

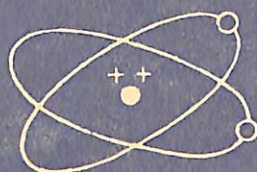
№ 263

3-1

К. Н. Елизаров

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О СТРОЕНИИ АТОМА

*в курсе физики
средней школы*



учпедгиз • 1953

К. Н. ЕЛИЗАРОВ

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ
О СТРОЕНИИ АТОМА
В КУРСЕ ФИЗИКИ
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

*ИЗ ОПЫТА УЧИТЕЛЯ ФИЗИКИ
209-й СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ ЛЕНИНГРАДА*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние десятилетия физика претерпела существеннейшие изменения; развитие ее идет чрезвычайно бурными темпами. Классическая физика рассматривала пространство как некое вместилище, как арену, на которой разыгрывались те или иные физические явления; постулировала неразрушимость атома; признавала универсальность закона всемирного тяготения, объясняя с точки зрения этого закона взаимодействие любых тел и частичек, утверждала положение о неизменности массы каждого данного тела. На этих основах классическая физика оказалась не в состоянии объяснить ряд открытых, новых для науки фактов и явлений, количество которых, начиная с конца XIX в., стало чрезвычайно быстро расти. Законы классической физики оказались неприменимыми к микромиру. В связи с этим возникала новая физика, качественно отличная от классической, с новыми основами, новыми представлениями и теориями.

Курс физики в средней школе, являющийся курсом классической физики, в наши годы оказывается уже недостаточным, не отвечает задачам подготовки учащихся к практической деятельности в настоящее время. Курс физики в средней школе, дающий основы классической физики, должен включать в себя и основы современной физики. Школа не должна отставать от жизни. Включение элементов современной физики необходимо не только с точки зрения общеобразовательной, но и воспитательной. Вопросы, рассматриваемые современной физикой, чрезвычайно важны в методологическом отношении; при правильном их изложении они должны содействовать выработке у учащихся научного мышления и мировоззрения.

К числу элементов современной физики, которые должны быть освещены в средней школе, надо в первую очередь отнести основы атомной и ядерной физики.

Ознакомление учащихся с этими вопросами предусмотрено программой Министерства просвещения¹ в теме „Строение атома“.

Программа Министерства просвещения определяет только круг тех вопросов, которые охватываются данной темой. Первая задача методики преподавания физики состоит в определении объема и глубины материала темы, исходя из указанной программы. Естественно, что решения этой задачи могут быть несколько различными. В связи с тем, что рассматриваемая тема для школы является относительно новой, указанную задачу в настоящее время нельзя еще считать решенной, да и таких попыток решить ее было еще очень немного.

Одной из первых попыток в этом направлении является изложение главы „Строение атома“ в учебнике физики для средней школы Г. И. Фалеева и А. В. Перышкина, изданного в тридцатых годах.² В свое время сведения, имеющиеся в этой главе, были ценными и полезными, в настоящее же время, в связи с чрезвычайно быстрым развитием науки, устарели и явно недостаточны, так как строение ядра атома в учебнике не рассматривается. В последующие годы элементы атомной физики в учебники средней школы не включались, так как их не было и в программе.

В учебнике физики И. И. Соколова³ глава „Строение атома“ появилась в издании 1950 г. В несколько более расширенном виде она имеет место в изданиях этого учебника в 1951 и 1952 годах. Это первая попытка определить объем и глубину материала темы после появления ее в программе по физике для средней школы. Глава небольшая (34 стр.), в ней много полезного и ценного, но она не может считаться полным рассмотрением рассматриваемого вопроса. Более подробно рассматри-

¹ См.: Программа средней школы. Физика. Астрономия. Учпедгиз, 1952.

² Г. И. Фалеев и А. В. Перышкин. Курс физики. Ч. 3, Учпедгиз, 1936.

³ И. И. Соколов. Курс физики. Ч. 3, Учпедгиз, 1950, 1951, 1952.

вается строение атома в учебнике физики под редакцией академика Г. С. Ландсберга.¹

Материал в этом учебнике недостаточно согласован с программой Министерства просвещения. Некоторые вопросы рассматриваются излишне подробно, если иметь в виду время, отводимое под изучение темы (например, траектории частиц в магнитном поле, зависимость энергии электрона от радиуса орбиты, способы вычисления массы и скорости частиц, ускорители частиц и др.), с другой стороны — некоторые вопросы вовсе не затронуты. Энергия связи ядра и некоторые другие вопросы, способствующие созданию у учащихся общих представлений о „происхождении“ ядерной энергии и способах ее выделения, имеют чрезвычайно большое научное и мировоззренческое значение и поэтому не должны быть опущены.

Также бедна пока что и методическая литература по изучению в школе строения атома. В книге П. А. Знаменского² „Методика преподавания физики“ интересующей нас теме посвящено буквально несколько строк, так же как и в методике И. И. Соколова;³ объем и содержание материала темы не определяются ни в одном из двух названных пособий.

Более серьезную попытку определить объем и содержание рассматриваемой нами темы можно обнаружить в следующих статьях журнала „Физика в школе“: В. Ф. Юськович „Опыт изучения темы „Строение атома“, 1951 г., № 1, Е. М. Шифнер „Из опыта изучения темы „Строение атома в X классе“, Л. И. Резников „Задачи по теме „Строение атома“, 1951 г., № 2, К. Н. Елизаров „Строение атома“, 1949 г., № 2 и в сборнике „Из опыта учебно-воспитательной работы учителей физики“ под редакцией Л. И. Резникова и Э. Е. Эвенчик, издательство АПН РСФСР, 1951 г.

Общий недостаток этих статей — их конспективность. Как правило, они содержат план уроков по теме, включающей перечень вопросов, подлежащих изучению, по

¹ Элементарный учебник физики, под ред. акад. Г. С. Ландсберга. Ч. 3, ГИТТЛ, 1952.

² П. А. Знаменский. Методика преподавания физики в средней школе. Учпедгиз, 1947.

³ И. И. Соколов. Методика преподавания физики в средней школе. Учпедгиз, 1951.

которому нет возможности достаточно полно судить об объеме и глубине материала.

Значительно подробнее сделаны указания по этому поводу в книжке: Л. И. Резников и В. Ф. Юськович „Изучение раздела „Строение атома“ в школьном курсе физики“.¹ Эта книжка — единственное пособие типа методической разработки темы, к сожалению, неполной и краткой.

Сделанный краткий анализ учебной и методической литературы по строению атома приводит нас к выводу о том, что вопрос об объеме и глубине материала по теме „Строение атома“ в настоящее время не может еще считаться решенным и что нужно дальнейшее обобщение опыта работы учителей в этой области, в поисках наиболее удачного решения этих вопросов. По-видимому, в этом одна из причин, вызывающих у многих учителей физики большие затруднения при прохождении этой темы и заставляющих их настойчиво требовать издания по ней методических пособий.

Не может еще считаться решенной также и другая не менее важная методическая задача, а именно: каковы возможные системы построения материала по этой теме. И тут возможны различные решения этого вопроса, отличные от предложенного в учебнике. Необходимо определить, в какой последовательности следует дать учащимся X класса материал, учитывая уровень их знаний по физике и уровень их развития.

Вместе с тем система построения материала должна определяться в строгом соответствии с объемом, содержанием и системой построения всего предыдущего курса физики, который учащиеся изучали до этого.

Довольно многочисленная популярная литература о строении атома, преследующая совершенно иные цели, рассчитанная не на учащихся X класса, а на совершенно иного читателя, не решает этого вопроса. По этой же причине непригодными оказываются и учебники для высшей школы. Нужно методически обосновать систему расположения материала этой темы на уроках в средней школе.

Кроме того, рассматривая строение атома, мы имеем дело с вопросами, имеющими большое мировоззренче-

ское значение. Эти вопросы в существующей популярной учебной и методической литературе часто оказываются изложенными недостаточно четко, сбивчиво, ошибочно. А между тем, эти неясности и ошибки приводят к чрезвычайно вредным последствиям. (Например, к утверждению о переходе массы в энергию или о том, что свет есть энергия или кванты есть порции энергии и др.) Надо помочь учителю физики избежать этих очень распространенных ошибок и правильно осознать основные законы микромира.

Не меньшие трудности встречает преподаватель и в вопросе о том, как надо вести изложение данной темы, какие методические приемы следует использовать, чтобы добиться нужных результатов.

По тем же причинам (новая тема, отсутствие опыта) затруднительно для учителя и планирование материала темы во времени.

Настоящая книга содержит изложение минимума тех знаний об атоме, которыми должен, безусловно, располагать учитель физики для правильного освещения на уроке программных вопросов о строении атома. В приведенном в книге материале выделен тот, который должен быть дан учащимся в соответствии с программой Министерства просвещения. Вместе с тем предложен возможный вариант распределения учебного материала во времени.

Разумеется, что ряд вопросов, освещенных в настоящей книге, может быть использован учителем физики во внеклассной работе с учащимися. В книге приведены методические указания о том, как следует излагать некоторые наиболее существенные вопросы. Эти указания даны после соответствующих параграфов, а не в тексте, так как в этом случае несколько пострадала бы четкость изложения.

В области темы „Строение атома“ физика соприкасается с химией. И программа и учебник по химии имеют в виду весьма общие представления об электронной оболочке атома и, по существу, совершенно не затрагивают строения его ядра и вопросов, связанных с ним (как, например, расщепление ядра, энергия его).

В курсе химии учащимся даются самые общие представления об основах атомной физики, основы же ядерной физики не включаются совершенно. Такое положение

¹ Изд. АПН РСФСР, М., 1952.

вещей надо считать правильным, так как естественным следует считать отнесение основ атомной и, во всяком случае, ядерной физики к курсу физики, а не химии.

При определении объема учебного материала по теме „Строение атома“ в курсе физики это обстоятельство было нами учтено.

Построение материала по теме определено стремлением использовать методологическую ценность его и изложить современное положение вопроса в какой-то мере обоснованно. В соответствии с этим изложение дано в историческом аспекте, что позволяет логично и последовательно нарисовать картину развития наших представлений о строении атома и его ядра и одновременно весьма ярко и убедительно показать неприменимость законов классической физики к микромиру и связанное с этим развитие современных теорий. Поэтому тема начинается главой I „Развитие учения о строении атома“.

Понятие о световых квантах (фотонах) программой отнесено к предыдущей теме „Излучение“. Дать это понятие в нужном размере при изучении явлений фотоэффекта трудно, так как учащиеся еще не знакомы со строением атома и энергетическими уровнями его. То же самое надо сказать и о вопросе „Свет как волновой и квантовый процесс“ из программной темы „Излучение“. Целесообразно в теме „Излучение“ остановиться на понятии о световых квантах и на вопросе о свете как о волновом и корпускулярном процессе в общих чертах, отнеся более подробное освещение этих вопросов к той части темы „Строение атома“, в которой идет речь о развитии современных физических теорий. Это обстоятельство так же нашло свое отражение в настоящей работе.

Один из основных принципов педагогики — наглядность в преподавании — остается в силе при изучении и этой темы. Приборы, которые нужны для прохождения темы, немногочисленны. К ним прежде всего надо отнести спинтарископ и действующую модель камеры Вильсона. Особенно важно ознакомить учащихся с камерой Вильсона, которая даст им представление о том, как не только могут обнаруживаться те или иные частицы, но и как могут быть определены их основные характеристики. В методическом отношении

желательно широко использовать (в проекции) фотографии частиц в камере Вильсона. По этим соображениям в книге приведен довольно большой подбор таких фотографий. Для проекции могут быть использованы фотографии установок. И, наконец, при изучении темы понадобятся чертежи (схемы строения атома, чертежи приборов). С этой целью могут быть спроектированы на экран чертежи приборов и установок, имеющиеся в этой книге. Целесообразно и удобно (см. методические указания после § 3) пользоваться заранее подготовленными стенными чертежами.

По причинам, указанным нами выше (стр. 8), многие учителя физики сокращают время, отводимое на „Излучение“, на столько же увеличивая время на тему „Строение атома“, что значительно облегчает прохождение этой темы, а иногда дает возможность и несколько расширить учебный материал в области некоторых вопросов (например, ускорители частиц, урановый котел, атомная бомба и др.).

В учебном плане темы указываются: а) основные вопросы, подлежащие изучению, б) параграфы настоящей книги, в которых они изложены, в) количество часов (уроков), отводимых для их изучения.

В некоторых случаях материал параграфов берется не полностью, а частично. Необходимые сокращения приведены в „Методических указаниях“ после соответствующих параграфов.

В конце книги дан список основной литературы для учителя и подобраны некоторые данные и константы, которые могут понадобиться при изложении темы. Значения констант в приложениях даны с большей степенью точности, чем в тексте, где они в разумных пределах округлены при расчетах, какие могут быть использованы в классе.

УЧЕБНЫЙ ПЛАН ТЕМЫ (6 часов учебного времени).

I. Элементы развития учения о строении атома

Ядерная модель атома Резерфорда. Понятие
о световом кванте. Атом Бора (§ 2, 3, часть § 4,
§ 6 и 7) 2 часа

II. Электронная оболочка атома

Периодическая система элементов и строение
атома. Строение электронной оболочки. Проис-
хождение спектров испускания (§ 16—19) . . . 1 час

III. Строение ядра атома

Радиоактивность. Расщепление ядер. Протон
(§ 20—23, 28) 1 час

Открытие нейтрона. Строение ядер атомов
химических элементов. Искусственная радио-
активность (§ 29, 30, 32) 1 час

Энергия ядра. Ядерные реакции. Освобожде-
ние энергии ядра. Цепная реакция. Элементар-
ные частицы (пункт 3-й § 35, § 37, 43, 45) . . . 1 час

ГЛАВА I

РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О СТРОЕНИИ АТОМА

§ 1. Первые представления о строении вещества

Более 2500 лет назад греческий философ Левкипп высказал гениальное предположение о том, что все вещества состоят из мельчайших частичек — атомов.

Аристотель (384—322 гг. до н. э.), другой греческий философ утверждал, что в природе нет пустоты, и учил о непрерывности материи. Это учение Аристотеля господствовало примерно до XVII столетия, в котором атомистические представления вновь возродились. Атомные представления о строении вещества горячо отстаивал гениальный русский ученый М. В. Ломоносов (1711—1765 гг.). Он же в 1756 г. впервые сформулировал закон сохранения массы вещества, который впоследствии (через 30 лет) был подтвержден французским химиком Лавуазье. Химия со времен М. В. Ломоносова и затем Дальтона стала опираться на атомную теорию. В самом деле: основной химический закон — закон постоянства состава и кратных отношений — объяснялся очень легко, если считать, что молекулы всех сложных веществ состоят из мельчайших неделимых частиц — атомов химических элементов, отличных друг от друга; причем „сортов“ атомов существует столько, сколько имеется в природе химических элементов.

Так было установлено понятие о химических элементах. Донаучный период в развитии химии (средние века) называется алхимическим. Алхимики искали так называемый „философский камень“ — вещество, которое, по их предположениям, могло обращать другие вещества в золото. Поиски „философского камня“, как

ненаучные, химией были отброшены и в основу ее было положено учение о неизменности химических элементов.

Еще в XVIII в. наш соотечественник М. В. Ломоносов в своих трудах „Размышления о причине теплоты и холода“ и „Опыт теории упругой силы воздуха“ дал основы кинетической теории тепла и кинетической теории газов. Молекулярно-кинетическая теория, оформившаяся к середине XIX в., подтверждалась экспериментальными данными. Справедливость же этой теории свидетельствовала, в свою очередь, о реальности существования атомов и молекул. Больше того, молекулярно-кинетическая теория дала возможность узнать многое о молекулах, несмотря на то, что видеть их не представлялось возможным. Так, например, оказалось возможным вычислить размеры молекул газов, среднюю скорость их движения, число соударений в секунду, количество молекул в единице объема и т. д. Вопрос же о строении самого атома оставался нерешенным. Атом до конца XIX в. попрежнему считали неделимым и рассматривали как некий упругий шарик.

§ 2. Открытие электрона. Первые научные теории строения атома

Наиболее гениальные представители науки (например, Д. И. Менделеев) уже в XIX в. ставили вопрос о строении атома, но первые научные теории строения атома относятся к самому началу XX в. В основе этих теорий лежала идея об „электрическом“ строении атома. Идея эта возникла в связи с тем, что ряд явлений, известных физикам, с несомненностью свидетельствовал о том, что атомам присущи электрические заряды: электризация соприкосновением, электризация металлов при калении, перенос зарядов ионами при электролизе, катодные и анодные лучи, радиоактивность. Электрон был открыт в самом конце XIX в. в связи с изучением катодных лучей английским физиком Дж. Дж. Томсоном в 1897—1898 гг. Исследования показали, что катодные лучи представляют собою поток частиц, заряженных отрицательно, летящих с огромными скоростями, достигающими до 150 000 км/сек. (Скорость их зависит от напряжения, приложенного к электродам трубки с разреженным газом.) Масса этих частиц оказалась примерно в 1840 раз меньше массы атома водорода, а отрицательный заряд —

равным $4,8 \cdot 10^{-10}$ абс. эл. ст. единиц заряда. Было установлено, что ни масса частиц, ни величина их заряда не зависят ни от рода газа в трубке, ни от вещества электродов в трубке, из которых частицы выбиваются. Эти частицы получили название электронов. По современным представлениям заряд электрона есть наименьший электрический заряд, какой существует в природе. Любой заряд, с которым мы имеем дело, или равен (по абсолютному значению) заряду электрона, или в целое число раз больше заряда электрона.

В катодных трубках электроны выбиваются положительными ионами из катода, который может быть сделан из различных веществ. Могут быть получены электроны и разнообразными другими способами: при накаливании металлов из них вылетают электроны (термоэлектроны), при падении света (с длиной волны не больше некоторой предельной) на металл из него тоже вылетают электроны (фотоэлектроны). Оказалось, что электроны, полученные из самых разнообразных веществ, совершенно одинаковы. Стало ясным, что, во-первых, электроны входят в состав атомов всех элементов и, во-вторых, что атомы всех элементов — сложные образования.

Так как атомы веществ в „обычном“ состоянии электрически нейтральны, то, следовательно, в атомах имеются и положительные заряды, по абсолютному значению равные заряду электронов.

В соответствии со сказанным, одна из первых теорий строения атома (Кельвин, 1902 г.) в общих чертах сводилась к следующему.

Атом представляет собою шарик. Положительный заряд его равномерно распределен по всему объему этого шарика. Электроны неподвижны относительно атома и находятся также внутри атома. Общий отрицательный заряд электронов равен положительному заряду атома. Электроны притягиваются к центру атома и вместе с тем отталкиваются друг от друга. Как показывают расчеты, если в атоме находится несколько электронов, то они должны располагаться вокруг центра атома, находясь на равных от него расстояниях. Если электронов много, то тогда они должны размещаться вокруг ядра концентрическими слоями. Опыт подтверждает эти расчеты.

В дальнейшем эта модель атома претерпела изменения. Дж. Томсоном было сделано предположение о том, что электроны в атоме движутся, а не неподвижны. Но и в этом случае положительный заряд считался распределенным по всему атому.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал первых двух параграфов может быть расширен и использован для внеклассной работы. При 6-часовом варианте плана темы полезно сказать учащимся о том, что в основе химии лежало утверждение о неизменности и непревращаемости химических элементов, но достижения современной науки изменили эти представления.

Дальше полезно указать, что первые научные теории строения атома появились в начале XX в. По этим теориям ученые представляли себе атом как некий шарик, положительный и отрицательный заряд которого равномерно распределены по всему атому.

Разумеется, что для того, чтобы появление в науке идеи об „Электрическом“ строении атома не показалось бы совершенно неожиданным для учащихся, обоснование этому факту, приведенное в тексте на стр. 12, надо сохранить.

Такое освещение этих вопросов (хотя бы в объеме не большем, чем приведенный здесь) вызывает у учащихся интерес, создает у них правильное представление о путях развития физики и будет соответствовать системе построения всего последующего материала.

§ 3. Ядерная модель атома. Атом Резерфорда

В 1911 г. английским ученым Резерфордом была разработана новая теория атома, принципиально отличная от предыдущих. Резерфорд ставил опыты по прохождению α -частиц в воздухе и в других газах. α -частица представляет собою дважды ионизированный атом гелия, иными словами — положительный ион гелия (атом гелия, лишенный своих двух электронов). α -частицы испускаются радиоактивными элементами. Разумеется, что α -частицы, так же как и атомы и молекулы, мы не видим не только невооруженным глазом, но и при помощи микроскопа. Однако если α -частицы летят

в газе, пересыщенном водяными парами, то они ионизируют атомы газа, встречающиеся на их пути. Ионизированные атомы газа становятся центрами конденсации пара, вследствие чего летящая в газе α -частица оставляет за собой след в виде тонкой полоски тумана. Эта полоска видна невооруженным глазом и может быть сфотографирована. Таким образом возможно обнаружить траекторию движения α -частицы. (На этом приеме, дающем возможность проследить за полетом заряженных частиц, невидимых глазом, в дальнейшем мы остановимся подробнее.)

Резерфорд наблюдал полет α -частиц в газах, а также прохождение их через тонкие (толщиной в сотые доли миллиметра) металлические пластинки. Результаты этих опытов оказались поразительными: большинство α -частиц, встречающихся на своем пути десятки тысяч атомов газа или металла, пролетали в газе или в металле как в пустоте, и только отдельные из них резко меняли направление своего движения (рис. 1).

На рис. 1 ясно видим следы полета двух групп частиц: одна группа частиц — более быстрых, другая группа частиц — с менее длинным пробегом (более медленных). Это фотографический снимок, на котором мы видим следы полета частиц, а не самые летящие частицы. Следует сказать, что очень часто о таких фотографиях для краткости условно говорят, что это „фотографии α -частиц“. Условность этого выражения надо постоянно иметь в виду.

Из рис. 1 видно, что α -частицы движутся прямолинейно, как будто ничто не мешает их движению, а на самом деле они встречают на своем пути огромное количество атомов того вещества, в котором они

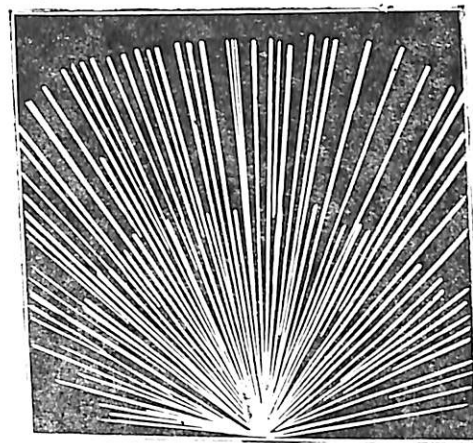


Рис. 1. Пути α -частиц. Траектории прямолинейны.

двигаются. Однако на других снимках было обнаружено, что отдельные α -частицы в силу какой-то причины резко изменяют направление своего движения (рис. 2 и 3).

Траектория движения α -частиц свидетельствует о немеханическом характере „столкновений“ их с атомами. Здесь нет „удара“, а есть поворот их под влиянием постепенно возрастающего отталкивания. (Подробнее об этом см. в § 4.)

Но α -частица заряжена положительно, значит отталкивать ее может только часть атома, заряженная тоже

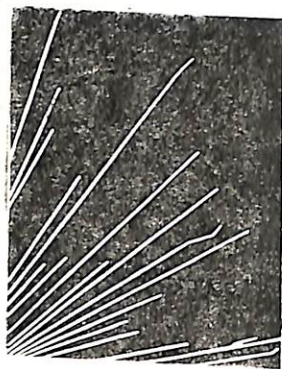


Рис. 2.

Излом траекторий α -частиц при соударении их с ядрами атомов.



Рис. 3.

положительно. Но так как масса электронов очень невелика по сравнению с массой атома, то эта положительно заряженная часть атома, очевидно, относительно массивная.

В соответствии с этим Резерфорд сделал следующие выводы:

1) атом не является сплошным; сквозь него легко проходят α -частицы;

2) в составе атома есть массивная часть, заряженная положительно, непроницаемая для α -частиц.

Так впервые была экспериментально установлена прерывность в строении атома, наличие в нем массивной части. В связи с этим структура атома представлялась в следующем виде.

В центре атома находится массивное ядро, в котором сосредоточен весь положительный заряд и почти вся масса атома. Вокруг ядра атома движутся электроны, общий отрицательный заряд которых по абсолютному значению равен положительному заряду ядра, поэтому атом в целом нейтрален. Пространство между ядром атома и его электронами не заполнено никакими частицами. Электроны находятся в движении и поэтому не падают на ядро атома, несмотря на то, что между ними и положительно заряженным ядром атома существуют кулоновские силы притяжения.

Таким образом, с точки зрения этой теории, структура строения атомов всех химических элементов одинакова. Перед наукой встал вопрос о том, как объяснить резкое различие в свойствах элементов, несмотря на общность в структуре атомов. Дальше мы увидим, как эта задача, а также и ряд других, связанных со строением атома, были разрешены физикой.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Заметим, что приведенная выше модель атома наталкивает нас на мысль о сходстве ее с нашей солнечной планетной системой. Но вместе с тем нетрудно видеть, что в строении атома и планетной системы имеются существенные различия: 1) массы планет различны, электроны же всех атомов тождественны; 2) планеты притягивают друг друга, а электроны отталкиваются. Поэтому внутренние планеты солнечной системы притягивают внешние планеты, а внутренние электроны отталкивают внешние электроны, ослабляя их связь с ядром атома. Эти соображения надо иметь в виду при использовании аналогии между строением атома и планетной системы. Кроме того, полезно обратить внимание на чрезвычайную устойчивость атома, проявляющуюся в постоянстве свойств химических элементов, хотя он может подвергаться самым разнообразным внешним воздействиям.

При изложении материала § 3 учитель должен показать фотографии α -частиц в камере Вильсона. Такая потребность встретится и в дальнейшем. Для этого можно спроектировать на экран фотографии, имеющиеся в данной книге. Еще лучше заранее изго-

товить (в продаже их пока нет) нужные диапозитивы. Для человека, занимающегося фотографией, это нетрудно. И в этом случае можно использовать приведенные в настоящей работе фотографии. Что же касается чертежей и схем, кроме фотографий, которые мы приводим, то и их можно спроектировать, но более целесообразно их также изготовить заранее, но не в виде диапозитивов, а в виде стенных чертежей на листах чертежной бумаги. Пользоваться чертежами удобнее, чем диапозитивами: не надо затемнять класс, можно пользоваться чертежами на протяжении всего урока. При изготовлении чертежей надо избегать очень распространенного недостатка, состоящего в том, что чертежи делаются очень мелкими, линии проводятся настолько тонкие, что они с трудом видны только впереди сидящим учащимся. Чертеж должен быть размером в лист чертежной бумаги, самые тонкие линии должны быть не уже 3—4 мм. При соблюдении этих условий и при достаточно тщательном выполнении чертежа он будет виден учащимся лучше, чем проекция. Фотографии же, сделанные с частиц в камере Вильсона, лучше иметь именно в виде диапозитивов, так как чертеж, с них сделанный, не так убедителен для учащихся, как фотография, которая более полно изображает описываемую учителем картину.

§ 4. Размеры атома и его частей

Молекулярно-кинетическая теория дала возможность определить, что диаметр атомов — порядка 10^{-8} см. Резерфорд на основании многочисленных опытов установил формулы, позволяющие вычислить заряд ядра и его диаметр. Размеры ядер атомов химических элементов несколько различны; в среднем их диаметр оказался порядка 10^{-13} см, т. е. примерно в 100 000 раз меньше диаметра атома. Как известно, масса электрона (а электроны в атомах всех веществ одинаковы) приблизительно в 1840 раз меньше массы ядра атома водорода. Таким образом, масса атома почти полностью сосредоточена в его ядре. Становится понятным, почему большинство α -частиц в упомянутых выше опытах легко проходило сквозь различные вещества. Альфа-частица представляет собою частицу довольно массивную. Масса

ее примерно в 4 раза больше массы атома водорода. Проходя сквозь атом того или иного газа или другого вещества, α -частицы преимущественно наталкиваются на электроны, масса которых примерно в 7300 раз меньше массы α -частицы. Эти столкновения α -частиц с электронами не изменяют сколько-нибудь заметно траектории движения частицы, но в конце концов затормаживают ее движение. Поэтому проникающая способность α -частиц конечна и относительно невелика, так как количество встречаемых атомов на их пути огромно. Установлено, что α -частицы задерживаются слоем воздуха при нормальном давлении толщиной около 7—10 см. Вследствие того, что ядра атомов очень малы по сравнению с размерами самого атома, только очень немногие α -частицы наталкиваются на ядра атомов и в результате этого столкновения резко меняют направление своего движения. Не надо думать, что речь идет о столкновении в буквальном смысле этого слова. Ядро атома и α -частица одноименно заряжены. Поэтому, когда расстояние между летящей α -частицей и ядром постепенно уменьшается, силы отталкивания между ними возрастают, вследствие чего, еще не дойдя до ядра атома, α -частица останавливается, а затем отбрасывается в прямо противоположном направлении. Это происходит с частицами, летящими прямо по направлению к ядру. Пролетающие же около ядра частицы теми же силами отбрасываются в сторону, так что траектория движения их искривляется. Воображаемая картина рассеяния α -частиц, полученная путем расчетов в предположении, что закон Кулона применим и в случае очень малых расстояний, показана на рис. 4.

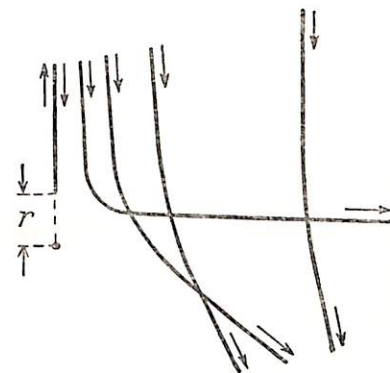


Рис. 4. Схема траекторий α -частиц, пролетающих вблизи атомного ядра.

Кружком условно обозначено ядро атома

Поэтому, когда расстояние между летящей α -частицей и ядром постепенно уменьшается, силы отталкивания между ними возрастают, вследствие чего, еще не дойдя до ядра атома, α -частица останавливается, а затем отбрасывается в прямо противоположном направлении. Это происходит с частицами, летящими прямо по направлению к ядру. Пролетающие же около ядра частицы теми же силами отбрасываются в сторону, так что траектория движения их искривляется. Воображаемая картина рассеяния α -частиц, полученная путем расчетов в предположении, что закон Кулона применим и в случае очень малых расстояний, показана на рис. 4.

Следует иметь в виду, что силы взаимодействия между α -частицей и ядром становятся более или менее

*

значительными тогда, когда α -частица пролетает в непосредственной близости от ядра. В остальных случаях электрические силы почти совершенно не сказываются на траектории α -частицы, движущейся с очень большой скоростью (см. траекторию наиболее удаленной от ядра частицы на рис. 4).

О размерах атома и о соотношении между размерами ядра и самого атома можно судить по таким примерам.

Чтобы атом стал равен ореху, надо было бы увеличить его во столько же раз, во сколько надо увеличить размер самого ореха, чтобы он стал равен земному шару. Если диаметр ядра атома водорода увеличить до 1 мм, то атом при таком же увеличении имел бы диаметр 100 м. Подсчеты показывают, что сумма объема ядер атомов и объема электронов в 1 м³ платины (а 1 м³ платины весит приблизительно 21 тонну) составляет всего 1 мм³. Остальная часть объема 1 м³, т. е. $(10^9 - 1)$ мм³ есть промежутки между ядрами атомов и электронами. Вещество оказалось прерывного строения. Этот расчет чрезвычайно поучителен. В самом деле, какой огромной была бы плотность того или иного вещества, если бы оно состояло из ядер атомов, лишенных электронов и сложенных вместе. Есть ли в природе вещества, плотность которых была бы значительно больше плотности веществ, имеющих на Земле? Оказывается, что есть. С такими веществами столкнулись астрономы, изучая так называемые „карликовые звезды“ — звезды относительно небольшого размера, но огромной массы. Огромная звезда Сириус имеет в качестве спутника такую карликовую звезду. Вычисляя влияние этого спутника на движение Сириуса, ученые установили, что плотность вещества спутника Сириуса равна 50 000 г/см³. Очевидно, ядра атомов карликовых звезд лишены полностью или частично (благодаря чрезвычайно высокой температуре) электронных оболочек и ближе расположены друг к другу, чем в веществе с меньшей плотностью.

Как известно, атомы группируются в молекулы. Вследствие ничтожных размеров атомов и размеры молекул оказываются также чрезвычайно малыми. Так, например, подсчеты показывают, что если взять число кирпичей, равное числу молекул в 1 см³ газа при нормальных условиях ($27,1 \times 10^{18}$), и укладывать их по

поверхности всей суши земного шара, то их пришлось бы уложить слоем толщиной в 120 м.

Не менее разительные результаты дает следующий расчет.

Допустим, что мы могли бы каким-либо образом пометить молекулы воды, налитой в чайный стакан. Представим себе, что эта вода с мечеными молекулами вылита в океан и равномерно распределена в воде морей и рек Земли. Тогда оказалось бы, что в каждом стакане воды, взятой из любого океана, моря или реки, находилось бы примерно по 100 меченых молекул.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал этого параграфа полезен и интересен для учащихся и наряду с другими параграфами может быть использован во внеклассной работе. Для сообщения в классе целесообразно сохранить из этого параграфа материал о размерах атома и его ядра и обосновать прерывность строения вещества. Кроме того, могут быть использованы и некоторые из приведенных примеров, свидетельствующих о малых размерах атома.

ГЛАВА II

ПРОБЛЕМА СТРОЕНИЯ АТОМА И ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

§ 5. Затруднения классической физики

Сразу же, как только была создана Резерфордом новая атомная теория, оказалось, что ядерная модель атома страдает существеннейшим недостатком. С точки зрения классической электродинамики, электрон, движущийся вокруг ядра, создает переменное электромагнитное поле, распространяющееся в окружающем пространстве со скоростью света и несущее с собою энергию. В связи с тем, что электрон теряет энергию, он не смог бы удержаться на своей первоначальной орбите и стал бы все ближе и ближе подходить к ядру. Таким образом, радиус орбиты, по которой движется электрон, стал бы постепенно уменьшаться, а число оборотов электрона вокруг ядра за 1 сек. возрастать, так как сила притяжения между ядром и электроном изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. В итоге электрон в конце концов неизбежно упал бы на ядро, что означало бы разрушение атома, прекращение его существования. С другой стороны, в связи с изменением периода вращения электрона вокруг ядра должна была бы непрерывно изменяться и частота и длина волны его излучения. Следовательно, светящийся газ, состоящий из огромного количества излучающих атомов, должен был бы давать непрерывный спектр со всевозможными длинами волн. В действительности же известно, что светящийся газ дает спектр линейчатый. Таким образом, применение основных положений классической электродинамики

к атому приводило к явным противоречиям. Выводы теории не подтверждались опытными данными. Так как экспериментальные данные не вызывали никаких сомнений, то становилось ясным, что закономерности классической физики, установленные для макромира, оказались неприменимыми к микромиру. Очевидно, в области микромира существуют другие закономерности, и поэтому на микромир нельзя просто механически переносить законы макрофизики.

§ 6. Понятие о световом кванте

С точки зрения классической физики каждый источник света испускает свет непрерывным потоком. Такое представление не давало возможности объяснить многие оптические явления и, в частности, явление фотоэффекта.

Явление фотоэффекта состоит в том, что под действием света, падающего на металл, из металла вырываются электроны. Оказалось, что фотоэффект можно наблюдать, используя любой металл, но большинство из них чувствительно только к ультрафиолетовым лучам. Щелочные металлы (калий, натрий, цезий) чувствительны и к лучам видимого света. Явление фотоэффекта было исследовано русским ученым А. Г. Столетовым (1839—1896).

Схема установки А. Г. Столетова показана на рис. 5. Металлическая пластина *A* соединена с отрицательным полюсом батареи *B*. Металлическая сетка *B* через сопротивление *r* соединена с положительным полюсом батареи. В цепь включен гальванометр *G*. При освещении пластины *A* светом от электрической дуги в цепи возникал ток, обнаруживаемый гальванометром. Под действием света из металлической пластины *A* вырываются электроны, которые, находясь в электрическом

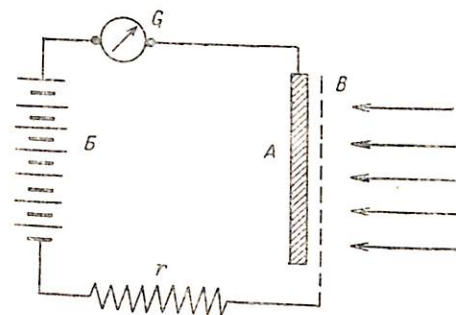


Рис. 5. Установка А. Г. Столетова по изучению фотоэффекта.

поле, переходят на металлическую сетку В. Возникающий в цепи ток получил название фотоэлектрического тока или фототока.

А. Г. Столетов установил, что сила фототока прямо пропорциональна световому потоку, падающему на металлическую пластинку (закон Столетова). Вскоре опытным путем были установлены и другие законы фототока. Было установлено, что энергия электрона, вырванного из металла, не зависит от силы света, а зависит только от частоты света. Вырывание электронов из металла начинается только с некоторой определенной для каждого металла частоты света; при меньшей частоте явления фотоэффекта не происходит. Непонятно было, почему световые лучи с различной длиной волны по-разному действуют на металл; почему энергия вырванного из металла электрона не зависит от силы света, но зависит от длины волны. Казалось бы, что при увеличении силы света увеличивается энергия, приносимая волнами, и поэтому должна бы возрасти энергия вырываемых электронов, а значит — и их скорость. На самом деле оказывается, что с уменьшением длины волны (с увеличением частоты) света энергия вырванных электронов возрастает. Также неясно было, почему явление фотоэффекта вызывается волнами, длина которых не больше некоторой определенной величины.

Объяснить законы фотоэффекта с точки зрения волновой теории оказалось невозможным. Эти затруднения были преодолены квантовой теорией света. В 1900 г. немецкий физик Планк разработал теорию, суть которой в самых общих чертах сводится к следующему.

Излучение и поглощение света¹ происходит не непрерывно, а отдельными, строго определенными порциями, называемыми „квантами“ (фотонами).² Величина энергии квантов различна для разных частот излучаемых волн. По теории квантов, энергия кванта прямо пропорциональна частоте излучения.

¹ Под светом здесь имеется в виду не только видимый свет, но и другие потоки фотонов, в частности, относящиеся к ультрафиолетовой, инфракрасной и другим частям спектра.

² Латинское *quantum* — количество; греческое *photos* — свет.

Если энергию кванта обозначить буквой ϵ , а частоту излучения ν , то указанная зависимость может быть выражена формулой:

$$\epsilon = h\nu.$$

В этой формуле коэффициент пропорциональности h есть постоянная для всех частот величина, называемая постоянной Планка. Численное значение ее в единицах CGS-системы равно $6,6242 \cdot 10^{-27}$ эл сек. Произведение энергии на время называется „действием“. Зная частоту излучения, можно вычислить энергию кванта. Так, например, энергия кванта фиолетового света равна $5 \cdot 10^{-12}$ эргов, красного — почти вдвое меньше.

Как же взаимодействует поток квантов с веществом?

Когда на вещество падает поток квантов (фотонов), то часть их может пройти через вещество без взаимодействия с его атомами, другая же часть может вступить во взаимодействие с ними. При этом взаимодействии с атомами фотоны обмениваются с ними энергией и количеством движения так же, как это происходило бы, если вместо фотонов были какие-либо другие частицы.

Таким образом фотоны сохраняют свое обособленное друг от друга существование и независимо друг от друга взаимодействуют с атомами вещества.

Теория квантов дала ответы на вопросы, связанные с явлением фотоэффекта, которые приведены в начале этого параграфа. Для вырывания электрона из атома нужна энергия. В соответствии со сказанным выше, тот или иной квант взаимодействует с электроном независимо от других квантов, так сказать, один на один.

Квант света, падая на металл, вырывает из него электрон. Энергия кванта $\epsilon = h\nu$ расходуется на работу по вырыванию электрона из атома и на сообщение электрону кинетической энергии:

$$h\nu = p + \frac{mv^2}{2}.$$

Если энергия кванта $h\nu$ меньше той, какая нужна для совершения работы p по вырыванию электрона из атома, то такая порция энергии не воспринимается электроном. Таким образом, электроны не обладают способностью „накапливать“ энергию отдельных квантов. Поэтому явления фотоэффекта в этом случае не наступит.

Отсюда очевидно, что вырывание фотоэлектронов может быть произведено только квантами, энергия которых не ниже некоторого предела. Этот предел энергии квантов соответствует определенной частоте, а значит, и длине волны света. Волны света большей длины (меньшей частоты) явления фотоэффекта не вызовут. Так как величина работы по вырыванию электрона для разных веществ различна, то поэтому для каждого вещества существует минимальная частота света, при которой возможен фотоэффект.

Вместе с тем понятно, что чем больше частота излучения падающего на поверхность металла, тем больше энергия квантов, а значит, и скорость вырываемых электронов.

С точки зрения квантовой теории света нетрудно ответить и на вопрос, почему энергия фотоэлектронов не зависит от силы света, но зависит от длины волны. Сила света источника сказывается на количестве квантов, испускаемых источником света в единицу времени, в то время как величина энергии квантов для каждой данной частоты света остается неизменной. Поэтому кванты света, обладающие одинаковой энергией, взаимодействуя с электронами независимо друг от друга, сообщают фотоэлектронам одинаковую энергию, независимо от того, сколько квантов участвует в явлении фотоэффекта. От количества квантов зависит количество вырываемых электронов, а не энергия каждого из них. Эта последняя зависит от величины энергии квантов, которая, в свою очередь, обусловлена частотой света.

Таким образом, квантовая теория дала возможность удовлетворительно объяснить явление фотоэффекта и его законы.

Оказалось возможным привести в согласие и ряд других явлений, объяснение которых было непосильно классической физике. Эта теория смогла преодолеть и затруднения, возникшие в связи с новой ядерной моделью атома.

§ 7. Теория Бора. Атом Бора

В 1913 г. датский физик Нильс Бор, используя понятие о световых квантах, развил новую теорию, которая вполне удовлетворительно объяснила и обосновала ядерную модель атома Резерфорда.

В основе теории Бора лежат три положения.

1. Электрон может двигаться вокруг ядра не по любым орбитам, а только по орбитам, имеющим определенный радиус. Эти орбиты называются стационарными (или разрешенными).

2. Когда электрон движется по любой стационарной орбите, то атом не испускает света.

3. Переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на орбиту, расположенную ближе к ядру, сопровождается испусканием света, а поглощение света атомом сопровождается переходом электрона с ближней орбиты на дальнюю.

В соответствии с этими основными положениями (постулатами) Бора строение атома водорода и явление испускания и поглощения им света представляются в следующем виде.

Положению электрона на каждой из возможных орбит соответствует определенный запас энергии атома, которая складывается из кинетической энергии движущегося электрона и из потенциальной энергии притяжения электрона и ядра. При нахождении электрона на ближайшей к ядру орбите атом обладает наименьшей энергией. Такое состояние атома, соответствующее минимальному запасу энергии, называют нормальным состоянием атома. Нахождение электрона на более удаленной орбите обуславливается большим запасом потенциальной энергии, а поэтому, естественно, что переход электрона на ту или иную дальнюю орбиту может быть совершён только за счет поступления энергии извне. Такой поступающей к атому энергией может быть энергия квантов, о которых говорилось выше. Чем больше величина энергии кванта, поглощенного атомом, тем на более удаленную орбиту переходит электрон. Атом при переходе электрона на новую, более удаленную орбиту будет обладать большей энергией, чем до этого перехода.

Такое состояние атома называют возбужденным состоянием. Переход атома в возбужденное состояние происходит под воздействием внешних факторов, сопровождающихся поглощением атомом энергии (например, при ударе о другой атом или молекулу, ударом электрона, действием света). Если подведенная атому энергия меньше той, какая нужна для перевода атома на

следующий энергетический уровень, то такая энергия атом не возбудит. Если же подведенная извне энергия будет равна или больше энергии, нужной для возбуждения атома, то атом перейдет на более высокий энергетический уровень.

Атом не остается в возбужденном состоянии: через малый промежуток времени (порядка 10^{-8} сек.) электрон срывается с новой орбиты и перескакивает на прежнюю орбиту сразу же или задерживаясь на промежуточных. Каждый переход электрона с дальней орбиты на ближнюю, ведущий к уменьшению энергии атома, сопровождается излучением в виде кванта. И в этом случае величина энергии кванта зависит от того, на какую из более близких к ядру орбит перескочит электрон с дальней орбиты. Частота излучения, в свою очередь, зависит от энергии кванта. Если разность энергий атома при положениях электрона на дальней и ближней орбитах обозначить ΔE , а частоту излучения через ν , то получим энергию излученного кванта

$$\Delta E = h\nu,$$

где h — известная нам постоянная Планка. Значения энергии атома, соответствующей положению электрона на той или иной орбите, называют уровнями энергии. Следовательно, ΔE есть разность уровней энергии атома.

Таким образом, излучение и поглощение света происходит порциями — квантами, что обусловлено тем, что уровни энергии атома имеют значения не непрерывные, а прерывные, соответствующие прерывному значению радиусов орбит электрона. Иными словами: уровни энергии атома и орбиты его электронов квантуются.

На рис. 6 схематично показаны возможные орбиты электрона в атоме водорода. Обычно орбиты обозначаются порядковыми номерами, начиная от первой орбиты, ближайшей к ядру. Радиус орбит электрона возрастает пропорционально n^2 , т. е. в отношении 1 : 4 : 9 и т. д. На рис. 6 стрелками, направленными к первой орбите, указаны возможные переходы электрона с удаленных орбит на более близкие к ядру. Линиями, идущими от первой орбиты, показаны возможные переходы электрона на более удаленные орбиты при возбуждении атома. Эти линии начинаются только с первой орбиты,

так как электрон в атоме водорода, находящемся в нормальном состоянии, пребывает на первой орбите. Полная энергия электрона, вращающегося вокруг ядра, тем больше, чем больше радиус орбиты. Кинетическая энергия электрона изменяется обратно пропорционально радиусу орбиты. Потенциальная же — возрастает с уве-

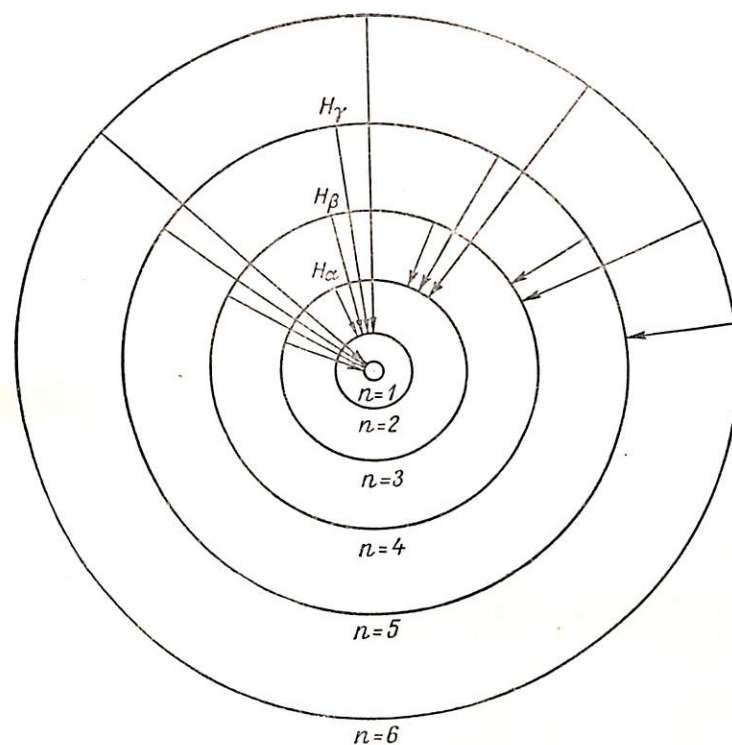


Рис. 6: Возможные орбиты электрона в атоме водорода.

личением радиуса орбиты, причем возрастает в большей степени, чем уменьшается кинетическая. В итоге полная энергия электрона увеличивается с увеличением радиуса орбиты.

Уровни энергии электрона, находящегося на разных орбитах в атоме водорода, схематически изображены на рис. 7. Верхняя горизонтальная прямая обозначает нулевой уровень энергии, соответствующий бесконечно удаленной орбите ($n = \infty$). Остальные горизонтальные

Линии проводятся так, что их расстояния от начальной линии в некотором произвольно выбранном масштабе равны соответствующим значениям энергии электрона. (Иногда масштаб не выдерживается.) Пунктирные стрелки показывают расстояния энергетических уровней от нулевого, сплошные — возможные переходы электрона с одного уровня на другой, соответствующие частоте

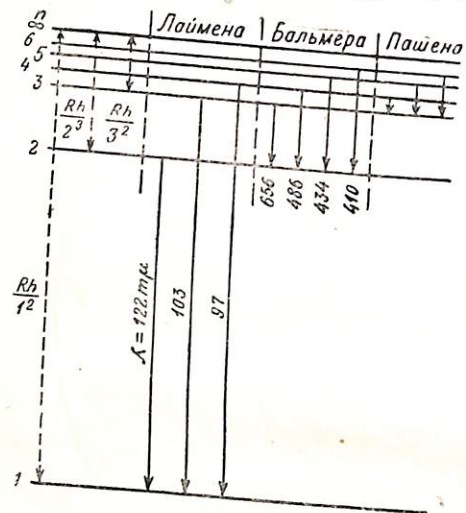


Рис. 7. Схема энергетических уровней электрона в атоме водорода.

Так как орбиты электрона в атоме водорода расположены закономерно, то поэтому атом водорода характеризуется определенным числом и расположением уровней энергии.

Следовательно, переход электрона в атоме водорода с одной орбиты на другую сопровождается испусканием квантов некоторых тоже определенных значений энергии. Возбуждение атомов водорода, находящегося в раскаленном состоянии, происходит в результате соударений атомов, а при электрическом разряде — в результате столкновений атомов с ионами или с электронами. Любое количество водорода представляет собою совокупность огромного количества атомов. Многие из них возбуждаются, затем (через очень малый промежуток времени, как об этом уже говорилось раньше)

возвращаются в нормальное состояние, а при следующем соударении с другими атомами (или ионами) снова возбуждаются и т. д.

В соответствии со сказанным выше, атомы водорода, переходя в нормальное состояние, испускают кванты, энергия которых имеет определенный „набор“ значений, каждому из которых соответствует определенная линия в спектре.

Поэтому в спектре водорода обнаруживается строго определенный „набор“ линий, присущий только спектру испускания водорода.

Спектральные линии (лежащие как в видимой, так и в невидимых глазом областях спектра) обычно сводятся в группы или, как их называют — серии линий. Переходы электронов с различных верхних уровней на один и тот же нижний дают серию. Серии спектральных линий, даваемых водородом, показаны на рис. 7.

Так же объясняется происхождение линейчатых спектров, даваемых более сложными атомами других химических элементов. Различие же в количестве и в сочетании линий в спектрах различных элементов обусловлено следующими причинами.

Радиусы орбит электронов в атомах различных химических элементов различны (они зависят от заряда ядра). Энергия же электрона, находящегося на той или иной орбите, зависит, как уже об этом было сказано, от радиуса орбиты и от величины заряда ядра.

Таким образом, атомы химических элементов отличаются друг от друга не только величиной заряда своих ядер и количеством электронов в их электронных оболочках, но и значениями энергии электронов на разрешенных орбитах. Иными словами: атом каждого элемента характеризуется определенным числом и расположением своих энергетических уровней. Поэтому каждый химический элемент и дает присущий только ему линейчатый спектр. Число и сложность серий спектральных линий, о которых было сказано применительно к водороду, для других химических элементов увеличивается, так как возрастает число электронов в атоме.

Переход атома с одного уровня на другой, очень близкий, сопровождается испусканием кванта очень небольшой энергии. Длина волны, соответствующей этой

энергии кванта, больше длины волны красного света. Излучение оказывается лежащим в инфракрасной части спектра. При переходе атома с очень высокого уровня на нижний может быть испущен квант с энергией, большей энергии кванта фиолетовых лучей. В этом случае длина волны будет меньше длины волны фиолетового света и излучение окажется в ультрафиолетовой части спектра.

Как видим, теория Бора удовлетворительно описывает структуру атома и, в соответствии с ней, процесс испускания и поглощения света, происхождение спектров, а также ряд других явлений. Но наряду с этим оказалось, что эта теория обладает рядом существеннейших недостатков, ограничивающих область ее применения, делающих ее недостаточной.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 5, 6 и 7 имеет особенно большое научное и мировоззренческое значение, поэтому преподавателю следует обратить на него внимание.

Особенно опасны в этом отношении возможные ошибки в толковании понятия о световом кванте и о свете вообще. Неправильные представления о свете, о квантах (фотонах) до сих пор чрезвычайно широко распространены и встречаются не только в устной речи, но и в популярной литературе, и в учебниках как для средней, так и для высшей школы. Известно, что свет представляет собою материю в одной из форм ее существования (см. § 15). В соответствии с этим свет обладает массой и энергией. Вопреки этому очень часто по установившейся издавна традиции свет называют энергией, что при современном состоянии науки явно ошибочно. С этой точки зрения привычное выражение „Атом, переходя из возбужденного состояния в нормальное, излучает энергию в виде квантов света“ — неверно, так как отсюда вытекает, что свет есть энергия. Не менее вредно определение и толкование кванта (фотона) как порции энергии; это ошибочно, так как нельзя отделять энергию от материи. С точки зрения современной физики, квант (фотон) — материальная частица, обладающая энергией и массой, но квант (фотон) не есть энергия, так же как он не есть масса. Квант

(фотон) есть порция света, обладающая массой и энергией. В соответствии с этим обычно употребляемое выражение „кванты (фотоны) лучистой энергии“ совсем неприемлемо, если это выражение употребляется не по отношению к порции энергии, которой обладает материальная частица, а по отношению к самой частице. К сожалению, именно в этом последнем смысле и употребляют очень часто термин „кванты лучистой энергии“, что ведет к отождествлению материи и энергии. Надо сказать, что современное состояние физики таково, что очень многие термины и привычные выражения не соответствуют тому содержанию, которое в них должно вкладываться. Например, количество магнетизма, электродвижущая сила, аннигиляция материи и многие другие. Как к ним относиться?

Наиболее полное и радикальное решение вопроса — замена всех неверных и неудачных терминов новыми. Очевидно, что в этом направлении нужен коллективный труд и общая договоренность. Необходимость последнего условия можно иллюстрировать таким примером.

В последнее время в литературе по физике можно обнаружить тенденцию называть фотоном материальную частицу с массой покоя, равной нулю, а квантом — порцию энергии, которой обладает частица. В подавляющем же большинстве случаев термины „квант“ и „фотон“ употребляются как синонимы. В итоге нужного эффекта от указанных попыток уточнить термины не получается. Некоторые термины и привычные выражения в настоящее время находятся в столь явном противоречии с положениями современной физики, что дальнейшее употребление их становится просто невозможным. Однако многие из терминов, с которыми мы сталкиваемся в данной книге, могут быть уточнены без замены их новыми, а от употребления других в ряде случаев можно просто воздержаться. Остальные же неудачные термины, которые могут быть ложно истолкованы (вроде — аннигиляции материи), должны быть разъяснены с точки зрения правильного содержания, которое в них должно вкладываться.

С учетом этих требований и изложен материал не только в § 5—7, о которых сейчас идет речь, но и весь остальной материал книги.

С точки зрения образовательной и воспитательной существенно обратить внимание учащихся на те затруднения, которые возникли при попытке объяснить явление фотоэффекта с помощью волновой теории света, и на то, как эти затруднения были преодолены квантовой теорией света. Для осознанного восприятия учащимися основ этой теории важно при изложении этого материала на уроке и при опросе учащихся подчеркнуть мысль о том, что кванты взаимодействуют с веществом независимо друг от друга, сохраняя свое обособленное существование. Чрезвычайно ценно указать учащимся, что учение о квантах резко изменило представление ученых о течении физических процессов. Раньше в физике господствовал взгляд на явления в природе как на процессы, развивающиеся плавно, непрерывно. В световых явлениях, а также в ряде других мы обнаруживаем скачкообразное течение процессов. (В связи с этим необходимо, излагая § 7, обратить особое внимание на квантование уровней энергии атома.)

Применительно к § 6 нужно учесть, что явление фотоэффекта учащимся уже известно. Эти их знания нужно использовать для создания представления о квантах света.

Дав учащимся формулу $E = h\nu$, пользуясь которой, можно вычислить энергию кванта, полезно дать и другую формулу:

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Переход к ней от первой формулы прост и доступен учащимся. Им известно, что $\nu = \frac{1}{T}$ и что $c = \frac{\lambda}{T}$. Отсюда

$$c = \lambda\nu, \text{ а } \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Поставив в формулу $E = h\nu$ вместо ν выражение $\frac{c}{\lambda}$, получаем $E = \frac{hc}{\lambda}$.

Опыт работы с учащимися X классов свидетельствует о том, что понимание происхождения линейчатых спектров встречается у них серьезные затруднения. Несомненно, что основными причинами затруднений являются следующие.

В литературе и в изложении материала учителем на уроке не всегда достаточно четко излагается вопрос о дискретном значении энергии атома. В этом — источник затруднений. Но еще более важно другое. Для того чтобы понять, почему каждый химический элемент обладает только ему присущим линейчатым спектром, важно усвоить: 1) что энергия электрона зависит от радиуса орбиты и от величины заряда ядра и 2) радиусы орбит электронных слоев в атомах различных химических элементов различны. Отсюда — число и расположение дискретных уровней энергии атомов различных элементов строго определены, но различны. Значит, и число и расположение спектральных линий в спектрах различных элементов тоже строго определено, но так же различно.

В учебной и в популярной литературе эти вопросы, как правило, не освещаются. Отсюда и возникают упомянутые затруднения у учащихся.

Эти соображения надо учесть при изложении § 7, а также при опросе учащихся по материалу этого параграфа.

В домашнее задание учащимся могут быть включены задачи № 1319—1321 (П. А. Знаменский и др. Сборник вопросов и задач по физике для 8—10 классов средней школы. Учпедгиз, 1949), а также задачи № 1—4 (Б. И. Резников и В. Ф. Юськович. Изучение раздела „Строение атома“ в школьном курсе физики. АПН РСФСР, 1952, стр. 31—33). При решении задачи

№ 4 учащимся понадобится формула $E = \frac{hc}{\lambda}$. Включать все указанные задачи в одно домашнее задание нецелесообразно. Как известно, мы, изучив с учащимися ту или иную тему, продолжаем решать задачи по ней и перейдя к следующей теме. Можно задавать учащимся по 2—3 задачи, а не все сразу. Такое решение вопроса не будет перегружать учащихся домашней работой и будет содействовать закреплению их знаний. Надо учесть, что задачи, приведенные в книге Л. И. Резникова и В. Ф. Юськовича, могут оказаться трудными для учащихся. Возможно, что нужно будет дать учащимся некоторые указания по решению их.

§ 8. Недостатки теории Бора

Модель атома Резерфорда противоречила положениям классической электродинамики. Когда какая-либо гипотеза не может быть обоснована и подтверждена наукой, то или она отвергается, или пересматриваются те положения, которым она противоречит. В этом случае экспериментальные данные, полученные Резерфордом и другими учеными в указанных выше опытах по рассеянию α -частиц, настолько обоснованно и убедительно свидетельствовали о наличии ядра в атоме, что отвергать его существование было невозможно. Бор показал, что положения классической электродинамики нельзя распространять на мир атома и, применив понятие о квантах, развивая дальше модель атома Резерфорда, создал новую теорию атома, частично покоившуюся на основах, чуждых классической физике.

Теория Бора ввела квантование орбит электронов в атоме и описала происхождение спектров, что бесспорно была сделать классическая физика. Но оказалось, что и эта теория страдает существенными недостатками.

1. Теория Бора, утверждая ядерную структуру атома Резерфорда, рассматривает движение электронов вокруг ядра как обычное механическое перемещение тел (частиц) в пространстве, т. е. с точки зрения классической механики. Но к этой классической механике были добавлены правила квантования, никак органически не связанные с нею. Кроме того, правила квантования были связаны с целыми числами, но по мере изучения спектров все чаще стали появляться целые числа с половинками. Правила квантования не были теоретически обоснованы, они были созданы как правила, объединяющие данные, полученные в результате опытов. В итоге теория Бора представляла собою не единую логичную теорию, а некоторое соединение классической механики с набором квантовых правил.

2. Теория Бора, описав строение атома водорода и происхождение спектра водорода, не могла разрешить этих вопросов по отношению к атомам более сложного строения.

Теория Бора удовлетворительно объясняла ряд явлений, в которых природа света представлялась кор-

пускулярной. Науке предстояло объяснить явления, связанные с волновыми свойствами света (например, интерференция света, поляризация, дифракция и др.).

Таким образом, появление и развитие теории Бора в учении об атоме характеризуется тем, что было установлено, что закономерности макромира не могут быть непосредственно применимы к микромиру, что в этом последнем существуют свои закономерности, качественно отличные от закономерностей классической физики, имеющей дело с явлениями в макромире. Кроме того, стало ясно, что необходимы не частичные коррективы и добавления к классической механике, а разработка новой широкой теории, разрешающей все затруднения и противоречия, теории, которая была бы применима к микромиру и объясняла бы строение атома и связанные с ним как корпускулярные, так и волновые свойства излучения.

Такой теорией была квантовая (волновая) механика.

§ 9. Квантовая (волновая) механика

Понятие о квантах зародилось в результате исследования и изучения световых явлений. Известно, что первой научной теорией, трактовавшей природу света, была так называемая корпускулярная теория света, разработанная Ньютоном. Она удовлетворительно объясняла известные в то время световые явления и была общепризнанной до начала XIX в. К этому времени в физике накопилось много данных, необъяснимых с точки зрения корпускулярной теории Ньютона. Основным „камнем преткновения“ для этой теории были явления интерференции и дифракции света. Трудом Юнга и Френеля была окончательно доработана и оформлена волновая теория света, созданная в своей основе Гюйгенсом. Эта теория вытеснила корпускулярную теорию. Уязвимым местом в волновой теории Гюйгенса, Юнга, Френеля было предположение о существовании в мировом пространстве особой среды — эфира, которое не было подтверждено экспериментальными данными. В дальнейшем теория Гюйгенса была вытеснена новой теорией света — электромагнитной. С точки зрения этой теории, свет представляет собою электромагнитные волны, а не волны, создаваемые механическими коле-

баниями гипотетического эфира. Поскольку электромагнитные волны есть не что иное, как распространяющееся электромагнитное поле, отпала необходимость предполагать существование какого-то особого „носителя“ волн. В наше время под волновой теорией и понимают именно эту электромагнитную теорию света. Но и эта теория, как мы уже видели, столкнулась с непреодолимым для нее затруднением в толковании явления фотоэффекта, строения атома и связанного с ним испускания и поглощения света. Эти затруднения в значительной мере преодолевались теорией квантов, появление которой относится к 1900 году.

С этого времени во взглядах на природу света и световые явления появилась ясно выраженная двойственность: такие явления, как распространение света, отражение его и преломление, интерференция, дифракция и некоторые другие, рассматривались с точки зрения волновой теории, явление же фотоэффекта, испускания и поглощения — с точки зрения квантовой теории. Физики вынуждены были считать, что свет вне атома ведет себя как волна, но как только он вступает во взаимодействие с веществом, что имеет место при излучении и поглощении света и в явлениях фотоэффекта, свет проявляет себя в виде квантов (фотонов).

Оказалось целесообразным рассматривать и процесс распространения света не с точки зрения волновой теории, а с точки зрения корпускулярной теории: свет должен рассматриваться не как волны, а как поток движущихся частиц — квантов (фотонов).

В соответствии с тем, что было сказано в § 6 и 7, фотоны обладают энергией, величина которой определяется формулой $\epsilon = h\nu$.

Кроме того, фотоны, будучи материальными частицами, должны обладать и массой, и количеством движения. Следовательно в этом отношении они подобны „обычным“ материальным частицам. Эти выводы подтверждались и экспериментальными данными, которые были получены еще раньше в результате опытов по измерению светового давления, блестяще поставленных выдающимся русским физиком П. Н. Лебедевым. Световое давление очень незначительно. Черная (поглощающая) поверхность, освещенная солнечными лучами, падающими на нее перпендикулярно, испытывает давле-

ние около $4 \cdot 10^{-8}$ грамма. Поэтому долгое время не удавалось обнаружить световое давление экспериментально. Основной частью прибора, которым пользовался П. Н. Лебедев, служило подвешенное на тонкой кварцевой нити легкое стеклянное коромысло с двумя легкими кружочками на концах (рис. 8). Это коромысло помещалось в сосуд, в котором создавался вакуум для того, чтобы токи воздуха, возникающие при нагревании кружков светом, не поворачивали коромысло. На один из кружочков направлялся свет от электрической дуги, собранный линзой. Свет давил на кружочек и, поворачивая коромысло на некоторый угол, закручивал кварцевую нить. Коромысло переставало поворачиваться, когда сила давления света оказывалась уравновешенной силой упругости деформированной нити. Угол поворота коромысла определялся по отклонению луча света, посылавшегося на зеркальце S . Зная угол поворота коромысла и упругость материала нити, можно определить величину силы, закрутившей нить. Эта сила и есть сила давления, производимого светом. П. Н. Лебедеву удалось измерить давление, производимое светом не только на твердые тела, но и на газы.

Световое давление, несмотря на свою небольшую величину, имеет очень большое значение в космических процессах. Им же объясняется образование кометных хвостов (состоящих из очень мелких и легких частиц), а также то обстоятельство, что кометные хвосты всегда направлены в сторону, противоположную Солнцу.

Световое давление свидетельствует о том, что свет (фотоны) обладает не только энергией (о чем говорилось выше), но и количеством движения и массой.

В самом деле: понятие о давлении связано с понятием о силе, а значит — с количеством движения ($Ft = mv$), а это последнее заставляет нас приписать фотону массу.

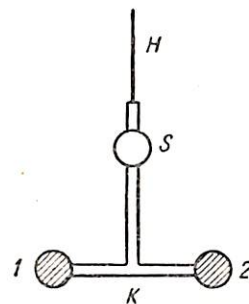


Рис. 8. Деталь прибора П. Н. Лебедева для определения светового давления.

Данные, полученные П. Н. Лебедевым в результате его опытов, позволяют вычислить количество движения и массу фотонов. П. Н. Лебедев установил, что сила давления света выражается следующей формулой:

$$F = \frac{W}{c},$$

где F — сила давления света; W — энергия, приносимая светом в 1 сек.; c — скорость света.

Энергия, приносимая светом в 1 сек., очевидно, равна всей приносимой энергии, деленной на время действия света.

Тогда получаем:

$$F = \frac{E}{ct},$$

где E — энергия света, а t — время его действия.

Из второго закона динамики известно, что сила давления, производимого каким-либо телом, измеряется изменением количества движения за единицу времени:

$$F = \frac{mv - mv_0}{t}$$

или

$$F = \frac{mv}{t},$$

если начальная скорость тела равна нулю.

Второй закон динамики применим не только к твердому телу, но и к потоку жидкости или газа, причем в этом случае m есть масса всей жидкости или газа, изменяющей свое количество движения. Второй закон динамики должен быть справедлив и для потока фотонов. Тогда для светового давления мы имеем два выражения:

$$F = \frac{E}{ct} \quad \text{и} \quad F = \frac{mv}{t}.$$

Приравнивая правые части этих равенств, получаем:

$$\frac{E}{ct} = \frac{mv}{t}.$$

Сокращая обе части равенства на t и учтя, что v в правой части равенства есть скорость света c , получаем:

$$\frac{E}{c} = mc,$$

откуда

$$E = mc^2.$$

В этой формуле E — энергия света; c — скорость света; m — масса света.

Применяя эту формулу к фотону, имеем:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2},$$

где ε — энергия фотона; c — скорость света; m — масса фотона.

Энергия кванта может быть вычислена по известному выражению $\varepsilon = h\nu$, скорость света известна, следовательно, может быть вычислена и масса фотона. Зная массу фотона и скорость света, можно вычислить и количество движения фотона.

Итак, процесс распространения света, стал рассматриваться с точки зрения корпускулярной. Свет есть поток фотонов, обладающих массой и энергией.

Такой взгляд на свет расширял применение квантов в области световых явлений, но не ликвидировал той двойственности в природе света, о которой говорилось в начале этого параграфа.

В 1925 г. были созданы основы теории, которая была развита и пополнена в 1927 г. Эта теория получила название „квантовой механики“ или иначе — „волновой механики“. Совершенно не ставя перед собой задачи изложения здесь квантовой механики, мы коснемся ее в настоящем параграфе и в некоторых последующих только в связи с отдельными вопросами рассматриваемой темы. Говоря о квантовой механике, необходимо прежде всего учесть, что эту теорию в настоящее время нельзя еще считать вполне оформившейся и законченной. Кроме того, квантовая механика не получила еще полного и вполне достоверного подтверждения опытом. Квантовая механика утверждает, что всякая движущаяся материальная частица обладает и волновыми свойствами. В соответствии с этим, с точки зрения квантовой механики свет есть одновременно и волновой процесс и корпускулярный. В свойствах света обнаруживается единство противоположностей: непрерывного — волны и дискретного (прерывного) — квантов. В явлениях, изучаемых нами, свет представляется нам

только волнами или только квантами потому, что в каждом данном явлении мы наблюдаем только одну из этих двух сторон единого процесса. Очевидно, волновой стороной света в тех или иных оптических явлениях оказываются электромагнитные волны, частицей — квант света.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 9, кроме последней его части (начиная со стр. 41), в которой даются самые общие представления о квантовой механике, может быть использован во внеклассных занятиях.

Учащимся известны теории света: корпускулярная — Ньютона, волновая — Гюйгенса и электромагнитная — Максвелла. Когда учащимся будет излагаться материал § 9, следует задать им на дом восстановить в памяти эти теории в общих чертах, с тем чтобы основное внимание во время беседы сосредоточить на новом материале, в частности, на соображениях, что фотон обладает массой и энергией. В случае необходимости материал параграфа может быть сокращен, а обоснование наличия у фотона массы, в крайнем случае, может быть сведено к следующему.

Опыты Лебедева показали существование светового давления; но понятие давления связано с понятием силы, а значит — и количества движения ($Ft = mv$), а это последнее показывает, что фотон имеет массу.

§ 10. Волновая природа частиц

Известно, что квант обладает энергией, массой, количеством движения и что он в этом отношении подобен любой другой материальной частице. С точки зрения квантовой механики, всякая движущаяся материальная частица, например, электрон, также связана с волной, только в этом случае с волной не электромагнитного характера. Но волна характеризуется частотой, длиной и скоростью распространения. Квантовая механика устанавливает законы, которые дают возможность найти все эти величины, а также и ряд других, связанных с частицей — волной. Таким образом, квантовая механика утверждает, что движение всех мате-

риальных частиц (в том числе и электронов, и протонов, и α -частиц, и других) подчиняется волновым законам.

§ 11. Экспериментальное подтверждение квантовой механики. Дифракция электронов

Явления интерференции и дифракции естественно считать наиболее надежным доказательством волновой природы процесса. Именно эти явления в области света решили спор между корпускулярной и волновой теориями света в пользу последней. Явление дифракции света состоит в огибании волнами препятствий. Дифракции света, как известно, сопутствует интерференция волн. Дифракцию света можно наблюдать в том случае, если размеры огибаемого светом препятствия соизмеримы с длиной волны. Когда были открыты рентгеновы лучи (1895 г.), встал вопрос о том, какова их природа. Этот вопрос довольно долго не находил разрешения, так как не удавалось обнаружить интерференцию и дифракцию этих лучей. Причиной этому было то обстоятельство, что обычные дифракционные решетки для рентгеновых лучей оказались чрезмерно грубыми. Позже было обнаружено, что роль дифракционной решетки для рентгеновых лучей могут играть ряды атомов в кристаллах, так как длина волны рентгеновых лучей и расстояния между атомами в пространственной решетке кристалла примерно одинаковы.

В 1912 г. Лауэ было получено первое подтверждение дифракции рентгеновых лучей — фотографическая пластинка (рентгеновы лучи действуют на фотопластинку), на которой была зафиксирована дифракционная картина, полученная в результате прохождения рентгеновых лучей через кристалл. На рис. 9 показана дифракция этих лучей при прохождении их через кристалл цинковой обманки (ZnS) — кристалла правильной системы. На нем видно, что, кроме пятна посредине снимка от прямо прошедших лучей, имеется еще ряд боковых правильно расположенных пятен. (Эта картина внешне отличается от той, какая получается при прохождении света через дифракционную решетку. Это и понятно, так как в кристалле атомы сгруппированы в пространственную решетку, решетку трех измерений).

Если пропускать рентгеновы лучи через мелкий порошок из кристаллов или через мелкокристаллическое вещество, то тогда боковые пятна сливаются в ряд концентрических колец вокруг центрального пятна, как это показано на рис. 10.

Эти опыты не только подтвердили волновую природу рентгеновых лучей, но и позволили вычислить длину волны их. Она во много раз меньше длины волн види-

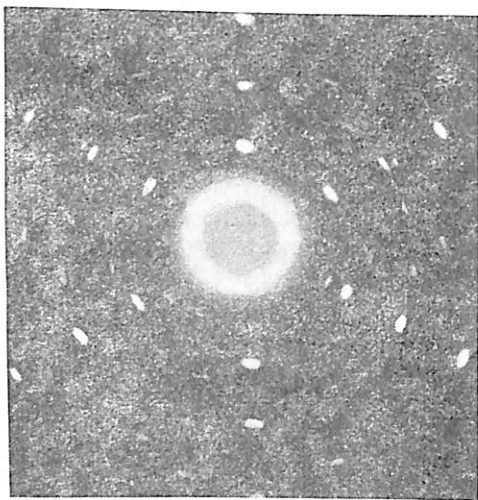


Рис. 9. Дифракция рентгеновых лучей от кристалла цинковой обманки (ZnS).

мого света. (Заметим, что дифракция рентгеновых лучей дает возможность определить строение кристаллов. Этот прием широко используется в кристаллохимии.)

В 1927 г. была открыта дифракция электронов. Первые были произведены опыты, которые с несомненностью показали, что поток электронов, который в явлениях, известных физикам до сих пор, проявлял себя как поток частиц, обнаруживает явно волновые свойства. Оказалось, что если пропускать пучок электронов сквозь тонкие пластинки кристаллических веществ (металлов, слюды), то наблюдается совершенно такая же

дифракционная картина, как и в случае дифракции рентгеновых лучей. Так как электроны действуют на фотографическую пластинку, то оказалось возможным зафиксировать эту картину (рис. 11).

Большее почернение фотографической пластинки происходит там, где на нее попадает большее количество электронов. В результате этого и появились на снимке дифракционные кольца. Таким образом, в явлении дифракции электронов они рассеиваются так, как если бы их рассеяние обуславливалось дифракцией волн. Квантовая механика позволяет вычислить длину волн электронных лучей. (Она зависит от скорости движения электронов. Длина волн электронных лу-

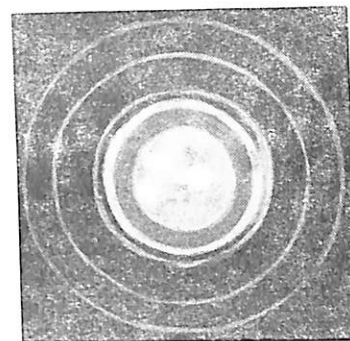


Рис. 10. Дифракция рентгеновых лучей от мелкого порошка из кристаллов.

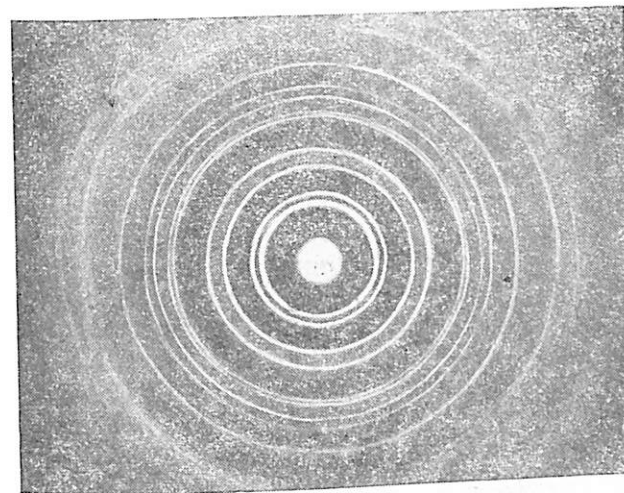


Рис. 11. Дифракция электронов от тонкой серебряной пластинки.

чей при практических применяемых скоростях электронов — порядка длины волн рентгеновых лучей.) Таким

образом, электроны, проходя через кристаллическую решетку, ведут себя как волны.

Эти волновые свойства частиц проявляются не только в случае потока электронов. Позже было установлено, что явление дифракции наблюдается и в случае пучка молекул (например, гелия).

Таким образом, квантовая механика получила экспериментальное подтверждение.

§ 12. Квантовая механика и атом

В соответствии с основным положением квантовой механики необходимо движение частиц связывать с волной. Это положение должно быть распространено и на электрон, движущийся вокруг ядра.

Рассматривая электрон именно с этой точки зрения, квантовая механика описывает особенности его движения. Электроны, движущиеся с очень большой скоростью в относительно небольшом пространстве, называют «электронным облаком».

Как уже указывалось, теория Бора постулирует положение о том, что движение электрона по одной из стационарных орбит не сопровождается излучением. Квантовая механика выводит это положение как следствие из уравнения волнового движения. Квантовая механика исследует структуру атомов сложного строения, со многими электронами. И, наконец, квантовая механика описывает и корпускулярные, и волновые свойства излучения. В настоящее время физика столкнулась с вопросами, решение которых не может дать и квантовая механика. Вообще, надо сказать, что в современной физике (в частности, в ядерной) существует целый ряд еще не решенных фундаментальных вопросов (например, природа ядерных сил и др.). Нужны дальнейшие экспериментальные исследования и дальнейшее развитие и совершенствование современных физических теорий.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 10—12 недоступен учащимся средней школы и потому не может излагаться им.

Для преподавателей физики он может представлять интерес в связи с вопросом о том, как можно предста-

вить себе наглядную картину атома с точки зрения квантовой механики.

Модель атома Резерфорда подкупает своей простотой и наглядностью, особенно благодаря бросающемуся в глаза внешнему сходству с планетной системой. С точки зрения квантовой механики движущийся электрон представляет собой одновременно и частицу, и волну, и, следовательно, картина должна быть значительно более сложной.

Как можно наглядно изобразить картину единства корпускулярного и непрерывного? Надо сказать, что все известные нам попытки дать картину атома в этом плане приводят к результатам или явно отрицательным, или, в лучшем случае, спорным.

Есть все основания считать, что эта задача в наше время еще не является разрешенной. Это положение может быть обосновано следующими соображениями.

Наглядными для нас являются картины, изображающие то или иное явление в виде механического перемещения тела в пространстве. Изучаемые нами движения (в частности — в атоме) представляют собой значительно более сложные формы движения. Известно, что эти сложные формы движения не могут быть сведены к механическому движению. Отсюда не может быть дана картина сложной формы движения в виде механического движения. Поэтому для наглядного изображения сложных форм движения должны быть найдены какие-то новые пути, новые приемы, пока еще не известные физике.

Однако это не значит, что надо вовсе отказаться от наглядного изображения явлений. Известно, что оно и в случае исследования сложных форм движения было бесспорно не только приемлемым, но и плодотворным. Достаточно в связи с этим вспомнить хотя бы изображение таких явлений, как интерференция света, поляризация и др.

Так, исследуя явление интерференции света, условно уподобляют электромагнитные волны (сложный процесс распространения непрерывно изменяющегося электромагнитного поля) «механическим» волнам, изображая для наглядности на рисунках электромагнитную волну как совокупность выступа и впадины, упрощая тем самым сложную картину действительности. При изуче-

нии явления поляризации света в целях той же наглядности прибегают к аналогии электромагнитных волн с механическими, возбужденными в резиновом шнуре, пропущенном через решетки, символизирующие поляризатор и анализатор. Сложная картина взаимодействия электромагнитной волны и вещества максимально упрощается и сводится к механическим образам. О несомненной приемлемости и плодотворности этого приема можно судить хотя бы потому, что закономерности, которым подчиняются явления интерференции и поляризации света, были установлены во времена господства волновой теории Гюйгенса — Юнга — Френеля, в соответствии с которой свет рассматривался как механические колебания так называемого светоносного эфира. Насколько далеки эти механические представления о природе света от современных — общеизвестно.

В силу указанных причин нецелесообразно отказываться от приемов наглядности и при изучении атома. Но во всех случаях, и особенно применительно к атому, прибегая к наглядным изображениям, мы обязаны иметь в виду: 1) что неизбежные упрощения, применяемые нами в изображении того или иного объекта или явления, не могут идти дальше некоторого разумного предела и 2) что они являются чисто условными. Этого последнего обстоятельства никак нельзя забывать, хотя бы потому, что мы, мало того, что сводим сложные формы движения к механическим, но даже и не охватываем картины полностью, так как, имея дело только с одной стороной явления — корпускулярной или волновой, мы ее одну и изображаем.

§ 13. Классическая и современная физика

Из кратко рассмотренного хода развития учения о строении атома мы видим, что изучение атома оказалось возможным благодаря тщательно поставленному эксперименту и созданию новых теорий, изменивших основные положения классической физики. Когда изучение вещества продвинулось до атома, то оказалось, что законы классической физики неприменимы к движению в атоме. Они были справедливыми для явлений в макром мире и частично даже в микромире — вплоть до движения атома как целого (кинетическая теория), но ока-

зались неприменимыми для исследования движений в атоме. В мире атома оказались существующими другие закономерности. Возникали одна за другой новые теории строения атома, постепенно создавалась новая физика не только с новыми закономерностями, но и с новыми образами и представлениями. Суть этих теорий в самых общих чертах была изложена выше. Краткое описание основных теорий современной физики не будет сколько-нибудь полным, если не остановиться на некоторых вопросах теории относительности (1905 г.). Совершенно не ставя себе задачи даже кратко изложить содержание этой теории, мы остановимся только на некоторых положениях, которые необходимы для дальнейшего изложения учения об атоме и его ядре. Вместе с тем эти положения еще раз подчеркнут мысль о том, что мир чрезвычайно малых частиц управляется другими законами.

1. Предельная скорость движения тел

Классическая механика считала, что тела могут двигаться друг относительно друга с какой угодно скоростью. Теория относительности утверждает, что скорость движения тел не может быть больше скорости света в вакууме, т. е. больше 300 000 км/сек.

2. Зависимость массы тела от его скорости

В классической физике считалось незыблемым утверждение, что масса каждого данного тела является величиной постоянной. Опыт и теория показали, что масса тела зависит от скорости его движения и может быть вычислена по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m — масса тела, движущегося со скоростью v ; c — скорость света; m_0 — масса покоящегося тела (или, точнее, масса, измеренная в системе, движущейся вместе с телом).

Эта зависимость массы тела от скорости его движения может быть обнаружена только при очень больших

скоростях, соизмеримых со скоростью света. При тех же скоростях, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни и в технике, изменения массы настолько малы, что лежат за пределами точности наших измерений.¹ Так, например, если покоящаяся масса артиллерийского снаряда (до выстрела) равна 6 кг, то при скорости в 600 м/сек (после выстрела) его масса увеличивается на $12 \cdot 10^{-9}$ г. Расчеты показывают, что даже при тех скоростях, с которыми движутся по своим орбитам планеты, изменения их масс ничтожны. Масса нашей Земли, движущейся со скоростью 30 км/сек, составляет 1,000 000 005 ее покоящейся массы. Поэтому, изучая макромир, в котором мы не имеем дела с очень большими скоростями, совершенно бесцельно подсчитывать изменение массы тел в зависимости от скорости. Совершенно иначе обстоит дело в области микромира. Физики в лабораторных условиях имеют дело с электронами, движущимися со скоростями 150 000—270 000 км/сек. Пользуясь приведенной выше формулой, легко подсчитать, что при скорости в 150 000 км/сек масса электрона составляет $1,13 m_0$, при 225 000 км/сек — $1,63 m_0$, при 270 000 км/сек — $2,5 m_0$, при 297 000 км/сек — $7,0 m_0$, при 299 700 км/сек — $22,3 m_0$. Как видим, при небольших скоростях электронов изменение их массы небольшое, но при скоростях, близких к скорости света, оно становится очень значительным. В состав космического излучения входят электроны с огромной скоростью, очень немногим отличающейся от скорости света. Их масса приблизительно в 2000 раз больше массы покоящегося электрона.

Эти расчеты по приведенной формуле теории относительности подтверждаются и экспериментальными данными. Ставились опыты по отклонению электронов различных скоростей в электрическом и магнитном поле. Величина такого отклонения электрона зависит от его массы. Вычисления изменения массы электрона в зависимости от скорости, произведенные на основании этих данных, вполне подтвердили расчеты теоретические.

Из сказанного выше вытекает, что классическая механика неприменима к частицам, движущимся с боль-

¹ С изменением массы приходится иногда считаться в электронных приборах.

шими скоростями, к частицам, с которыми мы имеем дело в мире атома. С другой стороны, так как скорости движения тел в явлениях макромира невелики, то в этих случаях классическая механика вполне применима. Мы видим, что она может рассматриваться как частный случай релятивистской механики для движения с небольшими скоростями.

В связи с тем, что при увеличении скорости движения тела масса его возрастает, а при уменьшении скорости соответственно уменьшается, естественно, может возникнуть вопрос: откуда берется эта добавочная масса тела? (Или — куда она „девается“ при уменьшении скорости движения тела?) По этому поводу могут быть высказаны следующие соображения.

Всякое изменение скорости одного тела есть результат воздействия на него другого тела. Если скорость первого тела возрастает, а его масса увеличивается, то источником добавочной массы первого тела служит второе тело, масса которого уменьшается, причем уменьшается ровно настолько, насколько увеличивается масса первого тела. Если в результате взаимодействия тел скорость, а значит и масса, первого тела уменьшается, то масса второго тела ровно настолько же увеличивается. Или — если частица вещества увеличивает свою скорость, масса ее возрастает. Добавочная масса этой частицы берется от того материального объекта, который своим воздействием ускорил частицу. Причем и в этом случае добавочная масса частицы равна уменьшению массы материального объекта, ускорившего движение частицы.

Высказанные соображения лежат в основе закона, называемого в физике законом сохранения массы. Изучение огромного количества разнообразнейших явлений природы, данные, полученные в результате тщательнейшим образом поставленных опытов, с несомненностью свидетельствуют о правильности этого закона, о всеобщности его, о том, что закон сохранения массы точнейшим образом выполняется во всех явлениях природы.

(В связи с исключительным значением закона сохранения массы, а также чтобы проиллюстрировать его некоторыми примерами с более простыми расчетами, мы вернемся к нему в следующем пункте этого параграфа.)

3. Закон взаимосвязи массы и энергии

Классическая физика и химия при изучении природы опираются на два основных закона: закон сохранения массы и закон сохранения энергии. До появления теории относительности эти законы считались никак не связанными друг с другом. Считалось, что масса вступающих в химическую реакцию веществ одинакова до и после реакции. Так, например, при соединении 2 г водорода и 16 г кислорода получается 18 г воды. При соединении (горении) 12 г углерода и 32 г кислорода получается 44 г углекислого газа, и т. д. Известно, что обе приведенные реакции сопровождаются выделением большого количества тепла. В первой из них на каждый грамм водорода, вступающего в реакцию с кислородом, приходится 34 000 кал; а при сгорании каждого грамма угля выделяется 8000 кал. Масса вступающих в реакцию веществ никак не связывалась с выделяющейся энергией. То же самое имело место и в механических движениях: давно было известно, что увеличение скорости движения тела влечет за собой увеличение кинетической энергии тела, но это увеличение энергии не связывалось с массой тела, которая считалась неизменной.

Опыт и теория показали, что увеличение скорости движения тела влечет за собой увеличение массы этого тела. Но увеличение скорости тела вызывает увеличение энергии. Следовательно, между энергией и массой тела должно существовать известное соотношение. Выяснилось, что увеличение энергии тела связано с увеличением его массы и, наоборот, уменьшение энергии тела сопровождается уменьшением его массы, причем зависимость между ними оказалась прямо пропорциональной и выражается формулой:

$$\Delta E = \Delta mc^2 \text{ или } \Delta m = \frac{\Delta E}{c^2},$$

где Δm — изменение массы тела; ΔE — изменение энергии тела; c — скорость света. (В случае CGS системы единиц коэффициент пропорциональности в этой формуле равен единице.)

Этим уравнением было установлено соотношение между массой и энергией. Мысль о том, что всякое изменение энергии тела связано с изменением его массы,

была новой, неожиданной, непривычной. Ведь получалось так, что нагревание какого-либо тела или охлаждение его вызывает изменение его энергии, а значит — и его массы; из того, что химические реакции сопровождаются выделением тепла, следовало, что масса получившихся в результате реакции веществ должна быть меньше массы их до реакции. Но это же уравнение дало понять, почему до сих пор не удавалось заметить изменения массы тел при изменении их энергии. Дело в том, что в знаменателе дроби в приведенной выше формуле входит скорость света в квадрате. В единицах CGS-системы это $9 \cdot 10^{20} \text{ см}^2/\text{сек}^2$. Легко подсчитать, что для того, чтобы масса тела изменилась на 1 г, телу надо сообщить огромную энергию: $9 \cdot 10^{20}$ эргов, или $21,6 \cdot 10^{12}$ кал. Стало ясным, что так как в земных условиях не происходит процессов с такими огромными балансами энергий, то поэтому изменения массы тел настолько малы, что их не удастся заметить.

В предыдущем пункте настоящего параграфа был приведен пример увеличения массы артиллерийского снаряда в связи с увеличением его скорости, т. е. в связи с увеличением кинетической энергии снаряда. При увеличении скорости снаряда от нуля до 600 м/сек кинетическая энергия его увеличилась от нуля до следующего значения:

$$\Delta E = \frac{mv^2}{2} = \frac{6 \cdot 600^2}{9,8 \cdot 2} \approx 110\,204 \text{ кгм} \approx 11 \cdot 10^{12} \text{ эргов.}$$

Этому увеличению энергии снаряда сопутствовало увеличение его массы. Добавочная масса снаряда может быть вычислена по уравнению:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2},$$

$$\Delta m = \frac{11 \cdot 10^{12}}{9 \cdot 10^{20}} \approx 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ г} = 12 \cdot 10^{-9} \text{ г.}$$

Подобного же рода расчеты показывают, что при увеличении энергии механического движения на 1 кгм масса тела увеличивается на $109 \cdot 10^{-15} \text{ г}$.

Ясно, что столь незначительные изменения массы не могут быть обнаружены на опыте.

Остановимся еще на некоторых примерах взаимосвязи массы и энергии, не приводя вычислений.

При нагревании 1 кг воды на 1°C масса воды увеличивается на $46 \cdot 10^{-12}$ г.

При нагревании 1 тонны воды на 100° ее масса увеличивается на 0,000005 г.

В результате соединения 2 г водорода с 16 г кислорода выделяется 68 000 калорий. Значит, масса получившейся воды будет не 18 г, а меньше на $3,2 \cdot 10^{-9}$ г.

Вследствие выделения тепла в количестве 96 ккал при сгорании 12 г углерода в 32 г кислорода, образуется не 44 г углекислого газа, а меньше на $4 \cdot 10^{-9}$ г. Никакими чувствительнейшими весами этих изменений массы обнаружить нельзя.

Приведенных примеров достаточно, чтобы показать, почему изменение массы тел, связанное с изменением их энергии в обычно наблюдаемых нами явлениях не обнаруживается. Итак: между энергией и массой существует взаимосвязь, выражаемая формулой $E = mc^2$.

Всякому изменению энергии любого материального объекта сопутствует соответствующее изменение его массы.

Зная величину изменения массы материального объекта, можно подсчитать, насколько изменилась его энергия, и наоборот: зная величину изменения энергии, можно вычислить, насколько изменилась масса.

В этом состоит суть закона взаимосвязи энергии и массы, установленного современной физикой.

Разумеется, что при всех процессах, связанных с изменением энергии любого материального объекта, а значит и массы его, остаются в полной силе и закон сохранения массы и закон сохранения энергии. Поясним это приведенными примерами.

Артиллерийский снаряд при выстреле приобрел кинетическую энергию в $11 \cdot 10^{12}$ эргов и добавочную массу в $12 \cdot 10^{-9}$ г. Откуда они взялись? При выстреле сгорел, допустим, 1 кг пороха. При этом он „потерял“ $3,14 \cdot 10^{13}$ эргов энергии и $35 \cdot 10^{-9}$ г массы. Ровно столько же энергии и массы получили снаряд, само орудие, воздух и другие тела, которые участвовали в этом процессе. Причем на долю снаряда пришлось примерно третья часть энергии и массы, „потерянных“ порохом.¹

¹ А. В. Луизов и Л. Б. Понизовский. В недрах вещества. Лениздат, 1952.

При нагревании воды мы пользуемся тем или иным нагревателем, сжигая в нем какое-либо топливо. „Потерянные“ топливом энергия и масса в точности равны энергии и массе, полученным водой и другими телами, участвовавшими в процессе (сосуд, воздух и т. д.).

„Потерянные“ водородом и кислородом энергия и масса при образовании воды в точности равны энергии и массе, полученным телами, участвующими в процессе (в частности, и воздухом).

То же самое надо сказать и о химической реакции между углеродом и кислородом.

Не только перечисленные явления, но все решительно явления природы протекают в соответствии с законами сохранения энергии и массы, причем в явлениях микромира точно выполняется и закон взаимосвязи массы и энергии. В дальнейшем мы убедимся в этом на ряде других явлений.

§ 14. Условие освобождения энергии вещества. Полная энергия тела

Из приведенных в предыдущем параграфе примеров мы видим, что выделение веществом энергии связано с уменьшением массы этого вещества. При сгорании пороха в орудии масса и энергия пороха уменьшились, они оказались переданными другим телам, в частности, снаряду, который, как указывалось, получил добавочную массу и энергию. Рассматривая этот процесс, мы говорим, что при сгорании пороха выделилась энергия. И при всяком другом процессе, при котором выделяется энергия, масса этого вещества уменьшается. При химическом соединении 2 г водорода и 16 г кислорода масса этих веществ и энергия их уменьшаются, передаваясь другим телам, энергия и масса которых соответственно увеличиваются. Опять мы говорим, что при этом процессе выделилась энергия. Так протекают явления, сопровождающиеся выделением энергии. Отсюда вытекают два очень важных вывода:

1) Вещество обладает энергией, находящейся в нем в скрытом для нас состоянии.

2) Скрытая в веществе энергия освобождается при таких процессах, при которых уменьшается покоящаяся масса вещества в результате перехода ее в добавочную

массу движущегося тела или в массу света (электромагнитного поля излучения), как это мы увидим в дальнейшем.

Второй вывод определяет то условие, какое надо осуществить для того, чтобы освободить энергию, которой обладает вещество.

Вернемся еще раз к примерам явлений, при которых происходит выделение энергии. Во всех рассмотренных случаях (выстрел из орудия, образование воды из водорода и кислорода и др.) уменьшение покоящейся массы веществ происходит в столь ничтожных размерах, что обнаружить уменьшение массы опытным путем оказывается невозможным. И все же эти явления сопровождаются выделением относительно больших количеств энергии, величина которой может быть определена на основании закона взаимосвязи массы и энергии по формуле

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Легко представить себе, какие огромные количества энергии могли бы быть выделены при процессах, сопровождающихся сколь-нибудь заметным уменьшением покоящейся массы вещества.

Физика не создала еще технически осуществимых процессов, при которых могла бы освобождаться вся внутренняя энергия вещества. Однако дальше мы увидим, что физика в состоянии вызвать процессы в ядрах атома, так называемые ядерные реакции, при которых происходит освобождение огромных количеств энергии, скрытых в веществе.

Итак, мы видим, как постепенно, шаг за шагом, создавалась современная физика, физика микромира, закономерности которого отличны от закономерностей макромира. Изучение микромира началось относительно недавно. Многие явления микромира еще неясны, не изучено достаточно полно, не подтверждено экспериментально. Но, наряду с этим, как это видно из изложенного выше, изучение весьма многих вопросов продвинулось довольно далеко. Наметились и решения весьма многих вопросов, например, таких, как зависимость массы тела от его скорости, соотношение между массой и энергией и т. д. Экспериментальные данные, полученные в результате изучения атома и его ядра, подтвердили весьма

многие положения, лежащие в основе современной физики. Этих вопросов мы коснемся и в последующем изложении.

§ 15. Формы материи

Все, что известно учащимся из школьного курса физики, свидетельствует о том, что физика занимается изучением движущейся материи. „Существующий материальный мир — движущаяся материя — представляется нам в двух основных формах, как вещество и свет“.¹

Свет здесь понимается, конечно, в самом широком смысле этого слова — как электромагнитное поле излучения любых длин волн: от γ -лучей до радиоволн.

Материя в форме вещества обладает массой и энергией, причем масса и энергия вещества всегда находятся в определенном соотношении. Все явления, происходящие с веществом, протекают в соответствии с законами сохранения энергии и массы. Что же в этом отношении можно сказать о материи в другой ее форме — о свете? Что свет (электромагнитное поле излучения) обладает энергией — общеизвестно. Кроме того, в § 9 было показано, что свет обладает массой, которая может быть вычислена.

„Солнечные лучи несут с собой солнечную массу. Свет — не бестелесный посланник Солнца, а само Солнце, часть его, долетевшая до нас в совершенной, раскрытой в энергетическом смысле форме, в форме света“.²

В том же § 9 было показано, что соотношение между массой и энергией, выражаемое формулой $E = mc^2$, справедливо и для света.

И, наконец, точнейшие исследования световых явлений свидетельствуют о том, что явления эти во всех случаях точно следуют законам сохранения массы и энергии.

Существенное различие между обеими формами материи состоит в том, что вещество обладает массой покоя, а свет массой покоя не обладает.

Итак, основные законы природы: законы сохранения

¹ С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. Изд. АН СССР, 1950, стр. 41.

² Там же, стр. 72.

массы, энергии и взаимосвязи массы и энергии — являются основными для обеих форм материи — для вещества и для света.

Может ли одна форма материи — вещество переходить в другую — в свет, и наоборот? Происходят ли такие процессы в природе? Оказывается, что происходят. В 1932 г. была открыта новая частица, имеющая массу, равную массе электрона, и положительный заряд, по абсолютному значению равный заряду электрона (подробнее об этом см. в § 32). Эту частицу назвали позитроном. Этих частиц очень мало, и они существуют очень недолго, так как при столкновении позитрона с электроном они, соединяясь, теряют благодаря взаимной нейтрализации свои заряды и всю свою энергию, и, в конечном счете, — всю свою массу. В итоге они прекращают свое существование как отдельные частицы, переходя в новую форму материи — в кванты (фотоны). Причем появившиеся фотоны обладают энергией, равной энергии электрона и позитрона, и массой, которая может быть определена по уравнению $m = \frac{E}{c^2}$ и равна массе „исчезнувших“ позитрона и электрона. Это явление представляет совершенно исключительный интерес, так как в нем происходит переход всей массы частиц в массу фотонов и их энергии — в энергию фотонов. Это явление получило крайне неудачное название „аннигиляции материи“ (аннигиляция — значит уничтожение). Никакого уничтожения материи здесь, разумеется, не происходит, а имеет место переход материи из одной формы: частиц (позитрон — электрон) в другую — фотоны.

Может ли происходить обратный переход γ -лучей в пару электрон — позитрон? Оказывается, что может. Ирэн Кюри и Фредерик Жолио-Кюри,¹ а за ними и ряд других ученых, в частности советские ученые Франк и Грошев (в других условиях, чем Кюри и Жолио), наблюдали образование пары позитрон — электрон в результате действия γ -лучей на свинцовую пластинку (она играла в этих опытах роль катализатора)

¹ Ирэн Кюри (род. в 1897 г.) дочь Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри (см. § 20). Фредерик Жолио (род. в 1900 г.) муж Ирэн Кюри, известный французский ученый и общественный деятель. Член Коммунистической партии Франции, председатель Всемирного Совета Мира.

(см. § 32). Причем и в этом случае точно выполнялись основные законы сохранения массы и энергии.

Очевидно, законы сохранения массы, энергии и взаимосвязи массы и энергии вытекают из самого общего начала — закона сохранения и неуничтожаемости материи, со всеми основными ее свойствами.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 13—15 выходит за пределы учебного плана темы и на уроках не излагается. Он может быть полезен учителю, и, кроме того, § 13 может быть использован во внеклассной работе с наиболее интересующимися физикой учащимися, которые, как правило, оказываются и наиболее разбирающимися в ней. Именно эту категорию учащихся мы и имеем в виду в методических указаниях к этим параграфам. При этом нужно учесть следующее очень важное обстоятельство. В современной физике еще много нерешенных вопросов фундаментального значения. В соответствии с этим и современные теории (теория относительности, квантовая механика) не могут считаться окончательно сформированными, а все их положения — окончательными, бесспорными и, несомненно, правильными. Это нужно учесть учителю вообще и особенно в том случае, если некоторые вопросы современной физики будут затрагиваться во внеклассной работе с учащимися (в частности, такие, как соотношение между массой и энергией, природа ядерных сил, о которой будет речь дальше и др.).

В § 13 приведены три положения теории относительности. Два последних из них будут нами использованы в дальнейшем, а первый, утверждающий, что скорость движения тел не может быть больше скорости света, был нами упомянут, так как он в теории относительности является фундаментальным.

Второе из приведенных положений — о зависимости массы тела от скорости его движения, тоже дается догматично (другого пути, повидимому, нет), но оно может быть иллюстрировано некоторыми расчетами, объясняющими, почему мы не обнаруживаем этой зависимости в явлениях макромира. Конечно, приятнее было бы показать учащимся эту зависимость в случаях, в каких она может быть обнаружена, но, к сожалению,

такой возможности в распоряжении учителя физики средней школы нет. Тем более, не следует пренебрегать и первым, „негативным“ путем. То обстоятельство, что нами не обнаруживается зависимость массы тела от движения при небольших скоростях, делает само положение для учащихся менее неожиданным и быстрее обращает его в более или менее привычное.

Нужно объяснить учащимся, почему раньше (в VIII, IX классах) при изучении отдела механики мы утверждали о неизменности массы каждого данного тела. При рассмотрении вопроса о зависимости массы тела от скорости его движения мы сталкиваемся со многими трудностями — одна из них проистекает из того, что увеличение массы тела при возрастании скорости движения часто связывается в представлениях учащихся с количеством вещества (частиц) в теле. Надо постараться разъяснить учащимся, что увеличение массы тела в этом случае обусловлено не увеличением количества частиц в нем, а увеличением скорости движения тела. Другая трудность обусловлена следующей причиной. Как правило, связь между массой тела и его скоростью рассматривается на примере движения одного тела, изолированно взятого, никак не взаимодействующего с другими материальными объектами. В результате оказывается неясным, откуда взялась добавочная масса у тела, скорость которого возросла? Если же этот вопрос вообще не возникает, то положение дела становится еще менее благополучным: создается впечатление о нарушении одного из существеннейших законов природы — закона сохранения массы. Эту опасность очень важно предусмотреть, используя, например, путь, указанный в § 13, п. 2.

Примеры изменения массы тел в связи с изменением скорости даны в § 13, расчеты же не приводятся, так как вычисления по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

довольно громоздки и на уроке нехватит времени на них. Кроме того, вычисление изменения массы тела, связанное с изменением его скорости, проще производить по изменению его кинетической энергии.

Исключительно большое образовательное и воспитательное значение имеет закон взаимосвязи массы и энергии. К сожалению, именно этот закон чрезвычайно часто толкуется ошибочно.

Иногда уравнение $E = mc^2$ трактуют как выражение закона превращения массы в энергию и наоборот. Или на основе этого же уравнения энергии приписывается масса. В некоторых случаях оно рассматривается как выражение, свидетельствующее о переходе материи в энергию.

Такое понимание уравнения $E = mc^2$ неверно даже с точки зрения формальной, не говоря уже о сути дела. В самом деле, если увеличение энергии E было бы обусловлено появлением ее за счет массы m , то, ведь, тогда эта последняя должна была бы уменьшаться. А уравнение говорит о прямо пропорциональной зависимости между энергией и массой. Масса и энергия — свойства материи. В природе не происходит превращения массы в энергию или материи в энергию. Уравнение $E = mc^2$ говорит о том, что масса и энергия любого материального объекта взаимно связаны друг с другом. Эта взаимосвязь состоит в том, что всякому изменению массы любого материального объекта соответствует строго определенное изменение его энергии и наоборот. В этом именно состоит суть закона взаимосвязи массы и энергии. И именно в этом плане следует трактовать уравнение $E = mc^2$ и учащимся.

Но дело не только в этом. Указанные выше ошибочные толкования рассматриваемого закона чаще всего являются следствием того, что взаимосвязь массы и энергии рассматривается вне зависимости от закона сохранения энергии и закона сохранения массы. Поэтому, установив взаимосвязь массы и энергии, рассказав учащимся о сути закона и о том, как надо понимать уравнение $E = mc^2$, крайне важно проследить хотя бы один-два процесса, связанных с изменением массы и энергии тела, и установить, откуда „взялись“ у этого тела масса и энергия. Иными словами, рассмотреть эти процессы с точки зрения законов сохранения массы и энергии.

Именно в такой системе построен материал § 13, и нам надо обратить на это особое внимание читателя. Материал § 14 тесно связан с материалом § 13 и является его логическим продолжением. Этот параграф,

а также § 15 помещены для учителя. Учащимся материал этих параграфов недоступен. Поэтому его целесообразно выносить и на внеклассные занятия.

Материал § 13 и 14 связан с вычислениями, которые в некотором количестве приведены в тексте. Вследствие недостатка времени, целесообразно производить все приведенные математические выкладки. Можно ограничиться записью формулы, подстановкой в нее численного значения величин и выписыванием конечного результата. По тем же причинам может быть уменьшено и количество данных в тексте примеров.

ГЛАВА III

ЭЛЕКТРОННАЯ ОБОЛОЧКА АТОМА

§ 16. Периодическая система элементов и строение атома

Квантовая (волновая) механика дала возможность теоретически обосновать то строение атома, модель которого предложил Резерфорд, опираясь на опыты по рассеянию α -частиц. Как уже говорилось, в соответствии с этой моделью в центре атома каждого химического элемента находится массивное ядро, несущее положительный заряд, причем в ядре сосредоточена почти вся масса атома, а вокруг этого ядра с огромной скоростью движется некоторое количество электронов, общий отрицательный заряд которых по абсолютному значению равен положительному заряду ядра, так что атом в своем обычном состоянии оказывается электрически нейтральным. Известно, что электроны во всех атомах совершенно одинаковы. Чем же можно объяснить все многообразие физических и химических свойств элементов, несмотря на общность строения атомов. На этот вопрос современная физика дает ответ, на котором мы кратко остановимся.

Известно, что каждый химический элемент характеризуется так называемым атомным весом. За единицу атомного веса принимается $1/16$ атомного веса кислорода (точнее — его преобладающего изотопа O^{16} , о чем см. в § 30). В этом случае атомный вес водорода окажется 1,00813, а кислорода 16. (Если атомный вес водорода принять за единицу, то атомный вес кислорода окажется 15,875). Существенно, что атомные веса выражаются дробными числами. Атомный вес является

относительным весом. Современное состояние физики позволило на основании данных многочисленных опытов **определить и массу атомных ядер различных элементов, и величину их зарядов.** Результаты оказались знаменательными. Выяснилось, что ядра атомов различных химических элементов отличаются друг от друга не только массой, но и величиной своих положительных зарядов. Причем если абсолютное значение заряда электрона принять за единицу, то положительный заряд ядра элемента равен его порядковому (атомному) номеру элемента (Z) в периодической системе элементов Менделеева. Но если заряд ядер атомов разных элементов различен, то, следовательно, различно и число электронов в атомах разных элементов. Оно, очевидно, также равно порядковому номеру элемента. (Здесь, так же как и во всех последующих случаях, в которых идет речь о строении атома, например, в следующем параграфе, имеется в виду атом в электрически нейтральном состоянии.) Совокупность электронов в атоме называют электронной оболочкой. В соответствии со сказанным, ядро атома водорода (порядковый номер 1) имеет заряд, равный единице, его электронная оболочка состоит из одного электрона; в атоме гелия (порядковый номер 2) 2 электрона, заряд его ядра равен 2; электронная оболочка атома меди (порядковый номер 29) состоит из 29 электронов, заряд его ядра равен 29; в электронной оболочке атома урана (порядковый номер 92) 92 электрона, заряд равен 92 — и т. д. Таким образом, мы видим, что заряд ядра играет решающую роль. Он определяет число электронов в электронной оболочке. Заряд ядра определяет и электрическое поле, в котором располагаются электроны. Вообще все внутреннее строение атома определяется зарядом ядра. Масса же ядра играет второстепенную роль. Поэтому место химического элемента в периодической системе элементов Менделеева определяется зарядом ядер его атомов.

Гениальность Менделеева проявилась, в частности, в том, что он, пользуясь при составлении своей таблицы атомными весами элементов (в его время это был основной отличительный признак элементов), не придавал им решающего значения, а руководствовался всеми свойствами элементов, а не только атомным весом. Именно поэтому в таблице Менделеева в отдельных местах на-

рушалась последовательность в расположении элементов в порядке возрастания их атомного веса. В наше время ясно, что это обстоятельство повело к установлению последовательности в отношении заряда ядер атомов, играющего решающую роль.

Таким образом, индивидуальность атома определяется его ядром. Если от электронной оболочки атома в силу тех или иных причин отрывается один или несколько электронов (или к электронной оболочке атома присоединяется один или несколько электронов), то от этого атом данного элемента не обратится в атом другого элемента, а становится только отрицательным (или положительным) ионом. Отсюда ясно, что изменение природы элементов связано с перестройкой ядер атомов. При химических же реакциях происходит перестройка электронной оболочки в атомах, а ядра их не претерпевают изменений.

В § 2 было уже сказано, что все решительно электроны, выявленные физиками путем самых разнообразных опытов, полученные из самых разнообразных элементов, оказались совершенно одинаковыми. Масса электрона $9 \cdot 10^{-28}$ г почти в 1840 раз меньше массы ядра атома водорода. (Имеется в виду масса „покоящегося“ электрона. См. § 13.) Поэтому почти вся масса атома оказывается сосредоточенной в его ядре. Масса единственного электрона в атоме водорода составляет 0,00054 массы всего атома; масса электронов атома гелия составляет около 0,00027 массы всего атома, а в атоме урана около 0,00021 массы атома. Заряд электрона (отрицательный) равен $4,8 \cdot 10^{-10}$ абс. электрост. единиц заряда, или $16 \cdot 10^{-20}$ кулона.

§ 17. Строение электронной оболочки

Говоря о квантовой теории, мы указывали, что движущаяся частица сопровождается волной. В связи с этим и движение электронов в атоме может быть рассматриваемо с точки зрения корпускулярной или волновой. Описание движения электронов с точки зрения корпускулярной значительно нагляднее и проще, поэтому мы и будем им пользоваться. Как уже указывалось выше, количество электронов в электрически нейтральном атоме равно порядковому номеру

элемента Z . Следовательно, число их растет от одного в атоме водорода до 92 в атоме урана. (Есть элементы, расположенные в периодической системе Менделеева за ураном. О них будет сказано дальше.) Электрически нейтральный атом каждого последующего элемента в периодической системе элементов имеет на один электрон больше предыдущего.

Электроны движутся вокруг ядра по некоторым орбитам. Орбиты эти или круговые, или эллипсы, в одном из фокусов которых находится ядро. Орбиты электронов квантуются. Это значит, что электроны могут двигаться вокруг ядра только по орбитам определенных радиусов или определенного значения больших полуосей (если орбита — эллипс). В расчетах, применяемых квантовой механикой, вычисляются радиусы круговых орбит, но такую же величину имеют и большие полуоси эллипсов. Распределение электронов вокруг ядра происходит в соответствии с принципом (установленным Паули), по которому в атоме в каждом данном квантовом состоянии может находиться только один электрон. В соответствии с этим одна и та же орбита не может быть занята несколькими электронами, движение которых характеризуется совершенно одинаковыми величинами.

Электроны движутся по своим орбитам с очень большими скоростями, совершая огромное число оборотов вокруг ядра в секунду.

Орбиты одинаковых радиусов (или одинаковых больших полуосей) группируются в отдельные электронные слои. Схематически эти слои можно представить себе в виде концентрических сфер, окружающих ядро. Каждому слою принадлежит некоторое определенное число электронов. Вся электронная оболочка атома делится на несколько слоев, обозначаемых буквами K , L , M , N и т. д., начиная от слоя, ближайшего к ядру. (В соответствии с этим слои называются K -слоем, L -слоем и т. д.) Большие полуоси орбит всех электронов одного и того же слоя одинаковы (малые полуоси — различны). Электроны одного слоя связаны в атоме приблизительно одинаково, т. е. для удаления из атома каждого из электронов этого слоя требуется приблизительно одинаковая энергия. Величина этой энергии меняется при переходе от слоя к слою. Для удаления электрона из

K -слоя нужна большая энергия, чем для удаления его из какого-либо другого слоя (для атомов данного элемента). Таким образом электроны наружного слоя наименее прочно связаны с ядром. В некоторых случаях один или несколько электронов наружного слоя атома могут оторваться от атома и присоединиться к электронам наружного слоя других атомов. Атом, лишившийся одного или нескольких электронов, обращается в положительный ион, а атом, присоединивший к себе один или несколько электронов, обращается в отрицательный ион.

Теория и опыт показывают, что в каждом электронном слое может находиться не более некоторого определенного числа электронов, а именно: в первом слое, наиболее близком к ядру, может располагаться не больше 2 электронов, во втором — не более 8, в третьем — не более 18, в четвертом — не более 32 и т. д.

Электроны в нейтральных атомах различных химических элементов, от водорода до урана, группируются так, что заполнение слоев электронами, в указанных пределах для каждого слоя, происходит последовательно от первого ближайшего к ядру слоя к последующим, все более и более удаленным от ядра. Так, например, единственный электрон в атоме водорода ($Z = 1$) помещается в первом слое, ближайшем к ядру. У гелия ($Z = 2$) в электронной оболочке имеются 2 электрона. Оба они находятся в первом слое. На рис. 12 показана условная схема этого атома.

Таким образом, в атоме гелия заканчивается построение первого слоя электронной оболочки. Дальнейшее увеличение количества электронов в атомах последующих элементов происходит путем постепенного заполнения следующих слоев. А именно, 3 электрона лития ($Z = 3$) расположены так: 2 из них находятся в первом слое, а 3-й — во втором. На рис. 13 показана условная схема строения этого атома.

В атомах последующих элементов происходит дальнейшее постепенное заполнение второго слоя, при наличии 2 электронов в первом слое. Так, атом бериллия

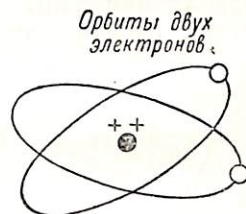


Рис. 12. Схема атома гелия.

($Z = 4$) во втором слое имеет 2 электрона, атом бора ($Z = 5$) во втором слое имеет 3 электрона, атом углерода ($Z = 6$) четыре, атом азота ($Z = 7$) пять, атом кислорода ($Z = 8$) шесть, атом фтора ($Z = 9$) семь, атом неона ($Z = 10$) восемь. Таким образом, на атоме неона заканчивается построение второго слоя электронной оболочки. Схема этого атома дана на рис. 14.

Следующий элемент натрий ($Z = 11$) имеет заполненный первый слой (2 электрона), второй слой (8 электронов), а 11-й его электрон располагается уже в третьем слое, на орбите, значительно более удаленной от ядра.

Примерно таким образом происходит дальнейшее заполнение слоев электронами. (Мы говорим „При-

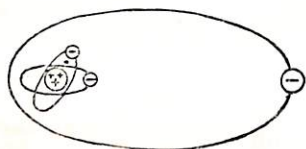


Рис. 13. Схема атома лития.

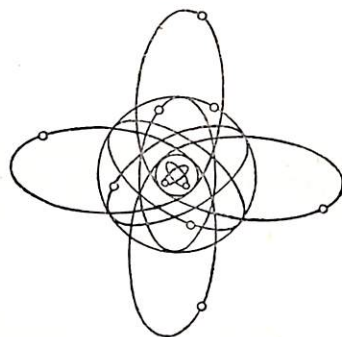


Рис. 14. Схема атома неона.

мерно таким образом“ потому, что заполнение третьего слоя происходит не сразу до 18 электронов, а сначала до 8, потом начинается частичное заполнение четвертого слоя, а затем уже достраивается третий слой до 18 электронов, и только после этого вновь начинается построение четвертого слоя. Построение четвертого слоя начинается с меди ($Z = 29$) $2 \div 8 \div 18 \div 1$. То же самое происходит в заполнении пятого и шестого слоев. Но в эти детали мы входить не можем.)

До сих пор мы обращали внимание на количество электронов в атоме, но существенно помнить, что параллельно с увеличением на один электрон числа электронов в оболочке атома, в периодической системе элементов при переходе от одного элемента к следующему увеличиваются и заряд и масса ядра. При этом заряд ядра, выраженный в элементарных зарядах, увеличивается каждый раз на единицу и потому, так же как и число электронов в атоме, остается всегда равным порядковому номеру элемента.

§ 18. Электронная оболочка атомов и спектры испускания. Рентгеновы лучи

Рассматривая строение атома водорода в связи с постулатами Бора (§ 7), мы дали краткое объяснение происхождению линейчатого спектра, а также и линейчатых спектров других химических элементов, поэтому здесь мы ограничимся только небольшими дополнениями к сказанному раньше.

В атоме, находящемся в нормальном (невозбужденном) состоянии, электроны движутся по тем квантовым орбитам, расположенным слоями, о которых мы только что говорили. Это состояние атома, соответствующее минимальной потенциальной энергии, является для него нормальным. Находясь в нем, атом не излучает. Излучение происходит только после того, как атом, благодаря внешним по отношению к нему воздействиям, окажется возбужденным. Возбуждение атома состоит в том, что один или несколько электронов в электронной оболочке атома перебрасываются со своих нормальных орбит на одну из более удаленных от ядра. Возбуждение атомов газа, находящегося в раскаленном состоянии, происходит в результате соударений атомов, а при электрическом разряде — в результате столкновений атомов с ионами или с электронами. Смещение электронов с их орбит наиболее легко может быть осуществлено по отношению к электронам внешних слоев, менее сильно связанным с положительным зарядом ядра, поэтому линейчатые спектры испускания обусловлены переходами электронов, принадлежащих к внешним слоям электронных оболочек атомов. Так называемые полосатые спектры, даваемые разреженными газами при электрическом разряде через них, обусловлены не только движениями электронов, но и колебаниями самих атомов. (Эти спектры относятся к молекулярным спектрам.) С помощью спектроскопов более совершенных, чем обычно употребляемые в школах (большей разрешающей силы), можно убедиться, что полосы этого спектра также состоят из отдельных, близко расположенных друг к другу линий.

Таким образом, происхождение и этих спектров может быть объяснено на основе наших представлений о строении атома и процессов, в нем происходящих.

Более сложным, но вполне возможным оказывается объяснение происхождения и сплошных спектров, даваемых накалированными твердыми телами и жидкостями. На этом вопросе останавливаться здесь не представляется возможным.

Итак, образование линейчатых спектров обусловлено возбуждением атома благодаря перемещению электронов, принадлежащих наружным слоям оболочки атома. В некоторых случаях (например, быстро летящим посторонним электроном) из атома может быть выброшен электрон, движущийся по одной из внутренних, близких к ядру орбит. На место, освободившееся на этой орбите, перескакивает один из внешних электронов. При этом, благодаря большой разности уровней энергии, через которые переходит атом, происходит излучение квантов очень большой энергии. Так как частота излучения прямо пропорциональна величине энергии кванта ($\varepsilon = h\nu$), то в этом случае возникает излучение большой частоты или, что то же, короткой длины волны. Так возникают рентгеновы лучи, когда поток электронов (катодные лучи), идущих от катода в рентгеновой трубке, налетает на антикатод. Известно, что рентгеновы лучи по своей природе тождественны лучам видимого света и отличаются от них своей более короткой длиной волны.

§ 19. Электронная оболочка атомов и химические свойства элементов

Данные о строении электронной оболочки атомов различных химических элементов приводят нас к выводу, что элементы, атомы которых имеют заполненный последний наружный слой электронной оболочки, заканчивают соответствующий период системы элементов. Так, гелий заканчивает первый период, неон ($2 \div 8$ электронов) заканчивает второй период и т. д. Эти атомы, у которых целиком заполнены два, три, четыре и т. д. слоя или у которых в последнем слое имеется 8 электронов (они представляют собою прочную группировку), имеют наиболее устойчивое строение. Оказывается, что у таких атомов очень трудно оторвать электрон, поэтому эти элементы химически не деятельны.

В атомах же элементов, с которых начинается каждый период, начинается построение нового слоя. Атомы,

имеющие последний слой незаконченным, легко отдают электрон с внешнего слоя, как, например, атом лития, имеющий 2 электрона в первом слое и один во втором слое, или дополняют этот слой, принимая один электрон, как, например, атом фтора, имеющий во внешнем слое 7 электронов (для завершения слоя не хватает одного электрона). Два электрона слоя *K* наиболее сильно связаны с ядром, но имеют наименьшую энергию. Чем дальше какой-либо из остальных слоев от слоя *K*, тем больше энергия электронов этих слоев, но тем менее они связаны с ядром, как вследствие большего расстояния от ядра, так и потому, что между ними и ядром

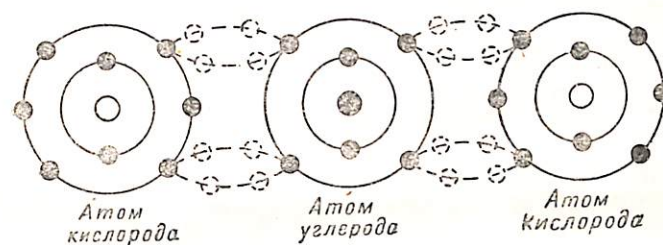


Рис. 15. Схема образования молекулы углекислого газа (ковалентная связь).

находятся другие электроны, частично нейтрализующие влияние положительного заряда ядра. Электроны самого внешнего слоя обладают наибольшей энергией и слабее всего связаны с ядром. Эти электроны принимают участие в химических реакциях. Их называют валентными электронами. От количества валентных электронов зависят химические свойства элементов. При химических реакциях происходит перегруппировка электронов в атомах. Как уже указывалось, ядра атомов не подвергаются каким-либо изменениям в этих реакциях.

При соединении атомов в молекулы, в них так изменяется движение некоторых электронов из числа наиболее удаленных от ядра, что эти электроны оказываются принадлежащими электронным оболочкам нескольких атомов, а не одного (ковалентная связь). На рис. 15 схематично показан такой тип связи между атомами молекул.

В результате „обобщения“ электронов каждый атом кислорода в молекуле углекислого газа во втором слое

имеет по 8 электронов. Таким образом, этот слой атомов кислорода достраивается до 8 электронов, становясь законченным и, следовательно, устойчивым. В свою очередь, и атом углерода в молекуле углекислого газа благодаря „обобщенным“ электронам приобретает законченный второй слой, в котором также оказывается 8 электронов.

На рис. 16 показан другой тип связи между атомами (ионная связь). Она обусловлена переходом электронов из оболочки одного атома в оболочку другого атома.

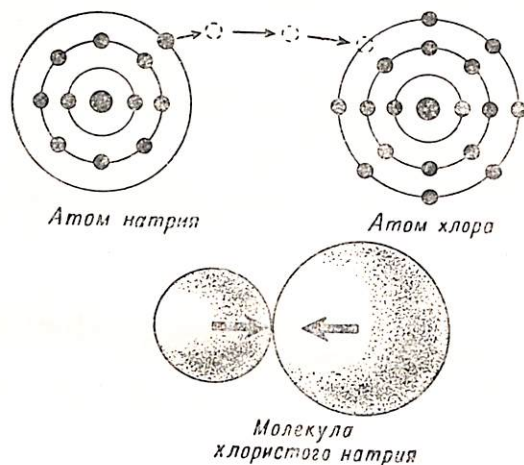


Рис. 16. Схема образования молекулы хлористого натрия (ионная связь).

Благодаря такому переходу электронов атомы, образующие молекулу, обращаются в ионы с зарядами противоположных знаков, взаимно притягивающиеся друг к другу.

В данном случае атом натрия (11 электронов) имеет в третьем слое всего один электрон. Атом хлора (17 электронов) содержит в третьем слое 7 электронов. При сближении этих атомов атом хлора захватывает электрон натрия. Получившиеся ионы, удерживаемые силами электростатического притяжения, образуют молекулу. Разумеется, что получившаяся молекула электрически нейтральна, так как заряды ионов равны по величине и противоположны по знаку.

Со строением электронной оболочки атома учащиеся знакомы из курса химии. Поэтому основной задачей изучения этой части нашей темы (§ 16—19) является: обобщение имеющихся у учащихся сведений — во-первых, и пополнение их некоторыми небольшими по объему, но принципиально существенными по их значению данными — во-вторых. При этом необходимо учесть следующее. Материал § 16 учащимся должен быть известен. Его следует повторить дома к нужному моменту прохождения темы. Применительно к § 17 (строение электронной оболочки) следует сделать такие замечания.

1. Учащиеся, представляя себе структуру строения атомов химических элементов, не знают о том, что орбиты электронов квантуются. Это обстоятельство нужно учесть.

2. Ознакомить учащихся с принципом Паули не представляется возможным. Здесь мы встречаемся с большими трудностями при ознакомлении учащихся с правилами квантования и понятием о спине, без которого нельзя обойтись, говоря о принципе Паули. В тексте § 17 осуществлена попытка дать упрощенную формулировку этого принципа, не противоречащую сути дела. Весьма общие, элементарные представления о принципе Паули могут быть использованы учителем в связи с возможными вопросами со стороны учащихся, наиболее интересующихся физикой.

3. Часть параграфа, где говорится о последовательном заполнении электронных слоев атомов электронами, может быть опущена.

4. Необходимо подчеркнуть, что свойства элементов определяются зарядом ядра его атомов.

Таким образом, по поводу строения электронной оболочки атома (§ 16 и 17) в итоге надо сделать одно дополнение к имеющимся у учащихся в этом отношении знаниям: кратко рассказать о том, что орбиты электронов квантуются.

В § 18, поскольку происхождение линейчатых спектров уже было рассмотрено, существенно ознакомить учащихся с рентгеновыми лучами. Сделать это в том объеме, какой указан, легко и просто, так как база,

нужная для понимания учащимися этого вопроса, у них уже имеется.

Для учащихся следует использовать из § 19 только представление о валентных электронах, сказать об их слабой связи с ядром и указать, что при химических реакциях происходит перегруппировка электронов, ядра же атомов изменений не претерпевают. Остальной материал этого параграфа помещен для учителя.

ГЛАВА IV СТРОЕНИЕ ЯДРА АТОМА

§ 20. Радиоактивность

Изучение строения ядра атома было начато в связи с изучением физиками радиоактивности.

В 1896 г. французский физик Беккерель обнаружил действие какого-то излучения из урана (или из соединений, в которые входит уран) на фотографическую пластинку, завернутую в черную бумагу. Это неизвестное излучение действовало на фотопластинку, как рентгеновы лучи. Кроме того, Беккерель обнаружил и другое свойство лучей, исходящих из урана: заряженный электроскоп, подверженный действию лучей, разряжался (листочки его опадали). Очевидно, лучи вызывали ионизацию воздуха. С этого времени перед учеными встала задача: разгадать природу обнаруженных лучей.

В 1898 г. Мария Кюри¹ открыла, что металл торий (и соединения его) испускают лучи так же, как и уран. Оказалось, что свойство испускать лучи принадлежало не только урану. Это свойство было названо М. Кюри радиоактивностью (от латинского *radius* — луч). В том же 1898 г. Мария Кюри и Пьер Кюри¹ выделили из урановой руды химический элемент, названный ими полонием, который испускал лучи Беккереля (как их называли) в значительно большей степени, чем уран. А через несколько месяцев (в декабре 1898 г.) ими из той же руды было выделено вещество в миллион раз

¹ Мария Кюри, урожденная Склодовская (1867—1934) — известный физик. Уроженка Польши. Основные научные работы выполняла во Франции вместе со своим мужем физиком Пьером Кюри (1859—1906).

более активное, чем уран, названное ими радием. Это было соединение радия — хлористый радий RaCl_2 . В 1910 г. путем электролиза хлористого радия Кюри получили радий в чистом виде.

В настоящее время свойства радия изучены довольно хорошо. Радий — металл серебристого цвета, разлагает воду при обычной температуре. По химическим свойствам близок к барию, с которым вместе и встречается в смоляной руде. Отделение радия от бария — дело трудное и сложное. Радий весьма распространен в природе; он встречается в очень многих минералах и в воде минеральных источников, но в ничтожных количествах. Наиболее богата радием урановая руда, из которой он обычно и добывается. В одной тонне урановой руды содержится около 0,2 г радия. Понятно, что получение радия из урановой руды — задача сложная и дорогостоящая. Получается он обычно в виде хлористой RaCl_2 , или бромистой RaBr_2 соли. Считают, что в настоящее время мировая добыча радия порядка 100 г ежегодно.

Соли радия светятся в темноте. Радиоактивные лучи вызывают многие химические реакции: вода, в которой растворена соль радия, постепенно разлагается на кислород и водород; аммиак распадается на водород и азот; кислород превращается в озон и др. Некоторые непроводники (например, парафин) под действием лучей радия начинают проводить ток. Радий производит и ряд физиологических действий: разрушает ткани организма, убивает бактерии и т. д.

Очень скоро были обнаружены два замечательных свойства радия. Оказалось, что радий непрерывно выделяет довольно значительное количество энергии. Опыты, поставленные Кюри, показали, что в течение часа грамм радия отдает 140 кал тепла. В связи с этим препарат радия всегда имеет несколько более высокую температуру, чем окружающая среда. Во-вторых, оказалось, что никакими физическими воздействиями не удастся повлиять на радиоактивность радия. Следует заметить, что эти „чудесные“ свойства радия были для физиков неожиданными и на первых порах непонятными: где источник этого непрерывного потока энергии, которую отдает радий в течение неопределенно долгого времени? какие процессы в нем происходят, и почему мы не в состоянии на них повлиять?

§ 21. Состав радиоактивного излучения

Дальнейшие исследования лучей радия показали следующее.

Если поместить препарат радия на дне узкого и довольно длинного канала, высверленного в толстом куске свинца, то лучи выйдут из него только в одном направлении, так как по другим направлениям они будут поглощены свинцом. Вышедшие лучи, невидимые глазом, могут быть обнаружены или с помощью экрана, покрытого флюоресцирующим веществом (обычно сернистым цинком), или с помощью фотопластинок, расположенных против канала в свинце на некотором от

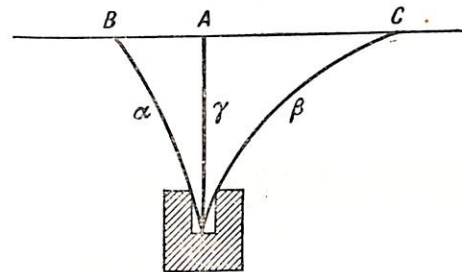


Рис. 17. Действие сильного магнитного поля на лучи радия (магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка и направлено от читателя).

него расстояния. Если взять флюоресцирующий экран, то на нем против канала в свинце появится светящееся пятнышко, в случае фотопластины на ней в этом же месте после проявления обнаруживается темное пятно (след воздействия лучей на эмульсию пластинки). Опыты показали, что если заставить лучи проходить через сильное магнитное поле, то они разделяются на три пучка (рис. 17).

Лучи, слабо отклоняющиеся магнитным полем, получили название α -лучей, сильно отклоняющиеся β -лучей, а лучи, на которые не действует магнитное поле, γ -лучей. Так же делятся на три пучка и по-разному отклоняются α - и β -лучи и в электрическом поле. Эти наблюдения позволили сделать вывод, что лучи радия состоят из электрически заряженных частиц: α - и β -лучей,

которые условно называются нами лучами и которые отклоняются в магнитном и электрическом поле, и γ -лучей, природа которых, очевидно, другая, так как на них не действует ни магнитное, ни электрическое поле. По отклонению α - и β -лучей в магнитном поле можно судить о знаке заряда частиц, из которых они состоят, а сопоставляя эти данные с отклонением частиц в электрическом поле, можно вычислить величину отношения заряда к массе частицы и скорости α -частиц и β -частиц.

Таким путем, а также и другими способами было выяснено, что α -частицы имеют атомный вес, равный 4, и положительный заряд, равный двум элементарным зарядам. Иными словами α -частицы оказались дважды ионизированными атомами гелия. Следовательно, α -частицы — это массивные, положительно заряженные частицы. Двигутся они со скоростью порядка $10\,000\text{ км/сек.}$ Этими частицами и пользовался Резерфорд в своих опытах по рассеянию α -частиц, которые упоминались в § 3. Проникающая способность этих частиц невелика: слой алюминия толщиной в 1 мм задерживает их полностью. В воздухе при нормальном давлении они проходят путь около 7 см. Сталкиваясь с молекулами воздуха, α -частицы выбивают из них электроны, обращая молекулы в ионы. На своем пути α -частица создает огромное количество ионов.

β -лучи оказались потоком электронов, тождественным с потоком известных катодных лучей. Скорости движения β -частиц различны и доходят до огромных значений порядка $270\,000 - 280\,000\text{ км/сек.}$ Так как масса электронов много меньше массы α -частиц, то поэтому они сильнее отклоняются магнитным полем. Проникающая способность β -лучей значительно больше, чем α -лучей: через пластину алюминия толщиной в 1 мм они проходят свободно.

γ -лучи оказались по своей природе подобными рентгеновым лучам и, следовательно, лучам света. Иными словами, γ -лучи есть электромагнитные волны, но с длиной еще меньшей, чем у рентгеновых лучей. Эти лучи не отклоняются ни магнитным, ни электрическим полем и обладают огромной проникающей способностью: они весьма незначительно ослабевают, проходя через алюминиевую пластинку толщиной в 5 мм. Длительное воз-

действие их на животные организмы вызывает трудно заживающие, а иногда и смертельные язвы. Для ограждения людей, работающих с препаратами радия, препараты эти хранят в толстых свинцовых оболочках.

Перед учеными встал вопрос о том, какого же происхождения лучи, испускаемые радием, за счет чего возникает энергия, непрерывно отдаваемая им. Совершенно очевидно, что тяжелая, массивная α -частица, являющаяся сама ядром атома гелия, не могла появиться из электронной оболочки атома радия. Очевидно, что радиоактивность была связана с какими-то процессами внутри ядра атома радия. В эту сторону и были направлены усилия ученых. Но прежде чем говорить о процессах, сопровождающихся радиоактивным излучением, мы должны познакомиться с методами обнаружения излучений радиоактивных веществ.

§ 22. Обнаружение излучений радиоактивных веществ

1. Метод сцинтилляций (мерцаний)

Как известно, целый ряд веществ (платино-синеродистый барий, вольфрамит кальция, сернистый цинк) обладает свойством люминесцировать под действием света, а также и в случае падения на них лучей радия. Если на экран, покрытый, например, сернистым цинком, попадают α -частицы, то, рассматривая этот экран в темноте в лупу, можно увидеть яркие вспышки света (сцинтилляции), производимые отдельными α -частицами, попадающими на экран. Это обстоятельство было использовано Круксом, построившим в 1903 г. прибор, получивший название спинтарископа (рис. 18). Это небольшая трубка, закрытая с одного конца экраном, покрытым сернистым цинком, а с другого — лупой L . Внутри трубки на небольшом расстоянии от экрана укреплена игла, острие которой расположено на оси трубки. На острие иглы наносится ничтожное количество препарата радия (для этого достаточно погрузить острие иглы в раствор

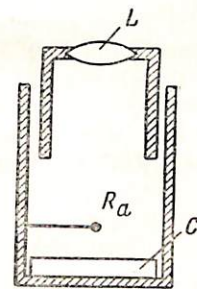


Рис. 18. Спинтарископ.

соли радиоактивного вещества). Если, побыв несколько минут в темной комнате, приучить глаза к темноте, а затем посмотреть на экран спинтарископа через лупу, то можно увидеть на экране множество ярких, отчетливых вспышек. Таким образом, этот простенький приборчик дает возможность обнаружить и даже сосчитать отдельные α -частицы, проявляющие себя этими вспышками. (β -частицы вызывают настолько слабые сцинтилляции, что их наблюдать почти совершенно невозможно.) В наше время метод сцинтилляций применяют только для качественных работ, но его значение в прошлом было очень большое.

2. Камера Вильсона

Водяные пары, обычно находящиеся в воздухе, при известном понижении температуры конденсируются в мельчайшие капельки воды, создающие в воздухе туман. Центрами конденсации являются пылинки или ионы, имеющиеся в воздухе. Если какая-либо частица,

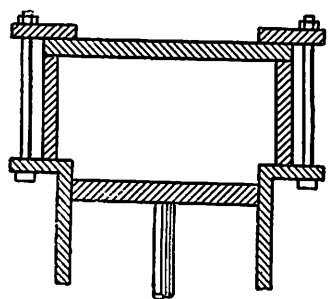


Рис. 19. Схема ионизационной камеры Вильсона.

способная производить ионизацию газа, пролетит через воздух (без пылинок), пересыщенный водяными парами, то ионизируя на своем пути огромное количество молекул, которые явятся центрами образования мельчайших капелек воды, эта частица оставит след в виде тонкой белой полоски тумана, называемой треком. Таким образом, невидимая для глаза частица будет обнаружена.

Это обстоятельство использовал английский физик Вильсон, сконструировавший прибор, получивший название камеры Вильсона. Устройство верхней части камеры показано на рис. 19. В металлическом цилиндре, верхнее основание которого стеклянное, находится подвижной поршень, поверхность которого покрыта желатином, смоченным водой, благодаря которой воздух в камере насыщен водяными парами. Желатин окрашивается в черный цвет, чтобы треки, которые появятся в камере, были лучше видны. В боковой стенке цилиндра

имеется узкая щель, закрытая тонкой пластинкой слюды. Сквозь нее попадают в камеру α -частицы от радиоактивного препарата, расположенного снаружи камеры. При опускании поршня вниз воздух в камере, благодаря происходящему адиабатическому расширению, охлаждается, а имеющиеся в нем пары становятся пересыщенными и образуют туман.

После нескольких качаний поршня все пылинки из воздуха в камере оседают на дно ее, и очередное опускание поршня уже не вызовет образования тумана. Если же в момент расширения воздуха в камере в нем пролетит заряженная частица, то она оставит на своем пути след — трек. Треки можно наблюдать сверху, через дно стеклянного цилиндра.

Часто вместо водяных паров в камере употребляют пары спирта или смесь паров спирта и воды.

Так как в воздухе всегда есть некоторое количество ионов, то, чтобы убрать их, в камере создается электрическое поле. Исследуемые частицы впускаются в камеру в тот момент, когда происходит опускание поршня. Одновременно с этим отключается и только что упомянутое электрическое поле.

Треки фотографируются через верхнее основание камеры, для чего камера освещается пучками лучей света сбоку. Снимки часто делают стереоскопическими.

Камера приводится в действие рукой экспериментатора или автоматически (с помощью мотора). В этом случае все нужные операции (выключение электрического поля, включение осветителя, дающего в нужный момент вспышку света, управление фотоаппаратом) производятся автоматически. С помощью такой камеры можно сделать тысячи снимков (на киноленту) за короткий промежуток времени.

Треки, создаваемые в камере различными частицами, различаются по внешнему виду, так как количество ионизируемых ими молекул различно. α -частица дает трек значительно более толстый, чем β -частица (см. рис. 20). По длине следа частицы в камере Вильсона можно определить энергию частицы.

Приведенные выше на рис. 2 и 3 фотографии получены с помощью камеры Вильсона, сыгравшей огромную роль в деле изучения атома и до сих пор

являющейся одним из основных приборов, с помощью которого обнаруживаются элементарные частицы.

Советский физик Д. В. Скобелцын (род. в 1892 г.) первый предложил при исследовании частиц в камере Вильсона помещать последнюю в магнитное поле. На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила, искривляющая траекторию частицы.

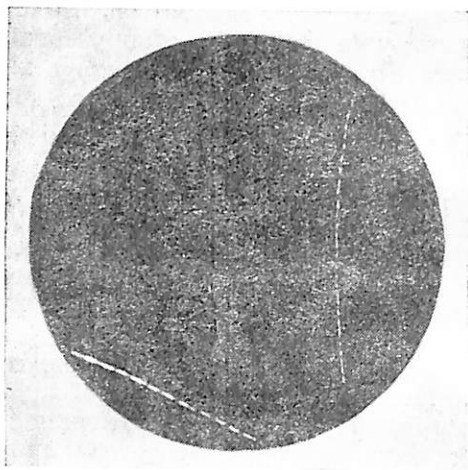


Рис. 20. Фотография следов α - и β -частиц в камере Вильсона.

Направление изгиба траектории дает возможность определить знак заряда частицы, так как направление магнитного поля может быть известно. Измерив радиус траектории и зная массу частицы, можно определить скорость движения ее. Возможно решение и другой задачи: измерив радиус кривизны следа и зная напряженность магнитного поля и заряд частицы, можно определить массу частицы. С другой стороны, заставляя исследуемую частицу двигаться в электрическом поле (траектория заряженной частицы в таком поле тоже искривляется), а затем — в магнитном, можно определить скорость движения частицы и ее массу.

На рис. 21 приведена фотография следов α -частиц, движущихся в магнитном поле, направленном перпен-

дикулярно к плоскости чертежа. Следы частиц искривлены. Направление изгиба показывает, что α -частицы несут положительный заряд.

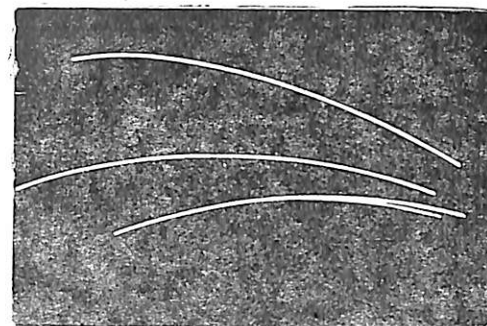


Рис. 21. Фотография следов α -частиц в камере Вильсона, помещенной в магнитном поле.

3. Счетчик Гейгера (с нитью)

Устройство этого прибора показано на схеме рис. 22. Он представляет собою небольшой металлический цилиндр, закрытый с концов крышками из диэлектрика.

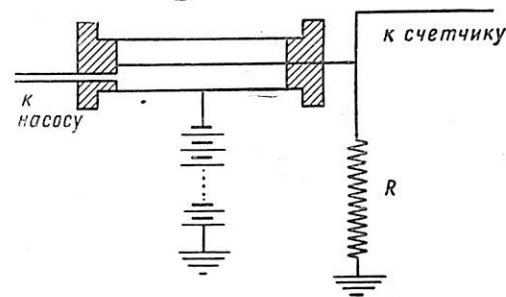


Рис. 22. Счетчик Гейгера.

По оси цилиндра натянута тонкая проволока (стальная, алюминиевая или вольфрамовая), один конец которой заземлен через большое ($10^7 - 10^{10}$ ом) сопротивление. Воздух из цилиндра откачивается до давления от 20 до 10 см рт. ст. Цилиндр присоединяется к одному из полюсов источника тока напряжения порядка 1000—

5000 вольт. Другой полюс батареи заземляется. В результате между провололкой и цилиндром создается сильное электрическое поле. Между нитью и цилиндром подбирается напряжение, очень близкое к тому напряжению, при котором воздух в цилиндре стал бы проводником электричества (в нем возникла бы ударная ионизация). Если в счетчик влетит частица, способная вызвать ионизацию молекул воздуха, то возникшие ионы,

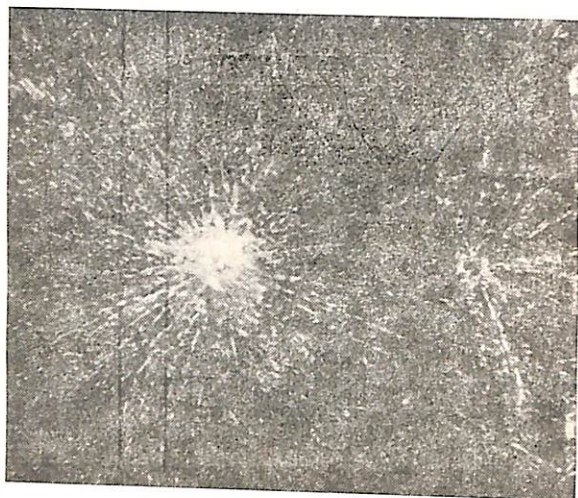


Рис. 23. Микрофотография следов излучения радия.

ускоренные электрическим полем, в свою очередь вызовут ударную ионизацию. Произойдет разряд, через воздух потечет ток. В связи с этим потенциал провололки повышается, разность потенциалов между нитью и цилиндром уменьшается, напряженность поля становится меньше и разряд прекращается. Но заряды с провололки в течение очень короткого промежутка времени (порядка 0,001 сек.) стекают с нее через сопротивление в землю. Тогда прежняя разность потенциалов между нитью и цилиндром восстанавливается и счетчик сможет обнаружить следующую частицу, если она влетит в цилиндр. Счет частиц (счет разрядов) обычно производится автоматически (с помощью чувствительного электростатического электрометра, соединенного с нитью

счетчика; отклонения нити электрометра фотографируются на движущейся пленке).

γ -лучи проходят в счетчик через стенки цилиндра (толщина их невелика). Для пропускания в счетчик α - и β -частиц в стенках его высверливаются многочисленные отверстия, закрываемые тонкими слоями слюды (они должны выдерживать давление, производящееся на них благодаря вакууму в счетчике).

4. Метод толстослойных фотопластинок

Частицы, прошедшие через толстый, специально подобранный светочувствительный слой фотопластинки, вызывают почернение зерен бромистого серебра на своем пути после проявления пластинки. След частиц в светочувствительном слое рассматривается с помощью микроскопа или со следа делается микрофотография (см. рис. 23). Этот способ особенно подробно разработан советским ученым А. П. Ждановым.

§ 23. Радиоактивные превращения. Изотопы

Выше было указано, что радий испускает α - и β -частицы. Подробное исследование явления радиоактивности показало: 1) что свежий, только что изготовленный препарат радия испускает сначала лишь α -частицы, и только через несколько дней появляются β -частицы; 2) что радий выделяет тяжелый газ, по своим свойствам принадлежащий к благородным газам. Этот газ называют эманацией радия или радоном. (Химический символ Rn.) Эти интереснейшие исследования заставили физиков придти к следующим выводам. Очевидно, что α -частица не может быть обязана своим происхождением электронной оболочке атома радия; надо полагать, что она появляется вследствие каких-то превращений, происходящих с ядром атома радия, в результате которых он обращается в атом радона, а этот последний излучает α -частицы. Радону, как и всякому другому газу, присущ определенный спектр испускания. Исследования спектра радона, заключенного в спектральную трубку, показали, что вначале яркий спектр радона в течение нескольких дней становится слабее, но наряду с ним появляется спектр гелия, а еще через несколько дней спектр радона исчезает, остается яркий спектр

гелия, а на стенках трубки появляется тончайший налет твердого вещества, которое также оказывается радиоактивным. Таким образом, радон превращается в другие вещества, одним из которых является гелий.

Ясно, что атомы радия претерпевают распад, в результате чего происходят превращения одного химического элемента в другой, причем некоторые из появляющихся новых элементов оказываются тоже радиоактивными и с ними также происходят превращения.

Остановимся на этих радиоактивных превращениях несколько подробнее.

Ядро атома радия, распадаясь, выбрасывает α -частицу. Вследствие чего: 1) атомный вес этого химического элемента уменьшается на 4 единицы; 2) в связи с тем, что α -частица имеет двойной положительный элементарный заряд, с ее уходом из ядра заряд последнего уменьшается на 2 единицы. Известно, что химические свойства элемента и его место в периодической системе элементов зависят от величины заряда его ядра, всегда равного порядковому номеру элемента. Поэтому атом радия ($Z=88$), выбросив α -частицу, обращается в атом другого химического элемента с меньшим атомным весом на 4 единицы и с порядковым номером, меньшим на 2 единицы. Таким элементом является радон ($Z=86$).

Радон оказывается тоже радиоактивным. Ядро его атома распадается, излучая α -частицу. Рассуждая в отношении его так же, приходим к выводу, что он обратится в новый элемент с порядковым номером 84. В таблице Менделеева под этим номером значится радиоактивный элемент полоний. Существенно заметить, что ядро атома нового элемента, получившегося в результате распада ядра радона, имеет заряд такой же, как ядро атома полония, но атомный вес его другой. Подчеркнем еще раз, что так как все химические свойства элемента обусловлены только величиной положительного заряда ядра, то химические свойства этого нового элемента и полония совершенно тождественны, они отличаются друг от друга только атомным весом. А поэтому химическими средствами отделить их друг от друга нельзя. Атомы, имеющие одинаковые ядра, с одинаковыми зарядами, но различной массы, называются изотопами (от греческих слов, означающих — „ра-

вноместные“, помещаются на одном и том же месте периодической системы и имеют один и тот же порядковый номер). Атомы изотопов в нормальном состоянии (не ионизированные) имеют не только одинаковые заряды ядер, но совершенно одинаковую электронную оболочку. Таким образом, продукт распада ядра атома радона является изотопом полония. Он получил название радия А (RaA).

Радий А ($Z=84$), выбрасывая α -частицу, переходит в изотоп свинца, получивший название радия В ($Z=82$).

Радий В излучает β -частицу. Так как масса атома сосредоточена в его ядре, то поэтому атомный вес элемента не изменяется, но потеря одного элементарного отрицательного заряда эквивалентна увеличению положительного заряда ядра на один положительный элементарный заряд. В связи с этим изменением заряда ядра получается атом химического элемента, расположенного на одно место дальше от начала периодической системы элементов. В итоге радий В ($Z=82$) обращается в изотоп висмута ($Z=83$), названный радием С (RaC). На этом цепь превращений радия не заканчивается. Оказывается, что путем дальнейших последовательных превращений он переходит в изотоп свинца — радий G (RaG), который оказывается уже не радиоактивным.

Таким образом, не только сам радий, но и продукты его распада, кроме конечного, оказались радиоактивными. Выяснилось, что радиоактивные вещества образуют целые, как говорят, семейства (или ряды). Различают три основных семейства радиоактивных веществ: семейство урана (радий является одним из членов этого семейства), тория и актиния. Во всех этих трех семействах ряд радиоактивных превращений заканчивается на элементах нерадиоактивных, а именно на устойчивых изотопах свинца.

§ 24. Закон смещения

Из приведенных выше радиоактивных превращений элементов видно, что они связаны с распадом ядер атомов, сопровождающимся испусканием α -частицы (α -распад) или β -частицы (β -распад). Превращения элементов, связанные с α -распадом и β -распадом, происходят

в соответствии с законом, получившим название закона смещения. Он может быть сформулирован следующим образом: „В результате α -излучения образуется элемент, стоящий в периодической системе на два места ближе к началу системы, в результате β -излучения — элемент, стоящий на одно место дальше от начала системы“.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 20—23 и 28 может быть изложен на одном уроке, при 6 часах, отведенных для изучения темы. Осуществляя этот вариант, необходимо учесть следующие обстоятельства, а именно: учащиеся знакомы из курса химии с явлением радиоактивности, с составом радиоактивного излучения (§ 20, 21) и с изотопами (§ 23).

Поэтому надо задать учащимся на дом повторить эти вопросы к уроку, на котором они будут рассматриваться. Надо иметь в виду, что объем фактического материала, изучаемого учащимися, будет значительно меньше содержащегося в данной книге. Но это расширение (в частности, вопроса о радиоактивных превращениях) произведено в интересах учителя.

По отношению к материалу § 20, 21 и 23 полезно обратить внимание учащихся на следующее:

- 1) на непрерывное выделение энергии, происходящее при радиоактивном распаде;
- 2) на то, что распад связан с какими-то процессами внутри атома;
- 3) на невозможность разделения изотопов химическим путем.

Об экспериментальных методах ядерной физики (§ 22) придется сказать очень кратко (о спинарископе и о камере Вильсона), уделив основное внимание на этом уроке материалу § 23. Весь остальной материал § 22, а также и § 20 и 21 может быть использован во внеклассной работе. Крайне желательно на внеклассных занятиях познакомить учащихся и с законом смещения (§ 24).

При изучении § 22 можно дать учащимся на дом задачи № 3 и 4 на стр. 21 и 22 и задачу № 5 на стр. 34 книги Л. И. Резникова и В. Ф. Юськовича. Для реше-

ния задачи № 4 могут быть использованы рис. 20 и 21 в настоящей книге, штриховые копии которых можно достаточно быстро воспроизвести на классной доске.

При опросе учащихся по материалу § 20—23 полезно учесть те основные вопросы, связанные с радиоактивностью, которые указаны нами выше. Так же существенно проверить знания учащихся (в общих чертах) об устройстве и действии камеры Вильсона, на которую в дальнейшем учителю придется часто ссылаться. В связи с рассмотрением принципа действия камеры может оказаться необходимым демонстрировать понижение температуры газа при адиабатическом его расширении. Для этого надо взять толстостенную стеклянную банку, налить в нее немного винного или денатурированного спирта, банку заткнуть пробкой, пропустив через нее стеклянную трубку, на наружный конец которой надеть резиновую трубку. С помощью насоса (например, Шинца) накачиваем в банку воздух. При некотором давлении в банке, превышающем атмосферное, пробка вылетит из банки. Произойдет адиабатное расширение воздуха в банке, сопровождающееся понижением температуры. В результате водяные пары в банке конденсируются и в ней появляется хорошо видимый туман. В камере Вильсона, при опускании поршня, происходит расширение газа, сопровождающееся понижением температуры, так что пары в камере становятся пересыщенными. Пыли в газе, наполняющем камеру, нет. Пары конденсируются на ионах, образующихся при полете в камере той или иной заряженной частицы (см. § 22).

§ 25. Период полураспада

Естественно, что в результате радиоактивного распада вещества количество атомов его уменьшается. Убытие радиоактивного вещества происходит в геометрической прогрессии. Это значит, что если от данного количества атомов радиоактивного элемента в течение некоторого определенного для каждого элемента промежутка времени останется половина, то в течение последующего такого же промежутка времени его останется половина от этой половины и т. д. Время, в течение которого распадается половина всех атомов

данного вещества, называется периодом полураспада этого вещества. Период полураспада радиоактивных веществ чрезвычайно различен. Например, для урана он равен $4,5 \cdot 10^9$ лет, для радия — 1590 лет, для радона (эманация радия) — 3,82 дня, для радия А — 3 минуты, а для радия С¹ — всего около 10^{-6} сек. и т. д. Из этих данных видно, что уран распадается крайне медленно, радий значительно быстрее. Поэтому в природных минералах урана бывает всегда больше радия. Зная период полураспада радиоактивных веществ, например урана, можно определять геологический возраст пород, в которых они находятся, а по нему судить о возрасте самой Земли. В самом деле, конечными продуктами распада урана являются изотоп свинца RaG и гелий (в результате выделения α -частиц). Если уран включен в породу так, что продукты его распада, например, свинец, остаются тут же, то, определив количество урана и свинца в породе, можно вычислить время, в течение которого образовалось это количество свинца. По этим данным возраст земной коры исчисляется около $2,5 \times 10^9$ лет.

§ 26. Энергия радиоактивного излучения

Испускаемые радиоактивным веществом α - и β -частицы представляют собою частицы, движущиеся с очень большими скоростями. Как уже указывалось, масса и скорость этих частиц могут быть достаточно точно вычислены. Отсюда может быть вычислена их кинетическая энергия. Энергия быстро движущихся частиц обычно подсчитывается в особых единицах — электрон-вольтах. Электрон-вольт — это энергия, которую получает электрон, пройдя в электрическом поле разность потенциалов в 1 вольт. Величина этой единицы энергии может быть определена по известной формуле, которой пользуются при подсчете работы по перемещению заряда в поле (энергия, которую приобретает заряд, и равна этой работе):

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Принимая заряд электрона, равным $4,8025 \cdot 10^{-10}$ абс. электрост. единиц заряда, и вольт, равным $\frac{1}{300}$ абс.

электрост. единицы потенциала, получаем:

$$A = 4,8025 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1}{300} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эргов.}$$

В итоге 1 электрон-вольт (eV) = $1,6 \cdot 10^{-12}$ эргов. При пересчете на калории получаем $(1,6 \cdot 10^{-12} \cdot 0,24 \times 10^{-7}) = 3,83 \cdot 10^{-20}$ кал.

Часто употребляют единицу энергии в миллион раз большую — мегаэлектрон-вольт (MeV). Очевидно, $1 MeV = 1,6 \cdot 10^{-6}$ эргов или $3,83 \cdot 10^{-14}$ кал.

Иногда употребляется килоэлектрон-вольт (KeV), равный 1000 eV . Энергия α - и β -частиц и может быть вычислена в электрон-вольтах или калориях. Разумеется, что может быть вычислена и энергия γ -лучей, по своей природе подобных лучам видимого света. Вычислено и количество частиц, испускаемых одним граммом радия в секунду. В итоге можно определить ту энергию, которая выделится из 1 г радия при его полном превращении в свинец (RaG). Оказалось, что она равна примерно $3,2 \cdot 10^8$ кал. Эта теплота, которую можно получить, сжигая около 0,5 тонны угля. О величине выделяемой радием энергии можно судить по такому примеру: энергия, выделяющаяся при превращении одного атома радия в атом радона, в полтора миллиона раз больше, чем энергия, выделяющаяся при образовании одной молекулы воды из кислорода и водорода (при горении водорода; а это одна из самых энергичных химических реакций).

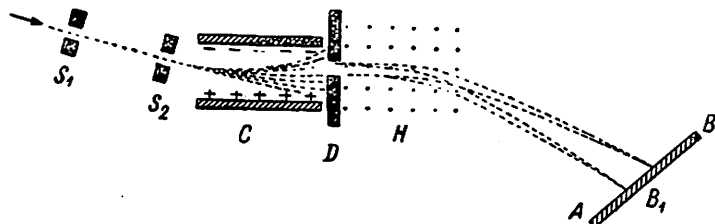
Но при всех таких расчетах надо иметь в виду медленность распада радия. Конечные размеры выделенной энергии огромны, энергия же, выделенная за небольшие промежутки времени, невелика: грамм радия (вместе со своими продуктами распада) выделяет около 140 кал в час.

§ 27. Изотопы нерадиоактивных элементов. Атомный вес. Массовое число

Исследование радиоактивности показало, что радиоактивные элементы имеют изотопы. Естественно, что возник вопрос о том, имеются ли изотопы нерадиоактивных элементов. Ответ на этот вопрос был получен следующим путем.

практически равна массе атома. Используя это обстоятельство, удалось уже в 1913 г. установить, что неон имеет атомы с несколько различной массой. Но окончательные достоверные данные о существовании изотопов

На рис. 25 показана часть прибора, находящаяся за катодом разрядной трубки. S_1 и S_2 — очень узкие щели в перегородке, разделяющей трубку. В показанной на



рисунке части трубки создан высокий вакуум. Пучок каналовых лучей (ионов газа), выделенный щелями S_1 и S_2 , проходит через электрическое поле, перпендикулярное направлению пучка, созданное конденсатором C . Величина отклонения частиц зависит от их скорости. Так как она различна, то частицы развернутся веером. Из этого веера диафрагма D выделит пучок частиц с близкими друг к другу скоростями. Далее этот пучок попадает в сильное магнитное поле H , отклоняющее их

| Number of Children (kr.) | Percentage (%) (VIII) |
|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 40 |
| 1 | 42 |
| 2 | 78 |
| 3 | 80 |
| 4 | 82 |
| 5 | 83 |
| 6 | 84 |
| 7 | 86 |

В настоящее время установлено, что подавляющее большинство элементов имеют изотопы. Именно этой причиной обусловлено то обстоятельство, что атомные веса элементов выражаются дробными числами, но атомные веса изотопов всех элементов по отношению к водороду выражаются почти целыми числами.

И водород имеет изотопы, атомные веса которых 1, 2 и 3. Изотоп водорода с атомным весом 2 (открыт в 1932 г.) называется дейтерием, а ядро атома этого изотопа — дейтоном или дейтеронном. Воду, в молекулу которой входит тяжелый водород, называют тяжелой водой. Ее молекулярный вес 20,027, а не 18,016. Физические свойства тяжелой воды отличны от обыкновенной; плотность ее $1,11 \text{ г/см}^3$, точка отвердевания $+3,8^\circ\text{C}$; наибольшая плотность при $+11,6^\circ$, точка кипения при нормальном давлении $101,42^\circ\text{C}$. Отличны и биологические свойства тяжелой воды: семена растений не про-

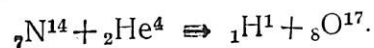
растают, рыбы гибнут. Тяжелая вода содержится в обыкновенной в ничтожных количествах. Она может быть выделена из обыкновенной воды электролизом, так как разложению подвергается легкая вода и, следовательно, количество тяжелой воды в электролитической ванне постепенно увеличивается. Так как тяжелой воды в обыкновенной очень немного, получение ее электролизом — дело очень длительное и требующее больших расходов электроэнергии. (Для получения 1 тонны чистой тяжелой воды надо разложить 10^{16} тонн природной воды, затратив на это электроэнергию в количестве 10^8 квт-ч).

В 1935 г. открыт изотоп водорода с атомным весом 3. В природе он не встречается. Его получили в процессе ядерных реакций.

§ 28. Расщепление атомных ядер. Протон

Данные изучения явления радиоактивности, свидетельствуя о том, что ядра химических элементов обладают сложной структурой, не давали еще возможности уверенно судить о том, из каких частиц ядро построено. Более достоверные сведения о строении ядра атомов были получены в результате многочисленных опытов по расщеплению ядер различных химических элементов.

В 1919 г. Резерфорд производил обстрел атомов азота α -частицами, испускаемыми радием. Результаты этих опытов оказались поразительными: α -частица при столкновении с ядром атома азота выбивала из него какую-то частицу. По отклонению этой частицы в магнитном поле (см. § 22) Резерфорд установил, что она является ядром атома водорода — протоном. Происхождение протона Резерфорд объяснил следующим образом: при столкновении с ядром атома азота α -частица захватывается этим ядром. Ядро становится неустойчивым и распадается, выбрасывая с большой скоростью протон. В итоге получают протон и новое ядро, состоящее из остатка ядра азота с присоединившейся к нему α -частицей. Это новое ядро оказалось ядром одного из изотопов кислорода. Такого рода реакции называют ядерными реакциями. Только что описанная ядерная реакция записывается следующим образом:



Числа, стоящие выше символа элемента, обозначают массовые числа, число ниже символа элемента обозначает заряд ядра в элементарных единицах, равный порядковому номеру элемента. При записи ядерных реакций сумма масс в левой и правой частях равенства, а также и суммы зарядов в них должны быть равны. (В действительности массы ядер незначительно отличаются от целых чисел. Ядерные реакции сопровождаются изменениями энергии ядер, а в связи с этим изменяется и их масса. С этой точки зрения приведенная запись ядерной реакции не является полной.)

Эта реакция была первой ядерной реакцией, осуществленной человеком, экспериментально доказавшей возможность превращения одного химического элемента в другой.

На рис. 27 приведена фотография этой реакции в камере Вильсона (камера была наполнена азотом). Снимок стереоскопический. След одной из α -частиц разветвляется в вилку — это в результате столкновения ее с ядром атома азота. Тонкая и длинная ветвь вилки — след протона, а другая, короткая и толстая — след ядра кислорода O^{17} .

Изучая эту фотографию, нельзя предположить, что вилка — следы α -частицы и ядра азота, претерпевших столкновение, так как направление следов явно противоречит законам механики упругого соударения двух частиц. Записанная выше ядерная реакция была проверена с помощью таких фотографий. Измеряя пробеги протона и массивного ядра, а также углы между их следами и следом α -частицы, можно было при помощи закона сохранения количества движения убедиться, что тяжелая частица — ядро изотопа кислорода O^{17} .

Резерфордом, а вслед за ним и многими другими учеными было произведено огромное количество опытов по расщеплению атомных ядер различных элементов.

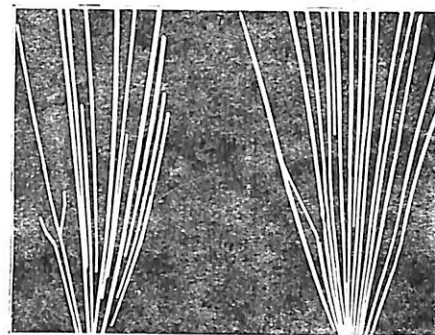


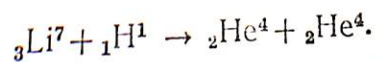
Рис. 27. Расщепление ядра азота α -частицей.

Многочисленные опыты по расщеплению ядер очень многих элементов (неона, магния, кремния, серы, хлора и др.) имели то общее, что при распаде ядер атомов из них выбрасывался протон. Вот для примера еще одна из таких ядерных реакций;



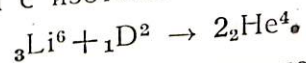
В результате этой ядерной реакции между фтором и α -частицей получились протон и ядро атома неона.

В указанных выше опытах в качестве снаряда для расщепления ядер служила α -частица. Очень скоро в качестве частицы, вызывающей расщепление, стали употреблять протон. Таким путем были осуществлены очень многие ядерные реакции, в частности, по расщеплению ядра лития:



Как видим, в результате захвата протона ядром лития, оно распадается на две α -частицы, разлетающиеся с огромными скоростями (более 20 000 км/сек).

Стали применять в качестве снаряда и дейтерон, например в реакции с изотопом лития:



Основными затруднениями в осуществлении служили два обстоятельства.

1) Столкновения α -частиц с ядром атома „обстреливаемого“ вещества крайне редки; как показывают подсчеты, только около 20 α -частиц из 1 миллиона сталкиваются с ядрами атомов. Блэкетт, производя обстрел атомов азота α -частицами в камере Вильсона, сделал 23 000 фотографий. Из них только в нескольких удалось зафиксировать упомянутую реакцию.

2) В приведенных нами ядерных реакциях снарядами служили α -частицы, протон и дейтерон. Существеннейшим недостатком в применении этих частиц в качестве снарядов было то обстоятельство, что все они обладают положительным зарядом, так же как и те ядра, которые надо было разрушать этими снарядами. В связи с этим, для того чтобы эти частицы проникли в положительно заряженное ядро, они должны были иметь очень большие энергии (а значит, и скорости). Энергии частиц, вылетающих при радиоактивных

процессах, различны; часто порядка миллионов электрон-вольт. Для расщепления ядер надо было иметь в своем распоряжении частицы, по крайней мере, такой же энергии, чтобы освободиться от необходимости пользоваться препаратами радия, неудобными во многих отношениях. Так возникла необходимость сконструировать приборы, с помощью которых можно было бы „разогнать“ частицы-снаряды до скоростей, при которых энергии частиц было бы достаточно для расщепления ядер. Об этих приборах будет кратко рассказано в § 34.

Осуществление ядерных реакций позволило сделать некоторые обоснованные предположения о строении ядер атомов. Явление радиоактивности свидетельствовало о сложном строении ядер атомов. С другой стороны, открытие изотопов позволило установить, что атомные веса всех изотопов выражаются почти целыми числами. Все это наталкивало на мысль о том, что ядра атомов всех химических элементов построены из каких-то одинаковых частиц. Но каких?

Атом самого легкого элемента — водорода — состоит из одного электрона и ядра, несущего один элементарный положительный заряд — протона. Об атомах остальных элементов — безусловно достоверно известно было число электронов в оболочке различных атомов (оно надежно устанавливалось данными изучения спектров), а также, что заряд ядра любого атома больше заряда протона в целое число раз. Было высказано предположение, что ядра атомов всех элементов состоят из этих элементарных частиц, т. е. из протонов. Результаты расщепления ядра α -частицами с несомненностью подтвердили правильность этого предположения.

Перед учеными встал новый вопрос: есть ли в ядрах атомов еще какие-либо частицы, кроме протона, и как объяснить равенство между положительным зарядом ядра и отрицательным зарядом электронов в оболочке атома.

Возьмем для примера атом гелия. Его атомный вес 4. Известно, что в электронной оболочке его 2 электрона. Если допустить, что его ядро состоит только из 4 протонов, то тогда атом не был бы электрически нейтральным, а имел бы положительный заряд, равный двум элементарным единицам, что явно противоречило опытным данным. Оставалось предположить, что в ядре атома гелия, кроме 4 протонов, имеется еще 2 элек-

трона, кроме двух электронов в оболочке атома. Такой атом оказался бы электрически нейтральным. Думали, что таким же образом построены ядра атомов и всех остальных химических элементов. Так возникла гипотеза о существовании внутриядерных электронов. Казалось, что существование внутриядерных электронов подтверждается и явлением радиоактивности: распад ядра атома радия сопровождается испусканием β -лучей электронов. Заметим, что дальнейшее изучение строения ядра показало, что это предположение было неверным и что в ядре атома нет электронов. К тому же выводу приводит и теория: волновая механика доказывает, что в ядре атома не может быть электронов. Итак, несомненным оказалось пока только одно: в состав ядра входят протоны. Дальнейшие данные о строении ядра надо было искать в опытах по расщеплению ядер. И они были получены с открытием новой частицы — нейтрона.

§ 29. Открытие нейтрона

Опыты по бомбардировке α -частицами ядер атомов различных элементов продолжались. В 1930 г. было обнаружено, что при бомбардировке α -частицами атомов ряда химических элементов последние становятся источниками каких-то лучей, обладающих огромной проникающей способностью. Существование этих лучей было подтверждено и опытами Ирэн Кюри и ее мужа Жюлио, производившимися в 1931 г. Особенно сильные излучения

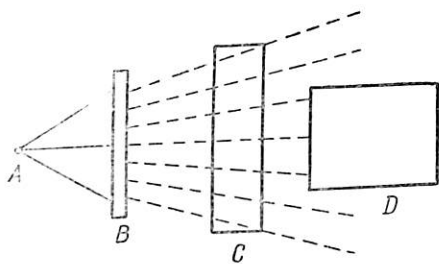


Рис. 28. Схема опыта для обнаружения нейтронов.

возникали при обстреле α -частицами бериллия (${}^9_4\text{Be}$). Схема этих опытов показана на рис. 28, где A — препарат радия, испускающий α -частицы, B — обстреливаемое вещество (бериллий или бор), C — пронизываемое вещество и D — камера Вильсона. Оказалось, что эти новые лучи не отклоняются ни магнитным, ни электрическим полем.

В 1932 г. было обнаружено, что новые лучи в состоянии сообщать ядрам атомов многих элементов очень большие скорости. В связи с этими свойствами пришли к выводу, что новые лучи состоят из потока материальных частиц, не обладающих зарядом. Эти частицы были названы нейтронами. Нейтрон, не обладая электрическим зарядом, не взаимодействует ни с электронами, ни с ядром атома. Этим объясняется его огромная проникающая способность. По этой же причине он почти не производит ионизации и потому не оставляет следов в виде треков в камере Вильсона. Но в случае так называемого лобового столкновения быстро движущегося нейтрона с ядром атома он сообщает последнему большую скорость. Это ядро отдачи, как его называют, вызовет на своем пути ионизацию газа в камере и, значит, появление трека. Таким образом, оказывается все же возможным обнаружить нейтрон.

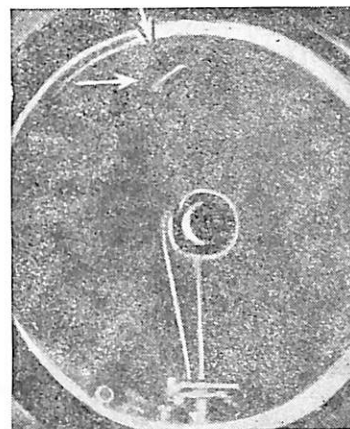


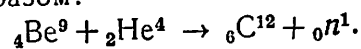
Рис. 29. Фотография следа ядра азота, претерпевшего столкновение с нейтроном.

На рис. 29 приведена фотография, показывающая след движения ядра азота после столкновения с нейтроном. В центре фотографии видна трубочка с препаратом полония, испускающего α -частицы, и бериллия, из которого вылетают не оставляющие следов нейтроны. Внизу снимка видна пластинка с очень слабым препаратом радия, от которой идут два трека α -частиц. Эта пластинка введена в камеру, чтобы убедиться в том, что она нормально работает. В левом верхнем углу фотографии виден короткий, широкий трек (указанный стрелками), явно принадлежащий какой-то массивной частице. Это след ядра азота находившегося в камере, который оставлен ядром после его столкновения с нейтроном.

Наполняя камеру различными газами, можно изучать движение ядер отдачи различных элементов. Отсюда можно вычислить скорость и массу нейтрона.

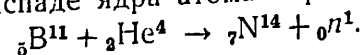
*

Оказалось, что масса нейтрона почти равна массе протона. Так был открыт нейтрон. Значение этого открытия было огромным: оно помогло окончательно решить вопрос о строении ядер атомов и дало в руки ученых мощное оружие для дальнейшего расщепления ядер. Итак, в результате расщепления ядер атомов бериллия появляются нейтроны. Эта реакция записывается следующим образом:

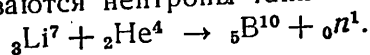


Нейтрон обычно обозначается буквой n , отсутствие у него заряда — нулем, массовое число — 1. Как видим, в результате расщепления ядра бериллия α -частицей получаются атом углерода и нейтрон.

Дальнейшие опыты по расщеплению ядер показали, что нейтрон появляется не только в случае бомбардировки α -частицами бериллия, но и при распаде ядер атомов и других элементов. Так, например, появляется нейтрон при распаде ядра атома бора:



В результате этой реакции получают ядро азота и нейтрон. Выбываются нейтроны также и из ядер лития:



В этом случае в итоге получают ядро бора и нейтрон.

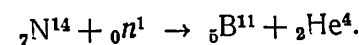
Все эти опыты с несомненностью подтвердили, что в состав ядер атомов, наряду с протоном, входят и нейтроны. Строение ядер атомов, наконец, оказалось выясненным.

Открытие нейтрона имело еще и другое значение. В предыдущем параграфе были указаны недостатки использования положительно заряженных частиц в качестве снарядов для расщепления ядер. С открытием нейтрона положение резко изменилось. Нейтрон, будучи электрически нейтральным, оказался чрезвычайно пригодным для расщепления ядер.

Наиболее мощным источником нейтронов является пластинка из бериллия, обстреливаемая дейтеронами. Очень часто в качестве источника нейтронов (менее мощного, чем только что указанный) употребляют трубочку, наполненную порошком бериллия и эманией радия. Вследствие действия α -частиц на бериллий им испускаются нейтроны.

После того как был открыт нейтрон, его быстро применили для осуществления многих ядерных реакций.

Приведем одну из них: реакцию нейтрона с ядром азота. Реакция протекает по следующей схеме:



Как видим, ядро азота, захватив нейтрон, распадается на ядро бора и ядро гелия.

Ядра атомов очень многих элементов, в том числе и урана, подверглись бомбардировке нейтронами. К этой последней реакции, имеющей огромное значение, мы вернемся несколько позже.

§ 30. Строение ядер атомов химических элементов

Результаты осуществленных ядерных реакций привели к заключению, впервые высказанному советским ученым Д. Д. Иваненко, что ядра атомов всех химических элементов состоят только из протонов и нейтронов.¹ Количество протонов и нейтронов в ядрах атомов различных элементов — различно. Представим себе строение ядер атомов некоторых химических элементов. Обозначим атомный вес элемента (в целых единицах, т. е. массовое число изотопа) буквой A , порядковый номер элемента — Z , число протонов в ядре — N_p , число нейтронов в ядре — N_n .

| Название элемента | Символ | Порядковый номер | Атомный вес (в целых единицах) | Число протонов в ядре | Число нейтронов в ядре | Число электронов в оболочке атома |
|--------------------|--------|------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Водород | H | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Гелий | He | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| Литий | Li | 3 | 7 | 3 | 4 | 3 |
| Бериллий | Be | 4 | 9 | 4 | 5 | 4 |
| Бор | B | 5 | 11 | 5 | 6 | 5 |
| Углерод | C | 6 | 12 | 6 | 6 | 6 |
| Уран | U | 92 | 238 | 92 | 146 | 92 |

¹ Тяжелые частицы с массой порядка массы протона в отличие от легких частиц получили общее название „нуклонов“

Заряд ядра атома обусловлен только протонами, так как нейтрон электрически нейтрален. Следовательно, число протонов в ядре равно порядковому номеру элементов (и, разумеется, равно числу электронов в оболочке атома, когда он не ионизирован).

Следовательно:

число протонов в ядре $N_p = Z$; $Z = N_p$

число нейтронов в ядре $N_n = A - N_p$; $A = N_p + N_n$.

Таким образом, масса ядра складывается из массы протонов и массы нейтронов.

В итоге, ядра атомов различных элементов отличаются друг от друга различным количеством содержащихся в них протонов и нейтронов. Ядра атомов изотопов одного и того же элемента имеют одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Поэтому ядра изотопов имеют одинаковый заряд, а следовательно, и одинаковые химические свойства, но различную массу.

Так, например, кислород имеет 3 устойчивых изотопа: O^{16} , O^{17} , O^{18} , смесь которых и дает так называемый природный кислород, но кроме того, имеются еще два неустойчивых (радиоактивных) изотопа O^{15} и O^{19} .

Очевидно, что число протонов и нейтронов в ядрах их следующее:

| | N_p | N_n |
|----------|-------|-------|
| O^{15} | 8 | 7 |
| O^{16} | 8 | 8 |
| O^{17} | 8 | 9 |
| O^{18} | 8 | 10 |
| O^{19} | 8 | 11 |

Природные элементы представляют собой смесь нескольких изотопов. Атомный вес элемента есть средний атомный вес его изотопов, поэтому он и выражается дробными числами.

По современным представлениям, между протонами и нейтронами в ядре существуют особые („обменные“) силы (см. § 35), обращающие ядро в прочную, устойчивую систему.

§ 31. Строение ядра и радиоактивность. Нейтрино

Было указано, что явления радиоактивности свидетельствуют о сложном строении ядра атома радия и других радиоактивных элементов. Очень кратко остановимся на объяснении радиоактивности с точки зрения тех представлений о строении ядра атома, которые только что изложены.

В § 23 было сказано, что радиоактивные превращения обусловлены α - и β -распадом ядер; причем α -распад чаще всего сопровождается испусканием γ -лучей.

Как можно объяснить распад ядер? По этому поводу можно сказать следующее.

Взаимосвязанные друг с другом частицы, входящие в состав ядра, могут быть сгруппированы внутри него различным образом. В связи с этим ядро может обладать большим или меньшим запасом энергии (причем энергетические состояния ядра не непрерывны, а квантуются), а сама группировка частиц в ядре может быть в различной степени устойчивой. Если ядро окажется в неустойчивом состоянии, то тогда оно испускает α -частицу (при α -распаде). При испускании α -частицы происходит перестройка ядра, в результате которой оно может оказаться или в основном или в возбужденном состоянии. В первом случае вся энергия, выделяющаяся при перестройке ядра, передается α -частице, γ -излучения не будет. Во втором случае ядро, переходя в основное энергетическое состояние из возбужденного, излучает γ -квант.

Происхождение β -лучей более сложное. Как уже указывалось, в ядре атома электронов нет. Часть электронов, входящих в β -лучи, связана с перестройкой ядра. По современным воззрениям, эти электроны появляются в момент превращения ядра.

Происходит этот процесс следующим образом. Отдельные нейтроны, входящие в состав ядер атомов радиоактивных элементов, самопроизвольно превращаются в протоны. Каждый отдельный акт такого превращения нейтрона в протон сопровождается испусканием электрона. При этом, кроме электрона, испускается еще и другая частица, не имеющая заряда и обладающая массой, значительно меньшей массы электрона. Эта частица

получила название „нейтрино“, что означает „маленький нейтрон“. Существование нейтрино было вначале выдвинуто в качестве гипотезы для объяснения кажущегося нарушения закона сохранения энергии при β -распаде. (Это обстоятельство дало повод некоторым физикам-идеалистам утверждать, что при β -распаде закон сохранения энергии не имеет места.) Дело в том, что может быть точно вычислена энергия ядра до испускания электрона и после этого. С точки зрения закона сохранения энергии испущенный электрон должен обладать энергией, в точности равной разности этих энергий. Исследования же показали, что электроны при β -распаде чаще всего обладают энергией, меньшей этой разности. В связи с этим и было предположено, что, наряду с электроном, вылетает еще одна частица — нейтрино, которая и несет с собой недостающую энергию.

Непосредственное экспериментальное обнаружение нейтрино невозможно, так как вследствие ничтожной массы и отсутствия заряда нейтрино практически не взаимодействует с веществом, свободно проходя „сквозь“ него. Однако имеются косвенные пути экспериментального подтверждения существования нейтрино. Существование этой частицы убедительно подтверждается также рядом косвенных очень веских соображений, так что в настоящее время реальность существования нейтрино не вызывает никаких сомнений.

Так происходит β -распад, сопровождающийся γ -излучением. Кроме этих электронов, связанных с ядерными превращениями, в β лучи входят электроны, вырванные γ -квантами, сопровождающими α - и β -распад, из внутренних слоев электронной оболочки самого атома. (Несколько подробнее об этом см. в § 35.)

§ 32. Искусственная радиоактивность. Позитрон

В 1934 г. Ирэн Кюри и Жолио натолкнулись на чрезвычайно интересное явление. При бомбардировке алюминия α -частицами появлялись не только протоны и нейтроны, но и позитроны. Позитроном была названа частица с массой, равной массе электрона, но имеющая элементарный положительный заряд, а не отрицатель-

ный, как у электрона. Существование позитрона было предсказано теорией, а в 1932 г. было подтверждено экспериментально Андерсоном при изучении космических лучей, приходящих на Землю из глубин Вселенной (§ 44).

На рис. 30 дана фотография, сделанная с камеры Вильсона, помещенной в магнитном поле. Камера перегорожена довольно толстой свинцовой пластинкой (6 мм).

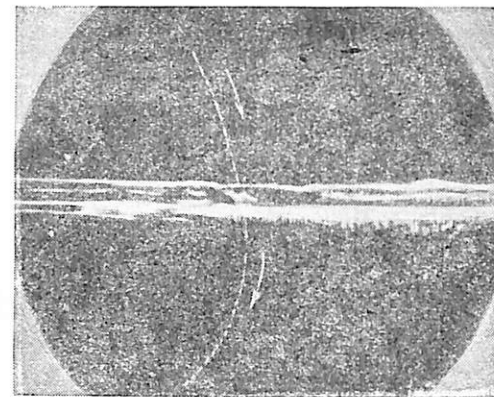


Рис. 30. Фотография следа позитрона.

Виден след частицы, попавшей в камеру и прошедшей через пластинку. Изучение этого следа показало следующее.

Частица, проходя через свинец, теряет часть своей энергии, скорость ее уменьшается. Под действием магнитного поля траектория движения частицы, уменьшившей свою скорость, должна изгибаться круче. По этому признаку можно было уверенно судить, что частица двигалась по направлению, указанному на фотографии стрелками. Зная направление магнитного поля и направление изгиба траектории, можно было определить, что частица имеет положительный заряд. По виду следа и проникающей способности частицы можно было сделать вывод, что она не является протоном. Определение массы ее показало, что масса частицы равна массе электрона. „Таинственная“ частица оказалась позитроном. В § 15 мы говорили о явлении, так называемой аннигиляции

материи и об образовании пары позитрон — электрон в результате действия γ -лучей на свинцовую пластинку, игравшую роль катализатора. Образуются пары γ -квантами и в газах.

Большое количество пар в газах (азот, криптон, ксенон) было сфотографировано и изучено советскими учеными: Л. В. Грошевым, И. М. Франком, Н. А. Добротиним.

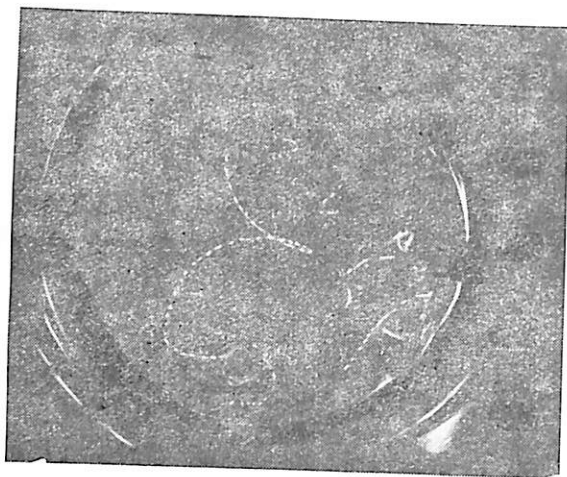


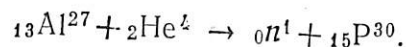
Рис. 31. Образование γ -квантом пары позитрон — электрон в криптоне.

На рис. 31 дана фотография Л. В. Грошева, на которой видно возникновение пары в криптоне. След, загнутый вправо, оставлен позитроном, загнутый влево — электроном.

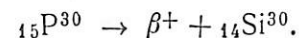
Вернемся к явлению, какое наблюдали Ирэн Кюри и Жолио при облучении алюминия α -частицами.

Подробное исследование явления показало, что оно протекает следующим образом.

Ядро алюминия захватывает α -частицу и распадается, выбрасывая нейтрон. В результате ядро алюминия обращается в неустойчивый (радиоактивный) изотоп фосфора:



Полученное ядро изотопа фосфора распадается, выбрасывая позитрон, и обращается в ядро изотопа кремния:



Таким образом, в результате первой из приведенных реакций был получен искусственным путем радиоактивный фосфор.

Дальнейшие исследования этого явления показали, что получение искусственных радиоактивных элементов возможно не только применением α -частиц, но и нейтронов, протонов и дейтеронов.

В настоящее время искусственным путем получены радиоактивные изотопы всех элементов.

Искусственные радиоактивные элементы нашли важное применение в медицине, химии, биологии.

Упомянутый распад ядра атома фосфора, сопровождающийся испусканием позитрона, заслуживает внимания. Естественно возникает вопрос: откуда берется позитрон? В предыдущем параграфе было указано, что нейтрон в ядрах атомов неустойчивых элементов самопроизвольно превращается в протон, испуская при этом электрон и нейтрино. Оказывается, что в ядрах атомов радиоактивных элементов имеет место переход протона в нейтрон, сопровождающийся испусканием позитрона и нейтрино. Таким образом, нейтрон может обращаться в протон, а протон в нейтрон. В связи с этим в настоящее время протон и нейтрон рассматривают как два состояния одной и той же тяжелой частицы. Эта частица получила название „нуклон“ (по-латински *nucleus* — ядро).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 25—27 можно использовать во внеклассной работе. В классе надо дать учащимся из этих параграфов только представление о массовом числе (см. § 27), что сделать нетрудно, так как о существовании изотопов учащиеся знают. Относительно § 28 заметим, что при изложении его в классе и при опросе учащихся должно быть обращено особое внимание на первую ядерную реакцию, осуществленную Резерфордом.

Здесь необходимо на основе разбора расщепления ядра азота α -частицей познакомить учащихся с

ядерными реакциями, со способами записи их и с обоснованиями, приведенными в § 28, что в состав ядер химических элементов входят протоны. Затем надо кратко сказать о применении протона и дейтерона в качестве „снарядов“ для расщепления ядер и о затруднениях, возникающих при этом.

Полезно, кроме классической ядерной реакции, осуществленной впервые Резерфордом, привести и еще одну-две реакции (см. § 28), сопровождающиеся выходом из ядра протона. В этом последнем варианте освещение вопроса о том, как исследовалось строение ядра, будет значительно более полным и последовательным.

Требовать от учащихся умения записывать все ядерные реакции, даваемые учителем, необязательно. По отношению к этой части материала (§ 28) достаточно, если все учащиеся будут твердо знать запись одной реакции — азота с α -частицей. То же самое надо сказать и по отношению к § 29 и § 32, т. е. от учащихся возможно требовать умения записывать только реакцию бериллия с α -частицей и реакцию, связанную с получением радиоактивного фосфора.

Материал § 29, 30 и 32 рассчитан на 1 час. Основное в этом уроке — это открытие нейтрона, строение ядер химических элементов, искусственная радиоактивность. Рассказав об открытии нейтрона, существенно подчеркнуть преимущества применения его для деления ядер, по сравнению с другими частицами. Сведения о нейтрине в учебный план темы не входит, § 31 по необходимости должен быть выкинут. В связи с рассмотрением в § 32 вопроса о распаде ядра изотопа фосфора, сопровождающемся испусканием позитрона, целесообразно очень кратко рассказать о взаимной превращаемости протона и нейтрона, а следовательно, и о нейтрине. Может оказаться полезным и поучительным для учащихся краткое изложение из § 32 анализа следа позитрона на фотографии, сделанной с камеры Вильсона, который привел к экспериментальному открытию этой частицы. По этому примеру учащиеся смогут судить о том, как исследуются по трекам частицы, оставляющие след.

Краткая справка об истории возникновения гипотезы о существовании нейтрино имеет огромное образовательное и мировоззренческое значение. На этом при-

мере можно очень убедительно показать всеобщность закона сохранения энергии в явлениях природы. С этой целью может быть использован материал, данный в § 31. Для учителя он может быть дополнен следующими существенными соображениями.

Испускаемые при β -распаде электроны обладают различными энергиями, начиная от больших (но не больших разности энергий ядра до и после испускания электрона) и вплоть до чрезвычайно малых.

Можно было бы предположить, что при этом распаде испускается не один, а два электрона, между которыми энергия распределяется произвольно, и что в сумме она равна уменьшению энергии ядра. Это предположение опровергается тем, что заряд ядра атома при β -распаде изменяется на одну, а не на две единицы. Казалось бы возможным другое предположение: электроны, испускаемые ядром, имеют энергию, равную упомянутой разности энергий ядра, но теряют свою энергию внутри радиоактивного вещества, претерпевающего распад. Точнейшим образом поставленные калориметрические опыты опровергли и эту гипотезу.

И, наконец, может быть верно утверждение, что в этом случае не выполняется закон сохранения энергии. Но и это предположение опровергается полностью.

В самом деле: исследование огромного количества явлений природы убедительнейшим образом показывает, что закон сохранения энергии в них не только не нарушается, но всегда без всяких исключений полностью подтверждается. Кроме того, изучение β -распада с несомненностью показало, что испускаемые электроны имеют энергию не большую, чем разность энергий ядра до и после испускания электрона, а чаще всего они имеют энергию, меньшую, чем эта разность. Если бы явление β -распада не подчинялось закону сохранения энергии, то испускаемые электроны должны были бы обладать энергией разной величины, в том числе и большей, чем разность уровней энергии ядра, претерпевшего распад. В действительности этого не наблюдается. Значит и это предположение должно быть отвергнуто.

Отсюда — естественный переход к гипотезе о существовании нейтрино и к тем обоснованиям реальности существования его, которые приведены в § 31.

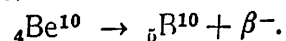
Изучая материалы § 29, можно дать учащимся на дом задачу № 4 на стр. 48 книги Л. И. Резникова и В. Ф. Юськовича.

Штриховая копия рисунка, нужного для задачи, может быть сделана на классной доске и зарисована учащимися. В связи с изучением строения ядер атомов (§ 30) могут быть даны задачи № 1 и 2 на стр. 47 той же книги и задача № 1323 из задачника под редакцией П. А. Знаменского. Учебный материал § 32 полезно закрепить, дав учащимся на дом задачи № 1—3 на стр. 56—58 книги Л. И. Резникова и В. Ф. Юськовича.

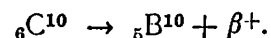
§ 33. Устойчивость ядер

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Число их растет по мере увеличения порядкового номера элементов. Изучение этого вопроса показывает, что из наиболее легких ядер (до кислорода включительно) устойчивыми, т. е. нерадиоактивными, оказываются ядра, содержащие примерно равные количества протонов и нейтронов. Ядра атомов этих элементов оказываются наиболее прочными. В тяжелых ядрах соотношение числа протонов и нейтронов несколько иное. Так, например, в ядре свинца нейтронов примерно в полтора раза больше, чем протонов.

Отступления от указанных соотношений в числе нейтронов и протонов ведет к тому, что такие ядра оказываются неустойчивыми, радиоактивными. При избытке нейтронов в ядре один из нейтронов может превратиться в протон. Этот процесс сопровождается испусканием электрона. Примером может служить распад ядра бериллия:



При избытке в ядре протонов, один из них может превратиться в нейтрон, причем в этом случае будет испускаться позитрон. Примером может служить распад ядра углерода:



§ 34. Ускорители

Успехи современной ядерной физики в значительной мере обусловлены применением частиц-снарядов, обладающих огромной энергией, достаточной для расщепле-

ния обстреливаемых этими частицами ядер. На необходимость создания приборов, с помощью которых возможно сообщение частицам достаточно большой энергии, мы уже указывали в § 28. Приборы, служащие для разгона заряженных частиц в сильном электрическом поле, получили общее название „ускорителей“. Первый ускоритель для получения протонов с энергией до 500 000 eV был построен Кокрофтом и Уолтоном, сотрудниками Резерфорда. В настоящее время существуют ускорители, сообщаемые частицам энергию в 300—400 миллионов eV, и строятся приборы, рассчитанные на сообщение частицам энергии в миллиарды электрон-вольт.

Наиболее употребительными ускорителями являются электростатический генератор, циклотрон, бетатрон и фазотрон.

1. Электростатический генератор

Как известно, заряженная частица, попав в электрическое поле, движется в нем под действием сил поля ускоренно. Скорость частицы, а значит и ее энергия, зависит от разности потенциалов пройденной частицей в поле. Увеличивая ускоряющую, как ее называют, разность потенциалов, соответственно увеличиваем и энергию частицы. Предел увеличения напряжения определяется прочностью изоляторов прибора и утечками зарядов. Практически с помощью электростатических генераторов удается получить напряжение порядка 5—8 миллионов вольт.

Первый электростатический генератор построил Ван-де-Грааф. Схема генератора более поздней конструкции показана на рис. 32, где P и N два полых металлических шаровых кондуктора, изолированных от Земли; C и D — бесконечные движущиеся ленты из изолирующего материала (шелк, прорезиненная ткань и т. п.); E — источник тока на 10 000—20 000 вольт (генератор переменного тока и трансформатор с выпрямителем); F — коллектор (система острий), с помощью которого положительные заряды источника E передаются ленте C ; A — коллектор (система острий), снимающий положительные заряды с ленты и передающий их кондуктору P , достигнув которого, заряды, переходят на его поверхность; B — коллектор (опять система острий),

с помощью которого отрицательные заряды с кондуктора P передаются правой половине ленты C и дальше отводятся к Земле. Устройство правой (по чертежу) установки такое же. Таким образом, лента C приносит внутрь кондуктора P положительные заряды и уносит отрицательные, а лента D передает кондуктору N отрицательные заряды, унося с него положительные. В связи с этим положительный потенциал левого кондуктора и отрицательный правого непрерывно возрастают, пока

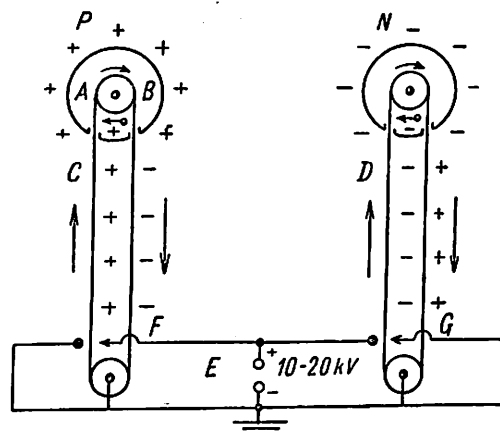


Рис. 32. Схема электростатического генератора.

утечка зарядов с кондукторов не станет равной зарядам, подводимым к ним лентой. Разгон частиц производится в эвакуированной трубке, располагаемой горизонтально между кондукторами P и N . Для нормальной работы генератора и получения возможно большего напряжения на нем шаровые кондукторы должны быть большего размера (диаметром 4—4,5 м), с гладкой поверхностью, хорошо изолированы от Земли и всех окружающих предметов. В результате электростатические генераторы являются громоздкими и дорогостоящими сооружениями, устанавливаемыми в специальных зданиях. Генератор может быть меньшего размера, если его поместить в специальный кожух, наполненный газом, находящимся под давлением. (Увеличивается при этом пробивное напряжение.) Естественно, что такой генератор оказывается менее громоздким, но более сложным.

Более эффективным для получения частиц с большей энергией оказался другой ускоритель — циклотрон.

2. Циклотрон

В основе устройства циклотрона лежит идея многократного ускорения заряженной частицы одной и той же сравнительно небольшой разностью потенциалов. Осуществляется эта задача следующим образом.

В камере, в которой во время работы циклотрона все время поддерживается высокий вакуум, помещаются на некотором расстоянии друг от друга два полых электрода, называемых дуантами, схематически

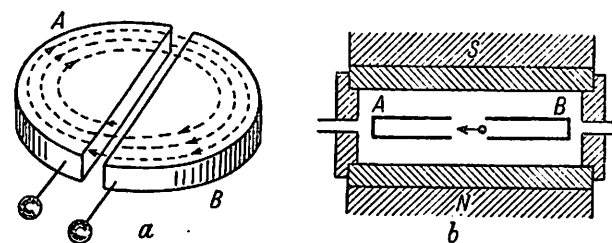


Рис. 33. Схема циклотрона:

a — дуанты, b — положение их между полюсами магнита.

показанных на рис. 33. Дуанты помещаются между полюсами электромагнита, создающего магнитное поле большой напряженности порядка 15 000 эрстед. К дуантам прикладывается быстропеременная разность потенциалов (например, 10 000—100 000 вольт) от высокочастотного генератора. В центре дуантов располагается источник ионов (например, небольшая электрическая дуга, горящая в водороде). Из полости, в которой находится источник ионов, идет узкая трубка в сторону одного из дуантов (на рис. 33 — в сторону дуанта B). Когда дуант B имеет отрицательный потенциал, положительные ионы через упомянутую трубку попадают в промежуток между дуантами. Двигаясь в электрическом поле между дуантами, ионы увеличивают свою скорость, а значит — и энергию. Попадая в дуант A , они оказываются находящимися под действием только магнитного поля, так как внутри полых дуантов электри-

ческого поля нет. В магнитном поле ионы движутся по окружности. Описав полуокружность, ионы снова попадают в промежуток между дуантами. К этому моменту времени полярности дуантов меняются. Таким образом, ионы, начавшие свое движение в то время, когда дуант *В* имел максимальный отрицательный потенциал, вернутся в промежуток между дуантами в тот момент, когда дуант *В* будет иметь максимальный положительный потенциал, а дуант *А* — максимальный

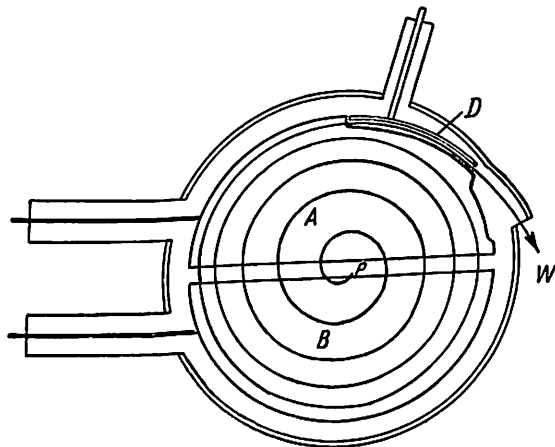


Рис. 34. Траектория иона в камере циклотрона.

отрицательный потенциал. Ионы второй раз ускоряются электрическим полем в промежутке между дуантами, удваивая свою энергию, и проходят в дуанте *А* вторую полуокружность, но уже большего радиуса, так как скорость их увеличилась, и т. д.

Период переменной разности потенциалов, приложенной к дуантам, должен быть в точности равен периоду обращения ионов. На первый взгляд можно, показавшись, что добиться таких условий невозможно, так как скорость движения ионов непрерывно увеличивается. В действительности оказывается, что время обращения иона в однородном магнитном поле не зависит от его скорости, так как с увеличением скорости иона увеличивается и радиус круговой траектории его. В итоге — ионы движутся по траектории, имеющей вид раскручивающейся спирали, сохраняя период

своего вращения постоянным. Поэтому оказывается практически возможным подобрать нужную частоту генератора, подающего напряжение дуантам.

На рис. 34 показана спиральная траектория одного из ионов. На этом рисунке *А* и *В* — дуанты, *Д* — пластина, заряженная отрицательно, направляющая ускоренные ионы через окно *W* наружу.

Первый циклотрон, изготовленный в 1936 г., представлял собой небольшой лабораторный прибор. Энергия разгоняемых частиц зависит от напряжения на дуантах и от размеров магнита. Увеличению напряжения кладется предел неизбежными утечками зарядов. Напряженность магнитного поля в циклотроне ограничивается магнитным насыщением сердечника. Для увеличения энергии частиц приходится увеличивать диаметр полюсов магнита. Поэтому в настоящее время циклотроны представляют собою большие технические установки, в которых диаметр полюсов магнита достигает 4,5 м.

3. Бетатрон и фазотрон

В последние годы был разработан ускоритель, получивший название бетатрона, в котором разгону подвергаются электроны, приобретающие энергию до 100 MeV.

Советский физик В. И. Векслер предложил принцип бетатрона и циклотрона. Такой ускоритель для электронов получил название синхротрона, а ускоритель для тяжелых частиц — название фазотрона (или синхроциклотрона). Идея В. И. Векслера реализована: ускорители обоих типов построены. С помощью фазотронов получают частицы с энергией значительно большей, чем в случае применения циклотрона.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Материал § 33 и 34 в учебный план темы не включен, но самые краткие сведения об ускорителях (§ 34), исключая бетатрон и фазотрон, желательно дать учащимся. Это можно сделать в связи с изложением материала § 28 (см. стр. 97). Параграф 33 помещен для учителя. Особенно желательно использовать § 34 во внеклассных занятиях. Это обусловлено тем, что

*

1) значение ускорителей в ядерной физике очень велико, 2) учащиеся проявляют большой интерес к этим приборам и 3) устройство и действие электростатического генератора и циклотрона теснейшим образом связаны с материалом, прежде изученным учащимися. Поэтому рассмотрение этих приборов является прекрасным примером практического применения физических закономерностей.

ГЛАВА V

ЭНЕРГИЯ ЯДРА АТОМА

§ 35. Ядерная энергия

1. Дефект массы ядра

В предыдущем изложении было указано на возможность очень точного опытного определения массы ядер атомов химических элементов и массы протона и нейтрона, из которых состоят ядра атомов. Сопоставление массы ядра и суммы масс протонов и нейтронов, из которых состоит данное ядро, показало, что они не совпадают друг с другом. А именно: оказалось, что масса ядра любого химического элемента всегда меньше суммы масс его составных частиц в свободном состоянии. Разность между суммой масс составляющих ядро частиц в свободном состоянии и массой ядра получила название дефекта массы ядра. Этот факт, установленный опытным путем, имеет чрезвычайно большое значение. Выше (§ 13) указывалось, что всякое изменение энергии тела (или системы тел) связано с соответствующим изменением его массы, и наоборот: изменение массы тела (или системы тел) связано с соответствующим изменением его энергии. Это соотношение между массой и энергией определяется уравнением $E = mc^2$. В соответствии с этим то обстоятельство, что масса ядра атомов меньше суммы масс составляющих его частиц в свободном состоянии, свидетельствует о том, что образование ядер атомов связано с выделением энергии. Больше того, пользуясь данными, полученными опытным путем о массе ядра атома того или иного химического элемента, и зная массу протона и нейтрона в свободном состоянии и количество их,

входящих в состав ядра, мы получаем возможность вычислить дефект массы данного ядра, а по этому дефекту массы, прибегнув к уравнению $E = mc^2$, можем вычислить энергию, выделившуюся при образовании этого ядра. К вопросу о подсчете энергии, выделяющейся при образовании ядер из частиц в свободном состоянии, мы вернемся несколько позже, а сейчас остановимся на подсчете дефекта массы ядра.

При подсчете дефекта массы обычно пользуются условной единицей массы, равной $1/16$ массы атома преобладающего изотопа кислорода O^{16} , которая равна $1,66035 \cdot 10^{-24}$ грамма. Эту единицу массы называют массовой единицей (или атомной единицей) и обозначают МЕ. Кроме того, употребляют единицу, в тысячу раз меньшую, и сокращенно обозначают ее — ТМЕ.

Приведем примеры подсчета дефекта массы ядер атомов некоторых элементов.

1. Ядро дейтерия состоит из одного протона и одного нейтрона. Масса атома водорода в массовых единицах 1,00813 МЕ. Масса нейтрона 1,00895 МЕ. Сумма масс атома водорода и нейтрона 2,01708 МЕ. Масса атома дейтерия 2,01473 МЕ. Запишем эти данные следующим образом:

$$\begin{array}{r} {}_1H^1 = 1,00813 \\ {}_0n^1 = 1,00895 \\ \hline {}_1H^1 + {}_0n^1 = 2,01708 \end{array}; \quad \begin{array}{r} {}_1D^2 = 2,01473 \\ \hline {}_1D^2 = 2,01473 \end{array}$$

Масса атома дейтерия меньше на $2,01708 - 2,01473 = 0,0024$ МЕ.¹ Значит, таков дефект ядра атома дейтерия. Производя указанные вычисления, мы брали массу атома водорода, т. е. массу не только ядра, но и массу электрона, составляющего электронную оболочку атома водорода. Тем не менее, в итоге мы получили дефект массы ядра дейтерия, так как масса электрона вошла и в массу атома дейтерия в правой колонке и при вычитании выпала.

2. Ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов. Подсчитаем сумму масс двух атомов водорода и двух нейтронов и сравним ее с массой атома

¹ С точностью до 0,0001.

гелия, попрежнему беря все массы в массовых единицах.

$$\begin{array}{r} {}_2H^1 = 2,01626 \\ {}_0n^1 = 2,01790 \\ \hline {}_2H^1 + {}_0n^1 = 4,03416 \end{array}; \quad \begin{array}{r} {}_2He^4 = 4,00389 \\ \hline {}_2He^4 = 4,00389 \end{array}$$

Масса атома гелия меньше массы двух атомов водорода и двух нейтронов на $4,03416 - 4,00389 = 0,03027$ МЕ. Таков дефект массы ядра атома гелия.

Обратим внимание, что и в этом случае мы брали массу атомов водорода, т. е. массу ядер вместе с их электронной оболочкой (в данном случае — массу двух ядер водорода и двух электронов), но и в правой колонке мы взяли массу атома гелия, т. е. массу его ядра и двух электронов. В итоге, при вычитании сумма масс электронов выпадает.

Так обычно производятся подсчеты дефекта массы ядер, что представляет большое удобство, так как исключает необходимость подсчитывать массу электронов.

Разумеется, что дефект массы ядра гелия (так же как и других ядер) может быть вычислен не только в массовых единицах, но и в граммах. Путь расчетов тот же. А именно: масса протона $1,67248 \cdot 10^{-24}$ г, масса нейтрона $1,6749 \cdot 10^{-24}$ г, масса же ядра гелия $6,64422 \cdot 10^{-24}$ г.

Тогда:

$$\begin{array}{r} 2p = 3,34496 \cdot 10^{-24} \\ 2n = 3,34980 \cdot 10^{-24} \\ \hline 2p + 2n = 6,69476 \cdot 10^{-24} \end{array}; \quad \begin{array}{r} He = 6,64422 \cdot 10^{-24} \\ \hline He = 6,64422 \cdot 10^{-24} \end{array}$$

Дефект массы

$$6,69476 \cdot 10^{-24} - 6,64422 \cdot 10^{-24} = 0,051 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Подобно тому, как нами был вычислен дефект массы ядра дейтерия и гелия, может быть вычислен дефект массы ядер и других атомов. Прежде чем перейти к подсчету энергии, выделяющейся при образовании ядер из протонов и нейтронов в свободном состоянии, мы должны остановиться на вопросе о силах, действующих между этими частицами ядра.

2. Ядерные силы. Нейтretto

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Между этими частицами ядра существуют силы, создающие прочные связи, обращающие ядро в устойчивую систему. Какова же природа сил, действующих между составными частицами ядра?

Эта задача в настоящее время еще не решена, поэтому об ядерных силах можно сказать немного и пока что в значительной степени предположительно. Прежде всего, ядерные силы не являются кулоновскими электростатическими силами. Это видно из того, что они, повидимому, действуют между частицами, заряженными одноименным электричеством (протон — протон), между незаряженными (нейтрон — нейтрон) и между заряженными и незаряженными (протон — нейтрон). Ядерные силы отличаются от кулоновских электростатических сил своей огромной величиной. Ядерные силы — короткодействующие, они играют существенную роль только при расстояниях порядка 10^{-12} — 10^{-13} см. При больших расстояниях электрические силы берут перевес над ядерными.

Предполагают, что ядерные силы относятся к виду так называемых обменных сил. В § 19 указывалось, что при образовании молекул из атомов имеет место ковалентная связь. Она обусловлена тем, что некоторые электроны принадлежат электронным оболочкам нескольких атомов, а не одного. Образно говоря, атомы прочно связываются в молекулу вследствие „обмена“ электронами, попеременно принадлежащими то одному, то другому атому. Обменом электронами (обладающими энергией) и осуществляется взаимодействие атомов, образующих молекулу.

Изучая электростатику, мы описывали взаимодействие между заряженными частицами с помощью электрического поля. Процесс испускания света атомом мы описываем с помощью частиц-фотонов, представляя себе, что их нет внутри атома, а что они возникают за счет электромагнитного поля атома при переходе атома с одного энергетического уровня на другой. С точки зрения квантовой механики процесс взаимодействия между электрическими зарядами, например, между электронами, можно описать с помощью поля или

с помощью частиц, представляя себе, что один электрон испускает фотон, поглощаемый другим электроном, этот последний испускает фотон, поглощаемый первым электроном и т. д. Этим обменом фотонами и осуществляется взаимодействие электронов.

Советские физики И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко (независимо друг от друга) предположили, что и ядерные силы — обменного характера. В § 31 и 32 было указано, что протоны и нейтроны, входящие в состав ядер, обладают свойством взаимной превращаемости. Нейтрон, испуская электрон и нейтрино, превращается в протон, а протон, испуская позитрон и нейтрино, обращается в нейтрон. В связи с этим можно было предположить, что ядерные силы следующего происхождения.

Нейтрон в ядре, превращаясь в протон, испускает электрон и нейтрино; эти последние поглощаются протоном, обращаясь поэтому в нейтрон, и т. д. Однако оказалось, что силы, возникающие при обмене нуклонами электроном и нейтрино, как это показал И. Е. Тамм, во много раз меньше ядерных сил, определенных на основании опытных данных. Это заставило японского физика Юкаву предположить, что нуклоны в ядре обмениваются особыми частицами с массой, промежуточной между массой электрона и протона.

При изучении космических лучей (см. § 44) были обнаружены частицы с массой около 230 и 320 электронных масс, получившие название „мезонов“. Мезоны обладают положительным или отрицательным зарядом, по абсолютному значению равным заряду электрона. Есть основания считать, что нуклоны в ядре и обмениваются именно мезонами. Обменом мезонами и обусловлено взаимодействие нуклонов в ядре, связанное с появлением ядерных сил, придающих ядру чрезвычайно большую прочность. (В соответствии с кратко рассмотренной нами теорией ядерных сил, получившей название мезонной теории, процесс радиоактивного распада ядер, упомянутый в § 31 и 32, происходит следующим образом. При распаде ядра происходит испускание электрона; при этом, нейтрон в ядре превращается в протон, испуская отрицательный мезон, а этот последний распадается на электрон и нейтрино. Когда распад ядра сопровождается испусканием позитрона, протон в ядре превра-

щается в нейтрон, испуская положительный мезон, падающий на позитрон и нейтрино.)

Обменом отрицательно и положительно заряженными мезонами может быть объяснено взаимодействие нейтрона и протона. Однако такой же величины ядерные силы действуют между протоном и протоном и между нейтроном и нейтроном. Происхождение этих сил можно объяснить, если допустить существование частиц с массой, равной массе мезона, но не имеющих заряда, получивших название нейтретто. В настоящее время экспериментальных доказательств существования нейтретто не имеется.

В заключение еще раз заметим, что ядерные силы не являются силами электрическими. Упомянутое выше сходство ядерных сил с силами химической ковалентной связи — только аналогия.

3. Ядерная энергия (энергия связи ядра)

Для того чтобы удалить ту или иную частицу из ядра, надо совершить некоторую работу или, как говорят, надо ядру сообщить энергию. С точки зрения закона сохранения энергии величина сообщенной энергии не зависит от того, каким образом частица будет удалена из ядра. Применяя эти рассуждения ко всем частицам ядра, приходим к выводу, что для расщепления ядра на его составные части в свободном состоянии, без сообщения им кинетической энергии, надо сообщить ядру извне определенное количество энергии. Наоборот, образование ядра атома из элементарных частиц должно сопровождаться выделением такого же количества энергии. Величину этой энергии называют энергией связи ядра. Так как ядра атомов различных элементов состоят из различного количества протонов и нейтронов и так как группировка этих частиц в ядрах может быть различной, то поэтому энергия связи ядер атомов различных химических элементов различна. Энергия связи ядер атомов принадлежит к особому виду энергии, получившему название ядерной энергии. (Часто употребляется для этого вида энергии другое, менее удачное название — атомная энергия.) Таким образом, к числу уже известных нам видов энергии — кинетической энергии движущихся тел и другим — надо отнести и ядерную энергию.

Известно, что в природе происходят превращения энергии из одного вида в другой. Все эти превращения энергии происходят в строгом соответствии с законом сохранения энергии, утверждающим положение о неумножаемости и о несоздаваемости энергии и вытекающим из закона сохранения материи. В превращениях энергии участвует и ядерная энергия; при радиоактивном распаде ядер и при ядерных реакциях, как это мы увидим, происходит переход ядерной энергии в энергию других видов.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра атома? Энергию связи какого-либо ядра можно найти из опыта, если возможно осуществить процесс образования этого ядра из элементарных частиц, ибо в соответствии со сказанным выше, при образовании ядра должна выделяться энергия, равная энергии связи данного ядра. Например, при соединении протона с нейтроном образуется дейтерон. Процесс образования дейтерона сопровождается испусканием γ -кванта, несущего с собой энергию, равную энергии связи дейтерона. Измерив частоту излучения, можно по известной нам формуле $\epsilon = h\nu$ определить энергию кванта, т. е. энергию связи дейтерона. Она оказалась равной 2,23 MeV.¹

Такой способ определения энергии связи ядер сложен и труден. Имеется другой способ, значительно более простой.

В пункте 1-м настоящего параграфа было указано, что энергия, выделяющаяся при образовании ядер из частиц в свободном состоянии, а эта энергия равна энергии связи ядра, может быть определена по дефекту массы ядра.

Итак, найдя дефект массы ядра любого атома, можно по уравнению $E = mc^2$ найти энергию связи этого ядра.

Находя энергию связи по уравнению $E = mc^2$, вместо m мы подставляем изменение массы — дефект массы; обозначим его Δm .

Следовательно, дефект массы

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2},$$

где ΔE — энергия связи ядра.

¹ Округлено с точностью до 0,01. Точнее, 2,2344.

Выше мы определили дефект массы ядер дейтерия и гелия. Подсчитаем энергию связи этих ядер. Дефект массы ядра дейтерия оказался равным 0,0024 ME.

Массовая единица соответствует энергии в $1,494 \times 10^{-3}$ эргов = 931 MeV, а тысячная массовой единицы — 0,931 MeV, или, округленно, 1 MeV. Отсюда энергия связи ядра дейтерия равна $931 \text{ MeV} \cdot 0,0024 = 2,23 \text{ MeV}$.¹

Выше было указано, что образование ядра дейтерия сопровождается испусканием γ -кванта, обладающего массой и энергией. Масса γ -кванта равна 0,0024 ME, а энергия его 2,23 MeV. Таким образом, при образовании ядра атома дейтерия (дейтерона) из протона и нейтрона часть массы протона и нейтрона перешла в массу кванта и часть их энергии в энергию кванта.

Дефект массы ядра гелия, как это мы установили, оказался равным 0,03027 ME. Поэтому энергия связи ядра гелия равна:

$$931 \text{ MeV} \cdot 0,03027 \approx 28,2 \text{ MeV}.$$

Если дефект массы ядра гелия выразить в граммах, то подсчет энергии связи этого ядра может быть произведен следующим образом.

1 грамм массы соответствует энергии

$$E = mc^2 = 1 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{20} \text{ эргов}.$$

Энергия связи ядра гелия равна

$$9 \cdot 10^{20} \cdot 0,051 \cdot 10^{-24} = 4,59 \cdot 10^{-5} \text{ эргов}.$$

или около 28 MeV.

Итак, энергия связи ядра гелия приблизительно равна 28 MeV. Это значит, что при образовании ядра гелия из двух протонов и двух нейтронов масса уменьшается на 0,03027 ME, и при этом выделяется около 28 MeV энергии. Куда она девается? Оказывается, что образование ядра гелия сопровождается образованием двух позитронов, обладающих массой и энергией. Уменьшение массы и энергии протонов и нейтронов при образовании ядра гелия обусловлено переходом их соответственно в массу и энергию позитронов. Абсолютное значение этой энергии невелико, но не следует забывать, что речь идет об энергии, рассчитанной на одно ядро. Пересчет

¹ С точностью до 0,01. Точнее, 2,2344.

на одну грамм-молекулу дает энергию в $2,7 \cdot 10^{19}$ эргов. Такая огромная энергия нужна, чтобы разделить все ядра атомов гелия в одной грамм-молекуле, и, наоборот, такая энергия выделится, если произойдет образование такого же количества ядер атомов гелия из свободных протонов и нейтронов. Подсчет показывает, что при образовании 1 г ядер атомов гелия должна выделиться энергия в $1,62 \cdot 10^{11}$ кал, т. е. 162 миллиона ккал.

Приведенные расчеты являются теоретическими, поскольку реакция образования ядер гелия из протонов и нейтронов до сих пор нами не была осуществлена. Повидимому, процесс, подобный только что указанному, происходит в недрах звезд и, в частности, Солнца, о чем дальше (в § 42) будет кратко рассказано.

Подобно тому, как нами была вычислена энергия связи ядер дейтерия и гелия, может быть вычислена и энергия связи ядер других атомов.

Как уже указывалось в начале параграфа, энергия связи ядер различных атомов различна. Для ядер дейтерия, гелия и для его изотопа ${}^3\text{He}$ мы ее только что вычислили, и она соответственно равна 2,23 MeV и 28,2 MeV. Энергия связи ядра бериллия (Be) равна 57,8 MeV, ядра углерода (${}^{12}\text{C}$) — 91,66 MeV, кислорода (${}^{16}\text{O}$) — 126,96 MeV, алюминия (${}^{13}\text{Al}$) — 212,92 MeV, хлора (${}^{35}\text{Cl}$) — 297,96 MeV, железа (${}^{56}\text{Fe}$) — 496,27 MeV и т. д.

Определение энергии связи ядер по их дефекту массы является способом, дающим наиболее точные результаты. Обусловлено это тем, что данные о ядерных реакциях подтверждают правильность закона взаимосвязи массы и энергии, и, с другой стороны, массы ядер изотопов могут быть определены с очень большой точностью (с помощью масс-спектрографа, о котором сказано в § 27).

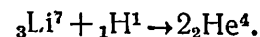
Подводя итоги сказанному в настоящем параграфе, мы можем прийти к выводу, что в ядрах атомов сосредоточены в скрытой форме огромные запасы энергии и что образование ядер из элементарных частиц сопровождается выделением ядерной энергии.

§ 36. Ядерные реакции. Освобождение ядерной энергии

В настоящее время мы не умеем еще осуществлять процессы образования ядер атомов из элементарных частиц. Но мы умеем расщеплять ядра атомов на части

путем так называемых ядерных реакций, с которыми мы уже познакомились. Оказывается, что очень многие из них тоже сопровождаются выделением ядерной энергии. Для того чтобы судить о том, является ли данная ядерная реакция эндотермической (так называют реакции, идущие с поглощением энергии) или экзотермической (так называют реакции, идущие с выделением энергии), можно прибегнуть к уже не раз испытанному нами приему: использовать закон взаимосвязи массы и энергии. Для этого надо сравнить массу частиц до реакции с массой частиц (включая сюда и массу фотонов, если они образуются при реакции) после реакции. По изменению массы можно судить об изменениях энергии. Причем уменьшение покоящейся массы свидетельствует об освобождении ядерной энергии (о переходе ее из скрытой формы в кинетическую энергию частиц), а увеличение покоящейся массы — об увеличении ядерной энергии (о переходе кинетической энергии, которой обладали частицы до реакции, в ядерную энергию).

Проиллюстрируем сказанное на известной нам ядерной реакции (§ 24) между протоном и ядром лития:



Известно, что ядро лития, захватив протон, становится неустойчивым и распадается на две α -частицы, разлетающиеся с огромными скоростями. Определим сумму масс частиц, вступивших в реакцию, и сумму масс частиц, получившихся в результате реакции, по-прежнему пользуясь массовой единицей. Причем в этом случае мы должны брать покоящуюся массу ядер, а не атомов, как мы это делали в случае расчета дефекта массы ядра (см. предыдущий параграф), так как реакция происходит между ядрами, а не атомами, а именно — между ядром лития и ядром водорода (протоном), и в результате реакции получаются два ядра гелия (две α -частицы). Кроме того, анализируя эту ядерную реакцию, мы должны учесть и увеличение массы α -частиц при их движении.

Покоящаяся масса ядра лития 7,0165 МЕ. (Ядро лития в начальный момент реакции можно считать покоящимся, так как кинетическая энергия его движения

столь мала, что изменением массы его, по сравнению с массой покоя, практически можно пренебречь.)

Покоящаяся масса протона 1,0076 МЕ. (Протон не покоится, поэтому его кинетическая энергия не равна нулю, но она относительно невелика. В процессе реакции эта энергия добавляется к энергии получившихся α -частиц. Ее обычно не учитывают. Вычисленная энергия α -частиц будет несколько меньше истинной, но зато она будет только энергией, выделившейся в результате ядерной реакции, без „добавки“ энергии, привнесенной одной из частиц, вступивших в реакцию.)

Покоящаяся масса α -частицы 4,0028 МЕ. (Получившиеся в итоге реакции α -частицы движутся с огромными скоростями. Изменением их массы пренебрегать никак нельзя. Мы его учтем, но для того чтобы судить, какие изменения произошли в массе частиц в процессе реакции, нужно взять покоящиеся массы частиц как до реакции, так и после нее.) Итак, имеем:

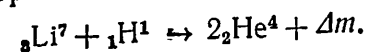
$$\begin{array}{rcl} {}_3\text{Li}^7 & = & 7,0165 \\ {}_1\text{H}^1 & = & 1,0076 \\ \hline {}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1 & = & 8,0241 \end{array}; \quad \begin{array}{rcl} {}_2\text{He}^4 & = & 4,0028 \\ {}_2\text{He}^4 & = & 4,0028 \\ \hline 2{}_2\text{He}^4 & = & 8,0056 \end{array}.$$

Покоящаяся масса α -частиц меньше, чем сумма массы ядра лития и протона. В результате ядерной реакции покоящаяся масса уменьшилась на 8,0241 — 8,0056 = 0,0185 МЕ или $3 \cdot 10^{-26}$ г. Эта часть массы в процессе ядерной реакции теряется как покоящаяся масса и переходит в добавочную массу движущихся с большой скоростью α -частиц, обладающих кинетической энергией. Воспользовавшись формулой $\Delta E = \Delta m c^2$, находим кинетическую энергию α -частиц, т. е. энергию, освобожденную при реакции.

$$\Delta E = 3 \cdot 10^{-26} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 27 \cdot 10^{-6} \text{ эргов} = 17 \text{ MeV}.$$

Опытные данные, полученные в результате расщепления ядра лития, полностью подтверждают приведенные расчеты и тем самым — соотношение $E = mc^2$.

В связи с появлением у ядер гелия добавочной массы, рассмотренная ядерная реакция может быть записана следующим образом:



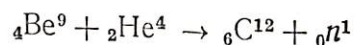
Таким образом мы видим, что в реакции расщепления ядра лития происходит превращение скрытой ядерной энергии в кинетическую энергию ядер гелия, или, как говорят в общем виде, — в кинетическую энергию осколков ядра.

В § 19 указывалось, что при химических реакциях происходит перестройка электронных оболочек атома, ядра же никаких превращений не испытывают. Так проявляется химическая энергия. В ядерных же реакциях происходит перестройка ядер атомов, связанная с освобождением или поглощением энергии. Энергия химических реакций относительно невелика — порядка электрон-вольт, энергия же ядерная, как мы уже неоднократно видели, порядка мегаэлектрон-вольт, т. е. в миллион раз больше.

Реакция расщепления ядра лития, а также реакции образования ядра дейтерия и гелия (§ 35) еще раз подтверждают условия освобождения скрытой энергии вещества, сформулированные нами в § 14. Освобождение ядерной энергии происходит в таких ядерных реакциях, при которых уменьшается покоящаяся масса, в результате перехода ее в добавочную массу движущихся частиц или в массу квантов (фотонов) излучения.

Кроме уже рассмотренных нами ядерных реакций, экзотермическими оказываются и многие другие, в частности, и из тех, которые нам уже встречались.

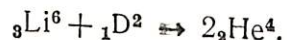
Так, например, ядерная реакция α -частицы с бериллием (§ 29)



сопровождается выделением энергии в 5,6 MeV.

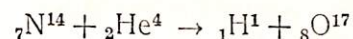
Следовательно, кинетическая энергия ядра углерода и нейтрона на 5,6 MeV больше кинетической энергии ядра бериллия и α -частицы. Здесь тоже происходит освобождение скрытой ядерной энергии — переход ее в кинетическую. Эта реакция интересна с исторической точки зрения, так как она связана с открытием нейтрона, а также и с тем, что она дает возможность наиболее легко и просто получать нейтроны. С этой целью в качестве источника нейтронов пользуются стеклянной трубкой с окисью бериллия, наполненной радоном.

Интересна реакция дейтерона с изотопом лития Li^6 (§ 28):



Она характеризуется выделением очень большой энергии — около 22,7 MeV, но реакция очень трудно идет: немногие из дейтеронов вызывают деление ядер лития.

Первая из осуществленных ядерных реакций — реакция α -частицы с азотом



была эндотермической. Сумма энергий ядра кислорода и протона меньше кинетической энергии исходных ядер на 1,2 MeV. Следовательно, в этой реакции происходит превращение кинетической энергии в ядерную.

Как видим из изложенного в этом параграфе, ядерные реакции сопровождаются изменением массы и соответствующим этому изменению массы изменением энергии. Отсюда ясно, что та запись ядерных реакций, которой обычно пользуются и которая была применена нами и здесь, не является полной, так как исходит из неизменности масс, участвующих в реакции частиц (суммы массовых чисел в обеих частях записи реакции равны), и не учитывает изменений запаса энергии. Поэтому при записи ядерных реакций таким способом между правой и левой частью записи ставится стрелка, а не знак равенства. При записи энергетического баланса ядерной реакции должны быть учтены изменения массы и соответствующие им изменения энергии.

Следовательно, энергия, заключенная в ядрах атома, может быть освобождена путем осуществления экзотермических ядерных реакций. Освобождение ядерной энергии происходит и при естественной радиоактивности. В этом случае она переходит в кинетическую энергию частиц, являющихся продуктом распада ядер. Известно, что кинетическая энергия движущихся тел, а также энергия радиоактивных излучений наиболее легко переходит в теплоту. Этим объясняется и выделение теплоты радиумом, ядра которого претерпевают распад. Высокая температура в недрах Земли поддерживается распадом ядер радиоактивных элементов (урана, тория). Энергия, выделяемая при образовании ядра одного нового атома в ядерных реакциях, в сотни тысяч и в миллион раз больше, чем та энергия, какую мы получаем от одного атома угля при образовании углекислого газа. Во всех ядерных реакциях, рассмотренных нами до сих пор, относительные количества выделяемой энергии были

очень большие, в абсолютном же их значении — очень незначительные, что обусловлено тем, что в этих ядерных реакциях принимало участие ничтожное количество атомов. Кроме того, получение снарядов для обстрела ядер атомов — дело сложное и дорого стоящее, да еще к тому же только очень немногие из них (например, около 20 α -частиц из миллиона) попадают в мишень — ядро, остальные в цель не попадают. Использовать естественный распад радиоактивных элементов нет возможности. Распад их происходит крайне медленно, ускорить же этот процесс никакими доступными физике в настоящее время средствами не удастся. Поэтому до недавнего времени казалось, что высвобождение энергии ядра в сколько-нибудь ощутимых количествах есть дело очень отдаленного будущего. Однако в самом конце 1938 г. была осуществлена ядерная реакция, которая резко изменила положение дел в этом отношении.

§ 37. Деление тяжелых ядер. Цепная реакция

Применение положительно заряженных частиц для расщепления ядер страдало существенными недостатками. Приближаясь к ядру, эти частицы должны были преодолевать силы отталкивания со стороны положительно заряженного ядра. Естественно, что чем больше положительный заряд ядра атома, тем больше силы, препятствующие проникновению частицы-снаряда в ядро. Поэтому не случайно, что все ядра, которые были подвержены расщеплению α -частицами, протонами и дейтеронами, принадлежали к легким атомам, атомам элементов, расположенных в начале периодической системы. Добиться еще больших энергий этих частиц, чем те, которых они достигали после „разгона“ в электрическом поле, не представлялось возможным. Открытие нейтрона дало в руки физиков снаряд, не обладавший этими недостатками. Нейтрон, электрически нейтральный, может легко приблизиться к обстреливаемому ядру. Больше того, его не только не нужно „разгонять“, но даже лучше, если его скорость будет не очень большой, так как в этом случае он дольше будет находиться вблизи ядра и возможность захвата нейтрона ядром увеличится. В связи с этим быстрые нейтроны сначала несколько замедляют, а затем уже используют для ядерных реакций.

Таким образом, деление тяжелых ядер удалось только после открытия нейтрона. При попадании нейтрона в ядро атома происходит следующее. Или 1) нейтрон остается в захватившем его ядре, в связи с чем масса ядра увеличивается, а заряд остается тем же; возникает ядро атома изотопа обстреливаемого элемента; эта реакция сопровождается выделением γ -квантов; или 2) ядро, захватившее нейтрон, становится неустойчивым и распадается на те или иные части (осколки).

В настоящее время осуществлено несколько реакций деления тяжелых ядер атомов элементов, для которых порядковый номер больше 90. Мы кратко остановимся на делении ядер урана, представляющем особый интерес. Установлено две особенности распада ядра урана.

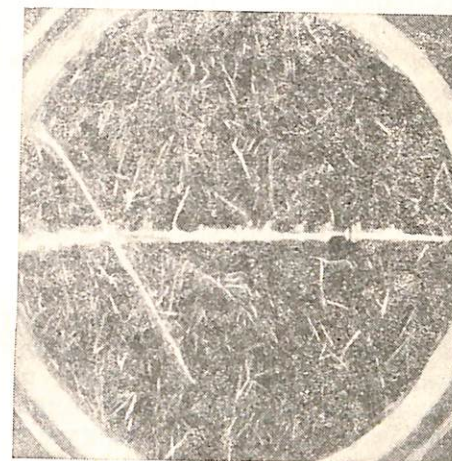


Рис. 35. Деление ядра урана в камере.

1. Исследования показали, что при захвате нейтрона ядром урана оно распадается на две приблизительно равные массивные части, движущиеся с очень большими скоростями и, следовательно, обладающие значительной кинетической энергией.

На рис. 35 приведена фотография, изображающая результат этой интереснейшей реакции. На пластинке, перегораживающей камеру Вильсона, нанесен тонкий слой окиси урана. Длинные треки — следы двух осколков ядра урана, летящих в противоположные стороны. (Многочисленные короткие следы — следы протонов, являющихся ядрами отдачи, движущихся в результате столкновения нейтронов с атомами водорода, входящими в состав паров, имеющихся в камере.)

Покоящаяся масса продуктов реакции меньше массы исходных продуктов приблизительно на 0,2 ME или на

200 тысячных массовой единицы (200 TME). Эта покоящаяся масса переходит в добавочную массу осколков ядра урана и в массу образующихся при реакции фотонов. По соотношению $\Delta E = mc^2$ можно вычислить, что энергия, выделяющаяся при делении ядра урана, равна примерно 200 MeV. (Каждой тысячной массовой единицы соответствует энергия в 1 MeV, или, точнее, 931 000 eV.) Осколки ядра урана являются радиоактивными и испытывают ряд последовательных превращений, в свою очередь сопровождающихся выделением энергии. Было обнаружено, что при распаде ядер урана образуются многие элементы, например: барий, криптон, рубидий, кадмий и т. д.

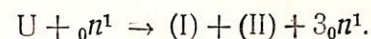
То обстоятельство, что при делении ядра урана появляются две массивные части, очень существенно. Во всех реакциях с легкими ядрами, при захвате ими частицы-снаряда, они распадались путем выбрасывания очень легких частиц, так что основная масса ядра оказывалась целой (вспомним: ${}^7\text{N}^{14} + {}^4\text{He}^4 \rightarrow {}^1\text{H}^1 + {}^8\text{O}^{17}$). В случае же распада ядра урана имеет место взрыв ядра как целого. Поэтому деление ядра атома урана сопровождается выделением огромного количества энергии, как уже указывалось, порядка 200 MeV. О размерах ее можно судить по таким данным.

При делении ядра урана выделяется энергия во много раз (в среднем раз в 100) большая, чем при распаде легких ядер. Вспомним, например (см. § 36), что при реакции протона с литием выделяется 17 MeV энергии, α -частицы с бериллием — 5,6 MeV и т. д. Энергия, выделяемая при распаде ядер урана, выраженная в калориях, приблизительно в 2 миллиона раз больше теплоты, которую можно получить при сжигании такого же количества угля. Следовательно, если произошел бы распад ядер всех атомов 1 кг урана (одного из изотопов его — U^{235}), то он сопровождался бы выделением энергии в таком же количестве, как и при сгорании 2000 тонн угля (или при взрыве 20 000 тонн нитроглицерина).

2. Другая особенность распада урана, еще более замечательная, состоит в следующем.

При делении ядра урана, кроме двух упомянутых выше „осколков“ его ядра, появляется несколько (от 1 до 3) нейтронов, так что эта реакция

в самом общем виде может быть изображена такой записью:



Факт появления новых нейтронов имеет огромное значение. В самом деле: при распаде ядра урана из него выбрасывается 2—3 нейтрона и происходит выделение энергии; появившиеся нейтроны, в свою очередь, расщепляют новые ядра урана, из которых снова выделяется удвоенное или утроенное число нейтронов, причем выделяется еще новое количество энергии и т. д. Число ядер, участвующих в реакции, и количество выделяемой энергии будет возрастать в геометрической прогрессии. Ядерную реакцию, подобную описанной, называют цепной реакцией. Схема такой реакции дана на рис. 36.

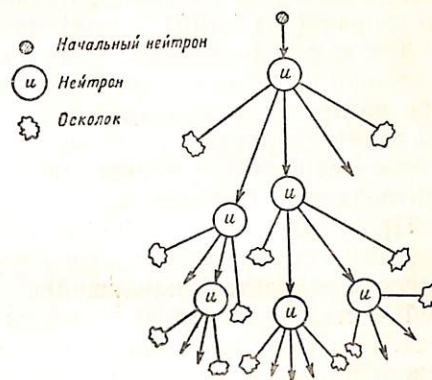


Рис. 36. Схема цепной реакции в уране.

Теория деления ядер разработана Бором и, независимо от него, советским ученым Френкелем. Практическое осуществление цепной реакции в уране встречает ряд больших трудностей. Основные из них таковы.

Уран имеет три изотопа с атомным весом 238, 235 и 234. Почти весь природный уран (99,3%) состоит из U^{238} . U^{235} содержится в количестве 0,7%, а U^{234} содержится в ничтожном количестве (0,008%). Ядра U^{238} сильно поглощают нейтроны (некоторых определенных скоростей) и, как показали работы советских ученых Г. Н. Флерова и К. А. Петржака, делятся только под действием нейтронов с энергией, большей одного миллиона электрон-вольт. Ядра урана 235 делятся под действием и быстрых, и медленных, так называемых тепловых нейтронов. (Такое название получили нейтроны, имеющие энергию порядка долей одного электрон-вольта, потому что их энергия сравнима с энергией,

которую имеют атомы различных веществ вследствие теплового движения.) Тепловые нейтроны оказались значительно более эффективными, чем быстрые нейтроны. Исследования показали, что, несмотря на то, что в природном уране изотоп U^{235} содержится в количестве в 140 раз меньше, чем изотоп U^{238} , тем не менее действие тепловых нейтронов на ядра U^{235} оказывается настолько сильным, что оно превосходит действие быстрых нейтронов на ядра U^{238} . Поэтому в природном уране, где содержание U^{235} невелико, цепная реакция на быстрых нейтронах (без замедлителя) не развивается.

Так как деление ядер урана вызывается медленными нейтронами, а возникающие в процессе цепной реакции нейтроны оказываются нейтронами быстрыми, то приходится прибегать к замедлению нейтронов. В качестве веществ, уменьшающих скорость нейтронов, употребляют тяжелую воду, графит, парафин.

Проникающая способность нейтронов очень велика. Поэтому, если масса взятого урана мала, то появившиеся в результате начавшейся реакции нейтроны большей частью выходят за пределы урана и реакция затухает. В связи с этим для осуществления цепной реакции нужно иметь уран в количестве, не меньшем некоторого предельного (несколько килограммов). Объем вещества, взятого в таком количестве, при котором возможна цепная реакция, называют критическим объемом.

Казалось бы, что для начала цепной реакции в уране достаточно облучить его нейтронами. В действительности это не так. Дело в том, что в воздухе всегда есть отдельные нейтроны, получающиеся в результате радиоактивного распада, которые, попадая в уран, могут начать реакцию. В связи с этим объем приготавливаемого вещества (уран с замедлителем или плутоний, о котором пойдет речь дальше в § 39 и 41) должен быть меньше критического. При доведении объема этого вещества до критического в нем начнется цепная реакция.

§ 38. Удельный дефект массы ядра и прочность ядра

В § 35 мы говорили об освобождении ядерной энергии при образовании ядер из элементарных частиц. Известно, что ядерная энергия освобождается и при распаде ядер, например, в явлении радиоактивности

или при распаде ядер урана. Здесь мы сталкиваемся, на первый взгляд, с противоречием: энергия выделяется и при образовании ядер, и при их распаде. Это противоречие кажущееся, и объясняется оно следующим образом.

Известно, что энергия связи ядер атомов различных химических элементов различна. Значит, при образовании ядер выделялась различной величины энергия.

Величина этой энергии зависит не только от числа нуклонов, из которых состоит ядро, но и от того, как нуклоны „упакованы“ в ядре. Поэтому прочность ядер определяется энергией связи, приходящейся на каждый нуклон ядра. С другой стороны, так как об энергии ядра мы судим по дефекту массы его, то ясно, что о прочности ядра можно судить по дефекту массы на каждый нуклон ядра. Очевидно, что для нахождения этой величины надо дефект массы ядра разделить на массовое число ядра. Эту величину называют „удельным дефектом массы ядра“.

Расчеты показали, что удельный дефект массы ядер атомов химических элементов в системе Менделеева различен и изменяется некоторым определенным образом. А именно: сначала (от водорода до железа) он возрастает, затем (примерно от железа до криптона) остается почти постоянным, а дальше уменьшается.¹ Таким образом, наибольший удельный дефект массы приходится на ядра атомов химических элементов, находящихся в середине системы Менделеева. При образовании ядер этих элементов выделилось наибольшее количество энергии, приходящейся на каждый нуклон. Значит, нуклоны в этих ядрах наиболее плотно „упакованы“, а сами ядра — наиболее прочные.

Как уже указывалось (§ 20), радиоактивный распад тория, актиния, урана заканчивается на стабильных изотопах свинца, ядра которых наиболее прочны. Распад неустойчивых ядер, о котором говорилось в § 33, есть результат перестройки ядер, ведущий к более „выгодной“, более прочной группировке нуклонов в ядре.

В частности, ядра атомов элементов, расположенных в конце периодической системы элементов (вклю-

¹ А. В. Луизов и Л. Б. Понизовский. В недрах вещества. Лениздат, 1952.

чая и уран), распадаются без внешних воздействий, как говорят, спонтанно. Спонтанный распад был открыт (в 1940 г.) и изучен советскими физиками: К. А. Петряком и Г. И. Флеровым. Спонтанное деление — явление редкое. Так, например, в 1 г урана за 1 час спонтанно распадается только около 20 ядер атомов.

Спонтанное деление как деление, происходящее самопроизвольно, должно быть отнесено к виду радиоактивного распада.

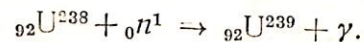
Ядерные реакции, имеющие место в природе, ведут к появлению более устойчивых, более прочных ядер.

Всякая перестройка нуклонов в более прочную группировку сопровождается выделением энергии, что обнаруживается увеличением удельного дефекта массы ядра. Так как наиболее прочными оказываются ядра элементов, находящихся в середине системы Менделеева, то поэтому ядерные реакции, связанные с усложнением более легких или с делением более тяжелых ядер, сопровождаются выделением энергии. Поэтому, в частности, и ядерная реакция в уране оказывается реакцией экзотермической.

§ 39. Трансурановые элементы

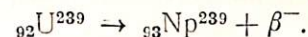
Осуществление цепной реакции в уране позволило обнаружить наличие новых элементов, не встречающихся в природе. Возникают они следующим образом.

Ядра наиболее распространенного изотопа урана U^{238} , захватывая нейтрон, увеличивают этим самым свою массу, сохраняя заряд прежним. В итоге получается изотоп урана с атомами весом на единицу больше. Реакция сопровождается образованием фотонов, обладающих большой энергией — γ -излучением. Реакция может быть записана следующим образом:

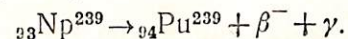


Этот изотоп урана радиоактивен. Период полураспада его 23 минуты. Он претерпевает β -распад, т. е. выбрасывает электрон. В результате ядра увеличивается на один элементарный заряд, а масса его остается той же. Появляется новый элемент, порядко-

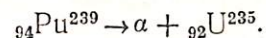
вый номер которого 93. Он получил название нептуния ¹ (Np):



Нептуний 239 также радиоактивен. Период полураспада его 2,4 дня. Он претерпевает также β -распад, в результате чего возникает новый элемент — плутоний (Pu), порядковый номер которого 94. ² Эта реакция сопровождается γ -излучением:



Плутоний тоже радиоактивен, но период полураспада его много больше, чем нептуния — 24 000 лет. Он претерпевает α -распад и обращается в U^{235} :



Существенно учесть, что цепная реакция может быть осуществлена не только в U^{235} , но и в Pu^{239} . Из приведенных реакций, связанных с постепенным превращением U^{238} в Pu^{239} , видно, что таким путем можно получить этот ценный элемент. Вследствие того, что плутоний имеет большой период полураспада, и потому, что он не изотоп нептуния, он может быть выделен химическим путем. Процесс обращения U^{238} в плутоний может быть осуществлен в урановом котле, о котором говорится в следующем параграфе.

В последнее время получены в лабораторных условиях новые элементы: америций ${}_{95}Am^{241}$, кюрий ${}_{96}Cu^{240}$ и ${}_{96}Cu^{242}$. Америций получен бомбардировкой ${}_{92}U^{238}$ α -частицами с очень большой энергией, а изотопы кюрия — бомбардировкой α -частицами Pu^{239} . Новые элементы являются α -активными. Период полураспада америция 241 — 490 лет, а Cu^{240} — 26,8 дня и Cu^{242} — 150 дней. (Совсем недавно стали известны еще два трансурановых элемента: берклий ${}_{97}Bk$ и калифорний ${}_{98}Cf$.)

§ 40. Урановый котел

Выше было указано, что распад ядер урана может сопровождаться выделением огромных количеств энергии. Для этого важно вовлечь в реакцию достаточно

¹ Нептуний имеет ряд изотопов (7).

² Плутоний тоже имеет ряд изотопов (7).

большое число ядер урана. Зависимость выделяемой энергии от числа делящихся ядер выражается следующими данными:¹

| Число ядер, делящихся в одну секунду | 10^{16} | 10^{17} | 10^{18} | 10^{19} |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Выделяемая мощность, <i>квт</i> | 400 | 4 000 | 40 000 | 400 000 |

Из приведенной таблицы видно, что при 10^{19} делений в секунду выделяемая мощность близка к мощности крупной ГЭС — 400 000 *квт*. С другой стороны, оказывается, что если в течение года непрерывно осуществлять деление ядер урана с такой скоростью, то на это уйдет всего 70 кг урана.

Выделение значительных количеств энергии является задачей очень сложной, но не неразрешимой. В процессе решения этой общей задачи надо было решить ряд частных задач, учитывая следующие обстоятельства.

1) Для осуществления цепной реакции в уране необходимо замедлить нейтроны, появляющиеся в процессе реакции.

2) Необходимо уметь управлять ходом реакции.

3) Среда, в которой происходит цепная реакция, является источником мощного излучения, вредного для организма человека. Нужна надежная защита от этого излучения.

4) Цепная реакция сопровождается выделением огромных количеств энергии, которую нужно отводить во избежание значительного повышения температуры. Иными словами, нужно было разработать систему охлаждения.

5) В процессе реакции в уране накапливаются продукты распада его ядер и плутоний (§ 39). Необходимо периодически очищать уран и собирать плутоний.

6) Все работы по управлению реакцией, по очистке урана и выделению плутония должны быть автоматизированы или управляемы на расстоянии.

Установку, в которой осуществляется цепная реакция, называют урановым котлом или ядерным реак-

тором. Конструкция урановых котлов может быть различной. Возможна, например, следующая.

Основной (по массе) частью котла является графит, играющий роль замедлителя нейтронов. В графите располагаются в определенном порядке стержни из металлического урана. Если масса урана больше критической, то в уране начнется цепная реакция. Нейтроны, появляющиеся в процессе деления ядер урана, на пути от одного стержня к другому проходят через графит, в котором уменьшают свою скорость. Часть этих нейтронов (некоторых определенных скоростей) производит деление ядер U^{235} , а другие (имеющие иную скорость) захватываются ядрами U^{238} , что в конечном счете ведет к образованию плутония.

Управление ходом реакции осуществляется вдвиганием в графит и выдвиганием из него урановых стержней. Котел охлаждается (обычно — водой).

Стержни подвергаются периодической обработке, в итоге которой получают плутоний и другие элементы, образующиеся в результате деления. Уран, не участвовавший в реакции, может быть выделен и использован снова.

Схема другого возможного котла приведена на рис. 37.¹

На этом рисунке *A* обозначает пространство, в котором находится уран и замедлитель, *B* — отражатель для нейтронов (благодаря ему уменьшаются критические размеры котла), *C* — массивный слой содержащего водород вещества, в котором поглощаются нейтроны, прошедшие через слой отражателя. Часть этого слоя делается из вещества, поглощающего γ -лучи, выделяемые котлом.

Регулировка котла осуществляется выдвиганием и вдвиганием стержней *D* и *E* из кадмия или бористой стали. Эти вещества обладают способностью поглощать нейтроны.

Стержень *E* (один стержень или группа стержней) может перемещаться внутри котла.

Перемещение этого стержня осуществляется автоматически с помощью ионизационной камеры, связанной с усилителем.

¹ См. М. И. Корсунский. Атомное ядро. ГИТТЛ, 1950.

¹ См. М. И. Корсунский. Атомное ядро. ГИТТЛ, 1950.

Когда нужно остановить котел, внутрь его вдвигают массивный стержень *D*. Он поглощает нейтроны, что ведет к затуханию реакции.

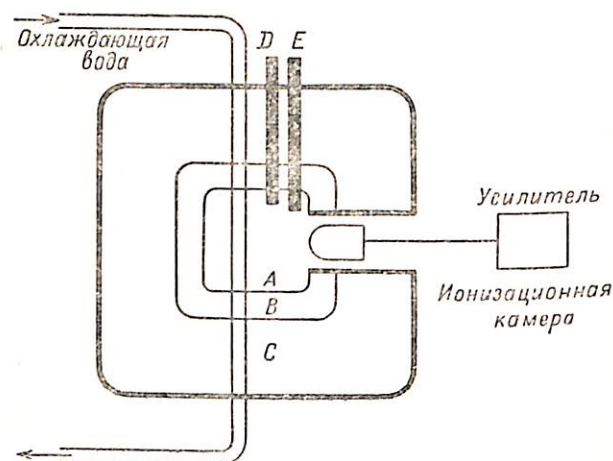


Рис. 37. Схема уранового реактора (котла).

Урановые котлы дают возможность получать плутоний, который может быть использован для изготовления атомных бомб.

§ 41. Атомная бомба

В урановом котле цепная реакция идет относительно медленно по двум причинам. Одна из них — сознательно осуществляемое нами замедление реакции (во избежание чрезвычайно значительного повышения температуры) введением в котел поглотителей нейтронов (стержней из кадмия или бористой стали). Другая — в природном уране, где содержание U^{235} невелико, цепная реакция на быстрых нейтронах (без замедлителя) не идет. Процесс замедления нейтронов требует известного времени, что замедляет и течение самой реакции. Если реакция пойдет с достаточно большой скоростью, то выделение огромного количества энергии произойдет в течение очень короткого промежутка времени. Это практически мгновенное выделение очень большой энергии, сопровождающееся повышением температуры

до миллионов градусов, произойдет как взрыв огромной силы.

Поэтому для взрывной реакции необходимо применять быстрые нейтроны.

Цепная реакция на быстрых нейтронах в природном уране не идет. Ее можно осуществить, применяя или U^{235} , или плутоний. Выделение U^{235} из природного, связанное с разделением изотопов, обладающих одинаковыми химическими свойствами, — задача чрезвычайно сложная, но все же осуществимая. Плутоний получают с помощью урановых котлов. И этот путь сложен и

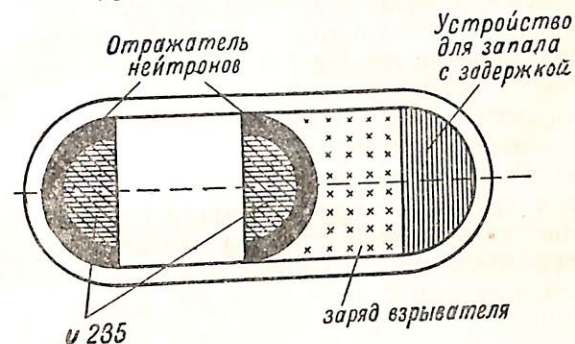


Рис. 38. Схема атомной бомбы.

труден. Для получения плутония в более или менее значительных количествах нужно строить урановые котлы огромной мощности. Кроме того, чрезвычайно трудно выделить относительно небольшое количество плутония, находящегося в смеси с очень большим количеством урана, который по своим химическим свойствам близок к плутонию. О трудностях, связанных с извлечением из котла урана, который радиоактивен, сказано в предыдущем параграфе.

Взрывная реакция в U^{235} или в плутонии произойдет в том случае, если они будут взяты в объеме не меньшем критического (весом порядка нескольких килограммов). Если такой кусок U^{235} (или плутония) разделить на две части, то цепная реакция в них не пойдет. Для осуществления взрыва необходимо обе части объединить в один кусок. Это объединение частей атомной бомбы в одно целое должно производиться очень быстро, так как иначе бомба (вследствие нагревания) может

разрушиться, не дав взрыва. В связи с развивающейся очень высокой температурой взрыв атомной бомбы сопровождается ослепительной вспышкой.

Схема атомной бомбы дана на рис. 38. В оболочке бомбы части урана (или плутония) разделены промежутком. В нужный момент срабатывает запал, происходит взрыв заряда взрывателя, части урана смыкаются, и бомба взрывается.

§ 42. Энергия звезд

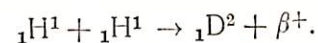
Пытливый ум человека давно стремился выяснить источник энергии Солнца. Известно, какие огромные количества энергии, излучает Солнце. И, несмотря на это, продолжительность жизни звезд исчисляется громадным промежутком времени порядка 10^{12} лет. Выдвигалось много предположений, с помощью которых пытались объяснить происхождение энергии Солнца. Так, например, источник энергии Солнца пытались найти в постепенном сжатии его или в потоке метеоритов, падающих на его поверхность. Несостоятельность всех этих гипотез быстро доказывалась простыми подсчетами.

По современным воззрениям, энергия звезд (в том числе и Солнца) обусловлена энергией, выделяющейся в результате ядерных реакций. Возникают они в недрах звезд под влиянием имеющейся там высокой температуры порядка 10^7 градусов, тогда как на поверхности звезд наблюдаются температуры порядка $10^3 - 10^4$ градусов. Полагают, что внутри звезд происходит цикл ядерных превращений, в которых участвуют углерод, водород, азот и кислород. В результате этого цикла реакций происходит образование ядра гелия из четырех протонов, сопровождающееся выделением двух позитронов. Один из возможных циклов реакций (имеет ли он место в действительности — пока неизвестно) следующий:

- 1) ${}^6\text{C}^{12} + {}^1\text{H}^1 \rightarrow {}^7\text{N}^{13} + \gamma.$
- 2) ${}^7\text{N}^{13} \rightarrow {}^6\text{C}^{13} + \beta^+.$
- 3) ${}^6\text{C}^{13} + {}^1\text{H}^1 \rightarrow {}^7\text{N}^{14} + \gamma.$
- 4) ${}^7\text{N}^{14} + {}^1\text{H}^1 \rightarrow {}^8\text{O}^{15} + \gamma.$
- 5) ${}^8\text{O}^{15} \rightarrow {}^7\text{N}^{15} + \beta^+.$
- 6) ${}^7\text{N}^{15} + {}^1\text{H}^1 \rightarrow {}^6\text{C}^{12} + {}^2\text{He}^4.$

Из этой записи видно, что реакции начинаются с углерода и им же заканчиваются, так что углерод в них играет роль катализатора. (Значком β^+ в приведенных реакциях обозначен позитрон.) Эти ядерные реакции являются экзотермическими и сопровождаются выделением огромных количеств энергии. Образование одного ядра атома гелия сопровождается выделением энергии приблизительно в 28 MeV, т. е. $160 \cdot 10^3$ ккал на 1 г водорода. Эта энергия и восполняет убыль энергии Солнца, обусловленной излучением. Подсчеты показывают, что расход водорода Солнцем за 100 лет составляет лишь около одной миллиардной доли массы Солнца.

Полагают, что приведенный выше цикл реакций, получивший название углеродно-азотного цикла, протекает внутри звезд, имеющих высокую внутреннюю температуру порядка $2 \cdot 10^7$ градусов. В звездах с более низкой внутренней температурой возможно восполнение энергии путем другой реакции, приводящей тоже к образованию α -частицы за счет четырех протонов. А именно: в результате объединения двух протонов, которые сопровождаются испусканием позитрона, образуется ядро атома изотопа водорода с атомным весом, равным 2 — дейтерон.



Получившийся дейтерон, захватывая последовательно два протона, обращается в α -частицу.

§ 43. Перспективы использования ядерной энергии

История науки и техники свидетельствует о том, что с момента того или иного научного открытия до момента разработки техники использования этого открытия в промышленных целях проходит довольно значительный промежуток времени. С момента открытия цепной реакции в уране прошло немногим более десяти лет. Техника использования ядерной энергии в промышленных целях еще не разработана. Поэтому в настоящее время можно говорить только о перспективах в этом отношении. В общих чертах они сводятся к следующему.

- 1) Ядерная энергия может быть использована для взрывных работ, осуществляемых в большом масштабе.

Эта область использования ядерной энергии особенно широка в Советском Союзе, ведущем грандиозное строительство, цель которого — использование сил природы на благо человека.

2) Энергия, освобождающаяся при ядерных реакциях, прежде всего переходит в теплоту. Эта теплота может быть использована для мощных теплоцентралей и электростанций.

3) Урановые котлы могут быть использованы для получения радиоактивных веществ, находящихся все большее и большее применение в научных и промышленных целях.

В настоящее время трудно предвидеть другие возможные пути использования ядерной энергии. Одно несомненно — они грандиозных масштабов.

Ядерная энергия обладает рядом преимуществ перед другими видами энергии.

а) Для получения за счет ядерной энергии теплоты не нужен кислород или какой-либо другой окислитель.

б) Возможно получение огромных количеств теплоты при очень малых расходах исходного вещества (см. таблицу, приведенную в § 40).

в) Ядерная энергия может быть получаемая при очень высоких температурах, а к. п. д. тепловой установки зависит от разности температур топки и холодильника. Поэтому теоретически возможно устройство установок с коэффициентом полезного действия, близким к 100%. Бесконечны перспективы применения ядерной энергии в мирных целях в нашей стране.

Советский Союз давно раскрыл „секрет“ атомного оружия. В сообщении ТАСС от 25 сентября 1949 г. было сказано, что СССР имел его еще в 1947 г. И. В. Сталин в ответе корреспонденту газеты „Правда“ насчет атомного оружия (октябрь 1951 г.) подтвердил, что Советский Союз имеет это оружие. Но и имея это оружие, Советский Союз продолжает борьбу за мир и за применение атомной энергии только в мирных целях.

„Советская наука направлена на службу делу мира и процветания нашей Родины. Если атомная энергия в руках империалистов является источником производства смертоносных орудий, средством запугивания, орудием шантажа и насилия, то в руках советских людей она может и должна служить могучим средством не-

виданного еще до сих пор технического прогресса, дальнейшего быстрого роста производительных сил нашей страны“.¹

§ 44. Космические лучи

Изучение элементарных частиц не ограничивается исследованием только ядерных реакций. С элементарными частицами мы встречаемся в так называемых космических лучах.

Известно, что всякое заряженное тело, помещенное в воздухе и изолированное от Земли, более или менее быстро разряжается. Происходит это потому, что в воздухе всегда имеется некоторое количество ионов. Откуда же они появляются? Считали, что ионизация воздуха производится лучами радиоактивных веществ, находящихся в почве. В 1910 г. швейцарский физик Гоккель, проверяя это предположение, поднялся с заряженным электрометром на воздушном шаре, ожидая уменьшения ионизации воздуха по мере удаления электрометра от поверхности Земли. Результаты опыта оказались неожиданными: по мере удаления от Земли ионизация воздуха вначале действительно уменьшалась, но затем явно увеличивалась. Эти опыты были повторены с более чувствительными приборами рядом других физиков. Оказалось, что до высоты порядка 5000 м ионизация воздуха растет относительно медленно, от 5000 м до высоты порядка 17000 м — очень быстро, а дальше это увеличение ионизации прекращается. Эти данные дали возможность прийти к выводу, что на Землю извне, из мирового пространства, идут особые лучи, получившие название космических. Частицы, поток которых и представляет собою космические лучи, входя в атмосферу и взаимодействуя с нею, создают большое число новых вторичных частиц, чем и объясняется значительная интенсивность лучей на высоте порядка 17000 м. На дальнейшем пути их к Земле интенсивность лучей уменьшается вследствие постепенного поглощения их атмосферой.

Космические лучи, разумеется, поглощаются не только воздухом, но и другими веществами, в частности,

¹ Г. М. Маленков. Доклад на торжественном заседании Московского Совета 6 ноября 1949 г.

водой. Поглощательная способность воды в отношении этих лучей исследовалась или опускавшимися в подводной лодке экспериментаторами с приборами, или погружением в воду специально сконструированных приборов (электрометров). Такие опыты произво-



Рис. 39. Фотография следов космических частиц (электрона и протона) в камере Вильсона в магнитном поле.

дились рядом ученых, в частности, советскими физиками А. В. Вериги в 1919—1930 гг. (опускавшимся в подводной лодке в воду Финского залива), Мысовским и Тувимом (погружавшими электрометры в воду озер).

Что же представляют собою космические лучи? Вначале возникло предположение, что они состоят из γ -фотонов. Но в 1933 г. было открыто влияние магнитного поля Земли на интенсивность космических лучей на различной географической широте (геомагнитный эффект). Стало очевидным, что космические лучи состоят из каких-то заряженных частиц. Позже было выдвинуто предположение, что в состав первичных космических лучей входят позитроны, γ -фотоны и электроны

громадных энергий (порядка нескольких миллиардов электрон-вольт), которые, входя в атмосферу, создают новые, вторичные частицы.

Такие частицы, обладающие большой проникающей способностью, попав в камеру Вильсона, вызывают появление в ней треков. На фотографии рис. 39 видно, что одна из частиц (электрон) описала полную окружность, другая (протон) проходит без заметного отклонения.

В 1946—1947 гг. советским ученым С. Н. Верновым и его сотрудниками были осуществлены тщательно поставленные опыты, которые достоверно показали, что на большой высоте (25—30 км над поверхностью Земли) позитронов, электронов и γ -фотонов такой большой энергии нет. С другой стороны, опыты, проведенные советскими физиками Н. А. Добротиним и С. Н. Верновым в 1948 г., обнаружили, что большая часть (90—95%) первичных частиц является частицами, заряженными положительно. Эти частицы оказались протонами. Дальнейшие исследования показали, что в состав первичного космического излучения, кроме протонов, входят ядра атомов гелия и других элементов (до элементов с порядковым номером $Z=41$).

Вопрос о происхождении космических лучей принадлежит к числу наиболее сложных и трудных проблем современной физики. Одна из гипотез, объясняющих происхождение космических лучей, была выдвинута советским физиком Я. П. Терлецким. С точки зрения этой теории первичные космические лучи зарождаются в атмосферах звезд, имеющих сильные изменяющиеся магнитные поля. Переменное магнитное поле таких звезд вызывает появление вихревых электрических полей (явление электромагнитной индукции), которые ускоряют заряженные частицы, имеющиеся в атмосфере звезды. Эти ускоренные частицы, ушедшие от звезды, путешествуя огромные промежутки времени в мировом пространстве, встречаются на своем пути движущиеся намагниченные ионизованные облака разреженной межзвездной материи и получают дополнительные ускорения, в конечном счете ускоряясь до огромных энергий. (Средняя энергия протонов в космических лучах порядка 10^{10} eV, а энергия ядер атомов других элементов доходит до 10^{15} — 10^{17} eV.)

Космические частицы, сталкиваясь с ядрами атомов газа или других веществ, могут производить расщепление этих ядер.

Первичные частицы, обладающие огромной энергией, врываются в атмосферу Земли и, взаимодействуя с атомами атмосферы, вызывают появление новых (вторичных) частиц, тоже обладающих большой энергией, летящих приблизительно по тому же направлению, что и первичные частицы, и вызывающих появление новых

вторичных частиц. Совокупность всех летящих частиц создает так называемый ливень частиц. Ливни впервые наблюдал советский ученый Скобельцын Д. В. (1929—1931 г.). Один из таких ливней показан на фотографии рис. 40.

Исследования частиц, составляющих ливень, показали, что в состав космических лучей входят позитроны,



Рис. 40. Фотография ливня из 14 частиц в камере Вильсона.

электроны, мезоны и γ -фотоны. В процессе изучения космических лучей были обнаружены новые частицы: позитрон, мезон, нейтрино, которые неоднократно упоминались нами выше.

Исследование космических лучей было знаменательным не только в отношении открытия позитрона. Было обнаружено, что позитрон очень недолговечен. Это происходит потому, что позитрон и электрон, встречаясь вместе, перестают существовать как частицы, обращаясь в излучение — в один или два фотона соответствующей энергии. Наряду с этим

был установлен факт и обратного превращения γ -фотонов достаточной энергии в пару электрон — позитрон.

Как уже указывалось, изучение космических лучей позволило установить существование еще одной частицы — мезона. Исследования показали, что эти частицы обладают или отрицательным, или положительным зарядом, по абсолютному значению равным заряду электрона. Большие затруднения возникли при определении массы мезонов. Мезоны возникают при расщеплении ядер атомов атмосферы первичными частицами. Они недолговечны, их „жизнь“ измеряется несколькими миллионными долями секунды, так как мезоны претерпевают распад. В результате одного из них тяжелый мезон

распадается, превращаясь в более легкий мезон и в электрически нейтральную частицу, получившую название „нейтрино“. В результате другого распада мезон превращается в электрон (если мезон имел отрицательный заряд) или в позитрон (если мезон имел положительный заряд) и в нейтрино. Предположение о существовании нейтрино было выдвинуто еще раньше при объяснении радиоактивного β -распада (§ 31). Данные последнего времени подтверждают реальное существование нейтрино. Масса нейтрино в настоящее время точно не известна, но известно, что она меньше массы электрона. Вследствие малой массы нейтрино и отсутствия заряда эти частицы почти не взаимодействуют с веществом, вследствие чего их очень трудно обнаружить.

§ 45. Взаимная превращаемость частиц

В процессе изучения строения атома и его ядра мы познакомились с рядом частиц: α -частица, электрон, протон, нейтрон, нейтрино, позитрон, фотон, мезон. Какие из этих частиц надо считать элементарными, т. е. простейшими? Ясно, что из перечисленных частиц надо удалить α -частицу, которая явно не является элементарной. Что же можно сказать об остальных частицах — в каком смысле слова мы называем их элементарными? Из каких элементарных частиц состоит атом и его ядро?

Чтобы ответить на эти вопросы, остановимся на следующем.

В изложении вопроса о происхождении β -лучей радия было подчеркнуто, что в ядрах атомов нет электронов и что электроны появляются в момент перестройки ядра. Откуда все же электрон берется? По современным воззрениям, электрон „появляется“ в тот момент, когда один из нейтронов ядра превращается в протон. При этом, кроме электрона, выделяется нейтральная частица, уже упоминавшаяся нами — нейтрино. Заметим, что до этого никаких электронов в ядре не было. Таким образом, надо придти к выводу, что при известных условиях нейтрон может превращаться в протон, причем это превращение сопровождается появлением электрона и нейтрино.

Ядра некоторых радиоактивных искусственных изотопов распадаются, выбрасывая позитрон. Значит ли это,

что в ядре атомов этого изотопа имеются позитроны? Отнюдь нет. Оказывается, что позитрон появляется в тот момент, когда один из протонов ядра обращается в нейтрон, испуская позитрон и нейтрино. Следовательно, при некоторых условиях протон может превращаться в нейтрон, и это превращение сопровождается появлением позитрона.

Мы уже указывали, что позитрон и электрон, столкнувшись, превращаются в другие элементарные частицы — фотоны. И фотоны должны быть отнесены к числу элементарных частиц. Жизнь позитрона поэтому и коротка, что он, столкнувшись с электроном, прекращает свое самостоятельное существование. Следовательно, позитрон и электрон могут обращаться в фотон.

Наряду с этим экспериментально установлен факт образования пары электрон — позитрон при падении на вещество γ -лучей. Отсюда: фотон может превращаться в электрон и позитрон.

Имея в виду только что изложенное, поставим перед собой вопрос: являются ли перечисленные нами частицы элементарными или они сложного строения? Иначе этот же вопрос можно поставить так: можно ли утверждать, например, что нейтрон состоит из протона и электрона или фотон состоит из электрона и позитрона? Совершенно очевидно, что на два последних вопроса должен быть дан отрицательный ответ. То обстоятельство, что, например, превращение нейтрона в протон сопровождается образованием электрона, не дает нам основания представлять себе дело так, что электрон до этого „сидел“ в нейтроне. Образование его, очевидно, связано с уменьшением энергии ядра. Точно так же испускание света атомом при переходе электрона с одной орбиты на другую, связанное с изменением энергетического состояния атома, не дает нам основания считать, что фотон до этого находился где-то в атоме.

Итак, мы приходим к очень важному выводу: элементарные частицы не являются сложными в „механическом“ смысле этого слова, но они оказываются и не неизменяемыми: они обладают свойством взаимного превращения.

Теперь мы можем ответить и на второй вопрос из поставленных в начале этого параграфа: из каких частиц построен атом и его ядро. Когда так ставится

вопрос, то обычно имеются в виду не частицы, которые могут быть получены в результате тех или иных превращений ядра, а частицы, постоянно находящиеся в атоме.

На основании всего сказанного здесь ясно, что к таким элементарным частицам, совокупность которых составляет атом, надо отнести электрон (из электронов построена оболочка атома), протон и нейтрон (из них построено ядро атома).

На некоторой ступени развития физики ей было свойственно искать некоторые вечные и неизменные „кирпичи мироздания“ — постоянные и неизменные частицы. Роль таких „кирпичей“ одно время играли электрон, протон и нейтрон. Дальнейшее изучение атома показало всю несостоятельность этих попыток: нет вечных, неизменных частиц, нет ничего застывшего. Мир атома оказался значительно более сложным и многообразным, чем это представлялось нам прежде. Наше представление о материи становится все более и более полным.

§ 46. Элементарные частицы

В заключение суммируем сведения о том, какие частицы в настоящее время считаются элементарными и каковы их основные характеристики.

1. *Фотон* — основным свойством которого является то, что покоящаяся масса его равна нулю. Электрический заряд также равен нулю. Фотоны тесно связаны с электромагнитным полем. Волновая сторона света — электромагнитные волны, корпускулярная — фотоны. Скорость движения фотона — скорость света.

2. *Электрон* — легкая частица, имеющая массу в 1837,5 раза меньшую, чем атом водорода, и обладающая элементарным отрицательным зарядом.

Масса покоящегося электрона $m = 9,1066 \cdot 10^{-28}$ г.
Заряд электрона $e = 1,6020 \cdot 10^{-20}$ абс. эл.-маг. ед. = $4,8025 \cdot 10^{-10}$ абс. эл.-ст. ед.

Энергия покоящегося электрона $mc^2 = 0,51$ MeV = $0,8185 \cdot 10^{-6}$ эрга.

Атомный вес электрона $A_e = 5,4862 \cdot 10^{-4}$.

3. *Протон* — тяжелая частица, несущая положительный заряд, по абсолютной величине равный заряду

электрона. Протон способен превращаться в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино.

Масса протона $M_p = 1,67248 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$

Заряд протона $e = 1,6020 \cdot 10^{-20} \text{ абс. эл.-маг. ед.} = 4,8025 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл.-ст. ед.}$

Атомный вес протона $A_p = 1,00758$.

4. *Позитрон* — легкая частица, имеющая массу, равную массе электрона, и обладающая положительным электрическим зарядом, по абсолютной величине равным заряду электрона. Характерным отличием позитронов от электронов является их недолговечность. Позитрон, соединяясь с электроном, превращается в один или два фотона. Фотон может обращаться в пару: электрон — позитрон.

Масса позитрона $m_p = 9,1066 \cdot 10^{-28} \text{ г.}$

Заряд позитрона $e = 1,6020 \cdot 10^{-20} \text{ абс. эл.-маг. ед.} = 4,8025 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл.-ст. ед.}$

5. *Нейтрон* — тяжелая частица с массой, приблизительно равной массе протона, и не имеющая электрического заряда (электрически нейтральная).

Нейтрон способен превращаться в протон с испусканием электрона и нейтрино.

Масса нейтрона $M_n = 1,6749 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$

Заряд нейтрона $= 0$.

Атомный вес нейтрона $A_n = 1,00895$.

6. *Нейтрино* — легкая частица, обладающая массой, значительно меньшей массы электрона, и не имеющая электрического заряда (электрически нейтральная). Благодаря этим свойствам нейтрино практически не задерживается веществом и поэтому до сих пор экспериментально эта частица не обнаружена. Однако в настоящее время имеется ряд убедительных доказательств существования нейтрино.

7. *Мезоны* (мезотроны) — частицы, встречающиеся в космических лучах; имеют массу, промежуточную между массой протона и массой электрона. Встречаются мезоны с массами около 230 и 320 электронных масс. Существуют мезоны с электрическими зарядами двух знаков — положительным (положительный мезон) и отрицательным (отрицательный мезон), равными по абсолютной величине заряду электрона.

Мезоны неустойчивы, они спонтанно (самопроизвольно) распадаются.

Имеются экспериментальные данные, пока еще недостаточно проверенные, указывающие на существование мезонов электрически нейтральных. Они получили название „нейтретто“ (в отличие от нейтронов и нейтрино).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Из § 35—45 на уроке могут быть изложены только пункт 3-й § 35 и § 37, 43, 45. Знакомить учащихся с законом взаимосвязи массы и энергии, а значит, и с понятием о дефекте массы при 6 часах урочного времени на тему нет возможности. Поэтому сведения о дефекте массы ядра атома урана в § 37 при изложении этого материала в классе должны быть опущены. В материал § 43 вносить какие-либо изменения нет необходимости, а в § 45 „Взаимная превращаемость частиц“ в перечне частиц, данном в самом начале параграфа, надо только исключить нейтрино и мезон, известные учащимся, сохранив весь остальной материал.

Урановый котел (§ 40) и атомная бомба (§ 41) в учебный план темы не входят, но, повидному, на уроке придется по необходимости о них все же сказать, хотя и очень кратко, имея в виду принципиальную сторону вопроса, отбросив детали. Сделать это можно в связи с рассмотрением цепной реакции в уране (§ 37).

Надо сказать, что такие вопросы, как урановый котел, атомная бомба, космические лучи, чрезвычайно интересуют учащихся. Поэтому материал § 35—45, не затрагиваемый на уроках, может быть с успехом использован во внеклассных занятиях. В связи с этим остановимся на некоторых методических соображениях, касающихся всего материала этих параграфов, а не только того, какой имеется возможность изложить на уроке.

Ознакомление с ядерной энергией целесообразно начать с рассмотрения понятия о дефекте массы ядра. С этого и начинается § 35. Количество примеров на расчет дефекта массы ядер может быть значительно расширено. С этой целью можно воспользоваться таблицами в конце книги.

Вычисление дефекта массы ядра гелия и энергии связи его намеренно произведено нами в двух вариантах. В одном из них масса частиц подсчитывается в массовых единицах, в другом — берется абсолютное значение массы в граммах. Сделано это, чтобы показать

возможность решать такие задачи, пользуясь различными единицами.

Для того чтобы закрепить знания учащихся в области вычисления энергии связи ядер по дефекту массы, могут быть использованы задачи № 4 и 5, приведенные на стр. 58 книги Л. И. Резникова и В. Ф. Юськовича.

По отношению к ядерным силам (п. 2, § 35) надо иметь в виду, что в настоящее время природа этих сил не может считаться установленной. В этом духе и дано изложение данного вопроса в § 35. В связи с этим вряд ли целесообразно знакомить учащихся с обменными силами хотя бы в самых общих чертах даже и в плане внеклассных занятий.

Пункт 3, § 35 „Ядерная энергия“ входит в учебный план темы, но не полностью. Урочным материалом является только начало этого пункта, в котором дается понятие об энергии связи ядра. Для того, чтобы дать учащимся представление о возможности вычислить энергию связи ядра, можно использовать пример определения энергии связи дейтерона, приведенный на стр. 123—124. Так как дефект массы ядра и соотношение между массой и энергией на уроке не рассматриваются, то вычисление энергии связи ядер по дефекту массы должно быть опущено. Этот материал может быть использован во внеклассной работе.

Содержание § 36 посвящено рассмотрению экзотермических ядерных реакций с точки зрения осуществления в этих реакциях условий, нужных для выделения скрытой ядерной энергии (переход покоящейся массы исходных продуктов реакции в добавочную массу движущихся с большой скоростью частиц или в массу фотонов излучения). Есть основания считать материал этого параграфа чрезвычайно существенным. Помещен он для учителя.

Представление о цепной реакции в уране (§ 37) обычно дается учащимся без особых затруднений. Существенно обратить внимание учащихся на то обстоятельство, что цепная реакция в уране была осуществлена после того, как в качестве „снаряда“ для расщепления ядер стали употреблять нейтрон. Далеко не всегда ясным для учащихся является вопрос о том, в какой форме выделяется энергия при цепной реакции в уране.

В связи с этим надо сказать учащимся о том, что в этом случае речь идет о кинетической энергии осколков ядер урана, движущихся с огромными скоростями, и об энергии квантов излучения, образующихся при реакции. Так как число делящихся при цепной реакции ядер огромно и реакция идет с очень большой скоростью, в итоге получается мгновенное выделение очень большой кинетической энергии, переходящей в тепловую (температура продуктов реакции возрастает до нескольких миллионов градусов), что даст мощный взрыв.

Упоминание, имеющееся в тексте о дефекте массы, на уроке должно быть опущено.

§ 38—Удельный дефект массы ядра и прочность ядра помещен для учителя.

§ 39, 40, 41 и 42 могут быть использованы во внеклассной работе. Особенно желательно в этом плане использовать § 41 „Космические лучи“.

Для уяснения принципиальной стороны взрывной реакции, о которой идет речь в § 41, полезно обратить внимание на следующие вопросы.

а) Почему цепная реакция на быстрых нейтронах не идет в природном уране.

Быстрые нейтроны вызывают деление ядер атомов U^{235} , но содержание его в природном уране невелико. Деления ядер U^{238} производят быстрые нейтроны только определенных скоростей. Нейтроны больших и меньших скоростей захватываются ядрами U^{238} , но деления их не происходит. В итоге, количество ядер атомов U^{235} и U^{238} , участвующих в реакции, относительно мало, реакция затухает.

б) Почему для осуществления взрывной реакции необходимо прибегать к быстрым нейтронам.

Недостаток времени не позволяет сколько-нибудь основательно осветить вопрос о разделении изотопов, имеющий большое образовательное и огромное практическое значение. При малейшей к тому возможности существенно хотя бы кратко, в плане внеклассной работы, рассказать о принципиальных путях решения этой задачи (масс-спектрографический метод, метод центрифугирования, газовой диффузии, фракционная перегонка, метод термодиффузии) и об огромных технических трудностях в решении ее.

Материал § 43 „Перспективы использования ядерной энергии“ ценен в воспитательном отношении. Надо обратить особое внимание учащихся на широкие возможности использования ядерной энергии на благо человека в условиях социалистического государства.

На протяжении всей темы надо не забывать задачу развития у учащихся чувства советского патриотизма и национальной гордости, очень тщательно вскрывая не только содержание, но и значение трудов советских ученых в деле развития науки. Исключительно большое ведущее значение работ советских ученых в области атомной и ядерной физики может быть очень ярко и убедительно показано учащимся на материале, изложенном во многих параграфах.

Особенно большое научное и мировоззренческое значение имеет материал § 45 „Элементарные частицы“.

В перечне элементарных частиц, данном в этом параграфе, имеется и фотон. Опыт работы с учащимися X класса показывает, что это обстоятельство для них на первый взгляд оказывается неожиданным, так как они часто представляют себе фотон как какую-то „над-частицу“. Возможно, что в связи с этим удастся еще раз ненадолго вернуться к этому вопросу и кратко вспомнить все, известное уже учащимся о фотоне, а именно:

1) при испускании света атомом фотоны возникают за счет электромагнитного поля, имеющегося внутри атома (мысль же о материальности электромагнитного поля должна быть уже раньше осознанно воспринята учащимися), следовательно фотон — тоже материален;

2) уже приводились соображения, которыми обосновано наличие массы у фотона (см. методические указания после § 9), что опять-таки свидетельствует о материальности фотона, и, наконец,

3) своеобразие фотонов состоит в том, что их масса покоя равна нулю.

Затронутый в § 45 вопрос о том, „из чего“ состоит атом, чрезвычайно важен в деле формирования у учащихся правильного научного мировоззрения.

§ 46 помещен для учителя, но при наличии времени может быть использован и в классе, как подводящий краткие итоги тому, что было сказано об элементарных частицах и об их основных характеристиках.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

| ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ПЕРИОДЫ | РЯДЫ | ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ | | | | | | | | | | |
| | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | | | O |
| 1 | I | H 1 1,008 | | | | | | | | | | He 2 4,003 |
| 2 | II | Li 3 6,940 | Be 4 9,013 | 5 B 10,82 | 6 C 12,010 | 7 N 14,008 | 8 O 16,000 | 9 F 19,00 | | | | Ne 10 20,183 |
| 3 | III | Na 11 22,997 | Mg 12 24,32 | 13 Al 26,97 | 14 Si 28,06 | 15 P 30,98 | 16 S 32,06 | 17 Cl 35,457 | | | | Ar 18 39,944 |
| 4 | IV | K 19 39,096 | Ca 20 40,08 | Sc 21 45,1 | Ti 22 47,90 | V 23 50,95 | Cr 24 52,01 | Mn 25 54,93 | Fe 26 55,85 | Co 27 58,94 | Ni 28 58,69 | |
| | V | 29 Cu 63,57 | 30 Zn 65,38 | 31 Ga 69,72 | 32 Ge 72,60 | 33 As 74,91 | 34 Se 78,96 | 35 Br 79,916 | | | | Kr 36 83,7 |
| 5 | VI | Rb 37 85,48 | Sr 38 87,63 | Y 39 88,92 | Zr 40 91,22 | Nb 41 92,91 | Mo 42 95,95 | Tc 43 (99) | Ru 44 101,7 | Rh 45 102,91 | Pd 46 106,7 | |
| | VII | 47 Ag 107,88 | 48 Cd 112,41 | 49 In 114,76 | 50 Sn 118,70 | 51 Sb 121,76 | 52 Te 127,61 | 53 J 126,92 | | | | Xe 54 131,3 |
| 6 | VIII | Cs 55 132,91 | Ba 56 137,36 | La 57 138,92 | Hf 72 178,6 | Ta 73 180,88 | W 74 183,92 | Re 75 186,31 | Os 76 190,2 | Ir 77 193,1 | Pt 78 195,23 | |
| | IX | 79 Au 197,2 | 80 Hg 200,61 | 81 Tl 204,39 | 82 Pb 207,21 | 83 Bi 209,00 | 84 Po (210) | 85 At (211) | | | | Rn 86 222 |
| 7 | X | Fr 87 223 | Ra 88 226,05 | Ac 89 (227) | Th 90 232,12 | Pa 91 (231) | U 92 238,07 | | | | | |

* * А К Т И Н И Д Ы

* Л А Н Т А Н И Д Ы 58 71

| | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ce 58 140,13 | Pr 59 140,92 | Nd 60 144,27 | Pm 61 (147) | Sm 62 150,43 | Eu 63 152,0 | Gd 64 156,9 |
| Tb 65 159,2 | Dy 66 162,46 | Ho 67 164,94 | Er 68 167,2 | Tm 69 169,4 | Yb 70 173,04 | Lu 71 174,99 |

| | | | | | | |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Th 90 232,12 | Pa 91 (231) | U 92 238,07 | Np 93 (237) | Pu 94 (239) | Am 95 (241) | Cm 96 (242) |
| Bk 97 (243) | Cf 98 (244) | | | | | |

Примечания. 1. В скобках указан не атомный вес, а массовое число одного из изотопов данного элемента.
2. Актиниды до урана оставлены в таблице на обычных местах, хотя, строго говоря, их следовало бы выделить так же, как и лантаниды.

АТОМНЫЕ ВЕСА НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Физическая шкала ¹)

| Наименование элементов | Атомный вес |
|--|----------------------------|
| Изотоп водорода с атомн. весом 1 | H ¹ = 1,00813 |
| Изотоп водорода с атомн. весом 2 | H ² = 2,01473 |
| Водород при отношении содержания | |
| $\frac{H^1}{H^2} = 6900 \pm 100$ | H = 1,008276 |
| Гелий | He ⁴ = 4,00389 |
| Изотоп углерода с атомн. весом 12 | C ¹² = 12,00386 |
| Изотоп углерода с атомн. весом 13 | C ¹³ = 13,00761 |
| Углерод при отношении содержания | |
| $\frac{C^{12}}{C^{13}} = 92 \pm 2$ | C = 12,01465 |
| Изотоп азота с атомн. весом 14 | N ¹⁴ = 14,00753 |
| Изотоп азота с атомн. весом 15 | N ¹⁵ = 15,0049 |
| Азот при отношении содержания | |
| $\frac{N^{14}}{N^{15}} = 270 \pm 6$ | N = 14,01121 |
| Изотоп кислорода с атомн. весом 16 | O ¹⁶ = 16,0000 |
| Изотоп кислорода с атомн. весом 17 | O ¹⁷ = 17,0045 |
| Изотоп кислорода с атомн. весом 18 | O ¹⁸ = 18,0049 |
| Кислород при отношениях содержания | |
| O ¹⁶ : O ¹⁷ : O ¹⁸ = (506 ± 10) : 1 : (0,204 ± 0,008) | O = 16,004357 |

¹ По этой шкале за единицу атомного веса берется $\frac{1}{16}$ атомного веса преобладающего изотопа кислорода O¹⁶.

АТОМНЫЕ ВЕСА НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Химическая шкала) ¹

| Наименование элементов | Атомный вес |
|--|---------------------------|
| Изотоп водорода с атомн. весом 1 | H ¹ = 1,007856 |
| Изотоп водорода с атомн. весом 2 | H ² = 2,014182 |
| Водород | H = 1,008002 |
| Гелий | He ⁴ = 4,00280 |
| Углерод | C = 12,01139 |
| Азот | N = 14,00740 |
| Натрий | Na = 22,994 |
| Хлор | Cl = 35,457 |

¹ По этой шкале за единицу атомного веса берется атомный вес кислорода O = 16,000, состоящего из смеси трех изотопов, содержащихся в смеси в отношении O¹⁶ : O¹⁷ : O¹⁸ = 99,76 : 0,04 : 0,20%.

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МЕГАЭЛЕКТРОН-ВОЛЬТОМ И ДРУГИМИ ЕДИНИЦАМИ

| Надо умножить | на | чтобы получить |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| MeV | $1,07 \cdot 10^{-3}$ | единицы массы ¹ |
| | $1,60 \cdot 10^{-6}$ | эрги |
| | $3,83 \cdot 10^{-14}$ | калории |
| | $4,45 \cdot 10^{-20}$ | киловатт-часы |
| Единицы массы ¹ | $9,31 \cdot 10^2$ | MeV |
| | $1,49 \cdot 10^{-3}$ | эрги |
| | $3,56 \cdot 10^{-11}$ | калории |
| | $4,15 \cdot 10^{-17}$ | киловатт-часы |
| Эрги | $6,71 \cdot 10^2$ | единицы массы ¹ |
| | $6,24 \cdot 10^5$ | MeV |
| | $2,39 \cdot 10^{-8}$ | калории |
| | $2,78 \cdot 10^{-14}$ | киловатт-часы |
| Калории | $2,81 \cdot 10^{10}$ | единицы массы ¹ |
| | $2,62 \cdot 10^{13}$ | MeV |
| | $4,18 \cdot 10^7$ | эрги |
| | $1,16 \cdot 10^{-6}$ | киловатт-часы |
| Киловатт-часы | $2,41 \cdot 10^{16}$ | единицы массы ¹ |
| | $2,25 \cdot 10^{19}$ | MeV |
| | $3,60 \cdot 10^{13}$ | эрги |
| | $8,60 \cdot 10^5$ | калории |

¹ За единицу массы в атомной и ядерной физике принимается 1/16 массы атома изотопа кислорода с массовым числом 16, равная $1,6603 \cdot 10^{-24}$ г.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ И СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗ ОБЛАСТИ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

1. В булавочной головке содержится атомов железа примерно 10 000 000 000 000 000 000
2. Ядро атома занимает в атоме часть его объема, составляющую примерно . . 0,0000000000000001
3. Масса электрона составляет от массы атома водорода примерно $\frac{1}{1837}$ часть
4. Масса электрона составляет от массы ядра атома урана меньше чем $\frac{1}{400\,000}$ часть
5. Масса 92 электронов в атоме урана меньше массы ядра его в 4550 раз
6. 1 г радия выделяет в час энергию в 140 кал
7. В течение часа из миллиарда атомов радия подвергаются распаду 5 атомов
8. Скорость α -частицы примерно . . . 20 000 км/сек
9. Расстояние, которое α -частица проходит в воздухе, не превышает 10 см
10. Для получения тонны чистой тяжелой воды (D_2O) требуется переработать природную воду в количестве 1 000 000 тонн
и затратить на это электроэнергию в . . 1 000 000 000 квт/ч
11. Расщепление всех атомных ядер, содержащихся в 1 кг изотопа U^{235} , сопровождается выделением энергии в таком же количестве, как и при сгорании угля в количестве 2000 тонн
или при взрыве нитротолуола в количестве 20 000 тонн
12. Масса углекислого газа, получающегося при сгорании 12 г углерода в 32 г кислорода, меньше 44 г на 0,000000004 г
13. Масса фотонов, испускаемых Солнцем в течение года 1 200 000 000 тонн

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

1. В. И. Ленин. Материализм и эмпириокритицизм. Соч., т. 14, 1947.
2. И. Сталин. О диалектическом и историческом материализме. Вопросы ленинизма. Изд. 11-е.
3. С. И. Вавилов. Ленин и современная физика. (Стенограмма публичной лекции, прочитанной в Колонном зале Дома союзов в Москве.) М., 1944.
4. С. И. Вавилов. Ленин и философские проблемы современной физики. Сб. статей „Великая сила идей ленинизма“. Госполитиздат, М., 1950.
5. С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. М., изд. 5-е, 1950.
6. Э. В. Шпольский. Атомная физика, т. I и II. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
7. Курс физики, под ред. акад. Н. Д. Папалекси, т. II, Гостехиздат, М.—Л., 1948.
8. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева. Курс физики, т. III. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
9. Н. Л. Глинка. Общая химия. Госхимиздат, М.—Л., 1948.
10. А. И. Бачинский, В. В. Путилов, Н. П. Суворов. Справочник по физике. Учпедгиз, М., 1951.
11. Элементарный учебник физики, под ред. акад. Г. С. Ландсберга, т. III, ГИТТЛ, М., 1952.
12. Л. И. Резников и В. Ф. Юськович. Изучение раздела „Строение атома“ в школьном курсе физики. АПН РСФСР, М., 1952.
13. М. И. Корсунский. Атомное ядро. Гостехиздат, М.—Л., 1951.
14. А. В. Луизов и Л. Б. Понизовский. В недрах вещества. Лениздат, 1952.
15. Большая советская энциклопедия, т. II, 2-е изд., статья „Алхимия“; т. III, статьи: „Атом“, „Атомистика“, „Атомная энергия“, „Атомное ядро“.
16. Журнал „Физика в школе“. 1946—1952.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| Предисловие | 3 |
| Глава I. Развитие учения о строении атома | |
| § 1. Первые представления о строении вещества | 11 |
| § 2. Открытие электрона. Первые научные теории строения атома | 12 |
| Методические указания | 14 |
| § 3. Ядерная модель атома. Атом Резерфорда | 17 |
| Методические указания | 18 |
| § 4. Размеры атома и его частей | 21 |
| Методические указания | 21 |
| Глава II. Проблема строения атома и основные теории современной физики | |
| § 5. Затруднения классической физики | 22 |
| § 6. Понятие о световом кванте | 23 |
| § 7. Теория Бора. Атом Бора | 26 |
| Методические указания | 32 |
| § 8. Недостатки теории Бора | 36 |
| § 9. Квантовая (волновая) механика | 37 |
| Методические указания | 42 |
| § 10. Волновая природа частиц | — |
| § 11. Экспериментальное подтверждение квантовой механики. Дифракция электронов | 43 |
| § 12. Квантовая механика и атом | 46 |
| Методические указания | 48 |
| § 13. Классическая и современная физика | — |
| 1. Предельная скорость движения тел (стр. 49). | |
| 2. Зависимость массы тела от его скорости (стр. 49). | |
| 3. Закон взаимосвязи массы и энергии (стр. 52). | |
| § 14. Условие освобождения энергии вещества. Полная энергия тела | 55 |
| § 15. Формы материи | 57 |
| Методические указания | 59 |
| | 165 |

| | Стр. |
|---|------|
| Глава III. Электронная оболочка атома | |
| § 16. Периодическая система элементов и строение атома | 63 |
| § 17. Строение электронной оболочки | 65 |
| § 18. Электронная оболочка атомов и спектры испускания. Рентгеновы лучи | 69 |
| § 19. Электронная оболочка атомов и химические свойства элементов | 70 |
| <i>Методические указания</i> | 73 |

| | |
|--|-----|
| Глава IV. Строение ядра атома | |
| § 20. Радиоактивность | 75 |
| § 21. Состав радиоактивного излучения | 77 |
| § 22. Обнаружение излучений радиоактивных веществ | 79 |
| 1. Метод сцинтилляций (стр. 79). 2. Камера Вильсона (стр. 80). 3. Счетчик Гейгера (с нитью) (стр. 83). 4. Метод толстослойных фотопластинок (стр. 85). | |
| § 23. Радиоактивные превращения. Изотопы | 85 |
| § 24. Закон смещения | 87 |
| <i>Методические указания</i> | 88 |
| § 25. Период полураспада | 89 |
| § 26. Энергия радиоактивного излучения | 90 |
| § 27. Изотопы нерадиоактивных элементов. Атомный вес. Массовое число | 91 |
| § 28. Расщепление атомных ядер. Протон | 94 |
| § 29. Открытие нейтрона | 98 |
| § 30. Строение ядер атомов химических элементов | 101 |
| § 31. Строение ядра и радиоактивность. Нейтрино | 103 |
| § 32. Искусственная радиоактивность. Позитрон | 104 |
| <i>Методические указания</i> | 107 |
| § 33. Устойчивость ядер | 110 |
| § 34. Ускорители | — |
| 1. Электростатический генератор (стр. 111). 2. Циклотрон (стр. 113). 3. Бетатрон и фазотрон (стр. 115). | |
| <i>Методические указания</i> | 115 |

| | |
|---|-----|
| Глава V. Энергия ядра атома | |
| § 35. Ядерная энергия | 117 |
| 1. Дефект массы ядра (стр. 117). 2. Ядерные силы. Нейтретто (стр. 120). 3. Ядерная энергия (Энергия связи ядра) (стр. 122). | |
| § 36. Ядерные реакции. Освобождение ядерной энергии | 125 |
| § 37. Деление тяжелых ядер. Цепная реакция | 130 |
| § 38. Удельный дефект массы ядра и прочность ядра | 134 |
| § 39. Трансурановые элементы | 136 |
| § 40. Урановый котел | 137 |
| § 41. Атомная бомба | 140 |
| § 42. Энергия звезд | 142 |
| § 43. Перспективы использования ядерной энергии | 143 |

| | Стр. |
|--|------|
| § 44. Космические лучи | 145 |
| § 45. Взаимная превращаемость частиц | 149 |
| § 46. Элементарные частицы | 151 |
| <i>Методические указания</i> | 153 |

Приложения

| | |
|---|---------|
| Периодическая система элементов Д. И. Менделеева | 158—159 |
| Некоторые физические константы | 159 |
| Атомные веса некоторых элементов (Физическая шкала) | 160 |
| Атомные веса некоторых элементов (Химическая шкала) | 161 |
| Соотношения между мегаэлектрон-вольт и другими единицами | 162 |
| Некоторые примеры и сопоставления из области атомной физики | 163 |
| Литература для учителя | 164 |

*Редактор И. В. Барковский
Технич. редактор А. Кирнарская
Корректор А. А. Морозова*

*

М-46243. Подписано к печати 6/XI 1953 г.
Формат 84×108¹/₃₂. Бум. л. 2,6 + вкл. 0,25.
Печ. л. 8,61 + вкл. 0,82. Уч.-изд. л. 8,11 +
+ вкл. 0,2. Тираж 25000. Цена без переплета 2 р. 40 к. Переплет 50 к.
Заказ. № 1877.

*

Типография «Красный Печатник».
Ленинград, проспект имени И. В. Сталина, 91.

2р. 90к.