

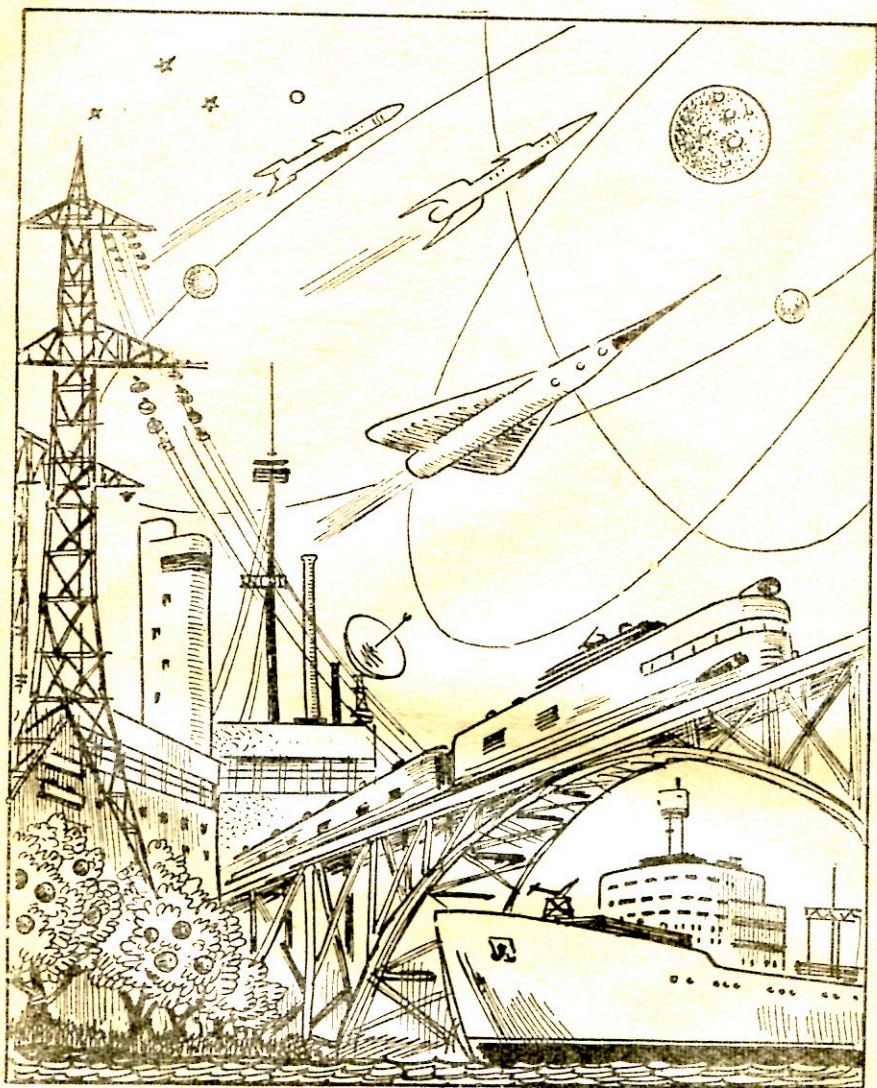
К. А. ГЛАДКОВ



АТОМ

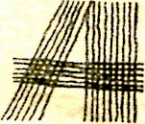
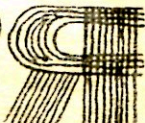
от **А**

до **Я**



К. А. ГЛАДКОВ

АТОМ

ОТ 
ДО 

АТОМ ИЗДАТ

МОСКВА • 1966

ОТ АВТОРА

Эта книга рассчитана на две категории читателей. Первая и основная — рядовой читатель газет и массовых журналов, не имеющий достаточной подготовки и не искушенный в чтении научно-популярной литературы: не доходили руки, некогда или просто не попадалась на глаза интересная книжка. Здесь главная задача — объяснить как можно понятнее значение наиболее часто встречающихся научных и технических терминов, прямо или косвенно связанных с получением и использованием атомной (ядерной) энергии.

Вторая, не менее многочисленная категория — читатель, уже успевший в разное время и без какой-либо системы прочитать изрядное количество статей и заметок на эту тему, у которого уже сложилось представление об основах атомной энергии. Писать для этой категории читателя труднее и сложнее. Усвоенные в результате многих повторений и, естественно, упрощенные истины, часто без должной связи с общими физическими знаниями, создают у такого читателя иллюзию понимания всей проблемы. Ему действительно трудно заставить себя прочитать даже хорошо написанную научно-популярную книгу, часто хотя бы и потому, что, перелистывая любую из них, он непременно встречается с многократно повторяющимися ходовыми объяснениями, эффектными картинками разлетающихся в стороны «клубничек», изображающих ядра атомов.

Имея в виду именно такого читателя, уже «подпорченного» крупными основами науки об атомной энергии, автор расположил материал таким образом, чтобы понятия и термины при чтении их подряд составили своеобразную научно-популярную — от А до Я — книгу по основам атомной энергии.

В каждом разделе, посвященном той или иной букве, понятия и слова, составляющие основы атомной физики, выделены особо в самом начале текста и иногда не в алфавитном порядке. Слова же, являющиеся развитием основных понятий, научными или техническими терминами и производными от других понятий и слов, расположены следом за ними, но уже в алфавитном порядке, как в энциклопедиях и словарях. Кроме того, многие сложные явления и понятия, нуждающиеся в обширных разъяснениях, разделены и распределены по различным словам таким образом, чтобы каждое из них развивало и дополняло предшествующее объяснение, подобно тому, как этого удается достичь в логически связанном и непрерывном тексте обычных научно-популярных книг. При этом ни в коей мере автор не стремится заставить читателя в явной или скрытой форме каждый раз перечитывать отдельные места книги, чтобы получить представление о том или ином разделе науки об энергии атома. Поэтому каждое из отобранных и включенных в книгу слов представляет или по крайней мере должно представлять по возможности законченный рассказ или объяснение явления, понятия или термина.

Не прибегая ни к каким ухищрениям, большую часть понятий и терминов можно было бы разместить под одной буквой А: атомная энергия, атомный транспорт, атомная техника и т. д. А еще больше прав на это имеет буква Я, так как более правильно считать энергию не атомной, а ядерной и говорить: ядерные реакции, ядерный реактор и т. д.

Поскольку же все, о чем рассказывается в этой книге, должно лежать между А и Я, волей-неволей весь материал пришлось расположить по возможности равномерно между этими двумя буквами. И поскольку человечество впервые познакомилось с неведомой титанической природной силой, скрытой где-то в недрах атома, как с энергией атомной, да и начинать с буквы А и слова «Атом» как-то удобнее, то мы и предоставили львиную долю понятий этому слову.

Если спустя некоторое время у читателя «карманной энциклопедии» появится желание более обстоятельно ознакомиться с любой из многих хороших научно-популярных книг, автор сочтет свою задачу более чем выполненной. Рекомендуемая литература приведена в конце этой книги.

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЧЕЛОВЕЧЕСТВО

Первая программа большевистской партии, основанной В. И. Лениным, вырвала нашу страну из капиталистического мира. Вторая программа, принятая еще при жизни Ленина, привела к полной победе социализма. Третья программа, утвержденная XXII съездом КПСС, содержит конкретный план строительства в нашей стране коммунистического общества.

В результате усилий советского народа, титанических по размаху, фантастических по конечным результатам и романтических по содержанию, в стране будет создана материально-техническая база коммунизма — невиданные еще на Земле по могуществу и богатству производительные силы, призванные превратить Советский Союз в первую индустриальную державу мира и окончательно выиграть экономическое соревнование с капитализмом.

И опять, как в 1920 г., основой генеральной линии нашей партии, постоянной и неизменной ее «второй» программой будет электрификация всей страны. «Электрификация на почве советского строя создает окончательную победу основ коммунизма», — неустанно повторял В. И. Ленин каждый раз, когда стоял вопрос, что является самым важным и главным для будущего нашей родины, для будущего человечества.

И не просто электрификация, а опережающее ее развитие по сравнению со всеми другими отраслями тяжелой промышленности — основы индустриализации страны. В наши дни к этому становому хребту экономики — электрификации — партия добавила еще и химизацию народного хозяйства.

840—850 миллиардов киловатт-часов электроэнергии в 1970 г., 2700—3000 миллиардов (3 триллиона!) — в 1980 г.—

в полтора раза больше, чем ее вырабатывают сегодня все страны мира! Новый, астрономический масштаб мер в делах строителей коммунизма.

Большому кораблю — большое плавание. В 1980 г. будет выплавлено 250 миллионов тонн стали, добыто 690—710 миллионов тонн нефти, 1000—1200 миллионов тонн угля. Общая валовая продукция всей советской промышленности возрастет не менее чем в шесть раз, а продукция сельского хозяйства — примерно в три с половиной раза. Это равносильно тому, как если бы на территории нашей страны дополнительно появились производственные ресурсы еще пяти промышленных и более двух сельскохозяйственных стран — таких, как Советский Союз!

Обилие электрической энергии создаст условия для еще большего роста основы всей промышленности — чрезвычайно энергоемкой тяжелой индустрии, которая призвана производить средства производства для предприятий, в свою очередь производящих средства производства (станки, машины) для заводов и фабрик, выпускающих уже все остальное.

Итак, энергия, энергия и еще раз энергия. Именно от энергии в самой совершенной форме — электрической — зависят сроки, в какие будет создана материально-техническая база коммунизма, и быстрота осуществления мечты человечества о золотом веке изобилия, ставшим уже так осязаемо близким.

Ученые однажды подсчитали, что здоровый взрослый мужчина, даже работая по восемь часов в день круглый год, едва-едва выработает 250 киловатт-часов энергии. Чтобы получить такое же количество электрической энергии, нужно сжечь в топке современной электрической станции около 125 килограммов угля. Каждая же тонна топлива, добытого человеком, как бы ставит рядом с ним восемь энергетических помощников.

Если три триллиона киловатт-часов электроэнергии разделить на 300 миллионов человек — предполагаемое население нашей страны к 1980 г., — то на долю каждого из них придется по 10 тысяч киловатт-часов. Следовательно, на порог нового общественного строя каждый советский человек вступит в окружении внушительного отряда из 40 неутомимых природных электрических помощников.

Это, безусловно, очень много, особенно если вспомнить то ничтожное количество — 14 киловатт-часов, — которое приходилось на душу населения в России в 1913 г., или 3 киловатт-

часа в 1920 г., когда утверждался знаменитый ленинский план электрификации России — план ГОЭЛРО.

Но только вступит! А ведь за 1980 г. последуют годы 1990-й, наконец 2000-й! И то, что перед нами сегодня предстает пока еще в виде мечты, для человечества конца XX века окажется уже бесконечно малым.

На пороге нового, коммунистического строя советскому человеку предстоит начать перестройку лица Земли, конструировать его по-своему. Текущие ныне на безлюдный север реки повернуть на юг. Гигантские излишки воды рек Сибири направить в пустыни Средней Азии. Восстановить уровень воды в Каспийском море. Проложить новые реки, создать новые моря.

А далее пойдут работы уже гигантских масштабов. Изменить направление океанских течений для того, чтобы обогреть целые континенты. Превратить в цветущие сады пустыни, вернуть планете весь ее растительный наряд. Обогреть тундры и уничтожить вечную мерзлоту. Вычеркнуть из словарей языков всех народов слова «недород», «нищета», «голод». Проникнуть в глубь Земли, в ее неисчерпаемую кладовую ископаемых богатств. Превратить мировой океан в неиссякаемый источник пищи и промышленного сырья, создать на его просторах искусственные острова и целые материки. Построить множество спутников Земли, заселить Луну и ближайшие планеты...

Любое из этих великих дел для своего осуществления в первую очередь потребует расхода энергии — десятков, сотен, а затем и тысяч триллионов киловатт-часов.

И чем дальше будет развиваться цивилизация, тем больше потребуются энергии... Целый океан ее!

Вполне естественно, что людей уже сейчас начинает тревожить вопрос: надолго ли хватит существующих источников энергии? Не наступит ли уже в конце текущего столетия энергетический голод, главным образом из-за исчерпания запасов ископаемого топлива: угля, нефти, природного газа, торфа, горючих сланцев, дров? Чем мы располагаем в настоящее время, на что можем рассчитывать в ближайшем и отдаленном будущем?

Сегодня мы являемся свидетелями захватывающего соревнования в строительстве энергетических гигантов. Одна за другой вводятся в строй гидроэлектрические станции поистине астрономической мощности: Волжская им. В. И. Ленина на 2,1 миллиона киловатт, Волжская имени XXII съезда

КПСС на 2,3 миллиона киловатт, Братская мощностью 3,6 миллиона киловатт. Ведутся работы по сооружению Красноярского гиганта мощностью 5 миллионов киловатт. Одна такая станция дает энергии в несколько раз больше, чем было предусмотрено планом ГОЭЛРО! Проектируется строительство еще более мощных гидроэлектрических станций на Ангаре, Енисее, Лене и других реках СССР. От всех же рек, протекающих по территории СССР, можно было бы получить мощность примерно 250 миллионов киловатт — в три раза больше, чем давали все электрические станции страны в 1960 г. Это, конечно, очень много, но не настолько, чтобы обеспечить нужды людей коммунистического завтра.

И нет ничего удивительного в том, что самым распространенным источником энергии во всем мире пока является ископаемое топливо, главным образом каменный уголь. Его больше всего запасено в недрах земли.

Нефти на земном шаре пока что разведано раз в сто меньше, чем угля. Однако ввиду того, что добывать, перевозить и использовать ее значительно легче, удобнее и дешевле, чем уголь, добыча и потребление нефти не только догнали, но и начинают обгонять добычу и потребление угля. В 1965 г. во всем мире добыто уже более 1400 миллионов тонн нефти.

Столь же быстро, а пожалуй, еще быстрее растет добыча природного газа.

Резкое возрастание добычи угля, а особенно нефти и газа, в свою очередь позволяет еще больше ускорить строительство и ввод в эксплуатацию сверхмощных тепловых электрических станций, а следовательно, и ускорить создание материально-технической базы коммунизма.

Электрическая энергия очень и очень долго будет оставаться идеальной, господствующей формой энергии, используемой обществом будущего во всех областях производительной деятельности. Но у этой энергетической владычицы есть и свои врожденные слабости.

Тепловую энергию можно, например, хранить, накапливать, правда косвенно, в виде запасов топлива, горючих и взрывчатых веществ, химических реактивов. Электрическую энергию ни хранить, ни накапливать ни прямо, ни косвенно, кроме очень ничтожно малых количеств, невозможно. Ее нужно потреблять по мере выработки.

Ну, а как быть в тех случаях, когда накопленной в виде топлива или падающей воды энергии нет вовсе или ее недостаточно? Например, около 80% всей промышленности, равно как и населения СССР, сосредоточено в Европейской части страны и на Урале. А подавляющая часть всех энергетических ресурсов, воды и топлива приходится на восточные и северо-восточные районы страны. Каким самым быстрым, экономически выгодным и технически целесообразным способом можно было бы разрешить эту проблему?

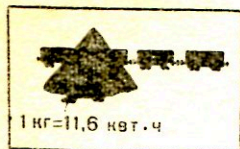
Или решить такую более далекую задачу: собрать в энергетический кулак огромной мощности электрическую энергию, вырабатываемую целой страной,— десятки миллионов киловатт. Но погрузить ее на борт ракеты и использовать для космического полета невозможно. Ее не в чем хранить, ничего ею нельзя зарядить, ее невозможно сгустить, сжать. А обычные многоступенчатые установки и машины для преобразования энергии топлива в электрический ток чрезвычайно громоздки, тяжелы и имеют низкий коэффициент полезного действия.

Поэтому ученые давно мечтают об источнике, который при ничтожно малом объеме обладал бы баснословно огромной энергией, превосходящей энергию любых самых сильных взрывчатых веществ на свете.

И вот свершилось чудо. Тридцати граммов урана-235 оказалось вполне достаточно, чтобы в течение суток питать энергией электрическую станцию мощностью в пять тысяч киловатт, обычно сжигающую за это время около ста тонн угля. А несколько сот граммов этого чудесного вещества позволяют машинам самого мощного в мире советского ледокола «Ленин» развивать мощность 44 тысячи лошадиных сил!

Природа постаралась скрыть столь потрясающее количество энергии в ничтожно малом объеме вещества — в ядре атома. Но человек сумел отомкнуть тысячи хитроумнейших запоров, ведущих к сердцу атома, извлечь из него энергию и подчинить ее своей воле.

И хотя с момента этого величайшего открытия, о котором выдающийся французский физик Поль Ланжевен сказал, что оно по своему значению в истории цивилизации, может быть, будет поставлено наряду с открытием огня, прошло более 20 лет, не только простой человек, но и ученые, имеющие дело с этой новой природной силой, до сих пор не могут свыкнуться



со столь «противоестественным» несоответствием между привычными количествами вещества и заключенной в нем энергией.

Подумайте: при полном сгорании одного килограмма самого лучшего топлива — нефти — выделяется 11,6 киловатт-часа тепловой энергии. А при делении ядер атомов одного килограмма урана-235 выделяется энергия, тоже в виде тепла, равная 22,9 миллиона киловатт-часов — почти в два миллиона раз больше! Причем эту энергию можно выделить или всю сразу, в форме взрыва колоссальной разрушительной силы, длящегося всего одну миллионную долю секунды (атомная бомба), или получать постепенно, как на обычной электрической станции.

Еще больше энергии выделяется при так называемой термоядерной реакции — реакции слияния ядер атомов легких элементов, например водорода. В этом случае количество энергии возрастает до еще более невероятной величины —

117,5 миллиона киловатт-часов на один килограмм водорода! И, наконец, что кажется уже непостижимой фантастикой, вещество оказалось вообще хранилищем баснословно огромного количества энергии — «пружиной» астрономических масштабов, способной, если сумеет когда-либо ее «спустить», выделить из одного килограмма вещества 25 миллиардов киловатт-часов энергии — годовую отдачу всех волжских гидроэлектрических гигантов! А ведь все вокруг нас, да и мы сами, состоит из триллионов триллионов атомов, «пружины» которых были заведены тогда, когда в исторической бесконечности космоса складывались все окружающие нас вещества, вся планета, Солнечная система, Галактика, система галактик, Вселенная.

Термоядерную реакцию мы пока можем осуществлять лишь в форме взрыва чудовищной силы — взрыва водородной бомбы. И в день, когда ученые научатся управлять ходом термоядерной реакции, человек станет подлинным властелином природы, так как получит в свое распоряжение действительно

неограниченные и неиссякаемые источники энергии — тысячи, миллионы, а со временем и миллиарды электрических двойников на каждого живущего на земном шаре человека!

Делящихся веществ в земной коре не столь уж много, а если учесть, что наша планета просуществует еще добрых несколько десятков миллиардов лет, то их вообще не останется. А водорода на земном шаре — превеликое количество. Это сотни миллионов кубических километров воды Мирового океана, рек, озер, подземные воды, влага атмосферы, десятки миллионов кубических километров льдов Арктики и Антарктики. Его хватит надолго, даже если счет вести на эпохи и эры.

Огромная концентрация регулируемой энергии в ничтожно малом объеме позволит отправлять ракеты в космические рейсы — на самые отдаленные планеты, в другие звездные миры, а возможно, и в соседние галактики, осуществить когда-либо, в очень далеком будущем, фантастическую попытку изменить ось наклона земного шара и тем самым превратить нашу планету в вечно цветущий рай, а возможно, и переправить ее целиком на орбиту какой-либо иной, более горячей звезды.

Сочетание коммунистического общественного строя и неисчерпаемых источников энергии, скрытых в недрах атома, знаменует собой начало подлинного золотого века человечества, воспеть который сегодня бессильна даже самая пылкая фантазия.

А

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
«Атомный» язык	14
Атом	16
Атом электричества — электрон	19
Атома и атомного ядра модели	22
Атомный (ядерный) реактор	26

«Атомный» язык. В ряде мест этой книги мы вынуждены пользоваться специальными буквенными и цифровыми обозначениями и формулами. Все они очень просты, наглядны, и к ним легко привыкнуть.

Буквенные и цифровые обозначения. В ядерной физике для химических элементов приняты те же буквенные обозначения, что и в химии. Однако рядом с сокращенным латинским обозначением элемента проставляются еще две цифры: вверху справа — атомный вес элемента, соответствующий суммарному числу всех нуклонов ядра атома (протонов и нейтронов), внизу слева — порядковый номер элемента в периодической таблице Менделеева, обозначающий количество положительных зарядов (протонов) в ядре атома и соответствующее им число электронов на всех его орбитах. Вот так: ${}^7_3\text{Li}$ — литий.

Внизу слева порядковый номер элемента 3 означает, что в ядре атома находятся три положительно заряженных протона, а на орбитах вокруг ядра вращаются три электрона. Вверху справа — атомный вес 7. Вычитая из семи три, можно узнать и число нейтронов в ядре атома. Оно равно четырем.

Часто, чтобы не усложнять при повторениях названий элементов или его изотопов, пишется полное название элемента по-русски, но только с числом, выражающим его атомный вес. Например, полоний-210, радий-226, уран-238 и т. д.

Сходные обозначения приняты и для атомных частиц:

e^- — электрон. Минус справа вверху означает отрицательный знак элементарного электрического заряда;

e^+ — позитрон. Плюс справа вверху означает положительный знак элементарного электрического заряда;

n^1 — нейтрон. Единица вверху справа означает атомный вес нуклона, нуль слева внизу — отсутствие электрического заряда.

На каждой странице этой книжки будут по многу раз встречаться и такие слова и понятия: скорость, ускорение, сила, а особенно часто — энергия. Поэтому сначала придется вспомнить кое-что из школьных учебников; это поможет правильно разобраться в некоторых особенностях терминов, после чего будет уже значительно легче перейти к более сложным и тонким понятиям, принятым в современной физике.

Скорость. Если физическое тело («точка»), движущееся в пространстве, проходит равные пути за одинаковые промежутки времени, говорят, что оно имеет постоянную скорость. Единица измерения скорости — один сантиметр в секунду (*см/сек*).

Ускорение означает быстроту изменения скорости. Единицей здесь служит изменение приведенной выше скорости — 1 см/сек за секунду. Получается 1 см/сек^2 .

Сила. Тело, обладающее массой и движущееся в пространстве с некоторым ускорением, испытывает непрерывное воздействие (давление), называемое силой. Величина силы определяется как произведение массы тела на его ускорение. Единицей силы служит дина (*дин*). Это такая сила, которая, действуя (давя) на тело с массой в 1 г , заставляет его ускоряться на единицу ускорения — 1 см/сек^2 .

Работа. Когда под действием силы какое-либо оказывающее ей противодействие тело перемещается с ускорением или поднимается на некоторую высоту, то говорят, что сила производит определенную работу. Единицей служит работа, производимая силой в 1 дин на расстояние 1 см . Эту единицу называют эрг (*эрг*). Практической единицей работы является джоуль (*дж*), равный 10^7 эрг . Отсюда $1 \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$.

Мощность — количество работы, выполненной за единицу времени. Физической единицей измерения ее служит 1 эрг/сек , а практической — 1 дж/сек , которая называется ватт (*вт*). 1000 вт составляет киловатт (*квт*).

Энергия. Работу, соответствующую определенной мощности, развиваемой в секунду, можно производить и дольше — в течение часов, дней, лет. Это зависит от количества энергии, расходуемой на выполнение данной работы. Поэтому количество энергии, требуемое для того, чтобы развивать мощность в 1 квт в течение часа, принято измерять единицей, называемой киловатт-часом (*квт-ч*).

В подавляющем большинстве случаев энергию люди получают от источников сырья, сжигая уголь, нефть, дрова, торф, ядерное горючее. А тепло в физике принято измерять в других единицах — калориях (*кал*). Это количество тепла, необходимого для нагрева 1 г воды на 1°C . 1000 кал , или 1 килокалория (*ккал*), способны нагреть на 1°C 1 кг воды. 1 г угля при сжигании дает 8 ккал , нефти — 12 , природного газа — $10,6$, дров — 4 ккал . 1 квт-ч равен 860 ккал .

Кинетическая энергия — энергия движения любого материального тела или частицы или количество работы, которое тело способно совершить благодаря своему движению. Определяется как половина произведения массы тела на квадрат скорости. Кинетическая энергия системы материальных тел равна сумме кинетических энергий каждого тела в отдельности.

Электронвольт. Что это за величина? Заряд электрона — величина строго постоянная. Попадая в электрическое поле, создаваемое разностью потенциалов между заряженными телами в 1 вольт (*в*), электрон разгоняется до скорости 593 км/сек . А вместе со скоростью, естественно, растет и кинетическая энергия частицы. При такой скорости кинетическая энергия будет равна произведению его заряда на раз-



ность потенциалов, т. е. $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг, или $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Это количество энергии и соответствует одному электронвольту (эв).

Чтобы получить представление о конкретной величине этой единицы, нужно знать, что средняя энергия теплового движения атомов или молекул газа, а также энергия атомов твердого или жидкого тела при комнатной температуре равна примерно 0,03 эв.

Энергия электрона, пребывающего в наивысшем энергетическом состоянии в пределах атома водорода (на самой удаленной от ядра орбите), составляет 13,53 эв. Приобретая энергию свыше этой величины, электрон уже навсегда покидает атом.

В электронвольтах измеряют энергию и всех других — заряженных и незаряженных — движущихся частиц, а также фотонов.

Потенциальная энергия — работа, которую тело может совершить в силу своего положения или состояния (например, сжатая пружина, поднятый на большую высоту груз, запас топлива и т. д.), или работа, которую нужно совершить над телом, чтобы переместить его в направлении, противоположном направлению действия его «замороженной» силы, зависящей только от положения тела.

Атом — главный персонаж данной книги и всего окружающего нас материального мира.

Мысль о том, что все бесконечно огромное разнообразие веществ в природе состоит из ничтожно малых и невидимых глазу частичек, не поддающихся дальнейшему делению (дроблению), приходила в голову еще мудрецам Древнего Востока, Индии, Китая, Греции. Но это все было плодом размышлений, раздумий и догадок, порой даже гениальных, а не результатом опытов или научных обобщений. Наиболее полно эта догадка была высказана древнегреческим философом Левкиппом и его учеником Демокритом, жившими за четыре века до нашей эры. Демокриту принадлежит и слово «атом» — неделимый, которое он дал таким неделимым частицам материи. Эти два великих мыслителя древности, а к ним можно еще прибавить Эпикура и Лукреция Кара, положили начало материалистическому пониманию явлений природы — философскому учению о вечности материи, ее несотворимости, неуничтоженности и вечном круговороте в природе.

Но только спустя 17 веков эти догадки древних ученых сумел переложить на язык подлинной науки великий русский ученый М. В. Ломоносов. В основу предложенной им теории строения вещества легло существование «корпускул» (молекул), которые состоят из химических элементов, или «нечувствительных физических частичек» — атомов. Все движение материи, учил Ломоносов, сводится к движению атомов и является причиной всех исключения изменений, происходя-

щих в природе. Движение атомов в веществе определяет и степень нагрева его, или температуру. Он же тогда предсказал и существование самой низкой возможной температуры — абсолютного нуля, при которой тепловое движение «нечувствительных частичек» вещества прекращается вовсе.

Самую крошечную порцию любого вещества окружающего мира, которая все еще полностью сохраняет все свойства этого вещества, назвали молекулой. При делении молекула вещества прекращает свое самостоятельное существование и распадается на атомы — самые маленькие частицы сравнительно небольшого числа отличных друг от друга химических элементов.

Исследуя шаг за шагом всевозможные природные вещества, открывая новые элементы, химики все точнее и точнее устанавливали их отличительные черты и свойства. В ходе этого кропотливого и длительного изучения обнаружилось много удивительного и просто непонятного. Атомы одних элементов были чрезвычайно легкими, других — крайне тяжелыми. Одни элементы вступали друг с другом в столь энергичное взаимодействие — реакцию, что их приходилось держать отдельно и далеко друг от друга. С другими же элементами этого проделать нельзя было ни при каких условиях.

Все это не могло не волновать ученых. В хаотическом беспорядке фактов нет-нет да угадывались некие закономерности, свидетельствовавшие о наличии какого-то строгого, но пока еще неведомого порядка. Кажущийся хаос, видимо, был не в природе, а в отрывочных, неполных знаниях ученых. И этот порядок требовалось установить в первую очередь. Честь раскрыть сложную, тщательно скрываемую тайну природы выпала на долю выдающегося русского ученого, профессора химии Петербургского технологического института Дмитрия Ивановича Менделеева (см. «Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева»).

Догадка о конечности атома просуществовала более тысячелетия. И понадобилось лишь несколько десятков лет, чтобы с полной бесспорностью установить, что неделимость атомов — заблуждение, правда, отражающее общую идею древних философов-материалистов о неделимости первооснов материи.

Атомы химических элементов оказались вовсе не атомами, а целыми своеобразными мирами относительно огромной про-

тяженности, построенными из более простых деталей — частиц. И хотя ученые называли их элементарными — простейшими — частицами, весь ход развития науки наших дней свидетельствует о том, что и они являются далеко не элементарными (см. «*Элементарные частицы*»).

Первое и основное — атом оказался состоящим из двух главных частей — тяжелого, положительно заряженного ядра (см. «*Ядро атома*»), в котором сосредоточена почти вся масса атома, и легкой оболочки, состоящей из атомов электричества — электронов (см. «*Атом электричества — электрон*»), с огромной скоростью вращающихся вокруг ядра, но никогда на него не падающих. Диаметр атома равен приблизительно одной стомиллионной доле сантиметра (10^{-8} см), а его ядро — меньше примерно в 10 000—100 000 раз.

Атом самого легкого в природе элемента — водорода — состоит из двух частиц: ядра, масса которого равна $1,6724 \cdot 10^{-24}$ г, и вращающегося вокруг него единственного электрона с массой, равной $9,1085 \cdot 10^{-28}$ г, что примерно в 1836 раз меньше массы ядра этого атома. У гелия — следующего после водорода элемента периодической системы — вокруг ядра вращаются два электрона, у лития — 3, у кислорода — 8, у железа — 26, у урана — 92 электрона.

Чтобы не усложнять до бесконечности расчеты, обычно массу всех атомов химических элементов выражают в относительных единицах (см. «*Атомный вес*») по отношению к $\frac{1}{16}$ части массы основного изотопа кислорода ${}^8\text{O}^{16}$.

Ядро атома заряжено положительно, а каждый из вращающихся вокруг него электронов несет с собой отрицательный электрический заряд, который никогда не бывает меньше строго определенной величины, называемой элементарным электрическим зарядом. Положительный электрический заряд ядра атома в точности равен сумме отрицательных зарядов электронов, находящихся в электронной оболочке атома. Поэтому в нормальном состоянии атом электрически нейтрален. Число положительных зарядов ядра атома и определяет собой атомный или порядковый номер данного элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Под действием внешних причин ядро атома может терять или захватывать электроны, в зависимости от чего оно становится или положительным (в случае потери электронов), или отрицательным ионом, если на время захватило лишний электрон от со-

седнего атома или из числа свободных электронов, присутствующих в окружающей его среде.

Электроны на своих орбитах удерживаются силами электрического притяжения между ними и ядром атома и образуют единую согласованную систему, причем каждый из электронов в зависимости от расстояния, на котором он вращается вокруг ядра, обладает определенным запасом энергии. Чем дальше электрон удален от ядра, тем большей энергией он обладает, хотя с увеличением этого расстояния связь его с ядром, естественно, ослабевает. Однако ни один из электронов не может пребывать в одном и том же энергетическом состоянии (на одной и той же орбите), что и другие электроны, поэтому в электронной оболочке электроны располагаются слоями. В каждом слое может находиться не больше определенного числа электронов: в первом, ближайшем от ядра слое — 2, во втором — 8, в третьем — 18, в четвертом — 32 и т. д. После второго слоя электронные орбиты разбиваются на подслои.

Химические свойства атома — способность вступать в те или иные химические реакции — определяются, как правило, электронами самых внешних слоев, так как, будучи слабее всех связанными со своим ядром, они легче вступают во взаимодействие с другими атомами.

При всех химических преобразованиях веществ окружающей нас природы всегда и неизменно происходит превращение некоторых сложных веществ в простые и обратно — простых в сложные. Эти процессы всегда сопровождаются затратой или выделением энергии.

Атом электричества — электрон. По мере углубления в изучение свойств окружающих нас тел человек все чаще и чаще сталкивался с проявлением электрических сил. Именно электрическая энергия в конечном счете дала в его руки наиболее гибкие и тонкие способы и средства решать самые разнообразные задачи, встречающиеся в современной науке и технике.

Мы уже знаем, что каждый атом представляет собой целую систему взаимодействующих друг с другом электрических зарядов — положительно заряженных ядер и вращающихся вокруг них отрицательных электронов. А так как подавляющая часть массы всего атома сосредоточена в его ядре,

то выходит, что почти вся масса окружающих нас веществ связана с положительным электричеством, которое в значительной степени определяет и свойства окружающей нас природы.

Отличие химических свойств того или иного вещества, например кислорода от железа, объясняется только тем, что в ядре атома кислорода сосредоточено восемь положительных электрических зарядов, в ядре атома железа — 26, а в оболочках — соответствующие им количества электронов. Большинство наблюдаемых в природе химических реакций является результатом взаимодействия внешних электронов, вращающихся на сравнительно огромных расстояниях от своих ядер.

Долгое время электрон считался простейшей и самой маленькой частицей мироздания. Все электроны всех веществ совершенно одинаковы, будь это вода, дерево или железо. Ни при каких обстоятельствах не удастся получить или наблюдать ни отрицательных, ни положительных электрических зарядов меньше заряда одного электрона.

При исследовании выяснилось, что к электронам в атоме нельзя применять полностью законы движения в том виде, как их установили для больших объектов. В пространстве, измеряемом стотысячными долями сантиметра, действуют совершенно иные законы.

В отличие от солнечной или любой другой крупной механической системы, в которой тело в зависимости от ее начальной скорости может двигаться по любой орбите, в атоме для движения электронов разрешены только орбиты, соответствующие строго определенным значениям их энергии и магнитным моментам. Никаких других значений энергии электрон в данном атоме иметь не может.

Такой дискретный (прерывистый) характер местоположения электрона на орбитах или, точнее, возможность существования только строго определенных уровней энергии электрона и невозможность иметь для него в атоме промежуточные величины энергии — одно из основных свойств, вытекающих из квантовой теории. Согласно этой теории, переход электрона с одной орбиты на другую, т. е. из одного энергетического состояния внутри атома в другое, сопровождается поглощением или испусканием кванта света строго определенной энергии. И если какая-либо орбита уже занята одним электроном, она не может быть занята другим электроном; в атоме не может

быть двух электронов, которые бы находились в одном и том же энергетическом состоянии.

Из всех возможных состояний, которые электрон может иметь в атоме, прежде всего замещается то, при котором он обладает наименьшей энергией и, следовательно, сильнее всего притягивается к ядру, т. е. располагается на самой близкой к ядру орбите.

Таким образом, электроны не могут все скопиться на одной и той же орбите, и каждый следующий занимает орбиту, соответствующую более высокому уровню энергии и остающуюся еще свободной. По этому правилу и происходит распределение электронов в атомах различных элементов в порядке возрастания их энергии, или так называемого квантового состояния.

Химические свойства атома зависят от количества и расположения электронов в оболочке. Каждый период менделеевской таблицы заполняется и строится по тому же закону, что и предыдущий. Поэтому и химические свойства, например, второго периода близко подходят к свойствам первого периода. Распределение электронов в атоме лития потом снова воспроизводится, но только на другом энергетическом уровне — в атоме натрия. Через один период мы имеем аналогичное состояние электронов в атоме калия, затем в атомах рубидия и цезия и т. д. Все эти элементы принадлежат к первому столбцу таблицы Менделеева — к группе щелочных металлов.

Чтобы оторвать самый внешний электрон от атома, например лития, нужно затратить энергию, равную 5,39 эв. Два других электрона этого атома, расположенные ближе к ядру, удерживаются более прочно. Энергия связи их с ядром соответственно равна 75,6 и 122,4 эв.

Направленный поток свободных, т. е. оторванных от своих атомов, электронов в проводниках или полупроводниках и является хорошо всем знакомым электрическим током.

При поглощении атомом поступающей извне энергии, причем эта энергия поглощается строго определенными порциями — *квантами*, электроны переходят на более удаленные от ядра орбиты (или более высокие энергетические уровни). Чем выше энергия поглощаемых квантов, тем дальше от ядра перебрасывается электрон.

В таком так называемом возбужденном состоянии представленный самому себе атом долго пребывать не может и вынужден вернуться обратно в обычное свое состояние. Осуше-

ствляется это тем, что заброшенный на более удаленную орбиту электрон возвращается на свое прежнее место. А приобретенная атомом излишняя порция энергии испускается в виде кванта электромагнитного излучения. Когда такой переход совершается на крайних орбитах (где энергия связи электрона с ядром слабее всего), испускаются кванты инфракрасных лучей, видимого света или ультрафиолетовых лучей. При перескоках электронов на орбиты, более близкие к ядру атома (допустим, сразу через одну или несколько орбит), испускаются кванты более «жесткого» электромагнитного излучения — *рентгеновских лучей*, обладающих во много раз большей энергией, чем лучи видимого и невидимого ультрафиолетового и инфракрасного света.

Атома и атомного ядра модели. Все наше знакомство с атомом и его ядром основано на очень косвенных методах исследования. Поэтому всякого рода термины: «строение» ядра атома, его «изображение» и сходные выражения — носят почти целиком условный характер. Ядро атома, во-первых, невидимо, во-вторых, почти каждое новое, не только фундаментальное, но и частное открытие в ядерной физике часто заставляет ученых видоизменять, совершенствовать, а подчас и начисто менять картину устройства этой важнейшей частицы микромира.

Поэтому, чтобы не создавать неправильного, научно неверного представления об истинной картине описываемых явлений, физики, как правило, говорят о «модели» атома или его ядра. Такой термин более правильно и точно отражает состояние самых последних фактических знаний и представлений о таинственном мире, изучение которого стало целью и смыслом жизни многих поколений ученых.

Самой первой моделью атома конца XIX века явился «пудинг с изюмом» Дж. Томсона. Этот большой ученый считал, что неделимый атом, например углерода, состоит из сферы — сплошного сгустка положительно заряженного электричества, в которую вкраплено шесть электронов. Сумма отрицательных зарядов всех этих электронов в точности равна величине положительного заряда всей сферы, что и объясняет, почему в обычном состоянии атом всегда нейтрален и лишь потеря им одного или нескольких электронов приводит к образованию положительно заряженного атома, т. е. положительного иона.

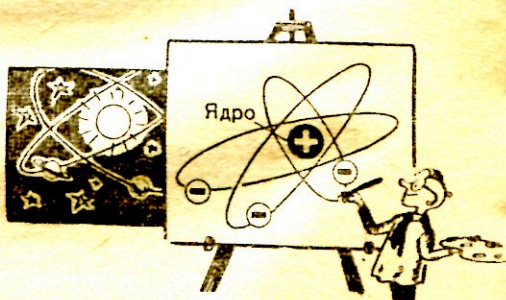
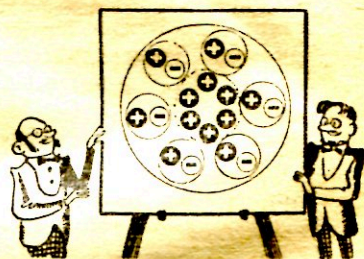
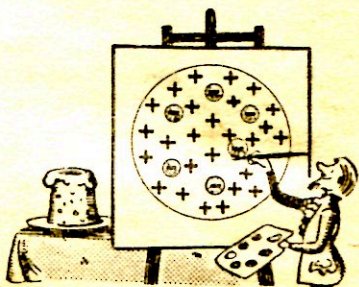
Открытие явления радиоактивности и существования у атома ядра заставило пересмотреть модель атома, что и сделал Э. Резерфорд, предложивший новую, так называемую планетарную модель атома, созданную по аналогии с солнечной системой.

Согласно этой модели, атом состоит из положительного ядра, расположенного в самом центре атома, а вращающиеся вокруг ядра электроны образуют как бы клубок орбит. От количества этих вращающихся электронов и зависят все химические свойства элементов.

Данная модель отличнейшим образом представляла устройство атома водорода. Его ядро составляла положительно заряженная частица — протон, вокруг которого вращался единственный электрон. Сходились также и их заряды, массы, размеры.

Ядра всех других элементов были тяжелее протона. Например, масса ядра следующего за водородом элемента — гелия, вокруг которого вращается два электрона, вчетверо больше массы протона и т. д. Наконец, ядро атома урана, вокруг которого вращается 92 электрона, в 238 раз тяжелее протона.

Поначалу такое усложнение массы ядра атома не вызывало особых неудобств, так как по тем временам более важным считалось то, что число электронов, а следовательно, и отрицательных электрических зарядов в атоме в точности



совпадало с суммарным положительным зарядом ядра атома (также соответствующим порядковому номеру элемента), поэтому «нормальный» атом всегда был нейтральным. Все идеально подтверждалось и таблицей Менделеева, расположившего некоторые элементы не в порядке возрастания их атомных весов, а по числу электрических зарядов, т. е. электронов в оболочке атома.

С того момента, когда ученым удалось впервые определить атомные веса различных элементов, их всегда поражала закономерность, с какой этот вес увеличивался от элемента к элементу в кратном соотношении к весу самого легкого из них — водороду. И не далее как в 1816 г. лондонский врач и страстный поклонник химии Вильям Пррут высказал мысль о том, что если бы атомы всех химических элементов были первичными основными частицами, подлинными «кирпичами мироздания», не разложимыми на части и нисколько не связанными друг с другом, то какая могла бы быть причина того, что атом азота ровно в 14 раз тяжелее атома водорода, а кислородный атом — ровно в 16 раз?

Отсюда любознательный естествоиспытатель сделал очень дальновидный вывод — атомы всех веществ сложены именно из атомов водорода. Атом азота — это 14 атомов водорода, собранных воедино, атом кислорода — 16 атомов водорода и т. д.

Эта гениальная догадка, будь она принята всей ученой корпорацией, могла бы значительно ускорить дальнейшее развитие физической науки. Но... последующие, более точные измерения атомных весов показали, что массы атомов всех других элементов не являются целыми кратными массы атома водорода. К тому же эти различия иногда оказываются столь значительными, что исключают возможные неточности измерений! Опровергнуть или сколько-нибудь удовлетворительно объяснить эти расхождения между соблазнительной гипотезой и научными фактами в те времена никто не сумел, и эта более чем любопытная идея любознательного врача канула в небытие с тем, чтобы, уже в новом качестве, воскреснуть в XX веке.

Как об этом свидетельствует многовековой опыт науки, все великое в природе в конечном счете оказывается и самым простым. Резерфорд доказал, что ядра всех атомов — тяжелые частицы — заряжены положительно. И ядром атома водорода, бесспорно, является протон. Но если считать, что ядра всех

других атомов состоят из набора протонов, то сразу оказывается непонятным одно обстоятельство. Заряд ядра и атомный вес численно совпадают только у водорода. Для всех остальных элементов они расходятся уже основательно — примерно в 2—2,5 раза. Но количество протонов в ядре не может быть больше суммарного заряда ядра. Тогда что это за протоны, меняющие свою массу от элемента к элементу? Или, может быть, в ядро атома входят какие-то еще неизвестные частицы?

По мере дальнейшего развития науки об атомном ядре все чаще и чаще возникала необходимость окончательно разобраться и в этом противоречии. Тогда была выдвинута и обоснована новая модель строения ядра атома, казалось бы, обходящая эту неприятность.

По-прежнему продолжали считать, что ядра всех атомов сложены из протонов, число которых в точности равно числу электронов, т. е. порядковому номеру элемента. Но в дополнение к ним в состав ядра входят еще протоны, тесно связанные с электронами, которые и нейтрализуют их положительный заряд. Число таких нейтрализованных протонов и составляет разницу между атомным весом и суммой положительных зарядов ядра.

Такая модель вполне удовлетворительно объясняла все известные в то время факты. А наличие электронов в ядре атома доказывалось распадом ядер радиоактивных элементов, в процессе которого из них вылетали самые доподлинные электроны.

Однако очень быстро возникло множество новых противоречий. Например, тот неоднократно проверенный факт, что масса протона и якобы связанного с ним электрона, помноженная на приведенную выше разность между порядковым номером элемента и массой ядра атома, была все же значительно меньше, чем это должно быть на самом деле. «Арифметика» не сходилась никак. Поэтому данная модель просуществовала очень недолго.

Открытие в 1932 г. нейтрона (см. «Нейтрон») сразу внесло ясность в существовавшую путаницу и значительно упростило (на самом деле сильно усложнило) картину строения ядра атома. Сразу же после опубликования этого открытия советский ученый Д. Д. Иваненко предложил новую, удивительно наглядную модель строения ядра атома.

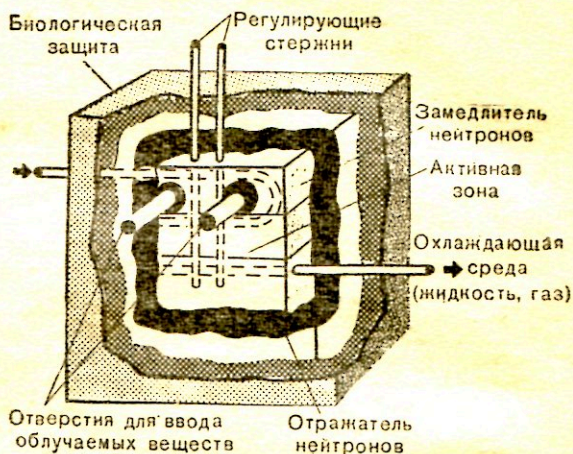
Согласно разработанной им теории, ядра всех атомов, как было принято и раньше, состоят из протонов, число которых равно сумме его положительных зарядов, т. е. порядковому номеру элемента в периодической системе Менделеева. Вместо спаренных с электронами протонов в ядро входят нейтроны — новые ядерные частицы, масса которых равна массе протонов, но которые не несут никакого электрического заряда, т. е. нейтральны. И как раз столько, сколько нужно, чтобы отчитаться за разницу между массой всего ядра атома и числом протонов в нем. При этом сходится идеально и «арифметика». По этой модели ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов. Сумма положительных зарядов ядра и число электронов в оболочке равны числу протонов — двум, масса же всех протонов и нейтронов равна атомному весу элемента — четырем. Аналогично ядро лития содержит три протона (количество, равное порядковому номеру элемента и числу электронов на орбитах), а сумма протонов и нейтронов равна шести, что соответствует атомному весу элемента.

И так по всей таблице элементов.

Открытие нейтрона прекрасно объясняет и существование *изотопов* — разновидностей атомов одного и того же элемента, несколько отличающихся друг от друга по массе; это отличие вызвано разным количеством нейтронов, входящих в их ядра.

Новая модель ядра атома сразу же получила признание физиков. Она полностью отвечает многочисленным фактам, накопленным до настоящего времени, показывает новые пути для уточнения тонкостей строения ядра, дает новую пищу для дальнейшего развития теоретических работ.

Атомный (ядерный) реактор (атомный «котел»). Так называется установка, в которой осуществляют управляемую цепную реакцию деления ядер урана или плутония, сопровождающуюся выделением огромного количества тепловой энергии — в миллионы раз больше, чем при сжигании такого же количества самого лучшего топлива. Английское слово «Pile» означает скорее «поленницу» или «кучу», чем «котел». Первый ядерный реактор и являлся по существу поленницей, ибо был сложен из нескольких сотен слоев больших графитовых кирпичей, в целом образующих что-то похожее на огромный графитовый шар. Кирпичи относительно небольшой сферы внутри



этого шара, так называемой *активной зоны* реактора, имели по два цилиндрических отверстия, в которые вставляли алюминиевые патроны с запаянными в них металлическим ураном или его оксидами. Около 50 т заключенного в активной зоне урана и составили *критическую массу*, в которой возникла саморазвивающаяся цепная ядерная реакция деления.

Графит, разделяющий урановые патроны в активной зоне, служил в качестве *замедлителя нейтронов*, а наружные сплошные слои — зеркалом, отражающим обратно в рабочую зону вылетающие из нее нейтроны, не успевшие расщепить ядра урана-235 и избежавшие захвата ядрами урана-238.

Чтобы не дать ходу цепной реакции, в специальные каналы, пронизывающие реактор сверху донизу, заранее опускали кадмиевые стержни, которые можно было легко вводить и извлекать из реактора. Жадно поглощающий нейтроны кадмий не позволял им размножаться в лавинообразно нарастающей геометрической прогрессии. Выводя же эти стержни постепенно из реактора, можно было весьма надежно и точно управлять моментом наступления цепной реакции и скоростью ее нарастания, автоматически удерживая ее на любом заранее установленном уровне. Кроме этого, реактор имеет отдельные каналы для введения внутрь активной зоны различных ве-

ществ для облучения их потоком нейтронов, для размещения в них измерительных приборов.

В процессе работы реактор источал огромное количество весьма проникающих и опасных излучений — нейтронов и гамма-лучей. Поэтому пришлось его заключить в бетонную оболочку двух-трехметровой толщины, называемую *биологической защитой*.

С момента пуска первого ядерного реактора прошло более 20 лет. За это время во многих странах мира разработано большое число самых разнообразных видов и типов реакторов — от самых малых, величиной с футбольный мяч, до многоэтажных, напоминающих завод-гигант, мощностью от долей ватта до сотен тысяч киловатт. Однако как бы ни менялись и ни усложнялись конструкция и назначение всех этих реакторов, принципиальная схема их действия остается пока такой же, как и у самого первого реактора.

По своему назначению и конструктивным особенностям реакторы стали делиться на следующие виды: экспериментальные, предназначенные для научных исследований, промышленные — для производства другого вида ядерного топлива — плутония, энергетические — для атомных электрических станций всех видов и многие другие.

Некоторые из этих реакторов настолько интересны, что в соответствующих местах книги мы даем более подробное их описание (см. «Реакторы» и др.).

Активная зона ядерного реактора — та часть ядерного реактора, в которой находится ядерное топливо и где собственно осуществляется управляемая цепная реакция деления атомных ядер урана или плутония.

Альфа-частица (альфа-лучи). Не зная еще, что представляют собой три вида только что открытых (в 1896 г.) лучей, испускаемых радиоактивными веществами, Мария Склодовская и Пьер Кюри дали им названия по первым буквам греческого алфавита: альфа-, бета- и гамма-лучи. Несколько позже было установлено, что бета-лучи являются ничем иным, как потоком отрицательно заряженных частиц — электронов, гамма-лучи — электромагнитным излучением с еще более короткой длиной волны, чем открытые за год до этого знаменитые рентгеновские лучи, а альфа-лучи — ядрами атомов гелия (${}^4\text{He}^+$), состоящими из двух протонов и двух нейтронов. Положительный электрический заряд такого ядра по абсолютной величине превышает в два раза отрицательный заряд электрона, а атомный вес равен 4,004.

Масса альфа-частицы составляет $6,664 \cdot 10^{-24}$ г.

Ускоренная до больших энергий альфа-частица является более эффективным снарядом «атомной артиллерии», чем протон, так как она хотя и

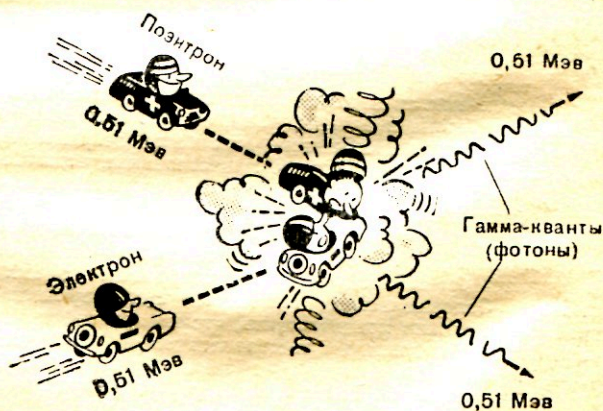
несет двойной положительный электрический заряд, тяжелее протона не в два, а в четыре раза.

Ангстрем (\AA) — единица для измерений электромагнитных колебаний с очень короткой длиной волны: инфракрасных, световых, ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-лучей. Ангстрем равен одной стомиллионной доле сантиметра (10^{-8} см). Широко применяется в оптике, а также в атомной и ядерной физике. Например, длина видимого спектра световых волн лежит в пределах от 4000 до 8000 \AA .

Аннигиляция (от латинского «самоуничтожение»). Удивительный сам по себе мир элементарных частиц, которых сейчас обнаружено уже около сорока, обладает еще более удивительным свойством: каждая из этих частиц имеет свою *античастицу*, т. е. частицу, обладающую одинаковой массой, но совершенно противоположными остальными свойствами — зарядом, направлением вращения и т. д. И что самое поразительное, любая частица или античастица, столкнувшись со своей «парой», немедленно «аннигилирует» — прекращает свое существование, превращаясь в другие элементарные частицы, или кванты излучения. При этом обязательно соблюдаются все законы физики, в том числе закон сохранения энергии и импульса. Изменяется лишь энергия и масса вновь образующихся частиц. Так, при встрече свободного электрона со своей античастицей — позитроном — в результате аннигиляции вместо них образуются обычно два фотона (гамма-кванта), обладающие вместе взятой энергией и импульсом столкнувшейся пары (см. рисунок).

При некоторых условиях гамма-квант может превращаться в пару электрон — позитрон.

Античастицы. Из довольно большого количества открытых по настоящее время элементарных частиц тридцать могут быть разбиты на 15 пар. Массы частиц каждой такой пары, например протон — антипротон, электрон — позитрон, нейтрон — антинейтрон и др., совершенно одинаковы, а



электрические заряды (за исключением нейтральных частиц) и другие физические свойства — противоположны.

При столкновении двух частиц каждой такой пары они мгновенно аннигилируют — взаимоуничтожаются. Вместо них возникают два фотона, т. е. энергия, скрытая в массе покоя этих частиц, переходит в энергию частиц излучения, не имеющих массы покоя.

Античастиц нет лишь у фотона и нейтрального мю-мезона (μ -мезона), которые принимаются тождественными со своими античастицами.

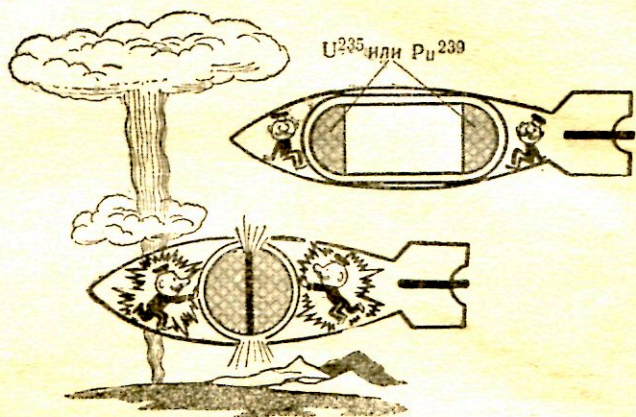
Первой ставшей известной человеку античастицей оказался *позитрон*, открытый в 1933 г., хотя его существование было предсказано задолго до этого события. Позитрон, или положительный электрон, имеет ту же массу, что и электрон, но противоположный электрический заряд. Столкнувшись друг с другом, позитрон и электрон тотчас же самоуничтожаются, превращаясь в два фотона с энергией по 0,51 млн. электрон-вольт (*Мэв*) каждый, что в сумме равно энергии, эквивалентной удвоенной массе покоя электрона. Позитрон появляется в результате процесса, носящего название «рождение пар». Этот процесс заключается в том, что фотон высокой энергии, соударяясь с ядрами атомов тяжелых элементов, например свинца, выбивает из них пару противоположно заряженных частиц — электрон и позитрон. Минимальная энергия фотона, необходимая для создания такой пары, равна 1,02 Мэв — по 0,51 Мэв на каждую частицу. Это один из многочисленных примеров прямого превращения энергии в массу покоя. Электрон и позитрон могут возникать при *бета-распаде*. Но при этом наряду с позитроном всегда рождается и нейтринно.

Открытая в 1955 г. частица, противоположная протону, называется *антипротоном*, или отрицательным протоном. Его можно создать, бомбардируя вещество протонами с кинетической энергией не менее 6 млрд. электрон-вольт (*Гэв*). В данном случае эта энергия непосредственно превращается в массу покоя и кинетическую энергию пары протон — антипротон.

Год спустя, в 1956 г., был открыт *антинейтрон*. Поскольку нейтрон — это частица, лишенная заряда, то антинейтрон также должен быть нейтральным. Однако антинейтрон самоуничтожается при встрече и с нейтроном.

Продуктами аннигиляции античастиц нуклонов, т. е. протона и антипротона, нейтрона и антинейтрона, обычно являются пи-мезоны.

Антивещество. После того как были открыты античастицы и экспериментально подтверждено их существование, естественно, возник вопрос: почему бы в окружающей нас природе не существовать и атомам, ядра которых сложены не из протонов, а из антипротонов, а оболочки — не из электронов, а из позитронов? В этом случае принципиально ничего бы не изменилось. Просто подобные «обращенные» атомы, например водорода, назывались бы антиводородом, а построенное из них вещество — антивеществом. Основываясь на повсеместно существующем в природе свойстве симметрии, можно предположить, что по крайней мере половина всех атомов Вселенной должна представлять собой такое антивещество! Однако если бы на Земле или даже в нашей Галактике имелось антивещество, то оно не смогло бы долго просуществовать и довольно скоро проаннигилировало бы с обычным веществом с выделением энергии, в тысячу раз большей, чем при взрыве водородной бомбы. Существует ли антивеще-



ство в каких-либо других областях обозреваемой Вселенной, неизвестно, хотя теоретически и возможно.

Атомная бомба — один из видов оружия взрывного действия с зарядом огромной разрушительной силы, в котором используют саморазвивающуюся цепную ядерную реакцию деления урана-235 или плутония-239.

Основными элементами такой бомбы являются заряд ядерного горючего, взрывное устройство и оболочка. Заряд делящегося вещества с общей массой больше критической (см. «Критическая масса») до взрыва разделен на две или несколько частей, каждая из которых меньше критической массы. Взрывное устройство сконструировано таким образом, чтобы как можно быстрее соединить обе половинки или все части разделенного общего заряда вместе, например «выстрелить» их навстречу друг другу. В массе делящегося вещества, ставшей с этого момента выше критической, мгновенно возникает разветвленная цепная реакция деления, оканчивающаяся примерно через миллионные доли секунды взрывом.

Взрыв атомной бомбы сопровождается одновременно действием мощной взрывной волны, светового излучения и проникающей радиации с последующим радиоактивным заражением окружающей местности, воздуха, воды.

Мощность атомной бомбы принято оценивать тротиловым эквивалентом, т. е. количеством обычного взрывчатого вещества (тротила), какое потребовалось бы взорвать, чтобы сравнять его взрыв по энергии со взрывом данной атомной бомбы (1 г тротила эквивалентен 1 ккал) (См. рисунок).

Атомная электрическая батарея — устройство, превращающее атомную энергию непосредственно в электрический ток, минуя множество «посредников»: паровые котлы, паропроводы, теплообменники, турбины, вращающиеся генераторы тока.

Наиболее простой является батарея, составленная из двух пластинок: чистого бета-излучателя — стронция-90 и какого-либо полупроводника, например кремния. Поток быстрых электронов, испускаемый стронцием, проходя через вещество полупроводника, выбивает из него большое количе-

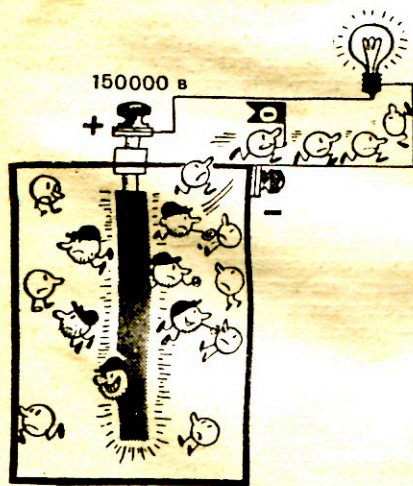
ство дополнительных электронов — в десятки и сотни тысяч раз больше, чем поток, испускаемый самим радиоактивным изотопом. Усиленный таким образом поток электронов будет протекать только в каком-либо одном направлении. Он и является постоянным электрическим током.

Один элемент такого устройства объемом в доли кубического сантиметра позволяет получить электрический ток силой в несколько миллионов долей ампера при напряжении в десятые доли вольта. Соединив параллельно (для увеличения силы тока) несколько тысяч таких элементов, можно получать силу тока уже в сотни миллиампер, а соединяя такие наборы элементов еще и последовательно друг с другом (для увеличения напряжения) — получать батарею напряжением в несколько вольт, вполне достаточную для питания переносной радиоаппаратуры, телефонов и т. д.

Так как период полураспада стронция-90 равен 24 годам, такая атомная батарея может действовать без смены в течение 10—15 лет! Высоковольтные (до 150 тыс. вольт) атомные батареи, правда, дающие ток ничтожно малой силы (10^{-10} — 10^{-12} а), конструируют по другому принципу. В них источник быстрых электронов помещают на изоляторе в центре металлической сферы или цилиндра. При радиоактивном распаде из источника излучений вылетает облако бета-частиц (электроны), вследствие чего он заряжается положительно, а собиратель электронов (сфера) — отрицательно. Естественно, между ними образуется разность потенциалов, создающая при замыкании электродов на нагрузку электрический ток. Столь высокая разность потенциалов между источником электронов и сферой создается за счет огромной скорости испускаемых бета-излучателем электронов.

Если активность источника бета-частиц равна 1 кюри, то такая атомная батарея будет развивать мощность около 200 микроватт (мквт) при рабочем напряжении 20 кв. Срок ее действия, как и предыдущей конструкции, определяется периодом полураспада использованного радиоактивного вещества.

Атомные батареи могут быть устроены и по-другому, например в виде наполненной газом трубки, в которой радиоактивное излучение сперва ионизирует атомы газа, а затем образовавшиеся ионы под действием небольшой разности потенциалов между двумя электродами трубки создают электрический ток; устройства, в котором энергия радиоактивного излучения нагревает до высокой температуры спай батареи полупроводниковых термоэлементов, вырабатывающих постоянный электрический ток; сложной конструкции, где перед источником электронов устанавливают люминофор — вещество, в



котором под действием электронной бомбардировки возникают яркие световые вспышки. Свет от этого вещества фокусируют на фотоэлемент, преобразующий световую энергию в электрическую и т. п.

Атомный двигатель — силовая установка, работающая на атомной (ядерной) энергии деления тяжелых ядер урана или плутония, осуществляемого в ядерных реакторах различного типа и назначения.

Тепловую энергию, выделяющуюся в процессе работы реактора, отводят из его активной зоны к теплообменнику каким-либо теплоносителем: водяным паром, перегретой водой под давлением, газом, легкоплавким жидким металлом и т. п.

В теплообменнике происходит передача тепловой энергии от теплоносителя к рабочему телу, т. е. превращение ее в кинетическую энергию струи пара (газа), который может быть направлен в паровую турбину, преобразующую тепловую энергию рабочего тела в механическую, а при необходимости — и в электрическую, или может быть выброшен через сопло наружу, как в обычном реактивном двигателе, создавая реактивную тягу.

Стационарные атомные силовые установки обычно мало чем отличаются от атомных электрических станций. В них используют энергетические атомные реакторы на медленных (тепловых) нейтронах.

Главное преимущество атомного двигателя — ничтожный расход атомного горючего, что делает его особо перспективным для различных видов транспорта: морских и речных судов, подводных лодок и самолетов. Атомный ледокол, снабженный атомным двигателем, может находиться в плавании до полутора лет без захода в порты для пополнения горючего, что особенно важно при плавании в арктических условиях, куда доставка обычного топлива (нефти и угля) сопряжена с громадными трудностями, дорогá и требует наличия портов и специального флота для перевозки огромного количества быстро расходуемого топлива, в том числе и топлива, сжигаемого этими же судами.

Главный недостаток атомных двигателей, затрудняющих их применение на железнодорожных локомотивах, самолетах, автомобилях и на судах малого тоннажа, — громоздкость и чрезмерно большой вес биологической защиты, которой должны окружаться как сам ядерный реактор, так и все элементы установки, испускающие опасные для людей гамма-лучи и потоки нейтронов.

Атомная электрическая станция — электрическая станция, работающая за счет энергии, выделяющейся при делении ядер атомов урана или плутония. Впервые такая станция электрической мощностью 5000 квт была введена в эксплуатацию в СССР 27 июня 1954 г.

Поскольку при делении атомного (ядерного) горючего получается главным образом тепло, на данном этапе развития атомной энергетики такая электрическая станция представляет собой обычную тепловую станцию, у которой паровой котел заменен атомным (ядерным) реактором. Любой теплоноситель, служащий для отвода тепла и охлаждения реактора, проходя через него, становится сильно радиоактивным и в таком виде представляет огромную опасность для людей. Поэтому реактор и все трубопроводы, по которым циркулирует теплоноситель, отделяют от остальной обычной части электрической станции теплообменником (парогенератором), в котором теплоноситель замкнутого и тщательно изолированного первичного контура передает тепло теплоносителю (рабочему телу) вторичного контура, непосредственно не соприкасаясь с ним.

Помимо этого реактор и все остальное, что входит в первичный контур установки, окружают еще *биологической защитой* — бетонной или водной оболочкой толщиной в несколько метров, способной надежно задерживать все виды излучений.

Все процессы управления работой реактора и остальными звеньями станции даже в безопасной ее части автоматизированы и осуществляются дистанционно (на расстоянии).

В настоящее время разработан ряд схем таких станций применительно к различным нуждам энергетического оснащения страны.

Атомное (ядерное) топливо. Атомное (ядерное) горючее — природные или искусственные элементы, ядра атомов которых в результате бомбардировки нейтронами способны делиться, высвобождая при этом несколько большее количество нейтронов (два-три), чем было затрачено на их деление, в результате чего в этих веществах может быть возбуждена разветвляющаяся, лавинообразно нарастающая цепная ядерная реакция деления. К этим веществам принадлежат: уран-235, плутоний-239, уран-233, уран-238. В будущем, после осуществления управляемой *термоядерной реакции* (слияния ядер атомов легких элементов в более тяжелые), к атомному топливу (горючему), видимо, будут отнесены все изотопы водорода (протий, дейтерий и тритий), а также литий.

Атомный вес (атомная единица массы — *а.е.м.*, или массовая единица). Вес атома настолько мал, что было бы чрезвычайно неудобно каждый раз обозначать его, допустим, в граммах. Получались бы цифры с десятками нулей. Поэтому его обычно выражают не в граммах, а в относительных единицах, в которых вес атома кислорода принимается равным 16. Отношение веса любого атома к весу $1/16$ части атома кислорода (${}_8\text{O}^{16}$) и называется атомным весом. В этом случае атомный вес самого легкого химического элемента — водорода — должен быть равным точно 1. Однако вследствие наличия у атомов кислорода нескольких изотопов целочисленного отношения не получается и атомный вес водорода оказывается фактически равным 1,008.

Вес $1/16$ части атома кислорода равен $1,674 \cdot 10^{-24}$ г. Это и есть атомная единица массы.

Недавно ученые условились принимать за атомную единицу массы отношение веса атома к весу $1/12$ части атома основного изотопа углерода ${}_6\text{C}^{12}$.

Атомный (реактивный) двигатель. Одним из высокоэффективных способов непосредственного превращения энергии тепла в энергию движения является ракетный (реактивный) двигатель, так как в нем полностью отсутствуют какие-либо промежуточные устройства вроде поршней, шатунов и систем передач, соединенных с воздушным винтом или ведущими колесами (в наземных локомотивах).

Сжигаемое в камере сгорания такого двигателя высококалорийное химическое топливо превращается в раскаленный до предельно высокой температуры и давления газ, который, вытекая с огромной скоростью через сопло наружу, создает реактивную струю, движущую ракету в направлении, противоположном движению этой струи газа.

Скорость движения ракеты при всех прочих равных условиях тем выше, чем быстрее вытекает из сопла двигателя струя раскаленного газа. Мощность ракетного двигателя, а следовательно, вес и грузоподъемность ракеты в свою очередь тем выше, чем больше масса одновременно нагреваемого и вытекающего из сопла двигателя газа. Скорость же истечения

струн газа зависит от температуры и давления, которые способны развить сжигаемое в рабочей камере топливо.

Наконец, длительность действия двигателя при данной мощности зависит от запаса топлива, который способна нести на себе ракета без его пополнения в пути.

Короче говоря, увеличить скорость движения и мощность ракеты можно по существу несколькими путями: поднимая температуру нагретого газа, повышая скорость его истечения из сопла, увеличивая массу нагретого вещества или осуществляя все это по возможности одновременно.

В принципе всего этого можно достичь только в атомном двигателе. В нем для нагрева или ускорения вещества, создающего силу тяги, используют атомную энергию, получаемую в атомном реакторе.

Вряд ли есть необходимость доказывать, что атомное (ядерное) горючее, теплотворная способность которого во много раз превышает теплотворную способность самого лучшего химического топлива, открывает самые широкие перспективы именно в области космических полетов.

Поэтому будущее космических полетов целиком и полностью зависит от возможности использования для этой цели компактного, обладающего огромной энергией и долгодействием атомного горючего, которое будет составлять не девяносто и больше процентов общего объема и веса ракеты, как при использовании химического топлива, а много меньше, что позволит или резко уменьшить общий вес ракеты, или при тех же условиях значительно увеличить ее скорость и грузоподъемность.

Использовать для этой цели атомную энергию можно по крайней мере двумя способами: либо непосредственно нагревая, пропуская через реактор рабочее тело, например мощную струю водорода, запас которого в сжатом или сжиженном виде, естественно, придется брать в ракету, либо преобразуя вырабатываемое реактором тепло сначала в электрическую энергию, которую в свою очередь используют для ионизации газа и ускорения ионизированных тяжелых частиц (см. «Ионная ракета»).

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Бета-распад	35
Биологическое действие радиоактивных излучений	37

Б

Бета-распад. Если рассмотреть превращения ядер атомов одних радиоактивных элементов в другие (см. «Радиоактивность» и «Радиоактивные семейства»), то видно, что большинство их сопровождается испусканием или электронов (бета-частиц), или альфа-частиц. Испускание альфа-частиц кажется более или менее понятным. Это осколки, «отторгающиеся» от распадающегося ядра атома. Но вот откуда берутся в ядре атома электроны? Ведь оно состоит только из протонов и нейтронов.

Единственное, что можно предположить, — это то, что электроны рождаются в ядре в результате каких-то внутриядерных превращений. Это и удалось установить на примере распада ядра атома трития (сверхтяжелого водорода), состоящего из одного протона и двух нейтронов. Вместо него получается ядро изотопа гелия-3, состоящее из двух протонов и одного нейтрона, и свободный электрон. Куда-то исчез один нейтрон, но зато вместо него появились протон и электрон. Получается, что рождение и испускание электрона досталось ценой превращения одного из нейтронов в протон.

Известны и другие ядерные реакции, когда вместо электрона ядро атома испускает позитрон — точно такую же частицу, как электрон, но не с отрицательным, а с положительным электрическим зарядом. Например, радиоактивный изотоп азот-13, состоящий из семи протонов и шести нейтронов, после распада превращается в ядро атома углерода-13, у которого уже шесть протонов и семь нейтронов, и испускает при этом один позитрон.

Ответ на естественное недоумение ученых был получен, когда удалось установить, что протоны и нейтроны в процессе радиоактивного распада возбужденных ядер атомов могут превращаться друг в друга, а оказавшийся лишним положительный или отрицательный заряд уносится или электроном, или позитроном. В случае электронной радиоактивности, когда один из нейтронов превращается в протон, а отрицательный заряд уносится электроном, общий положительный заряд ядра атома увеличивается на единицу. А это будет уже ядро изотопа атома нового, более тяжелого элемента периодической таблицы, например не трития-3, а гелия-3. При позитронной радиоактивности, когда протон превращается в нейтрон, а положительный электрический заряд уносится позитроном, общий положительный заряд ядра атома уменьшается на единицу, в результате чего появляется ядро атома изотопа нового, более легкого элемента, например не азота-13, а углерода-13.

После того как все сказанное удачно разложилось «по полочкам», возникла новая загадка. Стал не сходиться баланс энергий. При каждом таком переходе ядро теряет определенную энергию, а так как испускаемый им электрон или позитрон обладает самыми различными энергиями, часть энергии и вовсе куда-то пропадает. На радостях некоторые буржуаз-

ные ученые, стоящие на идеалистических позициях, объявили было о крушении закона сохранения энергии.

Но радость их оказалась недолгой. Вскоре было доказано, что одновременно с электроном или позитроном ядро испускает еще одну частичку, не имеющую никакого электрического заряда, обладающую ничтожно малой массой, но летящую с огромной скоростью, равной скорости света. Новую частицу назвали *нейтрино* — маленький нейтрон. Она-то и уносит недостающую до точного баланса малую толику энергии.

Таким образом, превращение внутри ядра нейтрона в протон сопровождается испусканием электрона и нейтрино, а превращение протона в нейтрон — испусканием позитрона и нейтрино.

Биологическое действие радиоактивных излучений. Как и любые другие вещества, атомы и молекулы живых клеток под действием рентгеновских и гамма-лучей, а также потоков заряженных частиц ионизируются, в результате чего в них происходят физико-химические изменения, влияющие на характер их последующей жизнедеятельности, в частности на наследственные особенности организма.

Согласно одним взглядам, ионизация атомов и молекул, возникающая под влиянием облучения, ведет к разрыву химических связей в сложных белковых молекулах, чрезвычайно чувствительных ко всяким внешним воздействиям. По другим теориям, первичные реакции происходят в воде, из которой в основном состоят ткани организма. Вода при этом разлагается на водород и свободный радикал ОН, которые присоединяются к молекулам белка, вызывая изменения в их химической структуре. Изменения нормальных химических процессов в тканях нарушают обмен веществ, что в ряде случаев приводит к обратному развитию (дегенерации) клеток организма.

Многие советские ученые считают, что все изменения в живых клетках определяются рефлекторным механизмом, так как на ионизирующие излучения реагирует в первую очередь нервная система. Изменения же в тканях и органах следует рассматривать лишь как вторичные. Интенсивное воздействие излучений на живой организм может вызвать *лучевую болезнь*.

Бетатрон — циклический ускоритель электронов. Бетатрон состоит из кольцеобразной вакуумной камеры, по форме напоминающей большую баранку, которая помещена между полюсами электромагнита, создающего переменное магнитное поле. Внутри камеры располагают источник электронов (см. «Электронная пушка»).

Двигаются электроны в бетатроне по круговой орбите. При изменениях величины магнитного потока, пронизывающего камеру, возникает вихревое электрическое поле, увлекающее за собой поток электронов. Одновременно магнитное поле создает силу, направленную перпендикулярно к движению электронов (к центру круга). Эта сила и удерживает электроны на круговой орбите. Бетатроны позволяют ускорять поток электронов до энергий от нескольких миллионов до 100—200 Мэв.

Небольшие бетатроны на энергии в несколько миллионов электронвольт широко используют в технике и в медицине.

Бета-частицы — один из видов излучений, испускаемых ядрами радиоактивных веществ при их распаде, являющиеся обычными электронами (см. «Атом электричества — электрон»).

Биологическая защита — система экранов или защитных оболочек, ослабляющих интенсивность радиоактивных излучений до уровня, безопасного для организма человека. Эти экраны устанавливают между источником излучения и зоной, где могут находиться люди.

Выбор материала для экрана зависит от вида, интенсивности и проникающей способности излучения, а также от конструктивных особенностей и стоимости устройства. Экраны могут быть однослойными или многослойными. При этом большое значение имеет порядок расположения слоев. Например, для защиты от гамма-лучей требуются материалы из элементов с большим массовым числом. Обычно это экран в виде многометровой бетонной стены или оболочки. Для защиты от альфа- и бета-частиц служат тонкие однослойные экраны, изготовленные из легких металлов или пластмасс.

Самой сложной является защита от нейтронов. Поглотив нейтрон, атомы большинства веществ приходят в возбужденное состояние, а затем распадаются, испуская при этом другие частицы и проникающие гамма-кванты. Поэтому экраны, предназначенные для защиты от нейтронов, приходится делать комбинированными: первый слой — из легких элементов (вода, графит и т. п.), хорошо замедляющих нейтроны, второй слой — из тяжелых элементов (железо, свинец и особенно бетон), ослабляющих вторичные гамма-кванты, образовавшиеся в результате захвата веществом первого слоя замедлившихся нейтронов. Большую роль при этом играют технические и экономические соображения. В стационарных (неподвижных) реакторах, где вес и объем защиты резко не ограничены, можно использовать самые дешевые материалы — обычную воду, бетон и т. д. В энергетических реакторах транспортного применения, например для морских судов, где снижение веса и объема биологической защиты имеет решающее значение, приходится применять более эффективные и дорогие материалы: свинец, карбид бора, бораль, гидриды некоторых металлов, специальную сталь.

Помимо собственно реактора биологическую защиту возводят и вокруг всей системы отвода тепла из него, включая трубопроводы, насосы и теплообменник, а также все устройства и помещения, в которых автоматически извлекают отработанные стержни, транспортируют их, хранят и т. д.

Защищают также каналы, по которым вводят в реактор подлежащие облучению вещества, каналы для вывода из активной зоны пучков нейтронов разных энергий и другие устройства.

В тех случаях, когда вещество теплоносителя является и рабочим телом для приведения в действие паровых турбин (например, в кипящем реакторе), биологической защитой приходится ограждать еще турбину и все паропроводы, по которым циркулирует перегретый и отработанный пар, включая холодильники.

Быстрые нейтроны — нейтроны, энергия которых превышает 1—2 Мэв. Такая энергия соответствует движению частицы при температуре в несколько миллиардов градусов в отличие от медленных (тепловых) нейтронов с энергией 0,03 эв.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Водород _____	39
«Возбужденное» состояние ядра атома _____	40

В

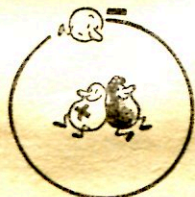
Водород — самый легкий, простейший и самый распространенный из всех химических элементов в природе, составляющий около 93% всего вещества Вселенной по объему и 76% по весу. И только 3% приходится на долю гелия и немногим больше 1% на все остальные элементы: углерод, железо, свинец, уран и другие.

Атом водорода состоит всего из двух элементарных частиц: положительно заряженного протона и вращающегося вокруг него отрицательно заряженного электрона.

Водород при нормальных условиях — газ. Как и у большинства других газов, его молекула состоит из двух атомов. Электронная связь, с помощью которой они соединены в молекулу, — одна из самых прочных и важнейших связей в природе. Чтобы перевести водород в атомарное состояние, т. е. разо-



Протий (${}_1\text{H}^1$)



Дейтерий (${}_1\text{H}^2$)



Тритий (${}_1\text{H}^3$)

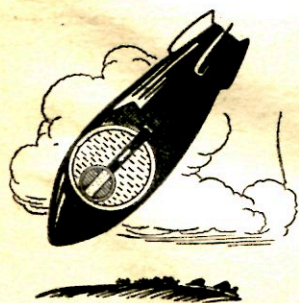
рвать его молекулу на два отдельных атома, необходимо затратить определенное (и довольно значительное) количество энергии.

Практически известны два устойчивых изотопа водорода: легкий водород (${}^1\text{H}^1$), называемый протием и составляющий 99,98% этого элемента, и тяжелый водород (${}^1\text{H}^2$) — дейтерий, количество которого не превышает 0,015%. Массы этих изотопов соответственно равны 1,008 и 2,015 а.е.м.

В результате непрерывной бомбардировки космическими лучами в атмосфере Земли обнаруживаются ничтожно малые количества радиоактивного изотопа водорода, испускающего только бета-частицы, — трития (${}^1\text{H}^3$), период полураспада которого равен 12,3 года. В сколько-нибудь ощутимых количествах этот изотоп можно получить только искусственным путем — в ускорителях, бомбардируя потоком тяжелых частиц — протонами и дейтронами — дейтерий и бериллий, или же в ядерных реакторах, облучая потоком нейтронов ядра атомов лития-6. Поглотив нейтрон, литий-6 распадается на два осколка: ядро атома гелия-4 (альфа-частицу) и ядро атома трития.

Из всех газов водород обладает наибольшей теплопроводностью, в силу чего он нашел широкое применение в технике и производстве, а успехи физики низких температур позволили использовать сжиженный водород в самых разнообразных областях научных исследований.

«Возбужденное» состояние ядра атома. Так называют состояние, в которое приходит ядро атома, поглотившее извне какое-то количество излишней для него энергии, столкнувшись с какой-либо другой частицей или захватив ее.



Взаимосвязь массы и энергии (см. «Эквивалентность массы и энергии»).

Водородная бомба (головка, снаряд) — разновидность атомного оружия колоссальной разрушительной силы, созданная на основе использования реакции синтеза ядер атомов легких элементов в ядра более тяжелых элементов (см. «Термоядерная реакция»), при которой выделяется огромное количество энергии. Наиболее эффективным считается использование в водородной бомбе смеси дейтерия (тяжелого водорода) и трития (сверхтяжелого водорода). При слиянии одного ядра атома дейтерия (дейтро-

на) с ядром атома трития (тритона) образуется ядро атома гелия и выделяется энергия, равная 17,6 Мэв — примерно в восемь раз больше энергии, получаемой при делении ядер атомов урана или плутония. Температуру в несколько десятков миллионов градусов, необходимую для возбуждения термоядерной реакции, создают путем взрыва внутри оболочки водородной бомбы достаточно мощной атомной бомбы.

Встречные пучки (ускоренных частиц) — новое направление в области создания ускорителей частиц сверхвысоких энергий — порядка сотен и тысяч миллиардов электронвольт. Суть его заключается в том, что при лобовом столкновении двух ускоренных пучков частиц с энергией, допустим, по 130 Мэв каждый можно получить за счет превращения части массы ускоренных частиц в энергию частицы с энергией взаимодействия, равной уже 70 Гэв, на что при обычных методах потребовались бы гигантские синхрофазотроны диаметром 50 м и больше. В Новосибирском институте ядерной физики разработана установка, в которой при столкновении двух встречных пучков электронов и позитронов с энергией по 700 Мэв каждый рождаются новые частицы с энергией, равной уже двум тысячам миллиардов (двум триллионам) электронвольт!

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Гелий _____	41
Гамма-лучи _____	41
Гипероны _____	42

Г

Гелий — химический элемент с порядковым номером 2 и атомным весом 4,004. Инертный газ. Природный гелий состоит из двух устойчивых изотопов: гелия-4 и незначительной примеси гелия-3. Изотоп гелия-4 накапливается в природе главным образом за счет распада урана, тория и других радиоактивных элементов, в процессе которого испускаются альфа-частицы (ядра атомов гелия, лишенные всех своих электронов).

Искусственным путем удалось получить радиоактивные изотопы гелия-5 с периодом полураспада менее 10^{-2} сек и гелия-6 с периодом полураспада 0,8 сек.

Атом гелия состоит из ядра и двух электронов. Ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, — сравнительно устойчивое ядерное образование: энергия связи всех его частиц равна 28,2 Мэв.

Гамма-лучи — один из видов излучений, испускаемых ядрами атомов природных, а также искусственных радиоактивных элементов, представляющих собой электромагнитное излучение с чрезвычайно короткой длиной волны (1Å и

короче) и вследствие этого обладающих исключительно большой проникающей способностью. Гамма-лучи возникают при торможении заряженных частиц (см. «Тормозное излучение»), при аннигиляции пар античастиц (электрон — позитрон, протон — антипротон и др.), при самопроизвольном и искусственном расщеплении ядер атомов урана и плутония и при некоторых других ядерных реакциях.

Так как волновые свойства — дифракция и интерференция — у гамма-лучей (с длиной волны менее 1 \AA) выражены слабо, их принято рассматривать как поток частиц — гамма-квантов. Однако энергия гамма-квантов растет с частотой колебаний, что свидетельствует об их электромагнитной природе. Чем выше частота, тем большую энергию несет в себе гамма-квант.

Благодаря своей большой энергии — до 5 Мэв у природных радиоактивных веществ и до 20 Мэв при искусственных ядерных реакциях — гамма-лучи не только легко ионизируют различные вещества, но способны также вызывать некоторые виды ядерных реакций и, в частности, порождать электронно-позитронные пары и образовывать некоторые элементарные частицы. Именно из-за опасности, которую представляют гамма-лучи для людей и живых организмов, приходится обнести бетонными стенами — биологической защитой — ядерные реакторы, хранить в контейнерах с толстыми свинцовыми стенками естественные и искусственные радиоактивные вещества, создавать другие сложные и дорогостоящие защитные устройства.

Гамма-лучи от естественных радиоактивных источников и возникающие при искусственных ядерных реакциях нашли широкое применение в науке и технике. С их помощью уничтожают раковые опухоли, в лабораториях и на заводах просвечивают огромные слитки металла (толщиной до 250 мм) и готовые изделия для обнаружения скрытых дефектов, консервируют и стерилизуют пищевые продукты и лекарства, ведут научные исследования во многих областях современной науки.

Гипероны. В последние годы сперва в космическом излучении, а затем и в ускорителях частиц были обнаружены частицы, масса которых оказалась больше массы нуклона (протона или нейтрона). Эти крайне неустойчивые, быстро

распадающиеся частицы были названы сверхпротонами, или гиперонами. Они могут быть и заряженными, и нейтральными.

В группу гиперонов входят 12 частиц: лямбда-частица, три сигма-частицы, две кси-частицы и соответственно все анти-частицы названных частиц (см. «Элементарные частицы»). Относительно изученным оказался нейтральный гиперон. Его масса равна 2182 массам электрона, т. е. примерно на 340 электронных масс тяжелее протона (лямбда-частица). Появившись, он живет не больше $3 \cdot 10^{-10}$ сек и распадается на протон и отрицательно заряженный пи-мезон (π -мезон) или нейтрон и нейтральный π -мезон.

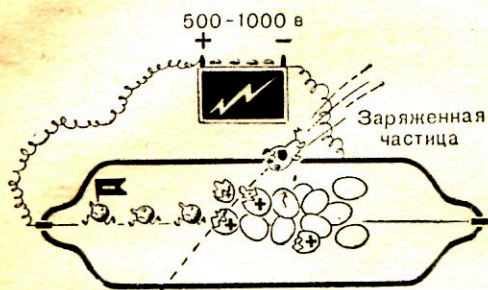
Гамма-дефектоскопия — метод обнаружения дефектов в слитках металлов, отливках, сварных швах и любых иных изделиях путем просвечивания их рентгеновскими лучами больших энергий и гамма-лучами, испускаемыми природными и искусственными радиоактивными веществами. В настоящее время такой контроль широко применяют в самых различных отраслях промышленности и строительства. Для этой цели источник гамма-излучений устанавливают на определенном расстоянии по одну сторону контролируемого изделия, а детектор, регистрирующий излучения (чаще всего фотоэмульсии), — с другой стороны. В зависимости от толщины, состава и плотности соответствующего участка интенсивность излучения, прошедшего через изделие, будет различной, что и фиксируется на фотографии вместе со всеми возможными дефектами (раковины, трещины, поры, непроваренные швы, неправильная сборка, посторонние предметы, обрывы и т. п.). Выбор радиоактивного изотопа в основном определяется толщиной просвечиваемого изделия и плотностью материала, а также чувствительностью детектора излучений, особенностями работы и другими условиями.

Применение для целей дефектоскопии гамма-лучей требует строжайшего соблюдения правил обращения с радиоактивными веществами, их хранения и правил техники безопасности как самим работающим с ними, так и всеми окружающими лицами.

Гейгера — Мюллера счетчик. Мир атома и атомных явлений из-за своей малости совершенно недоступен непосредственному восприятию органами чувств человека. Но физикам нужно отличать одну частицу от другой, измерять энергию, скорость и направление их движения, подсчитывать точное количество частиц. Учитывая ограниченные возможности ионизационной камеры, немецкий физик Гейгер предложил конструкцию счетчика заряженных частиц, позднее усовершенствованную им совместно с другим физиком — Мюллером.

Устройство счетчика чрезвычайно просто. Это заполненная каким-либо разреженным газом (до 100—200 мм атмосферного давления) стеклянная трубка, по оси которой протянута тонкая металлическая нить.

Между нитью и частично металлизированной поверхностью трубки приложено высокое электрическое напряжение — порядка 500—1000 в и выше. Обычно нить служит положительным электродом.



Пролетая через трубку, заряженная частица ионизирует малую толику заключенного в ней газа. Выбитые из атомов газа электроны, попав в сильное электрическое поле, существующее между нитью и стенками трубки, разгоняются в нем до очень большой скорости и на своем пути сами начинают разбивать на ионы атомы газа. Электроны второго поколения тоже уско-

ряются и ионизируют новые атомы и т. д. В результате образуется уже целая лавина электронов, импульс (сила тока) которой зависит от энергии и скорости первоначально пролетевшей через трубку частицы.

Этот импульс можно измерить, а если он слишком слаб, то предварительно еще и усилить. Чувствительность такого прибора может быть сколь угодно велика. При необходимости он может обнаружить появление даже одиночной заряженной частицы.

Однако одной только чувствительности прибора для исследовательских целей недостаточно. Поэтому к усилителю трубки Гейгера — Мюллера обычно подключают еще и довольно сложное устройство — счетчик частиц, вернее, создаваемых ими электрических импульсов, который автоматически сортирует их по энергиям, зарядам, скоростям, направлениям, а затем молниеносно подсчитывает.

Приборы этого типа позволяют обнаруживать и измерять рентгеновское и гамма-излучение, хотя оно, как известно, является не потоком заряженных частиц, а электромагнитными колебаниями с очень короткой длиной волны. Падая на металлизированную поверхность трубки, гамма-лучи выбивают из атомов металла электроны. Те, попадая в электрическое поле, ускоряются и летят к нити, и далее все идет как и при прохождении через трубку заряженных частиц.

Для того чтобы определить направление, откуда летят частицы, устраивают своеобразные телескопы — целые батареи трубок, счетчики которых настроены так, чтобы срабатывать только в том случае, если исследуемая частица пролетает, допустим, слева направо, сверху вниз или в любом ином направлении. Такие приборы изготавливают во многих разновидностях в зависимости от того, какие скорости у этих частиц и т. д. Они находят исключительно широкое применение во всех отраслях ядерной техники. Их делают большими и маленькими, стационарными и переносными, слабо чувствительными для измерения больших потоков частиц и высокочувствительными для обнаружения единичных частиц, при поисках слабо радиоактивных урановых и ториевых руд и т. д.

Геологическое летоисчисление с помощью радиоактивных веществ. Если бы исходные вещества трех ветвей радиоактивных элементов: урана, тория и актиния — имели сравнительно короткий период полураспада, они очень давно перестали бы существовать на Земле, и мы сегодня даже и не подозревали бы, что у хорошо известного и безобидного свинца были столь необычные предки.

Сейчас уже точно известно, что период полураспада урана-235 равен 710 млн. лет, урана-238 — 4,5 млрд. лет, а тория-233 — даже 13,9 млрд. лет! И чем точнее удается ученым определить время распада тех или иных радиоактивных элементов и изотопов, тем надежнее становятся методы измерения при их помощи сроков существования геологических образований Земли — этих удивительных часов, без усталы идущих на протяжении миллиардов лет, не забегая вперед и не отставая, и отсчитывающих свое особое, бесконечно долгое космическое время.

Допустим, в каком-то минерале обнаружен уран-238. Здесь же неминуемо должны присутствовать и некоторые промежуточные, наиболее долгоживущие продукты его распада и, безусловно, конечный продукт — изотоп свинца-106.

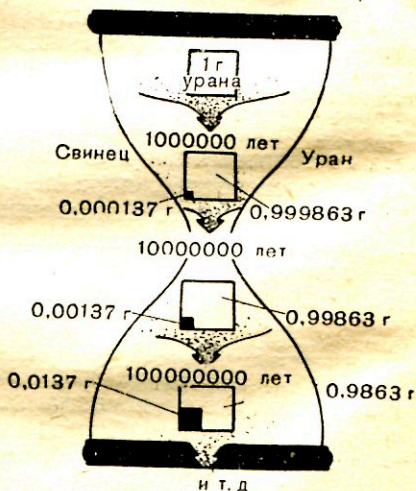
Можно легко высчитать, что за миллион лет в граммe природного урана должно образоваться 0,000137 г свинца. Тщательно измерив количество оставшегося урана и образовавшегося свинца, удастся с относительной большой точностью (других ведь способов нет!) определить и время образования данного минерала.

Более точное определение возраста Земли дает калий-аргоновый метод. Природный калий состоит из двух стабильных изотопов — калия-39 (93,08%) и калия-41 (6,91%) — и одного нестабильного изотопа — калия-40, период полураспада которого равен $1,3 \cdot 10^9$ годам. В природе калий очень распространен и входит в состав главнейших породообразующих минералов, отличаясь завидным постоянством своего изотопного состава.

Радиоактивный калий-40 распадается двумя путями: 88% его атомов образуют устойчивый изотоп кальций-40, а 12% превращаются в неустойчивый изотоп аргон-40, который после испускания гамма-кванта переходит в основной, стабильный изотоп аргон-40. Распад калия-40 постепенно ведет к убыванию его в природном элементе и к накоплению продуктов распада — аргона-40 и кальция-40. Измеряя и сопоставляя количества этих изотопов, удается определить абсолютный возраст тех или иных горных образований.

Гетерогенный ядерный реактор — реактор, в котором ядерное топливо и замедлитель располагаются на некотором расстоянии друг от друга в виде правильной геометрической решетки из отдельных блоков, тем самым представляя собой неоднородную среду для нейтронов.

Гомогенный ядерный реактор — реактор, в котором ядерное топливо и замедлитель смешаны друг с другом и представляют собой однородную среду для нейтронов. Это может быть смесь в виде тонких порошков или суспензия мелких частиц.



Горячая камера, горячая лаборатория — специально оборудованная лаборатория для работы с радиоактивными веществами, обладающими высокой активностью.

Все работы и операции в таких камерах или больших лабораториях осуществляются автоматически или с помощью дистанционных манипуляторов, управляемых операторами, надежно укрытыми от проникающих излучений за многометровыми стенами биологической защиты. Лабораторию оборудуют также средствами, исключаящими опасность заражения воздуха помещений, где находятся люди, радиоактивной пылью, аэрозолями и парами жидкостей.

Д

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Дейтерий	46
Деление атомного ядра (реакция)	46
Дефект массы	49

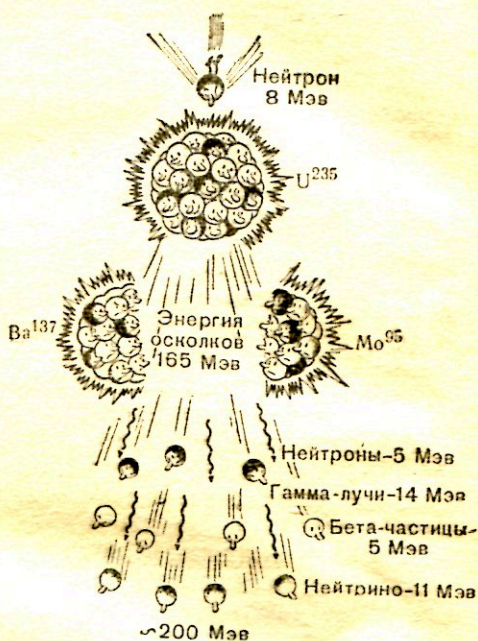
Дейтерий — природный устойчивый изотоп водорода с атомным весом 2,0147, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона, т. е. вдвое тяжелее обычного водорода (протия).

Дейтерий широко распространен в природе. На каждые шесть тысяч атомов обычного водорода приходится один атом дейтерия. $\frac{1}{6000}$ доля огромной массы воды Мирового океана состоит из молекул *тяжелой воды* — соединения двух атомов дейтерия с атомом кислорода.

Дейтерий широко применяется в ядерной технике, в частности в качестве замедлителя нейтронов в ядерных реакторах. Сталкиваясь с ядрами дейтерия, нейтроны благодаря близости их массы к массе ядра дейтерия быстро замедляются до тепловых энергий (скоростей). Ионизированные (лишенные электронов) ядра дейтерия используют в ускорителях частиц в качестве тяжелых бомбардирующих частиц. Соединения дейтерия, например с литием, могут служить ядерным взрывчатым веществом в водородной (термоядерной) бомбе.

Деление атомного ядра (реакция) — особый вид ядерной реакции, при которой ядра тяжелых элементов, например урана или плутония, поглотив нейтрон, приходят в сильно возбужденное состояние. Спустя короткое время они делятся на два осколка — ядра атомов элементов, расположенных в середине периодической таблицы Менделеева, выбрасывая при

этом целый фейерверк частиц: электронов, фотонов, гамма-лучей и дватри быстрых нейтрона. При этом высвобождается кинетическая энергия разлетающихся осколков и других частиц, равная примерно 200 Мэв. Несколько свободных нейтронов, оказавшихся лишними для ядер вновь образовавшихся атомов, при некоторых условиях могут начать каждый свою цепочку делений соседних ядер атомов урана или плутония, благодаря чему в слитке этих веществ может возникнуть саморазвивающаяся цепная ядерная реакция деления.



Деление ядер атомов тяжелых элементов может происходить не только при поглощении нейтронов, но и под действием облучения другими частицами, ускоренными до очень высоких энергий: протонами, дейтронами, альфа-частицами, гамма-квантами и т. д. Однако широкое промышленное применение нашел только один вид деления — посредством облучения делящихся веществ потоком нейтронов в специальных установках — *ядерных реакторах*.

Существует еще один вид деления — так называемое спонтанное (самопроизвольное) деление ядер атомов урана, открытое еще в 1940 г. советскими физиками К. Т. Петржаком и Г. Н. Флеровым, когда некоторые ядра атомов урана самопроизвольно, без какого-либо видимого внешнего воздействия, делятся надвое. Это случается очень редко — не более 20 делений в час. Однако при некоторых благоприятных условиях, обычно создаваемых в ядерных реакторах, этого оказывается вполне достаточно для возбуждения цепной ядерной реакции

без необходимости прибегать к какому-либо внешнему (затравочному) источнику нейтронов.

Чтобы можно было хоть сколько-нибудь наглядно представить механизм деления ядра атома тяжелого элемента, например урана, при поглощении им нейтрона, еще в 30-х годах советским физиком Я. И. Френкелем, а в США Уилером была предложена так называемая капельная модель строения ядра атома, т. е. модель, напоминающая своим поведением каплю жидкости, заряженную положительным электричеством. В ней частицы — нуклоны (протоны и нейтроны), из которых сложено ядро, — представлялись расположенными таким же образом и по очень сходным законам, что и молекулы в сферической капле жидкости. Электрические заряды одноименно заряженных молекул жидкости довольно энергично отталкивают их друг от друга, вследствие чего молекулы слабо связаны между собой и очень подвижны, а капля в целом жидка и стремится «разбухнуть» — разорваться. Примерно так же расталкиваются и стремятся разлететься в стороны и положительно заряженные протоны сферического ядра атома.

Но в капле жидкости действуют и другие силы. Это поверхностное натяжение ее наружной молекулярной пленки, которое удерживает, сжимает молекулы жидкости, вследствие чего она и принимает единственно возможную для очень подвижных и слабо связанных друг с другом частиц форму строго сферической капли.

Однако силы поверхностного натяжения имеют свои очень ограниченные пределы действия, зависящие от свойств жидкости — ее плотности, вязкости и т. п. Поэтому и размер капли не бывает больше некоторой предельной величины.

И здесь можно найти очень близкую аналогию с ядерными силами, удерживающими ядерные частицы, главным образом протоны, в небольшом объеме ядра и не позволяющими им разлетаться со страшной силой в стороны. Существует и резкая граница действия таких ядерных сил (примерно два диаметра ядра атома), за пределами которой даже этих необыкновенно мощных сил не хватает, чтобы преодолеть огромные силы электростатического отталкивания.

Когда капля приобретает размеры больше тех, которые способны удерживать поверхностное натяжение данной жидкости, она под действием молекулярных электрических сил отталкивания делится на части. Но не вдруг, а сперва дефор-

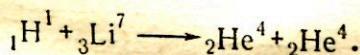
мируется, удлиняется, затем середина ее суживается, капля принимает вид гантели и, наконец, разрывается на две части.

Сходным образом при попадании в ядро атома лишнего для него нейтрона ядро приходит в возбужденное состояние. Благодаря внесенной при этом извне энергии, равной 7 Мэв, движение частиц, составляющих это ядро, резко убыстряется или, что одно и то же, резко увеличивается температура нуклонного вещества. Расталкиваемое участвовавшим числом взаимных столкновений, ядро как бы набухает, и в какой-то момент некоторые его части «выдавливаются» наружу, оказываясь в области ослабления действия удерживающих внутриядерных сил. Равновесие сил отталкивания протонов начинают преодолевать ядерные силы. Ядро теряет свою сферическую форму, удлиняется, в каком-то месте истончается и, превратившись в «гантель», наконец, рвется надвое. Две его половинки, ставшие ядрами атомов средних элементов, с огромной скоростью разлетаются в стороны, неся в себе около 200 Мэв кинетической энергии. Деление на три или четыре осколка случается крайне редко.

Эти осколки, оказавшись перенасыщенными нейтронами, выбрасывают их и, испытав ряд последовательных бета-распадов (испуская электроны), превращаются уже в стабильные ядра атомов средних элементов таблицы Менделеева.

Дефект массы. В 1932 г. два английских физика Кокрофт и Уолтон в который раз обстреливали пучком ускоренных протонов мишень из изотопа лития-7, надеясь обнаружить после этого что-либо новое и интересное. Это новое не заставило себя долго ждать. Снимки, сделанные в камере Вильсона, показали, что некоторые ядра лития-7, поглотив попавший в них протон, исчезали, выбрасывая две альфа-частицы, т. е. целиком превращались в два ядра атома гелия-4.

Это событие можно записать так:



Результат, безусловно, поразительный! Но то, что по-настоящему потрясло ученых, было совсем другим. Когда попробовали с карандашом в руках подсчитать баланс масс и энер-

гий всех участвовавших в этой, на первый взгляд, очень простой ядерной реакции, то обнаружили крайне непонятные «прибыли» и «убытки». Масса всех участвовавших в этой реакции частиц равнялась $7,0182$ (ядро лития-7) $+ 1,0081$ (протон) $= 8,0263$ а.е.м., а масса получившихся двух отдельных альфа-частиц в сумме давала всего лишь $4,004 \times 2 = 8,008$ а.е.м. Неизвестно, куда исчезала масса вещества, равная $8,0263 - 8,008 = 0,0183$ а.е.м.!

Одновременно, и тоже неизвестно откуда, появлялась весьма значительная прибавка энергии движения у двух разлетающихся альфа-частиц, по сравнению с энергией протона первоначально разбившего надвое ядро лития-7.

Крушение закона сохранения массы и энергии?

Ни то, ни другое. Что именно так и должно было происходить, теоретически предсказал еще в 1905 г. величайший физик нашего века Альберт Эйнштейн — творец теории относительности, одной из самых смелых и дальновидных научных идей современности.

Одним из важнейших выводов этой теории было то, что никакое тело не может двигаться в пустоте со скоростью, равной скорости света — $300\,000$ км/сек — или превышающей ее. Это утверждение шло в разрез с господствовавшим прежде законом механики Ньютона, по которому масса тела не зависит от скорости и, следовательно, любое дополнительное усилие, приложенное к движущемуся телу, должно пропорционально, а следовательно, и беспредельно увеличивать его скорость. Согласно же теории относительности, следует различать массу покоя m_0 и массу m , зависящую от скорости движения данного тела. Для малых скоростей масса m практически равна массе покоя m_0 , однако, если скорость движения тела становится сопоставимой со скоростью света, масса m очень быстро увеличивается, стремясь к бесконечности. Например, при скорости $282\,100$ км/сек масса электрона почти утраивается; при $298\,500$ км/сек она увеличивается в 10,79 раза, скорость $299\,400$ км/сек утяжеляет электрон уже в 20,58 раза и т. д. Отсюда следует и другой вывод: любое тело можно разогнать до скорости, сколь угодно близкой к скорости света, но никогда нельзя достичь ее.

Основываясь на опытах русского физика П. Н. Лебедева, установившего факт светового давления, т. е. доказавшего наличие массы у световых волн, на экспериментально подтверж-

денном факте утяжеления электрона при движении со скоростями, близкими к скорости света, — и на ряд других открытий века, А. Эйнштейн вывел свое знаменитое, вызвавшее множество споров и кривотолков, соотношение, связывающее массу — меру инерции — и энергию — физическую меру движения материи:

$$E = m c^2,$$

т. е. энергия равна массе тела, умноженной на квадрат скорости света.

Следовательно, любое вещество обладает определенным количеством энергии, строго пропорциональным его массе и, наоборот, каждому материальному телу, обладающему энергией, соответствует строго определенная масса. Чем больше масса тела, тем больше скрыто в нем энергии. Увеличивая энергию какого-либо тела, например нагревая его или разгоняя до близких к световой скоростей, мы тем самым увеличиваем и его массу. Если возбужденный атом вещества излучает квант света (фотон), то вместе с энергией он теряет и определенную массу.

При всем изобилии энергии атом отдает ее крайне скупно. Чтобы преодолеть силы, связывающие частицы в ядре и препятствующие его перестройке, нужно сперва затратить какое-то количество энергии. Только тогда распадающееся или перестраивающееся ядро атома выделит связанную с уменьшением его массы энергию. Однако не во всех случаях энергия, выделяющаяся при распаде или перестройке ядра, превышает энергию, затрачиваемую на разрушение или перестройку. Следовательно, для получения энергии выгодно разрушать или перестраивать ядра атомов только тех элементов, у которых «затраты» меньше «прибыли». Обычно это ядра атомов или самых легких, или самых тяжелых элементов.

Как известно, ядро атома гелия (альфа-частица) сложено из двух протонов и двух нейтронов. Чтобы разделить такое ядро на составляющие его элементарные частицы, надо преодолеть огромные силы притяжения, удерживающие их все вместе, которые, как выяснилось позже, действуют только на расстоянии, равном примерно двум диаметрам ядра.

Сделать это можно, попав в ядро атома гелия какой-либо тяжелой частицей, разогнанной до большой скорости. В опыте

английских ученых с литием-7 это был протон. Следовательно, на данной фазе происходит поглощение энергии. Но как только частицы разбиваемого ядра разойдутся на расстояние больше двух диаметров ядра, действие внутриядерных сил прекращается и вступают в действие исключительно огромные силы отталкивания одинаково заряженных протонов.

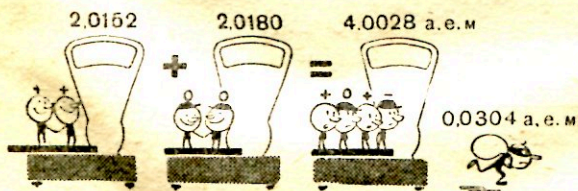
Разлетающиеся в стороны с колоссальной скоростью частицы обладают энергией, значительно больше той, которая была затрачена на разрушение этого атома.

Ну, а что произойдет при попытке соединить вместе четыре отдельных ядра атомов водорода (протона), чтобы получить ядро атома гелия?

Логично предположить, что сначала нужно затратить значительную энергию, чтобы преодолеть непрерывно нарастающее отталкивающее действие четырех положительных зарядов протонов. Но еще большее, поистине чудовищное количество энергии выделится после того, как, сблизившись и войдя в сферу действия ядерных сил притяжения, протоны затем как бы сольются в новое ядро («зашелкнутся»). При этом два протона превратятся в нейтроны, выбросив два позитрона и два нейтрино. И в качестве конечного результата появится избыточное количество энергии, сопровождающееся уменьшением некоторого количества массы. Разность между массой частиц до реакции слияния их в ядро атома более тяжелого элемента и массой образовавшегося в результате этой реакции ядра называют дефектом массы.

Теперь можно заняться подсчетами.

Сумма масс нуклонов, принимающих участие в реакции, равна: $2 \text{ протона} \times 1,0076 + 2 \text{ нейтрона} \times 1,0090 = 4,0332 \text{ а.е.м.}$ Масса же ядра атома гелия, когда-то ранее сложившегося из таких же частиц, составляет $4,0028 \text{ а.е.м.}$ Разница $0,0304 \text{ а.е.м.}$



Тем не менее даже такое, казалось бы, ничтожно малое уменьшение массы эквивалентно энергии 28,2 Мэв!

Дефект массы наблюдается не только при соединении протонов и нейтронов в ядра атома, но и в тех случаях, когда ядро атома тяжелого элемента делится на два более легких ядра.

Но... не у всех элементов при сложении или делении ядер атомов «выделяющаяся» энергия превосходит затрачиваемую. Это относится к очень ограниченному числу атомов: к самым легким — водороду, дейтерию, тритию, гелию, литию и самым тяжелым — урану, плутонию. Все же элементы середины таблицы Менделеева никаких выгод в этой части не представляют. По этой причине булыжник при дороге, кусок железа, серебро, золото, ртуть и другие вещества до скончания веков останутся тем, чем они есть сейчас. Вот почему взрыв атомной или водородной бомбы не вызывает детонации и взрыва всех окружающих нас веществ: воды, воздуха, почвы, всей планеты.

Избыточная энергия при слиянии легких элементов будет выделяться только в том случае, если в соответствующую ядерную реакцию удастся вовлечь все или значительную часть наличных атомов. А даже при самой мощной бомбардировке, пользуясь имеющимися в распоряжении ученых источниками тяжелых снарядов: ускоренных альфа-частиц, дейтронов и протонов, — в цель попадает едва одна десяти-миллионная их часть. Все же остальные пролетают мимо. Вот почему тысячи ученых во всех странах мира изыскивают способы и средства вмешиваться в происходящие в недрах атомов физические процессы, с тем чтобы, управляя некоторыми из них, высвободить скрытую в них энергию (см. «Термоядерная реакция»).

Деактивация — методы и средства удаления радиоактивных веществ с одежды, оборудования, различных сооружений и местности, с оружия и боевой техники, попадающих на них в результате технологических процессов, связанных с получением и применением природных и искусственных радиоактивных веществ, в результате небрежности, аварий или вследствие применения атомного оружия.

Дейтрон — ядро атома дейтерия (тяжелого водорода). Самая простейшая в природе ядерная система, состоящая всего из двух частиц — протона и нейтрона, связанных между собой внутриядерными силами. Энергия связи протона с нейтроном в дейтерии равна 1,1 Мэв.

Делящиеся вещества — вещества, способные вступать в ядерную реакцию деления при облучении их нейтронами. Такими свойствами обладают

уран-235, уран-238 (при облучении только быстрыми нейтронами с энергией выше 1 Мэв), искусственно получаемые в ядерных реакторах плутоний-239 и изотоп уран-233, (он образуется в результате облучения тория-232 нейтронами). Деление урана-235, плутония-239 и урана-233 позволяет осуществлять самоподдерживающуюся цепную ядерную реакцию.

Диссоциация — распадение молекул на составляющие их атомы или группы атомов, например под действием очень высоких температур. Обратный процесс называют рекомбинацией, т. е. соединением атомов в молекулы.

Доза — количество ионизирующего излучения, поглощаемое облучаемым объектом или его частью. Это столь тонкое понятие, что в зависимости от среды, типа и характера излучения приходится устанавливать несколько разновидностей доз.

Физической дозой называется энергия рентгеновского или гамма-излучения, поглощенная одним кубическим сантиметром воздуха. Единицей ее измерения является *рентген* (*р*). Дозы других ионизирующих излучений, отличных от рентгеновского или гамма-излучения (например, заряженных частиц, нейтронов), измеряют физическим эквивалентом рентгена (*фэр*), т. е. это такое излучение, которое по своему ионизационному действию эквивалентно одному рентгену рентгеновских или гамма-лучей.

При одинаковом физическом ионизационном эффекте альфа-, бета- и других частиц их воздействие на живые клетки и организмы различно, поэтому применяют еще и биологический эквивалент рентгена (*бэр*), т. е. в зависимости от вида ионизирующего излучения различают дозу гамма-облучения, дозу рентгеновского облучения, дозу смешанного облучения, нейтронную дозу и т. д.

При облучении людей и живых организмов различают еще поверхностную дозу, глубинную дозу и тканевую дозу. Кроме того, существует разделение на локальную дозу, т. е. дозу, приходящуюся на какую-то ограниченную точку поверхности или площадь, и дозу облучения, которой подвергается весь организм.

Максимально допустимой дозой общего облучения человека считается доза, которая в свете современных знаний не должна вызывать значительных повреждений его организма в любой момент на протяжении всей жизни.

В Советском Союзе за разовую допустимую дозу общего (интегрального) облучения принята доза 5 *бэр*, после чего человек не должен подвергаться лучевому воздействию в течение длительного времени. Предельно допустимой дозой ежедневного облучения для лиц, имеющих дело с радиоактивными излучениями, в настоящее время считается 0,017 *бэр*, а за неделю — 1 *бэр*.

Дозиметрический контроль, дозиметрическая служба — система мероприятий, специально разработанных для контроля и обеспечения безопасности от радиоактивных излучений на предприятиях и в учреждениях, имеющих дело с установками для облучения и с радиоактивными веществами — искусственными и естественными, а также для ведения непрерывного контроля и учета доз облучения людей, радиоактивного заражения местности, воды, атмосферы, продовольствия, оборудования и сооружений.

Дозиметрический контроль осуществляют с помощью большого числа разнообразных приборов: дозиметров, показывающих непосредственно ве-

личину дозы, рентгенометров, определяющих мощность дозы, полученную за определенный отрезок времени, и, наконец, радиометров, измеряющих радиоактивную зараженность местности и окружающих предметов.

Контрольные приборы конструируют специально для самых разнообразных случаев их применения: для измерения внешнего фона излучения, радиоактивного загрязнения территории, помещений и рабочих поверхностей, загрязнения техники, одежды, рук, подошв обуви и т. д.

Приборы бывают стационарные, переносные, вплоть до карманных, снабженные звуковой и световой сигнализацией.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Стр.

Ж

Жидкие металлы в атомной технике _____ 55

Жидкие металлы в атомной технике. При делении ядра атома урана-235 или плутония-239 более $\frac{3}{4}$ выделяющейся энергии уносится двумя осколками, с огромной скоростью разлетающимися в разные стороны. Кинетическая энергия этих осколков деления при резком торможении мгновенно переходит в тепло. Поэтому на данном этапе развития энергетики наиболее целесообразно использовать атомную энергию как источник тепла.

Но новая техника требует и передовых средств преобразования энергии. А соревноваться приходится с весьма совершенными паросиловыми установками. Например, коэффициент полезного действия тепловых электрических станций с турбинами, работающими на перегретом до 600—650° С паре и давлении до 300—350 атм, достигает 38—41%. И поскольку ядерный реактор вступает в соревнование с ними как своеобразный паровой котел, он должен обладать характеристиками по крайней мере не хуже современных паровых котлов. Однако здесь встречается целый ряд принципиальных трудностей.

Паровой котел специально и конструируют, чтобы он выдерживал развивающиеся в нем огромные давления. Используются для этого металлы и конструкционные материалы обладают определенной механической прочностью и жаростойкостью, поддающимися точному расчету и конструкторскому предвидению.

А многие металлы и другие конструкционные материалы, подвергнувшись длительному облучению мощными потоками

нейтронов и гамма-квантов, порой резко меняют почти все свои свойства: очень редко в лучшую сторону, чаще же всего — в худшую. Поэтому очень высокие давления внутри ядерного реактора пока еще недопустимы.

В отличие от парового котла реактор может развивать любую мощность, но только при одном условии: чтобы все образующиеся при этом огромное количество тепла из него немедленно отводилось, иначе расплавятся урановые стержни или их оболочки и весь реактор окажется зараженным радиоактивными продуктами распада и выйдет из строя.

Но если у парового котла поверхность соприкосновения нагреваемых частей (труб) с охлаждающей их средой (теплоносителем) может быть как угодно большой, поверхность тепловыделяющих элементов в рабочей зоне даже больших реакторов сравнительно мала. Следовательно, отпадает возможность и сколь-либо резкого повышения рабочих температур.

Есть ли пути радикального решения этого принципиального противоречия, в какой-то мере предопределяющего судьбы «большой» ядерной энергетики? Нельзя ли, не развивая внутри реактора слишком высоких давлений, сравнить его по эффективности действия с современными паровыми котлами?

Один путь — это естественный путь создания более жаростойких и прочных конструкционных материалов: металлов, сплавов, новых веществ. Другой путь — поиски новых, более эффективных теплоносителей.

В современных высокоэффективных и экономичных паровых котлах, особенно в компактных установках, в качестве теплоносителя все чаще и чаще стали применять обладающие большой теплопроводностью жидкие металлы: ртуть, натрий, калий, висмут, их сплавы и др. Преимущества их по сравнению с охлаждением водой и газами в ряде случаев огромны или просто несравнимы.

Но главное не это. Жидкий натрий, например, кипит при 800°C . Это значит, что тепло от реактора можно отводить с помощью жидкого металла, находящегося под давлением, равным обычному атмосферному! Нагретая до такой температуры вода, превратившись в пар, развивала бы давление порядка 160 атм !

Благодаря высокой теплопроводности объем жидкого металла, необходимого для охлаждения реактора, может

быть во много раз меньше, чем при использовании воды или газа.

Следовательно, охлаждение реактора жидкими металлами позволяет в принципе резко повысить рабочую температуру внутри реактора и получить достаточно высокий коэффициент полезного действия всей энергетической установки.

В Советском Союзе созданы установки, использующие в качестве теплоносителя жидкие металлы. И у них, несомненно, большое будущее.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Запаздывающие нейтроны _____	57
Защита от радиоактивных излучений _____	58
Замедление нейтронов _____	59
Захват нейтронов ядрами атомов _____	60

3

Запаздывающие нейтроны. Процесс деления ядра атома урана-235 или плутония-239 на две части при попадании в него нейтрона длится что-то около миллиардной доли секунды.

Образующиеся осколки выбрасывают в среднем два или три нейтрона, которые могут быть использованы в свою очередь для деления уже двух или трех новых ядер делящихся веществ, т. е. для создания или поддержания саморазвивающейся ядерной реакции. Однако часть этих нейтронов (около 1%) испускается не сразу, в течение примерно миллиардной доли секунды, а с некоторым запозданием — от долей секунды до нескольких десятков секунд. А запаздывание одного звена цепочки цепной реакции деления приводит к замедлению всего процесса в целом. Если время жизни 99% каждого поколения нейтронов равно 10^{-5} сек, а у 1% — 10 сек, то среднее время жизни всей совокупности нейтронов оказывается равным 0,1 сек, т. е. в 10 тыс. раз больше жизни мгновенных нейтронов.

Предположим, что мы довели коэффициент размножения нейтронов точно до единицы, т. е. до уровня, когда расход нейтронов на деление ядер атомов урана непрерывно восполняется рождением новых нейтронов. В этом случае цепной

процесс поддерживается по существу лишь запаздывающими нейтронами, так как, не будь их, коэффициент размножения стал бы меньше единицы и реакция постепенно бы затухла. И если бы мы теперь пожелали увеличить его, допустим, до 1,001 или до 1,007, то скорость реакции не подскочит сразу вверх до неуправляемой величины, а начнет расти медленно — примерно в течение 0,1 сек. А этого времени достаточно, чтобы совершенно спокойно вводить в реактор или выводить из него, даже вручную, регулирующие стержни с поглощающими нейтроны веществами, не позволяющими переступить опасный рубеж коэффициента размножения нейтронов, а в случае необходимости — мгновенно прервать ход реакции.

Защита от радиоактивных излучений. Многочисленные области применения атомной энергии потребовали создания большого разнообразия всевозможных приборов, устройств, установок, приспособлений, а также специальной одежды, предназначенных для защиты лиц, прямо или косвенно имеющих дело с радиоактивными веществами и их излучениями, в длинной технологической цепочке — от преобразования исходного сырья до захоронения отходов атомной промышленности.

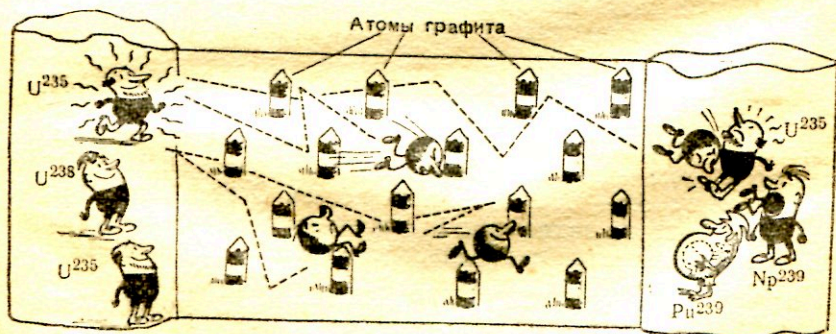
Разработана и постоянно совершенствуется строго продуманная система взаимно связанных, перекрывающих друг друга защитных «линий»: первая линия такой защиты — полностью автоматизированные ограждения (барьеры, экраны, боксы, шлюзы, контейнеры, контрольно-проверочные установки и т. п.), исключающие возможность войти в непосредственный контакт с радиоактивными веществами или по ошибке попасть в зону опасных ионизирующих излучений. Ведь в борьбе с ними глухи и немы все естественные органы чувств человека. Поэтому исключительно богат арсенал средств второй линии защиты — так называемой дозиметрической аппаратуры, стационарной и переносной, самых разнообразных типов и назначений. Она предназначается как для измерений любых видов излучений, так и для обнаружения их присутствия вообще и в дозах, представляющих опасность для людей, в частности.

Для более надежной и перекрестной страховки применяют автоматические сигнализаторы, поднимающие тревогу при достижении любых, заранее установленных уровней излучения.

Так как существует опасность загрязнения воздуха, одежды, приборов и инструментов радиоактивными веществами, используют лабораторные приборы — радиометры, позволяющие обследовать большие и малые подозрительные на возможность заражения площади. При обнаружении доз, превышающих норму, прибор автоматически подает сигнал опасности.

Для индивидуального контроля используют дозиметрические устройства, регистрирующие суммарную дозу облучения, полученную каждым работающим за полный рабочий день. Это разного рода приборы («карандаши», кассеты и др.) с кусочками специальной фотопленки, чернеющей по мере воздействия на нее излучений, индивидуальные миниатюрные ионизационные камеры, карманные электрометры и т. д.

Замедление нейтронов. Замедлить нейтрон и заставить его потерять часть кинетической энергии можно только путем многочисленных столкновений с ядрами атомов, не поглощающих нейтроны. Чтобы при каждом таком столкновении терялось как можно больше энергии, масса ядра атома замедлителя должна быть равна массе нейтрона или близка к ней. Кроме того, вещество замедлителя должно быть стойким в условиях интенсивного облучения как нейтронами, так и другими видами излучения и высоких температур, которые существуют в ядерных реакторах. Например, отличным замедлителем служат обычная и тяжелая вода, гелий, бериллий, графит и некоторые другие вещества.



Захват нейтронов ядрами атомов. В тех случаях, когда свободный нейтрон сблизится с ядром атома другого вещества на расстояние действия мощных ядерных сил (10^{-13} см), он в зависимости от своей скорости (энергии) может или пролететь мимо, или быть втянутым в ядро этого атома. Присоединение нового, лишнего нейтрона приводит ядро такого атома в возбужденное состояние, затем к образованию так называемого промежуточного ядра, которое через короткий промежуток времени распадается, высвобождая определенное количество энергии за счет испускания протона, нейтрона, альфа-частицы или кванта гамма-излучения.

И

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Ионизация _____	60
Изотопы _____	61

Ионизация. В своем нормальном состоянии, т. е. не находясь ни под каким внешним воздействием, атомы вещества, как правило, электрически нейтральны, т. е. сумма положительных зарядов всех входящих в их ядра протонов строго равна сумме отрицательных зарядов всех вращающихся вокруг ядер электронов.

В результате взаимодействия с другими атомами — в ходе химических реакций, при сильном нагревании, под действием сильных электрических полей, света и других излучений — одни атомы могут потерять один или несколько электронов, расположенных на самых внешних электронных орбитах, другие, наоборот, захватить себе лишние, «чужие» электроны. С этого момента пребывание атома в нейтральном, «безразличном» состоянии прекращается, и он становится электрически активным ионом: потерявший какое-то количество электронов атом — положительным ионом, захвативший лишние электроны атом — отрицательным ионом. Оторванный от своего атома, но не захваченный каким-либо другим атомом, электрон становится свободным электроном.

Процесс превращения электрически нейтральных атомов в активные ионы называют ионизацией. В подавляющем большинстве случаев процесс ионизации атомов связан с по-

терей ими электронов, т. е. с образованием положительных ионов.

Так как хаотическое тепловое движение атомов и молекул в веществе, а следовательно, и столкновения между ними начинаются не от привычного нам 0°C , а от абсолютного нуля — 0°K ($-273,16^{\circ}\text{C}$), то и процесс ионизации начинается от этой температуры. По мере повышения температуры ионизация постепенно увеличивается — почти незаметно в твердых веществах, более активно в жидкостях и весьма энергично — в газах.

Если же к ионизированному веществу приложить внешнее электрическое поле, то в нем начнется упорядоченное, направленное движение электронов, т. е. через ионизированное вещество потечет электрический ток.

Степень ионизации, естественно, зависит от ряда обстоятельств: природы вещества (если это газ, то от плотности или степени разрежения), температуры, энергии ионизирующего излучения и других причин.

Изотопы. Изучая природные радиоактивные элементы, ученые столкнулись с некоторыми непонятными явлениями другого порядка.

Вещества, образующиеся в результате распада, оказывались по своим свойствам совершенно одинаковыми с уже известными химическими элементами, отличаясь от них лишь атомным весом. Например, открытое в 1906 г. вещество — ионий — оказалось идентичным торию, а обнаруженный в следующем году мезоторий — радью. Все виды свинца, получающиеся в конечном результате последовательных распадов цепочек урана, тория и актиния, отличаются друг от друга и от обычного свинца только своим атомным весом. Поэтому в процессе постепенного уточнения таблицы элементов Менделеева приходилось в одни и те же клетки помещать уже по несколько видов атомов элементов с совершенно одинаковыми химическими свойствами, но различных по массе.

Такие атомы-близнецы стали называть изотопами («занимающие одинаковое место»).

Естественно, возникло подозрение: а нет ли изотопов и у обычных, нерадиоактивных элементов? Однако выделить их обычными — химическими — методами невозможно, так как химически они идентичны. Электрическое поле тоже бес-

сильно, ибо число электронов на орбитах и положительный заряд ядра у них тоже одинаковы.

Какое же свойство изотопов одних и тех же элементов можно было бы использовать для их разделения? Только одно — разницу в атомном весе. Но обнаружить ее можно было бы только при движении электрически заряженных ионов в сильном электрическом или магнитном поле. При одинаковой скорости путь (траектория) атома более легкого изотопа искривлялся бы больше, чем путь атома более тяжелого изотопа.

На этом принципе и работает своеобразная «машина для сортировки атомов» — масс-спектрограф Астона, названный так по имени впервые сконструировавшего ее английского физика (см. «Разделение изотопов»).



Изотопы водорода



Изотопы гелия



Протон



Нейтрон

Нуклоны

Оказалось, что почти у всех химических элементов имеются свои изотопы. У одних элементов их мало, у других довольно много. Так, кислород состоит из трех изотопов: кислорода-16 (99,76%), кислорода-18 (0,2%) и кислорода-17 (0,04%).

Изотопы бывают устойчивые (стабильные) и неустойчивые (радиоактивные), т. е. самопроизвольно распадающиеся с течением времени (см. «Радиоактивные изотопы»). У 92 элементов таблицы Менделеева к настоящему времени обнаружено более 250 устойчивых изотопов, более 50 естественных и более 1000 искусственных радиоактивных изотопов!

Возможность примешивать к обычным химическим элементам их радиоактивных близнецов открыла широкую дорогу для применения таких непрерывно сигнализирующих о своем присутствии веществ в научных исследованиях, особенно в биологии, медицине, в общей и органической химии, а также в технике и промышленности (см. «Меченые атомы»).

Изобары. Так называют ядра атомов, имеющих одинаковый атомный вес, но различные положительные заряды (атомные номера), а следовательно, и принадлежащие к атомам разных химических элементов. Известно очень большое число как устойчивых, так и радиоактивных изобаров: например, цирконий-96 (${}_{40}\text{Zr}^{96}$), молибден-96 (${}_{42}\text{Mo}^{96}$), рутений-96 (${}_{44}\text{Ru}^{96}$). У них у всех одинаковый атомный вес (96), но разные атомные номера (40, 42 и 44).

Изомеры ядерные. Радиоактивные ядра атомов некоторых элементов могут состоять из одного и того же количества протонов и нейтронов, но по-разному размещенных в пределах ядра. Благодаря этим особенностям ядра могут пребывать в разной степени возбужденного состояния, а при последующем распаде обладать и различной радиоактивностью, т. е. отличаться разными периодами полураспада. Например, ядра атомов одних и тех же искусственных радиоактивных изотопов сурьмы-124 могут иметь изомерные возбужденные состояния с периодами полураспада, равными 1,3; 21 мин и 53,7 дня.

Инжекция частиц. Прежде чем ускорять заряженные частицы в различных ускорителях, их необходимо предварительно разогнать до определенной энергии, зависящей от технических характеристик установок.

Довольно сложный процесс вывода таких частиц на орбиту основного ускорителя и называют инъекцией («вспрыскиванием»). Частицы можно вводить как изнутри (при малых энергиях ускорителей), так и извне магнитного поля ускорителей (в установках, рассчитанных на предельные энергии ускорения частиц). Инжекция частиц может быть непрерывной или в форме отдельных импульсов.

Иод радиоактивный. Природный иод — химический элемент с порядковым номером 53 и атомным весом 126,91 (${}_{53}\text{I}^{127}$) — имеет всего лишь один изотоп. Однако путем облучения нейтронами в ядерном реакторе сурьмы,

теллура, а также в результате деления ядер урана-235 и плутония-239 может быть получена целая гамма радиоактивных изотопов иода с самыми различными периодами полураспада: иод-125 (56 дней), иод-128 (25 мин), иод-130 (12,6 ч), иод-131 (8 дней), иод-132 (2,4 ч), иод-133 (22 ч), иод-135 (6,7 ч). Радиоактивные изотопы иода широко применяют в медицине и биологии, главным образом для исследований и лечения заболеваний щитовидной железы, которая накапливает в себе иод. Для этого особенно пригоден радиоактивный изотоп иод-131, обладающий малым периодом полураспада. Концентрация его в щитовидной железе может быть довольно точно измерена снаружи с помощью обычных дозиметров, чувствительных к гамма-излучению этого изотопа.

Лечебное действие радиоактивного иода, например при раковом заболевании или болезненно повышенной функции щитовидной железы, основано на том, что, накопившись в щитовидной железе, он своим бета-излучением разрушает пораженные или больные секреторные клетки изнутри.

При взрыве в атмосфере атомных бомб в числе радиоактивных осадков выпадает и много долгоживущих изотопов иода. Попадая в организм людей и животных, они могут вызывать лучевую болезнь, а при значительных концентрациях — их гибель.

Ионизирующие излучения — все виды излучений, вызывающие ионизацию атомов или молекул вещества. К их числу относят видимые и ультрафиолетовые лучи света, рентгеновские и гамма-лучи, любые заряженные частицы: электроны, протоны, альфа-частицы, многозарядные ионы.

Ионный двигатель (ионная ракета). За последние годы в связи с созданием мощных ускорителей заряженных частиц и плазменных преобразователей тепла непосредственно в электричество начались разработки так называемых ионных реактивных двигателей для ракет.

Главным соблазном здесь является возможность сначала превратить в низкотемпературную плазму, т. е. ионизировать, газообразное топливо, а затем ускорить полученные ионы до скоростей, сопоставимых со скоростью света, а тем самым увеличить тягу двигателей во столько раз по сравнению с обычными видами топлива, во сколько раз скорость истечения ионов превышает скорость истечения газообразных продуктов сжигания химического топлива, если брать их одинаковые количества. Отсюда повышенные грузоподъемность, скорость и дальность полета ракет, большой запас поднимаемого ими топлива и другие столь же решающие преимущества.

Естественно, что при применении ионных двигателей ничего не дается даром. Для того чтобы иметь возможность ионизировать огромное количество атомов газообразного топлива, а затем разогнать полученную массу заряженных частиц до скоростей порядка десятков и сотен тысяч километров в секунду, необходимо устанавливать на ракете мощные источники энергии, вес и объем которых «съедают» значительную долю преимуществ, приобретенных за счет огромного выигрыша в скорости истечения реактивной струи. Однако подсчеты, проведенные учеными, показали, что игра, безусловно, стоит свеч. В результате длительных исследований плазменные двигатели, созданные советскими учеными, впервые были применены на автоматической межпланетной станции «Зонд-2» в 1964 г.

Устройство ионного двигателя исключительно просто. Основная его часть — электрический генератор, создающий сильное электрическое поле высокого напряжения. Источником положительно заряженных ионов могут

быть газообразные вещества, например водород и гелий, легкий металл цезий или другие вещества, ионизирующиеся, т. е. теряющие свои электроны уже при сравнительно невысоких температурах — порядка двух — пяти тысяч градусов. Попадая в электрическое поле мощного ускорителя, ионы разгоняются до космических скоростей и выбрасываются из хвостовой части двигателя, создавая таким образом тягу.

Искровая камера — счетчик для регистрации радиоактивных излучений, в котором заряженная частица, пролетая в точно подобранном промежутке между двумя находящимися под высоким электрическим напряжением электродами, ионизирует заполняющий этот промежуток газ или иное вещество, в результате чего между электродами при каждом появлении заряженной частицы возникает обычный электрический разряд (электрическая искра). Присоединенное к такой камере устройство позволяет считать число разрядов в единицу времени, а тем самым и количество пролетающих через искровой промежуток заряженных частиц.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Кванты. Теория квантов	65
Критическая масса (ядерного горючего)	66
Коэффициент размножения нейтронов	68
Космические лучи	70

К

Кванты. Теория квантов. Хотя поведение света, рентгеновских и гамма-лучей в обычных условиях долгое время убедительно свидетельствовало об их волновых свойствах, был известен и целый ряд явлений, которые теорией волнового процесса никак не подтверждались. Их можно было легко объяснить только в том случае, если предположить, что очень коротким электромагнитным волнам, по крайней мере при их взаимодействии с веществом, присущи свойства дискретных частиц, т. е. тел, имеющих определенную, конечную величину, однако могущих существовать и двигаться только со скоростью света.

В 1901 г. известный немецкий физик Макс Планк предложил теорию, согласно которой в процессе физических преобразований и взаимодействий атомов вещества энергия выделяется и поглощается не непрерывным, сплошным потоком, а как бы концентрируется в мелкие конечные количества, или порции. Такая порция энергии позднее получила название квант.

Следовательно, поглощение света, рентгеновских и гамма-лучей различными веществами, а также испускание света воз-

бужденными атомами, например нагретого до высокой температуры вещества, происходит строго определенными конечными порциями — квантами. Мерой энергии кванта Планк считал величину, получаемую по формуле

$$E = h\nu,$$

где E — энергия, эрг; ν — частота колебаний источника излучения, $1/\text{сек}$; h — некоторая постоянная величина, равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек («постоянная Планка»).

Из этого довольно простого выражения следует, что чем выше частота электромагнитного излучения, тем большую энергию несет с собой каждый квант излучения.

Однако поглощаться и испускаться кванты энергии будут только тогда, когда они достигнут строго определенной, присутствующей данному физическому процессу величины.

Фотоэффект — физический процесс, при котором падающие на металлическую поверхность кванты света при достаточной их энергии выбивают из металла электроны.

Подобные порции света позже назвали фотонами, подчеркивая этим корпускулярные свойства света.

Критическая масса (ядерного горючего). Хорошо известно, что никакими силами поджечь и заставить гореть дальше маленький кусочек угля невозможно. В то же время большая куча угля горит претотличным образом. Причина этого, казалось бы, непонятого противоречия заключается в том, что химическая цепная реакция горения топлива, идущая при 500 — 600°C , может поддерживать сама себя только в том случае, если выделяющееся при этом тепло в состоянии непрерывно нагревать до такой же температуры и соседние слои топлива. А это возможно лишь тогда, когда приток тепла к зоне горения превышает его потери через поверхность еще холодного угля. И чем меньше кусочек угля, тем относительно больше его поверхность (по отношению к массе), через которую может улетучиваться это тепло. Например, у шара диаметром 20 см отношение поверхности к объему составляет всего $0,3$, в то время как у шарика диаметром 2 см это же соотношение будет равно 3 , т. е. в десять раз больше! Естественно, что при нагревании малый шарик будет терять в десять раз больше тепла, чем крупный. Потери эти могут быть столь ве-

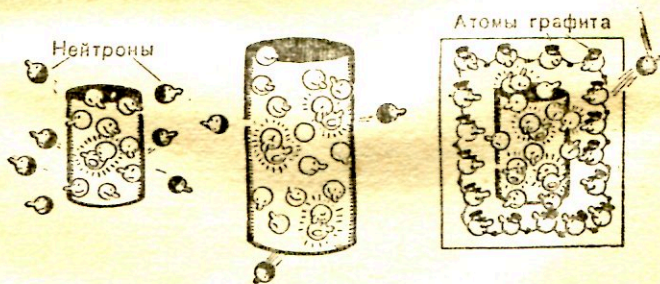
лики, что самоподдерживающейся реакции горения не получится. Нужен какой-то определенный минимальный физический объем топлива, который назовем критическим.

Для начала саморазвивающейся цепной реакции деления ядер атомов урана или плутония нужно, чтобы какое-то одно самопроизвольно разделившееся ядро атома выбросило, допустим, два нейтрона, а эти нейтроны обязательно попали в соседние ядра атомов делящегося вещества и разделили бы уже по два ядра каждый, а те выбросили четыре нейтрона, которые в свою очередь разделили бы четыре ядра и выбросили 16 новых нейтронов и т. д.

Но нейтроны могут и не попадать в ядра соседних атомов. Объем 1 г урана равен $0,053 \text{ см}^3$ и содержит $2,56 \cdot 10^{21}$ атомов. А если сложить ядра этих атомов все вместе, то они займут только $4,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3$, или одну десятиллионную долю объема горошинки урана, или примерно столько же пространства, сколько занимает шарик объемом 1 мм³ по сравнению с Солнцем. При таком соотношении объемов нейтроны будут безнадежно проскакивать мимо цели и вылетать из кусочка урана наружу. Никакой цепной реакции деления ядер урана не получится.

Но если взять слиток урана весом в несколько десятков килограммов, т. е. сферу диаметром 25—30 см, то вероятность вылета нейтронов, не задевших по пути ядер атомов урана, будет сводиться к минимуму.

Можно поступить и так: окружить слиток урана веществом, хорошо отражающим нейтроны, — отражателем из графита, тяжелой воды и других веществ, ядра атомов которых по массе сопоставимы с нейтронами. Этот экран будет возвра-



щать нейтроны обратно в слиток урана и тем самым давать им дополнительные шансы наконец-то встретиться с ядром атома урана и разделить его.

Существует и третья возможность. Движущиеся с огромными скоростями ядерные частицы обладают не только свойствами частиц, но и свойствами волн. При этом чем медленнее они движутся, тем больше проявляются у них волновые свойства. И, что самое парадоксальное, тем большим становится так называемое сечение, т. е. условная поверхность их возможного взаимодействия с встречающимися на пути ядрами атомов. Частица как бы увеличивается в размерах, «раздается» по сторонам. Там, где быстрый нейтрон пролетел бы, не задев ни одного ядра атома урана, очень медленно движущийся, как бы «распухший», нейтрон будет непрерывно натываться на ядра атомов урана и делить их уже наверняка. Следовательно, необходимо каким-то способом замедлить нейтроны.

Теперь можно сделать и выводы. Для осуществления цепного процесса в уране необходимо, чтобы количество его было не меньше определенного критического объема.

Для конкретных условий возникновения саморазвивающейся цепной реакции деления критическая масса может иметь разную величину.

Можно сказать и так: критическая масса, при которой начинается цепная реакция деления,— это то минимальное количество ядерного горючего, при котором каждое поколение нейтронов рождает следующее поколение, насчитывающее такое же или несколько большее количество нейтронов, т. е. когда потери нейтронов в нем вследствие утечки или поглощения примесями полностью восполнены.

Коэффициент размножения нейтронов. При делении ядра атома урана-235 на два осколка (элементы, приходящиеся на середину периодической таблицы химических элементов Менделеева) высвобождаются два-три (в среднем 2,5) нейтрона. Количество делящихся ядер будет удваиваться или утраиваться при каждом новом поколении делений. Но это лишь в идеальном, теоретически возможном случае. Практически же в уране любой степени технической чистоты всегда присутствуют посторонние примеси, поглощающие некоторую часть высвобождающихся при делении нейтронов. Компенси-

ровать эту потерю можно, только сократив до минимума количество нейтронов, вылетающих за пределы рабочей зоны реактора и не успевающих разделить свою долю ядер урана-235, или увеличив количество ядерного топлива в реакторе (см. «Критическая масса»). Но если уран очень «загрязнен» вредными, поглощающими нейтроны примесями, то уже не помогут ни увеличение его количества, ни наличие хорошего отражателя, возвращающего нейтроны обратно в активную зону реактора. Никакой цепной реакции в этом случае не возникает.

«Вредными» примесями приходится считать и атомы основного тяжелого изотопа природного урана — урана-238. Их ядра слишком жадно поглощают нейтроны. Поэтому в сплошном слитке природного урана любого объема, состоящего на 99,3% из этого изотопа, цепной реакции деления «просто так» возбудить нельзя.

Ну, а каким путем можно? Если каким-то способом нам удалось возбудить в слитке урана реакцию деления, то она будет продолжаться на том же самом уровне (числе делений в единицу времени), если каждый высвободившийся в процессе такого деления нейтрон обязательно разделит хотя бы по одному ядру атома урана-235. Не нужно и угадывать, что условная величина — коэффициент размножения нейтронов K , т. е. среднее значение отношения числа вторичных нейтронов, производящих деление ядер атомов урана или плутония, к числу первичных нейтронов, — в этом случае будет строго равна единице. Но при любом, пусть даже самом медленном росте числа делений, допустим, когда количество нейтронов, делящих свои ядра атомов топлива в каждом последующем поколении, превышает хотя бы на миллионную долю число разделившихся ядер предыдущего поколения, коэффициент размножения будет уже превышать единицу. Опять-таки в идеальном случае он будет равен, как нетрудно догадаться, 2,5—3,0, т. е. количеству нейтронов, выброшенных разделившимся ядром урана-235. В килограмме урана-235 имеется примерно 2^{80} атомов. И даже если цепной процесс в слитке был начат всего одним нейтроном, то все это буквально астрономическое количество атомов разделится за ничтожную долю секунды — всего за 80 поколений делений! И если цепную реакцию деления искусственно не замедлять (т. е. не управлять ею), она окончится мгновенным взрывом (атомная бомба). При

$K < 1$ цепная реакция невозможна, а если бы и началась, то неминуемо затухла бы.

Космические лучи. Вслед за открытием в 1895 г. рентгеновских, а за ними и радиоактивных лучей ученые задались вопросом: а нет ли в природе и других, еще неизвестных излучений, проливающих еще больше света на самые сокровенные физические процессы, протекающие в бесконечных глубинах атомов?

Австрийский физик В. Гесс в 1912 г. запустил воздушный шар с регистрационной аппаратурой на высоту 5 км. К удивлению всего ученого мира, излучение вверху оказалось намного сильнее, чем у поверхности Земли. Дальнейшие многочисленные опыты показали, что новое излучение приходит откуда-то извне, из космоса. Поэтому по месту предполагаемого зарождения оно было названо космическими лучами.

Первые же попытки определить природу этих лучей принесли немало неожиданностей и откровений.

Начнем с того, что они оказались не лучами, а частицами — протонами, небольшим количеством ядер атомов гелия — альфа-частицами и совсем редко — ядрами атомов более тяжелых элементов — углерода, азота, железа и других. Далее выяснилось, что подавляющее большинство этих частиц обладает огромной, а некоторые даже чудовищно огромной энергией, достигающей миллиардов миллиардов электронвольт, в то время как самые быстрые и проникающие частицы, выбрасываемые при радиоактивном распаде веществ, «едва» достигают энергии 10 Мэв. Космические частицы удавалось зарегистрировать даже на глубине нескольких километров под землей или под водой! Наконец, что самое важное, удалось установить, что подлинно «космических» частиц в этом достигающем Земли потоке вообще нет. Подавляющая масса «лучей» — это бесчисленные осколки микроскопических катастроф — ядер атомов воздуха, разрушенных при попадании в них первичных, «настоящих» космических частиц, обладающих столь огромной энергией, что эти осколки сами превращаются в космические лучи почти такой же космической энергии, способные с неменьшей легкостью разбивать ядра атомов воздуха. Даже «осколки» осколков, к тому же еще и нескольких поколений разбитых до основания ядер атомов, способны разбивать свои порции атомов, создавая нарастающую, как снежный

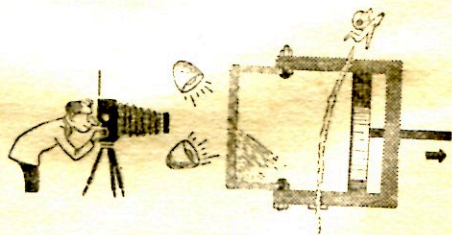
ком, лавину — своеобразную цепную реакцию ядерных катастроф. И не только осколков. Выделяющиеся в ходе таких столкновений огромные количества энергии порождают целые семейства новых, не существующих в обычных условиях короткоживущих частиц, которые, распадаясь, тут же порождают новые частицы самых разнообразных физических свойств и характеристик. Природа как бы создает на миллиардные доли секунд свои собственные «искусственные частицы», невольно приподнимая завесу над самыми сокровеннейшими тайнами образования материи (см. «Элементарные частицы»).

Камеры регистрационные. Так называют целый класс приборов и установок, которые наряду со счетчиками частиц и толстослойными фотографическими пластинками являются основными средствами наблюдения и регистрации ядерных реакций, превращений элементарных частиц при их взаимодействиях друг с другом, изучения этих превращений и реакций не только с качественной, но и с количественной стороны. Главными из богатого разнообразия подобных устройств являются: *камера Вильсона*, в которой пролетающая заряженная частица оставляет за собой видимый след из сконденсированного перенасыщенного пара; *пузырьковые камеры*, основанные на свойстве перегретой жидкости вскипать при прохождении через нее заряженной частицы, также оставляя видимый след в виде мельчайших пузырьков пара; *искровые камеры*, в которых появление частицы обозначается возникновением микроскопического электрического разряда, и многие другие.

Камера Вильсона. Успехи в конструировании счетчиков заряженных частиц поставили перед учеными такую задачу: а нельзя ли попытаться каким-либо способом «увидеть» частицы, из которых складывается атом, несмотря на то, что они в миллиарды раз меньше самых маленьких тел, которые можно разглядеть в самые мощные оптические микроскопы?

Обычно, когда что-либо плохо видно или что-то мешает видеть, говорят, что «все как в тумане» или «все затуманилось». Однако в некоторых случаях, по крайней мере в области физики, «туман» позволяет невидимое превращать в видимое. Это несколько неожиданное обстоятельство связано с вопросом: почему и каким образом на ясном небе собираются облака и тучи, почему выпадает дождь?

В воздухе, каким бы он ни был сухим и прозрачным, всегда содержится некоторое количество влаги, непрерывно испаряемой морями, озерами, реками, растениями и почвой. Эти водяные пары незаметны, так как отдельные молекулы пара распределены в воздухе равномерно и не изменяют его однородности, как невидны растворенные в воде молекулы соли.



Однако если атмосферное давление по каким-либо причинам понижается, то содержащийся в воздухе пар становится пересыщенным. Вот тогда отдельные молекулы влаги соединяются сперва в мелкие капельки, видимые в виде знакомого нам «пара» и облаков, а затем в более крупные капли, которые, не будучи в состоянии свободно плавать в воздухе, падают вниз в виде дождя.

Но влага может собираться в капли только в том случае, если в воздухе содержатся в достаточном количестве мелкие пылинки, особенно если они несут электрические заряды. Они-то и являются центрами конденсации влаги. Иначе молекулы пара не могут соединяться в капли даже при большом избытке влаги в атмосфере.

В 1912 г. английский физик Чарльз Вильсон, много работавший до этого над вопросами происхождения дождей и туманов, предложил очень остроумный и удивительно простой способ «видеть» заряженные частицы. Для этого лишь необходимо в наполненной перенасыщенным паром камере вызвать нечто вроде искусственного тумана. Пролетающие сквозь камеру заряженные частицы ионизируют молекулы пара, и образующиеся в результате этого ионы служат в качестве центров конденсации водяного пара. Из капелек жидкости получаются видимые цепочки (треки).

Камера состоит из стеклянного цилиндра с подвижным поршнем, заменяющим дно, и заполнена парами испаряющейся жидкости, например спирта. Если очень быстро опустить вниз поршень, то давление, а следовательно, и температура пара в камере резко понизятся, вследствие чего в нем образуется избыток влаги, т. е. переохлажденный и перенасыщенный пар. Так как впускаемые внутрь камеры пары тщательно очищены от пыли и других взвешенных частиц, то молекулам влаги не на чем собираться и никакого тумана внутри камеры не появится.

Однако если в этот критический момент сквозь камеру пролетит какая-либо заряженная частица, даже очень быстрая, то на своем пути она, как обычно, будет непрерывно разбивать молекулу пара на ионы, т. е. порождать заряженные частицы, которые тут же станут центрами конденсации пара. След частицы мгновенно покроется великим множеством капелек влаги, жадно осевших на ионах, и станут видны более или менее четкие и тонкие линии «треков», распад которых на отдельные капельки можно заметить только под сильным микроскопом. Особенно хорошо эти следы видны, если их сильно осветить сбоку, а внутри камеру и поршень покрыть черной матовой краской. Согласовав опускание поршня с затвором фотографической камеры и вспышкой света, следы пролетающих частиц можно легко фотографировать.

Камера Вильсона позволяет не только видеть следы пролетающих частиц, но и определять некоторые качественные характеристики этих частиц. Например, по толщине и чистоте следа можно узнать, медленно или быстро летит заряженная частица: чем медленнее она летит, тем больше молекул газа она успевает ионизировать на каждом сантиметре своего пути. Измеряя ширину или плотность следов, можно довольно точно определить и скорость исследуемых неизвестных частиц. По числу капелек в следе, если он кончается в пределах камеры, можно найти полное число пар ионов, образованных пролетевшей исследуемой заряженной частицей. А зная энергию, которую необходимо затратить на образование одной пары ионов, можно вычислить и полную энергию, которую имела частица в момент ее появления в камере.

Позднее камера Вильсона была значительно усовершенствована. Особенно ценный вклад в ее конструкцию внесли советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын, предожившие в 1927 г. помещать камеру в сильное магнитное поле. Взаимодействуя с заряженными частицами, магнитное поле заставляет их искривлять свой путь, благодаря чему можно, во-первых, определить заряд частицы — положительно или отрицательно она заряжена, во-вторых, еще одним способом определить энергию частицы, так как чем быстрее она движется или чем больше ее масса, тем меньше изгибается ее путь в магнитном поле. И наконец, что самое главное, можно исследовать все явления, наблюдаемые при столкновении этих частиц с атомами паров, заполняющих камеру, или атомами мишеней из различных веществ, устанавливаемых на пути движения частиц. В этих случаях можно изучать поведение даже частиц, не несущих электрического заряда, — по следам (трекам) разлетающихся в результате таких столкновений заряженных частиц.

Каротаж радиоактивный (геофизическое исследование буровых скважин). Одним из самых надежных средств исследований геологического строения земной коры, а также поисков полезных ископаемых является бурение со взятием проб пород с различных глубин. По извлеченной из бура пробе породы (керну) можно судить о составе и последовательности залегания горных пород. Однако при глубоком бурении с обсадными трубами и при различном заполнении ствола скважин водой, глинистыми растворами и т. п., например при поисках нефти, получить целый керн уже нельзя. Следовательно, невозможно судить и о геологическом разрезе скважины. Но когда появились особо чувствительные приемники для улавливания предельно слабых гамма-излучений, геологи получили новое, исключительно точное, гибкое и удобное средство геофизического исследования геологических разрезов буровых скважин, для поисков и разведки месторождений радиоактивных руд и вод и многих других полезных ископаемых, в частности нефти.

Сейчас этот метод кажется даже слишком простым. Суть его такова. Известно, что почти все породы земной коры содержат ничтожно малые, но разные количества радиоактивных веществ. Опустив в скважину прибор, который улавливает гамма-лучи, испускаемые различными слоями пород и легко проходящие сквозь обсадные трубы, и записав энергию и продолжительность их излучения, можно, сравнивая эту запись с заранее измеренными образцами пород, составить исключительно точный геологический разрез скважины любой глубины.

Однако нефтяные и водоносные пласты гамма-лучей не испускают, и об их наличии часто приходится только гадать. Поэтому пассивный метод исследования можно заменить активным. Для этого в скважину опускается довольно сильный источник нейтронов (нейтронный каротаж). В результате интенсивного обстрела нейтронами атомы элементов, из которых складываются минералы горных пород, становятся радиоактивными и начинают испускать — одни больше, другие меньше — гамма-лучи. Установленный на некотором расстоянии от источника нейтронов приемник гамма-излучений улавливает и измеряет уже не естественную, а искусственную радиоактивность горных пород.

Атомы водорода, которыми особенно богаты нефть и вода, очень хорошо отражают нейтроны. По количеству таких отраженных нейтронов уже легко определяются глубина залегания и мощность нефтеносных и во-

доносных пластов. Аналогичные методы могут быть применены и во многих других областях геофизических исследований.

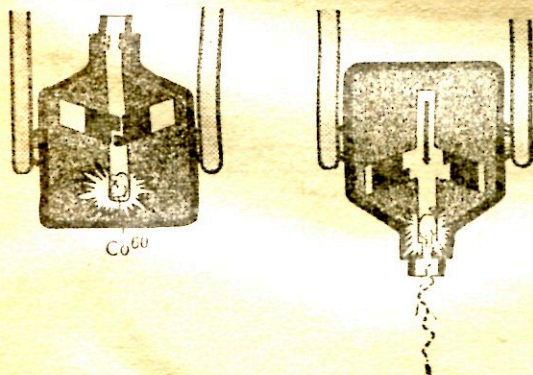
Кобальт — тугоплавкий металл, нашедший широкое применение в металлургии для получения жаропрочных и магнитных сталей и сплавов и в других отраслях промышленности. Это один из немногих химических элементов, имеющий всего лишь один природный изотоп, ядро которого состоит из 27 протонов и 32 нейтронов ($^{59}_{27}\text{Co}$).

Кобальт, облученный интенсивным потоком нейтронов в ядерном реакторе, превращается в искусственный радиоактивный изотоп — кобальт-60 ($^{60}_{27}\text{Co}$) с периодом полураспада, равным 5,25 лет, который испускает гамма-лучи с энергией 1,33 и 1,17 Мэв и относительно слабые бета-частицы с энергией 0,31 эв.

В технике кобальт-60 применяют для просвечивания огромных слитков металлов и изделий, в химии — для облучения и получения искусственных пластических масс с новыми свойствами, в медицине — для лечения самого страшного недуга человечества — рака, для стерилизации лекарств и медицинской аппаратуры, в сельском хозяйстве — для борьбы с прорастанием картофеля, уничтожения вредителей, для стимуляции роста растений и др.

Кобальтовая пушка. Чтобы задержать гамма-лучи, испускаемые радиоактивным кобальтом-60 (с энергией, равной 1,33 Мэв), сделать их безопасными для окружающих и в то же время иметь возможность использовать излучение в научных, лечебных и технических целях, этот элемент приходится хранить в свинцовых или стальных контейнерах. Такой контейнер вместе с контрольными механизмами, органами управления и устройствами для выпуска узкого пучка гамма-лучей назвали кобальтовой пушкой (см. рисунок).

Кристаллические счетчики частиц — счетчики радиоактивных излучений, в которых используют свойство некоторых кристаллов изменять проводимость электрического тока при прохождении через них быстрых ионизирующих заряженных частиц и гамма-излучений (алмаз, хлористое серебро, хлористый таллий и др.).



Кюри — единица измерения естественной или искусственной радиоактивности. Это такое количество любого радиоактивного вещества, которое претерпевает 37 миллиардов распадов в секунду (радиоактивность 1 г радия). В повседневной практике применяют более мелкие единицы: милликюри (1 мкюри = 0,001 кюри), микрокюри (1 мккюри = 0,000001 кюри).

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

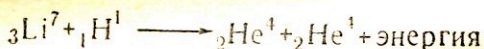
	Стр.
Легкие элементы _____	75
Литий _____	75

Л

Легкие элементы — условное название группы химических элементов от водорода до кислорода включительно, в ядрах атомов которых количество нейтронов не превышает число протонов.

Литий — химический элемент первой группы периодической системы Д. И. Менделеева. Порядковый номер 3, атомный вес 6,94. Щелочной металл с температурой плавления около 180° С, серебристо-белого цвета, очень мягкий. Встречается в природе в составе многих минералов. При нагревании на воздухе загорается при 200° С. Состоит из природной смеси устойчивых изотопов: лития-6 (7,52%) и лития-7 (92,48%).

В ядерной физике реакцию



используют для получения альфа-частиц разных энергий. При облучении же лития нейтронами происходит реакция



в результате которой получается радиоактивный изотоп сверхтяжелого водорода *тритий*.

Гидрид лития LiH служит для получения водорода. Но если в этом соединении обычный водород заменить дейтерием, то полученный дейтерид лития — LiD может служить в качестве ядерного взрывчатого вещества в *водородной бомбе*.

Линейный ускоритель — установка, предназначенная для ускорения заряженных частиц. Отличается от других типов ускорителей тем, что разгоняемые в нем частицы движутся по прямой линии в отличие от кругового движения в циклических ускорителях.

Линейные ускорители бывают двух видов: электростатические, в которых частицы ускоряются постоянным электрическим полем, создаваемым высоковольтными генераторами постоянного напряжения, сразу, в один прием, и резонансные, разгоняющие частицы полем, создаваемым относительно слабыми последовательными импульсами переменного высококачественного электрического поля (см. «Ускорители»).

Лучевая болезнь — заболевание, вызываемое действием ионизирующих излучений при облучении организма альфа-, бета- или гамма-лучами, потоком нейтронов, а также при попадании радиоактивных веществ внутрь организма (внутреннее облучение). В первую очередь и главным образом при этом страдают кровотворные органы, слизистые оболочки и железы внутренней секреции.

Различают острую и хроническую формы лучевой болезни. Острая форма может возникнуть при большой однократной дозе наружного облучения организма или при попадании внутрь организма большого количества радиоактивного вещества. Одна и та же доза облучения у разных людей может вызывать развитие болезни неодинаково — в зависимости от способности организма сопротивляться излучению. Хроническая форма лучевой болезни возникает при длительном действии непрерывных или повторяющихся излучений небольшими дозами и характеризуется рядом отличающихся друг от друга признаков. В настоящее время разработана система комплексного лечения как острой, так и хронической формы лучевой болезни, включающая в особо тяжелых случаях пересадку костного мозга.

М

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Меченые атомы _____	76
Мезоны _____	78
Медленные (тепловые) нейтроны _____	78
Мёсбауэра эффект _____	79

Меченые атомы. В практике на каждом шагу встречаются сотни, тысячи случаев, когда успех решения какой-либо научной или технической проблемы целиком зависит от того, знаем мы или не знаем, где находится, откуда и как попадает или куда исчезает то или иное вещество. Металлургу, например, важно знать, почему даже небольшие примеси серы делают металл хрупким, непрочным. К металлу добавили небольшое количество радиоактивного изотопа серы. Изучение фотографических отпечатков, полученных под действием бета-частиц, испускаемых такими мечеными атомами, показало, что примеси серы располагаются, главным образом, по грани-

цам кристаллов металла, что и ведет к резкому уменьшению его прочности. Биологу крайне важно проследить путь в живом организме тех или иных питательных веществ, тончайшие процессы их усвоения, действие на организм тех или иных лекарственных и других препаратов. Картина изучаемых явлений становится много яснее, когда к атомам, входящим в состав этих веществ, примешивается небольшое количество точно таких же, но радиоактивных атомов. Путь их по организму непрерывно улавливают извне с помощью самых разнообразных счетчиков и других следящих устройств.

Добавление радиоактивных изотопов к сплавам, из которых изготовляют режущие инструменты или работающие под большими нагрузками ответственные детали машин, позволяет сравнительно легко установить степень и характер их износа, зависимость износа от различных добавок к сплавам, из которых делают эти детали и инструмент, от качества отдельных видов смазок, температурных, скоростных и других режимов работы.

Химику очень важно знать точную картину поведения тех или иных веществ даже в хорошо изученных химических реакциях, не говоря уже о самых сложных или недоступных для обычных методов наблюдения. Интенсивность излучения меняется и в зависимости от толщины, плотности, количества или поглощающих свойств веществ, находящихся между источником излучения и счетчиком. Отсюда несложно сконструировать великое множество приборов и аппаратов, определяющих толщину листовых изделий, например стали, цветных металлов, бумаги и чего угодно другого по сравнению с заранее установленным эталоном. Более того, соединив, например, выход счетчика радиоактивности с устройством, регулирующим расстояние между валками, от которых зависит толщина листа или ленты, можно сделать так, что машина будет автоматически поддерживать нужную толщину выпускаемого ею изделия. С тем же успехом можно контролировать качество или размеры штучных изделий, плотность растворов, скорость протекания жидкостей и сыпучих веществ по трубам и множество других сходных операций.

Радиоактивные изотопы способны, и с большим эффектом, заменить рентгеновские установки, особенно мощные, применяемые в машиностроении и металлургии, где стало уже повседневной практикой просвечивать с помощью гамма-лучей

огромные слитки металлов и готовые изделия с целью обнаружения скрытого (внутреннего) брака: раковин, трещин, инородных включений и других дефектов. Они много проще, удобнее и дешевле громоздких рентгеновских аппаратов соответствующей мощности и способны просвечивать сталь толщиной до 250 мм.

Приведенных примеров (а их можно продолжать до бесконечности) более чем достаточно, чтобы обрисовать огромную роль радиоактивных изотопов или, как их называют иначе, «меченых атомов».

Мезоны — элементарные частицы, масса которых лежит между массами электронов и протонов. Их обнаруживают в космических лучах и получают искусственно при взаимодействиях между ускоренными до больших энергий частицами. Существуют положительно и отрицательно заряженные, а также нейтральные мезоны. По абсолютной величине заряд положительных и отрицательных мезонов в точности равен элементарному электрическому заряду электрона. Мезоны крайне неустойчивы; время их жизни — в пределах от 10^{-6} до 10^{-14} сек.

Известны следующие разновидности мезонов: положительные и отрицательные μ -мезоны с массой, равной 207 электронным массам, положительные, отрицательные и нейтральные π -мезоны с массой в 273 раза больше массы электрона. У нейтральных π -мезонов несколько меньшая масса. Положительные, отрицательные и нейтральные K -мезоны имеют массу в 966,5 раза больше массы электрона.

Считается, что нуклоны удерживаются в ядре атома благодаря непрерывному обмену между собой π -мезонами. Этот обмен и обуславливает существование так называемых внутриядерных сил, придающих столь удивительную прочность ядру атома.

Медленные (тепловые) нейтроны. Так называют нейтроны, кинетическая энергия движения которых сравнима с тепловой энергией молекул окружающего вещества при комнатной температуре (20°C), что соответствует энергии 0,03 эв.

Благодаря способности легко делить ядра атомов урана-235 и плутония-239 тепловые нейтроны играют основную роль в процессе возбуждения и развития цепной ядерной реакции де-

ления, осуществляемой в ядерных реакторах (см. «Управляемая цепная реакция деления»).

Медленные нейтроны получают искусственным путем в результате многократных упругих столкновений с ядрами атомов, масса которых близка к массе самих нейтронов, например с ядрами атомов водорода, гелия, дейтерия, углерода, очень мало или совсем не поглощающих нейтроны. При каждом таком столкновении нейтрон отдает атому этого вещества часть своей кинетической энергии, вследствие чего скорость его движения уменьшается, пока не будет достигнута энергия, особо благоприятная для деления ядер урана-235.

Мёссбауэра эффект. Известно, что, поглотив поступившую извне строго определенную порцию энергии, ядро атома приходит в «возбужденное» состояние — деформируется, пульсирует. Спустя какое-то время оно испускает гамма-лучи — фотоны большой энергии с высокой частотой электромагнитных колебаний (см. «Кванты. Теория квантов», «Фотон»), так как фотоны одновременно обладают свойствами и частицы, и волны. Эти колебания давно стремились использовать в качестве измерителя времени, ибо постоянство частоты такого излучения настолько велико, что значительно превосходит все, с чем встречаются физики в других колебательных процессах. Нельзя даже представить себе иной механизм часов, обеспечивающий точность хода в 1 сек за 100 000 лет.

Из теории ядерных процессов следует, что приемником, отзывающимся на гамма-кванты излучения точно такой же частоты, могут быть только ядра таких же атомов. Поглотив гамма-кванты, ядра атомов приемников должны прийти в возбужденное состояние и в свою очередь через долю секунды испустить гамма-кванты опять-таки той же самой частоты.

Короче говоря, когда одно ядро атома излучает фотоны (гамма-кванты), а другое их поглощает, то те и другие «ядерные часы» (ядро-излучатель и ядро-поглотитель) дают одинаковые показания, так как их частоты в точности совпадают. Но как только эти частоты расходятся, явление резонанса исчезает. Это свидетельствует о различном ходе времени в двух местах: там, где излучатель, и там, где приемник.

Однако по ряду причин обнаружить такое (резонансное) поглощение долгое время не удавалось — слишком велика частота колебаний гамма-излучения и слишком мало время из-

лучения. И только в 1958 г. немецкому физику Р. Мёссбауэру удалось обнаружить существование резонанса между атомами радиоактивного и нерадиоактивного изотопа — железа-57, а затем применить данный эффект для измерения ничтожно малых отрезков времени. До открытия Мёссбауэра это явление не удалось наблюдать только потому, что испускаемые ядром атома излучателя гамма-кванты в большинстве случаев не были в состоянии возбудить ядра атомов поглотителя, в процессе излучения они теряли часть своей энергии, вследствие чего их частота уменьшалась. Почему?

Воспользуемся некоторой аналогией. Когда снаряд вылетает из пушки, последняя испытывает отдачу, т. е. ей передается определенная часть энергии, полученная снарядом при выстреле. Аналогично этому вылетающий из ядра атома гамма-квант сообщает испустившему его ядру импульс отдачи, теряя при этом некоторую часть полученной кинетической энергии, в результате чего его частота уменьшается, и ядро атома приемника (вследствие нарушения условий резонанса) оказывается уже не в состоянии поглотить такой гамма-квант.

Дело можно поправить, если заставить излучатель и приемник излучения двигаться навстречу друг другу с такой скоростью, при которой частота гамма-кванта (а следовательно, и его энергия) повысилась бы до резонансной частоты. Это так называемый эффект Допплера, наблюдаемый, например, при прохождении поезда. Когда поезд приближается к наблюдателю, частота колебаний (высота звука) его гудка заметно увеличивается, а при удалении поезда, наоборот, звучание гудка понижается (частота уменьшается). В случае с гамма-квантами частота меняется на долю, равную отношению скорости движения кванта к скорости света (300 000 км/сек). Поэтому требуется очень большая скорость движения, чтобы можно было получить нужное повышение частоты кванта.

Потеря энергии снарядом может быть, однако, значительно уменьшена, если пушка при выстреле жестко закреплена на основании, имеющем большую массу.

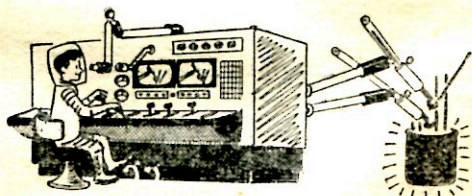
Открытие, названное эффектом Мёссбауэра, и заключается в том, что энергию отдачи, которую получает ядро атома излучателя при испускании гамма-кванта, можно резко уменьшить, если ядро связать с какой-либо большой массой, например «встроить» его в кристалл. Тогда энергия отдачи распределится между большим количеством атомов кристалла и не вызовет

существенного их перемещения, вследствие чего частота испускаемого гамма-кванта будет соответствовать резонансной частоте ядра атома поглотителя. Аналогичным образом можно закрепить и само ядро поглотителя. Тогда излученный им обратно гамма-квант может быть поглощен каким-то другим ядром или первоначальным излучателем.

Самое же важное в открытии резонансного поглощения без отдачи состоит в том, что оно позволяет обнаруживать изменение частоты за счет указанного выше встречного движения (эффекта Допплера) уже при скорости в тысячные доли миллиметра в секунду! Это открывает возможности для совершенно неожиданных применений и позволяет наблюдать явления, которые ранее казались вне пределов, доступных для экспериментов. Например, еще в 1911 г. Эйнштейн, исходя из своей теории относительности, предсказал, что частота излучаемого света меняется на ничтожно малую величину под действием силы тяжести. Однако для проверки этого утверждения требовались астрономические расстояния. Эффект Мёссбауэра позволил ученым осуществить этот опыт, подняв излучатель над поверхностью Земли всего на 21 метр.

Манипулятор — сложное устройство, позволяющее осуществлять на расстоянии любые манипуляции с радиоактивными веществами, окруженными надежным слоем биологической защиты. Манипуляторы бывают простые (ручные), механические с гидравлическим или электрическим приводом, автоматизированные. Они устроены таким образом, что захваты, соприкасающиеся непосредственно с «горячими», радиоактивными веществами, в точности повторяют движения рук и пальцев оператора — управляющего манипулятором человека. Они позволяют держать предметы (пробирки, инструменты, даже крупинки), перемещать их с места на место, переливать жидкости, взвешивать, смешивать различные вещества и выполнять другие операции (см. рисунок).

Масс-спектрограф — прибор для определения массы заряженных частиц, в котором используют свойство частиц изменять траекторию (линию) своего движения под действием сильного магнитного поля: чем больше масса



частицы, тем меньше она будет отклоняться. Если в конце пути таких ускоренных и пролетающих через магнитное поле частиц поставить мишень, то они будут попадать не в одну точку, а распределяться полоской в соответствии со своими массами — к одному концу самые легкие частицы, к другому — самые тяжелые. Прибор применяют для разделения изотопов одних и тех же химических элементов (см. «Разделение изотопов») и для других исследований.

Масса движения. Согласно теории относительности, масса движущегося тела больше массы этого же тела, находящегося в покое (массы покоя), и непрерывно увеличивается со скоростью. Для обычных тел, движущихся даже с космической скоростью, такой прирост массы столь незначителен, что не может быть измерен никакими существующими средствами. Однако для атомных частиц, движущихся со скоростями, сопоставимыми со скоростью света, этот прирост становится уже заметным и измеримым. Например, масса электрона, обладающего энергией 1000 эв и движущегося со скоростью 18 720 км/сек, увеличивается в 1,002 раза. При энергии, равной 1 Мэв, и скорости 282 100 км/сек масса увеличивается в 2,957 раза, при энергии 10 Мэв и скорости, близкой к 299 400 км/сек, масса возрастает уже в 20,58 раза!

Масса покоя (собственная масса) — масса атомной частицы, скорость которой равна или принимается равной нулю. В повседневной жизни ее часто смешивают с весом.

Массовое число — число нуклонов — протонов и нейтронов, из которых состоит ядро атома. В отличие от атомного веса, который почти никогда не бывает целочисленным, массовое число всегда бывает целой величиной, близкой к атомному весу данного химического элемента.

Мощность ядерного реактора. Интенсивность, с которой выделяется энергия в ядерном реакторе, зависит от количества делений ядер атомов урана или плутония в секунду.

Теоретически мощность реактора может быть любой, однако практически она самым жестким образом ограничивается сравнительно невысокой температурой, какую могут выдерживать конструкционные материалы, из которых строится реактор, способностью теплоносителя поглощать, переносить и отдавать тепло, допустимой скоростью его перекачки, свойствами замедлителя нейтронов и другими факторами.

Количество тепла, выделяющегося в ядерном реакторе за одну секунду при номинальном режиме его работы, безотносительно к тому, как оно используется в дальнейшем, и называют тепловой мощностью реактора.

В тех случаях, когда ядерный реактор используют в энергетических установках, например на атомных электростанциях или в качестве силовой установки на надводных и подводных судах, тепловая мощность реактора обычно в три-четыре раза больше электрической мощности всей установки (при к.п.д. от 20 до 35%). Так, при электрической мощности первой в мире советской атомной электрической станции в Обнинске, равной 5000 квт, тепловая мощность ее атомного реактора равнялась 30 000 квт.

Мю-мезон — неустойчивая элементарная частица с массой, равной 206,86 массы электрона. Существует два вида мю-мезонов: с положительным и отрицательным электрическими зарядами, равными по абсолютной величине заряду электрона. Время жизни мю-мезона — около $2,2 \cdot 10^{-6}$ сек, после чего он распадается на электрон или позитрон и два нейтрино (или антинейтрино). Образуются мю-мезоны в основном в результате распада

более тяжелых *пи-мезонов*. В отличие от других мезонов *мио-мезоны* слабо взаимодействуют с ядерным веществом и несутывают в основном лишь рассеяние при столкновении с одинаково заряженными частицами.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Стр.

Нейтрон	83
Нейтрино	90

Н

Нейтрон. В 1930 г. немецкие ученые В. Боте и Г. Беккер встали втупик перед таким явлением. Бомбардируя пластинку из металлического бериллия альфа-частицами, они обнаружили исходящее из мишени очень слабое, но удивительно проникающее излучение, которое не могли сколько-нибудь заметно ослабить даже свинцовые экраны толщиной в десятки сантиметров, обычно задерживающие самые мощные гамма-лучи.

Чета талантливых французских физиков Фредерик Жолио и Ирен Кюри — дочь Марии Склодовской и Пьера Кюри — подметили еще более любопытный факт. Если на пути этого странного излучения они ставили пластину парафина — вещества, богатого водородом, — то из парафина начинали вылетать с огромной скоростью, а следовательно, и с большой энергией протоны.

Альфа-частицы целиком застревали еще в бериллиевой пластинке и попадать в парафин никак не могли. Выбивать же из парафина протоны с энергией, равной примерно 50 Мэв, было бы не под силу и гамма-лучам. В таком случае что за сверхмощная «артиллерия» вдруг объявилась в бериллии и какими «снарядами» она вела огонь по парафину?

Ученик Резерфорда, английский физик Дж. Чедвик, долго занимавшийся таинственным излучением, в конце концов пришел к единственно возможному и правильному выводу: «Никакие это не лучи, а просто вылетающие из парафина протоны приводятся в движение частицами, равными по массе протону, но не имеющими никакого электрического заряда — ни положительного, ни отрицательного». Эти частицы получили название «нейтроны».

Благодаря отсутствию электрического заряда любое вещество становится для нейтрона как бы «прозрачным». Он спокойно преодолевает все защитные линии атома: и внешнюю

электронную оболочку, с большой силой отталкивающую любую отрицательно заряженную частицу, и суммарный положительный заряд ядра атома, отбрасывающий в стороны даже движущуюся с огромной скоростью тяжелую альфа-частицу.

Открытие нейтрона решило загадку непонятного и «нелогичного» утяжеления массы ядер атомов при увеличении их заряда только на единицу и позволило советскому ученому Д. Д. Иваненко и немецкому ученому В. Гейзенбергу предложить в 1932 г. новую модель строения ядра атома, в которой все оказалось удивительно «простым и ясным».

По их мысли, ядра всех атомов состоят из протонов и нейтронов. Число протонов равно атомному номеру элемента в периодической системе Менделеева, а масс сложенных вместе протонов и нейтронов — его атомному весу, или массовому числу.

Например, ядро атома гелия (знаменитая альфа-частица) состоит из двух протонов, придающих ей два положительных электрических заряда (и соответственно два электрона в оболочке), и двух нейтронов. Общее число протонов и нейтронов равно четырем, что в точности и равняется его атомному весу, долгое время вызывавшему недоумение ученых.

Аналогично ядро атома лития содержит три протона (атомный номер 3) и три нейтрона, что в сумме и дает атомный вес элемента, равный шести.

Открытие нейтрона довольно просто объясняет и другую загадку — существование изотопов.

В качестве примера можно взять наипростейший химический элемент в природе — водород, ядро которого состоит из одиночного положительно заряженного протона. Его иногда называют протием. Затем следует тяжелый изотоп водорода, имеющий в ядре один протон и один нейтрон и атомный вес, равный двум. Этот изотоп водорода получил название «дейтерий». Наконец, существует очень редкий, почти не встречающийся в природе, сверхтяжелый и уже радиоактивный изотоп водорода, в ядре которого на один протон приходится два нейтрона. Его называли тритием.

Новая модель строения ядра атома, в нашем описании, пожалуй, даже слишком упрощенная, почти полностью отвечает многочисленным фактам, накопленным физикой до настоящего времени, объясняет прежние сложные и запутанные противоречия, а главное, открывает множество новых путей и

возможностей для вторжения в «святая святых» атома — его ядро и, как это повелось в науке, коварно подводит к новым, еще более глубоким тайнам, противоречиям и настоящим чудесам!

Перечислить эти особенности и чудеса означало бы просто от начала до конца изложить всю современную ядерную физику. Поэтому здесь мы ограничимся лишь тем, что более или менее прямо и непосредственно связано с нейтроном.

Например, почему ядро атома, в которое наряду с нейтронами входят и положительно заряженные протоны, не разваливается под действием поистине титанических сил отталкивания одноименных зарядов (учитывая малость расстояний между ними)? Лишь значительно позже было установлено, что строго в пределах ядра действуют особые, ни на что иное не похожие так называемые внутриядерные силы, притягивающие эти частицы друг к другу независимо от того, заряжены они или нейтральны, и что эти силы, действуя на чрезвычайно малых расстояниях, значительно превосходят силы отталкивания всех взятых вместе протонов. Не будь этих сил, ядерные частицы давно бы разлетелись в стороны, а скорее никогда бы и не собирались вместе.

Но в природе нет и не может существовать никаких тел, даже масштаба ядерных частиц, которые не находились бы в непрерывном движении, зависящем от энергии частиц, в свою очередь зависящей от температуры вещества, сложенного из этих частиц. Если откуда-то извне в эту систему частиц поступает дополнительное количество энергии, то частицы начинают двигаться значительно быстрее. И, естественно, может наступить момент, когда это движение станет столь бурным, что его энергии будет достаточно, чтобы какая-то одна, а то и несколько частиц получили возможность, преодолев внутриядерные силы, выскочить за пределы сферы их действия. И тогда уже под действием сил отталкивания одноименных зарядов эта частица или несколько частиц вылетают из ядра атома.

Если же избыточной энергии поступит значительно больше, все частицы ядра атома, растолкавшись еще энергичнее, окажутся в состоянии перепрыгнуть таинственный рубеж действия внутриядерных сил. Тогда ядро разделится само по себе.

Сколько в таком случае нужно этой избыточной энергии, или энергии возбуждения, как ее называют физики?

Тем меньше, чем тяжелее ядро атома. Но зато чем тяжелее ядро атома, тем больше энергии выделяется при его «развале»:

Массовое число ядра атома	140	200	235
Энергия, требуемая для его возбуждения, <i>Мэв</i>	62	40	5
Энергия, выделяющаяся при делении, <i>Мэв</i>	48	135	200

Самые тяжелые ядра оказываются и самыми неустойчивыми. И стоит чуть-чуть «подтолкнуть» их, т. е. придать им небольшое количество избыточной энергии, в нашем примере 5 *Мэв*, как насыщенное, словно губка, своей собственной энергией ядро дальше уже разделится само!

Сделать это можно двумя путями. Самый трудный — это попытаться силой «загнать» в него какую-либо тяжелую заряженную частицу, способную преодолеть отчаянное сопротивление суммарного положительного электрического заряда ядра атома.

Но для этого исходной энергии 5 *Мэв* протону или альфа-частице заведомо мало. Большую часть ее частицы растратят на преодоление «броневой защиты» — положительного заряда ядра атома и, обессиленные, даже не смогут к нему прикоснуться, не то чтобы его разделить.

Кроме того, тяжелых частиц даже с такой энергией естественные радиоактивные вещества не испускают. Следовательно, разгонять их и до значительно более высоких энергий и скоростей нужно искусственным путем на специальных установках — *ускорителях частиц*.

Совсем другими, поистине удивительными возможностями обладает нейтрон. Так как электрического заряда он не несет, то никакой энергии на преодоление суммарного отталкивающего положительного заряда ядра атома ему не нужно. Пользуясь своей нейтральностью, он свободно проникает к ядру атома, доходит до зоны действия притяжения внутриядерных сил и втягивается в ядро.

Втянув нейтрон, ядро начинает внутреннюю перестройку. При этом оно оказывается обладателем излишка энер-

гии, равной 7 Мэв в случае урана-235, от которой оно, естественно, придя в возбужденное состояние, тут же должно избавиться. Следовательно, одно лишь простое присоединение нейтрона к ядру тяжелого атома урана вносит в него дополнительную энергию, равную 7 Мэв.

Откуда берется все-таки этот излишек энергии? Естественно, никаких чудес здесь не происходит. В процессе внутренней перестройки старого ядра атома в новое сумма масс всех его нуклонов оказывается несколько меньше суммы масс нуклонов, взятых в отдельности. За счет этой разницы в массах и появляется эквивалентное ей количество энергии (см. «Дефект массы»), сперва возбуждающее ядро, а затем и приводящее его к делению.

Получается, что для этого нейтрон вообще не должен обладать никакой начальной энергией. Нужно лишь помочь ему попасть в ядро нужного атома, а уж там он, мобилизовав скрытые резервы энергии ядра, сможет высвободить (правда, потеряв чуть-чуть в массе) энергию, способную взорвать ядро.

Но нейтроны, не обладающие сколь-нибудь существенной начальной энергией, могут делить ядра не всех элементов, а только те, у которых энергия возбуждения, необходимая для их деления, меньше 7 Мэв, т. е. именно та, которая выделяется при перестройке ядра, вызванного добавлением к нему лишнего нейтрона. Таких атомов немного: это уран-233, уран-235, плутоний-239.

Здесь позволительно спросить: откуда у нейтрона столь необычные, резко отличные от других ядерных частиц свойства и способности, хотя и те обладают своими, достаточно удивительными свойствами?

Истоки всего необычного кроются в открытом в начале текущего века дуализме — двойственности свойств света, ведущего себя и как частицы и как электромагнитные волны. Еще большее волнение среди ученых вызвало последующее открытие таких же свойств и у электрона. Эти открытия прекрасно объяснялись теорией, выдвинутой в 1900 г. немецким физиком Максом Планком, согласно которой процесс излучения телом тепла или света происходит не непрерывно, а носит дискретный характер, т. е. отдельными, строго определенными порциями — *квантами*, и что световая волна, обладая вполне конкретной протяженностью, в некоторых случаях проявляет свойства, характерные для частиц. В 1923 г. французский фи-

зик Луи де Бройль установил, что специфические волновые свойства присущи любой движущейся частице. Согласно разработанной им теории длина волны любой частицы прямо пропорциональна некоторой очень малой величине, называемой постоянной Планка, и обратно пропорциональна произведению массы частицы на ее скорость. Это соотношение выглядит довольно просто: $\lambda = \frac{h}{mv}$. Из этого соотношения получается,

что чем больше масса или скорость частицы или одновременно и то и другое, тем короче длина присущей ей волны, и наоборот.

Законы физики не терпят исключений. И объект макромира, например снаряд или земной шар, наряду со свойствами «частиц» должен обладать также и волновыми свойствами. Но благодаря их большой массе соответствующая им длина волны настолько мала, что этими волновыми свойствами можно совершенно пренебречь. Нейтронам с высокой скоростью соответствует настолько малая длина волны, что они ведут себя фактически как частицы. Некоторые стороны их особенно «странного» поведения можно объяснить только явно волновыми свойствами. Но так как масса нейтрона все же ничтожно мала по сравнению с любым, даже микроскопически малым телом, длина его волны становится вполне ощутимой величиной в типичных явлениях, господствующих в микромире.

Чтобы в поведении нейтрона проявились в достаточной степени волновые свойства, его скорость должна быть как можно меньше. Ее можно настолько замедлить, что нейтрон полностью потеряет свойства частицы и будет вести себя как настоящая волна.

В свете этих особенностей возникают явные осложнения в установлении истинных размеров нейтрона, ибо они, как это ни покажется странным, зависят от скорости движения этой частицы. Например, диаметр обычного атома равен примерно $(2-4) \cdot 10^{-8}$ см. Диаметр ядра еще меньше — около 10^{-13} см. Наконец, поперечник протона едва достигает $2 \cdot 10^{-14}$ см. Для того чтобы длина волны нейтрона приблизительно соответствовала диаметру атома, т. е. 10^{-8} см, его энергия (т. е. скорость движения) должна составлять всего лишь около 0,1 эв. Нейтрон с такой малой энергией более правильно представлять как волну длиной 10^{-8} см, а не как частицу таких же размеров.

Но дальше начинаются уже парадоксы. Нейтрон с длиной волны 10^{-8} см оказывается в десятки тысяч раз больше ядра, которое в свою очередь содержит в себе нейтроны, и не один, а порою много!

Находиться внутри ядра нейтрон может только в том случае, если он движется с большой скоростью и, следовательно, имеет малую длину волны. А большая скорость, как мы знаем, означает большую энергию. Входящие в состав ядра нейтроны поэтому имеют энергию около 50 Мэв, которой соответствует очень малая длина волны — порядка 10^{-13} см. Это обстоятельство позволило объяснить тайну бета-распада радиоактивных веществ, долго мучившую ученых и путавшую все их карты.

Влетев в чужое ему ядро атома и создав там несусветный переполох, нейтрон, не выдержав возникших там сложнейших взаимодействий, эквивалентных чудовищно высоким температурам, распадается на протон и электрон.

Это открытие и позволило ученым считать протон и нейтрон одной ядерной частицей. Отсюда и их название — нуклоны. Существовать же они могут только в каком-либо одном состоянии: протонном или нейтронном.

При бета-распаде один из нейтронов переходит в протон. Вот тогда-то и появляется электрон. Его заряд должен компенсировать положительный заряд вновь народившегося протона. Однако в силу законов, управляющих ходом радиоактивного распада неустойчивых ядер, у этого электрона не находится своего места на орбите, и он вынужден покинуть ядро. Это и будет бета-частица. Общий положительный заряд остающегося по-прежнему неустойчивым ядра становится на единицу больше.

В свою очередь при некоторых условиях протон может превращаться в нейтрон. Но тогда куда-то должен исчезнуть его положительный заряд. Этот заряд и уносится частицей, являющейся точной копией электрона, только имеющей противоположный, положительный заряд. Такая частица была открыта в 1930 г. американским физиком Андерсоном и названа позитроном. Оба эти превращения сопровождаются испусканием еще одной, упоминавшейся ранее нейтральной частицы — нейтрино.

Испускаемые бериллиевым источником нейтроны летят с огромной скоростью. Следовательно, их эффективный размер или, как говорят, «сечение» очень мало. Сталкиваясь с под-

вернувшись на пути ядрами атомов легких элементов, они отскакивают от них и меняют направление полета примерно так же, как отскакивают друг от друга бильярдные шары. Каждое такое столкновение стоит нейтрону потери части энергии, поэтому скорость его движения замедляется, а «размер», или «сечение», увеличивается.

Этим и воспользовались ученые, чтобы путем многократных столкновений нейтрона с веществами, содержащими атомы, близкие по массе к нейтрону (водород, гелий, углерод), замедлить его движение. Не имея возможности непосредственно наблюдать сам нейтрон, легко можно обнаружить и измерить скорость и энергию всех «задетых» и отскакивающих от него атомов, а тем самым скорость, энергию и размеры самого нейтрона.

Нейтрон как частица оказался чуть-чуть тяжелее протона. Вне ядра атома он радиоактивен и, пробыв на свободе около 11,7 мин, начинает распадаться; превращаясь в протон, испускает электрон и нейтрино. Величина энергии, выделяющейся при распаде нейтрона, равна примерно 1 Мэв. Этим и объясняется, почему нейтрон чуть-чуть тяжелее протона.

Наблюдая за поведением нейтронов, ученые вскоре обнаружили еще одну их удивительную особенность: легко проникая сквозь толстую стальную броню, они не в состоянии преодолеть даже тоненькой пластинки кадмия, которую легко пронизывали не только гамма-лучи, но даже поток бета-частиц (электронов).

Вскоре пришла и разгадка новой «странности».

Ядра атомов некоторых элементов (кадмий, бор, гафний и др.) вместо того, чтобы отталкивать нейтрон, «захватывают», втягивают его в себя. Чем медленнее движется нейтрон, тем успешнее осуществляется такой захват.

Нейтрино. История физики слабых взаимодействий связана прежде всего с исследованием свойств, пожалуй, самой загадочной из элементарных частиц — нейтрино. Нейтрино — это трудно обнаруживаемые и еще более трудно уловимые нейтральные частицы.

Откуда появилась мысль о существовании нейтрино?

При экспериментальном исследовании процесса бета-распада — самопроизвольного испускания электронов ядрами ато-

мов — оказалось, что измеренные энергии вылетающих электронов в этом процессе имеют самую различную величину. В большинстве случаев электронам явно не хватало энергии. Создавалось впечатление, что она куда-то исчезает, как будто закон сохранения энергии не был верным. Трудности оказались настолько серьезными, что многие физики предлагали даже отказаться от закона сохранения энергии. Это несохранение энергии, однако, имело довольно странный характер. Действительно, если в процессе бета-распада энергия не сохраняется, можно было бы ожидать, что иногда энергии электронов не хватит, а иногда она должна быть излишней, но этого «выигрыша» энергии не бывает.

Такое противоречие заставило известного швейцарского физика Паули в 1931 г. предположить, что в природе должна существовать еще одна нейтральная частица с массой, много меньшей, чем у нейтрона. Эту частицу знаменитый итальянский физик Э. Ферми сразу же назвал нейтрино (по-итальянски — нейтрончик).

Доводы в пользу существования этой частицы были таковы. Кажущееся несохранение энергии происходит потому, что процесс бета-распада — это не только испускание электронов. В распаде еще участвует не наблюдаемая на опыте нейтральная (поэтому практически и не обнаруживаемая) частица, уносящая исчезнувшую долю энергии. И хотя в каждом процессе выделяется точно определенная суммарная энергия всех частиц, она распределяется между продуктами распада так, что в разных случаях электрон получает разные ее порции.

Через 11 лет, в 1942 г., предсказанная Паули частица была обнаружена. Она оказалась в полном соответствии с предсказанием: электрически нейтральна, обладает чрезвычайно малой массой.

Крайне малая масса согласно теории относительности приводит к тому, что нейтрино не может находиться в состоянии покоя: оно всегда движется со скоростью света. Как элементарная частица нейтрино в некоторых отношениях сходно с фотоном.

Как известно, при превращении частиц действует не только закон сохранения энергии, но и закон сохранения импульса. В многочисленных опытах было установлено, что суммарный импульс при бета-распаде не сохраняется, если не допустить

существования нейтрино. «Неуловимая» частица уносит с собой не только «исчезающую» энергию, но и «исчезающий» импульс!

Ненаблюдаемость нейтрино была временной из-за трудностей его улавливания и регистрации. Поймать нейтрино и зарегистрировать ядерные превращения, вызванные свободным нейтрино, удалось лишь совсем недавно.

В последние годы родилась новая область исследования элементарных частиц, очень важная и интересная, к которой приковано теперь внимание ученых всего мира, — физика нейтрино высоких энергий (основоположник теории — академик, лауреат Ленинской премии Б. М. Понтекорво). При этом исследуются свойства нейтрино «мезонной» природы, рождающиеся в процессах распада мезонов, мощные пучки которых стало возможным сейчас получать на сверхгигантских ускорителях.

Но являются ли «неуловимые» частицы, испускаемые в совершенно разных процессах, тождественными частицами? Оказалось, что «электронные» нейтрино (испускаемые в процессах бета-распада) отличаются от нейтрино, испускаемых в процессе распада мезонов! Каждое из них соответственно взаимодействует в паре только с мезоном или только с электроном.

Идеи об универсальности слабых взаимодействий получили еще одно подтверждение, когда физики открыли ряд новых, так называемых «странных частиц». Оказалось, что для них также характерны «слабые взаимодействия».

По аналогии со всеми другими частицами в свое время было предсказано и существование антагонистов нейтрино — антинейтрино 1 и 2 (электронное и мезонное). Совсем недавно их существование было подтверждено и экспериментально.

Нуклон. Чтобы избежать (там, где нет особой необходимости) слишком частого повторения названия частиц, из которых состоят ядра всех атомов, — положительно заряженных протонов и не имеющих никакого электрического заряда нейтронов, им присвоено общее название нуклоны, т. е. ядерные частицы. Массы этих частиц, однако, отличаются друг от друга на небольшую величину: масса протона составляет — 1836,1 массы электрона, масса нейтрона — 1838,6. Есть основания считать, что и протон, и нейтрон являются одними и теми же частицами, только находящимися в различном «зарядовом» состоянии, и при определенных условиях могут переходить одна в другую.