



К.А.ГЛАДКОВ

АТОМ ОТ А ДО Я



АТОМ

от А
до Я



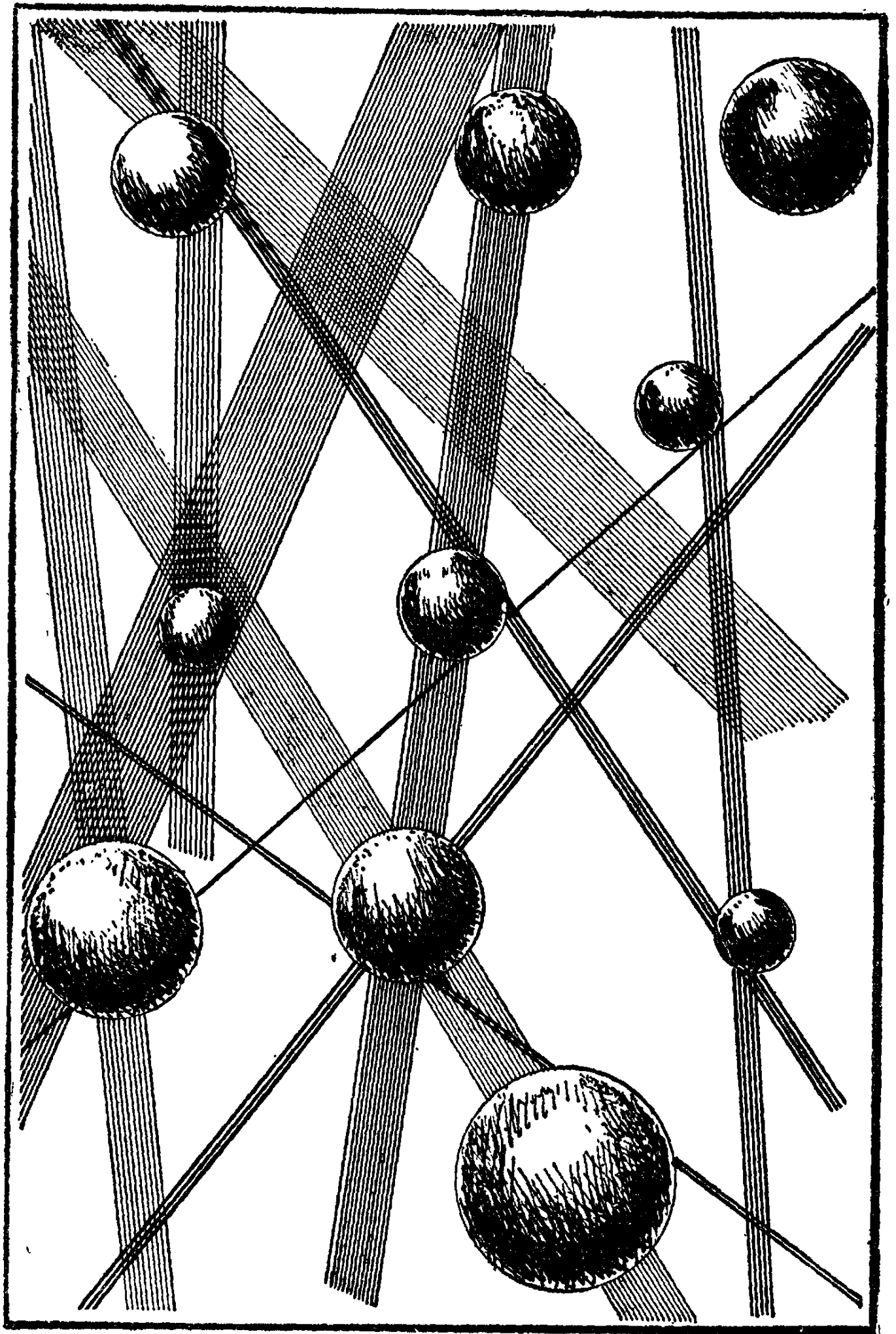
К. А. ГЛАДКОВ

Заслуженный работник культуры РСФСР Кирилл Александрович ГЛАДКОВ (1903—1973 гг.) известен советскому и зарубежному читателю как замечательный популяризатор науки и техники. Им написано более десяти книг.

Книги «Телевидение» и «Энергия атома» отмечены Первыми премиями на Всесоюзных конкурсах научно-популярных книг. В 1965 г. на Международном конкурсе в Брюсселе книга «Энергия атома» была присуждена премия «Красное и зеленое» как лучшей научно-популярной книге года.

«Атом от А до Я» — это маленькая энциклопедия о микромире. Ценность этой книги в том, что читатель может найти в ней популярный ответ на вопрос об атоме, о его строении, об энергии атома, о том, как ее можно высвободить и поставить на службу человеку. Первое издание книги (1966 г.) получило высокую оценку и переведено на многие языки мира.

АТОМ ОТ **А** ДО **Я**



К.А.ГЛАДКОВ

АТОМ ОТ

А до **Я**

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ



АТОМИЗДАТ МОСКВА
1974

Гладков К. А.

Г58 Атом от А до Я. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1974 г., 272 с.

Книга представляет собой небольшой карманный словарь, объясняющий самые ходовые термины, встречающиеся при чтении газет, журналов и неспециальной литературы. Это небольшая энциклопедия, дающая краткое, но полное представление о соответствующих разделах физики. Термины подобраны так, что они представляют собой законченное изложение того или иного понятия.

Первое издание книги (1966 г.) было с большим интересом встречено читателями и высоко оценено. За истекшее с момента выхода книги время в бурно развивающейся атомной науке и технике появилось много новых понятий, данных, информации; некоторые, недостаточно полно освещенные в первом издании понятия и термины получили первостепенное значение: антивещество, активационный анализ, вакуум, кварк, лазер, псевдооживление, Токамак, нейтронография и пр. Во втором издании все это учтено, материал значительно дополнен и обновлен.

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 и заново возникающих 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 прочесть изрядное количество брошюр, статей и заметок на эту тему, у которого уже сложилось представление об основах основ атомной физики. 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 прочесть 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 знаниями 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 (иногда не в алфавитном порядке). Слова же, являющиеся последующим 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 описаний 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 расположить под одной буквой А: атомная энергия, атомный транспорт, атомная техника и т. п. 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. п.

Поскольку же все, о чем рассказывается в этой книге, должно лежать между А и Я, волей-неволей весь материал пришлось распределить 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 читателей «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 книги.

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, принятая XXII съездом КПСС, содержит план строительства в нашей стране коммунистического общества.

В результате усилий советского народа, титанических по размаху, фантастических по конечным результатам и реалистических по содержанию, в стране создается 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.

Конкретное воплощение эта программа нашла в решениях XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. И опять, как в 1920 г., главной задачей в развитии экономики страны является электрификация. «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 в экономике для будущего нашей родины, для будущего человечества. И не просто электрификация, а опережающее ее развитие по сравнению с развитием всех других отраслей тяжелой промыш-

ленности — основы индустриализации страны. 1030—1070 млрд. *квт·ч* электроэнергии в 1975 г. Только за девятую пятилетку будут введены в строй электрические станции общей мощностью 65—67 млн. *квт*. Таким образом, общая установленная мощность электрических станций в 1975 году превысит 230 млн. *квт*. Вот новый, астрономический масштаб мер в делах строителей коммунизма!

Большому кораблю — большое плавание. В 1975 году будет выплавлено 142—150 млн. *т* стали, добыто 480—500 млн. *т* нефти, 300—320 млрд. *м³* природного газа, 685—695 млн. *т* угля.

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 предметы народного потребления.

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

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

Уже в 1972 г. на душу населения в СССР приходилось более 3000 *квт·ч* энергии.

Это, безусловно, очень много, особенно если вспомнить то ничтожное количество — 14 *квт·ч*, которое приходилось на душу населения в России в 1913 г., или 3 *квт·ч* в 1920 г., когда утверждался знаменитый Ленинский план электрификации России — план ГОЭЛРО.

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 пройденным этапом.

На пороге новой, коммунистической фазы советскому человеку предстоит начать менять лик планеты, перестраивать ее по-своему. Гигантские излишки воды рек Сибири направить в пустыни Средней Азии. Восстановить уровень воды в Каспийском море. Проложить новые реки, создать новые моря. Превратить в цветущие сады пустыни, вернув им весь их былой растительный наряд. Обогреть тундру и уничтожить вечную мерзлоту. Проникнуть в глубь Земли, в ее кладовую ископаемых богатств. Превратить моря и океаны в неиссякаемый источник пищи и промышленного сырья, создать на их просторах искусственные острова.

Любое из этих великих дел для своего осуществления потребует в первую очередь 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, когда сильно сократятся запасы ископаемого топ-

лива: 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 введены в строй гидроэлектрические станции поистине астрономической мощности: Волжская им. В. И. Ленина на 2,1 млн. *квт*, Волжская имени XII съезда КПСС на 2,3 млн. *квт*, Братская мощностью 3,6 млн. *квт*, Красноярский гигант мощностью 6 млн. *квт*. Одна такая станция дает энергии в несколько раз больше, чем было предусмотрено всем планом ГОЭЛРО! Ведется строительство еще более мощных гидроэлектрических станций на Ангаре, Енисее, Лене и других реках СССР. На всех же реках, протекающих по территории СССР, можно было бы построить электростанции общей мощностью примерно 250 млн. *квт* — в три раза больше, чем давали все электрические станции страны в 1960 г. Это, конечно, очень много, но не настолько, чтобы обеспечить потребности людей коммунистического завтра.

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. Сейчас во всем мире добывается уже более 1500 млн. *т* нефти ежегодно.

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

Резкое возрастание добычи угля, а особенно нефти и газа, в нашей стране 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 производственной 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 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 70% 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: например, можно было бы собрать электрическую энергию, вырабатываемую целой страной, в энергетический кулак огромной мощности — десятки миллионов киловатт. Но погрузить ее на борт ракеты и использовать для космического полета

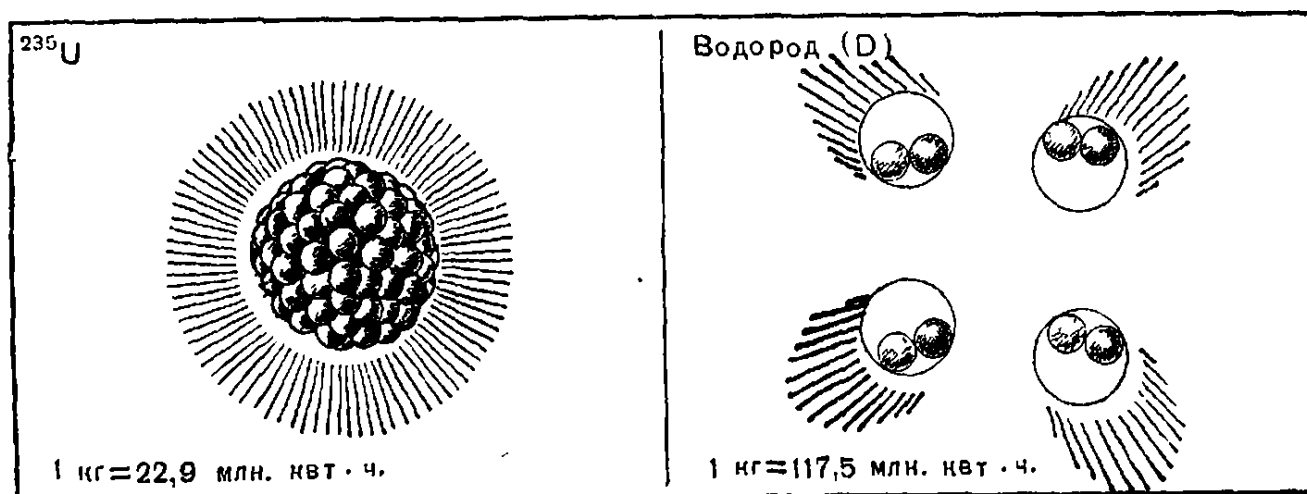
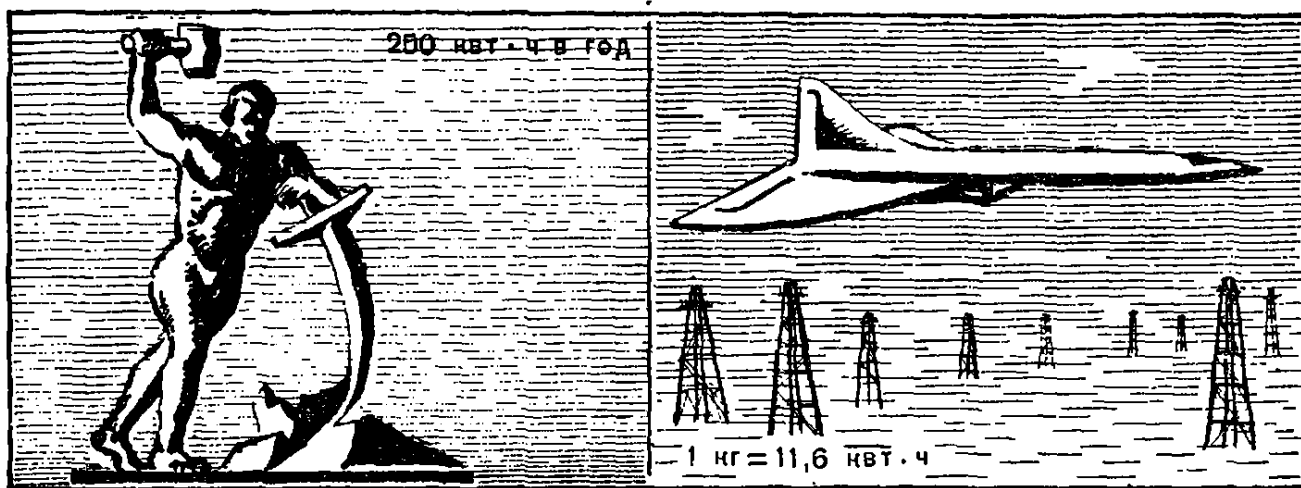
невозможно. Ее не в чем хранить, ничего ею нельзя зарядить, ее невозможно сгустить, сжать. А обычные установки и машины для преобразования энергии топлива в электрический ток чрезвычайно громоздки, тяжелы и имеют низкий коэффициент полезного действия.

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. Сжигания 30 г урана-235 оказалось вполне достаточно, чтобы в течение суток питать энергией электрическую станцию мощностью в 5 тыс. *квт*, обычно сжигающую за это время около 100 *т* 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 на пути 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 Жанжевен сказал, что оно по своему значению в истории цивилизации, может быть, будет поставлено наряду с открытием огня, прошло более 30 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 привычным количеством горючего вещества и заключенной в нем энергией.

Подумайте: при полном сгорании 1 *кг* нефти (или самого лучшего угля) выделяется 11,6 *квт·ч*



тепловой энергии. А при делении ядер атомов одного килограмма урана-235 выделяется энергия (тоже в виде тепла), равная 22,9 млн. *квт · ч* — почти в два миллиона раз больше! Причем эту энергию можно получить или всю сразу, например при взрыве колоссальной разрушительной силы, длящемся всего одну миллионную долю секунды (атомная бомба), или 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 млн. *квт·ч* 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 млрд. *квт·ч* энергии — годовую отдачу всех волжских гидроэлектрических гигантов! А ведь все вокруг нас состоит из триллионов триллионов триллионов атомов, «пружины» которых были заведены тогда, когда в исторической бесконечности космоса складывались все окружающие нас вещества, Солнечная система, Галактика, система галактик.

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 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 Антарктиды. Его хватит надолго, даже если счет вести на эпохи и эры.

Огромная концентрация регулируемой энергии в ничтожно малом объеме позволит отправлять ра-

кеты 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.

Наша Партия и правительство уделяют огромное внимание развитию атомной энергетики. В «Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы» предусматривается «значительное развитие атомной энергетики путем строительства крупных электростанций с установкой реакторов единичной мощностью 1 млн. киловатт и выше. Ввести в действие мощности на атомных электростанциях в размере 6—8 млн. киловатт... Обеспечить в новом пятилетии решение проблем термоядерного синтеза».

В программе, начатой в девятом пятилетии и рассчитанной на 10—12 лет, предусматривается ввод в действие атомных электростанций общей мощностью 30 млн. *квт.*

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

«АТОМНЫЙ» ЯЗЫК

АТОМ

АТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА — ЭЛЕКТРОН

АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА МОДЕЛИ

АТОМНЫЙ (ЯДЕРНЫЙ) РЕАКТОР

«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 два числа: вверху слева — массовое число (атомный вес) элемента, соответствующее суммарному числу всех нуклонов ядра атома (протонов и нейтронов), внизу слева — порядковый номер элемента в Периодической системе Д. И. 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 слева — массовое число 7. Вычитая из семи три, можно узнать число нейтронов в ядре атома. Для лития оно равно четырем.

Часто, чтобы не усложнять при повторениях название элемента или его изотопов, пишут полное название элемента по-русски, но только с числом, выражающим его массовое число. Например, полоний-210, радий-238 и т. п.

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_0 — нейтрон; единица вверху справа означает атомную массу нуклона, нуль слева внизу — отсутствие электрического заряда.

На каждой странице этой книги много раз встречаются такие слова и понятия, как скорость, ускорение, сила и

другие, а особенно часто — энергия. Поэтому сначала придется вспомнить кое-что из школьных учебников; это поможет правильно разобраться в некоторых особенностях терминов, после чего уже значительно легче будет перейти к более сложным и тонким понятиям, принятым в современной физике.

В настоящее время в СССР введена новая, более совершенная, удобная и краткая Международная система физических единиц, сокращенно обозначаемая СИ. В эту систему в качестве основных единиц вошли метр (*м*), килограмм (*кг*), секунда (*сек*) и другие вместо сантиметра, грамма, секунды прежней системы СГС. Поэтому в книге мы будем прибегать к терминам и единицам уже новой системы и лишь в отдельных случаях — к некоторым старым единицам, допускаемым системой СИ.

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 метр в секунду (1 м/сек).

УСКОРЕНИЕ означает быстроту изменения скорости. Единицей здесь служит изменение скорости за секунду, т. е. 1 м/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 **ньюто н** (*н*). Это такая сила, которая, действуя (давя) на тело массой в 1 кг , заставляет его перемещаться с ускорением 1 м/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 н на пути 1 м . Эту единицу называют **дж о у л ь** (*дж*).

МОЩНОСТЬ — количество работы, выполненной за единицу времени. Единицей измерения ее служит один джоуль в секунду (1 дж/сек), которая называется **в а т т** (*вт*). 1000 вт составляет один 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 **к и л о в а т т - ч а с** (*квт · ч*).

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. п.), или работа, которую нужно совершить над телом, чтобы переместить его в направлении, противоположном направлению действия его «замороженной» силы, зависящей только от положения тела.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ — энергия движения любого материального тела или частицы или работа, которую тело способно совершить благодаря своему движению. Определяется как половина произведения массы тела на квадрат скорости. Кинетическая энергия системы материальных сил равна сумме кинетических энергий каждого тела в отдельности.

Например, тело массой в 1 кг, движущееся со скоростью 1 *м/сек*, обладает кинетической энергией, равной 1 *дж*.

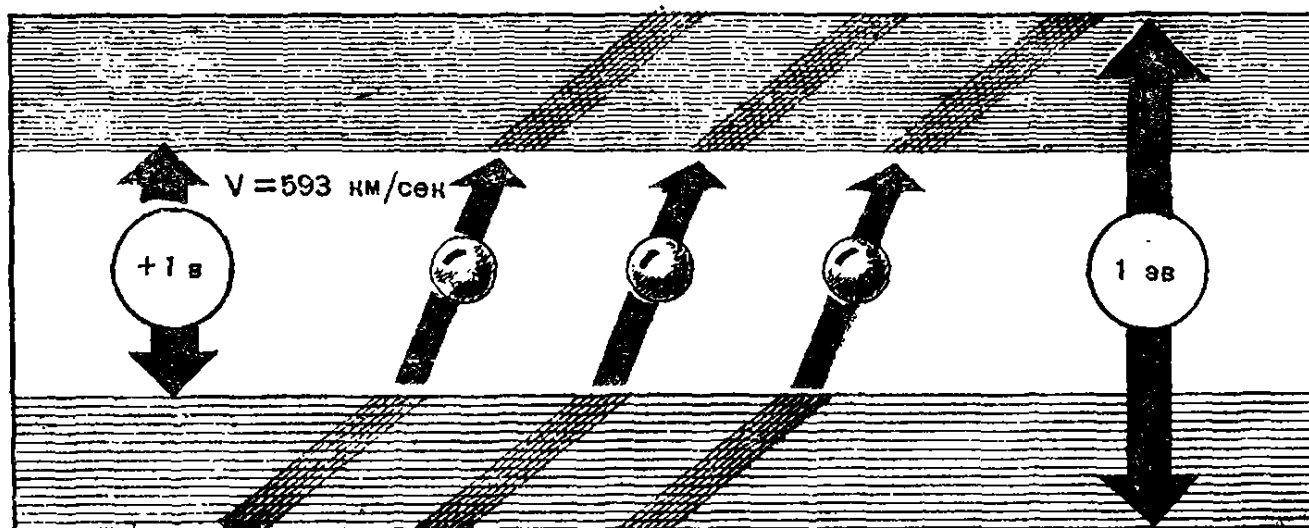
КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ, ИЛИ ИМПУЛЬС — одна из характеристик движущегося тела. Благодаря импульсу движущееся тело (или частица) в случае столкновения с покоящимся телом оказывает на него действие. Величина импульса определяется как произведение массы тела на его скорость.

КЕЛЬВИН (°К) — единица измерения температуры. 1°К равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды (см. *Кельвина шкала*).

Из старых единиц мы иногда будем пользоваться единицей силы — **д и н а** (*дин*): $[дин] = г \cdot см/сек^2$, отсюда 1 *н* = $= 10^5$ *дин*; а также единицей энергии и работы — **э р г**: $[эрг] = дин \cdot см$, отсюда 1 *дж* = 10^7 *эрг*.

ВОЛЬТ (в) — единица, принятая для обозначения разности потенциалов электрически заряженных тел или источников тока. Например, разность потенциалов одного элемента химической батарейки для карманного электрического фонарика равна 1,2—1,4 *в*.

ЭЛЕКТРОНВОЛЬТ. Заряд электрона — величина строго постоянная. Попадая в электрическое поле, создаваемое разностью потенциалов между заряженными телами в 1 *в*, электрон разгоняется до скорости 593 *км/сек*. А вместе со скоростью, естественно, растет и кинетическая энергия частицы. При такой скорости кинетическая энергия равна произведению его заряда ($1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона) на разность потенциалов, т. е. $1,6 \cdot 10^{-12}$ *эрг*, или $1,6 \cdot 10^{-19}$ *дж*. Это количество энергии и соответствует одному **э л е к т р о н в о л ь т у** (*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 $0,03 \text{ эв}$.

Энергия электрона, пребывающего в наивысшем энергетическом состоянии в пределах атома водорода (на самой удаленной от ядра орбите), составляет $13,53 \text{ эв}$. 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. 1 эв соответствует температуре $11\,606^\circ \text{ К}$.

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, которым он назвал такие неделимые частицы 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, неуничтожении 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 М. В. Ломоносов, сводится к движению атомов и является причиной всех без исключения изменений, происходящих в природе. Движение атомов в веществе определяет и степень нагрева его, или температуру. Он же тогда предска-Авал и существование самой низкой возможной температуры — абсолютного нуля, при которой тепловое движение «нечувствительных физических частичек» вещества прекращается вовсе.

Самую крошечную порцию любого вещества окружающего мира, которая все еще полностью сохраняет все свойства этого вещества, называли 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; другие даже при непосредственном контакте ни при каких условиях не взаимодействовали.

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 университета 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 (неделимыми), а целыми своеобразными мирами относительно огромной протяженности, построенными из более простых деталей — ядерных частиц и электронов. 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*).

В атоме различают две основные части: тяжелое, положительно заряженное ядро (см. *Ядро атома*), в котором сосредоточена почти вся масса атома, и легкую оболочку, состоящую из отрицательно заряженных частиц — 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 массой $9,109 \cdot 10^{-28}$ 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 $1/12$ части массы основного изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$.

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 ($1,6 \cdot 10^{-19}$ к). 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 атом может терять или захватывать электроны, в зависимости от чего он становится или положительным (в случае потери электронов), или отрицательным и о н о м (если на его оболочку попал лишний электрон от соседнего атома или из числа свободных электронов, присутствующих в окружающей 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. В электронной оболочке электроны располагаются слоями: 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 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 заряженного ядра и вращающихся вокруг него 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 на оболочках находится определенное количество электронов соответственно 8 и 26. **А**

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 стомиллион-

ными 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. Никаких других значений энергии электрон в данном атоме иметь не может.

Существование только строго определенных уровней энергии электрона и невозможность иметь для него в атоме промежуточные значения энергии — одно из основных свойств, вытекающих из к в а н т о в о й т е о р и и (см. *Кванты, Теория квантов*). 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, так как в атоме не может быть двух электронов, которые бы находились в одном и том же энергетическом состоянии.

В первую очередь электрон занимает ту орбиту, на которой он обладает наименьшей энергией и, следовательно, сильнее всего притягивается к ядру, т. е. самую близкую к ядру орбиту.

Таким образом, электроны не могут все скопиться на одной 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 таблицы Д. И. Менделеева заполняется и строится по тому же закону, что и предыдущий. Поэтому и химические свойства элементов, например, второго периода близки свойствам элементов 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 Д. И. Менделеева — к группе щелочных металлов.

Чтобы оторвать самый внешний электрон от атома элемента, например лития, нужно затратить энергию, равную 5,39 эв. Два других электрона этого атома, расположенных 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.

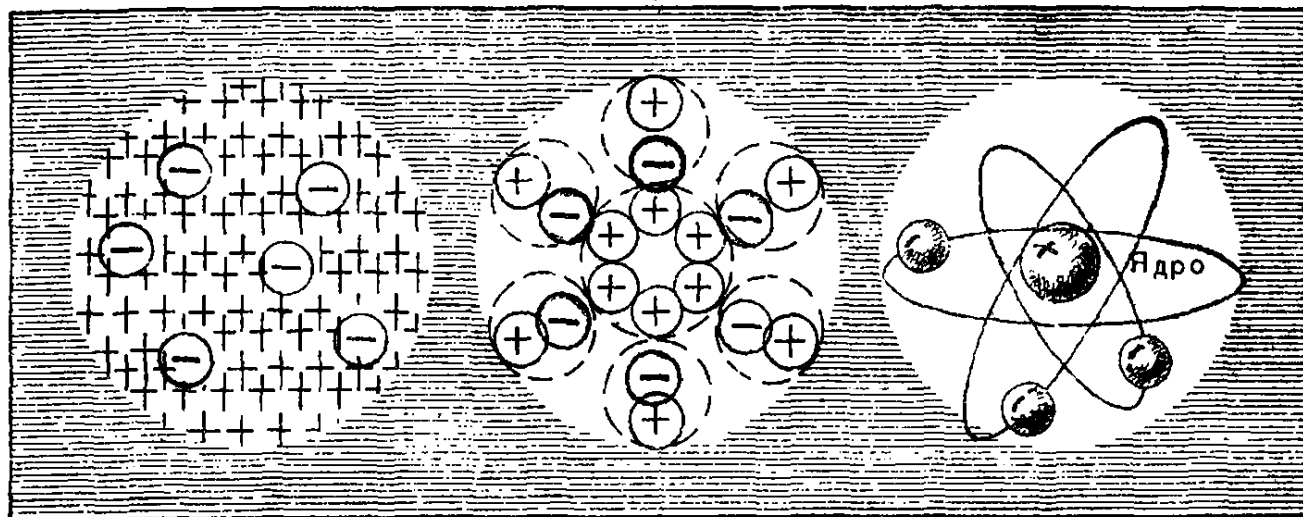
При поглощении атомом поступающей извне энергии (причем эта энергия поглощается строго определенными порциями — к в а н т а м и) электроны переходят на более удаленные от ядра орбиты (или более высокие энергетические уровни), и атом переходит в так называемое возбужденное состояние. Чем выше энергия поглощаемых квантов, тем дальше от ядра перебрасывается электрон. В таком состоянии предоставленный самому себе атом долго пребывать не может и вынужден вернуться обратно в обычное свое состояние, а приобретенная атомом излишняя порция энергии испускается в виде кван-

та электромагнитного излучения. Когда такой переход совершается на крайних орбитах (где энергия связи электрона с ядром слабее всего), испускаются кванты инфракрасного излучения, видимого света или ультрафиолетового излучения. При перескоках электронов на орбиты, более близкие к ядру атома (допустим, сразу через одну или несколько орбит), испускаются кванты более «жесткого» электромагнитного излучения — рентгеновского, обладающего во много раз большей энергией, чем видимый и невидимый ультрафиолетовый и инфракрасный свет.

АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА МОДЕЛИ. Все наше знакомство с атомом и его ядром основано на очень косвенных методах исследования. Поэтому 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 подчас заставляет ученых совершенно изменять свое представление об устройстве этой важнейшей частицы микромира.

Чтобы не создавать 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 ученых многих поколений.

Самой первой моделью строения атома (1904 г.) явился «пудинг с изюмом» Дж. Томсона. Этот большой ученый считал, что неделимый атом, например атом углерода, представляет собой сферу — сплошной сгусток положительно заряженного электричества, в который вкраплено шесть электронов.



Сумма отрицательных зарядов всех этих электронов точно равна положительному заряду 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 английский физик 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 описывала устройство атома водорода. Его ядро составляет положительно заряженная частица — п р о т о н, вокруг которого вращается единственный электрон. Сходятся 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 Д. И. Менделеева, в которой некоторые элементы расположены не в порядке возрастания их атомных масс, а по числу электрических зарядов, т. е. электронов в оболочке атома.

С того момента, когда ученым удалось впервые определить атомные массы различных элементов, их всегда поражала закономерность, с которой эта масса увеличивалась от элемента к элементу приблизительно в кратном отношении к массе самого легкого из них — водорода. И не далее как в 1816 г. лондонский врач и страстный поклонник химии Вильям Проут высказал мысль о том, что если бы атомы всех химических элементов были первичными основными частицами, подлинными «кирпичиками 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 атом кислорода — ровно в 16 раз?

Отсюда любознательный естествоиспытатель сделал очень дальновидный вывод: атомы всех ве-

ществ 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 масс показали, что массы атомов всех других элементов не являются целыми кратными массы атома водорода. К тому же эти различия иногда оказывались столь значительными, что исключали возможные погрешности 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 простая догадка 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 ядром атома водорода, бесспорно, является протон — тяжелая, заряженная положительно частица. Но если считать, что ядра всех других атомов состоят из набора протонов, то сразу оказывается непонятным одно обстоятельство. Заряд ядра и атомная масса 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 окон-

чательно 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 (парных с электронами) протонов и составляет разницу между атомной массой и суммой положительных зарядов ядра.

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

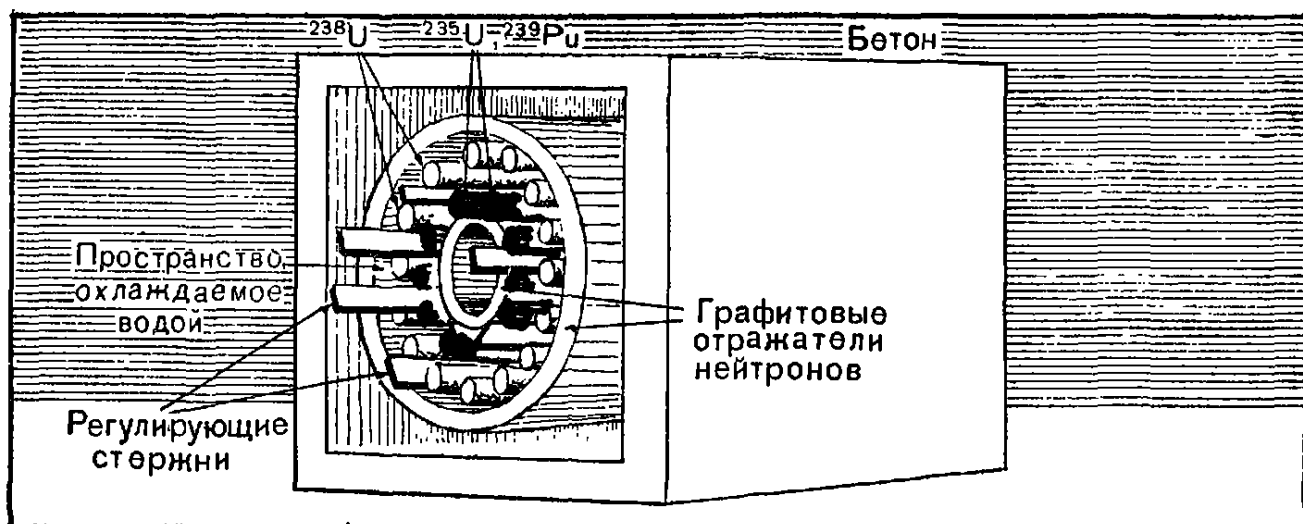
Однако очень быстро возникло множество новых противоречий. Например, тот неоднократно проверенный факт, что масса протона и якобы связанного с ним электрона, помноженная на приведенную выше разность между порядковым номером элемента и массой ядра атома, была все же значительно меньше, чем это должно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

Открытие в 1932 г. нейтрона (см. *Нейтрон*) 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, ядро любого атома, как было принято и раньше, состоит из протонов, число которых равно сумме его положительных зарядов, т. е. порядковому номеру элемента в Периодической системе Д. И. 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. Их 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 атомной массе элемента — четырём. 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 атомной массе этого элемента. И так по всей таблице элементов.

Открытие нейтрона прекрасно объясняет и существование **и з о т о в** — 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 объясняла многочисленные накопленные к тому времени экспериментальные факты, показывала новые пути для уточнения тонкостей строения ядра, давала новую пищу для дальнейших теоретических работ (см. *Бора атом*).



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 сот 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 окислами. Около 50 т заключенного в активной зоне урана и составили к р и т и ч е с к у ю м а с с у, в которой возникала саморазвивающаяся цепная ядерная реакция деления. Графит, разделяющий патроны с ураном в активной зоне, служил з а м е д л и т е л е м нейтронов, а наружные сплошные слои — «зеркалом», отражающим 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 до низу, заранее опускали кадмиевые стержни, которые можно было легко вводить и извлекать из реактора. Жадно поглощающий нейтроны кадмий не позволял им лавинообразно размножаться. 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 имел отдельные каналы, по которым внутрь активной зоны вводились различные вещества для облучения их потоком нейтронов, а также каналы для размещения в них измерительных приборов.

В процессе работы реактора возникали сильно проникающие и опасные излучения — нейтронное и гамма-излучения. Поэтому пришлось его заключить в бетонную оболочку двух-трехметровой толщины, называемую биологической защитой.

С момента пуска первого ядерного реактора прошло более 30 лет. За это время во многих странах мира разработано большое число самых разнообразных видов и типов реакторов — от самых малых, величиной с футбольный мяч, мощностью доли ватта, до многоэтажных, напоминающих завод-гигант — на сотни 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 подразделять на следующие

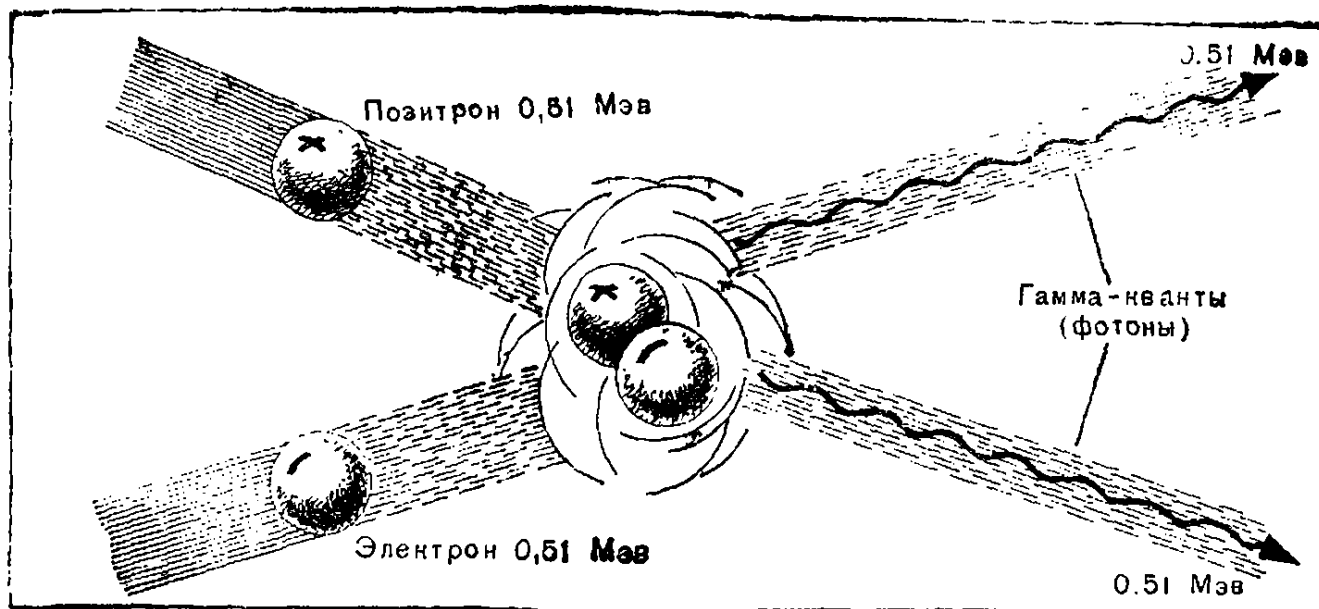
виды: экспериментальные, предназначенные для научных исследований; промышленные — для производства другого вида ядерного топлива (плутония); энергетические — для атомных электрических станций всех видов и многие другие.

Некоторые из этих реакторов настолько интересны, что в соответствующих местах книги приводится их подробное описание (см. *Реакторы и др.*).

АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ — одна из областей ядерной техники. Применяется для нахождения и опознания тех или иных химических элементов, содержащихся в ничтожно малых количествах в исследуемых веществах, когда обнаружить их другими способами или методами практически невозможно.

Этот метод находит все более и более широкое применение в научных исследованиях, медицине и промышленности. В частности, он оказался незаменимым в криминалистической практике для анализа неуловимо малых следов веществ, обнаруживаемых на месте происшествия (следы краски, микроскопические количества грязи из-под ногтей, осколки стекол, ворсинки тканей, пылинки табака, пепел, волосы и т. п.).

В принципе этот метод довольно прост. Исследуемое вещество или ничтожно малые его следы вводят в активную зону ядерного реактора, где подвергают бомбардировке мощным потоком нейтронов (см. *Меченые атомы*). В результате облучения исследуемое вещество на некоторое время становится радиоактивным и испускает гамма-кванты, альфа- или бета-частицы, причем характер этого наведенного излучения (энергия, длительность и интенсивность) проявляется поразному, что позволяет с помощью специальных приборов весьма точно определить, какие именно элементы содержит исследуемое вещество, их соотношение, абсолютное количество и наличие тех или иных характерных примесей. Метод позволяет исследовать образцы веществ и предметы без их разрушения, что является необходимым условием в ряде производств. Главное достоинство метода — его особая, ни с чем не сравнимая чувствительность, быстрота и точность. Он позволяет, например, обнаружить присутствие в исследуемых образцах 1/1000 микрограмма того или иного элемента, а в отдельных случаях даже 1/10 000 000



микрограмма. Для многих областей применения активационный метод дает достаточно точные результаты и при облучении исследуемых веществ гамма-квантами или любыми частицами, получаемыми с помощью ускорителей частиц.

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.

АКТИВНОСТЬ — одна из основных характеристик радиоактивных веществ. Определяется числом испускаемых частиц или пропорциональной ему величиной — числом распадающихся ядер атомов — в секунду. Единица активности — **к ю р и**, которая соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ распадам ядер атомов радия в секунду.

АЛЬФА-ЧАСТИЦА (α -ЧАСТИЦА) — **АЛЬФА-ЛУЧИ(α)**. Не зная еще, что представляют собой три вида только что открытых (в 1896 г.) лучей, испускаемых радиоактивными веществами, ученые дали им названия по первым буквам греческого алфавита: альфа-, бета- и гамма-лучи. Несколько позже было установлено, что бета-лучи являются не чем 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; альфа-лучи — ядрами атомов гелия (${}^4_2\text{He}$), состоящими из двух протонов и двух нейтронов. Положительный электрический заряд такого ядра по абсолютной величине превышает в два раза отрицательный заряд электрона, а атомная масса равна 4,004.

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

АНГСТРЕМ \AA — вспомогательная единица для измерения очень коротких длин волн электромагнитных колебаний: инфракрасных, световых, ультрафиолетовых, рентгеновского и гамма-излучений. 1\AA 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 (в пер. с лат. «уничтожение»). Удивительный сам по себе мир атомных (элементарных) частиц обладает еще более удивительным свойством: каждая из этих частиц имеет свою античастицу, т. е. частицу такой же массы, но с совершенно противоположными свойствами: зарядом, направлением вращения и т. п. 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 частиц. Так, при встрече свободного электрона со своей античастицей — позитроном — в результате аннигиляции образуются обычно два фотона (гамма-кванта), обладающие энергией и импульсом столкнувшейся пары (см. рисунок).

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

АНТИЧАСТИЦЫ. Из довольно большого количества открытых к настоящему времени элементарных частиц тридцать могут быть разбиты на 15 пар. Массы частиц каждой такой пары, например: протон — антипротон, электрон — позитрон, нейтрон — антинейтрон и пр., совершенно одинаковы, а электрические заряды (за исключением нейтральных частиц) и другие физические свойства противоположны.

Античастиц нет лишь у фотона и нейтрального мю-мезона (μ -мезона), которые принимаются тождественными своим античастицам.

Первой ставшей известной человеку античастицей оказался **п о з и т р о н** (e^+), открытый в 1932 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 взаимно уничтожаются, превращаясь в два фотона с энергией по 0,51 млн. эв ($M_{\text{эв}}$) каждый, что в сумме равно энергии, эквивалентной удвоенной массе покоя электрона. Позитрон по-

является в результате процесса, носящего название **рождения пары**. 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, также равна $1,02 \text{ Мэв}$ — по $0,51 \text{ Мэв}$ на каждую частицу. Электрон и позитрон могут возникать и при **бета-распаде**. Но при этом наряду с позитроном всегда рождается еще одна частица — **нейтрино**.

Открытая в 1955 г. частица, противоположная протону, называется **антипротоном**, или отрицательным протоном. Его можно получить, бомбардируя вещество протонами с кинетической энергией не менее 6 млрд. эв (Гэв).

Год спустя, в 1956 г., был открыт **антинейтрон**. Поскольку нейтрон — это частица, лишенная заряда, то антинейтрон также нейтрален. Однако антинейтрон аннигилирует при встрече и с нейтроном, и с протоном.

Продуктами аннигиляции античастиц нуклонов, т. е. протона и антипротона, нейтрона и антинейтрона, обычно являются **пи-мезоны** (π -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 атомы 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 38 раз большей, чем при взрыве водородной бомбы.

Используя опыт получения (с помощью сверхмощных ускорителей) античастиц почти ко всем известным элементарным частицам, ученые предприняли попытки создания из них реальных ядер атомов антивещества. В 1965 г. группе физиков Колумбийского университета (США) впервые удалось получить **антидейтроны** — связанные состояния антипротона и антинейтрона, соответствующие ядру атома тяже-

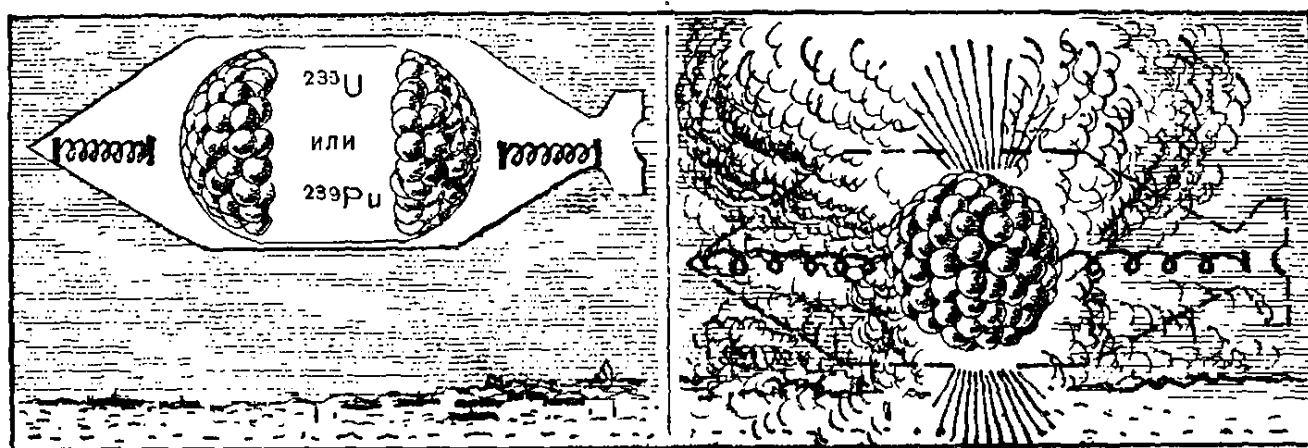
лого водорода. В этом опыте поток протонов энергией 30 млрд. эв бомбардировал мишень из бериллия. Из образующихся в результате ядерных реакций частиц отбирали лишь отрицательно заряженные, которые затем разделяли по массе. Среди них оказались и частицы с массой, равной массе дейтрона.

В сентябре 1971 г. советскими учеными на Серпуховском синхрофазотроне были получены ядра изотопа следующего по таблице Периодической системы элемента — антигелия-3, состоящего из двух антипротонов и одного антинейтрона. Тем самым в принципе стало возможным создавать в земных условиях антиподы атомов всех элементов таблицы Д. И. Менделеева. Но пока только в принципе — чем больше анти-нуклонов нужно объединить в ядре, тем меньше вероятность создания соответствующего антиэлемента при данной энергии ускорителя частиц. В опытах, поставленных в Серпухове, удавалось получать лишь одно ядро антигелия-3 в неделю. Для получения же антигелия-4 требуется еще более мощная установка. Следует учесть и то, что антиэлемент может существовать ничтожно малое время, да и то лишь в самом высоком, буквально космическом, вакууме. Столкнувшись с ядром обычного элемента, антиядро аннигилирует, превращаясь в кванты гамма-излучения. Поэтому получить антиядро еще недостаточно — нужно, пока оно не исчезло, успеть еще его и зарегистрировать. Существует ли антивещество в каких-либо других областях обзораемой Вселенной, неизвестно, хотя теоретически и возможно.

АТОМНОЕ (ЯДЕРНОЕ) ОРУЖИЕ. Так называется оружие, действие которого основано на использовании энергии взрыва, высвобождающейся при реакциях деления ядер тяжелых элементов (уран-235, плутоний-239) или слиянии легких элементов (водород) в более тяжелые (гелий), и боевые радиоактивные вещества.

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.

Основные элементы такой бомбы — заряд ядерного горючего, взрывное устройство и оболочка. Заряд делящегося вещества с общей массой больше критической (см. *Критическая масса*) до взрыва разделен на две половины или на несколько частей, каждая из которых меньше критической массы. Взрывное устройство сконструировано таким образом, чтобы как можно быстрее соединить половинки или все части разделенного общего заряда вместе, например «выстре-



лить» 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.

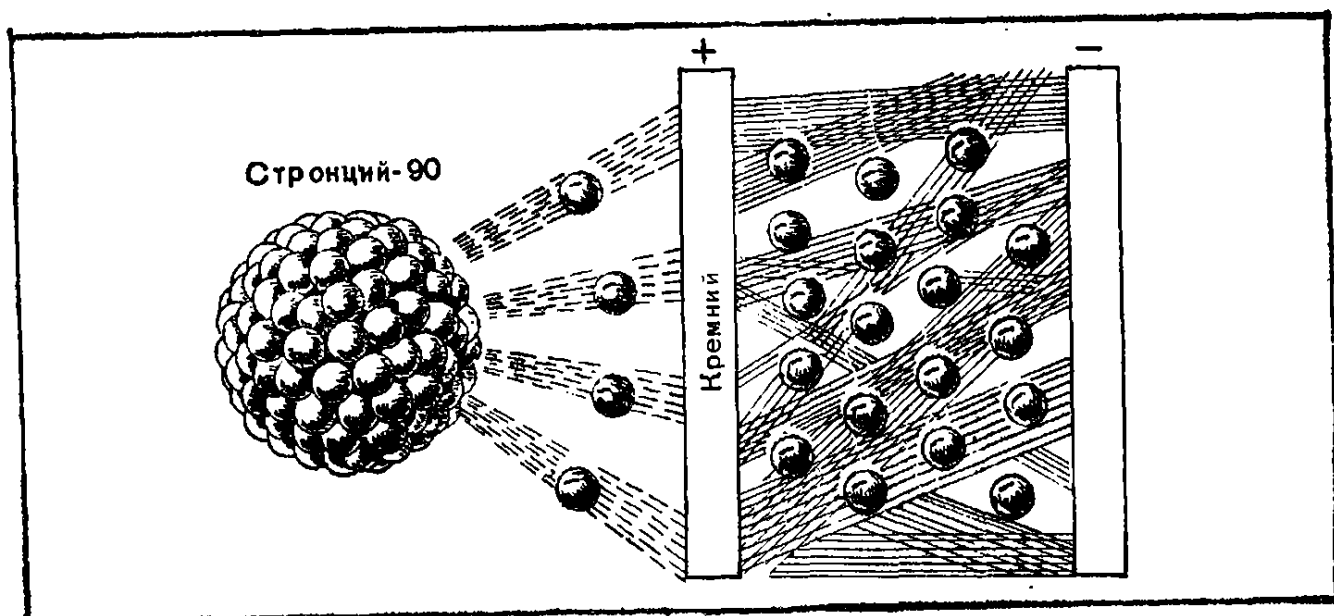
Взрыв атомной бомбы сопровождается одновременно действием мощной взрывной волны, светового излучения и проникающей радиации с последующим радиоактивным заражением окружающей местности, воздуха, воды.

Мощность атомной бомбы принято оценивать тротильным эквивалентом, т. е. количеством обычного взрывчатого вещества (тротила), которое потребовалось бы взорвать, чтобы сравнить его взрыв по энергии со взрывом данной атомной бомбы (см. рисунок).

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БАТАРЕЯ — устройство, превращающее атомную энергию непосредственно в электрический ток, минуя множество «посредников»: паровые котлы, паропроводы, теплообменники, турбины, роторные генераторы тока.

Наиболее проста батарея, составленная из двух пластинок: чистого бета-излучателя (стронция-90) и какого-либо полупроводника, например кремния. Быстрые электроны, испускаемые стронцием, проходя через вещество полупроводника, выбивают из него большое количество вторичных электронов — в десятки и сотни тысяч раз больше, чем испускает сам радиоактивный изотоп. Усиленный таким образом поток электронов протекает 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 миллионных долей ампера при напряже-



нии в десятые доли вольта. Соединив параллельно (для увеличения силы тока) несколько тысяч таких элементов, можно получить силу тока уже в сотни миллиампер, а соединив такие наборы элементов еще и последовательно друг с другом (для увеличения напряжения), можно получить батарею напряжением в несколько вольт, вполне достаточным для питания переносной радиоаппаратуры, телефонов и т. п.

Так как период полураспада стронция-90 равен 28 годам, такая атомная батарея может действовать без смены в течение 10—15 лет! Высоковольтные (до 150 тыс. в) 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 вылетают бета-частицы (электроны), вследствие чего он заряжается положительно, а собиратель электронов (оболочка) — отрицательно. Естественно, между ними возникает разность потенциалов, создающая при замыкании электродов на нагрузку электрический ток.

Срок ее действия, как и предыдущей конструкции, определяется периодом полураспада используемого радиоактивного вещества.

Атомные батареи могут быть устроены и по-другому, например: в виде конструкции, в которой энергия радиоактивного излучения нагревает до высокой температуры спаян- ные батареи полупроводниковых термоэлементов, вырабатываю-

щих постоянный электрический ток, или в виде 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 с помощью теплоносителя: 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). Пар 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, что создает реактивную тягу.

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

Главное преимущество атомного двигателя — ничтожный расход атомного горючего, что делает его очень перспективным для различных видов транспорта: морских и речных судов, подводных лодок. Атомный ледокол, снабженный атомным двигателем, может продвигаться через сплошное ледяное поле толщиной до трех метров. Такой ледокол может находиться в плавании до полутора лет без захода в порты для пополнения горючего, что особенно важно при плавании в арктических условиях, когда доставка обычного топлива (нефти и угля) сопряжена с громадными трудностями, дорого и требует наличия портов и специального флота для перевозки огромного количества быстро расходуемого топлива, в том числе и топлива, сжигаемого этими же судами. В настоящее время успешно идут работы по сооружению нового атомного ледокола «Арктика».

Главный недостаток атомных двигателей, затрудняющий их применение на железнодорожном транспорте, са-

А

молетах, автомобилях и на судах малого тоннажа, — громоздкость и чрезмерно большой вес системы биологической защиты, которой должны окружаться как сам ядерный реактор, так и все элементы установки, испускающие опасные для людей нейтронное и гамма-излучения.

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ (АЭС) — 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, в 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 (первый контур), по которым циркулирует теплоноситель, отделяют от остальной (второй контур) части электрической станции теплообменником (парогенератором). Теплоноситель замкнутого и тщательно изолированного первого контура передает тепло теплоносителю (рабочему телу) второго контура, непосредственно не соприкасаясь с ним. Помимо этого реактор и все остальное оборудование, входящее в первый контур установки, окружают биологической защитой — бетонной или водяной оболочкой толщиной в несколько метров, способной надежно задерживать все виды излучений.

Все процессы управления работой реактора даже в безопасной его 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 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. Если удастся осуществить управляемую термоядерную реакцию (слия-

ния 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 (МАССА) (атомная единица массы — *а. е. м.*, или массовая единица). Масса атома настолько мала, что было бы чрезвычайно неудобно каждый раз обозначать ее, допустим, в граммах. Получились бы числа с десятками нулей. Поэтому ее обычно выражают не в граммах, а в относительных единицах, в которых масса атома углерода припимается равной 12. Отношение массы любого атома к $1/12$ массы основного изотопа углерода ($^{12}_6\text{C}$) и называется атомной массой. В этом случае атомная масса самого легкого химического элемента — водорода — должна быть равна точно 1. Однако вследствие наличия у атомов водорода нескольких изотопов, его атомная масса оказывается фактически равной 1,008.

До 1951 г. за атомную единицу массы принимался вес $1/16$ части кислорода ($^{16}_8\text{O}$), равный $1,674 \cdot 10^{-24}$ г.

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 газ. Вытекающий с огромной скоростью через сопло газ создает реактивную струю, движущую ракету в направлении, противоположном движению струи.

Скорость движения ракеты при всех прочих равных условиях тем выше, чем быстрее вытекает из сопла двигателя струя раскаленного газа. Мощность такого 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 струи газа зависит от температуры и давления, которые может 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 истече-

ния из сопла, увеличивая массу нагретого вещества или осуществляя все это по возможности одновременно. В принципе 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 горючее, теплотворная способность которого в миллионы раз превышает теплотворную способность самого лучшего химического топлива, открывает наиболее широкие перспективы именно в области космических полетов. Использовать для этой цели атомную энергию можно, по крайней мере, двумя способами: либо непосредственно нагревая и пропуская через реактор рабочее тело, например мощную струю водорода, запас которого в сжатом или ожиженном виде 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*).

АЭС — сокращенное обозначение атомной электрической станции.

Б

БЕТА-РАСПАД

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

БОРА АТОМ

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.

Возможно единственное предположение: электроны рождаются в ядре в результате каких-то внутренних 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 естественный вопрос 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, гелия-3, а не трития-3. При позитронной радиоактивности, когда протон превра-

Б

щается 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, углерода-13, а не азота-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. Некоторые ученые, стоящие на идеалистических позициях, объявили было о крушении закона сохранения энергии. 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 называли нейтрино (маленький нейтрон). Она-то и уносит недостающую для 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.

Довольно логическая и понятная картина таких превращений несколько усложнилась после того, как было установлено, что в природе фактически существует не одна, а две разновидности почти идентичных нейтрино. Одно рождается при реакциях, сопровождающихся испусканием ядром атома или какой-либо иной частицей электрона, другое — при распаде элементарной частицы — мю-мезона. Поэтому первое из них называют нейтрино электрон-

ное, второе — нейтрино мюонное (мю-мезонное) (см. *Нейтрино, Мезоны*).

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ. Как и любые другие вещества, атомы и молекулы живых клеток под действием рентгеновского и гамма-излучений, 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 (см. *Ионизация*).

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 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.

БОРА АТОМ. После открытия Э. Резерфордом существования ядра атома, ученых больше всего смущало одно трудно объяснимое обстоятельство:

по законам классической физики (электродинамики) отрицательно заряженные электроны, вращаясь вокруг положительно заряженного ядра, должны были непрерывно терять (излучать) свою энергию и в конце концов упасть на него. Однако этого почему-то не случилось. Вращаясь вокруг ядра, электроны никакой энергии не теряли и не излучали, и всеобщей гибели Вселенной не состоялось. Естественно, напрашивался вывод: либо неверны законы классической физики, либо движение атомных частиц подчиняется каким-то иным законам.

Выход из создавшегося положения был подсказан в 1913 г. известным датским физиком Нильсом Бором, предложившим модель атома, известную как «атом Бора — Резерфорда». В основу этой модели были заложены три допущения: 1) электроны движутся вокруг ядра атома под действием сил притяжения, реально существующих и имеющих определенную величину; 2) атом водорода при его возбуждении испускает видимый свет не сплошным спектром, а только определенной, строго фиксированной частоты (длины волны) и, наконец, 3) фотон света с данной частотой имеет строго определенную величину энергии.

В силу первого обстоятельства электрон, вполне естественно, стремится притянуться и упасть на ядро. В то же время он обладает некоторой потенциальной энергией, зависящей от расстояния, на котором этот электрон находится от ядра. На разных расстояниях его потенциальная энергия, естественно, различна. Чем дальше от ядра, тем она больше. Приближаясь к ядру, электрон столь же естественно должен терять и часть своей потенциальной энергии. Короче говоря, каждому радиусу вращения электрона вокруг ядра соответствует и определенный энергетический уровень. Поскольку же возбуж-

денный атом испускает свет лишь определенной частоты, а тем самым и определенной энергии фотонов, Бор пришел к заключению, что у электрона при вращении вокруг ядра атома могут быть лишь определенные, строго фиксированные энергетические уровни, а следовательно, и орбиты. «Пока электрон находится на такой орбите, он не испускает никакого света, а следовательно, и не теряет никакой энергии».

Испускает же он свет только тогда, когда перескакивает с орбиты с более высоким уровнем энергии на орбиту с более низким уровнем энергии. Обычно электрон пребывает на орбите с наименьшим значением энергии. Это его основное состояние. Но атом можно возбудить в такой степени, что он, поглотив извне двойную или большую кратную дозу квантов энергии, может перевести электрон сразу на одну из более удаленных от ядра орбит, возвращаясь откуда в основное состояние, электрон может излучить квант света двойной или большей, но обязательно кратной энергии (частоты). Отсюда следует, что электрон в атоме водорода не может располагаться где угодно — на любом энергетическом уровне, а только на строго определенных орбитах.

Модель Бора прекрасно согласовывалась с данными экспериментов, но лишь для атома водорода. Для других атомов все оказывалось значительно сложнее. Кроме того, она не отвечала на главный вопрос: почему все же электрон рано или поздно не падает на ядро?

Ответ на последний вопрос попытался дать французский физик Луи де Бройль. Он предложил рассматривать быстро движущуюся частицу (электрон) одновременно и как частицу, и как волну. Связь между свойствами волны и частицы, по его гипотезе, выражается соотношением $\lambda = h/mv$, где m —

Б

масса частицы; v — ее скорость; λ — длина волны; h — постоянная Планка. Из этого соотношения следует, что чем больше момент количества движения (произведение массы частицы на ее скорость), тем короче длина волны. Когда электрон движется подобно волне света и вереница таких волн укладывается целое число раз по длине окружности орбиты электрона, они усиливают друг друга, т. е. возникают устойчивые колебания, или так называемые стоячие волны. Приходя же в каждую точку орбиты не в такт, они взаимно гасятся. Эти особые окружности, длина которых кратна длине волны электрона, только и могут быть орбитами электрона.

В последующем модель атома Бора претерпела ряд серьезных, более сложных и тонких изменений в работах таких выдающихся физиков, как Зоммерфельд, Гейзенберг, Борн, Шредингер, Паули, Дирак и др.

БАРИОН—общее название элементарных частиц, входящих в группу самых тяжелых элементарных частиц, которую образуют нуклоны (протон и нейтрон) и гипероны. Всего барионов 16: нейтрон, протон, лямбда-частица, три сигма-частицы, две кси-частицы и соответствующие им античастицы. Основное свойство барионов состоит в том, что они ни при каких реакциях, кроме аннигиляции, не могут превращаться в легкие частицы (см. *Элементарные частицы. Гипероны*).

БЕРИЛЛИЙ—химический элемент № 4 группы II Периодической системы. Стабильный изотоп с атомной массой 9,013. Искусственный радиоактивный изотоп бериллия (бериллий-7) с периодом полураспада, равным 53 дням, получаемый путем облучения изотопов лития-6 и лития-7. Бериллий используется как источник нейтронов, а также в качестве замедлителя быстрых нейтронов и отражателя медленных (тепловых) нейтронов в ядерных реакторах.

БЕТАТРОН — циклический ускоритель электронов. Бетатрон состоит из кольцеобразной вакуумной камеры, по форме напоминающей большую баранку, которая помещается

между полюсами электромагнита, создающего переменное магнитное поле. Внутри камеры расположен источник электронов.

Двигутся электроны в бетатроне по круговой орбите. При изменениях магнитного потока, пронизывающего камеру, возникает вихревое электрическое поле, увлекающее за собой поток электронов. Одновременно магнитное поле создает силу, направленную перпендикулярно 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 (β) — так назван один из трех видов излучений, испускаемых ядрами радиоактивных веществ при их распаде; представляют собой обычные электроны (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-излучения 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. п. В энергетических реакторах транспортного применения, например в реакторах 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 отверстия каналов, по которым вводят в реактор подлежащие облучению вещества, и каналов для вывода из активной зоны пучков нейтронов разных энергий.

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

БОР — химический элемент с атомным номером 5 группы III Периодической таблицы Д. И. Менделеева. Атомная масса 10,89. Состоит из двух природных изотопов: бор-10 (19%) и бор-11 (81%). Обладает способностью сильно поглощать нейтроны, вследствие чего используется для изготовления управляющих стержней ядерных реакторов. Бор и его соединения также используются в качестве материалов для защиты от нейтронного излучения, так как захват нейтронов не сопровождается (в отличие от кадмия) сильным проникающим гамма-излучением. Слабое альфа-излучение (2,8 Мэв) и мягкое гамма-излучение (0,5 Мэв) легко поглощаются сравнительно тонкослойными материалами.

БРИДЕРНЫЙ РЕАКТОР (см. *Реакторы, Размножительный (бридерный) реактор*).

БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ — нейтроны, энергия которых превышает 1 Мэв. Такая энергия соответствует движению частиц при температуре в несколько миллиардов градусов в отличие от энергии медленных (тепловых) нейтронов (0,03 эв), соответствующей комнатной температуре (20° С).

ВАКУУМ. Окружающий нас физический мир, в том числе беспредельное количество атомов, атомных частиц и фотонов излучений, взятые все вместе, занимают не так уж много места в пространстве. Их разделяет некая физическая среда, называемая в повседневной жизни пустотой. Сейчас она получила более правильное название — **в а к у у м**.

Существует два понятия вакуума — чисто техническое и философское. В прикладной физике и технике вакуумом называют разреженный газ, давление которого таково, что средний пробег его хаотически движущихся частиц (до столкновения с другими частицами или стенками сосуда) больше размеров сосуда, в который заключен газ. Обычно этому соответствует давление газа порядка 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст. Тем не менее даже при таких давлениях в одном кубическом сантиметре газа содержится около $3 \cdot 10^{10}$ — $3 \cdot 10^9$ атомов (или молекул). Для исследований, связанных с ядерной физикой, требуется значительно более глубокий вакуум — порядка 10^{-10} — 10^{-14} мм рт. ст. Но и в этом случае в одном кубическом сантиметре все еще содержится около 10^6 частиц. Наиболее же высокий вакуум в природе существует в межзвездном пространстве. Там на 1 см^3 может приходиться всего 1—3 частицы, т. е. вакуум, в миллион и более раз лучший, чем когда-либо полученный человеком с помощью самых совершеннейших откачивающих устройств.

Если рассматривать пустоту — вакуум — с философской точки зрения, то нельзя не признать, что

то, что мы считаем вакуумом — это физическая реальность, особый вид материи, существующий объективно, независимо от нашего сознания, и способный оказывать при определенных условиях физическое воздействие как на человека, так и на создаваемые им приборы и устройства. Другими словами, вакуум рассматривается не как абсолютная пустота, а как некий вполне материальный фон, на котором разыгрываются самые сложнейшие и тончайшие физические процессы и явления.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ (ЭЛЕМЕНТАРНЫХ) ЧАСТИЦ. Свойства элементарных частиц проявляются в процессе их взаимодействия. Если не считать сил тяготения, которые играют существенную роль только в присутствии очень больших масс, известны три вида взаимодействия элементарных частиц: электромагнитное, сильное и слабое.

Несмотря на великое многообразие электромагнитных явлений все они определяются взаимодействием электрических зарядов. Сюда относятся и все явления, связанные с излучением и поглощением электромагнитных волн. Главным действующим лицом ответственным за самую возможность таких взаимодействий — посредником, которым непрерывно как бы обмениваются между собой заряженные частицы, является фотон — квант энергии электромагнитного излучения. Этот вид взаимодействия примерно в 100 раз слабее сильных взаимодействий ядер и элементарных частиц.

Понятие сильное взаимодействие появилось после того, как раскрылась тайна внутренней структуры ядра атома, состоящего из заряженных протонов и не несущих никакого заряда нейтронов. Именно сильные взаимодействия соединяют и с огромной силой удерживают нуклоны в ядре атома. Эти силы в отличие от электромагнит-

ных характеризуются очень малым радиусом действия. Они резко обрываются на расстоянии около двух диаметров ядра атома. В основе ядерных сил лежит процесс испускания и поглощения пи-мезонов, которыми непрерывно обмениваются взаимодействующие между собой нуклоны ядра — протоны и нейтроны. Помимо этого, сильные взаимодействия проявляются при столкновениях частиц, обладающих высокой энергией, в процессе которых за счет части энергии этих частиц рождаются мезоны, гипероны и многие другие элементарные частицы.

Однако существуют еще и соударения элементарных частиц, обусловленные слабым взаимодействием. Они зачастую остаются незамеченными в «океане» сильных и даже электромагнитных взаимодействий. Речь идет о многочисленных самопроизвольных распадах — «тихих» превращениях различных элементарных частиц, которые в принципе ничего общего между собой могли не иметь, например, бета-распад нуклонов (протона или нейтрона), распад мю- и пи-мезонов, захват мю-мезона нуклоном и распады и превращения других частиц.

Процессы, вызванные слабыми взаимодействиями, часто называют медленными, так как их время относительно велико, хотя в ряде случаев оно может длиться всего миллионные доли секунды. За это время, например, распадается мю-мезон. В мире элементарных частиц такой промежуток времени действительно весьма продолжителен, поскольку для сильных взаимодействий характерны процессы, длящиеся 10^{-23} сек. Это взаимодействие в десятки миллионов раз слабее сильного и в миллиарды раз слабее электромагнитного, хотя соответственно намного сильнее гравитационного взаимодействия.

Носителем слабых взаимодействий является пока еще остающаяся очень загадочной нейтраль-

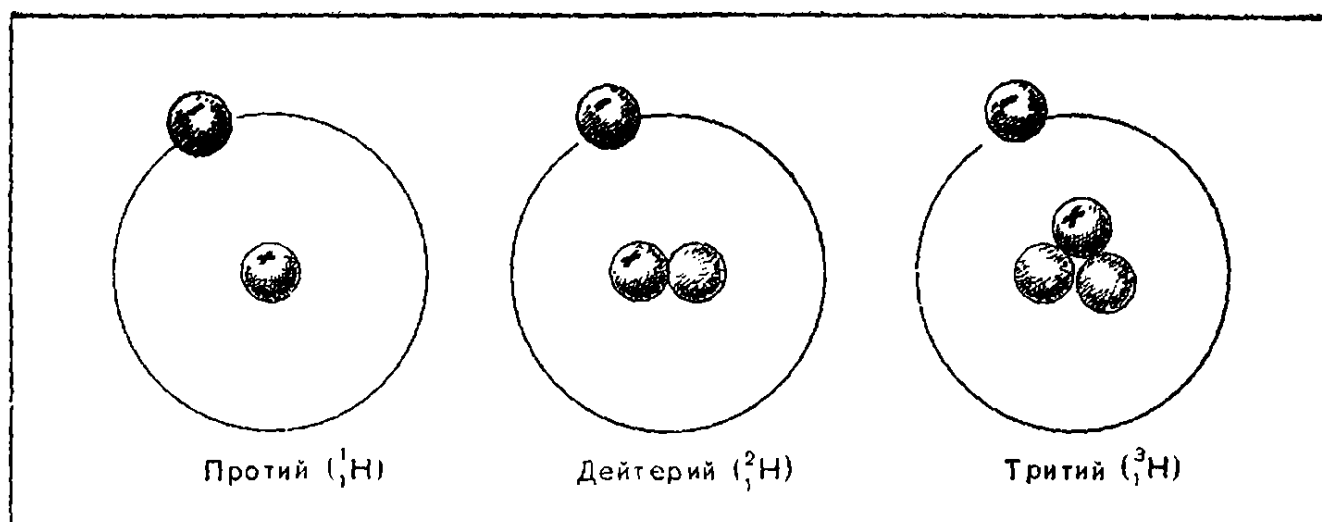
В

ная частица — нейтрино, не несущая никакого заряда и к тому же не имеющая массы покоя. Она может существовать только в движении со скоростью, очень близкой к скорости света, наподобие фотона, несущего квант электромагнитной энергии. Самое удивительное в этой частице — ее поистине потрясающая проникающая способность. Она может беспрепятственно пролететь, не вступая ни в какие взаимодействия с частицами вещества, сквозь чугунную плиту толщиной, в несколько миллиардов раз превышающей расстояние от Земли до Солнца!

Потребовалось около 25 лет, чтобы доказать существование этой частицы. Собственно говоря, ученые зарегистрировали не само нейтрино, а противоположную ему частицу — антинейтрино, точнее, след его взаимодействия с другими частицами. Трудно представить себе, чем отличается эта нейтральная частица от своего нейтрального же двойника, поскольку обе они не несут никаких электрических зарядов и имеют одинаковые массы. Однако это все же разные частицы. Одно нейтрино — электронное, другое — мюонное (мю-мезонное). Электронное нейтрино участвует во всех взаимодействиях, в которых рождается или исчезает электрон, а мюонное — только в паре с мю-мезоном.

Самое важное при всех взаимодействиях частиц заключается в том, что масса и энергия никогда не создаются и не исчезают. Общее количество массы и энергии, которое вступает в реакцию, равно общему количеству массы и энергии, которое остается после реакции (см. *Нейтрино*).

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

Практически известны два устойчивых изотопа водорода: легкий водород (${}^1_1\text{H}$), называемый протием и составляющий 99,98% этого элемента, и тяжелый водород (${}^2_1\text{H}$) — 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 частицами в атмосфере Земли обнаруживаются

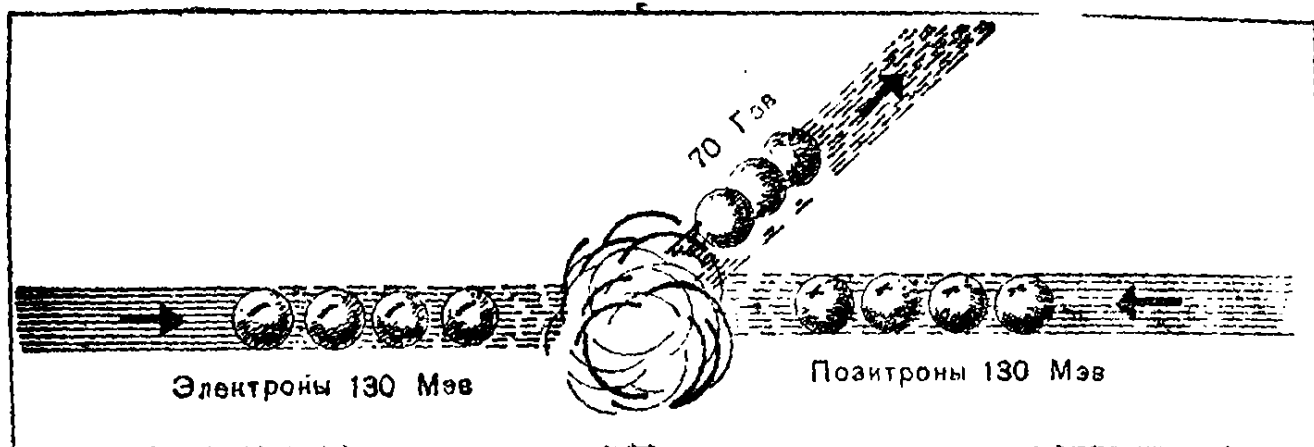
ничтожно малые количества радиоактивного изотопа водорода, испускающего только бета-частицы, — трития (^3_1H), период полураспада которого равен 12,3 года. В сколько-нибудь ощутимых количествах этот изотоп можно получить только искусственным путем — в ускорителях, бомбардируя потоком тяжелых частиц (протонами 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, при столкновении с какой-либо другой частицей или при ее захвате. Обычно этот избыток энергии тотчас же испускается в виде гамма-квантов.

ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ (УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ) — новое и весьма перспективное направление в области создания ускорителей частиц сверхвысоких энергий — порядка сотен и тысяч миллиардов электронвольт.

Со времен Резерфорда одним из главных направлений физических исследований было изучение структуры и тончайших деталей строения вещества методом рассеяния быстрых частиц на ядрах исследуемых атомов и составляющих его частиц. Чем меньше размеры изучаемых частиц, тем больше должна быть энергия бомбардирующих частиц. От-



сюда постоянное стремление к увеличению мощности ускорителей, достигших к настоящему времени буквально циклопических размеров. Физика элементарных частиц превратилась в физику высоких энергий.

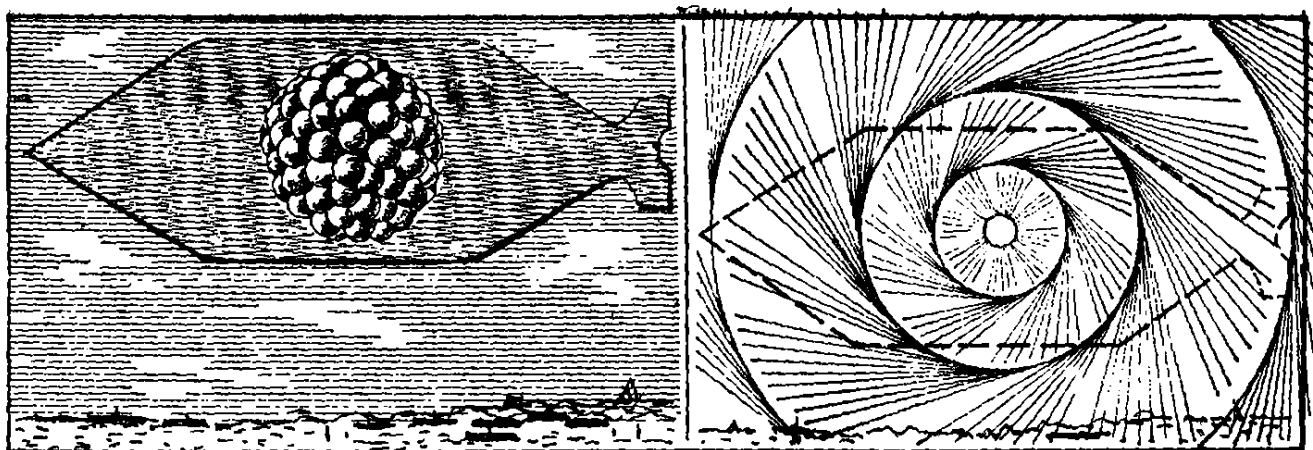
Столкновения элементарных частиц при высокой энергии и скорости движения, близкой к скорости света, являются основой изучения их взаимодействий друг с другом, гибели одних и рождения других частиц, взаимопревращения одних в другие. Энергия, которую необходимо сообщить частицам, чтобы произошли реакции, предсказанные экспериментом и теорией, растет не пропорционально росту энергии современных ускорителей, а в десятки раз больших пропорциях. Происходит это потому, что когда скорость налетающей частицы приближается к скорости света, основная часть ее энергии при столкновении с покоящейся частицей бесполезно переходит в энергию последующего движения всей системы сталкивающихся частиц как целого, и только малая доля идет на реакцию между частицами. Например, если разогнанная даже до энергии 1000 млрд. эв частица столкнется с покоящейся частицей, то на долю реакции между ними придется энергия, равная всего лишь 50 млрд. эв, т. е. всего лишь 5% первоначальной энергии. Отсюда возникла

В

идея разгонять исследуемые частицы навстречу друг другу с тем, чтобы их соударения осуществлялись «лоб в лоб», т. е. методом встречных пучков, когда, по существу, мишень движется навстречу потоку бомбардирующих ее частиц. Тогда энергия реакции между ними составит не небольшую долю энергии, затраченной на разгон только одной частицы, а будет равна их суммарной энергии. Так, при лобовом столкновении двух пучков частиц, ускоренных до энергии, допустим, 130 млн. эв, можно получить (в результате превращения части массы сталкивающихся частиц в энергию) частицы с энергией взаимодействия, равной даже не 260 млн. эв, а уже 70 млрд. эв, на что при обычных методах потребовалась бы энергия такого гиганта, как Серпуховский ускоритель. А эти частицы были получены на ускорителе диаметром всего около 43 см!

Однако для того, чтобы реакции происходили достаточно часто, в каждом таком пучке должно быть очень и очень много частиц — в миллионы и миллиарды раз больше, чем их способен дать самый мощный ускоритель. В микромире расстояния между мчащимися в самом плотном потоке частицами оказываются, если принять соответствующие масштабы, не меньше, чем между звездами в нашей Галактике. Поэтому, чтобы повысить вероятность столкновений, одни и те же частицы заставляют встречаться друг с другом миллиарды раз. Это осуществляется или непосредственно в вакуумной камере (дорожке) кольцевого ускорителя, или в устройстве, называемом **накопительным кольцом**.

Еще больший интерес вызвали эксперименты на установках со встречными пучками электронов и позитронов. Сконструированная в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР уста-



новка ВЭПП-2 позволяет получать встречные электрон-позитронные пучки с энергией 2×670 млн. эв. Пущенная в работу в 1972 г. первая очередь установки ВЭПП-3 позволила поднять уровень энергии встречных пучков до $2 \times 3,5$ млрд. эв.

Здесь же были созданы установки для встречных протон-протонных пучков и, наконец, ведутся работы по освоению установки ВЭПП-4 с протон-антипротонными пучками на энергию около 2×25 млрд. эв. Несомненно, метод встречных пучков в ближайшие годы станет одним из главных методов физики элементарных частиц.

ВАН-ДЕ-ГРААФА ГЕНЕРАТОР. В самых ранних конструкциях ускорителей заряженных частиц в качестве источника высокого напряжения использовались генераторы Ван-де-Граафа, которые и поныне, вследствие простоты конструкции и сравнительно высокого генерируемого напряжения, продолжают использовать в лабораторной практике для высоковольтных и ядерных исследований.

Практический предел напряжения, создаваемого таким генератором, — 15 млн. в, а при последовательном соединении двух генераторов — до 25 — 30 млн. в. Однако получаемый от такого генератора электрический ток под нагрузкой обычно не превышает 1 ма (1/1000 а).

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 (дейтрона) с ядром атома трития (тритона) образуется ядро атома гелия и выделяется энергия, равная $17,6 \text{ Мэв}$ — примерно в семь раз больше энергии, получаемой при делении ядер атомов урана или плутония. Температуру в несколько десятков миллионов градусов и высокое давление, необходимые для возникновения термоядерной реакции, создают путем взрыва внутри оболочки водородной бомбы достаточно мощной атомной бомбы.



ГЕЛИЙ
ГАММА-ЛУЧИ (ГАММА-КВАНТЫ)
ГИПЕРОНЫ
ГИПЕРЯДРА

ГЕЛИЙ — химический элемент с порядковым номером 2 и атомной массой 4,004. Инертный газ. Природный гелий состоит из двух устойчивых изотопов: гелия-4 и незначительной примеси гелия-3. Изотоп гелий-4 накапливается в природе главным образом в результате 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: гелий-5 с периодом полураспада менее 10^{-2} сек и гелий-6 с периодом полураспада 0,8 сек.

Атом гелия состоит из ядра и двух электронов. Ядро атома гелия, содержащее два протона и два нейтрона, — сравнительно устойчивое ядерное обра-

зование: энергия связи всех его частиц равна $28,2 \text{ Мэв}$.

ГАММА-ЛУЧИ (ГАММА-КВАНТЫ) — один из видов излучений, испускаемых ядрами атомов природных, а также искусственных радиоактивных элементов, представляющий собой электромагнитное излучение с чрезвычайно короткой длиной волны (1\AA и короче) и вследствие этого обладающий исключительно большой проникающей способностью. Гамма-излучение возникает также 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-излучения (с длиной волны менее 1\AA) выражены очень слабо, его принято рассматривать как линейный поток частиц — гамма-квантов. Однако энергия гамма-квантов растет с частотой колебаний, что свидетельствует об их истинной электромагнитной природе. Чем выше частота, тем большую энергию несет в себе гамма-квант.

Благодаря большой энергии — до 5 Мэв у природных радиоактивных веществ и до 20 Мэв при искусственных ядерных реакциях — гамма-излучение не только легко ионизирует различные вещества, но способно также вызывать некоторые ядерные реакции и, в частности, порождать электрон-позитронные пары и образовывать некоторые элементарные частицы. Именно из-за опасности, которую представляет гамма-излучение для людей и живых организмов, приходится окружать бетонными стенами — биологической защитой — ядерные реакторы, хра-

нить в контейнерах с толстыми свинцовыми стенками естественные и искусственные радиоактивные вещества, создавать другие сложные и дорогостоящие защитные устройства.

Гамма-излучение от естественных радиоактивных источников и возникающее при искусственных ядерных реакциях нашло широкое применение в науке и технике. С его 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 сначала в космическом излучении, а затем и на 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: ламбда-частица, три сигма-частицы, две кси-частицы и соответственно все античастицы названных частиц (см. *Элементарные частицы*). Относительно изученным оказался нейтральный гиперон (ламбда-частица). Его масса равна 2182 массам электрона, т. е. примерно на 340 электронных масс тяжелее протона. Появившись, он живет не больше $3 \cdot 10^{-10}$ сек и распадается на протон и отрицательно заряженный пи-мезон или нейтрон и нейтральный пи-мезон.

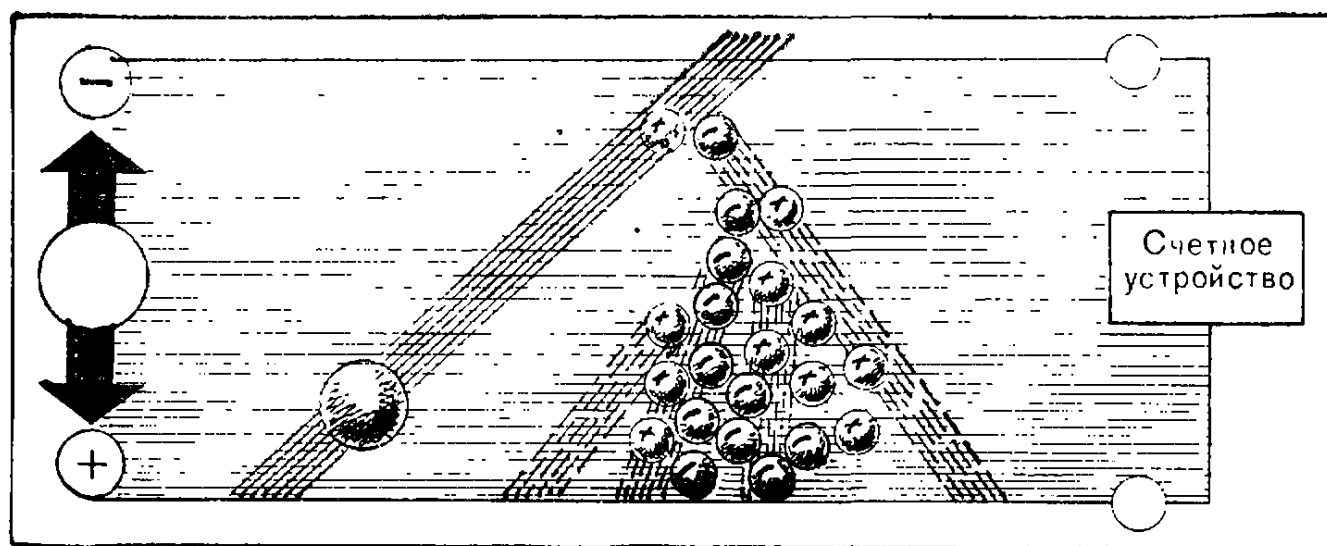
ГИПЕРЯДРА. Каждый атом состоит из ядра и окружающих его электронов. В свою очередь ядро тоже имеет сложную структуру и составлено из частиц, называемых нуклонами — положительно за-

ряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов (см *Нуклоны*) Атомный номер элемента всегда равен числу протонов в ядре, но число входящих в состав данного ядра нейтронов неопределенно. Элемент, как правило, может иметь несколько разновидностей атомов, отличающихся друг от друга числом нейтронов в ядре. Это так называемые **и з о т о п ы**. Соотношение протонов и нейтронов в ядре атома в значительной степени влияет на устойчивость ядра. Установлено, что наиболее прочной структурой обладают ядра, содержащие 2, 8, 20, 50, 82, 126 протонов или нейтронов.

Нейтроны относятся к группе элементарных частиц, называемых **б а р и о н а м и**. Остальные барионы, называемые гиперонами, более тяжелые и сами по себе очень неустойчивы, т. е. быстро распадаются. Самый легкий после нуклона — барион, называемый **л а м б д а - ч а с т и ц е й**. Так же как и нейтрон, она электрически нейтральна. Время ее жизни около 10^{-10} сек.

Из теоретических рассуждений вытекает, что в некоторых случаях один из нейтронов в ядре атома может быть заменен гипероном — **ламбда-частицей**. Такое ядро впервые было обнаружено в космическом излучении в 1952 г. польскими учеными М. Дандышем и Е. Пневским и названо ими **г и п е р я д р о**.

Самым простым гиперядром является гипертригий, состоящий из 1 протона, 1 нейтрона и 1 **ламбда-частицы**. Позже был получен изотоп гипертригия с 1 протоном, 2 нейтронами и 1 **ламбда-частицей** в ядре, а затем гипергелий, состоящий из 2 протонов, 2 нейтронов и 1 **ламбда-частицы**, а позже — разновидность гипергелия, в ядре которого, как и в ядре обычного гелия, имеется 2 протона, но всего 1 нейтрон и 1 **ламбда-частица**.



Открытие гиперядер привело к созданию нового раздела физики, которым занимаются ученые в разных странах. В настоящее время получены путем бомбардировки ядер пи-мезонами и K -частицами гиперядра многих других элементов, например лития, бериллия, бора, углерода и еще более тяжелых элементов.

Из-за неустойчивости самого гиперона все гиперядра тоже крайне неустойчивы — они живут около одной десятиллиардной доли секунды.

В 1963 г. М. Дандыш и Е. Пневский открыли первый случай двойного гиперядра (ядро, содержащее кроме нуклонов 2 гиперона) — ядро бериллия-10, содержащее 4 протона, 4 нейтрона и 2 ламбда-частицы, а американский физик Д. Пройс — гипергелий-6, состоящий из 2 протонов, 2 нейтронов и 2 ламбда-частиц.

Получение гиперядер позволяет судить о характере взаимодействия между гиперонами и нуклонами, способствуя развитию физики элементарных частиц, и расширяет область сведений по физике обыкновенных ядер атомов и составляющих его частиц.

ГАММА-ДЕФЕКТОСКОПИЯ — метод обнаружения дефектов в слитках металлов, отливках, сварных швах и лю-

бых иных изделиях путем просвечивания их рентгеновскими лучами больших энергий и гамма-излучением, испускаемым 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 фотоэмульсия), — с другой стороны. В зависимости от толщины, состава и плотности соответствующего участка интенсивность излучения, прошедшего через изделие, будет различной, что и зафиксировается 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-излучения требует строжайшего соблюдения правил обращения с радиоактивными веществами, их хранения и правил техники безопасности как самими работающими 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 Г. Гейгер предложил конструкцию счетчика заряженных частиц, позднее усовершенствованную им совместно с другим физиком — В. Мюллером.

Устройство счетчика чрезвычайно просто. Это заполненная каким-либо разреженным газом (до 100 — 200 мм рт. ст.) стеклянная трубка, по оси которой протянута тонкая металлическая нить. Между нитью и металлизированной внутренней поверхностью трубки приложено высокое электрическое напряжение — порядка 500—1000 в и выше. Обычно нить служит положительным электродом. Пролетая через трубку, заряженная частица ионизирует атомы 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 ускоряются и ионизируют новые атомы и т. д. В результате образуется уже целая лавина электронов, импульс (или ток) которой зависит от энергии и скорости первоначально пролетевшей через трубку частицы. Этот импульс можно измерить, а если он слишком слаб, то предварительно его следует усилить. Чувствительность такого прибора может быть сколь угодно велика. При необходимости он может обнаружить появление даже одиночной заряженной частицы.

Однако одной только хорошей чувствительности прибора для исследовательских целей недостаточно. Поэтому к усилителю счетчика 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-излучения, хотя они, как известно, являются не потоком заряженных частиц, а электромагнитными колебаниями с очень короткой длиной волны. Падая на металлизированную поверхность трубки, гамма-кванты 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 выпускаются во многих модификациях 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 удастся 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 устали 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-206.

Можно легко высчитать, что за миллион лет в 1 г природного урана должно образоваться 0,000137 г свинца. Тщательно измерив количество оставшегося урана и образовавшегося свинца, удастся с относительно большой точностью (других ведь способов нет!) определить 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 $1,3 \cdot 10^9$ года. 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, удастся 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 (ЗАЩИТНАЯ) КАМЕРА, ГОРЯЧАЯ (ЗАЩИТНАЯ) 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 многослойными стенами биологической защиты. Лабораторию оборудуют также средствами, исключающими опасность заражения воздуха в помещениях, где находятся люди, радиоактивной пылью, аэрозолями и парами жидкостей.

ГРАММ-ЭКВИВАЛЕНТ РАДИЯ — количество гамма-излучающего вещества, которое при одинаковых условиях создает ту же дозу излучения, что и 1 г радия.

ГРАВИТАЦИЯ (ТЯГОТЕНИЕ) — свойство тел взаимно притягиваться согласно закону всемирного тяготения, открытому Ньютоном в 1687 г. Сила тяготения, действующая между двумя телами, пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

ГРАФИТ — разновидность чистого углерода, применяемого в ядерных реакторах для замедления нейтронов (путем многократных их столкновений с ядрами углерода). Изготавливается из особо чистого нефтяного кокса, спрессованного в кирпичи на связке и нагретого затем до высокой температуры.

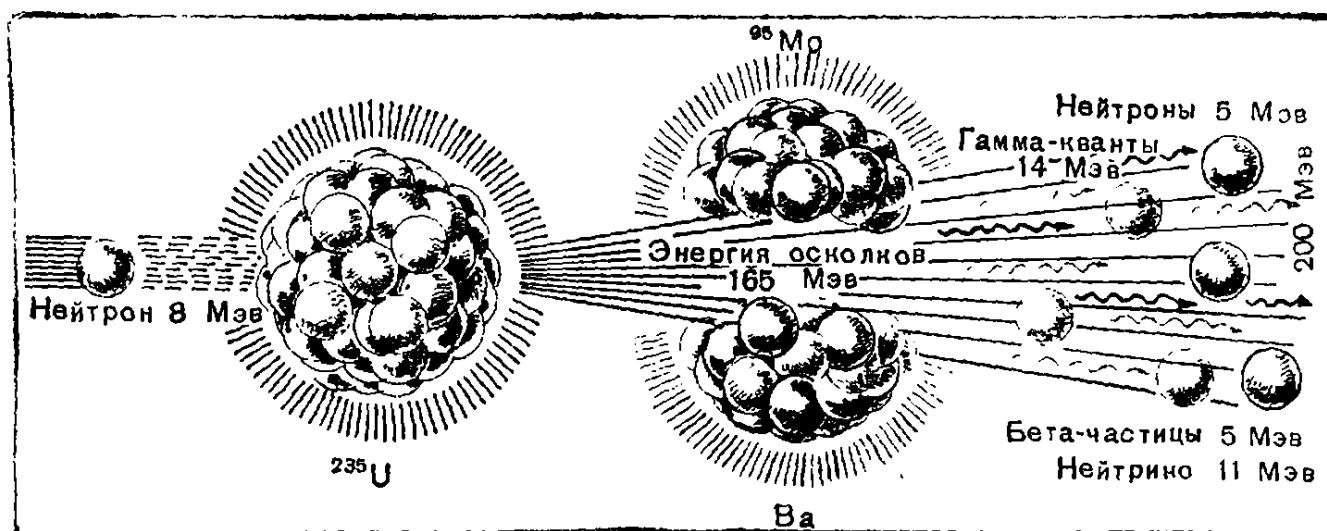


ДЕЙТЕРИЙ

ДЕЛЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА (РЕАКЦИЯ)

ДЕФЕКТ МАССЫ

ДЕЙТЕРИЙ — природный устойчивый изотоп водорода с атомной массой 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. 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). Ионизованные (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 Д. И. Менделеева,

выбрасывая при этом целый фейерверк частиц: электронов, фотонов, гамма-квантов и два-три быстрых нейтрона. В результате этой реакции высвобождается энергия. Например, при делении ядра урана выделяется энергия, 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.

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. п. 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 (открыто в 1940 г. советскими физиками К. А. Петряком и Г. Н. Флёровым), когда некоторые ядра атомов урана самопроизвольно, без какого-либо видимого внешнего воздействия, делятся надвое. Это случается очень редко — не более 20 делений в час в 1 г урана. 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 жидкая 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 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 — плотности, вязкости и т. п. Поэтому и размер капли не бывает больше некоторой предельной величины. И здесь можно найти очень близкую аналогию с я д е р н ы м и с и л а м и, 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 не-

Д

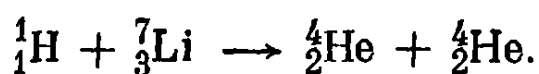
обыкновенно мощных сил не хватает, чтобы преодолеть огромные силы электростатического отталкивания.

Когда капля приобретает размеры больше допускаемых поверхностным натяжением данной жидкости, она под действием молекулярных электрических сил отталкивания делится на части. Но не вдруг, а сначала деформируется, 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 число взаимных столкновений, ядро как бы набухает, и в какой-то момент некоторые его части «выдавливаются» наружу и оказываются в области ослабления действия удерживающих их внутриядерных сил. Равновесие сил отталкивания и сил сжатия в ядре нарушается: силы отталкивания протонов начинают преодолевать ядерные силы. Ядро теряет свою сферическую форму, удлиняется, в каком-то месте истончается и, превратившись в гантель, наконец, рвется надвое. Эти половинки, ставшие ядрами атомов средних элементов, с огромной скоростью разлетаются, неся в себе около 150 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 Периодической таблицы Д. И. Менделеева.

ДЕФЕКТ МАССЫ. В 1932 г. два английских физика, Д. Кокрофт и Э. 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 по-настоящему потрясло ученых совсем другое. Когда попробовали с карандашом в руках подсчитать баланс масс и энергий всех частиц, участвовавших в этой, на первый взгляд, очень простой ядерной реакции, то обнаружили 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. выдающийся 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 вразрез 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 подтвержденном факте утяжеления электрона при движении со скоростями, близкими к скорости света, и на других открытиях века, А. Эйнштейн вывел свое знаменитое, вызвавшее множество споров и кривотолков, соотношение, связывающее массу (меру инерции) и энергию (физическую меру движения материи):

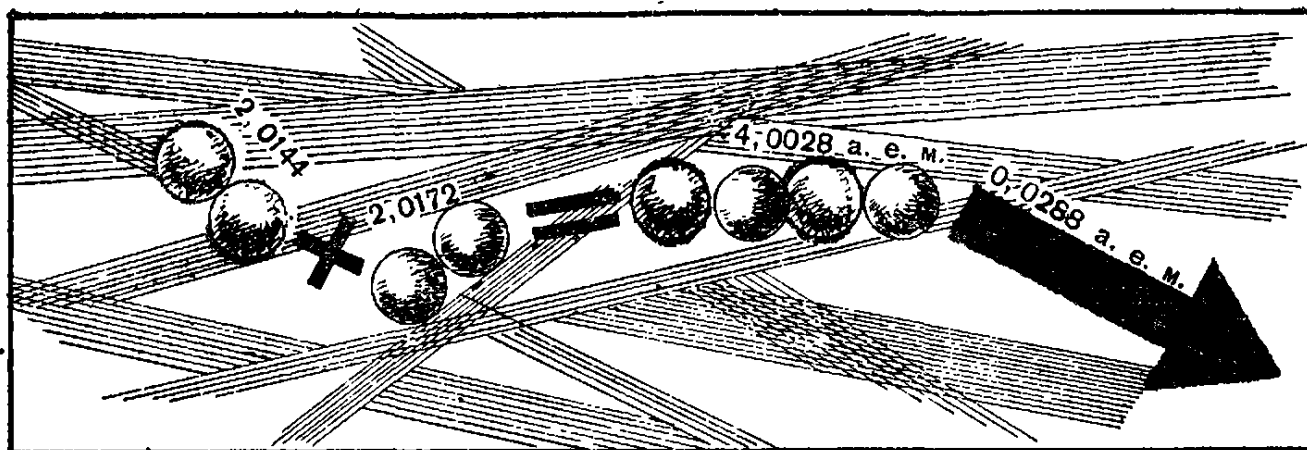
$$E = mc^2,$$

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

Следовательно, любое вещество обладает определенным запасом 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 сначала 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 («защелкнутся»). При этом два протона превратятся в нейтроны, выбросив два позитрона и два нейтрино. И в качест-

ве 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 **д е ф е к т о м** **м а с с ы**.

Теперь можно заняться подсчетами.

Сумма масс нуклонов, принимающих участие в реакции, равна: 2 протона $\times 1,0072 + 2$ нейтрона $\times 1,0086 = 4,0316$ *а.е.м.* Масса же ядра атома гелия, когда-то ранее сложившегося из таких частиц, составляет 4,0028 *а.е.м.* Разница 0,0288 *а.е.м.* Тем не менее даже такое, казалось бы, ничтожно малое уменьшение массы эквивалентно энергии 25,9 *Мэв*!

Дефект массы наблюдается не только при соединении протонов и нейтронов в ядре 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 элементы середины таблицы Д. И. Менделеева никаких выгод в этой части не представляют. По этой причине булыжник при дороге, кусок железа, серебро, золото, ртуть и другие вещества до окончания 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 наличные атомы или их значительную часть. 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 десятимиллионная 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*).

ДЕ БРОЙЛЯ ВОЛНА. Согласно квантовой механике, всякая частица обладает одновременно как свойствами типичной материальной частицы, так и волновыми свойствами. В частности, любая частица вещества, движущаяся с некоторым заданным импульсом (импульс — произведение массы частицы на скорость), проявляет волновые свойства, соответствующие длине волны, равной постоянной Планка, деленной на величину импульса. Вследствие чрезвычайно малого значения постоянной Планка длина волны большинства материальных объектов ничтожно мала, поэтому их волновые характеристики почти не поддаются измерению. Однако для малых частиц — протонов или электронов, волновые свойства уже легко обнаруживаются и поддаются точному измерению. Впервые длину волны с данным импульсом предсказал и вычислил в 1923 г. французский ученый Луи де Бройль. Впоследствии волновые свойства, предсказанные де Бройлем, были обнаружены у всех других элементарных частиц (см. *Элементарные частицы*).

ДЕЗАКТИВАЦИЯ — методы и средства удаления радиоактивных веществ с одежды, оборудования, различных сооружений и местности, оружия и боевой техники, попадающих на них при технологических процессах, связанных с получением и применением естественных 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 2,1 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 — величина, являющаяся мерой действия излучения в какой-либо среде. 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. Единица измерения — *рентген (р)*. Дозы других ионизирующих излучений, отличных от рентгеновского или гамма-излучений (например, заряженных частиц, нейтронов), измеряют физическим эквивалентом рентгена (*фэр*), т. е. это доза такого излучения, которое по своему ионизационному действию эквивалентно одному рентгену рентгеновского или гамма-излучений.

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 поверхностную дозу, глубинную дозу и тканевую дозу. Кроме того, существует разделение на локальную дозу, т. е. дозу, приходящуюся на какую-то ограниченную область тела, и дозу облучения, которой подвергается весь организм.

Предельно допустимой дозой общего облучения человека считается доза, которая в свете современных знаний не долж-

на вызывать значительных повреждений организма в любой момент на протяжении всей жизни.

В Советском Союзе за предельно допустимую дозу общего (интегрального) облучения принята доза 5 бэр за 1 год. Предельно допустимой дозой ежедневного облучения для лиц, работающих с ионизирующими излучениями, в настоящее время считается 0,017 бэр, а за неделю — 0,1 бэр.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ СЛУЖБА — система мероприятий, специально разработанных для контроля и обеспечения безопасности от ионизирующих излучений на предприятиях и в учреждениях, где имеются установки для облучения и ведутся работы с радиоактивными веществами — искусственными и естественными, а также для 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 дозу; рентгенметров, 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. п.

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

ДОЧЕРНЕЕ ЯДРО. Распад ядер атомов урана-238, актиния-235 и тория-232 происходит последовательно, отдельными, следующими друг за другом ступеньками (см. *Радиоактивные семейства*). На начальной ступеньке ядро каждого из этих элементов, распадаясь, превращается в дочернее ядро, которое, будучи радиоактивным, снова распадается, превращаясь в следующее радиоактивное ядро и т. д.

Цепочка распадов каждого из этих элементов заканчивается образованием конечного дочернего ядра уже стабильного, т. е. нерадиоактивного изотопа свинца: цепочка урана-238 — свинцом-206, тория-232 — свинцом-208, актиния-235 — свинцом-207.

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.

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 $600-650^{\circ}\text{C}$ паре и давлении до $300-350\text{ атм}$, 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. Используемые для этого конструкционные материалы обладают определенной механической прочностью и жаростойкостью, поддающимися точному расчету и учету. А многие металлы и другие конструкционные материалы, подвергнувшиеся дли-

тельному облучению мощными потоками нейтронов и гамма-квантов, порой резко меняют почти все свои свойства: например, ухудшаются механические свойства. 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: все образующееся при этом огромное количество тепла должно немедленно отводиться, иначе расплавятся урановые стержни или их оболочки, и вся ядерная установка окажется зараженной 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, то поверхность тепловыделяющих элементов в рабочей зоне даже больших реакторов сравнительно мала. Следовательно, отпадает возможность и 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, сравнять 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 пр. Преимущества их по сравнению с охлаждением водой и газами в ряде случаев огромны или просто несравнимы.

Но главное не это. Так как температура кипения натрия 800°C , то тепло от реактора можно отводить с помощью жидкого натрия, 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.

«ЖЕСТКАЯ» МАГНИТНАЯ ФОКУСИРОВКА — особое устройство магнитной системы в циклических ускорителях заряженных частиц, позволяющее «обжимать» поток ускоряемых частиц не одновременно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, как в первых ускорителях с «мягкой» фокусировкой, а поочередно, то в горизонтальной, то в вертикальной плоскости. Кроме того, благодаря особой конфигурации магнитного поля, удастся еще и значительно уменьшить размах отклонения частиц в стороны при их движении в вакуумной камере ускорителя. Все это позволило резко сократить размеры и вес магнитной системы. В настоящее время все крупные циклические ускорители строятся с «жесткой» магнитной фокусировкой (см. *Синхрофазотрон*).

Ж

ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ. Процесс деления ядра атома урана-235 или плутония-239 на две части при попадании в него нейтрона длится 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, а с некоторым запаздыванием — от долей секунды до нескольких десятков секунд. А запаздывание одного звена цепочки реакции деления приводит к замедлению всего процесса в целом. Если время действия 99% каждого поколения нейтронов равно 10^{-5} сек, а 1% — 10 сек, то среднее время действия всей совокупности нейтронов равно 0,1 сек, т. е. в 10 тыс. раз медленнее действия 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. 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, т. е. в течение 10^{-5} сек, а начнет расти медленно — примерно в течение 0,1 сек. А этого времени достаточно, чтобы без задержки вводить в реактор или вы-

водить из него (даже вручную) регулирующие стержни с поглощающими нейтроны веществами, которые не позволяют переступить опасный рубеж бурного размножения нейтронов, а в случае необходимости — мгновенно прервать ход реакции деления.

ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ 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 немые 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 предназначена как для измерений любых видов излучений, так и для обнаружения их присутствия вообще и в дозах, представляющих опасность для людей, в частности.

3

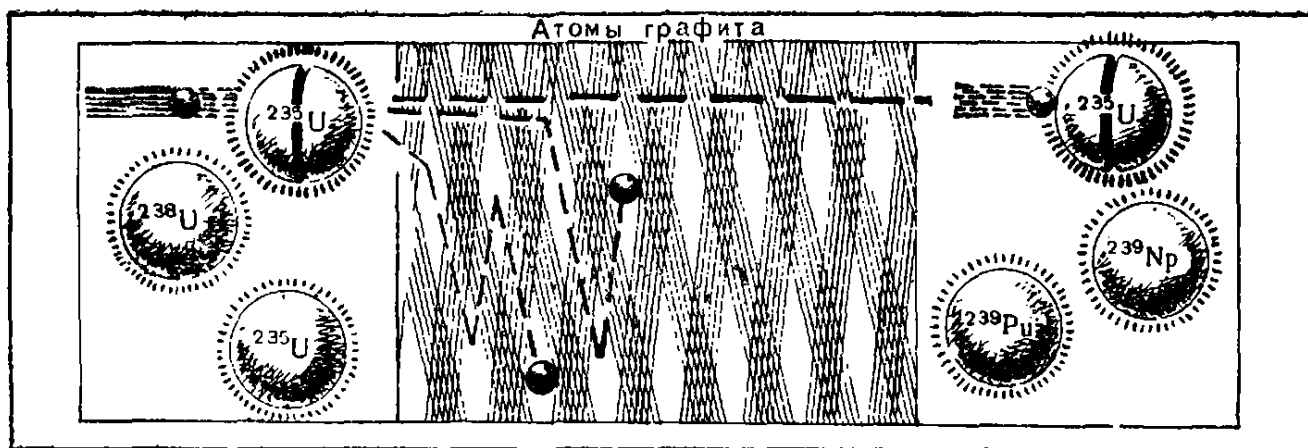
Для более надежной (перекрестной) страховки применяют автоматические сигнализаторы, поднимающие тревогу при достижении любых, заранее установленных уровней излучения.

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 пр.) с кусочками специальной фотопленки, индивидуальные миниатюрные ионизационные камеры, карманные электрометры и т. п.

ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ. ЗАМЕДЛИТЕЛЬ. 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 добавляет ядру избыток энергии около 7 Мэв, что 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

ИОН

ИОНИЗАЦИЯ

ИЗОТОПЫ

ИОН. 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 — атомы некоторых элементов могут потерять один или несколько электронов, расположенных на самых внешних электронных орбитах, атомы других, 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.

ИОНИЗАЦИЯ. Процесс превращения электрически нейтральных атомов в активные ионы называют ионизацией. В подавляющем большинстве случаев процесс ионизации атомов связан с потерей 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 газу приложить внешнее электрическое поле, то в нем начнется

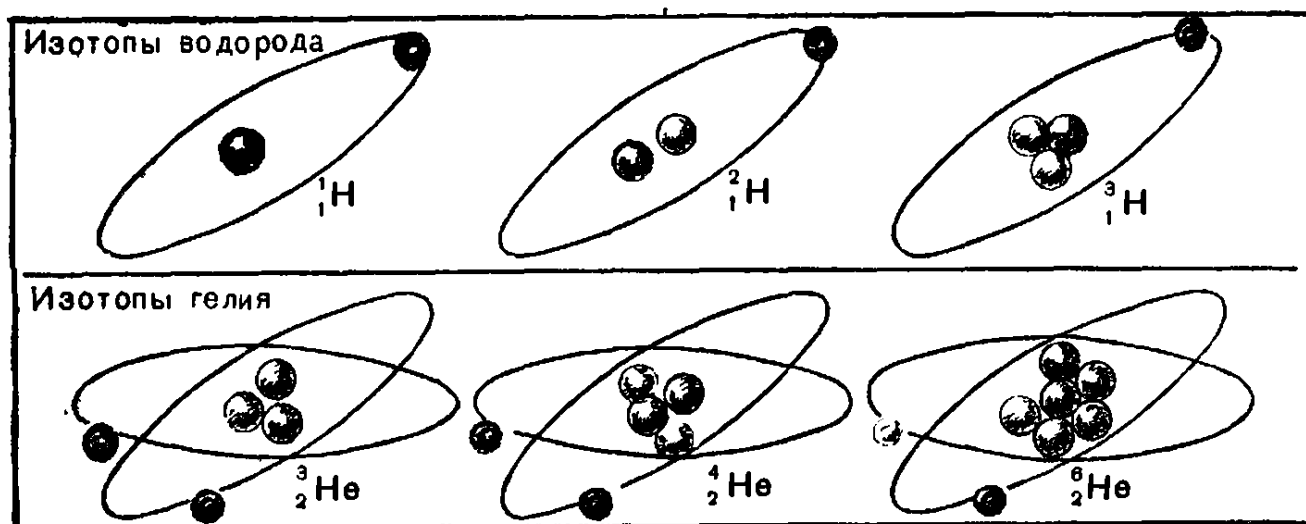
упорядоченное, направленное движение электронов в одну сторону, а положительно заряженных ионов газа в другую сторону, т. е. через ионизированное вещество потечет электрический ток.

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 естественные радиоактивные элементы, ученые столкнулись с некоторыми непонятными явлениями.

Вещества, образующиеся в результате радиоактивного распада, оказывались по своим свойствам совершенно одинаковыми с уже известными химическими элементами, отличаясь от них лишь атомной массой. Например, открытое в 1906 г. вещество — ионий — оказалось идентичным торию, а обнаруженный в следующем году мезоторий — радю. Все виды свинца, получающиеся в конечном результате последовательных распадов цепочек урана, тория и актиния, отличаются друг от друга и от обычного свинца только своей атомной массой. Поэтому в процессе постепенного уточнения таблицы элементов Менделеева приходилось в одни и те же клетки помещать уже несколько видов атомов элементов с совершенно одинаковыми химическими свойствами, но различных по массе. Такие атомы-близнецы стали называть **и з о т о п а м и** (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 бессильно, ибо число электронов на орбитах у них одинаково.



Какое же свойство изотопов одних и тех же элементов можно было бы использовать для их разделения? Только одно — разницу в массе. Но обнаружить ее можно было бы лишь 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 его английского физика (см. *Разделение изотопов*).

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 радиоактивные близнецы открывала 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 одинаковые атомные массы, но различное число положительных зарядов, а следовательно, и принадлежащие атомам разных химических элементов. Известно очень большое число как устойчивых, так и радиоактивных изобар: например, цирконий-96 ($^{96}_{40}\text{Zr}$), молибден-96 ($^{96}_{42}\text{Mo}$), рутений-96 ($^{96}_{44}\text{Ru}$). У них у всех одинаковая атомная масса (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 1,3 мин, 21 мин и 53,7 суток.

ИОД РАДИОАКТИВНЫЙ. Природный иод — химический элемент VII группы Периодической системы Д. И. Менделеева с порядковым номером 53 и атомной массой 126,9 ($^{127}_{53}\text{I}$) 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 получен целый набор 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 пригодны радиоактивные изотопы иод-125 и иод-131, обладающие периодами полураспада 56 и 8 дней соответственно. Концентрация в щитовидной железе может быть довольно точно измерена извне с помощью обычных дозиметров, чувствительных к гамма-излучению этих изотопов.

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 клетки железы.

При взрыве в атмосфере атомных бомб в выпадающих радиоактивных осадках есть и долгоживущие изотопы иода. Попадая в организм людей и животных, они могут вызывать лучевую болезнь, а при значительных концентрациях — их гибель.

ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА. Если в сосуд, содержащий некоторое количество ионизированного газа, ввести два противоположно заряженных электрода источника напряжения, то положительно заряженные ионы начнут двигаться к отрицательному электроду источника, а отрицательные ионы (электроны) к положительному. На этом принципе и основан самый простой прибор для ядерных исследований — ионизационная камера. Пролетающая через камеру заряженная частица ионизирует некоторое количество атомов газа, а образующиеся при этом ионы под действием электрического поля собираются на соответствующих электродах. По показаниям электрометра и судят о количестве прошедших через камеру частиц или о величине их заряда.

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

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.

Очень заманчива здесь возможность сначала превратить в низкотемпературную плазму, т. е. ионизировать, газообразное топливо, а затем ускорить полученные ионы до ско

ростей, соизмеримых 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. 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, 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 ионизирующих 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 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 (см. *Камеры регистрационные*).

К-ЗАХВАТ. Помимо двух видов самопроизвольного (естественного) распада ядер атомов радиоактивных веществ, сопровождающихся испусканием бета-частиц (см. *Бета-распад*), в ряде случаев наблюдается еще один, совершенно иной вид распада, с испусканием нейтрино, названный *К*-захватом. Это происходит, когда ядро возбужденного атома захватывает один из своих собственных электронов, вращающихся вокруг него на ближайших к ядру орбитах, чаще всего с орбиты, обозначаемой латинской буквой *K*. Втянутый в ядро электрон немедленно исчезает, соединяясь с одним из протонов, который превращается в нейтрон. В результате такого захвата ядро атома становится ядром атома элемента, имеющего порядковый номер в периодической таблице элементов на единицу меньше (исчез один положительный электрический заряд его ядра), но с прежним массовым числом, так как протон просто превратился в нейтрон, т. е. становится ядром-изомером совсем другого элемента (см. *Изомеры ядерные*). Например, ядро атома бериллия-7, состоящее из 4 протонов и 3 нейтронов (всего 7 нуклонов), захватив с орбиты *K* свой же электрон, становится ядром атома лития-7, состоящего из 3 протонов и 4 нейтронов (тоже 7 нуклонов).

Поскольку при *K*-захвате с электронной оболочки атома исчезает (а не просто удаляется) один из его электронов, такой процесс превращения ядра атома одного элемента в другой сопровождается испусканием кванта рентгеновского излучения и нейтрино.

КВАНТЫ. ТЕОРИЯ КВАНТОВ. Хотя поведение света, рентгеновского и гамма-излучений 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 физических явлениях и при взаимодействии атомов вещества энергия выделяется и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями. Такая порция энергии позднее получила название **к в а н т**.

Следовательно, поглощение кванта рентгеновского и гамма-излучений различными веществами, а также испускание света возбужденными атомами, например нагретого до высокой температуры вещества, происходит также строго определенными конечными порциями — квантами. Мерой энергии кванта Планк считал величину, получаемую по формуле

$$E = h\nu,$$

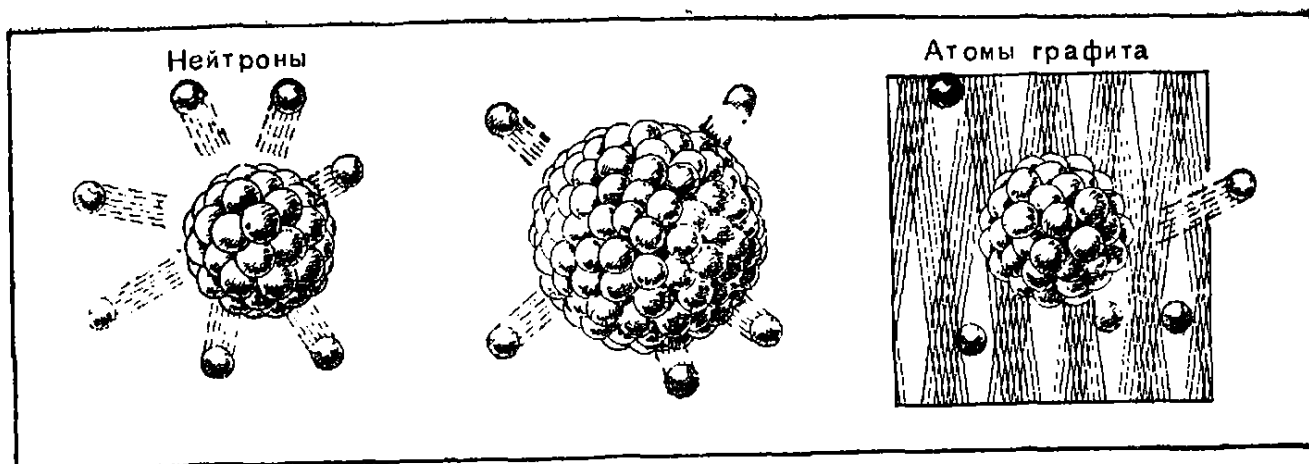
где E — энергия, *эрг*; ν — частота колебаний источника излучения, *сек*⁻¹; h — некоторая постоянная величина, равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек* (см. *Планка постоянная*). Из этого выражения следует, что чем выше частота электромагнитного излучения, тем большую энергию несет с собой каждый квант излучения.

Ф о т о э ф ф е к т — физический процесс, при котором падающие на металлическую поверхность кванты света при достаточной их энергии выбивают из металла электроны.

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

КРИТИЧЕСКАЯ МАССА (ЯДЕРНОГО ГОРЮЧЕГО). Хорошо известно, что практически поджечь и заставить гореть маленький кусочек угля невозможно. В то же время большая куча угля горит преотличным образом. Причина этого, казалось бы, непонятого противоречия заключается в том, что химическая реакция горения топлива, идущая при $500\text{--}600^\circ\text{C}$, 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 $0,3\text{ см}^{-1}$, в то время как у шарика диаметром 2 см это же соотношение будет равно 3 см^{-1} , 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 велики, что самоподдерживающейся реакции горения не получится. Нужен какой-то определенный минимальный физический объем топлива, который назовем **к р и т и ч е с к и м**.

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 восемь новых нейтронов и т. д.

Однако 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 десятитриллионную долю объема горошинки урана. Чтобы представить такой объем, можно сравнить шарик объемом 1 мм^3 с объемом высотного здания. При таком соотношении 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 массой в несколько десятков килограммов, т. е. сферу диаметром 25—30 см, то вероятность вылета нейтронов, не задевших по пути ядер атомов урана, будет сведена 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 возвращать нейтро-

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

Следовательно, для осуществления цепного процесса в уране необходимо, чтобы его было не меньше определенного критического количества. Для конкретных условий возникновения саморазвивающейся цепной реакции деления критическая масса может иметь разные значения. Или иначе: критическая масса, при которой начинается цепная реакция деления, — это то минимальное количество ядерного горючего, при котором каждое данное поколение нейтронов, осуществив деление определенного количества ядер атомов урана или плутония, вызывает в свою очередь появление следующего поколения, насчитывающего такое же или несколько большее количество нейтронов, т. е. когда потери нейтронов в нем вследствие утечки или поглощения примесями оказываются полностью восполненными.

КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ. При делении ядра атома урана-235 на два осколка (элементы, приходящиеся на середину Периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева) высвобождаются два-три (в среднем 2,1) нейтрона, т. е. количество делящихся ядер будет удваиваться 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. Компенсировать 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 помогают 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) при условии, что 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, 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 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—2,1, т. е. количеству нейтронов, выброшенных разделившимся ядром ура-

К

на-235. В 1 кг 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 миллионную 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 коэффициенте размножения $K < 1$ цепная реакция невозможна, а если бы и началась, то неминуемо затухла.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ. Вслед за открытием в 1895 г. рентгеновского, а за ним и ионизирующего излучений ученые задались вопросом: 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, ядрами 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

миллиарды 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 почти 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 частицы 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 сокровеннейшими тайнами материи (см. *Элементарные частицы*).

КАДМИЙ — химический элемент с атомным номером 48 II группы периодической системы с атомной массой 112,40. Природный кадмий состоит из смеси 8 изотопов с атомными массами от 108 до 116. Обладает исключительно большой

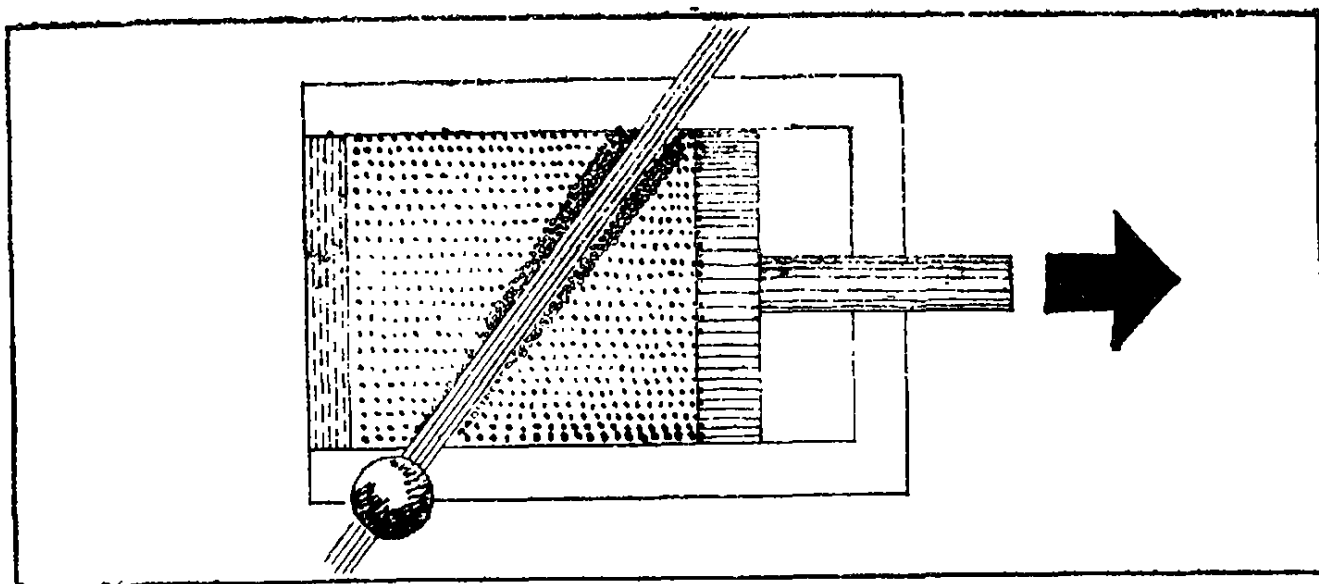
способностью захватывать тепловые (медленные) нейтроны (кадмий-112), что позволяет применять его для изготовления или покрытия регулирующих и аварийных стержней в ядерных реакторах. Несмотря на большую поглощающую способность, для защиты от нейтронов не применяется, так как их поглощение кадмием сопровождается испусканием проникающего гамма-излучения. Большое количество радиоактивных изотопов кадмия получается в виде продуктов деления урана-235, а также при облучении в ядерных реакторах.

K-МЕЗОНЫ — сильновзаимодействующие с атомными ядрами, неустойчивые, короткоживущие заряженные и нейтральные элементарные частицы, масса которых равна 966,5 и 974 электронным массам. Рождаются при столкновении пи-мезонов или нуклонов большой энергии (свыше миллиарда электронвольт) с нуклонами.

Заряженные K -мезоны (K^+ и K^-) обладают электрическим зарядом, равным по величине положительному или отрицательному элементарному электрическому заряду. Время жизни заряженных K -мезонов $1,23 \cdot 10^{-8}$ сек. Известны две разновидности нейтрального K -мезона: K_1^0 со временем распада $0,92 \cdot 10^{-10}$ сек и K_2^0 со временем распада $5,62 \cdot 10^{-8}$ сек.

Распадаются K -мезоны разными путями с образованием пи- или мю-мезонов, электронов или позитронов, а также нейтронов. При поглощении K -мезонов нуклонами образуются сигма-гипероны (см. *Элементарные частицы*, «Странные» 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. Вот главные из богатого арсенала подобных устройств: 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 сопровождается возникновением микроскопического электрического разряда, и многие другие.



КАМЕРА ВИЛЬСОНА. Успехи в конструировании счетчиков заряженных частиц поставили перед учеными такую задачу: попытаться каким-либо способом «увидеть» частицы, составляющие 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 вопросами: 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 не заметны, так как отдельные молекулы пара распределены в воздухе равномерно и не изменяют его однородности, как не видны 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 сначала в мелкие капельки, образующие «пар» и облака, а затем в более крупные капли, которые выпадают 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 молес-

кулы 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 центрами конденсации водяного пара. Из капелек жидкости получаются цепочки (треки).

Камера состоит из стеклянного цилиндра с подвижным поршнем, заменяющим дно, и заполнена парами испаряющейся жидкости, например спирта. Если очень быстро опустить поршень, то давление, а следовательно, и температура пара в камере резко понизятся, вследствие чего в ней 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, мгновенно 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, а внутри камеру и поршень покрыть черной матовой краской. Если одновременно опустить поршень и осветить камеру яркой вспышкой света, следы пролетевших 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 пре-

делах камеры, можно найти полное число пар ионов, образованных пролетевшей исследуемой заряженной частицей. А зная энергию, необходимую для образования 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, предложившие 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 разлетающихся в результате таких столкновений заряженных частиц.

КАРОТАЖ РАДИОИЗОТОПНЫЙ (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. 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.

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-излучение, испускаемое различными слоями пород и легко проходящее сквозь обсадные трубы, и записав его энергию и продолжительность, можно, сравнивая эту запись с заранее измеренными образцами пород, составить исключительно точный геологический разрез скважины любой глубины.

Однако нефтяные и водоносные пласты гамма-излучения не испускают, и о его наличии часто приходится только га-

дать. Поэтому пассивный метод исследования можно заменить активным. Для этого в скважину опускают довольно сильный источник нейтронов (нейтронный каротаж). В результате интенсивного обстрела нейтронами атомы элементов, из которых состоят минералы горных пород, становятся радиоактивными и начинают испускать — одни больше, другие меньше — гамма-кванты.

Установленный на некотором расстоянии от источника нейтронов приемник гамма-излучений улавливает и измеряет уже не естественную, а искусственную радиоактивность горных пород.

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

КВАРКИ. Обилие элементарных частиц, открываемых по мере ввода в действие ускорителей частиц все больших и больших мощностей, сначала только радовало ученых. Когда же количество относительно устойчивых и более или менее достаточно изученных частиц перевалило за три десятка, а короткоживущих частиц со временем жизни порядка 10^{-22} — 10^{-23} сек — за двести, в умах озадаченных ученых возникли сомнения: не состоят ли все эти частицы, и в первую очередь короткоживущие резонансы, из небольшого числа (2—3) еще более мелких — субэлементарных частиц, отличающихся только тем, что они находятся в каком-то особом, сверхвозбужденном или ином состоянии? К такому выводу, в частности, пришел известный американский физик, лауреат Нобелевской премии Мюррей Гелл-Ман, предложивший гипотезу о том, что все или по крайней мере большинство из открытых субатомных частиц могут быть скомбинированы всего из трех еще более простых частиц. Это позволяет не только расположить все уже известные и предсказываемые теорией частицы в логически стройную и свободную от противоречий и неожиданностей систему, но и вывести теорию элементарных частиц из тупика. Эти три частицы Гелл-Ман шутливо назвал «кварками». Самое удивительное в кварках то, что они должны иметь дробный электрический заряд в отличие от элементарного заряда электрона (-1) или протона ($+1$) и их производных, кратных этим зарядам. Несмотря на всю теоретическую заманчивость этой, весьма убедительной, стройной и привлекательной гипотезы, обнаружить кварки пока еще не удалось ни в одной из ведущих лабораторий мира. В частности, это обосновывается тем, что каждый кварк должен обладать огромной и трудно вообразимой для элементарных частиц массой — в десять раз большей, чем масса протона, и чтобы осуществить реакцию, способную породить

эту частицу из трех кварков (30 протонных масс), нужны новые ускорители частиц с энергией порядка многих тысяч миллиардов электронвольт.

КЕЛЬВИНА ШКАЛА (шкала абсолютных температур Кельвина — $^{\circ}\text{K}$). Вместо температурной шкалы Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), принятой в европейских странах, и Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) — в Англии и США, при научных исследованиях применяется как более предпочтительная так называемая шкала абсолютных температур ($^{\circ}\text{K}$), предложенная английским физиком У Томсоном (лорд Кельвин).

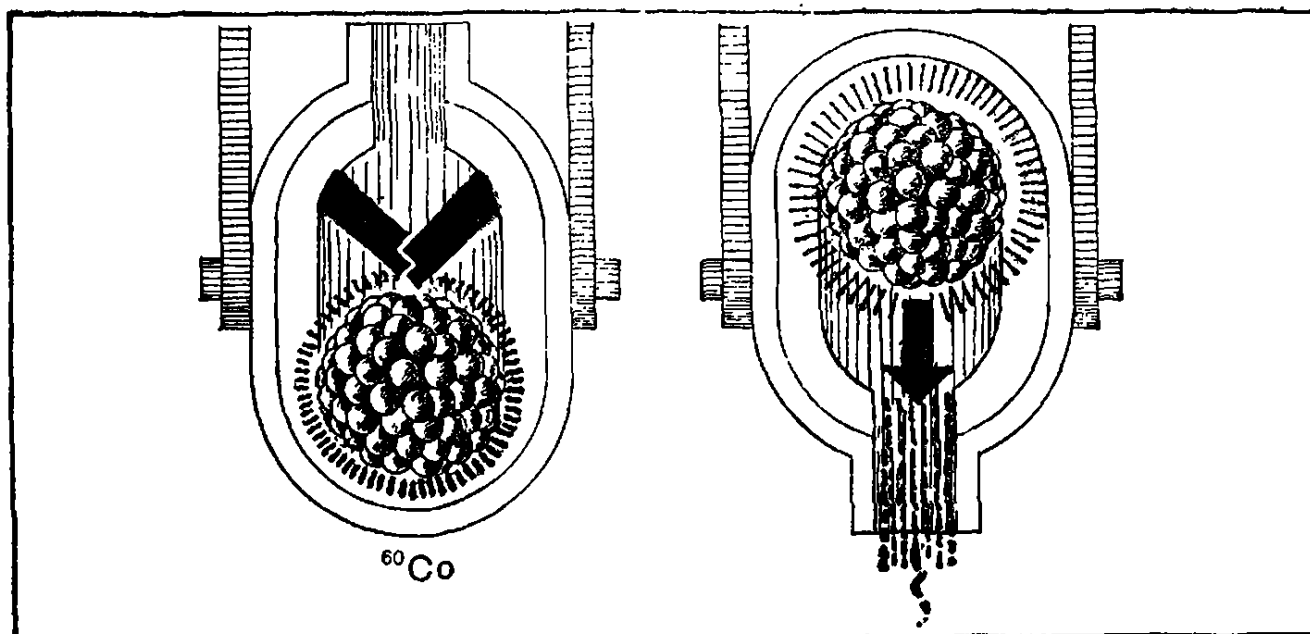
В этой шкале за нуль отсчета принята самая низкая, какая только возможна в природе, температура, соответствующая такому теоретическому состоянию вещества, при котором полностью прекращается движение его молекул. Это значение было получено после изучения свойств газов, находящихся при нулевом давлении. По шкале Цельсия абсолютному нулю соответствует температура $-273,16^{\circ}$. Значение градуса по абсолютной шкале температур такое же, как и по шкале Цельсия, т. е. равно $1/100$ интервала между точкой таяния льда ($273,16^{\circ}\text{K}$ или 0°C) и точкой кипения воды при нормальных атмосферных условиях ($373,16^{\circ}\text{K}$ или 100°C).

КОБАЛЬТ — тугоплавкий металл, нашедший широкое применение в металлургии для получения жаропрочных и магнитных сталей и сплавов, а также 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 ($^{59}_{27}\text{Co}$). К

Кобальт, облученный потоком нейтронов в ядерном реакторе, превращается в искусственный радиоактивный изотоп кобальт-60 ($^{60}_{27}\text{Co}$) с периодом полураспада 5,25 года, который испускает гамма-кванты 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 толстых 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 и для стерилизации лекарств и медицинской аппаратуры; в сельском хозяйстве — для борьбы с прорастанием картофеля, для уничтожения вредителей, для стимуляции роста растений.

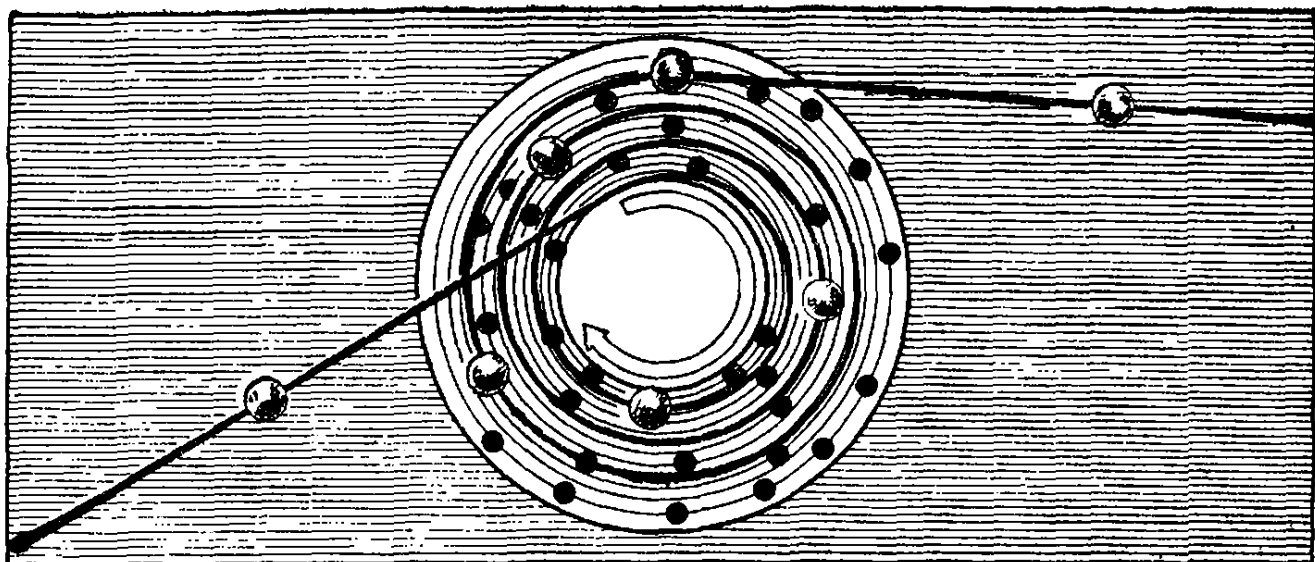
КОБАЛЬТОВАЯ ПУШКА. Чтобы задержать гамма-излучение, испускаемое радиоактивным кобальтом-60 (с энер-



гией 1,17 и 1,33 $Mэв$), сделать его безопасным 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 формирования узкого пучка гамма-квантов называли кобальтовой пушкой.

КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ («КОЛЬЦЕТРОН»). Во всех до сих пор существующих и проектируемых ускорителях заряженные частицы разгоняются внешними электрическими или магнитными полями. Существенное увеличение энергии этих внешних полей связано, как правило, с резким ростом размеров и стоимости ускорителей. Длина орбиты Серпуховского ускорителя на 70 млрд. $эв$ равна 1,5 км, а в ускорителе на 1000 млрд. $эв$ длина пробега частиц увеличилась бы до 20 км. Поэтому нет ничего удивительного в том, что ученые упорно ищут новые пути и способы ускорения частиц и, в частности, один из таких способов — ускорители на встречных пучках.

Еще в 1956 г. академик В. И. Векслер предложил тонко подмеченный им новый, в то время казавшийся фантастическим и нереальным, метод. Когда быстрая, обладающая огромным запасом кинетической энергии частица космического излучения врывается в атмосферу Земли и сталкивается с какой-либо частицей воздуха, она передает этой частице всю или часть своей энергии, а сама или останавливается или замедляется. Но можно этот процесс рассматривать и по-



другому. Если привести в движение окружающую неподвижную частицу среду, то она увлечет с собой и частицу, и та в конце концов приобретет скорость среды.

В свое время это явление на примере эффекта Вавилова — Черенкова объяснил и рассчитал академик И. Е. Тамм. Ну а какую среду (также состоящую из каких-то частиц) выбрать, чтобы, с одной стороны, разогнать ее до предельно возможной скорости, а с другой, чтобы она смогла увлечь за собой достаточно тяжелую заряженную частицу. Естественно, выбор мог остановиться на потоке электронов, легче всего разгоняемых до самой близкой к световой скорости, а в качестве «обдуваемых» частиц — сгусток положительно заряженных ионов, например протонов.

Этот удивительный по замыслу способ ускорения обладает тем преимуществом, что тяжелые частицы ускоряются не внешним электрическим полем, а полем, образующимся внутри между коллективами заряженных частиц — среды и собственно ускоряемыми частицами. Эти поля не нужно создавать искусственно, не нужно настраивать и корректировать. Они возникают сами при взаимодействии частиц именно там, где нужно и как нужно.

Но от идеи даже, казалось бы, гениально простой, до ее реализации дистанция долгая. Начатую в 1963 г. в Дубне работу по созданию нового ускорителя после смерти академика В. И. Векслера продолжил его ученик В. П. Саранцев. Ускоритель должен состоять из источника разгоняемых электронов, устройства, формирующего их сгусток, содержащий увлекаемые внутрь тяжелые частицы, и системы, ускоряющей весь сгусток. Положительно заряженные ионы оказываются как бы запертыми коллективным отрицательным зарядом

электронов, поэтому этот метод ускорения и называется коллективным. Если теперь этот комбинированный сгусток ускорить как целое, то за счет скорости, приобретенной огромным количеством электронов, запертые внутри сгустка ионы, например протоны, ускоренные до скорости сгустка электронов, получают в 40 раз большую энергию.

Сгусток (импульс) электронов, длящийся около 10^{-12} сек, ускоряется небольшим внешним электрическим полем, а тяжелые ионы в соотношении примерно 1:100 увлекаются этим сгустком, как «барашки», бегущие по ветру на гребне морских волн.

Система действует в том случае, если количество электронов в сгустке довольно велико — 10^{13} — 10^{14} , что примерно соответствует напряжению в 10 млн *в/см* — в 20 раз больше, чем в обычном ускорителе. Приблизительно 2/3 затрачиваемой на ускорение энергии падает на долю электронов, 1/3 приходится на долю ионов.

А как все-таки удастся удержать частицы на своих местах в сгустке, предотвратить их смешивание?

При очень больших скоростях параллельно летящих электронов взаимодействуют не только их электрические поля, но и магнитные. А это означает, что они не только отталкиваются друг от друга как одноименные заряды, но и в значительной степени притягиваются друг к другу.

Для пучка с энергией электронов в 5 *Мэв* силы расталкивания ослабляются в 100 раз. И если в такой пучок добавить 1% ионов, то силы расталкивания будут полностью скомпенсированы, что и используется при формировании сгустка в виде вращающегося по всей длине окружности кольца диаметром примерно до 4—10 *см*, что послужило поводом американцам шутливо назвать такой ускоритель «смокотроном», т. е. генератором колец сигаретного дыма.

Длина линейного коллективного ускорителя ионов на энергию 1000 млрд *эв* будет не больше 1,5 *км*. Кольцевой синхрофазотрон на эту же энергию имел бы диаметр около 5 *км*.

КРИПТОН — химический элемент (инертный газ) VIII группы Периодической системы элементов с атомным номером 36 и атомной массой 83,80.

Природный газ состоит из смеси 6 изотопов с атомной массой от 73 до 86. Еще большее количество, но только радиоактивных изотопов криптона может быть получено искусственным путем, так как ядра атомов криптона составляют значительную часть осколков, на которые распадаются ядра атомов делящихся веществ при цепной реакции деления в ядерном реакторе (см. *Продукты деления урана*).

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

КСЕНОН (в пер. с греч. «чужой») — химический элемент с атомным номером 54 VIII группы периодической системы элементов. Очень редкий тяжелый инертный газ. В 1 м³ воздуха содержится всего лишь 0,08 мл ксенона. Природный газ состоит из смеси 9 изотопов (см *Изотопы*) с атомными массами от 124 до 136. При делении в ядерном реакторе урана-235 в числе более чем 200 изотопов различных химических элементов образуется и 10 радиоактивных изотопов ксенона с атомными массами от 131 до 145, составляющих до 19% общей суммы осколков.

Когда в 1943 г. в США был пущен в эксплуатацию первый промышленный ядерный реактор, было обнаружено, что, спустя сравнительно непродолжительное время, мощность реактора неожиданно начинала падать, и чтобы «подстегнуть» ценную реакцию, приходилось раньше положенного времени постепенно выводить из него регулирующие стержни. Наконец, даже при полностью выведенных стержнях, реактор останавливался.

Спустя сутки или двое реактор так же необъяснимо начинал работать, а затем останавливался снова. Так могло повторяться несколько раз, и, чтобы запустить его в работу, приходилось загружать в реактор дополнительные порции урана.

Оказалось, что два радиоактивных изотопа — ксенон-133, а особенно ксенон-135, составляющие около 0,5% осколков урана-235, являются сильнейшими поглотителями тепловых нейтронов, и накопление их изотопов в продуктах деления постепенно «отравляет» реактор, вызывая необходимость смены тепловыделяющих элементов задолго до выгорания в них урана-235.

В природе ксенон образуется в результате самопроизвольного распада содержащихся в минералах изотопов урана-235 и урана-233. На этом, в частности, основан один из методов определения возраста горных пород. Зная период полураспада урана-235 ($4,5 \cdot 10^9$ года) и урана-238 ($4,5 \cdot 10^9$ года), можно, определив соотношение количества образовавшегося в том или ином минерале ксенона к оставшемуся количеству урана, вычислить абсолютный возраст данного минерала.

КСИ-ГИПЕРОН (Ξ) — тяжелая короткоживущая элементарная частица. Известны два вида частицы: нейтральный кси-гиперон с массой, равной примерно 2656 массам электрона, и временем жизни $3,06 \cdot 10^{-10}$ сек и отрицательный кси-гиперон с массой около 2580 электронных масс и временем жизни $1,74 \cdot 10^{-10}$ сек.

КЮРИ — единица измерения естественной или искусственной радиоактивности — количество любого радиоактивного вещества, претерпевающее 37 млрд. актов распада 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)

Масса того или иного вещества, обладающего радиоактивностью, равной одному кюри, зависит от периода его полураспада. Например, один кюри стронция-90 весит менее 1/100 г, в то время как один кюри природного урана-238 — больше тонны.

Л

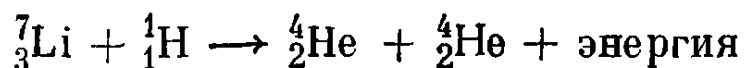
ЛЕГКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ЛИТИЙ

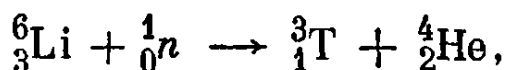
ЛЕГКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ — условное название группы химических элементов от водорода до кислорода включительно, в ядрах атомов которых количество нейтронов не превышает число протонов.

ЛИТИЙ — химический элемент первой группы периодической системы Менделеева. Порядковый номер 3, атомная масса 6,94. Щелочной одновалентный, очень легкий металл с температурой плавления около 180°C , серебристо-белого цвета, очень мягкий. Встречается в природе в составе многих минералов. При нагревании на воздухе загорается при 200°C . 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

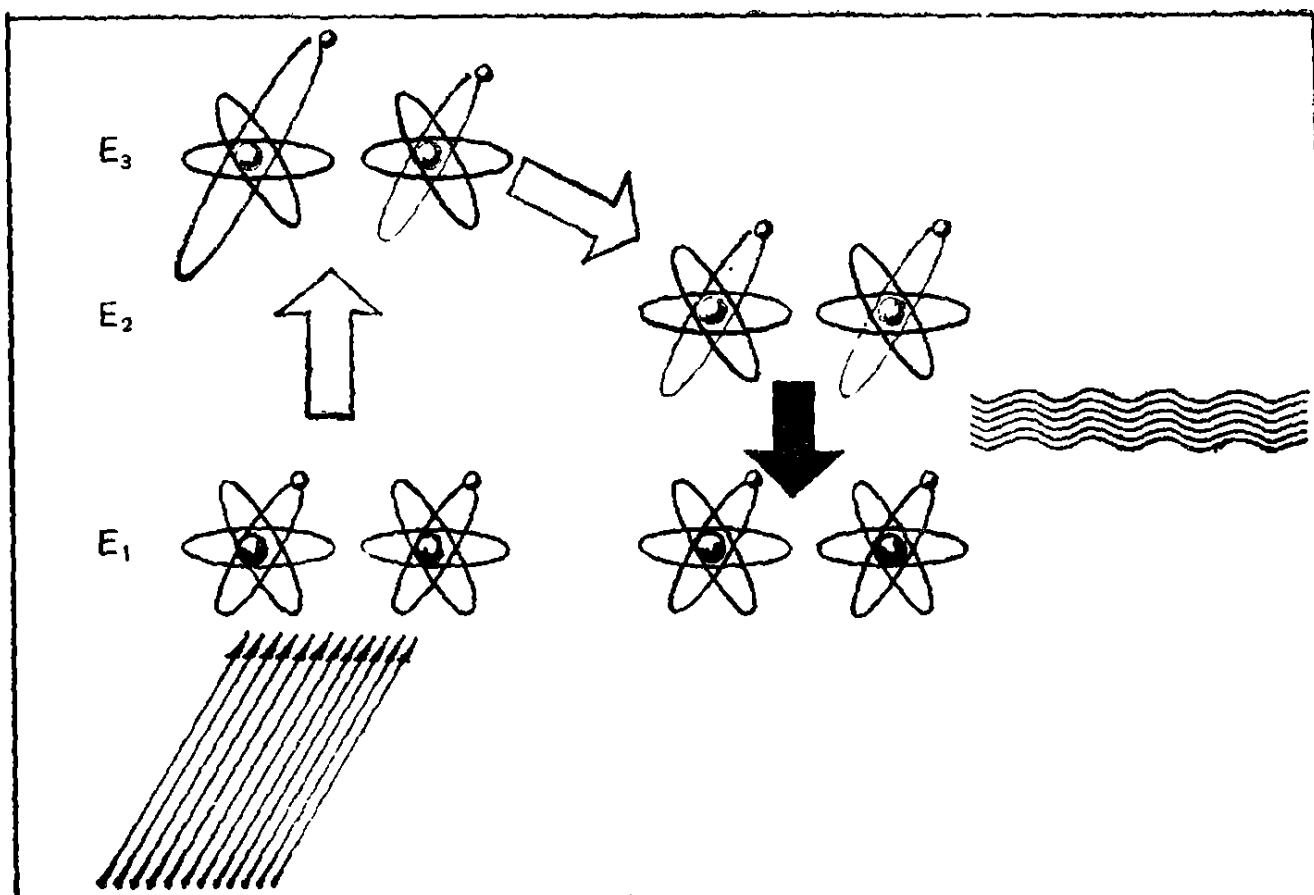


в результате которой получается радиоактивный изотоп сверхтяжелого водорода — тритий.

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.

ЛАЗЕР. Преобразование любого вида энергии, в частности электрической, в энергию световых волн (электромагнитных колебаний) отличается крайне низким коэффициентом полезного действия. Даже у самых высокоэкономичных специальных осветительных ламп он едва достигает 3—5%, а у газосветных источников света 20—25%. При этом лучи света от каждой точки нагретого до высокой температуры тела распространяются во все стороны, их колебания складываются и вычитаются друг из друга — интерферируют, и даже если все эти лучи сконцентрировать при помощи зеркальных рефлекторов в параллельный луч, яркость луча, вследствие несовпадения электромагнитных колебаний (так называемой некогерентности волн), оказывается относительно слабой. Это и ограничивало долгое время возможности использования луча света для целей дальней оптической связи, ибо луч света даже от самого мощного прожектора распространяется лишь на 20—30 км.

Однако разработанная в последние годы техника усиления света путем стимулирования излучения и основанные на этом явлении устройства, так называемые лазеры, открыли захватывающие дух перспективы их применения буквально во всех областях современной науки и техники. Лазерные устройства излучают когерентный свет — свет, лучи которого могут распространяться на огромные расстояния. А так как эти устройства позволяют получать вспышки света, хо-



тя и длящиеся миллионные и миллиардные доли секунды, но баснословно огромной мощности — до 8 млрд. *вт* в импульсе, — то такой строго параллельный и узко направленный луч света может распространяться на поистине космические расстояния. Например, направленный на Луну луч, отразившись от ее поверхности, возвращается на Землю и может быть зафиксирован особо чувствительными приемниками.

Сосредоточенный на очень малом объеме какого-либо вещества, лазерный луч способен мгновенно его расплавить — например прожечь отверстие в стальном изделии или алмазе.

Основой прибора служит прозрачный стержень из материала типа рубина. Торцы стержня строго параллельны и хорошо отполированы. Эти плоскости отражают внутрь возбуждаемый определенным образом в кристалле свет, а часть его пропускают наружу. Вокруг кристалла располагают очень мощный источник белого света. Вспышки света в нем получают с помощью разряда высоковольтного конденсатора большой емкости в лампу с ионизированным газом. Порожденный этими вспышками в кристалле луч красного света излучается через один из торцов в виде пучка строго

параллельных, когерентных лучей и в этом отношении аналогичен электромагнитной волне, излучаемой антенной радиопередатчика:

Существуют также газовые лазеры, в которых специально подобранный газ, помещенный в трубке, заменяет кристалл рубина. Эту же роль могут выполнять и растворы некоторых химических веществ.

ЛАМБДА-ГИПЕРОН (Λ) — короткоживущая нейтральная элементарная частица с массой, равной 2182 массам электрона, и временем жизни около $2,62 \cdot 10^{-10}$ сек.

ЛЕПТОНЫ — группа элементарных частиц, отличающихся слабым взаимодействием с другими элементарными частицами. В эту группу входят электроны, мю-мезоны и нейтрино двух видов (см. *Взаимодействие частиц*).

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, в которых частицы разгоняются полем, создаваемым относительно слабыми последовательными импульсами переменного высокочастотного электрического поля (см. *Ускорители*). Л

ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ — заболевание, вызываемое внешним действием на организм ионизирующих альфа-, бета-, гамма-излучений или потока нейтронов, а также при попадании радиоактивных веществ внутрь организма (внутреннее облучение). В первую очередь при этом страдают кровеносные органы, слизистые оболочки и железы внутренней секреции.

«ЛЮДМИЛА» — одна из самых больших в мире пузырьковых жидководородных камер для исследования частиц очень высоких энергий. Построена в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубне при участии ученых социалистических стран для экспериментов с пучками частиц, получаемых от Серпуховского ускорителя.

Камера длиной 2 м заполнена охлажденным водородом при температуре -247°C и весит со всем вспомогательным оборудованием около 100 т, включая магнит весом 650 т создающий магнитное поле напряженностью 26 тыс. эрстед. Камера может работать трижды в 1 сек. Сложная установка

для автоматического фотографирования следов частиц и ядерных реакций состоит из четырех фотокамер, фиксирующих события в камере на разных уровнях. Камера вступила в строй 14 января 1972 г. (см. Пузырьковая камера).

М

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ (СИЛЬНЫЕ И СВЕРХСИЛЬНЫЕ)
МЕДЛЕННЫЕ (ТЕПЛОВЫЕ) НЕЙТРОНЫ
МЕЗОНЫ
МЕЧЕННЫЕ АТОМЫ

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ (СИЛЬНЫЕ И СВЕРХСИЛЬНЫЕ). Увеличение энергии частиц, получаемых на современных ускорителях, связано с ростом площадей, занимаемых вакуумными каналами таких устройств, а установка и настройка каналов требует буквально астрономической точности. В ускорителях используются мощные магнитные поля, для получения которых строятся дорогостоящие сооружения. А темпы развития науки обгоняют темпы сооружения таких гигантов. Мощность Серпуховского ускорителя, разгоняющего частицы до энергии 70—76 млрд. эв, в ряде случаев уже не удовлетворяет пожеланиям ученых — требуются энергии уже в сотни и даже тысячи миллиардов электрон-вольт. Ускоритель в г. Беркли (США), ускоряющий частицы до 6,2 млрд. эв, имеет диаметр 34 м; ускоритель в г. Дубне на 10 млрд. эв — уже 60 м; ускоритель ЦЕРНа в г. Женеве — 200 м. Диаметр Серпуховского гиганта — 470 м. Чтобы достичь энергии частиц в 1000 млрд. эв, а проекты таких сверхгигантов уже разрабатываются, диаметр его кольца должен быть порядка 10 км и, наконец, ускоритель на 300 тыс. млрд. эв должен был бы иметь 4 тыс. км в окружности. Поэтому ученые ищут новые пути и ме-

тоды ускорения частиц (см. *Встречные пучки*). Однако размеры обычных ускорителей можно значительно уменьшить, увеличивая напряженность магнитного поля. Чем мощнее поле, тем меньше диаметр ускорителя. При температуре, близкой к абсолютному нулю ($4-20^{\circ}\text{K}$), электрическое сопротивление некоторых металлов и сплавов исчезает, и они становятся сверхпроводниками (см. *Сверхпроводимость*). Так как напряженность магнитного поля зависит от мощности тока, питающего обмотки электромагнитов, то уже сейчас можно конструировать электромагниты со сверхпроводящими обмотками (охлаждаемыми сжиженными газами — гелием, водородом и пр.), создающими магнитные поля напряженностью от 60 до 100 тыс. э, а в ряде случаев (при «ударных» или «взрывных» нагрузках) и в миллионы эрстед. Это, в свою очередь, дает возможность в 5—10 и более раз уменьшить диаметр и размеры ускорителей.

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 деления, 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 та-

ком 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.

МЕЗОНЫ — элементарные частицы, масса которых лежит между массами электронов и протонов. Их обнаруживают в космических лучах и получают искусственно при взаимодействиях частиц больших энергий. 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 меняется в пределах от 10^{-6} до 10^{-16} сек.

Известны следующие разновидности мезонов: положительные и отрицательные μ -мезоны с массой, равной 206,7 электронной массы; положительные, отрицательные и нейтральные π -мезоны с массой в 273,2 раза больше массы электрона. У нейтральных π -мезонов несколько меньшая масса (264,2). Положительные, отрицательные и нейтральные K -мезоны имеют массу в 966,5 и 974 раза больше массы электрона.

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

МЕЧЕННЫЕ 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. Metallур-

гу, например, важно знать, почему даже небольшие примеси серы делают металл хрупким, непрочным. Но вот к металлу добавили небольшое количество радиоактивного изотопа серы. Изучение фотографических отпечатков, полученных под действием бета-частиц, испускаемых такими мечеными атомами, показывает, что примеси серы располагаются, главным образом, по границам 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 в зависимости от толщины, плотности, количества или поглощающих свойств веществ, находящихся между

М

источником излучения и счетчиком. Отсюда несложно сконструировать самые разнообразные приборы и аппараты, определяющие толщину листовых изделий, например стали, цветных металлов, бумаги и чего угодно другого, по сравнению с заранее установленными образцами. 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 листа. 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-излучения огромные слитки металлов и готовые изделия для обнаружения скрытого (внутреннего) брака: раковин, трещин, инородных вкраплений 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 продолжить до бесконечности) более чем достаточно, чтобы представить, какова роль радиоактивных изотопов или, как их называют иначе, меченых атомов.

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. Манипуляторы позволяют держать предметы (пробирки, инструменты, даже крупинки), перемещать их с места на место, переливать жидкости, взвешивать различные вещества, смешивать их и выполнять другие операции.

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 отклоняется. 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. С точки зрения классической механики масса тела не зависит от его движения и остается точно такой же, как и при покое. Согласно же теории относительности, масса движущегося тела больше массы этого 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, соизмеримыми со скоростью света, этот прирост становится уже заметным. 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 раз!

При скорости, равной скорости света, масса тела становится бесконечной, а действующая на тело ускоряющая сила также должна быть бесконечно большой.

Из этого следует, что никакой материальный объект никогда не может достичь скорости света или превзойти ее.

Поэтому со скоростью света могут двигаться только объекты, у которых масса покоя равна нулю. Это означает, что тело с такой массой вообще не может покоиться, а должно всегда двигаться со скоростью света c . Объект с нулевой массой покоя — свет, точнее, кванты света — **ф о т о н ы**.

МАССА ПОКОЯ (собственная масса) — масса атомной частицы, скорость которой равна, или принимается равной, нулю.

МАССОВОЕ ЧИСЛО — число нуклонов (протонов и нейтронов), из которых состоит ядро атома

МЁССБАУЭРА ЭФФЕКТ. Известно, что, поглотив поступившую извне строго определенную порцию энергии, ядро атома приходит в возбужденное состояние — деформируется, пульсирует. Через какое-то время оно испускает гамма-кванты — 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 для измерения 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 изменение хода на 1 сек за 100 000 лет.

Из теории ядерных процессов следует, что приемником, отзывающимся на гамма-кванты определенной 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 совпадения частот (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 излучения. И только в 1958 г. немецкому физiku Р. Мёссбауэру удалось обнаружить существование резонанса между атомами радиоактивного и нерадиоактивного изотопов — же-

леза-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 Доплера, 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 ($300\,000\text{ км/сек}$). 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 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 Доплера) уже при скорости в тысячные доли миллиметра в секунду! Это открывает возможности для совершенно неожиданных применений и позволяет наблюдать явления, которые ранее казались недоступными для экспериментов.

МЕЗОАТОМ (МЕЗОННЫЙ АТОМ). Как известно, обычный атом состоит из положительно заряженного ядра, окруженного оболочкой из отрицательно заряженных электронов, удерживаемых на орбитах электромагнитными силами притяжения.

В принципе вместо электрона вокруг ядра с таким же успехом может вращаться любая иная частица, несущая на себе, так же как и электрон, отрицательный электрический заряд.

Возможными кандидатами на эту роль могут быть и трудно управляемые и неустойчивые отрицательные мезоны и гипероны (см. *Мезон*, *Гиперон*).

Главная трудность в создании такого атома заключается лишь в том, чтобы заставить такую частицу приблизиться к ядру атома на такое расстояние, при котором она может быть им захвачена и удержана на соответствующей орбите, образуя необычную разновидность атома — мезо а т о м. Однако в отличие от электрона частица-дублер выполняет несвойственную ей роль не слишком долго и в конце концов — спустя стомиллионную долю секунды — поглощается ядром, успев за столь короткое время совершить вокруг него миллионы миллионов оборотов. Тем не менее такие экзотические системы были получены искусственным путем с помощью мощных ускорителей частиц и достаточно полно изучены: ядро атома с пи-мезоном на орбите вместо электрона — в 1952 г., с мю-мезоном — в 1953 г., с *K*-мезоном — в 1967 г., и наконец, в 1968 г. впервые был создан атом, на орбите которого вращался отрицательный сигма-гиперон — частица с массой, почти равной массе самого ядра атома, а в 1970 г. был получен атом с антипротоном на орбите.

Все эти частицы значительно тяжелее электрона: мю-мезон — в 206,7 раз, сигма-гиперон — в 2331 раза, поэтому они вращаются на орбитах соответственно в 206,7 и 2331 раза ближе к ядру, чем подмененные ими электроны. В послед-

нем случае трудно даже говорить об орбите, ибо самые тяжелые частицы вращаются уже в пределах самого ядра! Мы знаем, что ядро атома — исключительно плотное тело. Однако плотность еще не означает обязательно непроницаемость. И совершенно не исключается возможность, что мезон может свободно путешествовать внутри ядра, не встречая препятствий своему движению со стороны нуклонов ядра.

По мере сближения с ядром атома такая частица последовательно теряет свою первоначально высокую энергию в виде квантов рентгеновского излучения, переходя с одного уровня на другой, и поглощается ядром атома.

В свою очередь, вместе с уменьшением расстояний между орбитами таких атомов, собственно, сокращается и длина волны, излучаемой при перескоке отрицательной частицы с одной орбиты на другую. Если на месте электрона оказывается мю-мезон, то все орбиты и соответственно длины волн излучения возбужденного атома сокращаются тоже в 206,7 раза. Поэтому вместо спектра видимого света, мезоатом излучает очень мягкие рентгеновские лучи.

Изучение таких атомов вследствие необычных форм взаимодействия тяжелых орбитальных частиц с частицами (нуклонами), из которых складывается ядро атома, дает в руки исследователей новое средство для изучения взаимодействия элементарных частиц и их структуры.

«МИРАБЕЛЬ» — одна из самых больших в мире пузырьковых жидководородных камер, служащих для исследования частиц особо высоких энергий. Разработана и изготовлена во французском центре атомных исследований в Сакле для совместных исследований на самом мощном в мире ускорителе частиц в Серпухове по плану советско-французского научно-технического сотрудничества. Вес всей установки достигает 3000 т. Один только электромагнит, окружающий сердце прибора — саму камеру, весит около 1000 т. Емкость камеры длиной 4,5 и диаметром 1,6 м — около 10 тыс. л охлажденного до температуры -247°C водорода.

Ускоренные до 70 млрд. эв частицы направляют в камеру через специальный канал длиной в полкилометра, который сам по себе представляет сложную конструкцию. Назначение камеры — исследования взаимодействия элементарных частиц высоких энергий с протонами ядер атомов водорода, заполняющих «Мирабель». Такие столкновения вызовут рождение новых частиц, путь которых благодаря исключительным размерам камеры достаточно велик, чтобы обнаружить возможные повторные столкновения их с протонами, какие

не удастся зафиксировать при использовании камер меньших размеров.

«Мирабель» введена в эксплуатацию 15 октября 1971 г (см. *Камеры регистрационные, Пузырьковая камера*).

МИШЕНЬ — материал, подвергаемый исследованию путем облучения его потоком ускоренных частиц.

МНОГОЗАРЯДНЫЕ ИОНЫ. Долгое время до скорости близкой к скорости света, помимо электронов удавалось разогнать только протоны — лишенные своего электрона ядра самого легкого изотопа водорода. Однако работы по синтезу искусственных сверхтяжелых (трансурановых) элементов, особенно элементов с порядковыми номерами 110—114, которые, по предсказаниям теоретиков, не должны распадаться столь быстро, как уже открытые элементы 101—105, требовали создания ускорителей, способных разгонять до максимально возможной энергии частицы, лишенные всех своих электронов и более тяжелые, чем протоны. Ранее применявшиеся для этой цели ускорители, хотя и позволили в свое время получить положительно заряженные многозарядные ионы (ядра атомов углерода, азота, неона, аргона, кальция и даже цинка-10), однако энергия и интенсивность потока таких частиц (сила тока) не обеспечивали большинства экспериментов по синтезу новых трансурановых сверхтяжелых изотопов.

В августе 1970 г на синхротроне Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне впервые в мире был получен пучок дейтронов — ядер атомов тяжелого водорода, состоящих из протона и нейтрона, большой интенсивности с энергией до 11 млрд. эв (11 Гэв). Благодаря этому появилась возможность получать не только релятивистские (разогнанные почти до скорости света) дейтроны, но и альфа-частицы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, а также исследовать свойства новых частиц — резонансов (см. *Резонансы, Элементарные частицы*).

В конце 1971 г. на ускорителе, составленном из двух соединенных между собой ускорителей, был получен пучок ядер атомов ксенона с энергией 850 млн. эв.

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 стро-

ится 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.

Даже у самых современных тепловых электрических станций коэффициент полезного действия не превышает 38—43% теплотворной способности расходуемого ими топлива, а у атомных электростанций лежит в пределах от 25 до 35%, и только у самых совершенных установок, вводимых в действие в последнее время, от 38 до 41%. Поэтому во всех энергетических расчетах при применении ядерных реакторов для выработки электрической энергии принято различать электрическую мощность (отдачу) станции в киловаттах (или мегаваттах) и тепловую мощность собственно реактора, обычно в 3—4 раза превышающую электрическую мощность станции. Так, при мощности атомной электрической станции 1 млн. *квт* (1000 *Мвт*) тепловая мощность его ядерного реактора (или реакторов) должна быть от 3,5 до 4 млн. *квт*.

МЮ-МЕЗОН (μ) — неустойчивая элементарная частица с массой, равной 206,7 массы электрона. Существует два вида мю-мезонов: с положительным и отрицательным электрическими зарядами, равными по абсолютной величине заряду электрона (μ^+ , μ^-). 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 мю-мезоны слабо взаимодействуют с ядерным веществом и испытывают в основном лишь рассеяние при столкновении с одинаково заряженными частицами.

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ (МАГАТЭ) — автономная межправительственная организация, связанная с Организацией Объединенных Наций (ООН) и несущая ответственность за международные действия, относящиеся к применению атомной энергии в мирных целях.

Членами Агентства являются более 100 государств — членов ООН, в том числе СССР, УССР, БССР и другие социалистические страны. Центральные учреждения МАГАТЭ находятся в Вене (Австрия).

Н

НЕЙТРОН

НЕЙТРИНО

НУКЛОН

НЕЙТРОН. В 1930 г. немецкие ученые В. Боте и Г. Беккер были поставлены в тупик 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, задерживающие самое мощное гамма-излучение.

Талантливые французские физики Фредерик Жолио и Ирен Кюри подметили еще более любопытный факт. Если на пути этого странного излучения ставили пластину парафина — вещества, богатого водородом, — то из парафина начинали вылетать с огромной скоростью, а следовательно, и с большой энергией, протоны — ядра атомов водорода.

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-квантам. 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 заря-

да — ни положительного, ни отрицательного». Эти частицы позднее получили название **н е й т р о н ы**.

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 положительного 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 «простым и ясным».

По этой модели ядра всех атомов состоят из протонов и нейтронов. Число протонов равно атомному номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева, а массы сложенных вместе протонов и нейтронов — его атомной массе, или массовому числу (см. *Нуклон*). Например, ядро атома гелия, известное как альфа-частица, состоит из двух протонов, придающих ей два положительных электрических заряда, и двух нейтронов. Общее число протонов и нейтронов равно четырем, что в точности 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 дает атомный вес элемента, равный шести.

Открытие нейтрона довольно просто объясняет и другую загадку — существование изотопов. В качестве примера можно взять наипростейший химиче-

ский элемент в природе — водород, ядро которого состоит из одиночного протона. Его иногда называют протием. Затем следует тяжелый изотоп водорода, имеющий в ядре один протон и один нейтрон, с атомной массой, равной 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 объясняла многочисленные факты, накопленные физикой, а главное, открывала новые пути для вторжения в святая святых атома — его ядро и, как это повелось в науке, коварно подвела 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 рассказом о том, 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 протонов (учитывая малость расстояний между ними)? Лишь значительно позже было установлено, что 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 не собирались вместе (см. *Ядерные силы*).

Но в природе нет и не может существовать никаких тел, даже размера ядерных частиц, которые не находились бы в непрерывном движении, зависящем от температуры, т. е. энергии частиц 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 какая-то одна, а то и несколько частиц получат 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 преодолеть 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. сообщить 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 ядро 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, например урана-235, 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 выпускают. Следовательно, разгонять их до значительно более высоких энергий и скоростей нужно искусственным путем на специальных установках — у с к о р и т е л я х ч а с т и ц.

Совсем другими, поистине удивительными возможностями обладает нейтрон. Так как электрического заряда нейтрон не несет, то никакой энергии на преодоление суммарного отталкивающего действия положительного заряда ядра атома ему не нужно. Пользуясь своей нейтральностью, он свободно проникает к ядру атома, доходит до зоны притяжения внутриядерных сил и втягивается в ядро. Втянув нейтрон, ядро начинает внутреннюю перестройку. При этом оно оказывается обладателем излишка энергии, равного не 5, а 7 *Мэв*, от которого оно, естественно, придя в возбужденное состояние, тут же

должно избавиться. Следовательно, одно лишь простое присоединение нейтрона к ядру тяжелого атома урана-235 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. Надо 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 сколько-нибудь существенной начальной энергией, могут делить ядра не всех элементов, а только тех, у которых энергия возбуждения, необходимая для их деления, меньше 7 Мэв, т. е. именно та, которая выделяется при перестройке ядра, вызванной 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 двойственности — дуализме свойств света, ведущего себя и как частицы и как электромагнитные волны. Еще больше взволновало ученых последующее открытие

таких же свойств и у электрона. Эти открытия прекрасно объяснялись теорией, выдвинутой в 1900 г. немецким физиком Максом Планком, согласно которой излучение телом тепла или света происходит не непрерывно, а дискретно, т. е. отдельными, строго определенными порциями — квантами, а световая волна, обладая вполне конкретной протяженностью, в некоторых случаях проявляет свойства, характерные для частиц. В 1923 г. французский физик 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: $\lambda = h/mv$. Из этого соотношения следует, 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 особенности их «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 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.

Из-за 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 $2 \cdot 10^{-13}$ 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 выдерживает воз-

Н

никших сложнейших взаимодействий, эквивалентных чудовищно высоким температурам, и распадается на протон и электрон.

Это открытие и позволило ученым считать протон и нейтрон одной ядерной частицей. Отсюда и их название — н у к л о н ы. 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 радиоактивным распадом неустойчивых ядер, у 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 уносится частицей, являющейся точной копией электрона, но имеющей противоположный, положительный, заряд. Такая частица была открыта в 1932 г. американским физиком К. Андерсоном и названа позитроном. Оба эти превращения сопровождаются испусканием еще одной, нейтральной частицы — нейтрино.

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

Сталкиваясь с встречающимися на пути ядрами атомов легких элементов, нейтроны отскакивают от них и меняют направление полета примерно так же, как отскакивают друг от друга бильярдные ша-

ры. 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 и энергию самого нейтрона.

Нейтрон как частица оказался чуть-чуть тяжелее протона. Вне ядра атома он радиоактивен и, про-
быв 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 пронизывало не только гамма-излучение, но даже поток бета-частиц (электронов).

Вскоре была разгадана и эта «странность».

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

НЕЙТРИНО. История физики слабых взаимодействий (см. *Взаимодействия (элементарных) частиц*)

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

Когда появилась мысль о существовании нейтрино?

При экспериментальном исследовании процесса бета-распада — самопроизвольного испускания электронов ядрами атомов — 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 В. 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 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 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 полностью соответствовала предсказанной: электрически нейтральна, чрезвычайно малой массы.

Крайне малая масса, согласно теории относительности, приводит к тому, что нейтрино не может находиться в состоянии покоя: оно всегда движется со скоростью света. Этим элементарная частица нейтрино в некоторых отношениях сходна 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, да и то косвенным способом.

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 мезонных нейтрино, испускаемых в процессе распада мезонов! Каждое из них соответственно взаимодействует в паре только с электроном или только с мезоном.

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 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, которые при определенных условиях могут переходить одна в другую.

НЕЙТРОНОГРАФИЯ. Свое первое практическое применение рентгеновские лучи нашли в медицине для просвечивания и выявления состояния внутренних, недоступных глазу человека, органов. И лишь значительно позднее, по мере создания все более и более мощных установок — для лечения некоторых видов заболеваний, главным образом, для разрушения злокачественных опухолей, а затем и в промышленности — для просвечивания самых разнообразных изделий без разрушения исследуемого образца и обнаружения в них скрытых дефектов.

Мощные рентгеновские установки на напряжение до 1—3 млн. в способны просвечивать металлические слитки и листы толщиной до 250 мм и более.

С открытием явления радиоактивности и особенно после создания ядерных реакторов, позволяющих получать изотопы с энергией частиц, достигающей миллионов электрон-вольт (кобальт-60 и пр.), в медицине и промышленности вместо рентгеновского излучения стали применять радиоактивные изотопы ввиду относительной простоты и сравнительной дешевизны соответствующих установок и устройств.

Со временем, по мере усложнения задач, возлагаемых на этот вид устройств при их промышленном применении, рентгеновского и гамма-излучений даже с большой проникающей способностью (миллионы электронвольт) во многих случаях оказалось недостаточно. Рентгеновское и гамма-излучения, пройдя исследуемое изделие, состоящее, например, из различных материалов и веществ, дают на светящемся экране или фотографической пленке чисто теневое изображение, свидетельствующее лишь о плотности того или иного участка исследуемого изделия, зачастую не позволяющее достаточно точно и уверенно разобраться в получаемом изображении. Вещества с малой плотностью оказываются для них слишком прозрачными, более же плотные и металлы — непрозрачными.

Выход из создавшегося затруднительного положения был найден в замене рентгеновского и гамма-излучения для этой цели нейтронным излучением, получаемым с помощью ядерных реакторов или специальных ускорительных установок.

Поток нейтронов в отличие от рентгеновского или гамма-излучений взаимодействует (рассеивается или поглощается) не с электронной оболочкой атомов, а с их ядрами, причем это взаимодействие проявляется по-разному. Например, непрозрачный для рентгеновского излучения свинец оказывается сравнительно прозрачным для нейтронов, в то же время

материалы, богатые водородом или бором, например резина, кожа, пластмассы и жидкости, — непрозрачными. В результате одно и то же изображение, полученное в рентгеновском или гамма-излучении, получается резко отличным от изображения в нейтронном потоке. В то время как первое изображение состоит из резко очерченных силуэтов просвечиваемой детали, второе содержит полутени, обилие мелких деталей, даже тех, которые расположены внутри или позади металлических кожухов. Поток нейтронов позволяет, например, сфотографировать горящую свечу со всеми ее деталями (фитиль, пламя и т. п.), стоящую позади толстой свинцовой пластины, тончайшие детали строения тела насекомого.

Рентгеновское и гамма-излучения трудно фокусируются и еще труднее сделать с их помощью снимки больших объектов.

Поток нейтронов может быть распределен по большой площади и позволяет произвести детальный снимок наружного и внутреннего устройства даже авиационной турбины.

Обычно применяемые для радиографии и рентгенографии фотопленки мало чувствительны к нейтронным потокам, поэтому, пройдя просвечиваемый объект, поток нейтронов попадает на чувствительный к ним металлический экран — конвертер, который, поглощая нейтроны, испускает поток бета- или гамма-излучения, засвечивающий особо чувствительную к ним фотопленку.

НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО — один из видов ускорителя частиц, отличающийся тем, что он имеет одно или два, соединенных в виде восьмерки, полых кольца — вакуумных канала с магнитной фокусировкой, в которых происходит совместное или раздельное постепенное увеличение плотности пучка ускоренных частиц (электронов, позитронов, протонов и антипротонов) с тем, чтобы, направляя накопленные таким путем частицы навстречу друг другу, резко увеличить число их взаимных столкновений. Этот эффект усиливается еще и тем, что, когда частица совершает внутри кольца огромное число оборотов (миллиарды оборотов), увеличивается во столько же раз вероятность столкновения с движущейся навстречу ей другой частицей. В результате столкновений частиц «лоб в лоб» выделяется энергия, служащая для образования новых частиц — в сотни и тысячи раз превышающая энергию, которую можно было бы получить при столкновении ускоренных частиц с неподвижной мишенью (см. *Встречные пучки*).

ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ. Так называется взаимодействие двух физических систем или частиц, возникающее в результате непрерывного обмена ими между собой какой-то третьей частицей, общей для первых двух.

Например, ядерные силы, действующие между нуклонами ядра атома, являются следствием обмена между нуклонами частицей, называемой пи-мезоном (см. *Ядерные силы*).

ОПРЕСНЕНИЕ ВОДЫ. В связи со все увеличивающимся народонаселением Земного шара и бурным развитием промышленного производства ученые и экономисты в разных странах и по разным поводам все чаще и чаще подсчитывают и пересчитывают, на какой срок хватит человечеству разведанных источников природных ископаемых, и в первую очередь топлива.

Прогнозы ученых оказались довольно мрачными. Нефти по их подсчетам хватит максимум на 25—50 лет, угля — на 100—200 лет, и только запасы делящихся веществ урана и тория обещают отодвинуть реальную угрозу энергетического голода на несколько столетий (а возможно, и тысячелетий), что вселяет надежду на то, что задолго до исчерпания этого последнего источника энергии человечество наконец-то поставит себе на службу практически неисчерпаемый источник энергии — т е р м о я д е р н у ю р е а к ц и ю (см. *Термоядерная реакция*).

Однако сейчас, минуя даже стадию предварительных прогнозов, ученые забили тревогу по другому поводу. Угроза человечеству оказывается грядет совсем не с той стороны, откуда ее до сих пор ожидали, и не в те сроки, которые прикидывали для истощения различных видов полезных ископаемых, а со стороны наступившей уже сейчас кое-где реальной нехватки самого распространенного на нашей планете минерала... воды!

При этом речь идет не о тех пустынных и засушливых районах Земного шара, где вода порой продается кувшинами и чашками по дорогой цене, а, наоборот, о ряде стран, высокоиндустриальных и богатых, таких, как США, Англия, ФРГ и др.

Только потому, что вода покрывает 71% нашей планеты, наполняет озера и реки, падает с неба в виде дождя и насыщает влагой атмосферу, большинство людей думает, что источники ее на Земле — 1 359 000 000 км³ — практически бесконечны и неисчерпаемы. При этом они, естественно, имеют в виду воду пресную. Но увы, подавляющая часть (99,683%) этой воды — Мировой океан — вода соленая.

Возникла новая, крайне важная и срочная проблема — опреснение — очистка морской воды от солей.

Еще в 350 г. до н. э. Аристотель писал об успешных опытах удаления соли из морской воды. То же делали и римские легионеры Юлия Цезаря в 49 г. н. э. Они опресняли воду путем дистилляции — перегонки.

И хотя с тех пор прошло достаточно много времени и разработано много разных методов опреснения воды, все они требуют расхода довольно большого количества энергии — порядка одного киловатт-часа

на один кубический метр (тонну) морской воды. В одних случаях это число бывает несколько больше (сильно соленая вода), в других несколько меньше (слабо соленая вода).

Чтобы начать борьбу с уже наступившим недостатком пресной воды (а ведь нужно еще вдоволь напоить пустынные и засушливые районы ряда стран, некогда бывшие цветущими садами), нужны десятки и сотни миллиардов тонн пресной воды, а следовательно, десятки и сотни миллиардов киловатт-часов энергии.

Как правило, пустыни — это не те места, где не идут дожди, а те места, где нет энергии.

Каждая страна пытается разрешить эту задачу по-своему, но все их усилия упираются в одну единственную проблему: где, откуда, как получить нужное количество энергии?

Источник таких масштабов может быть только один — атомные электрические станции с реакторами очень большой тепловой мощности, такой, чтобы получаемая от них энергия обходилась значительно дешевле энергии, получаемой от обычных тепловых электрических станций.

Первая такая установка, развивающая тепловую мощность свыше миллиона киловатт, введена в строй в СССР на восточном берегу Каспийского моря в городе, названном по фамилии знаменитого украинского поэта Т. Шевченко, где тот отбывал царскую каторгу.

На вырабатываемом реакторами тепле работает электрическая станция мощностью около 150 тыс. *квт*, а пар, после того как он приведет в движение турбины и генераторы электрического тока, направится в опреснительную установку, вырабатывающую до 120 тыс. *т* опресненной воды в сутки, не считая ценных химикалий, получаемых

из рассола, образующегося после опреснения морской воды. Этого количества электрической энергии и пресной воды хватит для нужд большого промышленного города с населением в несколько десятков тысяч человек!

Объединение самого мощного источника термоядерной энергии с неограниченными запасами воды Мирового океана окажет самое решающее влияние на все последующее развитие цивилизации.

ОБОГАЩЕННЫЙ УРАН. Цепная ядерная реакция деления обычно может быть возбуждена только в одном из природных изотопов урана — уране-235. Однако в чистом металлическом уране его содержится только 0,72%; 99,27% составляет уран-238 и ничтожно малое количество (0,006%) — уран-234. Так как выделение урана-235 связано с огромными трудностями и затратой значительных средств, то технически и экономически, оказывается, несравненно более выгодно управляемую цепную реакцию возбуждать в уране-235, не выделяя его из обычного металлического урана, с одновременным превращением некоторой части урана-238 в плутоний. По чисто техническим причинам ядерный реактор для этого приходится загружать довольно большим количеством природного урана — иногда несколькими десятками тонн.

Однако часто, например, для транспортных целей (ядерные реакторы для морских судов, подводных лодок, самолетов и т. п.), размеры реактора должны быть предельно уменьшены.

В этих случаях в загружаемом в реактор природном уране искусственно увеличивают количество делящегося изотопа — урана-235, полученного путем сложного и дорогого разделения изотопов урана на специальных заводах (см. *Разделение изотопов*). Такое искусственное увеличение доли делящегося изотопа в обычном уране (2—90%) и называют обогащением.

ОРБИТАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОН — электрон, вращающийся вокруг ядра атома на одной из его орбит, имеющей эллиптическую форму.

Орбитальные электроны составляют электронную оболочку атома.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА. 6 марта 1869 г. на заседании Русского физико-химического общества Д. И. Менделеев впервые прочитал свое сообщение «Опыт системы элементов, основанный на их атомном и химическом сходстве». То, о чем рассказывалось в этом сообщении, вызвало огромную сенсацию в научных кругах и принесло ее автору и русской науке мировую славу, ибо знаменовало начало нового этапа в развитии науки на подступах к атомному веку.

Молодой ученый (тогда ему было всего 35 лет) мучительно долго ломал голову, пытаясь уловить хоть какие-нибудь закономерности в мире химических элементов. А это, по его твердому убеждению, могло быть установлено только в том случае, если все химические элементы (а многие из них были еще не открыты) расположить в каком-то порядке по их главным свойствам.

Ну а что в этом случае считать самым главным?

Д. И. Менделеев выбрал атомный вес. Записав атомный вес и химические свойства элементов на карточках, Д. И. Менделеев долго и упорно раскладывал их в тысячах всевозможных комбинаций.

«... Когда я расположил элементы в соответствии с величинами их атомных весов, начиная с самых малых, — вспоминал позже Д. И. Менделеев, — то стало очевидно, что в их свойствах существует периодичность. Я назвал периодическим законом взаимные соотношения между свойствами элементов и

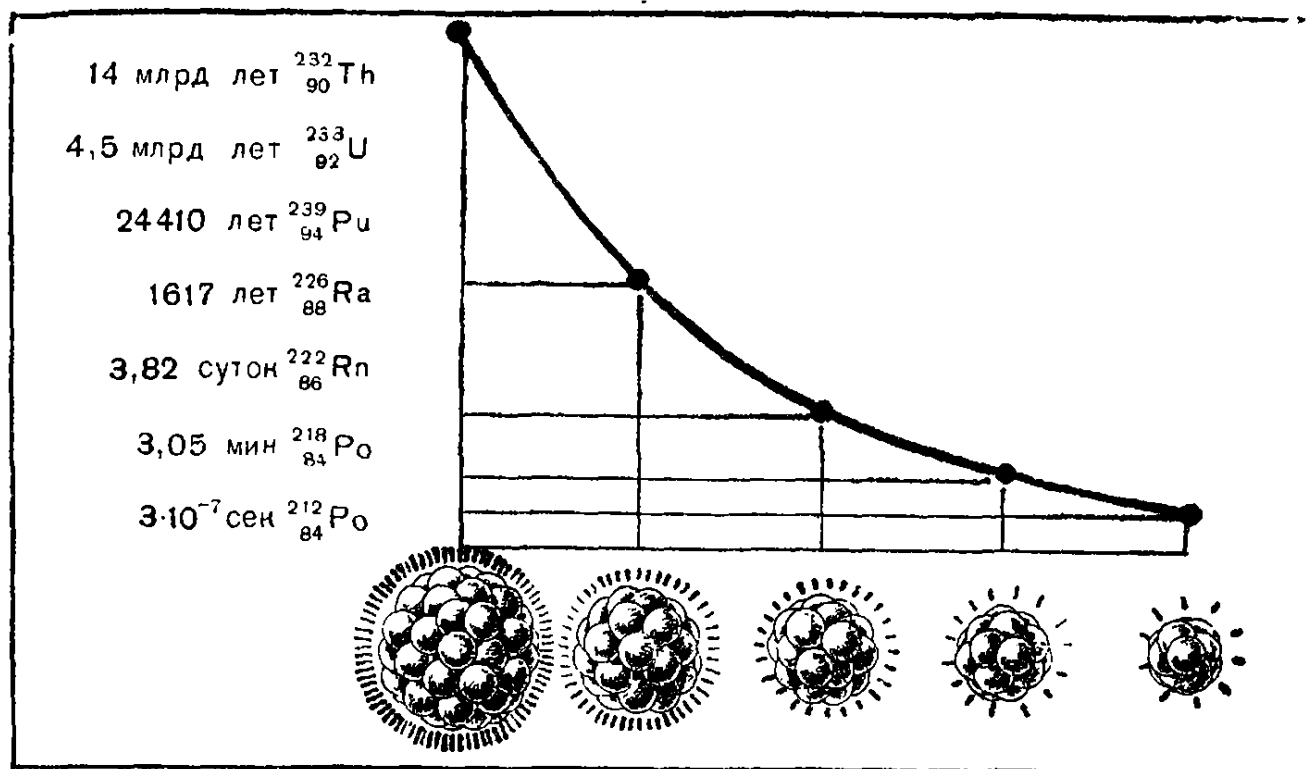
их атомными весами; эти соотношения применимы ко всем элементам и имеют периодическую природу».

На первых порах строго вертикальных столбиков у него никак не получалось. И, убежденный в существовании совершенно строгой периодичности, ученый пошел на исключительно смелый шаг. Там, где в горизонтальном ряду какой-либо элемент не располагался точно под своим химическим двойником, он утверждал, что или общепринятые атомные веса элементов ошибочны и их нужно пересмотреть, или же там должны стоять другие элементы, еще не открытые. Для них он просто оставлял в своей таблице свободные места. Более того, зная «соседей» по вертикали вверх и вниз, Д. И. Менделеев с удивительной точностью предсказал химические свойства этих недостающих и еще неизвестных элементов.

Это убеждение великого ученого блестяще подтвердилось. В 1875 г. был открыт элемент галлий, в 1879 г. скандий и в 1886 г. — германий.

Так родилась знаменитая Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева, вернее, закон периодичности, пользуясь которым, ученые получили возможность ориентироваться в самых сокровеннейших и скрытых тайниках атомного «космоса».

По ряду некоторых, порой очень тонких признаков, периодичность свойств химических элементов натолкнула ученых на другую, еще более смелую мысль: а правильно ли утверждение, что атом является неделимой частицей материального мира, последней ступенькой на пути в микрокосмос? Что лежит в основе различия атомных весов и химических свойств элементов? Нельзя ли попытаться проникнуть и внутрь самого атома, узнать, из чего он сложен? Не распространяются ли на его устрой-



ство закономерности великого периодического закона? Тем более, что, как считал и сам Д. И. Менделеев, «легко предположить, что ныне нет еще возможности показать, что атомы простых тел суть сложные существа, образованные сложением некоторых еще меньших частей». По его представлениям, «мир атомов устроен так же, как мир небесных светил, со своими солнцами, планетами и спутниками».

Великий закон сокрушил стену, долгое время отделявшую химию от физики. Сквозь широкую брешь эстафета знаний была передана дальше — исследователям микромира.

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА. Важной характеристикой радиоактивного вещества является период полураспада — время, за которое распадается половина количества исходного вещества. Например, если половина его распадается за четыре дня, то и период полураспада принимается равным четырем дням. Через следующие четыре дня распадается по-

ловина оставшегося количества, через восемь дней его останется только $1/4$, через 12 дней — $1/8$ и т. д. Чтобы радиоактивность снизилась до 1% исходного вещества, должно пройти примерно семь периодов полураспада.

Необходимо подчеркнуть, что половина атомов радиоактивного вещества распадается за указанное время лишь в среднем. Фактически некоторые атомы не распадаются вовсе, в то время как другие распадаются в значительно более короткие промежутки времени.

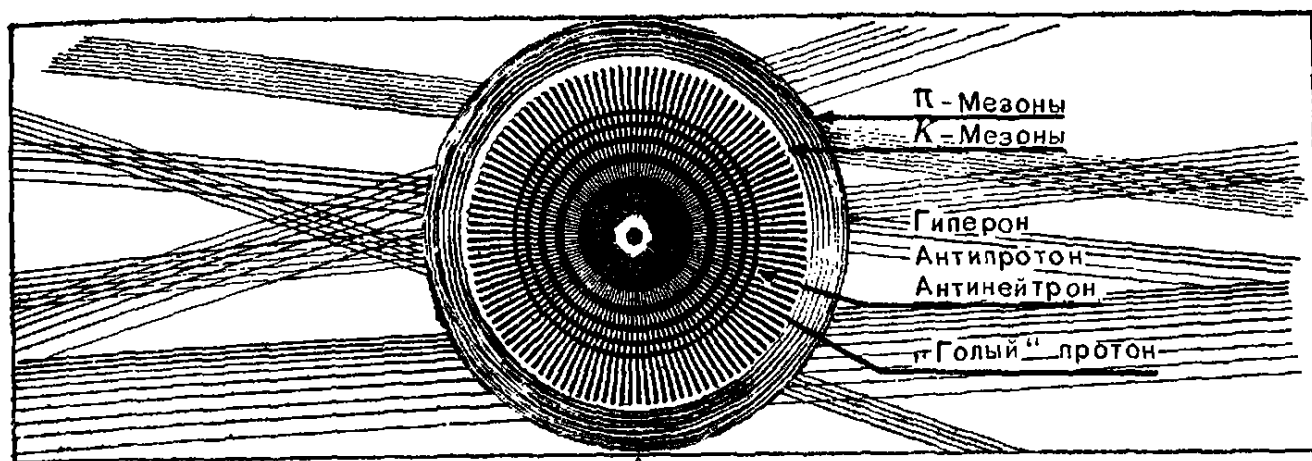
Чем интенсивнее идет радиоактивный распад, тем короче период полураспада. Сильные излучатели живут гораздо меньше, чем слабые.

Один грамм урана содержит около $2,5 \cdot 10^{21}$ атомов. Однако из этого астрономического количества в секунду распадается только около 12 тыс. атомов. Поэтому период полураспада урана исключительно долг — около 4,5 млрд. лет. У тория он еще дольше — более 14 млрд. лет! Время полураспада радия-226 — 1617 лет, радона — 3,82 дня, полония-218 — 3,05 мин, полония-212 — $3 \cdot 10^{-7}$ сек, некоторых элементарных частиц — миллионные и миллиардные доли секунды.

ПРОТОН — одна из немногих устойчивых элементарных частиц, входящая (наряду с нейтроном) в состав всех ядер атомов химических элементов.

Так как водород занимает первое место в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, то отсюда и название этого элемента «протий» — от греческого слова «протос» — «первый».

Хотя протон несет одинаковый с электроном элементарный электрический заряд (но противоположный по знаку), масса его в 1836 раз больше массы электрона и равна $1,672 \cdot 10^{-24}$ г. В тех случаях,



когда нет необходимости указывать на заряд любой из ядерных частиц, протон наравне с нейтроном носит более общее название — нуклон. Это тем более оправдано, что сейчас уже не остается никаких сомнений, что протон и нейтрон являются различными физическими состояниями одной и той же элементарной частицы. При поглощении ядром атома энергии извне и последующем распаде протон внутри ядра может превратиться в нейтрон. Этот процесс сопровождается рождением позитрона — частицы, масса которой в точности равна массе электрона, но несущей противоположный, положительный, электрический заряд, и еще одной незаряженной (нейтральной) частицы — нейтрино, не имеющей массы покоя и движущейся только со скоростью света. При превращении нейтрона в протон из ядра атома вместо позитрона выбрасывается электрон и опять-таки нейтрино.

В результате зондирования протона путем облучения его потоком электронов, ускоренных до энергий в несколько миллиардов электронвольт, сейчас уже окончательно установлено, что каждый протон и нейтрон, подобно атому, имеет свое небольшое ядро — так называемый *к е р н* (сердечник), — окруженный «атмосферой» из двух элементарных частиц: гиперонов, антипротонов, антинейтронов,

K-мезонов и пи-мезонов. Да и сам керн не является однородным телом и состоит из каких-то других, пока еще не опознанных или неизвестных частиц.

ПРОТОННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ. До недавнего времени в науке были известны следующие основные виды радиоактивного распада ядер атомов. Три из них: испускание альфа-частиц (ядер атомов гелия), бета-частиц (электронов) и гамма-квантов — известны еще со времен Марии и Пьера Кюри. Еще один вид распада — самопроизвольное (спонтанное) деление ядер атомов урана с испусканием нейтронов, электронов и гамма-квантов, *K*-захват — был открыт советскими учеными Г. Н. Флëровым и К. А. Петржаком в 1940 г. И наконец, испускание нейтронов продуктами деления ядер урана — запаздывающих нейтронов — спустя короткое время после того, как это деление уже произошло.

В свое время на основании теоретических исследований было предсказано существование еще одного вида распада, при котором ядро возбужденного, т. е. поглотившего извне какое-то количество энергии, атома испускает протон — положительно заряженную элементарную частицу. Это так называемая протонная радиоактивность была открыта советскими учеными в 1962 г.

ПОЗИТРОН (ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОН) — предсказанная П. Дираком и открытая К. Андерсоном в 1932 г. элементарная частица, идентичная по свойствам (массе, величине заряда и т. д.) электрону, но имеющая не отрицательный, а положительный заряд, вследствие чего она является античастицей электрона — первая из серии открытых после нее античастиц. Позитрон, испущенный ядром, принято называть бета-плюс-частицей (e^+). Позитрон возникает при аннигиляции двух или трех квантов гамма-излучения или в процессе бета-распа-

да атомов ядер и неустойчивых ядерных частиц. Испускание позитрона называют бета-плюс-распадом. При встрече позитрона с электроном обе частицы аннигилируют — исчезают. В результате этой реакции образуются два или три фотона — кванта гамма-излучения.

ПЛАЗМА — ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА. Известно, что любое вещество может существовать только в одном из трех состояний: твердом, жидком или газообразном, классическим примером чему является вода, которая может быть в виде льда, жидкости и пара. Однако веществ, пребывающих в этих считающихся бесспорными и общераспространенными состояниях, если брать всю Вселенную в целом, очень мало. Они вряд ли превышают то, что в химии считается ничтожно малыми следами. Все остальное вещество Вселенной пребывает в так называемом плазменном состоянии. Что это такое?

Известно, что по мере нагревания тепловое движение атомов любого твердого тела принимает все более и более энергичный характер, пока не начинают ослабевать, а затем и рваться одна за другой связи, определяющие структуру вещества.

Первой разрушается кристаллическая решетка — твердое тело плавится и превращается в жидкость. Затем ослабляются связи между молекулами, и вещество принимает газообразную форму — испаряется. Выше 2000°C жидкая вода уже не может существовать вообще, несмотря ни на какие давления. Следовательно, исключаются все виды химических реакций в водной среде. При четырех-пяти тысячах градусов рвутся все связи внутри молекул, и вещество окончательно распадается на атомы составляющих его элементов. Поэтому прекращаются все обычные химические реакции.

Ну а что будет происходить, если нагревать сосуд с газом?

По мере повышения температуры движение атомов газа становится все более и более энергичным, и они все чаще и чаще, а следовательно, и сильнее сталкиваются друг с другом. В результате столкновений первыми начинают отрываться электроны, расположенные на самых внешних орбитах и слабее всех связанные с ядрами своих атомов. Внутри газа появляется как бы второй газ, состоящий из этих электронов, число которых по мере оголения ядер атомов непрерывно растет. Вслед за ними наступает очередь электронов, «запрятанных» на самых глубоких и более прочных орбитах. Одновременно начинают учащаться столкновения и между ионами, лишенными всей или части своей электронной защиты.

Газ, в котором под действием исключительно высокой температуры произошло разделение вещества на свободные электроны, носящиеся с бешеной скоростью и сталкивающиеся между собой и со стенками сосуда, совершенно оголенные ядра атомов и атомы, по какой-то случайности все еще удерживающие некоторую толику своих электронов, стали называть **п л а з м о й**. «Идеальная» плазма с разделенными полностью атомными частицами соответствует температуре в несколько десятков миллионов градусов. Везде, где вещество чрезвычайно горячо, оно находится в плазменном состоянии. Однако плазма — это не просто нагретое до сверхвысокой температуры вещество. Это совершенно иное его физическое состояние, проявляющее целый ряд необыкновенных и очень важных свойств.

Например, плазменное состояние газообразного вещества может возникать и при менее высоких и даже относительно низких температурах в зависимос-

ти от состава, структуры и степени разрежения газа. Пламя свечи, свечение ламп холодного света, электрическая дуга, электрический разряд, огненная струя, вырывающаяся из сопла реактивного двигателя или ракеты, ослепительный след, оставляемый молнией, — все это далеко не полный перечень явлений, при которых человек прямо или косвенно имеет дело с четвертым, плазменным, состоянием вещества.

Большинство людей и даже некоторые ученые не делают различия между отдельными видами плазмы и газом. Очень часто можно слышать о раскаленной атмосфере Солнца и звезд, потоках раскаленных газов и т. п.

Плазма действительно по ряду признаков очень сходна с газом. Она и разрежена, и текуча. Однако на уровне атомов и молекул природа их строения совершенно различна, и именно это объясняет чрезвычайно широкое разнообразие свойств плазмы и ее поведения, что резко отличает плазму от всех остальных состояний вещества.

В целом плазма нейтральна, так как она содержит одинаковое количество отрицательно и положительно заряженных частиц. Но взаимодействие этих зарядов придает плазме потрясающее разнообразие свойств, не похожих ни на какие свойства газов. При некоторых условиях она может проводить электрический ток лучше, чем медь, течь как вязкая жидкость, вступать в реакции с другими веществами как сильный химический раствор. Более того, плазма легко управляется электрическими и магнитными полями.

В необыкновенно короткий срок физика плазмы стала одной из ведущих областей науки, главным образом, в связи с исследованиями термоядерной реакции, получаемой пока только в мгновенной

вспышке раскаленной до температуры в несколько сот миллионов градусов плазмы, при взрыве водородной бомбы (см. *Термоядерная реакция*).

ПАРА. ОБРАЗОВАНИЕ ПАРЫ ЭЛЕКТРОН — ПОЗИТРОН — один из видов взаимодействия квантов гамма-излучения с ядрами атомов вещества, в результате которого гамма-кванты с энергиями более $1,2\text{ Мэв}$ превращаются в пару частиц — позитрон и электрон с энергией по $0,51\text{ Мэв}$ каждый.

ПИ-МЕЗОН (π) — неустойчивая элементарная частица с массой около $273,2$ массы электрона. Существует три вида таких частиц: положительный и отрицательный пи-мезоны, обладающие электрическими зарядами, равными по абсолютной величине электрическому заряду электрона, и нейтральный пи-мезон (π^+ , π^- , π^0). Масса заряженного пи-мезона равна $273,2$ массы электрона, нейтрального пи-мезона — несколько меньше — $264,2$ массы электрона. Пи-мезон рождается на нуклонах или ядрах под действием бомбардировки нуклонами и гамма-излучения большой энергии. Время жизни заряженного пи-мезона около $2,55 \cdot 10^{-8}\text{ сек.}$ Чаще всего пи-мезон распадается на мю-мезон и нейтрино. Время жизни нейтрального пи-мезона не превышает $1,8 \cdot 10^{-16}\text{ сек.}$, после чего он распадается на два фотона. В отличие от мю-мезонов пи-мезоны активно взаимодействуют с атомными ядрами. Они, в частности, ответственны за существование ядерных сил. Обмениваясь пи-мезонами, нуклоны ядра удерживаются все вместе, несмотря на существование огромных сил отталкивания между положительно заряженными протонами, стремящимися «взорвать» ядро изнутри.

ПЛАНКА ПОСТОЯННАЯ (h) — принятая и широко применяемая в квантовой теории константа, введенная в 1900 г. немецким физиком Максом Планком для объяснения природы излучения, испускаемого нагретыми телами: $h = 6,625 \cdot 10^{-27}\text{ эрг} \cdot \text{сек.}$

ПЛОТНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА — количество нейтронов, проходящих в любом направлении через сечение площадью один квадратный сантиметр в секунду. В реакторах нулевой мощности плотность потока составляет примерно 10^9 , в реакторах атомных электрических станций — 10^{12} . Специальные исследовательские реакторы дают поток плотностью до $10^{12} - 10^{15}\text{ нейтрон}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек.})$.

ПОЗИТРОНИЙ. В результате распада некоторых искусственных радиоактивных элементов происходит излу-

чение позитрона — частицы, идентичной во всем электрону, за исключением положительного электрического заряда (см. *Позитрон*). Следом за быстролетящим позитроном тотчас же «увязывается» один из свободных электронов, всегда имеющихся в избытке в окружающей среде. Эта своеобразная погоня кончается тем, что на ничтожно короткий отрезок времени (10^{-7} сек в вакууме, а еще меньше в веществе — 10^{-8} — 10^{-9} сек) возникает временное неустойчивое образование — позитроний — некое подобие атома, в котором, однако, отсутствует ядро, а электрон вместе с позитроном вращаются вокруг общего центра тяжести. По электрическим и некоторым другим свойствам такой искусственный псевдоатом похож на атом самого легкого устойчивого элемента — водорода, в котором один электрон вращается вокруг одиночного протона. Но так как масса позитрона равна массе электрона, позитроний приблизительно в 1000 раз легче, а по диаметру в два раза больше атома легкого водорода (протия). За невероятно короткое время своего существования позитрон и электрон тем не менее успевают совершить один вокруг другого несколько миллионов оборотов, а затем, сталкиваясь, взаимно уничтожаются (аннигилируют). Позитроний погибает, излучая два или три фотона.

ПЛУТОНИЙ — химический элемент Периодической системы элементов Д. И. Менделеева с порядковым номером 94 и атомной массой 239, впервые полученный человеком в 1940 г.

Как известно, использование атомной энергии человеком началось с урана-235, который был и остается важнейшим видом ядерного горючего. Можно было бы иметь гору природного урана, но не использовать нисколько заключенной в нем энергии, если бы в нем не содержался делящийся изотоп уран-235. Этот изотоп хорошо делится нейтронами любых энергий. Однако в природном металле его очень мало — всего 0,7%. Остальные 99,3% составляет изотоп уран-238, который делится только быстрыми нейтронами. Зато уран-238 отлично поглощает промежуточные нейтроны с энергией от 1 до 10 эв. И тут начинаются чудеса. Если с помощью замедлителя — графита, тяжелой или обычной воды и других веществ — замедлить до этой энергии выбрасываемые при делении ядер изотопа урана-235 быстрые нейтроны, то, захватив такой медленный нейтрон, ядро атома урана-238 приходит в сильно возбужденное состояние и, распавшись, превращается в конечном итоге в плутоний, период полураспада которого равен уже 24,40 года. Самое замечательное то, что он становится как бы двойником урана-235 —

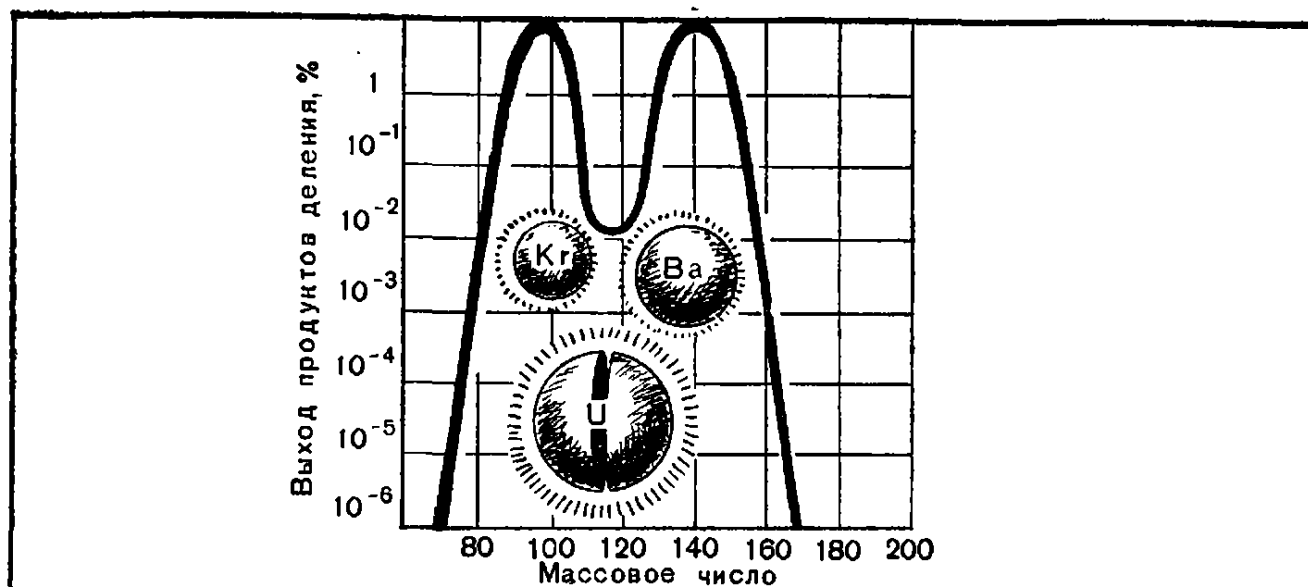
также делится и быстрыми и медленными нейтронами. А это позволяет в ходе выгорания урана-235 одновременно превратить малую толику практически неделящегося урана-238 в делящийся плутоний-239. Так постепенно, выжигая в ядерном реакторе уран-235 (0,7%) и полученный побочным путем плутоний-239 (естественно, меньше 0,7%), можно переработать в ядерное горючее значительную долю природного урана-238.

Долгое время считалось, что самый тяжелый природный элемент — уран-238. Однако совсем недавно в одной из руд был обнаружен естественный устойчивый изотоп плутоний-244.

Чистый плутоний-239 — сильно ядовитое вещество, легко загорается на воздухе. Распадаясь, он испускает альфа-частицы с энергией около 5 *Мэв*. Особо опасно попадание плутония внутрь живого организма, так как он естественным путем не выводится, а длительное внутреннее облучение альфа-частицами приводит к тяжелым формам лучевой болезни и даже гибели организма.

ПРОБЕГ ЧАСТИЦЫ — путь, проходимый заряженной частицей до полного ее замедления в результате многочисленных упругих столкновений с ядрами атомов вещества, в котором движется эта частица. Величина пробега зависит от энергии (скорости) движения частицы, ее заряда, массы, а также от свойств самого вещества (среды). Пробег увеличивается с энергией частиц и при заданной скорости примерно пропорционален массе частицы и обратно пропорционален квадрату ее заряда. Пробег чаще всего выражают не в единицах длины (сантиметрах), а в массовых единицах слоя вещества, проходимого частицей ($г/см^2$).

ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ УРАНА. Когда в ходе ядерной реакции ядро атома урана-235 делится надвое, то получающиеся радиоактивные осколки никогда не бывают равными: один побольше, другой поменьше. И те и другие оказываются ядрами атомов элементов, имеющих массы примерно от 72 до 162 — от германия до гафния. Распределение этих элементов имеет вид кривой с двумя четко выраженными горбами, приходящимися на массы около 90 и 140, например на стронций-90, криптон-91, иттрий-91, цирконий-95, иод-126, цезий-137, барий-142, церий-144 и др. Однако максимальное количество любого из изотопов этих элементов не превышает 5—6% всего количества осколков. Великое разнообразие комбинаций видов излучений (бета-частиц и гамма-квантов), их энергий и периодов полураспада открывает неисчерпаемые возможности для самого широкого



применения этих элементов в науке, технике, медицине, промышленности и сельском хозяйстве.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ НЕЙТРОНЫ — частично замедленные нейтроны, энергия (скорость) которых лежит в пределах от 1 кэв до 0,5 Мэв (быстрые нейтроны — больше 0,5 Мэв, медленные нейтроны ниже 1 кэв).

ПРОТИВОАТОМНАЯ ЗАЩИТА — система мероприятий, направленных на защиту людей, животных и материальных ценностей от атомного нападения противника, а также мер по своевременному оказанию медицинской помощи пострадавшим, проведению дезактивации (обеззараживания) местности и строений, быстрой ликвидации вызванных нападением разрушений. Сюда входят работы по созданию сети убежищ и укрытий, противоатомная подготовка населения и формирований противовоздушной и противоатомной обороны, а также осуществление комплекса предупредительных, противопожарных и других мер.

ПРОТИЙ — атом легкого водорода, ядро которого состоит всего из одного протона. Данное название более удобно в тех случаях, когда его приходится употреблять наряду с дейтерием (атом тяжелого водорода) или тритием (атом сверхтяжелого водорода). Отсюда ядро атома протия — протон, дейтерия — дейтрон, трития — тритон.

ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА. Несмотря на то что с момента изобретения камеры Вильсона прошло уже немало лет и в ее конструкцию внесено много усовершенствований, этот прибор и до сих пор удивляет своей простотой, сочетающейся с точностью и предельной наглядностью получаемых результатов.

Однако физика атомного ядра имеет дело с необыкновенно быстрыми частицами, входящими в состав космического излучения или получаемыми при помощи современных сверхмощных ускорителей. Эти частицы, пролетая камеру Вильсона, часто оставляют столь короткий, слабый, не успевший искривиться и разорванный след, что измерить его достаточно точно не представляется возможным. В результате все наиболее важное и интересное ускользает от наблюдения. К тому же в момент расширения газа в камере Вильсона в нем возникают потоки и завихрения, которые хотя и не много, но смещают и искажают следы частиц. Очень часто возникает необходимость точно знать, в какой именно последовательности появлялись эти следы — который первый, который второй и так до последнего, какой из них прошел выше, какой ниже другого.

На эти вопросы камера Вильсона ответа не дает.

Как же заставить ее отвечать и на такие вопросы? На помощь пришел кипятилок. Что служит первым признаком закипания жидкости? Появление пузырьков. Но как и где они зарождаются — вряд ли кто на это обращал особое внимание. А в физике кипения жидкости это обстоятельство, оказывается, имеет весьма важное и решающее значение.

Опыты показали, что пузырьки пара зарождаются главным образом на стенках сосуда, в котором нагревают жидкость, в местах, где имеются мельчайшие углубления или бугорочки, которые практически невозможно устранить никакой, даже самой тщательной шлифовкой или полировкой. Они и служат центрами образования и дальнейшего роста пузырьков.

Если жидкость содержит в себе взвешенные частички твердого вещества или в ней растворен какой-нибудь газ, то центрами образования пузырьков пара могут явиться и такие твердые и газообразные частицы.

Если же начать кипятить очень чистую воду в сосуде с идеально отполированными стенками, избегая всяческих, даже самых ничтожных толчков и сотрясений, то воду можно «перегреть» без каких-либо признаков кипения. Однако стоит теперь лишь слегка толкнуть сосуд или каким-либо другим способом нарушить покой такой перегретой воды, как она мгновенно вскипает. Это явление и навело физиков на мысль использовать не облачко невидимого пара в камере Вильсона, а перегретую жидкость.

Достаточно какой-либо заряженной частице пролететь сквозь такую жидкость и произвести ионизацию ее молекул,

как эти молекулы на всем протяжении пути частиц становятся центрами образования паровых пузырьков, т. е. жидкость на этом пути мгновенно вскипает. Если теперь успеть достаточно быстро сделать фотографический снимок, то мы увидим на нем цепочки пузырьков — такие же следы частиц, как и те, которые можно наблюдать в обычной камере Вильсона.

Можно поступить и иначе. Известно, что вскипание жидкости предотвращают, увеличивая давление пара над ней. Если быстро снять это давление, то жидкость вскипает не мгновенно, а спустя короткий промежуток времени. Следы пролетающих через жидкость частиц можно фотографировать за отрезок времени между снятием давления и ее вскипанием.

Какие же тогда преимущества имеет камера с перегретой жидкостью перед обычной «паровой»? Достаточно много.

Любая жидкость значительно плотнее, чем водяной пар, и поэтому она лучше замедляет пролетающие частицы. Благодаря этому ионизированные следы от них остаются более плотными, сплошными и легче поддаются наблюдению и измерениям. Образование пузырьков в перегретой жидкости идет значительно быстрее, чем в паре, и, кроме того, движение частиц самой жидкости менее ощутимо, чем движение легких частиц пара, вследствие чего оставляемый частицей след в жидкости искажается намного меньше, чем в паре. И наконец, что очень важно и что является самым главным преимуществом такой камеры, пузырьки пара, после того как они образовались вокруг ионизированных частиц жидкости, продолжают непрерывно увеличиваться. Сделав ряд фотоснимков, по величине пузырьков можно достаточно точно устанавливать, какие именно следы появились в жидкости раньше, а какие позднее.

«Перегретая» жидкость не всегда означает жидкость, нагретую до высокой температуры. Существует огромное количество жидкостей, «вскипающих» и превращающихся в пар не только при комнатной, но и при значительно более низкой температуре или при незначительном уменьшении внешнего давления, например сжиженный водород, пропан, изопентан и пр.

Заполняющий пузырьковую камеру сжиженный, а следовательно, находящийся под большим давлением газ тоже идеально прозрачен. Но если это давление уменьшить до критического значения, при котором жидкость не вскипает только потому, что в ней нет центров, способствующих образованию пузырьков (пылинок, заряженных частиц и т. п.),

то стоит заряженной частице пролететь сквозь такую сверхчувствительную, готовую мгновенно вскипеть жидкость, как ее ионизированный след, густо облепленный пузырьками газа, становится видимым.

В такой камере нет никаких поршней и других подвижных частей, и ее размеры могут достигать нескольких метров длины. Как раз то, что нужно ученым!

И еще. Если в камере Вильсона можно наблюдать следы оставляемые пронизывающими ее заряженными частицами, каждый раз только в течение долей секунды, то пузырьковая камера позволяет наблюдать следы частиц значительно дольше. Это уже огромное, а в ряде случаев решающее преимущество.

Преимущества новой камеры становятся особенно понятны, если мы вспомним, что ученым при помощи мощных ускорителей частиц сейчас удается придать частицам такие скорости и энергии, какие уже не встречаются у естественных или искусственных радиоактивных веществ, а скоро, видимо, будут соизмеримы со скоростью и энергией космических частиц (см. «Людмила», «Мирабель»). Именно благодаря использованию камер Вильсона и других сходных по устройству и действию установок сделано большинство открытий в области современной физики.

Р

РАДИЙ
РАДИОАКТИВНОСТЬ
РАДИОАКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННАЯ
РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ
РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА
РАДИОАКТИВНОСТЬ НАВЕДЕННАЯ
РЕАКТОРЫ

РАДИЙ — один из первых природных радиоактивных элементов, открытых и выделенных в чистом виде Марией и Пьером Кюри еще в конце прошлого века.

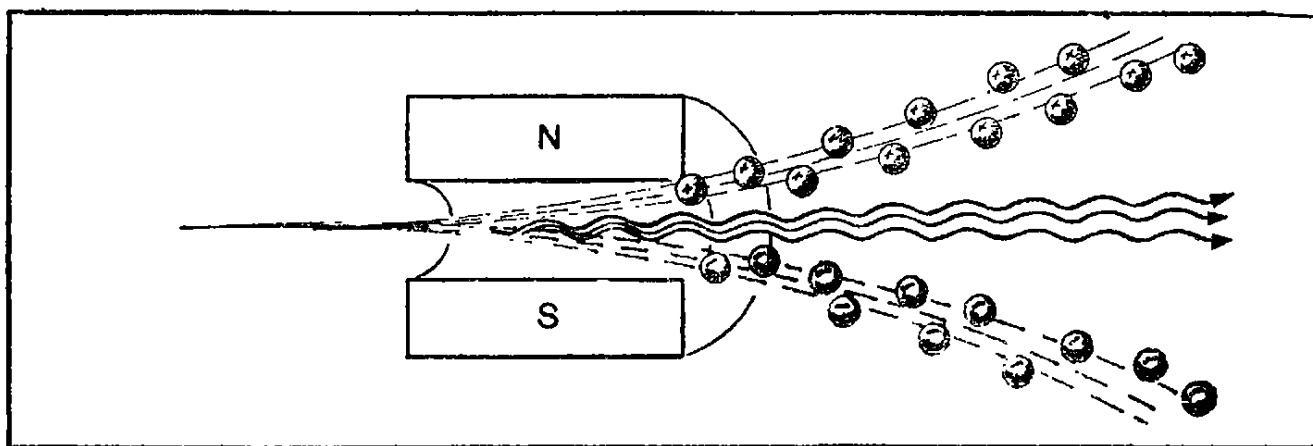
Неизвестное до того времени вещество оказалось поистине удивительным. Оно непрерывно испускало обладающие огромной проникающей способностью невидимые лучи. Под действием таинственных лучей, так же как и под действием рентгеновских,

ярко светились в темноте экраны, покрытые сернистым цинком, платино-синеродистым барием и другими веществами, засвечивались фотографические пластинки.

Ничтожно малые количества этого элемента, не превышающие миллиардных долей грамма, можно было обнаружить по ионизации воздуха, которую вызывало их излучение. Новое излучение оказывало сильное воздействие на живые организмы и в ряде случаев становилось опасным для здоровья людей. Все эти столь необыкновенные свойства дали повод его первооткрывателям назвать новый элемент радием, что означает «лучистый».

Радий является продуктом распада цепочки элементов, начинающейся ураном-238, и состоит из четырех природных изотопов с массовыми числами 228, 226, 224 и 223 (средняя атомная масса 226,05). Наиболее долгоживущий изотоп — радий-226 — излучает альфа-частицы энергией 4,78 Мэв с периодом полураспада 1617 лет. Испускание альфа-частиц сопровождается гамма-излучением энергией 0,188 Мэв. Благодаря высокой энергии испускаемых альфа-частиц радий вместе с полонием-210 (энергия альфа-частиц еще выше — 5,3 Мэв) в течение длительного времени — до создания ускорителей заряженных частиц и ядерных реакторов — представляли собой «главный калибр атомной артиллерии» для обстрела ядер атомов всех легких элементов периодической таблицы Менделеева. Именно с их помощью была открыта возможность превращения одних элементов в другие, обнаружено существование ядра атома, затем и нейтрона, осуществлено подавляющее большинство важных открытий атомного века. Испускаемые радием гамма-кванты с энергией 188 кэв в течение долгого времени служили единственным источником для борьбы с самым

Р



страшным заболеванием человека — раком, а также для просвечивания металлических изделий и т. д.

РАДИОАКТИВНОСТЬ — самопроизвольный, не поддающийся никакому внешнему воздействию непрерывный распад некоторых естественных и искусственных элементов, в ходе которого эти вещества испускают альфа-, бета-частицы и гамма-кванты. Явление радиоактивности впервые было открыто в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем и детально исследовано Марией и Пьером Кюри, открывшими важнейшие природные радиоактивные элементы полоний и радий.

Английские физики Э. Резерфорд и Ф. Содди установили, что в отличие от обычных элементов ядра атомов радиоактивных веществ — неустойчивые, нестабильные образования, а вследствие этого они непрерывно распадаются. Испуская альфа- и бета-частицы (ядра атомов гелия и электроны), они превращаются в новые, более легкие элементы. Например, испустив альфа-частицу (${}^4_2\text{He}$) и потеряв тем самым два положительных заряда и четыре единицы массы, радий-226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) превращается в новый элемент — газ радон-222 (${}^{222}_{86}\text{Rn}$). В результате возникают атомы уже двух новых элементов — радона и гелия. Однако на этом процесс распада исход-

ного радиоактивного элемента не прекращается. Вновь образовавшийся радон-222 оказывается также неустойчивым и, испустив в свою очередь альфа-частицу, превращается в новое, тоже неустойчивое радиоактивное вещество: радий А или полоний-218 (${}_{84}^{218}\text{Po}$). Этот процесс образования и распада всех последующих поколений радиоактивных веществ останавливается только тогда, когда все исходное количество радия превратится в обычный свинец, вернее, в один из его изотопов — свинец-206 (${}_{82}^{206}\text{Pb}$) (см. *Радиоактивные семейства*).

РАДИОАКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННАЯ — радиоактивность, искусственно создаваемая в устойчивых химических элементах путем их облучения потоками нейтронов в ядерных реакторах или бомбардировки этих элементов тяжелыми частицами — протонами, альфа-частицами и др.

Вследствие огромного разнообразия свойств (вид излучения, энергия, время жизни, масса испускаемых частиц и др.) радиоактивные вещества, получаемые искусственным путем, применяют значительно шире, чем естественные (см. *Изотопы*). В связи с открытием искусственной радиоактивности оказалось возможным осуществить мечту средневековых алхимиков — превращать атомы одних химических элементов в атомы других элементов (см. *Радиоактивность*).

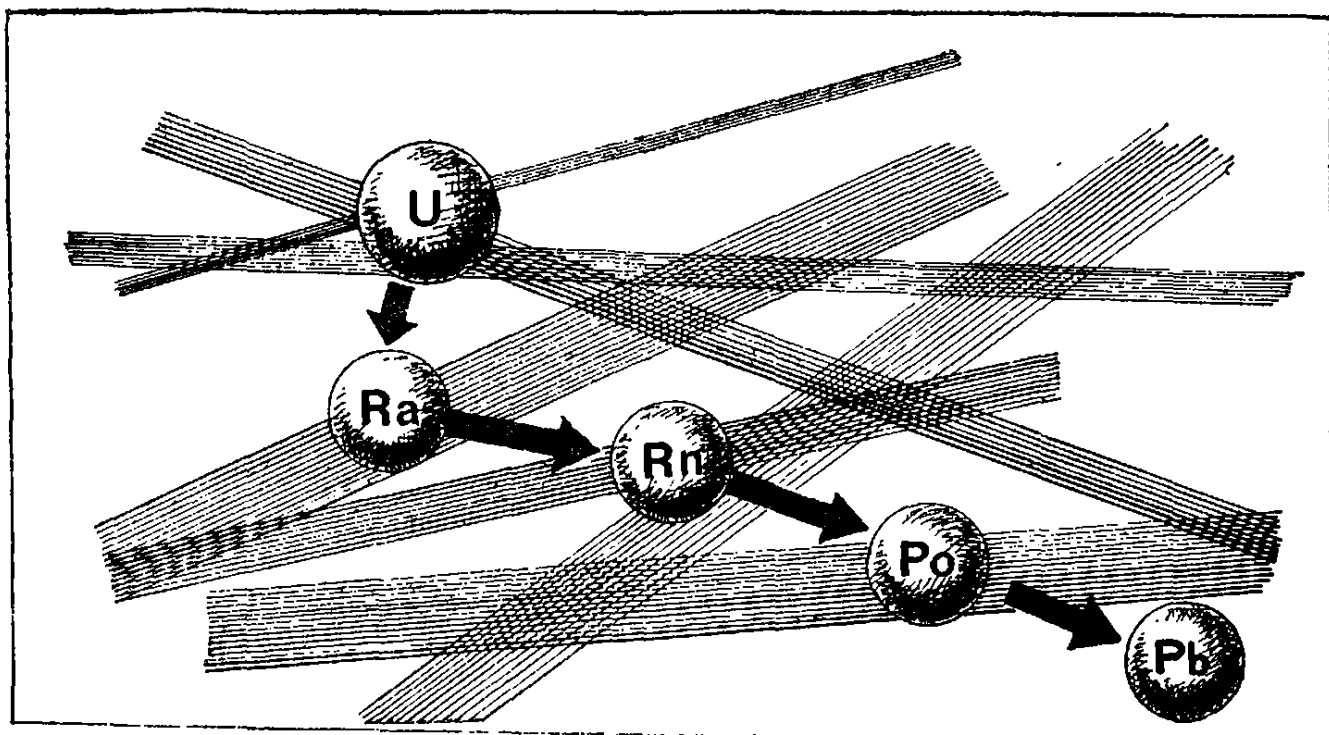
Вслед за этим открытием ученые в различных странах стали подвергать бомбардировке ядерными частицами буквально все химические элементы таблицы Менделеева. При этом выяснилось, что почти все они могут образовывать новые искусственные радиоактивные изотопы. В сравнительно короткий срок число таких искусственных излучателей дошло до тысячи и с каждым годом открываются все новые и новые.

Сейчас искусственные радиоактивные изотопы занимают исключительно важное место в науке и технике.

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ. Число получающихся в результате деления урана и плутония элементов оказалось очень большим по разнообразию и по видам радиоактивных излучений: длительных и короткоживущих, мощных и слабых, практически в любых сочетаниях. Например, стронций-90 распадается наполовину в течение 28 лет и излучает только бета-частицы с энергией 0,63 *Мэв*, а образующийся одновременно с ним дочерний элемент иттрий-90 распадается наполовину уже за 62 ч, зато излучает бета-частицы с энергией 2,3 *Мэв*. Ни тот, ни другой не излучают сильно проникающих гамма-квантов. Цирконий-95 с периодом полураспада 65 дней излучает бета-частицы с энергией 0,39 *Мэв* (98%) и немного (2%) с энергией 1 *Мэв* и одновременно гамма-кванты трех энергий: 0,73 *Мэв* (93%), 0,23 *Мэв* (93%), 0,92 *Мэв* (7%); дочерний элемент ниобий-95 с периодом полураспада 35 дней излучает бета-частицы с энергией 0,15 *Мэв* и гамма-кванты с энергией 0,76 *Мэв*. Можно подметить общее для всех них правило: самой высокой энергией излучения обладают самые короткоживущие изотопы и, наоборот, самой низкой — самые долгоживущие.

РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА. Цепочку элементов, самопроизвольно образующихся один из другого в результате радиоактивного распада, называют радиоактивным семейством. Таких семейств существует четыре. Они охватывают все известные радиоактивные элементы.

Родоначальником первой цепочки является уран-238, который заканчивает свой распад изотопом обычного свинца-206. Вторая цепочка начина-



ется торием-232, превращающимся в конечном счете в изотоп свинца-208, третья цепочка — актиния-235 или актиноурана-235 — заканчивается свинцом-207.

Процесс распада идет так. При испускании альфа-частицы масса вещества уменьшается на четыре массовые единицы и превращается в новое вещество, стоящее на две клетки раньше в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. При испускании же бета-частицы (электрона) один из нейтронов превращается в протон. Так как в данном случае происходит лишь перераспределение количества нейтронов и протонов в ядре атома, то это влечет за собой превращение его в один из изотопов элемента, стоящего следующим в таблице.

Четвертое радиоактивное семейство начинается с искусственно получаемого радиоактивного сверхтяжелого «зауранового», или «трансуранового», элемента плутония-241, переходит затем в цепочку урана-235 и кончается тоже устойчивым таллием-205.

РАДИОАКТИВНОСТЬ НАВЕДЕННАЯ — радиоактивность воздуха, воды, почвы и других материа-

лов, возникающая под действием облучения их нейтронами — в ядерных реакторах, ускорителях или при взрывах атомных бомб.

Захватив нейтрон, ядро атома приходит в возбужденное состояние и распадается, испуская бета-частицы и кванты гамма-излучения. Отсюда и возникает необходимость окружать все прямые и косвенные источники нейтронов мощной многослойной биологической защитой, не только поглощающей все ускользающие из них нейтроны, но и задерживающей гамма-излучение искусственных радиоактивных изотопов. Эти изотопы рождаются в результате поглощения нейтронов не только ядрами атомов специально облучаемых веществ, но и ядрами атомов окружающей атмосферы, конструкционных материалов, из которых построены установки, атомами вещества теплоносителя и самих защитных оболочек.

РЕАКТОРЫ. Уран-графитовый реактор — первый и ставший как бы классическим — основной тип ядерного реактора, в котором ядерное горючее размещено в замедлителе нейтронов — графитовых блоках. Реакторы такого типа широко применяются в промышленных установках, предназначенных для производства плутония и для выработки электрической энергии.

РЕАКТОР ВОДО-ВОДЯНОЙ — ядерный реактор, в котором в качестве замедлителя нейтронов применяют обыкновенную дистиллированную воду, служащую одновременно и теплоносителем — средой, отводящей тепло из реактора в теплообменник.

Водо-водяной реактор позволяет получать при одной и той же мощности несколько большее количество плутония (по сравнению с другими реакторами).

РЕАКТОРЫ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ — общее название ядерных реакторов, в которых деление ядерного топлива — сильно обогащенного урана-235 и плутония-239 —

осуществляется быстрыми нейтронами с энергией 1 *Мэв* и выше. Такой реактор не содержит замедлителя. Обычно реакторы на быстрых нейтронах имеют малые размеры, но большую загрузку топлива. Существует целый ряд конструкций таких реакторов, например импульсный, размножительный (бридерный) и др.

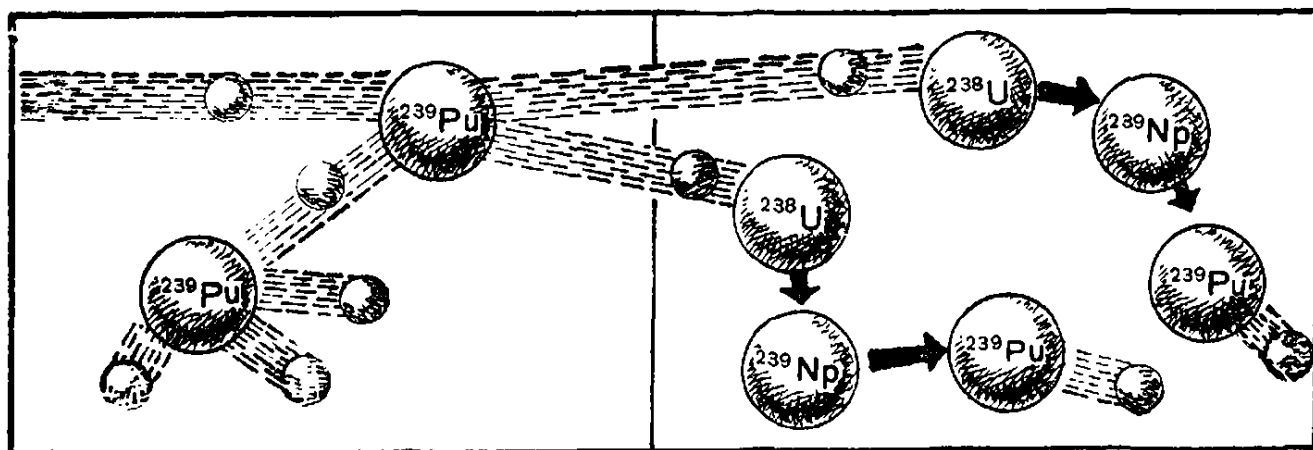
РЕАКТОР ИМПУЛЬСНЫЙ. Представьте себе два куска плутония (их масса несколько меньше критической массы), установленных так, чтобы между ними оставалась щель (достаточная для того, чтобы не началась цепная ядерная реакция). В этой щели со скоростью пять тысяч оборотов в минуту вращается диск с укрепленным на нем кусочком урана-235. В тот момент, когда кусочек урана-235 влетает в щель и оказывается между кусками плутония, масса всей комбинации ядерного горючего оказывается выше критической, и в ней начинается взрывная цепная реакция. Тогда... Взрыва не происходит, ибо за какую-то малую долю секунды до возможного взрыва кусочек урана выскальзывает из щели, и цепная реакция столь же быстро угасает. Но в момент «противостояния» плутония и урана выбрасывается, как вспышка молнии, сгусток быстрых нейтронов.

Ценность такого реактора заключается в том, что при среднем уровне мощности, не превышающем всего 1 *квт*, он пять тысяч раз в секунду «бьет» импульсами нейтронов мощностью по несколько тысяч киловатт, что под силу лишь большому промышленному реактору.

Все вместе взятое позволяет изучать и измерять не только энергии, скорости и свойства столь большого количества нейтронов, но и результат их взаимодействия с самыми различными веществами.

РАЗМНОЖИТЕЛЬНЫЙ (БРИДЕРНЫЙ) РЕАКТОР. Мы уже говорили, что делящегося изотопа урана-235 в природном уране содержится всего 0,7%. Остальной уран-238 (99,3%) после очень сложного процесса выделения урана-235, по сути дела, понадал в очень дорогие и не находящие применения в других отраслях производства отходы. До поры до времени их хранили, не зная, что с ними делать.

И перед учеными встала новая проблема: каким путем выгоднее всего и технически проще высвободить скрытую в недрах атома энергию — прямым, предварительно отделяя от природной смеси урана 0,7% его драгоценного делящегося изотопа — урана-235 (см *Разделение изотопов*) или возбуждая в нем (вернее, «усмиряя») саморазвивающуюся цепную ядерную реакцию деления урана-235 в неразделенной природной смеси урана? Если при этом искусственно замед-



лить скорость большинства выбрасываемых при делении ядер атомов урана-235 нейтронов до скорости, при которой они будут усиленно поглощаться ядрами атомов урана-238, то, претерпев короткий ряд радиоактивных распадов, ядра атомов урана-238 превратятся в ядра атомов не существующего в природе искусственного радиоактивного элемента плутония-239, который делится уже нейтронами любых энергий — от тепловых до быстрых.

Что при этом теряется? Выжигая из природной смеси 0,7% урана-235, можно превратить в плутоний-239 несколько меньшее количество урана-238 (0,2—0,3%).

А что выгадываем? Плутоний-239 хотя и близок по массе к урану-238, но химически это совсем другой элемент с другими свойствами; его несравнимо легче отделить от осколков деления и неразделившихся атомов урана-235 и от урана-238, не превратившегося в плутоний-239, чем осуществлять еще более дорогой, длительный и сложный процесс физического разделения изотопов урана.

Было выбрано более правильное второе направление, благодаря чему использование атомной энергии в технических и энергетических установках стало конкретной реальностью.

Но это само по себе грандиозное достижение науки и техники наших дней не разрешило основной нелепости: из общей массы природного урана с помощью замедленных нейтронов удастся использовать лишь 1/140 его часть, а остальное сваливать в отходы.

Но как, откуда получить достаточное количество быстрых нейтронов, чтобы иметь возможность делить и остальные 139/140 частей урана-238?

Лишь значительно позже выяснилось, что в отличие от урана-235 пужной энергией, способной делить ядра атомов

урана-238, обладает большая часть нейтронов, выбрасываемых при цепной реакции деления плутония-239. А раз так, то почему бы не попытаться построить ядерный реактор не на делении урана-235, а на быстрых нейтронах, испускаемых при делении плутония-239, примерно по такой схеме. В центре реактора разместить активную зону из плутониевых стержней, в которых будет возбуждаться управляемая цепная ядерная реакция деления, сопровождаемая обильным излучением быстрых нейтронов. Вместо же графитового зеркала, возвращающего нейтроны обратно в активную зону реактора, установить в несколько рядов как бы частокот из стержней урана-238, поглощающих каждый долетевший до них быстрый нейтрон и превращающихся спустя короткое время в плутоний-239.

Допустим, что в реакторе «сгорит» 1 кг где-то ранее полученного обычным способом плутония-239. Каждый его атом, расколовшись надвое, «выстрелит» двумя-тремя быстрыми нейтронами с энергией более 1 Мэв. Один нейтрон, скажем, в среднем будет израсходован на поддержание хода цепной реакции в самом плутонии, а от 1,5 до 2 нейтронов застрянут в ядрах урана-238, превратив их сперва в нептуний-239, а затем в плутоний-239. В конечном счете в урановом «зеркале» появится, предположим, от 0,4 до 0,7 кг плутония-239. Если эти 0,7 кг плутония-239 заложить в другой такой же реактор, то в плутоний превратится уже 1,5 кг урана-238 и т. д. Короче говоря, вместо 1/140 части природного урана в нем можно использовать в несколько раз больше, а со временем и все 100%!

Очень малые размеры активной зоны ядерного реактора, в которой, однако, высвобождаются сотни тысяч киловатт тепловой энергии, крайне осложняют задачу отвода от нее столь большого количества тепла.

Преимущества реакторов на быстрых нейтронах весьма велики, поэтому разработки их наиболее рациональных конструкций ведутся во многих странах.

В СССР раньше, чем в других странах, построено и действует несколько исследовательских реакторов на быстрых нейтронах. В частности, такой реактор (БОР-60) установлен в Димитровграде Ульяновской области. Пущена в эксплуатацию крупнейшая в мире атомная электростанция на быстрых нейтронах мощностью 150 тыс. кВт в г. Шевченко в Закаспии. Эта АЭС соединена с опреснительной установкой, дающей пресную воду для развивающейся промышленности полуострова Мангышлак. На Урале начато сооружение такой АЭС мощностью уже 600 тыс. кВт.

РЕАКТОР НА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ НЕЙТРОНАХ — ядерный реактор, в котором деление ядер урана вызывается нейтронами промежуточных энергий от 1 *кэв* до 0,5 *Мэв*.

РЕАКТОР НА МЕДЛЕННЫХ (ТЕПЛОВЫХ) НЕЙТРОНАХ — любой вид ядерного реактора, в котором подавляющее большинство делений ядерного топлива происходит путем захвата медленных (тепловых) нейтронов, для чего используют замедлители (вода, графит, тяжелая вода), снижающие энергию нейтронов примерно до 0,03 *эв*.

РЕАКТОР НА ОБОГАЩЕННОМ УРАНЕ — ядерный реактор, в котором применяют ядерное топливо с искусственно повышенным содержанием делящегося изотопа урана-235. При использовании обогащенного топлива коэффициент размножения нейтронов увеличивается настолько, что это позволяет применить при конструировании реактора материалы, поглощающие несколько больше нейтронов, чем специальные материалы, поглощающие их мало, например нержавеющую сталь, а в качестве замедлителя — обыкновенную воду. Помимо этого, несколько большее содержание изотопа урана-235 позволяет уменьшить критическую массу ядерного топлива, а благодаря этому и размеры самого реактора.

РЕАКТОР НУЛЕВОЙ МОЩНОСТИ — ядерный реактор, развивающий столь малую мощность, что для своей работы он не требует принудительного охлаждения и специальных мер защиты обслуживающего персонала от облучения. Используют его только в исследовательских, экспериментальных и учебных целях.

РЕАКТОР С ГАЗОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ — ядерный реактор, в котором вместо воды или жидкого металла теплоносителем служит газ, мало поглощающий нейтроны. Газовое охлаждение позволяет получать очень высокие температуры на выходе реактора, необходимые для увеличения коэффициента полезного действия установки, однако оно требует значительных затрат энергии на прокачку большого объема газа.

РЕАКТОР С ОРГАНИЧЕСКИМИ ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ И ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ. Вес любой атомной электрической станции, работающей по паро-водяному или водо-водяному циклу, приходится не столько на собственно реактор, сколько на его биологическую защиту (весьмающую сотни и тысячи тонн), так как помимо сравнительно небольшой активной зоны реактора приходится защищать и все громоздкое устройство первого контура, включая трубопроводы, насосы, теплообменники и т. д. Незащищенными остаются только те-

плоноситель и трубопроводы второго контура и сами турбины

Причина этого — вода. Какой бы идеально чистой вода ни была, проходя через активную зону реактора, она как бы впитывает в себя излучения — растворенные в ней ничтожно малые количества солей и некоторые изотопы кислорода становятся сильно радиоактивными и опасными для всего живого вокруг. Кроме всего, вода, поступающая в активную зону реактора, нагревается до температуры порядка $450\text{—}550^\circ\text{C}$ и выше, а для того чтобы она при этом не вскипела, она должна находиться еще и под огромным давлением — порядка $100\text{—}150\text{ атм}$. Все это создает множество затруднений при конструировании реакторов.

Ну а что было бы, если бы вместо воды или капризных и довольно опасных жидких металлов (см. *Жидкие металлы*) использовать в качестве замедлителя и теплоносителя вещества, не становящиеся радиоактивными при облучении любой интенсивности, к тому же обладающие еще большей теплоемкостью, чем вода? Тогда отпала бы необходимость в громоздкой и тяжелой биологической защите всего, что находится вне активной зоны реактора, а это на добрую половину, или даже на три четверти, сократило бы вес биологической защиты и, следовательно вес всего реактора.

Как компромисс между водой, требующей слишком высокого давления, и химически активными и небезопасными жидкими металлами в качестве теплоносителей используются некоторые органические соединения, например полифенил: дифенил ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}$), терфенил ($\text{C}_{18}\text{H}_{14}$) и др. Они, как и жидкие металлы, не требуют повышенного давления, не становятся сколько-нибудь заметно радиоактивными, так как не захватывают нейтронов, не вызывают коррозии конструктивных элементов реакторов, не увеличивают своего объема и довольно устойчивы к действию тепла и излучений, хотя их способность отводить тепло гораздо хуже, чем у жидких металлов и воды.

К их достоинствам следует также отнести малый размер активной зоны реактора, пониженные требования к прочности его конструктивных элементов, трубопроводов и др.

Естественно, есть и другие серьезные недостатки: высокая стоимость органических теплоносителей, склонность к разложению и полимеризации (сгущению) под действием высоких температур и облучений, требующая применения дополнительного контура, в котором можно было бы его время от

времени или непрерывно регенерировать (очищать и восстанавливать).

В разработанной советскими конструкторами передвижной атомной электрической станции АРБУС мощностью 750 *квт*, предназначенной для работы в самых отдаленных и необжитых районах страны, в качестве теплоносителя использована органическая жидкость — обычное дизельное топливо — газойль. Если его хорошо очистить от посторонних примесей, и в первую очередь от серы, он совершенно «равнодушен» к действию облучений и после выхода из активной зоны реактора, совершенно безопасен для окружающих. Более того, газойль ничего не корроззирует. Все трубопроводы, насосы, арматуру можно делать не из специальной, а из обычной стали. Благодаря большой удельной теплоемкости теплоносителя, давление, под которым он работает, в 20 раз меньше, чем на атомных электростанциях, где теплоноситель — вода. Благодаря этому вес всей установки не превышает 360 *т*. Малый объем биологической защиты позволяет расчленить электростанцию на 19 отдельных блоков, ни один из которых не весит более 20 *т*, вследствие чего ее легко можно доставить в любой район страны.

РЕАКТОР С ТЯЖЕЛОЙ ВОДОЙ — ядерный реактор, у которого замедлителем служит тяжелая вода. Данный тип реактора особенно пригоден для научных исследований, так как позволяет получать в активной зоне очень большие количества нейтронов.

РЕАКТОР БАССЕЙНОВОГО ТИПА — ядерный реактор, в котором тепловыделяющие элементы в виде набора кассет погружены на дно большого бассейна с водой, причем вода служит одновременно и охладителем рабочей зоны и замедлителем нейтронов. Используют его главным образом для исследовательских целей и приготовления радиоактивных изотопов.

РЕАКТОР НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ — ядерный реактор, в котором ядерное топливо используют в жидком виде — в виде раствора солей урана или плутония или в виде тонкой взвеси делящихся веществ в какой-либо другой жидкости. Жидкость с растворенным в ней или взвешенным ядерным топливом служит одновременно и замедлителем нейтронов, и теплоносителем, отводящим тепло от рабочей зоны. Реактор такого типа имеет то преимущество, что удаление продуктов деления и неиспользованной части ядерного горючего и введение свежего горючего можно осуществлять постепенно и непрерывно, без необходимости останавливать реактор на перезарядку. Однако эти преимущества одновременно услож-

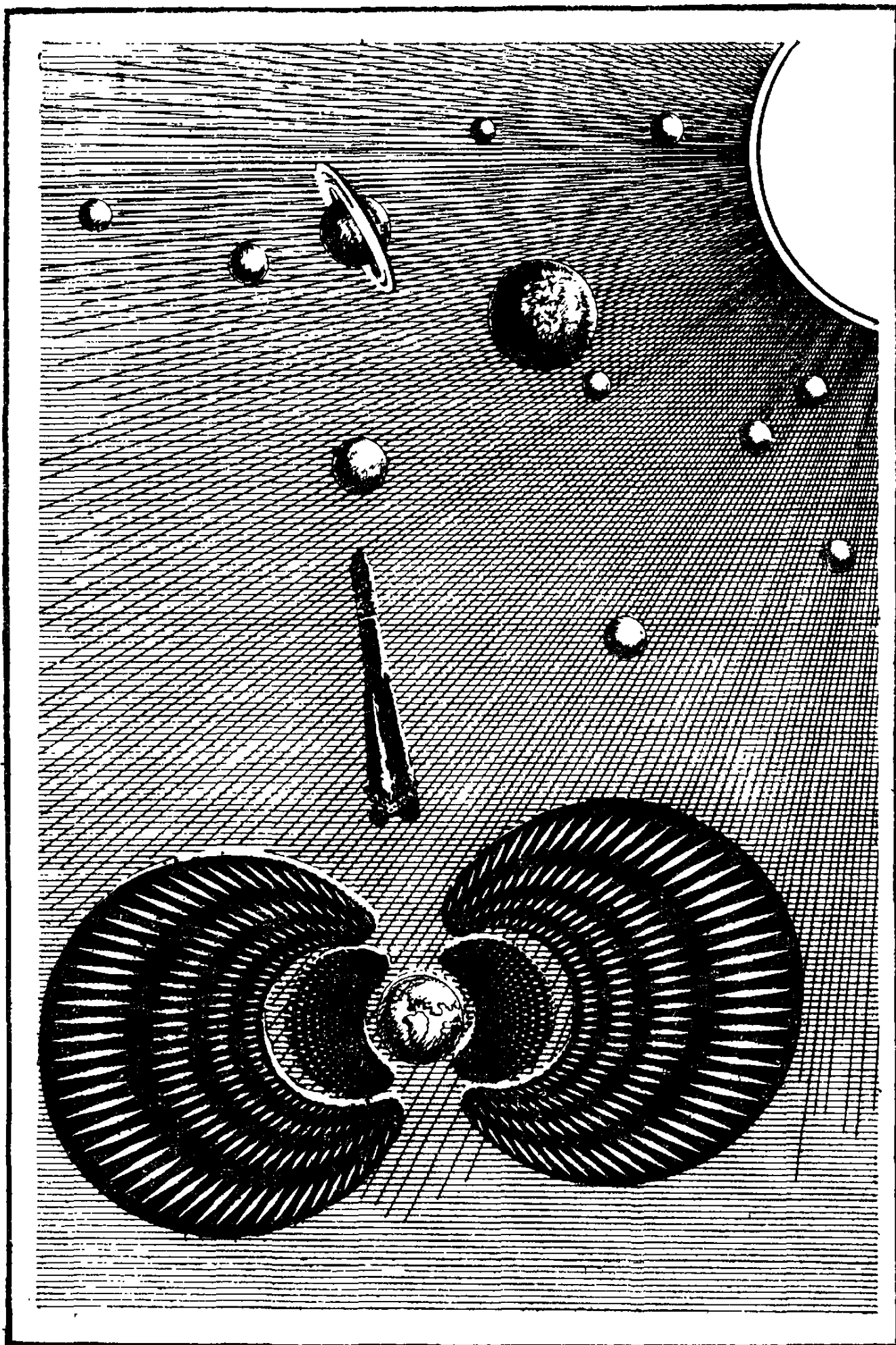
няют конструкцию реактора и затрудняют его работу, так как для непрерывной регенерации топлива необходимо добавлять специальный узел, в котором постоянно должна находиться часть циркулирующего через реактор делящегося материала. По этой же причине значительно увеличивается объем биологической защиты.

РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ — новая отрасль химической науки, изучающая влияние излучений (радиации) на химические и физические свойства различных веществ и материалов. В ряде случаев действие излучений позволяет вести производственные химические процессы, которые не удастся осуществлять ни при каких других способах воздействия. Особенно перспективно применение радиации в производстве полимерных материалов, т. е. при превращении мономеров в полимеры без введения в них обычных добавок — инициаторов полимеризации. Радиационная химия изучает также стойкость различных материалов под действием излучений и одновременно разрабатывает методы их защиты от действия радиации, ищет новые пути синтеза химических веществ и изменения их свойств в заданном направлении.

РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ (ПОЯСА ВАН АЛЛЕНА — ВЕРНОВА). После открытия космических лучей — потоков частиц, падающих на Землю извне, — прогресс в этой новой и исключительно важной области физики почти целиком зависел от условий опыта, например от высоты, на которую удавалось поднять сложные приборы и счетчики над Землей.

И не удивительно, что в числе полезного груза ракет, впервые вырвавшихся за пределы земной атмосферы в космическое пространство, главное место занимают всевозможные установки для изучения заряженных частиц. Первые же сигналы показаний приборов, автоматически переданные по радио на Землю, вызвали удивление ученых. На некоторых высотах космические лаборатории попадали в области, густо насыщенные заряженными частицами, обладающими очень большой энергией, резко отличными от наблюдавшихся ранее космических частиц, и первичных, и вторичных.

Советский ученый Вернов и почти одновременно с ним американский физик Ван Аллен установили, что земной шар окружен в экваториальной плоскости двумя, а по последним сведениям, даже тремя сравнительно четко отделенными друг от друга поясами — нечто вроде гигантских бубликов, густо заселенных частицами разных зарядов, энергий и масс. Плотность частиц изменяется от края до края каждого пояса,



причем космическое пространство в обе стороны от полюсов от них практически свободно. После обработки данных первых запусков ракет и полетов спутников стало ясно, что речь идет о заряженных частицах, захваченных магнитным полем Земли.

Известно, что любые заряженные частицы, попав в магнитное поле, начинают «навиваться» на силовые линии магнитного поля, одновременно передвигаясь вдоль них. Размеры витков получающейся спирали зависят от первоначальной скорости частиц, их массы, заряда и напряженности магнитного поля Земли в той области околоземного пространства, в которую они влетели и изменили направление движения. Магнитное поле Земли неоднородно. У полюсов оно «сгущается» — уплотняется. Поэтому заряженная частица, начавшая движение по спирали вдоль «оседланной» ею магнитной линии из области, близкой к экватору, по мере приближения к какому-либо полюсу испытывает все большее и большее сопротивление, пока не остановится, а затем возвращается назад к экватору и дальше к противоположному полюсу, откуда начинает движение в обратном направлении. Частица оказывается как бы в гигантской «магнитной ловушке» планеты.

Первый такой пояс начинается на высоте примерно 500 км над западным и 1500 км над восточным полушарием Земли. Самая большая концентрация частиц этого пояса — его ядро — находится на высоте двух-трех тысяч километров. Верхняя граница этого пояса достигает трех-четырёх тысяч километров над поверхностью Земли. Второй пояс частиц простирается от 10—11 до 40—60 тыс. км с максимальной плотностью частиц на высоте 20 тыс. км. Внешний пояс начинается на высоте 60—75 тыс. км. Приведенные границы поясов определены пока еще только приблизительно и, видимо, в каких-то пределах периодически изменяются.

Отличаются эти пояса друг от друга тем, что первый из них, самый близкий к Земле, состоит из положительно заряженных протонов, обладающих очень большой энергией — порядка 100 Мэв. Их смогла захватить и удержать только самая плотная часть магнитного поля Земли. Второй пояс состоит главным образом из электронов с энергией «всего лишь» 30—100 кэв. В третьем поясе, где магнитное поле Земли самое слабое, удерживаются частицы с энергией 200 эв и более. Если учесть, что обычное рентгеновское излучение, применяемое кратковременно для медицинских целей, обладает энергией 30—50 кэв, а мощные установки для просве-

чивания огромных слитков и глыб металла — от 200 кэв до 2 Мэв, можно легко представить, насколько опасны эти пояса, особенно первый и второй, для космонавтов будущего и для всего живого при полетах на другие планеты. Вот почему сейчас ученые столь упорно и тщательно пытаются уточнить месторасположение и форму этих поясов, распределение частиц в них. Пока ясно лишь одно. Коридорами для выхода обитаемых космических кораблей на трассы к другим мирам будут области, близкие к магнитным полюсам Земли, свободные от частиц больших энергий.

Естественен вопрос: откуда взялись все эти частицы? Их в основном выбрасывает из своих недр наше Солнце. Сейчас уже установлено, что Земля, несмотря на огромное расстояние от Солнца, находится в самой внешней части его атмосферы. Это, в частности, подтверждается тем, что каждый раз, когда возрастает солнечная активность, а следовательно, увеличиваются количество и энергия испускаемых Солнцем частиц, возрастает и количество электронов во втором радиационном поясе, который как бы под напором «ветра» из этих частиц прижимается к Земле. Застревают в магнитной ловушке Земли и космические частицы, энергии которых оказалось недостаточно, чтобы проскочить сквозь нее дальше, а также частицы, образовавшиеся в результате столкновения частиц первичных космических лучей больших энергий с атомами самых верхних и крайне разреженных слоев атмосферы, которая, как оказалось, простирается значительно дальше, чем считалось до недавнего времени, — почти на 150 км от поверхности Земли.

Мы даже и не подозреваем, каким надежным щитом является для человека и вообще для всего живого на Земле прозрачная и почти неосязаемая атмосфера и совсем невидимое и неощутимое магнитное поле планеты. А к той сравнительно незначительной части излучений, которым все же удастся прорваться сквозь двойную природную броню Земли, живая материя и ее венец — человечество — за сотни миллионов лет своей эволюции полностью приспособились, и трудно даже фантазировать, какие бы формы приняла жизнь на планете, если бы она не была полностью защищена от всех видов космического излучения. Выход человека в космическое пространство сразу лишает его спасительного щита атмосферы и магнитного поля и подвергает воздействию всех видов излучения сразу.

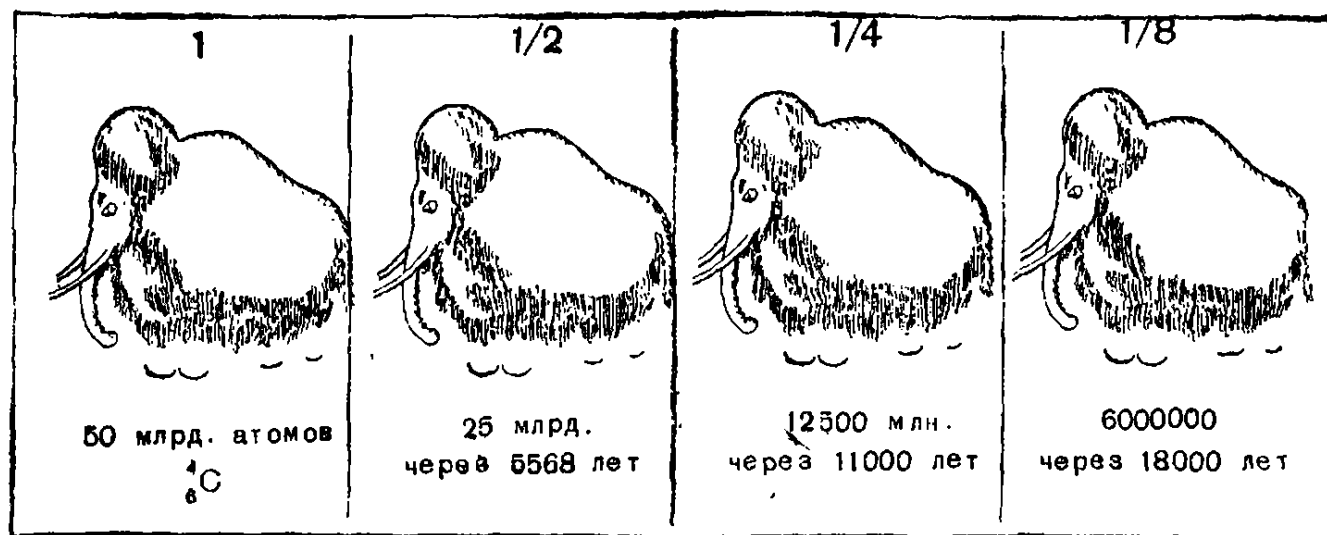
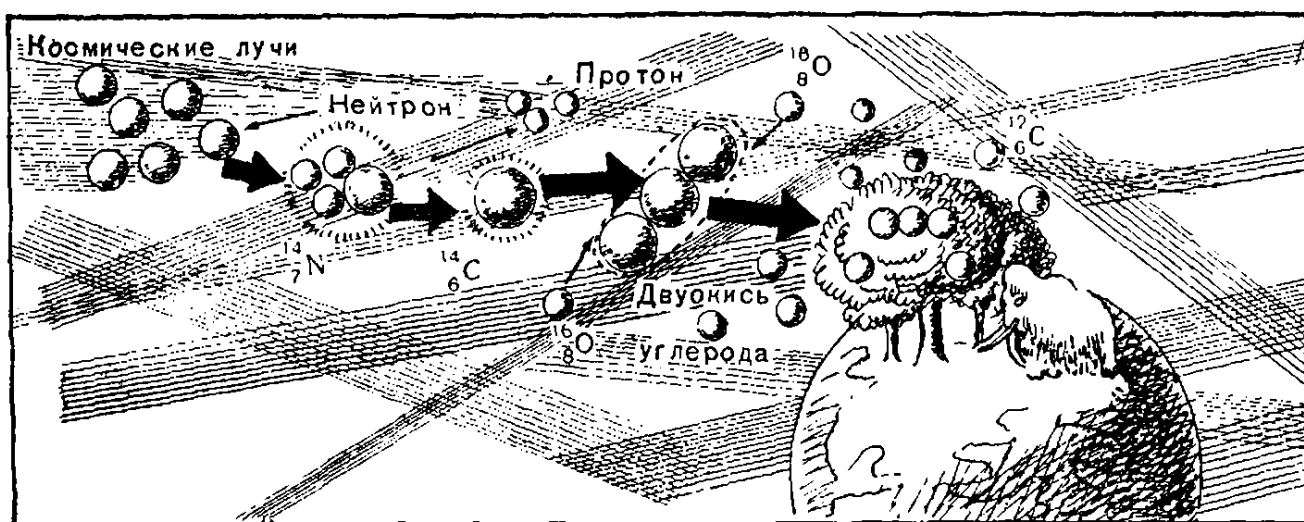
РАДИОАКТИВНЫЕ ОСАДКИ (РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ БИОСФЕРЫ) — заражение атмосферы, мест-

ности, почвы, источников воды, различных сооружений радиоактивными веществами, происходящее в результате ядерных взрывов или распыления в воздухе радиоактивных отходов атомной промышленности.

При взрыве атомных бомб в воздухе крупные радиоактивные частицы выпадают вблизи места взрыва, приводя к радиоактивному заражению местности, более мелкие частицы распределяются по тропосфере и стратосфере и воздушными течениями разносятся по всему земному шару. Подводный взрыв вызывает сильное заражение огромного количества воды, разносимой затем подводными течениями и естественной циркуляцией по всей массе воды Мирового океана. Подземные атомные взрывы приводят к радиоактивному заражению почвы в непосредственном окружении места взрыва, а в ряде случаев и к прорыву радиоактивных газов и продуктов деления в атмосферу с последующим их оседанием на землю, как это уже случалось при некоторых подземных взрывах в США.

РАДИОБИОЛОГИЯ — раздел биологической науки, изучающий изменения в животных и растительных организмах, происходящие в результате воздействия на них ионизирующей радиации. Радиобиология изучает тончайшие первичные механизмы действия ионизирующей радиации на живые клетки, поражения и необратимые изменения в клетках и осложнения, возникающие в организмах в результате воздействия ионизирующих излучений, а также влияние излучений на наследственные изменения, проявляющиеся у потомства облученных организмов.

РАДИОГРАФИЯ — общее название метода регистрации и изучения ионизирующих излучений (заряженных частиц и гамма-квантов) с помощью фотографии. Попадая в слой фотоэмульсии, заряженная частица или гамма-квант оставляют в ней след из ионизированных атомов. При этом в зернах бромистого серебра, входящего в состав фотоэмульсии, образуются центры скрытого изображения, которые становятся видимыми (чернеют) после проявления фотопластины (или пленки). Данным способом, например, легко получить картину распределения радиоактивных индикаторов (меченых атомов) в каком-либо веществе по всей плоскости поверхности или сечения исследуемого предмета. Для этого фотографическую пластину просто прикладывают на некоторое время к предмету (например, к листу растения, пластинке металла или срезу ткани). Таким же путем можно исследовать любые формы поверхностных явлений — адсорбции, коррозии и т. д., а также процессы образования и роста



кристаллов и распределение компонентов в сплавах металлов.

РАДИОУГЛЕРОДНЫЙ МЕТОД (ДАТИРОВАНИЯ ИСКОПАЕМЫХ ОСТАТКОВ). Счет на сотни миллионов и миллиарды лет ведут астрономы, геофизики, геологи. Другие ученые заинтересованы в определении более коротких отрезков времени — тысячелетий. Здесь приходится обращаться к методу, как это ни покажется странным, космического происхождения — к применению в качестве геологических часов радиоактивного углерода-14 (^{14}C).

Природный углерод, соединения которого являются основой всех живых организмов, состоит из двух стабильных изотопов: углерода-12 (98,892%) и углерода-13 (1,108%). В очень ничтожных количествах в атмосфере обнаруживается еще

и радиоактивный изотоп этого элемента — углерод-14 — неземного происхождения. Откуда он берется?

Наша планета подвергается непрерывной бомбардировке космическими лучами — частицами, обладающими огромной энергией, измеряемой десятками и сотнями тысяч миллиардов электронвольт (см. *Космические лучи*). Эти частицы разбивают встречающиеся им на пути ядра атомов воздуха, образуя вместе с осколками нейтроны. Нейтроны захватываются ядрами других атомов, в том числе и ядрами азота-14. Возникает ядерная реакция, в результате которой образуется изотоп углерод-14. Период полураспада такого углерода равен 5568 годам.

Углерод — один из наиболее активных химических элементов в природе. Поэтому, едва возникнув, он тут же подвергается «нападению» атомов кислорода и, соединившись с ними, образует углекислоту (двуокись углерода-14, CO_2).

Вездесущий ветер, а также взаимная диффузия газов основательно перемешивают молекулы газа, содержащего меченые радиоактивные атомы углерода, с молекулами обычного углекислого газа. Далее все идет обычным порядком: углекислоту поглощают растения, а животные и люди потребляют эти растения в пищу вместе с попавшим в них радиоактивным углеродом.

Теперь предположим, что где-то и когда-то заболело, прекратило принимать пищу и погибло животное. Или было срублено дерево. 5568 лет спустя ученый археолог или палеонтолог обнаружил при раскопках сохранившуюся кость этого животного или кусок дерева от постройки. Радиоактивный углерод в организм животного или в растение после его гибели, естественно, больше не поступает, а тот, что был накоплен до этого, постепенно распадается и исчезает. Половина первоначально накопленного углерода-14 исчезнет через 5568 лет, половина оставшегося количества — еще через 5568 лет и т. д.

Но какое количество радиоактивности следует принять за исходное? Дело в том, что содержание в обычном природном углероде его «космического» изотопа в течение миллионов лет не изменилось, ибо в природе давно достигнуто равновесие между вновь образующимися и распадающимися атомами углерода. Следовательно, остается определить лишь разницу между радиоактивностью углерода-14, обнаруживаемого в ископаемых останках животных и растений, и его радиоактивностью в окружающей нас живой материи.

Любое животное или растение, живущее сегодня, содержит в 1 г углерода ткани или клетчатки столько же радиоактивных атомов углерода-14, сколько содержало их погибшее 5568 лет назад животное или срубленное дерево, а именно около 50 млрд. атомов. Но в ископаемых останках это количество, допустим, уменьшилось наполовину. Значит, животное или дерево погибло 5568 лет назад. Если бы радиоактивных атомов осталось только $1/4$, мы могли бы сказать, что возраст этих останков равен 11000 лет и т. д.

Этот метод в ряде случаев был проверен на образцах тканей, взятых от египетских мумий, и на других археологических находках, время погребения которых было точно известно. Однако в последнее время выяснилось, что содержание радиоактивного углерода в атмосфере в разные периоды и в разных местах нашей планеты не отличалось ожидавшимся постоянством и возраст ряда ископаемых органических останков оказался в явном противоречии с обнаруженными позднее документальными данными или возрастом, определенным по годовым кольцам деревьев. Это заставило ученых внести ряд закономерных корректив в эту, в общем-то достаточно надежную и удобную систему.

Вплоть до 2500 г. до н. э. возраст органических останков, определенный радиоуглеродным методом для Северной Европы, достаточно точно совпадает с известными историческими датами. Для юга Франции и Балкан он оказался более ранним, чем на самом деле. Для Египта же, наоборот — чересчур поздним. Предметы и останки, документально датированные 3000—2000 г. до н. э., при определении возраста радиоуглеродным методом систематически оказывались на несколько сот лет моложе.

С полученными поправками и сравнением с годовыми кольцами деревьев удалось продлить область действия радиоуглеродного метода вглубь веков на 8200 лет. До 1500 г. до нашей эры расхождение сравнительно незначительно, далее оно прогрессивно нарастает и к 2500 году до нашей эры достигает 700 лет, т. е. все ранее определенные радиоуглеродным методом европейские даты для трех тысячелетий до нашей эры пришлось отодвинуть на несколько столетий в прошлое. Все это заставило ученых археологов и историков пересмотреть хронологию целого ряда событий, которые целиком основывались на возрасте предметов и останков, определенном радиоуглеродным методом до внесения в него последних коррективов.

РАДИОХИМИЯ — наука, изучающая проблемы получения, разделения, очистки и определения радиоактивных

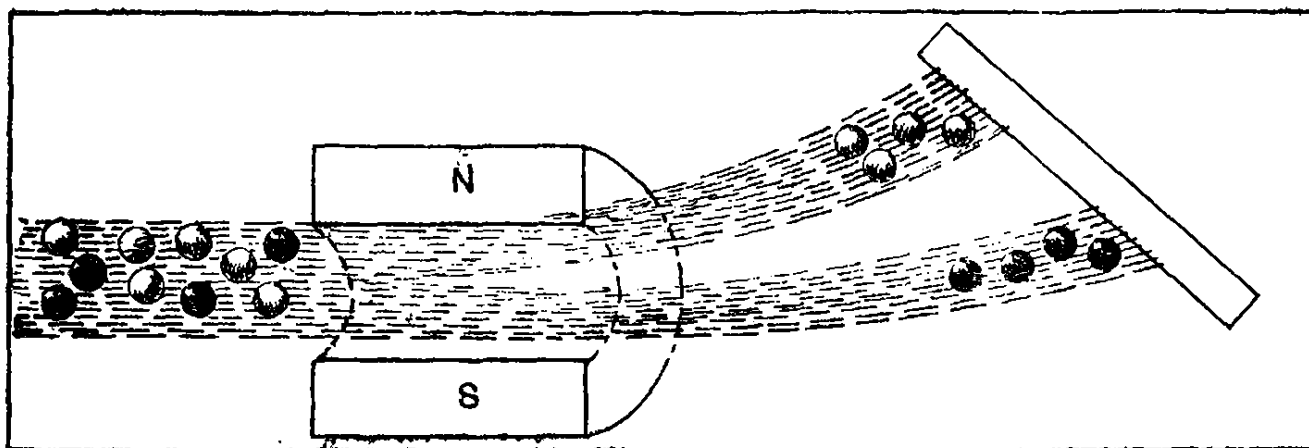
веществ а также методы измерения их основных свойств, химию ядерных реакций, при которых возникают и распадаются радиоактивные элементы. Радиохимия пользуется своеобразными методами, отличными от методов обычной химии, так как ионизирующее излучение веществ позволяет применять многие физические методы анализа с помощью всевозможных счетчиков частиц.

Радиохимический анализ отличается большой точностью и чувствительностью. Никакими другими средствами, например, невозможно было бы определить химические свойства одного из искусственных трансурановых элементов, количество которого составляло всего . 17 атомов! Прикладная радиохимия занимается также изучением методов применения радиоактивных изотопов в обычных химических исследованиях.

В связи с развитием мощной атомной промышленности радиохимия изучает и разрабатывает технологические процессы получения исходного радиоактивного сырья, восстановления отработанного в реакторах ядерного топлива, разделения продуктов деления и многие другие задачи и проблемы.

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ (МЕТОДЫ) — способы частичного или полного разделения смеси различных изотопов одного и того же химического элемента. Химическими способами осуществить такое разделение нельзя, так как химические свойства изотопов одного и того же элемента совершенно идентичны. Электрическое поле тоже не помогает — число электронов в оболочке и положительный заряд ядра у всех их совершенно одинаковы. Как тогда быть? К счастью, изотопы отличаются друг от друга своими массами. Это и было использовано в «машинах для сортировки атомов» — лабораторных приборах для определения массы атомов — так называемых масс-спектрографах.

Если некоторое количество газообразного вещества (подлежащей разделению смеси изотопов) поместить в откачанную от воздуха трубку с двумя впаянными в нее электродами, к которым приложено высокое напряжение, то можно наблюдать следующую картину. По ряду причин в любом объекте газа всегда имеется какое-то количество свободных электронов, выбитых из атомов при столкновении некоторого числа атомов друг с другом. Под действием сильного электрического поля эти свободные электроны тотчас же устремятся к положительно заряженному аноду. Сталкиваясь по пути с нейтральными атомами газа, электроны уже набравшие большую скорость, будут их ионизировать — выбивать новые



электроны. Выбитые электроны, ставшие тоже свободными, в свою очередь также устремятся к аноду и по пути начнут отрывать от встречных атомов свои порции электронов. В результате через трубку потечет электрический ток, сила которого зависит от степени ионизации газа.

Ну а как в это время будут себя вести положительные ионы — ядра атомов газа? Они устремятся в обратную сторону, к отрицательно заряженному катоду трубки, тоже с большой скоростью, но значительно медленнее электронов, ибо их масса в несколько тысяч раз больше массы электронов. Если в катод трубки сделать отверстие, то часть разогнавшихся до большой скорости ионов проскочит сквозь это отверстие и вырвется из него в виде узкого ионного луча. На пути у такого луча можно поставить несколько кольцевых электродов, к которым подведено дополнительное отрицательное напряжение для того, чтобы еще больше увеличить скорость ионов. Далее пучок ионов попадает в сильное магнитное поле. А любая заряженная частица, взаимодействуя с магнитным полем, изменяет направление своего движения. Естественно, что ионы, имеющие различную массу, под действием магнитного поля будут отклоняться по-разному. Чем легче изотоп, тем сильнее будет искривлена траектория его полета. Если теперь поставить на пути пучка ионов мишень под небольшим отрицательным потенциалом — металлическую пластинку, то каждый сорт ионов станет откладываться на разных участках пластинки.

Повторив такую операцию многократно, можно разделить элемент на составляющие его изотопы с любой степенью чистоты. По этому принципу и работает довольно сложный прибор масс-спектрограф Астона, названный так по имени его изобретателя, английского физика. С помощью этого прибора ученые исследовали почти все химические элементы Пе-

периодической таблицы Д. И. Менделеева: у одних элементов оказалось небольшое число изотопов, у других — более десятка (см. *Изотопы*).

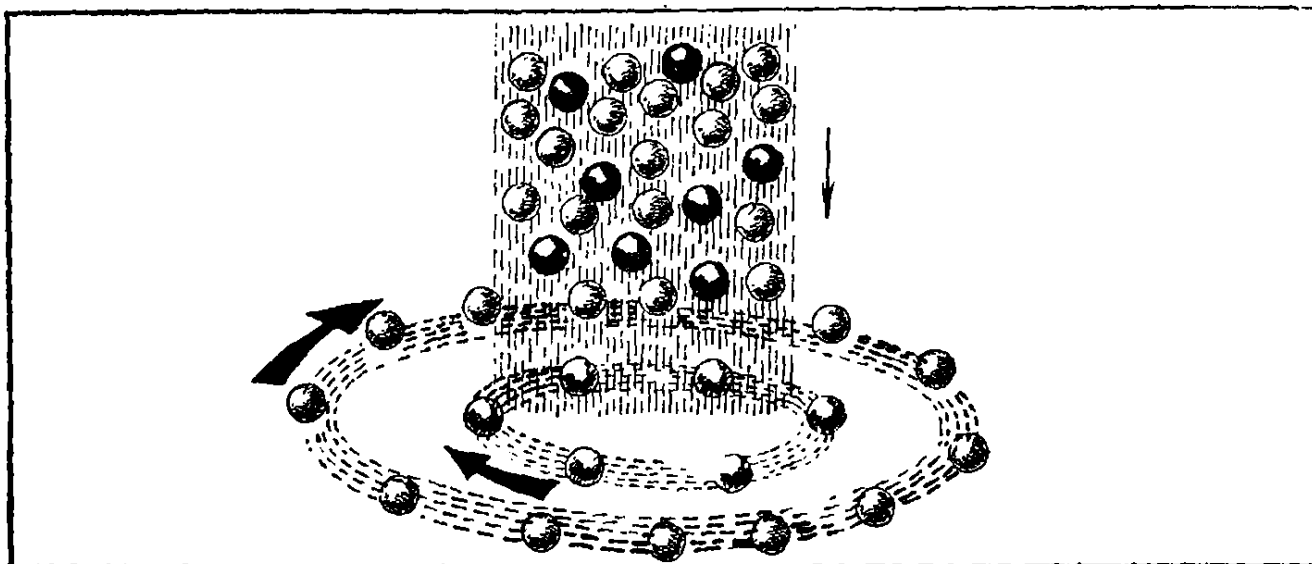
РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА. Природный уран состоит из трех изотопов: урана-234 (0,0056%), урана-235 (0,7184%) и урана-238 (99,276%).

Очень трудно разделить неусловимо малые количества изотопов, еще труднее — набрать достаточное их количество для изготовления атомной бомбы или использования в ядерном реакторе.

Наиболее продуктивным оказался следующий метод. Из физики известно, что молекулы любой смеси газов имеют в среднем одну и ту же кинетическую энергию. Но это вовсе не означает, что все они движутся с одной и той же скоростью. Одни молекулы, в результате многочисленных столкновений движутся быстрее, другие — медленнее, более легкие молекулы — вообще движутся быстрее, чем более тяжелые. Движущиеся быстрее легкие молекулы поэтому и чаще налетают на стенки сосуда, в котором заключена смесь газов, создавая в нем различное давление: более высокое для легких молекул, более низкое — для тяжелых. Если одну из стенок сосуда изготовить из вещества с множеством микроскопических пор, то за некоторый отрезок времени из такого сосуда улетучится наружу несколько больше легких молекул газа, чем тяжелых. Просочившийся и собранный снаружи газ окажется на какую-то долю легче, чем оставшийся в сосуде. Такое избирательное проникновение более легких молекул газа через пористые стенки сосуда называют **диффузионным разделением**.

Однако этот, кстати сказать, очень медленный процесс практически осуществляется в том случае, если более легкий газ будет проникать сквозь перегородку только в одном направлении — наружу — и не сможет возвращаться обратно. Для этого сосуд должен состоять из двух отделений. В первом отделении газ находится под несколько повышенным давлением, из второго отделения он непрерывно откачивается. Если составить батарею из большого числа таких двойных сосудов, разделенных каждой пористой перегородкой, и заставить подлежащий разделению газ последовательно проходить все эти сосуды (ячейки) один за другим, допустим через несколько тысяч ячеек, то к концу такого многотрудного путешествия в нем окажутся только самые легкие молекулы газа.

Чтобы использовать этот способ для разделения изотопов природного урана, последний нужно превратить в газ. Един-



ственное газообразное соединение урана — гексафторид — шестифтористый уран, который и используют для разделения природной смеси изотопов урана-238 и урана-235

Другой метод разделения изотопов урана разработан в ФРГ. Струя газа состоящего из 95% гелия и 5% шестифтористого урана под большим давлением нагнетается в трубку, двигаясь по которой она приобретает сверхзвуковую скорость. В конце трубки струя газа попадает в изгиб поворачивающий ее на 180 градусов, рассеивается и попадает на перегородку разделяющую струю на две неравные части. При этом внутренняя часть струи содержит несколько больше атомов более легкого изотопа урана-235 чем внешняя. Проходя последовательно через несколько тысяч таких трубок, газ все больше и больше обогащается дефицитным изотопом — ураном-235 пока не достигнет пригодной для использования степени насыщения.

В последнее время разработан еще один промышленный метод разделения изотопов урана — центрифугирование. По этому способу газообразный шестифтористый уран поступает в центрифугу вращающуюся со скоростью 300—500 об/сек. При этом более тяжелые изотопы — уран-238 — отбрасываются к стенкам центрифуги, а более легкие изотопы — уран-235 — концентрируются в ее центре. Разделенная таким образом струя газа поступает в следующую центрифугу, в которой уже несколько обогащенный легким изотопом газ обогащается еще больше. Этот процесс, так же как и все описанные выше, требует последовательного пропускания струи шестифтористого урана через несколько тысяч центрифуг, прежде чем он достигнет требуемой степени обогащения дефицитным изотопом — ураном-235.

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, в частности большой расход электрической энергии. Тщательнее других разработан и наиболее часто до сих пор применяется метод газодиффузионного разделения.

РЕГУЛИРУЮЩИЕ СТЕРЖНИ — пластины, покрытые веществом, сильно поглощающим нейтроны (кадмием, бором и т. д.), которые могут вручную или автоматически вдвигаться внутрь активной зоны реактора. Увеличивая или уменьшая таким путем поглощение нейтронов, можно достаточно точно регулировать уровень (скорость) цепной реакции, а следовательно, и тепловую мощность реактора.

РЕЗОНАНСЫ (резонаны) — частицы с необычно коротким сроком жизни (около 10^{-23} сек), открытые в 1962 г. с помощью новых гигантских ускорителей одновременно в СССР и США. Ввиду столь малого срока жизни ученые склонны рассматривать их не как своеобразное подсемейство элементарных частиц, а скорее как некую мгновенную промежуточную и крайне неустойчивую форму существования «нормальных» элементарных частиц.

РЕКОМБИНАЦИЯ — воссоединение распавшихся (диссоциировавших) молекул вещества под действием внешних сил, например очень высоких температур

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЧАСТИЦЫ. В классической механике основной характеристикой любого тела является масса, определяющая инертные свойства этого тела, т. е. способность получать под действием приложенной к нему внешней силы то или иное ускорение. В новой, вытекающей из специальной теории относительности Эйнштейна так называемой релятивистской механике масса любого тела зависит от его скорости. По мере приближения скорости движения к скорости света масса тела стремится к бесконечности. По этой же причине ни одно тело нельзя разогнать до скорости света. Частицы, масса которых вследствие огромной скорости их движения изменяется в соответствии с приведенным законом, называют р е л я т и в и с т с к и м и.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (лучи Рентгена) — электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны — примерно от 0,06 до 20 \AA [один ангстрем (\AA) равен одной стомиллионной доле сантиметра (10^{-8} см)]. Образуется при торможении (столкновении) потока быстрых электронов в веществе (см. *Тормозное излучение*).

Очень быстрая частица, в частности ускоренный до энергии от десятков тысяч до миллионов электронвольт электрон, попадая в атом, может пройти сквозь его внешнюю электрон-

ную оболочку и выбить один из электронов с внутренних оболочек. Это, например, осуществляется в рентгеновской трубке, когда испускаемый катодом поток ускоренных электронов тормозится вблизи мишени (анода) трубки. На образовавшееся во внутренней оболочке атома пустое место мгновенно переходит электрон с одной из внешних оболочек атома. При этом переходе он теряет часть энергии в виде фотона рентгеновского (мягкого или жесткого) излучения в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-10} см. При этом может возникнуть сплошной спектр рентгеновского излучения — от самого короткого до самого длинного, хотя подавляющая часть испускаемых веществом длин волн будет тем короче, чем выше энергия (скорость) бомбардирующих его электронов. В тех случаях, когда энергия электронов настолько велика, что выбивает электроны, расположенные на самых «глубоких» внутренних электронных оболочках атомов испускается так называемое жесткое излучение.

Эта особенность позволяет на основании спектра рентгеновского излучения, испускаемого тем или иным веществом при облучении его потоком быстрых электронов, определять ряд его физических свойств и уточнять детали строения этого вещества.

Рентгеновские лучи могут преломляться, отражаться, претерпевать дифракцию и интерференцию, но только в тех веществах, в которых расстояния между атомами примерно такие же, как и длина применяемых рентгеновских лучей, т. е. главным образом в кристаллах.

Рентгеновское излучение обладает сильной проникающей способностью и может вызывать почернение фотографической пластинки и свечение некоторых веществ, ионизирует газы, оказывает биохимическое действие на живые клетки. Эти свойства и используют в науке и технике для просвечивания непрозрачных предметов с целью обнаружения дефектов в них (вплоть до стальных слитков в несколько десятков сантиметров толщиной), для просвечивания больных, лечения злокачественных опухолей, для исследования химического состава вещества, стимуляции роста растений, борьбы с вредителями сельского хозяйства и т. д.

РЕНТГЕН — очень важная в ядерной технике величина, показывающая степень ионизации вещества под действием рентгеновского или гамма-излучения или, что одно и то же, количество поглощенного им излучения. Эта величина такого излучения, при котором в 1 см^3 воздуха при обычном атмосферном давлении и температуре 0°C образуются заряды (ионы) обоих знаков в одну электростатическую единицу

каждый. Один рентген соответствует образованию в 1 см^3 воздуха 2,1 млн. пар ионов. Чтобы образовать одну пару ионов в воздухе, каждому фотону излучения необходимо затратить 32,5 эв энергии. Величина излучения, измеренная в рентгенах, имеет важное значение для определения безопасных, доз, которыми можно облучать живые организмы.

Биологическое воздействие ионизирующих частиц (альфа-частица, бета-частица, протон) на живые организмы различно, оно измеряется другой единицей, названной биологическим эквивалентом рентгена (*бэр*).

РУДЫ (УРАНОВЫЕ И ТОРИЕВЫЕ) При создании любой новой отрасли промышленности одной из главных проблем является обеспечение ее сырьем. Это относится и к проблеме использования атомной энергии, требующей большого количества новых видов сырья, прежде всего для производства ядерного горючего. В недрах земли имеется очень много различных видов урановых и ториевых руд, но лишь некоторые из них были открыты в количествах, пригодных для их разработки.

РУДЫ УРАНОВЫЕ На современном этапе развития атомной науки и техники самое важное значение имеют урановые руды. Залежи урана могут находиться в самой различной геологической среде: в осадочных породах (песчаники, конгломераты, известняки), в породах с кристаллическим строением (граниты, гранулиты и др.) и метаморфическим строением (гнейсы, пироксениты, сланцы и др.) Они образовывались на протяжении всех ступеней геологического формирования поверхности Земли, начиная с докембрийского и вплоть до четвертичного периода. Их структурные формы весьма разнообразны: рудные жилы, отдельные скопления, чечевицеобразные тела, пласты, контактные зоны и т. п.

Основная урановая руда — смоляная обманка. Она состоит из смеси природных окисей урана (UO_2 , UO_3). Ее залежи находятся главным образом в рудных жилах, обычно в твердом состоянии или же в виде рассыпчатой массы (черные окислы), образовавшейся из-за поверхностного разложения руды.

Уран также содержится в рудах редкоземельных элементов. К их числу относятся сложные окислы урана, ниобия, тантала, титана и других редкоземельных элементов. Промышленного значения эти руды не имеют.

РУДЫ УРАНОВЫЕ, ВТОРИЧНЫЕ Характерная особенность этих руд — их яркий зеленый, желтый а иногда

красный цвет. Эти руды можно разделить на две группы. Первая группа руд, образующаяся в результате разложения смоляной обманки, встречается как в местах залегания первичных урановых руд, так и на небольшом расстоянии от места залегания. К числу таких руд чаще всего относят отунит (фосфат урана и кальция), кальколит (фосфат урана и меди) и, наконец, многочисленные руды (кюрит, уранотил и др.), объединенные под общим названием «желтые руды» («желтый спек») — окись-закись урана — U_3O_8 . Эти руды, добываемые одновременно с первичными рудами, очень редко пригодны для отдельной разработки. Вторая группа включает определенное число ванадатов (карнотит и др.), которые в ряде мест встречаются в виде крупных залежей, пригодных для разработки.

РУДЫ ТОРИЕВЫЕ. Это главным образом торанит — окись тория. Некоторые виды торанита, называемые ураноторанитами, содержат и некоторое количество урана. Монацит — фосфат церия — содержит до 15% тория и 0,3% урана. Кстати, в земной коре тория содержится значительно больше, чем урана.

Так как потребность атомных электростанций в уране непрерывно возрастает, специалисты-геологи уже предвидят то время (примерно 2000-й год) когда половина мирового производства электроэнергии будет приходиться на атомные электростанции и начнет сказываться нехватка в уране.

Как это ни странно, в морской воде содержится заметное количество урана — 3,34 миллионных долей грамма на литр воды. На первый взгляд — как будто бы и немного, но в общей массе воды Мирового океана, в этой «кладовой», скрыто более 4 млрд. т урана. Исследуя возможности использования в будущем такого практически неистощимого источника урана, ученые обнаружили, что гидроокись титана обладает замечательным свойством: выделяет уран из морской воды, который после этого уже сравнительно нетрудно отделить от гидроокиси титана, растворив его в углекислом аммонии, с последующим превращением урана в металлическое состояние. При этом гидроокись титана не теряет своих свойств и может быть снова использована для извлечения из морской воды новых порций урана. В этом процессе, находящемся еще в зачаточной стадии исследований, используется система фильтров из обтянутых тканью больших рам, покрытых слоем гидроокиси титана, на которых и осаждается уран из прокачиваемой через такие фильтры морской воды.

СИНТЕЗА ЯДЕРНОГО РЕАКЦИЯ (см. *Термоядерная реакция*) — ядерная реакция, в ходе которой ядра атомов водорода (протия, дейтерия или трития) соединяются в более тяжелые ядра атомов гелия с выделением энергии, примерно в семь раз большей, чем при делении такого же количества урана-235 или плутония-239 на килограмм исходных продуктов.

Именно за счет слияния ядер атомов легких элементов в более тяжелые вот уже несколько миллиардов лет излучает баснословно огромные потоки энергии наше Солнце, «горят» другие звезды. Реакция ядерного синтеза впервые осуществлена человеком при взрыве водородной бомбы.

СПИН (ЭЛЕКТРОНА). Помимо энергии, связанной с движением вокруг ядра атома, электрон обладает еще и дополнительной энергией, связанной с вращением вокруг своей оси наподобие волчка, откуда и происходит слово **с п и н** (спин — по-английски верчение). Поскольку же электрон имеет электрический заряд, то при его вращении возникает круговой электрический ток, а следовательно, и магнитное поле, превращающее электрон в маленький электромагнитик, имеющий два магнитных полюса. Так как электрон может вращаться в разных направлениях — по часовой стрелке и против нее, то он может пребывать в двух различных энергетических, или, как говорят, спиновых, состояниях. Спин электрона вызывает ряд дополнительных взаи-

модействий, играющих исключительно важную роль в физических свойствах атома.

Спином обладают и другие элементарные частицы: протон, нейтрон, а также кванты излучений — фотоны. Согласно законам квантовой теории спин имеет строго определенную величину, характерную для данной частицы. В системе единиц, принятой в квантовой теории, спин электрона, а также протона и нейтрона равен $1/2$. Спин фотона равен 1.

СТИМУЛИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ. Существует мнение, что действие очень малых доз ионизирующих излучений на клетки и живые организмы не угнетает их жизнедеятельность, а, наоборот, усиливает их основные жизненные функции, в частности ускоряет рост растений. Однако многочисленные исследования не подтверждают эту точку зрения, по крайней мере, для животных клеток. В отношении растительных клеток полученные результаты крайне противоречивы, и поэтому данную проблему тщательно изучают во многих научных учреждениях мира.

Некоторое усиление жизненных функций животного организма как целого под влиянием малых доз облучения, например при приеме радоновых ванн, является не следствием усиления функции отдельных клеток при прямом действии на них излучений, а результатом вызванных этим излучением некоторых функциональных сдвигов в нервной и эндокринной системах человека, в свою очередь воздействующих уже на основные функции клеток, т. е. происходит не прямая, а косвенная стимуляция жизнедеятельности клеток организма.

«СТРАННЫЕ» ЧАСТИЦЫ. Начиная с 1949 г. в космическом излучении, а затем и на вновь сооружаемых сверхмощных ускорителях были обнару-

жены частицы, получившие, в отличие от других элементарных частиц, название «странные». Это были K -мезоны и гипероны. Появление этих частиц вызывалось сильным ядерным взаимодействием, имеющим место при столкновении быстрых нуклонов. При этом странные частицы всегда рождались парами. По началу их называли тау- и тета-мезонами. Однако позднее выяснилось, что тау-мезон с массой, равной 964 электронным массам, это K -мезон, распадающийся на три пи-мезона, а тета-мезон — это мезон, распадающийся только на два пи-мезона. Другие странные частицы оказались гиперонами — частицами, масса которых уже превышает массу нуклонов.

Обычно зарождение и распад частиц при сильных взаимодействиях происходит в исключительно короткий промежуток времени — порядка 10^{-23} сек. «Странные» же частицы, зарождаясь, как и при сильных взаимодействиях (в те же промежутки времени) живут, однако, во много раз дольше — примерно 10^{-9} — 10^{-10} сек, что свойственно лишь частицам, распад которых вызывается слабыми взаимодействиями.

Это дало основание добавить ко многим сложным свойствам элементарных частиц еще одну характеристику — «с т р а н н о с т ь», удерживающую частицы от немедленного распада (см. *Мезоны, Взаимодействие частиц*).

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В 1911 г. голландский ученый Г. Камерлинг-Оннес, исследуя тепловые, электрические и магнитные свойства различных веществ при температуре, близкой к абсолютному нулю, неожиданно столкнулся с поразительным эффектом, который не был предусмотрен ни одной физической теорией. При охлаждении погруженной в жидкий гелий ($4,2^{\circ}\text{K}$) ртути у нее полностью исчезало электрическое сопротивление. При дальнейшем изучении это удивительное свойство было обнаружено и у ряда других металлов и спла-

вов. Возбужденный в замкнутом контуре из таких металлов электрический ток мог протекать без потерь сколь угодно долго — дни, месяцы и даже годы. При повышении температуры до определенного, критического для каждого вещества значения это явление скачкообразно исчезает и в нем устанавливается обычная электрическая проводимость (сопротивление). Это новое явление и было названо **с в е р х п р о в о д и м о с т ь ю**. Возможность передавать электрическую энергию любой мощности на огромные расстояния без присущих обычным проводникам больших потерь на преодоление сопротивления, достигающих порой половины всей передаваемой энергии, заставила ученых заняться исследованием самого феноменального явления и упорными поисками материалов и веществ, которые обладали бы свойством сверхпроводимости при обычных или близких к ним температурах. Однако обнаружить материалы, обладающие сверхпроводимостью при температуре выше $20,7^{\circ}\text{K}$ (при температуре кипения водорода вместо дорогого гелия) или, что было бы идеально, при точке кипения жидкого азота, равной 78°K до сих пор не удалось, что ограничило область применения свойства сверхпроводимости главным образом лабораторной практикой.

В последние годы в связи с развитием техники получения в больших количествах сжиженных газов (водорода, гелия, азота и др.) сверхпроводники нашли некоторое применение и в технике для передачи больших энергий на короткие расстояния (фидерные устройства электростанций, радиопередатчиков и т. п.), а главным образом для изготовления обмоток электромагнитов, способных пропускать без потерь импульсы тока огромной силы тем самым создающие сильные и сверхсильные магнитные поля, достигающие десятков и сотен тысяч и даже миллионов эрстед (напряженность магнитного поля Земли равна примерно 1). В частности, сильные магнитные поля используются в ускоряющих, фокусирующих и отклоняющих магнитных системах ускорителей частиц и других установках ядерной техники.

СВОБОДНЫЙ ПРОБЕГ ЧАСТИЦЫ — расстояние между двумя последовательными столкновениями частицы с другими частицами при движении ее в какой-либо среде например в газе или ином веществе

СИГМА ГИПЕРОН (Σ) — элементарная, быстро распадающаяся частица с массой, примерно равной 2327 электронным массам для положительно заряженной частицы, 2331 для нейтральной и 2340 для отрицательно заряженной частицы. Время жизни сигма-плюс-гиперона $0,788 \cdot 10^{-10}$ сек, сигма-

минус-гиперона $1,58 \cdot 10^{-10}$ сек и нейтрального сигма-гиперона 10^{-14} сек.

СИНХРОФАЗОТРОН — один из типов ускорителей тяжелых заряженных частиц (см. *Ускорители частиц*). В отличие от циклотрона и фазотрона здесь применено переменное управляющее магнитное поле, периодически нарастающее и спадающее до некоторого начального значения. Это позволяет частице двигаться не по спиральной, как в циклотроне и фазотроне, а по круговой орбите постоянного радиуса. Каждому увеличению напряженности управляющего магнитного поля здесь соответствует и вполне определенное нарастание частоты ускоряющего напряжения, что позволяет все чаще и чаще «подхлестывать» все быстрее и быстрее летящую по одной и той же орбите частицу. При таких условиях движения можно сделать магнитную систему в виде кольца, собранного из отдельных электромагнитов. Однако для достижения высоких энергий ускоряемых частиц требуется и очень большая электромагнитная система. Магнит синхрофазотрона в г. Серпухове, ускоряющего частицы до энергии 70 млрд эв (70 Гэв) весит около 20 тыс. т.

Дальнейшее увеличение энергии в ускорителе такого типа потребовало бы применения еще более мощных магнитных систем. Поэтому изыскиваются и разрабатываются более совершенные принципы работы ускорителей.

СЛОЙ ПОЛОВИННОГО ОСЛАБЛЕНИЯ — толщина слоя любого вещества, снижающая дозу проникающей радиации (рентгеновского и гамма-излучений, альфа-, бета- и других частиц). Для гамма-излучения, выделяющегося при атомном взрыве, слой половинного ослабления равен: у свинца 1,5—1,8 см; железа 2—3 см; алюминия 6—7 см; бетона 27—40 см; земли 12—16 см.

СПОНТАННОЕ (САМОПРОИЗВОЛЬНОЕ) ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА — явление, открытое в 1940 г. советскими физиками К. А. Петржаком и Г. Н. Флёровым. Суть его в том, что некоторые ядра атомов природного урана, период полураспада которого равен $8 \cdot 10^{15}$ лет, самопроизвольно, без какого-либо обнаруживаемого внешнего воздействия делятся надвое, как в ядерном реакторе под воздействием бомбардировки нейтронами. Явление это происходит крайне редко — не более 20 делений в час в одном грамме урана [см. *Деление атомного ядра (реакция)*].

СТЕРИЛИЗАЦИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ. Способность ионизирующих излучений подавлять жизнедеятельность и уничтожать ряд болезнетворных бактерий и других паразитов позволила разработать несколько методов стерилизации

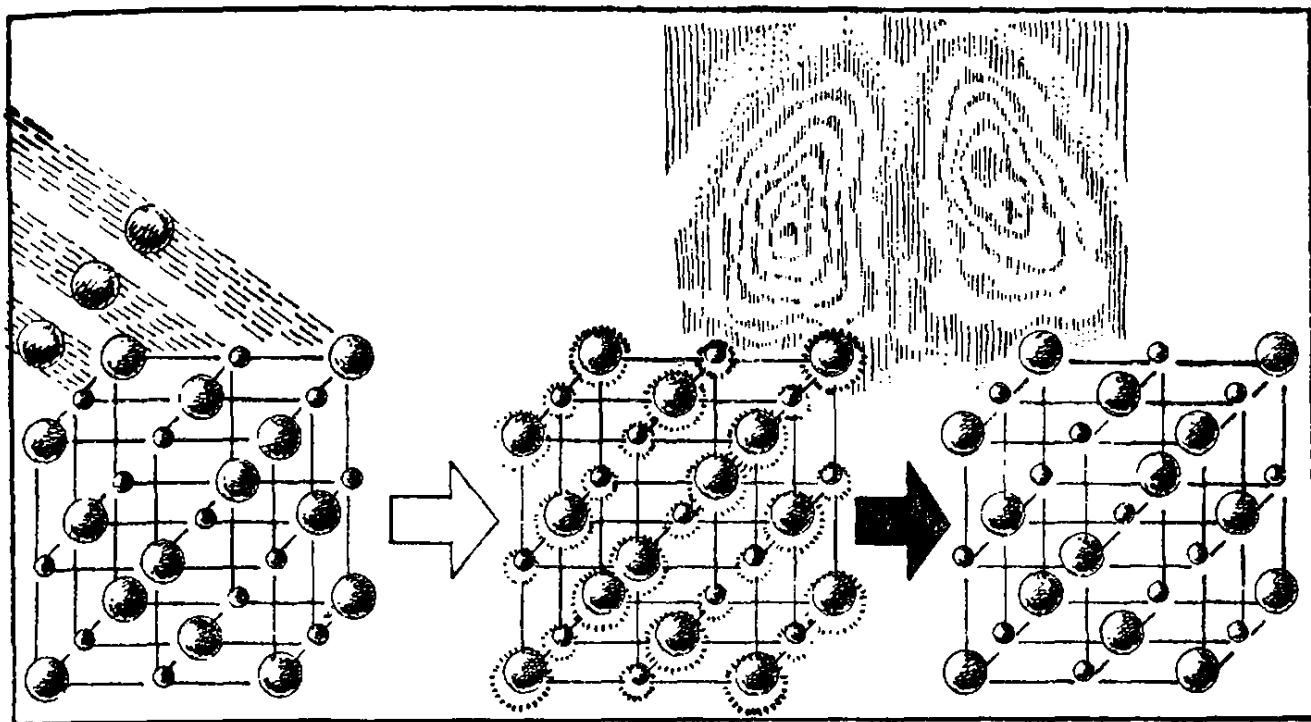
пищевых продуктов не только в готовом, но и в сыром виде, в частности сырое мясо, свежую рыбу и др. В медицине лучевую стерилизацию применяют для обеззараживания хирургических инструментов, перевязочных материалов, питательных сред, при микробиологических исследованиях питьевой воды и т. д.

СТИМУЛЯТОР СЕРДЦА (ЯДЕРНЫЙ СТИМУЛЯТОР РИТМА СЕРДЦА) — прибор, имплантируемый (помещаемый) в область сердца для стимулирования и поддержания правильного ритма работы и силы сокращения мышц сердца у больных с тяжелым врожденным или нарушенным ритмом. До недавнего времени стимуляторы питались от миниатюрных батарей или от внешних источников тока, что или не обеспечивало достаточно надежной работы прибора, или требовало смены батарей, а следовательно, повторных хирургических операций через каждые 1,5—2 года. В настоящее время в США и Франции разработаны и серийно выпускаются стимуляторы сердца, источником энергии для которых служит изотоп плутоний-238. Такие приборы способны работать без замены в течение 10 лет, т. е. в 6 раз дольше, чем батареи, питаемые химическими источниками тока. Для работы прибора требуется всего лишь 150 мг плутония. Одновременно ведутся работы по дальнейшему усовершенствованию источника энергии — по увеличению срока его службы на десятки лет и уменьшению размеров прибора, в частности, чтобы его можно было использовать и для детей.

СТРОНЦИЙ — химический элемент с порядковым номером 38 и атомной массой 87,62. Относится к щелочноземельным металлам. Имеет четыре стабильных изотопа: стронций-84 (0,56%), стронций-86 (9,86%), стронций-87 (7,02%) и стронций 88 (82,56%).

При делении ядер урана образуется целое семейство радиоактивных изотопов стронция, главным образом это стронций-89 с периодом полураспада 50,5 суток, испускающий бета-частицы с энергией 1,463 Мэв, и стронций-90 с периодом полураспада 28 лет, испускающий бета-частицы с энергией 0,61 Мэв.

Печальную известность стронций-90 получил потому, что является опасным осадком, выпадающим на поверхность Земли после взрывов атомных бомб. Растворяясь в воде, он всасывается растениями, которые поедаются домашними животными, а через их молоко попадают в организм человека. Будучи химически сходным с кальцием, стронций-90 откладывается в костях человека, создавая постоянное внут-



ренное облучение костной ткани и заключенного в ней костного мозга

Благодаря тому что радиоактивные изотопы стронция излучают бета-частицы (электроны), их широко применяют в качестве меченых атомов в научных исследованиях в химии в технике и промышленности. Стронций-90 и его дочерний изотоп иттрий-90 используют в качестве источника электронов в атомных батареях.

СЦИНТИГРАФИЯ — метод использования радиоактивных веществ (изотопов) с целью воспроизведения наглядной картины из их распределения в организме человека, а тем самым для получения ценной медицинской информации при лечении ряда заболеваний.

Метод основан на использовании способности определенных органов накапливать на некоторое время или надолго радиоактивные химические вещества, в том числе и их радиоактивные изотопы, введенные пациенту через рот или посредством инъекции. Рисунок распределения, получаемый на специальном экране, позволяет сделать некоторые полезные для диагностики выводы относительно нормального или аномального состояния внутренних органов человека. Неравномерности распределения (концентрации) радиоактивности в том месте, где обычно она не бывает, или отсутствие ее там, где она должна быть, могут показать наличие поражений, которые не могли бы быть обнаружены иными способами.

СЦИНТИЛЛЯЦИЯ. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ. Под действием ионизирующих излучений в некоторых органических и неорганических веществах и их растворах, например в сернистом цинке, вольфрамите кальция, растворе терфенила, в толуоле и др., возникают световые вспышки — сцинтилляция. Эти вещества часто называют еще фосфорами.

Если такой кристалл соединить с очень чувствительным многокаскадным усилителем света (фотоэлектронным умножителем), то каждая вспышка сцинтилляций, многократно усиленная затем еще и ламповым усилителем, может привести в действие счетное устройство любого вида. Сцинтилляционные счетчики обладают высокой чувствительностью к различного рода излучениям. В связи с трудностью изготовления кристаллов очень больших размеров, которые иногда требуются в ходе ядерных экспериментов, применяют жидкие сцинтилляционные растворы твердых органических и неорганических сцинтилляторов в бензоле, ксилоле, толуоле и других растворителях. Однако эффективность растворов несколько ниже эффективности чистых кристаллов. Разработаны и твердые растворы сцинтилляторов в полистироле, плексигласе и других прозрачных пластмассах, имеющие значительные преимущества перед жидкими растворами.

Т

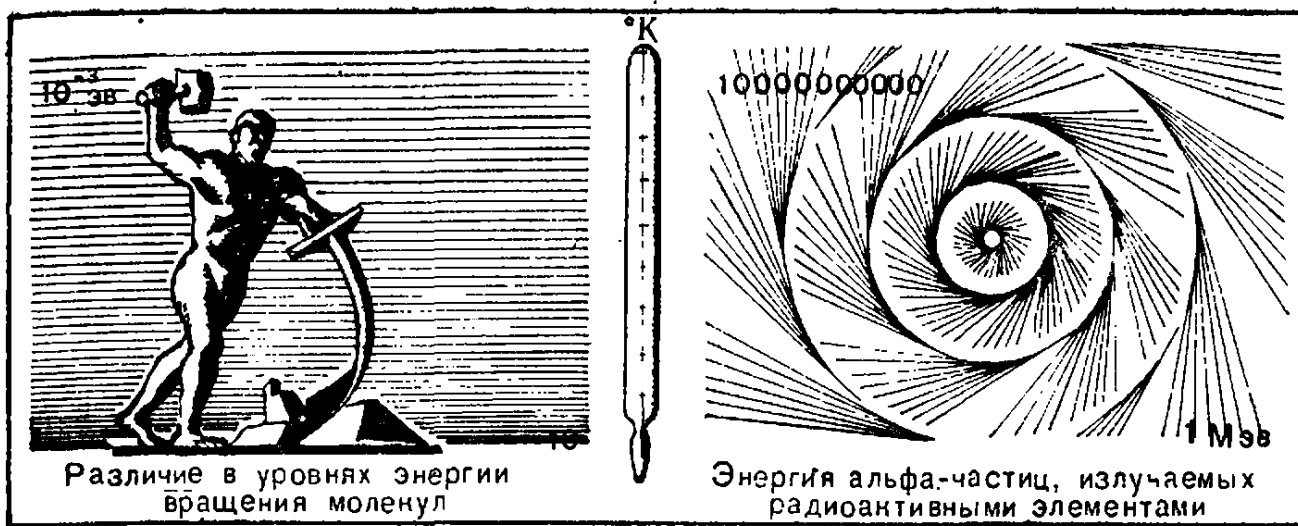
ТЕПЛО

ТЕМПЕРАТУРА

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ТЕПЛО. Молекулы и атомы окружающих нас веществ постоянно пребывают в состоянии беспорядочного движения, непрерывно сталкиваясь друг с другом. Это движение, вызываемое поглощением поступившей к ним извне энергии, мы называем теплом. Чем больше энергии поглощается этими частицами, чем энергичнее их движение и чем чаще происходят их взаимные столкновения, тем большим количеством теплоты обладает данное вещество.



ТЕМПЕРАТУРА. Мерой хаотического движения всей совокупности частиц вещества, проявляющегося в форме энергии тепла, является его температура. Тепловая энергия — не что иное, как кинетическая энергия движения отдельных молекул, из которых построены все физические тела. Высокая температура соответствует и высокому уровню тепловой энергии. При высоком уровне энергии, а следовательно, и при высокой температуре частицы вещества движутся быстрее, а встречая другие частицы, соударяются с ними энергичнее и чаще. При низком уровне энергии и низкой температуре скорость движения частиц и количество столкновений, естественно, меньше.

Температура тела или вещества и определяется средней энергией всей совокупности частиц, составляющих данное тело или вещество. Но где господствует хаотическое, беспорядочное движение частиц, там, естественно, можно найти частицы с самой различной энергией, т. е. движущиеся с самой различной скоростью.

Отсюда вывод: каждой энергии частицы или совокупности частиц соответствует своя скорость движения, а следовательно, и число столкновений с дру-

гими частицами и, как результат, разная температура. Поэтому, чтобы судить о состоянии вещества, важно знать самую исходную характеристику энергии его частиц. А температура совокупности этих частиц является уже следствием средней энергии их движения.

Тщательные измерения энергетических уровней частиц показали, что энергии движения частицы, равной 1 эв, соответствует температура 11600°К . Следовательно, чтобы осуществить ту же самую операцию, только нагревая атомы вещества, нужно было бы поднять их температуру значительно выше $10\,000^{\circ}\text{С}$. Чтобы оторвать, например, электрон от атома водорода, нужно затратить энергию 13,53 эв. Такова связь между энергией, выраженной в электронвольтах, и энергией, выраженной в градусах.

Большая часть молекул вещества распадается на атомы (диссоциирует) при температуре $10\,000^{\circ}\text{С}$. Атомы лишаются большей части или всех своих внешних электронов при $100\,000^{\circ}\text{С}$, и, наконец ядро атома распадается на протоны и нейтроны при температуре, превышающей тысячи и десятки тысяч миллионов градусов. При всех этих процессах поглощается энергия, идущая на преодоление сил, удерживающих вместе частицы, из которых складывается ядро атома, затем атомы и, наконец, молекулы.

Для осуществления термоядерной реакции необходима энергия уже в несколько десятков тысяч электронвольт. При этом газ нагревается до нескольких сот миллионов градусов. Это число поражает воображение своей грандиозностью, но мало что говорит физику, которому в конечном счете важно знать не температуру, а энергию частицы.

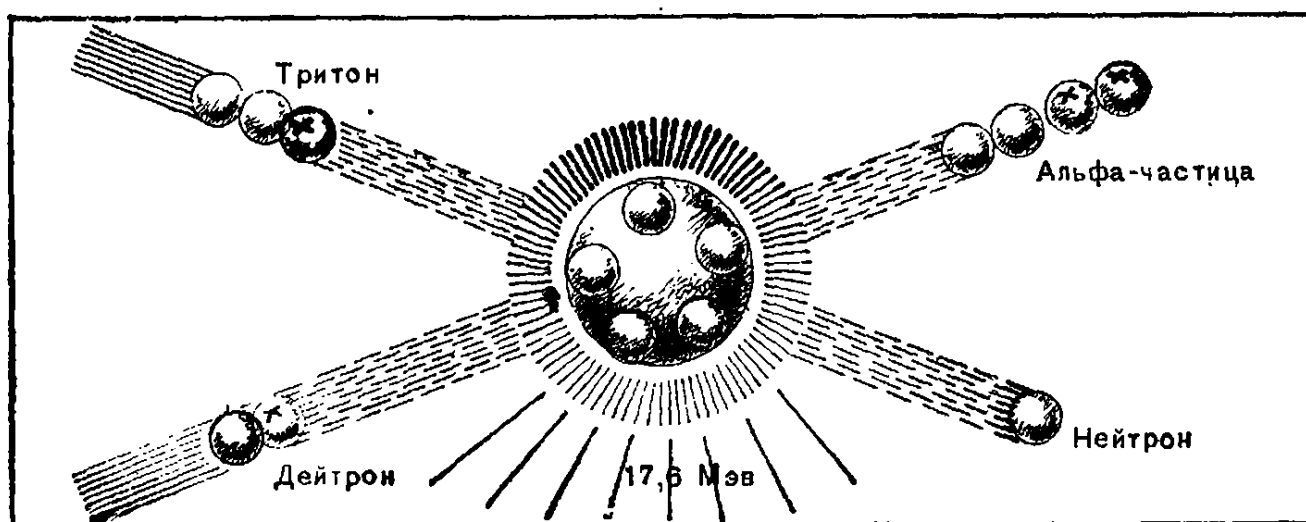
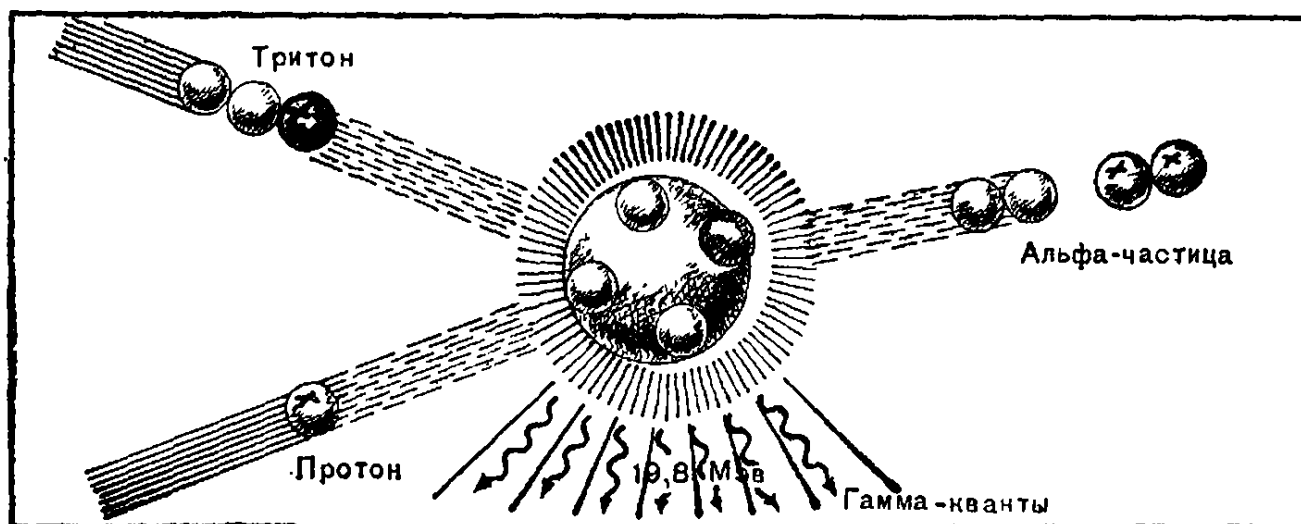
Здесь необходимо сделать одно очень существенное замечание. Главной характеристикой тепловой

энергии является то, что это энергия беспорядочного движения и столкновений частиц, движения как попало, во все стороны, независимо от времени. Только при таком естественном беспорядочном распределении направлений скоростей и числа столкновений частиц можно отождествлять это движение с температурой газообразной системы частиц.

Совсем другая физическая картина наблюдается при движении потока частиц в вакууме, всех в одном направлении, например частиц, разгоняемых в ускорителях до энергии, допустим, равной 1 Гэв (1 млрд. эв). При таких энергиях, казалось бы, температура состоящего из этих частиц газа должна получаться равной 10 тысячам миллиардов градусов. Однако этого не наблюдается, так как движение частиц носит организованный характер. Все они движутся в одном направлении, редко сталкиваясь друг с другом. Их движение резко отличается от беспорядочного теплового движения частиц, какое происходило бы в газе при такой скорости составляющих его частиц. Поэтому можно успешно определить энергию этих частиц (что, собственно говоря, и нужно), но ничего нельзя сказать о температуре этого потока частиц. Да и знать ее не существенно: она будет незначительна. Но зато можно точно сказать, какова будет температура совокупности этих частиц, когда они обрушатся на какую-либо мишень, т. е. когда организованное движение их превратится в хаотическое. Она и будет равна тысячам миллиардов градусов.

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ. Что это за реакция?

Возьмем условно случай образования ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$ путем слияния двух ядер тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$. Условно потому, что осуществить та-



кую реакцию, о чем будет сказано ниже, пока труднее, чем другие. Выделяющаяся при этом энергия $23,64 \text{ Мэв}$ равна разности между полной энергией связи ядра атома гелия ($28,2 \text{ Мэв}$), удерживающей вместе четыре нуклона, и полной энергией связи двух ядер тяжелого водорода (по $2,28 \text{ Мэв}$ каждый), удерживающей лишь по два нуклона в ядре.

Как видим, чтобы высвободить столь огромное количество энергии, нужно солидно и «потратиться». В этом пока ничего удивительного нет. Самое неприятное заключается в следующем; слияние

двух ядер тяжелого водорода возможно в том случае, если энергия каждого из них будет не менее 20 кэв. А ее они могут приобрести только в том случае, если дейтерий нагреть до температуры порядка 200 млн. градусов! Это очень и очень много, если учесть, что при обычной комнатной температуре тепловая энергия частиц воздуха равна только 0,25—0,3 эв (см. *Тепло, Температура*). Только при такой температуре, существующей лишь в недрах очень горячих звезд, станет возможным преодолеть взаимное отталкивающее действие двух положительно заряженных ядер тяжелого водорода и «втолкнуть» их в сферу действия других, еще более мощных и уже притягивающих внутриядерных сил.

Двести миллионов градусов! Такую «сверхадскую» жару невозможно представить себе даже мысленно. Тем не менее человек сумел создать ее сравнительно просто: внутри оболочки, заполненной веществами, легче всего вступающими в термоядерную реакцию, он взорвал «обычную» атомную бомбу. На какое-то очень короткое мгновение — миллионные доли секунды — температура внутри еще целой оболочки достигала нескольких сотен миллионов градусов, а давление — сотен миллиардов атмосфер. В результате начиналось слияние ядер водорода в ядра атомов гелия и выделение энергии, сопровождающееся уже вторым, еще более мощным взрывом!

Поскольку добиться слияния ядер атомов легких элементов в ядра более тяжелых атомов — водорода в гелий — и получить нужную для этого энергию движения частиц можно лишь при температурах в сотни миллионов градусов, когда все, что есть в природе, даже при более низких температурах превращается в плазму, становится вполне

понятным, почему после длительных исследований ученые пришли к убеждению, что решение проблемы управляемой термоядерной реакции скрыто среди многочисленных тайн плазменного состояния вещества.

Все, что говорится о плазме, — соображения больше теоретические, чем практические, ибо никто и никогда еще не видел, как ведет себя плазма, заключенная в каком-либо сосуде, при температуре 200—400 млн. градусов, если не считать вспышки атомной или водородной бомбы. Не наблюдал по той простой причине, что такие сосуды не существуют и существовать не могут. Все испарится, все распадется не только на атомные, но и уже на ядерные частицы.

Но если бы такой сосуд и нашелся, плазма в нем все равно никогда бы не нагрелась до столь высокой температуры. Почему?

В физике существует закон, по которому способность нагретого тела отдавать тепло по мере повышения температуры резко ускоряется. По закону Стефана—Больцмана излучение пропорционально четвертой степени температуры. Поэтому все попытки нагреть плазму до температуры, при которой в ней начался бы процесс слияния ядер тяжелого водорода в ядра гелия, окончатся неудачей. По достижении температуры равновесия все подводимое к плазме тепло будет передаваться стенкам сосуда, а те в свою очередь — щедро рассеят его в окружающее пространство.

Напомним, что все вышеизложенные рассуждения весьма условны, ибо не сказано самого главного: где взять источник тепла, чтобы нагреть плазму до температуры недр звезды — 200 млн. градусов?

В самом начале делу помогла... молния.

В холодном состоянии газ — отличный изолятор электричества, но до поры до времени. Уже при сравнительно невысоком электрическом напряжении в сильно разреженном газе может происходить так называемый газовый разряд. Младший представитель огромного семейства газоразрядных устройств — хорошо всем известная трубка световой рекламы.

Но что если попробовать сквозь наполненную разреженным газом трубку, обладающую огромным запасом прочности, разрядить батарею конденсаторов, заряженных до колоссально высокого напряжения — порядка пяти-шести миллионов вольт?

Такая созданная человеком искусственная молния хотя и не сможет по разрушительной силе сравниться с природной, все же позволит на ничтожно короткий промежуток времени — тысячные доли секунды — сконцентрировать в очень небольшом объеме хаотически движущихся частиц газа огромную энергию, достаточную для того, чтобы превратить в плазму заключенный в трубке газ, раскалив его до температуры поверхности Солнца — нескольких миллионов градусов.

В то же самое время, что такое газовый разряд в трубке, наполненной разреженным газом? Упорядоченное на очень короткий отрезок времени общее движение электрически заряженных частиц — свободных электронов в одном направлении, а положительных ионов в противоположном направлении.

А что такое организованное движение всей массы электронов? Электрический ток. Известно, что вокруг проводника, по которому протекает электрический ток, возникает кольцевое магнитное поле. И чем сильнее ток, тем сильнее будет создаваемое им вокруг самого себя магнитное поле. Если такой теку-

щий в одном направлении ток пропустить по пучку параллельных проводников, то магнитное поле с большой силой немедленно сожмет их вместе. Идеально ионизированная плазма и является по сути дела довольно рыхлым пучком проводников.

Раз так, то непрерывно нарастающее по мере увеличения силы тока сквозь плазму кольцевое магнитное поле, образующееся вокруг трубки, начнет сжимать рыхлую плазму в тоненький плазменный шнур, уменьшая ее объем, а тем самым еще больше увеличивая ее температуру и давление, так как число взаимных столкновений атомных частиц в малом объеме плазмы резко возрастает. И, что самое главное, магнитный кулак, сжимающий плазму, отрывает ее от стенок трубки, прекращая утечку через них тепла в окружающее пространство. А это в свою очередь еще больше поднимает температуру плазмы. А если прекратилась мощная бомбардировка стенок трубки бушующими частицами, то прекращается и давление на них. Значит, отпадает неразрешимая задача создания трубок с фантастической прочностью стенок.

Короче говоря, плазма сама себя организует: сжимается, разогревается и целиком изолируется от стенок трубки. Остается, следовательно, одна забота: как можно больше «вогнать» в плазму энергии, увеличив для этого напряжение и силу электрического тока и создаваемое им вокруг плазмы мощное магнитное поле. И ждать, когда начавшаяся термоядерная реакция разнесет всю такую установку и все на несколько километров в окружности?

Ничего этого, конечно, не произойдет и произойти не может. Во-первых, плазма создается в сравнительно ничтожном объеме к тому же еще и сильно разреженного газа. И даже если бы во всем ее

объеме сразу возникла взрывная термоядерная реакция, сила взрыва была бы ограниченной, во всяком случае безопасной.

Далее. От температур, которые можно получить, разогревая плазму таким способом, до требуемых для реакции синтеза 200 млн. градусов дистанция пока еще слишком велика. Правда, если применять вместо одного только дейтерия смесь дейтерия и трития, необходимая для возникновения термоядерной реакции температура существенно уменьшится, и реакция возможна даже при нескольких десятках миллионов градусов.

Ну а как установить, что такая реакция осуществилась во время разряда? По возникновению нейтронного излучения. При слиянии двух ядер атомов тяжелого водорода (дейтерия) образуется ядро изотопа гелия-3 и выбрасывается или протон, или нейтрон, одновременно возникает гамма-излучение и выделяется энергия, равная 3,2 Мэв. Если один из атомов дейтерия заменить атомом сверхтяжелого водорода (тритием), то образуется ядро гелия (альфа-частица), испускается один нейтрон и несколько гамма-квантов. В этом случае выделяется 17,6 Мэв энергии. Слияние ядра атома сверхтяжелого водорода трития с протоном дает альфа-частицу и энергию 19,8 Мэв, наконец, при синтезе ядра лития-6 с ядром тяжелого водорода образуются две альфа-частицы и выделяется энергия 22,4 Мэв.

Улавливая вылетающие из плазмы нейтроны и определяя их количество, легко установить и все остальные необходимые данные обо всем происходящем в плазме: числе ядер, вступивших в термоядерную реакцию, скорости ее нарастания и т. п.

Магнитное поле, к сожалению, оказалось не идеальной невидимой стенкой, удерживающей плазму в самом центре трубки. Во-первых, может случиться

так, что отдельные частицы плазмы, сталкиваясь друг с другом в бесконечных комбинациях скоростей и энергий, могут случайно приобрести столь большую энергию, что их в конце концов выбросит сквозь любое самое сильное магнитное поле к стенке сосуда.

Во-вторых, при определенных условиях большое количество заряженных частиц, двигаясь в какой-то момент вместе и в одном направлении, может создать свое собственное магнитное поле, способное выдавить плазму через изолирующее ее общее магнитное поле. Могут возникнуть и другие капризы. А почему ученые так «чувствительны» к таким капризам плазмы?

Дело в том, что управляемая термоядерная реакция в плазме не начинается так, как в водородной бомбе, — взрывом, длящимся миллионные и более короткие доли секунды. Время слияния частиц зависит от «густоты» плазмы. Имеется определенный максимум «густоты», который может удержать данное магнитное поле. Если плазма доведена до этой «густоты», то время слияния будет равно приблизительно одной тысячной или сотой доли секунды. Следовательно, нужно термоизолировать — удерживать температуру плазмы хотя бы на это время или даже дольше. А это очень трудно.

В результате многолетних исследований бесчисленных «капризов» плазмы и методов их «обуздания» ученые сравнительно точно установили условия (так называемый критерий Лаусона), при которых возможно возникновение термоядерной реакции в плазме: число, равное произведению плотности плазмы (количество частиц в 1 см^3) на время удержания возбужденной плазмы (в секундах), должно равняться или быть больше 10^{14} . Естественно, что высвобождающаяся при возникновении термо-

ядерной реакции энергия значительно превышает затраты энергии на ее возбуждение. Однако все ранее осуществлявшиеся опыты позволяли получать или довольно высокую температуру (порядка десятков миллионов градусов), или высокую плотность частиц в плазме, или же более длительное время удержания плазмы, однако были крайне далеки от указанного критерия. И лишь в последние годы советским ученым удалось создать установки, в которых произведение плотности частиц на время удержания плазмы равнялось $4 \cdot 10^{13}$ сек/см³ при температуре порядка 7 миллионов градусов и времени удержания плазмы около 0,05 сек! Это в 10 000 раз выше, чем удавалось достичь в первоначальных опытах, давших толчок к развитию всей совокупности работ последних лет в области управляемой термоядерной реакции, но на полтора-два порядка, т. е. в 50—100 раз, меньше, чем необходимо для ее реального осуществления (см. *Токамак*).

Поскольку прямой путь — электрический разряд в газе — не дает требуемых результатов, а плазменное состояние можно получить и другими способами, ученые начали один за другим пробовать и все остальные. Известно, что если разогнанная до большой скорости частица попадает в магнитное поле, то она начинает закручиваться — тем сильнее, чем сильнее магнитное поле. Частица как бы навивается на подвернувшуюся по пути незримую и пока неизвестно из чего состоящую, скорее даже условную, магнитную силовую «линию».

Выстрелим пучком электронов или положительно заряженных ионов дейтерия, допустим сбоку, в большую, тщательно откачанную от воздуха трубу, вокруг которой размещены огромные катушки, создающие внутри нее сильное магнитное поле. Частицы тотчас же начнут «навиваться» на линии

этого поля, сталкиваться друг с другом и нагреваться. Если увеличивать напряженность магнитного поля, то, сжимаясь, оно начнет сжимать и гирлянды навившихся на линии этого поля заряженных частиц. Число их столкновений друг с другом увеличится, поднимется и температура плазмы. Если на концах такой трубы — магнитной ловушки — создать еще более сильное магнитное поле, то заряженные и завивающиеся по спирали частицы отскочат от него и начнут свое движение обратно, с тем чтобы, повстречавшись с такой же магнитной стенкой или «зеркалом» на другом конце стены, еще раз начать обратное движение. Так и будут двигаться взад и вперед вдоль линий магнитного поля частицы, набирая под действием сжимающего их магнитного поля энергию, а с нею и повышая температуру всей плазмы.

Частицы плазмы можно заставить двигаться и вдоль бесконечной (кольцевой) трубки, сжимая ее не поперечным, а продольным магнитным полем или комбинацией этих полей. Для устранения некоторых недостатков такую «баранку» можно скрутить еще один раз и получить «восьмерку». Это и будет «стелларатор».

Имеется большое число и других видов установок, отличающихся друг от друга теми или иными усложнениями, главная цель которых — устранить какую-либо одну или сразу несколько видов неустойчивости плазмы.

Заслуживают внимания опыты по возбуждению ядерной реакции в плазме с помощью луча лазерного света огромной интенсивности. Когда кванты такого света сталкиваются с атомами разреженного газа, переменное электрическое поле электромагнитных волн «раскачивает» электроны в такт с импульсами этого поля, заставляя их сталкиваться

с другими электронами и с ядрами (ионами) атомов газа, тем самым превращая энергию этих волн в тепло, разогревающее плазму.

Это становится возможным благодаря тому, что лазерный луч можно сконцентрировать в чрезвычайно малом объеме, порядка 100 мкм^3 , а его мощность в импульсе довести до нескольких миллиардов киловатт! Однако вследствие того что количество частиц в сильно разреженной плазме крайне невелико, получить необходимый для начала термоядерной реакции критерий: произведение концентрации частиц на время удержания, равное 10^{14} , практически невозможно, поэтому вместо разреженного газа используют сжиженную и замороженную до сверхнизкой температуры смесь дейтерия и трития в вакууме с концентрацией $5 \cdot 10^{22}$ частиц в 1 м^3 . Лазерный луч разогревает примерно 1 мм^3 этой смеси до температуры в 100 млн. градусов. Энергия лазерного импульса, длящегося в течение нескольких наносекунд ($1 \text{ нсек} = 10^{-9} \text{ сек}$), должна быть при этом не менее 100 дж. Так как коэффициент полезного действия лазеров невелик и составляет лишь доли одного процента, будущее этого направления в создании термоядерного реактора зависит от прогресса в области создания сверхмощных лазеров с более высоким коэффициентом полезного действия, ибо полезная отдача такого реактора должна во много раз превышать энергию, затрачиваемую на генерирование лазерного луча требуемой мощности.

ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. Попытки многих экспериментаторов в середине 30-х годов создать новые, еще более тяжёлые, чем уран, химические элементы, бомбардируя его нейтронами, поначалу увели ученых довольно далеко в сторону, и, лишь свершив круг, лежащий через легкие

осколки урана-235, удалось обнаружить существование новых, действительно сверхтяжелых за-урановых искусственных элементов — нептуния-239 (№ 93) и плутония-239 (№ 94). Однако попытки получения более тяжелых элементов не удались, так как выяснилось, что энергии и свойств любых имевшихся в распоряжении ученых частиц, в том числе и всемогущего нейтрона, для этой цели совершенно недостаточно. И лишь с вводом в действие мощных ускорительных установок, разгоняющих частицы до энергии в сотни миллионов и миллиарды электронвольт, один за другим стали появляться новые искусственные трансурановые элементы с атомными номерами от 95 до 105: америций-243, кюрий-247, берклий-247, калифорний-251, эйнштейний-254, 100-й элемент, названный в честь Э. Ферми фермием-257, 101-й элемент, открывающий счет новой сотне, названный в честь великого русского химика менделевием-259.

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне несколько лет назад советскими учеными были синтезированы 102-й элемент (позднее полученный и в США) и 104-й элемент, получивший название «курчатовий» в честь выдающегося советского ученого — физика И. В. Курчатова. А в октябре 1969 г. был обнаружен самопроизвольно делящийся изотоп 105-го элемента с периодом полураспада около двух секунд.

Вся эта группа элементов изучена пока еще недостаточно полно. Все они радиоактивны и обладают чрезвычайно малым сроком жизни: чем больше их атомная масса, тем меньше они живут.

В естественных земных породах они не встречаются. Некоторые из этих элементов были получены в

столь ничтожном количестве (17 атомов!), что для определения их свойств понадобились точнейшие средства современной радиохимии.

ТЕПЛООБМЕННИК. Нагреваемые в активной зоне ядерного реактора под большим давлением вода или пар подвергаются еще и чрезвычайно интенсивному облучению нейтронами, вследствие чего ядра атомов кислорода и примесей, всегда присутствующих в воде, становятся сильно радиоактивными и опасными для людей. Поэтому использовать получаемый пар непосредственно в паровых турбинах атомных электрических станций можно, только окружив все рабочие агрегаты паросиловой установки, так же как и сам реактор, биологической защитой — сплошной бетонной оболочкой толщиной в несколько метров.

Однако перегретую воду, пар, раскаленный газ, жидкий металл и другие теплоносители можно пропустить через теплообменник — устройство, служащее для передачи тепла от более нагретого теплоносителя к менее нагретому, и представляющее в простейшем виде змеевик, который помещен внутри замкнутого сосуда. Проходя по змеевику, нагретый теплоноситель в свою очередь нагревает и испаряет пропускаемую через этот сосуд воду. В результате радиоактивные вещества остаются в теплоносителе, циркулирующем между реактором и змеевиком теплообменника (первый контур), а в теплоноситель (пар), циркулирующий между теплообменником и турбиной, и другие устройства уже не передадутся, вследствие чего отпадает необходимость окружать громоздкой, тяжелой и дорогой биологической защитой все устройства, входящие во второй контур: паропроводы, холодильник, турбины и т. п., хотя наличие теплообменника увеличивает потери тепла атомной установки в целом.

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ (ТВЭЛ) — самый основной и важный узел ядерного реактора, с помощью которого в активную зону вводится ядерное горючее и отводится тепло от делящегося материала к теплоносителю.

Обычный твэл состоит из сердечника в форме цилиндра, содержащего делящийся материал, и металлической оболочки. Твэлы можно собирать в сборки — пакеты, кассеты и т. д.

Главная забота конструкторов реакторов — создание и использование для твэлов таких материалов, которые предельно долго не изменяли бы своей механической прочности, физических свойств, геометрических размеров под действием

высоких температур и механических напряжений, интенсивной нейтронной бомбардировки и мощного гамма-излучения.

ТЕПЛОВЫЕ (МЕДЛЕННЫЕ) НЕЙТРОНЫ (см. *Медленные (тепловые) нейтроны*) — нейтроны, замедленные до энергии 1 эв и ниже, что сравнимо с энергией теплового движения молекул.

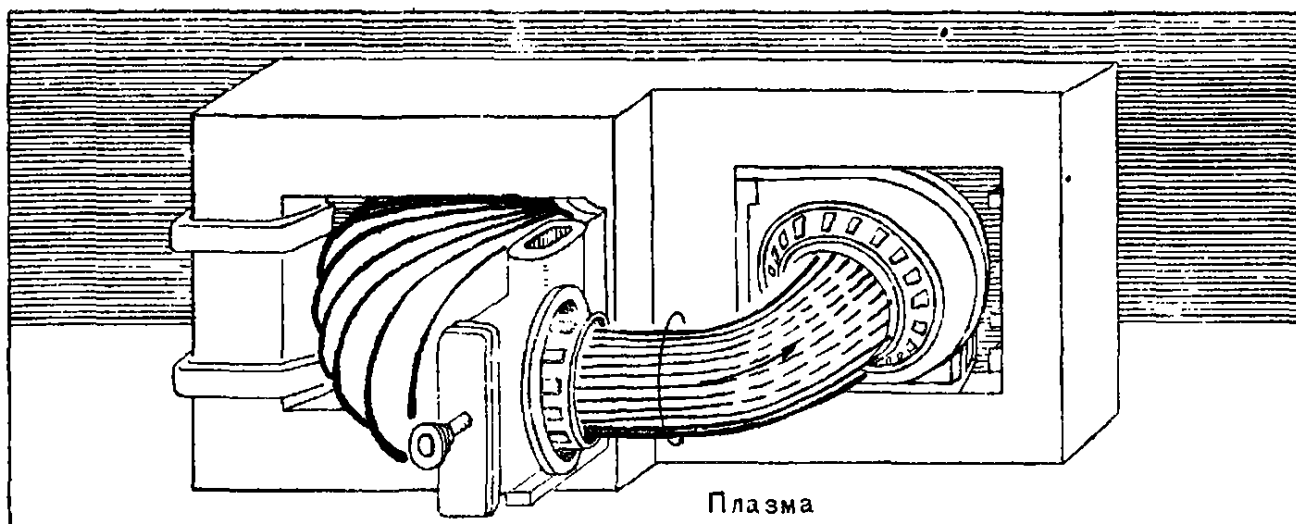
ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ. Из самого слова явствует, что это какая-то среда, служащая для переноса тепла. Более конкретно так называется вещество — жидкое или газообразное (вода, пар, газ, жидкий металл или соли, жидкое органическое вещество), пропускаемое через активную зону ядерного реактора для ее охлаждения и передачи уносимого тепла другому теплоносителю или для непосредственного использования в тепловых двигателях (пар, газ)

Вследствие высоких требований, предъявляемых к теплоносителям (малое поглощение нейтронов, химическая стойкость в условиях интенсивного облучения нейтронами, гамма-излучением, низкая коррозионная активность при длительном соприкосновении с конструкционными материалами реактора, высокий коэффициент теплопередачи, большая удельная теплоемкость, низкое давление при высоких температурах), существует не так много веществ, которые бы одновременно удовлетворяли всем требованиям. Газы, например углекислота, мало поглощают нейтроны, допускают нагревание до высоких рабочих температур, безопасны в эксплуатации, но у них плохая теплопроводность. Их приходится нагревать в реакторе до высоких давлений и затрачивать значительную часть получаемой от реактора мощности на прокачку. Обладающий высокой теплопроводностью инертный газ гелий встречается в малых количествах и дорог. Столь же дефицитна и дорога тяжелая вода.

Высокой теплопроводностью обладают жидкие металлы: калий, натрий, литий, висмут, свинец, ртуть и смеси: натрий — калий, свинец — висмут. Они позволяют получать на выходе реактора очень высокие температуры при совсем низком давлении. Однако многие из них очень коррозионны, взрывоопасны в соединении с водой и сравнительно быстро становятся радиоактивными в результате облучения их в рабочей зоне реактора.

В силу этих причин наиболее часто применяемым теплоносителем пока еще является дистиллированная вода и значительно реже — тяжелая вода.

ТОКАМАК (тороидальная камера со стабилизирующим магнитным полем) — семейство разработанных за последние



10 лет советскими учеными установок для получения контролируемой термоядерной реакции в разогретой до высокой температуры плазме. На одной из этих установок Токамак-4 в плазме из смеси трития и лития были достигнуты температура, соответствующая электронной температуре от 2000 до 3000 эв, и ионная температура около 600 эв, плотность порядка $3 \cdot 10^{13}$ частиц в кубическом сантиметре и время удержания плазмы порядка 20 мсек. Следует напомнить, что энергия в 1000 эв соответствует температуре $11\,600\,000^\circ \text{К}$.

Установка Токамак-4 представляет собой кольцевую вакуумную камеру (тор) из нержавеющей стали с наружным радиусом 100 и внутренним радиусом 20 см, заключенную в сердечник, создающий тороидальное магнитное поле напряженностью около 40 тыс. эрстед.

Схематически установка представляет собой трансформатор, по одной из обмоток которого пропускаются очень короткие, но мощные импульсы электрического тока от внешнего источника, а вторичной обмоткой является ионизированное плазменное кольцо. В собранной в тонкий шнур, радиусом около 17 см, плазме циркулирует ток, достигающий в импульсе 300 тыс. а.

Вокруг этого основного костяка установки размещено весьма сложное и обширное хозяйство, назначение которого — предотвратить бесчисленные «капризы», вызывающие неустойчивость плазменного шнура. Стабилизация шнура осуществляется с помощью навитой уже на саму тороидальную камеру обмотки, создающей внешнее магнитное поле, параллельное электрическому току в плазме.

В текущем пятилетии в нашей стране будет сооружена более совершенная установка Токамак-10, время удержания

плазмы в которой по предварительным расчетам должно достигнуть нескольких десятых долей секунды. Большой радиус тора у этой установки будет равен 150 см, радиус плазменного шнура 35 см, напряженность продольного магнитного поля 40 000 э. Импульсы тока длительностью в несколько секунд создадут ток в плазме силой до 850 000 а. Это потребует источника энергии мощностью до 150 000 квт.

По мнению большинства ученых, как советских, так и зарубежных, если в науке не произойдет чего-либо непредвиденного, разработка токамаков — наиболее реальный путь создания термоядерного реактора будущего (см. *Термоядерная реакция*).

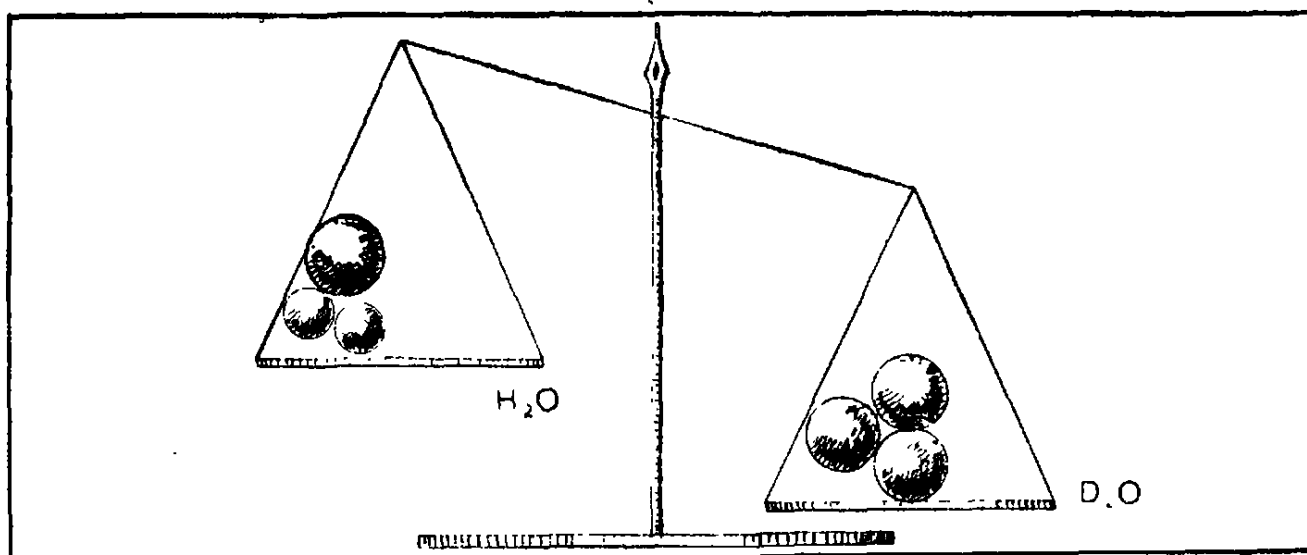
ТОРИЙ — тяжелый природный радиоактивный химический элемент, занимающий 90-е место в периодической таблице Менделеева, с атомной массой 232,05. Торий состоит из одного изотона — тория-232. Все остальные его 13 изотопов получают искусственно.

Из всех естественных радиоактивных элементов торий обладает самым долгим периодом полураспада, равным 14,5 млрд. лет!

Хотя торий и считается наравне с ураном ядерным топливом, никакой цепной реакции в нем из-за отсутствия делящегося на тепловых нейтронах изотопа (такого, как изотоп уран-235 в обычном уране) возбудить нельзя. Поэтому в своем обычном состоянии он ни для каких энергетических целей не пригоден.

Но почему же тогда его считают столь же драгоценным ядерным топливом наравне с плутонием? Именно с плутонием. Потому что торий-232, так же как и неделящийся уран-238, легко можно превратить в ядерное горючее. Для этого его приходится предварительно подвергать интенсивной нейтронной бомбардировке в ядерном реакторе обычного или специального типа. После двух распадов, сопровождающихся излучением бета-частиц, торий-232 превращается в искусственный, не существующий в природе изотоп урана — уран-233, который, так же как и плутоний-239, делится как быстрыми, так и медленными нейтронами.

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. Если летящая с большой скоростью частица поглотит откуда-то извне некоторое количество энергии, то это тотчас же отразится на скорости ее движения — она увеличится на соответствующую данной энергии строго определенную величину. В случае же резкого замедления — торможения — высвобождающаяся энергия будет испускаться в виде квантов рентгеновского излучения. Такое излучение и называется **т о р м о з н ы м**.



Например, при резком торможении потока электронов, ускоренных до энергий выше 12 *кэв* (при столкновении их с атомами тугоплавкого вольфрамового анода рентгеновской трубки), возникают рентгеновские лучи с различной длиной волны.

ТРЕКИ — следы элементарных частиц, зафиксированные в регистрационных камерах (камере Вильсона, пузырьковой и других камерах), в фотоэмульсиях.

ТРИТИЙ — сверхтяжелый радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3. Ядро атома трития состоит из одного протона и двух нейтронов. Период полураспада изотопа трития равен 12 годам. Распадаясь, ядро атома трития испускает бета-частицы с энергией около 0,018 *Мэв*.

ТРИТОН — ядро атома трития (сверхтяжелого водорода). Состоит из трех нуклонов: протона и двух нейтронов.

ТРОТИЛОВЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ — количество взрывчатого вещества, которое потребовалось бы взорвать, чтобы сравнить его по энергии со взрывом, произведенным данной атомной бомбой (см. *Атомная бомба*).

«ТЯЖЕЛАЯ» ВОДА — вода, в молекулу которой вместо двух атомов обычного водорода (H_2O) входят атомы тяжелого водорода (дейтерия).

Тяжелая вода отличается от обычной целым рядом любопытных свойств. Замерзает она не при 0, а при $+3,82^\circ C$, кипит не при 100, а при $101,42^\circ C$ (плотность ее равна $1,11 \text{ г/см}^3$). В ней не прорастают семена, гибнут растения, рыбы и животные. Тяжелая вода — отличный замедлитель нейтронов. В ядерных реакторах она одновременно используется в качестве замедлителя и теплоносителя.

ТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ — условное название химических элементов от полония до урана, в ядрах атомов которых количество нейтронов в полтора раза и больше превышает число протонов.

ТЕРМОЭМИССИОННАЯ АТОМНАЯ УСТАНОВКА. Как указывалось в некоторых местах книги, коэффициент полезного действия (отдача) даже самых современных атомных электрических станций достигает 35—38%, да и у тепловых электрических станций не превышает 38—41% — больше половины тепловой энергии сжигаемых на них обычных видов топлива (угля, нефти и т. п.) буквально выбрасывается на ветер. Даже вне зависимости от этого обстоятельства на всем протяжении развития электротехники ученые предпринимали неоднократные попытки разработать ряд промышленных методов непосредственного преобразования энергии тепла в электричество, позволяющих получать коэффициент полезного действия близкий к 100%: электрохимическое «горение» (в топливных элементах), магнетогидродинамический, термоэмиссионный и другие.

Термоэмиссионный способ наиболее перспективен, благодаря своей необычной простоте. В принципе установка состоит из двух электродов, помещенных в откачанном от воздуха сосуде. Один электрод — катод или эмиттер — нагревается до максимально возможной высокой температуры, другой электрод — анод или коллектор — столь же энергично охлаждается. Горячий электрод испускает поток электронов, которые собираются анодом. Нагрузка включается во внешнюю цепь между катодом и анодом. И все происходит так же, как в хорошо всем знакомой электронной выпрямительной лампе (диоде).

Коэффициент полезного действия такого устройства главным образом зависит от температуры катода. Нагрев катода осуществляется за счет ядерной энергии. Так как сила тока термоэмиссионного преобразователя тепла в электрическую энергию должна быть, естественно, большой, потребовалось преодолеть большое число чисто технических трудностей, например устранить влияние пространственного заряда — отрицательного потенциала, возникающего между электродами и отталкивающего электроны обратно к катоду, для чего расстояние между электродами было сведено до сотых долей миллиметра. В результате упорной работы советских ученых в начале 1971 г. в СССР была создана атомная термоэмиссионная (безмашинная) установка «Топаз» электрической мощностью в несколько киловатт, использующая тепло, выделяемое при делении ядерного горючего.

УПРАВЛЯЕМАЯ ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ. Представим себе, что в делящийся изотоп уран-235 влетел один-единственный нейтрон. Попав в одно из ядер атома урана-235, он разделит его на две части. При этом высвободится относительно огромное количество энергии — примерно 200 Мэв. Но самое важное заключается в том, что в результате расщепления ядра атома урана-235 на две части будет выброшено два свободных нейтрона (в среднем 2,1), которые разделят два ядра с образованием уже четырех нейтронов. Эти четыре нейтрона разделят четыре новых ядра урана-235. Четыре ядра выбросят уже восемь нейтронов, способных разделить такое же количество ядер атомов урана. Далее процесс деления и высвобождения нейтронов пойдет лавинообразно, удваиваясь при каждом новом поколении. Словом, начнется саморазвивающаяся цепная ядерная реакция деления.

Чтобы сразу определить, как быстро будет нарастать такая реакция в каком-либо куске делящегося вещества, вводят особую величину, называемую коэффициентом размножения нейтронов K . Этот коэффициент показывает, во сколько раз каждое последующее поколение появляющихся нейтронов больше предыдущего, иначе говоря, во сколько раз увеличивается нейтронный поток после каждого использования очередной порции народившихся на свет нейтронов. Если эта величина будет хоть на тысячную долю процента больше единицы, коли-

чество нейтронов, а вместе с ним и число делений ядер атомов урана-235 все равно будут увеличиваться лавинообразно. Но для того чтобы использовать ядерную энергию на пользу человеку, ее надо сделать контролируемой: добиться, чтобы число делений за единицу времени, а следовательно, и количество выделяемой энергии увеличивалось не катастрофически быстро, а достаточно медленно, и, после того, как будет достигнут требуемый режим (уровень мощности) реакции, установилось бы равновесное состояние. Очевидно, это возможно только в том случае, если к определенному моменту коэффициент размножения нейтронов станет равен единице. Если же он упадет ниже единицы, уже начавшаяся реакция затухнет.

Как же в таком случае осуществить управляемую цепную ядерную реакцию?

Возникнуть в естественном уране цепная реакция не может, так как коэффициент размножения нейтронов из-за сильного их поглощения ядрами урана-238 будет всегда меньше единицы. А поглощенные нейтроны, естественно, никакого прироста потомства не дают. Однако есть пути для создания цепной реакции и в естественном уране.

Проблема состоит в том, чтобы сразу же после каждого деления ядра урана-235 каким-то способом замедлить нейтроны до такой энергии, при которой они уже не будут все захватываться ядрами атомов урана-238. Тогда часть нейтронов, замедленных до тепловых энергий, сможет разделить нужное для поддержания хода цепной реакции число ядер атомов урана-235, а нейтроны, не успевшие замедлиться до тепловых энергий, будут поглощены ядрами урана-238. Отсюда возникла новая задача: найти такие средства или такое вещество, которое позволяло бы замедлить свободные нейтроны

до тепловых скоростей — порядка $0,025—0,03$ эв — и при этом само бы не поглощало нейтронов.

Нейтроны можно замедлить только одним путем — заставить их многократно сталкиваться с ядрами атомов замедлителей. При каждом столкновении нейтрон должен терять как можно больше энергии.

Из законов механики следует, что если скорость движущегося тела замедлять путем упругих столкновений его с другим неподвижным или медленно движущимся телом, то наибольшее количество энергии теряется (передается другому телу) в том случае, когда массы сталкивающихся тел одинаковы или близки друг другу. Поэтому для замедления нейтронов лучше всего применять ядра легких атомов, например водорода, масса которого почти равна массе нейтрона. Наилучшими замедлителями по совокупности свойств — малому поглощению нейтронов, эффективности замедления, минимальной стоимости и удобству эксплуатации — являются тяжелая вода, особо чистый графит и даже обычная дистиллированная вода. Эффективное замедление нейтронов достигается в так называемых гомогенных реакторах, где ядерное горючее равномерно распределено в замедлителе. Избежать усиленного поглощения ядрами урана-238 нейтронов, замедленных до резонансной энергии (скорости), в этом случае не удастся. Поэтому, чтобы возбудить цепную реакцию, количество делящегося изотопа урана-235 должно быть соответственно увеличено.

В реакторах, созданных для производства плутония, используют тепловыделяющие элементы из естественного урана.

Расстояния между тепловыделяющими элементами подбирают такие, чтобы нейтроны, выброшенные при делении ядер урана-235, поглощались яд-

рами урана-238 не все сразу. Часть их, пролетая сквозь слой замедлителя (графита), должна успеть в нем замедлиться до тепловых скоростей, минуя резонансные скорости (1—7 эв), и, попав в соседний слиток урана, спокойно разделить ядра атомов урана-235, избежав поглощения по пути ядром атома урана-238. Естественно, что вызванное этим большое рассредоточение урана-235 требует значительного увеличения количества природного урана, необходимого для образования критической массы. Для этого в реактор приходится закладывать несколько десятков и даже сот тонн природного урана.

Но и при соблюдении всех этих условий очень трудно было бы создать управляемую цепную реакцию деления, так как предоставленный самому себе процесс деления развивается столь быстро (миллионные доли секунды), что за ним не в состоянии поспеть даже самые быстродействующие и сверхчувствительные приборы. Совершенно неожиданно делу помогло наличие так называемых запаздывающих нейтронов.

Дело в том, что два-три нейтрона, выбрасываемые при делении ядер урана-235, появляются не все сразу, а в разное время. Сначала вылетают мгновенные нейтроны, составляющие примерно 99% их общего числа, и лишь потом остальные — 1% нейтронов — с запозданием примерно от 0,0001 до нескольких десятков секунд.

В результате ход реакции во всей массе урана в среднем замедляется до тысячных или десятых долей секунд.

Именно они и позволили самым надежным образом контролировать ход цепной ядерной реакции деления даже вручную. В этом случае мощность реактора нарастает достаточно медленно, и ни при каких обстоятельствах реактор не пойдет в «разнос».

И наконец, еще одно немаловажное условие. Часть нейтронов, появляющихся при делении ядер урана-235, пропутешествовав в уране и замедлителе, может, не попав ни в одно ядро атома урана, просто вылететь наружу. Устранить такую потерю нейтронов можно, если окружить реактор сплошной оболочкой из вещества, хорошо отражающего нейтроны, например из того же графита. Претерпев многократные столкновения с ядрами замедлителя, нейтроны отразятся обратно в активную зону реактора. Следовательно, число безвозвратно теряемых нейтронов резко сократится. В результате такой экономии нейтронов можно соответственно уменьшить загрузку реактора ядерным горючим.

УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ). Осуществить термоядерную реакцию — реакцию синтеза (слияния) ядер атомов легких элементов в ядра атомов более тяжелых элементов (гелий) — удалось пока только одним путем — в виде взрыва водородной бомбы огромной разрушительной силы. Большой пользы человечеству такая взрывная реакция, естественно, не приносит. Поэтому ученые упорно добиваются возможности получения контролируемой, т. е. управляемой, термоядерной реакции, вернее, замедления ее хода до такой степени, чтобы можно было практически использовать ее энергию, так как при реакции синтеза энергии выделяется в семь раз больше, чем при реакции деления на единицу веса исходных продуктов (см. *Термоядерная реакция*).

УРАН — естественный радиоактивный элемент, занимающий 92-е место в Периодической системе Д. И. Менделеева, с атомной массой 238,07. Уран — металл серебристого цвета, легко поддается механической обработке. Температура плавления 1130° С.

Хорошо окисляется на воздухе, воспламеняется в обычной атмосфере при температуре около 100°C . Состоит из смеси трех изотопов: урана-238 (99,27%), урана-235 (0,72%) и урана-234 (0,006%). Уран-238 и уран-235 являются родоначальниками семейств естественных радиоактивных элементов, которые после длинного ряда последовательных распадов превращаются в устойчивые (стабильные) изотопы: свинец-206 и свинец-207. Период полураспада урана-238 равен 4,5 млрд. лет, урана-235—710 млн. лет и урана-234—250 тыс. лет.

Целый ряд изотопов урана может быть получен искусственно, из них наиболее важен уран-233, образующийся в результате нейтронной бомбардировки тория-232. Уран-233 так же легко делится быстрыми и медленными нейтронами, как и уран-238. Эта триада элементов — один естественный и два искусственных — и является тем, что называется а т о м н ы м (я д е р н ы м) г о р ю ч и м.

УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ. Для самых первых исследований атома и его ядра хватало энергии альфа-частиц, вылетающих при естественном распаде радиоактивных веществ. Но вскоре этого оказалось недостаточно, поэтому пришлось создавать специальные, очень сложные установки для искусственного ускорения атомных частиц. Как это осуществляется?

Мы знаем, что, попав в электрическое поле, любая заряженная частица постепенно ускоряет свое движение, а влетев в магнитное поле, начинает закручиваться вокруг мысленно представляемых нами линий этого поля. Эти особенности, взятые порознь или в комбинации, и натолкнули на мысль использовать их для создания тяжелой атомной артиллерии — ускорителей заряженных частиц. В первом случае частицу разгоняют прямолинейно. Уско-

рители такого вида называют линейными. Во втором случае частицы одновременно закручиваются еще и по спирали. Ускорители этого вида называют циклическими, т. е. повторяющимися.

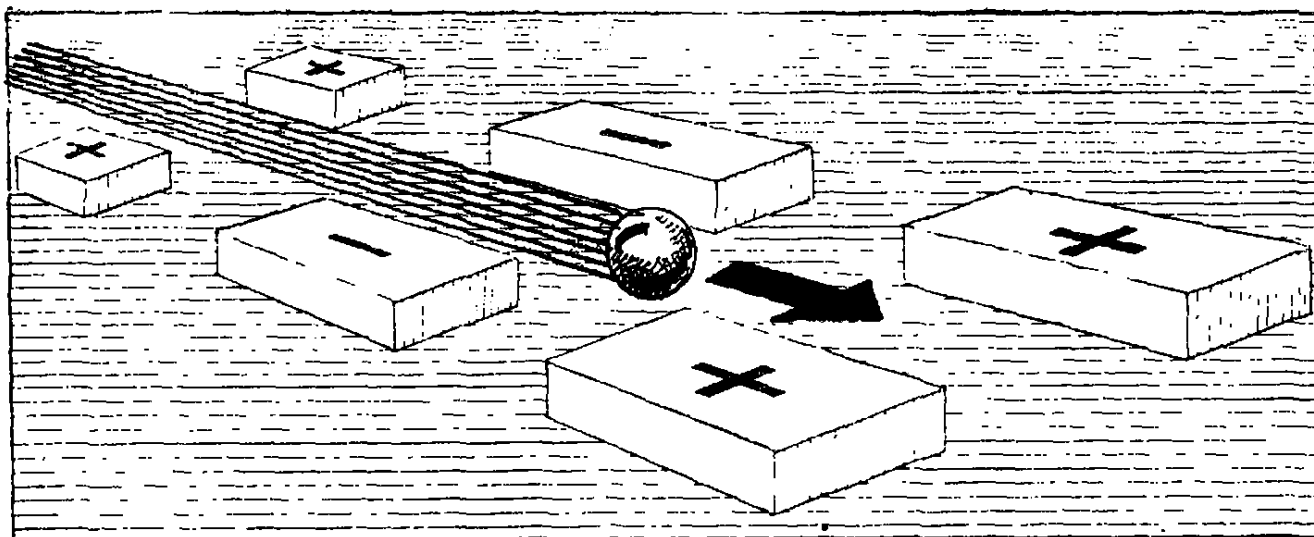
УСКОРИТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫЙ — это длинная прямая труба, тщательно откачанная от воздуха. Внутри нее друг за другом расставлено большое число электродов — металлических трубок, хорошо изолированных от главной трубы. Длина каждого электрода по мере удаления от входного конца ускорителя постепенно увеличивается. На каждые два соседних электрода подают сравнительно невысокое переменное электрическое напряжение от специального генератора колебаний высокой частоты. Когда первый электрод в какой-то момент оказывается заряженным, допустим, положительно, то расположенный следом за ним электрод будет заряжен отрицательно. Дальше снова идет трубка, заряженная положительно, а следующая за ней — отрицательно, и так до конца ускорителя. Напряжение на электродах непрерывно меняют так, чтобы положительные и отрицательные заряды как бы бежали один вдогонку за другим вдоль электродов ускорителя.

Стоит «впрыснуть» в него порцию предварительно ускоренных заряженных частиц, допустим электронов, как под действием потенциала ближайшего положительно заряженного электрода они начинают разгоняться до еще более высокой скорости и проскакивают сквозь этот электрод дальше. В этот же момент заряды на трубках меняются. Электрод, только что притягивавший электроны, став отрицательным, начинает уже как бы подталкивать сзади пролетевшие сквозь него электроны. А притягивать приближающийся сгусток электронов начинает следующая, ставшая за это время положительно заряженной, трубка, с тем чтобы после пролета сквозь нее облачка электронов переменить свой заряд на отрицательный и подтолкнуть порцию электронов дальше.

Точнее, ускорение пучка электронов происходит только в пространстве между электродами. Внутри них частицы заслонены от действия электрического поля и движутся с постоянной скоростью — «дрейфуют» сквозь них.

По мере движения электронов вперед скорость их постепенно увеличивается. Соответственно с этим и удлиняются ускоряющие трубки.

Пролетев всю длину ускорителя, порция электронов разгоняется до скорости, близкой к скорости света, и приобре-

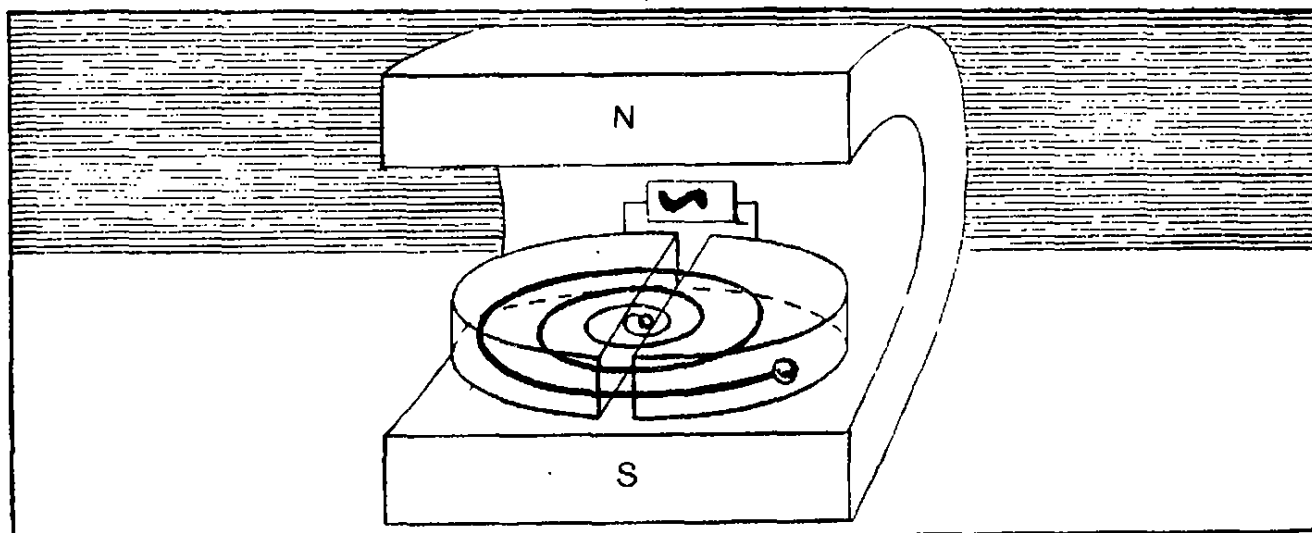


тает энергию, измеряемую сотнями миллионов и даже миллиардами электронвольт. Через установленное в конце трубы непроницаемое для воздуха окошечко порция ускоренных электронов направляется в специальные установки для облучения ими исследуемых веществ.

Самые крупные линейные ускорители электронов находятся в г. Харькове (СССР) на энергию 2 млрд. эв и в г. Станфорде (США) на энергию 20 млрд. эв.

УСКОРИТЕЛИ ЦИКЛИЧЕСКИЕ. Представьте теперь, что нашу длинную трубу удалось свернуть в спираль. Чтобы ускоряющие электроды не нагромодились друг на друга, все их можно убрать, оставив только два электрода, изготовленные в виде пары полых половинок огромного круга, надвинутых снаружи на свернутую спираль. Эту комбинацию помещают между полюсами огромного магнита. Тогда, вместо того чтобы двигаться прямолинейно, заряженные частицы под действием вертикального магнитного поля будут закручиваться по спирали. А раз так, то вместо свернутой трубы можно просто оставить цилиндрическую откачанную от воздуха камеру без каких-либо перегородок внутри. Переменное электрическое напряжение высокой частоты теперь можно подавать по очереди на два полукруглых электрода, называемых дуантами. Когда на одном из них оказывается положительный электрический заряд, он втягивает в себя электроны, другой, заряженный отрицательно, подталкивает их вперед.

Порция подлежащих ускорению заряженных частиц впрыскивается в самом центре воображаемой спирали. Сначала они набирают скорость довольно быстро, но потом этот процесс замедляется, а затем и прекращается вовсе, так как чем



больше скорость движения частиц приближается к скорости света, тем тяжелее и тяжелее они становятся и начинают постепенно отставать от меняющего свой знак электрического напряжения на дуантах. Предел наступает где-то около 20—30 Мэв. Такие установки называются **циклотронами**.

Чтобы преодолеть это препятствие дальнейшему разгону частиц, частота электрического напряжения, поочередно подаваемого на ускоряющие электроды, делается переменной — по мере набора скорости частицами она замедляется, с тем чтобы не перегонять «отяжелевшие» частицы. На этих установках, называемых **синхроциклотронами**, частицы, в частности протоны, можно разгонять уже до энергий 600—800 Мэв.

По мере увеличения энергии снарядов атомной «артиллерии» стали выявляться все новые и более тонкие детали строения атомных ядер и составляющих их ядерных частиц, раскрываться тайны возникновения новых частиц, число которых уже превысило три десятка. Поэтому возникла необходимость строить еще более мощные ускорители — **синхротроны** и **синхрофазотроны**, в которых движение частиц происходит не по спирали, а по замкнутому кругу в кольцевой камере, напоминающей гигантскую баранку, а ускорение осуществляется только в одной или нескольких точках на пути частиц.

Сначала были построены установки на 2,9 и 6,2 Гэв (млрд. электронвольт) в США, затем на 10 Гэв в г. Дубне (СССР), наконец, на 30 Гэв в г. Женева (Швейцария) и на 33 Гэв в г. Брукхейвеле (США).

В районе г. Серпухова, под Москвой, с октября 1967 г. действует один из самых крупных в мире ускорителей протонов на энергию 70—76 млрд. эв. Ускорение протонов происхо-

дит в вакуумной камере — кольце эллипсоидального сечения высотой 11,5 мм, шириной 17,0 мм, диаметром 472 м. Ускорение частиц осуществляется переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом, весящим 20 000 т! В настоящее время ведутся работы над созданием еще более мощных установок.

В г. Батавия (США) завершено строительство ускорителя на проектную энергию 500 млрд. эв. Уже получен пучок протонов, ускоренных до энергии 300 млрд. эв. В Европейском центре ядерных исследований в г. Женеве сооружен протонный ускоритель на энергию до 300 млрд. эв и начаты работы по сооружению протонного ускорителя, в котором энергия частиц будет доведена до 1000 млрд. эв.

УСКОРИТЕЛЬ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ (ЦИКЛОТРОННЫЙ ТАНДЕМ). По мнению теоретиков, в далекой области трансурановых элементов с атомным номером ~ 110 и ~ 126 могут существовать изотопы сравнительно более устойчивые, чем получаемые ныне короткоживущие сверхтяжелые элементы от 102 до 105. Для проникновения в эту область нужны не только мишени из тяжелых элементов, но и максимально ускоренные ядра тяжелых атомов.

Предполагается, что, например, элемент № 114 (аналог свинца) можно получить если бомбардировать мишень из трансуранового элемента кюрия (№ 96) ускоренными ядрами цинка (№ 30). Однако при этом, если происходит ядерная реакция слияния кюрия с аргоном, образуется составное ядро, в котором будет не хватать минимум десятка нейтронов, вследствие чего оно окажется неустойчивым и быстро распадется. При реакции же кюрия с цинком образуется ядро с достаточным количеством нейтронов, но тяжелые ядра атомов цинка передадут получившемуся ядру слишком много лишней энергии, оно распадется еще быстрее — разделится на осколки средней массы. Поэтому получить далекие трансурановые элементы удастся, видимо, все же скорее в результате реакции деления ядер, а не слияния.

Для этого ядра кюрия, плутония и урана придется бомбардировать значительно более тяжелыми ядрами атомов, чем ядра цинка. Тогда при распаде получившегося уже совсем тяжелого ядра образуются как раз нужные сверхтяжелые (трансурановые) осколки. Например, при бомбардировке ядер атомов ксенона-129 на какое-то мгновение получится что-то вроде ядра элемента № 146 с массовым числом 367, которое тотчас же распадется на ядра более тяжелых трансурановых элементов, чем удалось получить до сих пор. Возможно, среди них окажутся и ядра элемента № 114 со

184 нейтронами, дающими надежду на его относительную устойчивость.

Для выполнения этой задачи требовалось «немного» — ускорить ядра очень тяжелых элементов, вроде ксенона, что было не под силу ни одному из существующих в мире ускорителей частиц. Однако ученые Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне нашли остроумное решение этой задачи. Они спарили в одну установку (тандем) два ускорителя — циклотроны У-200 и У-300. Первоначально на большем из них многозарядные ионы ксенона (лишенные восьми внешних электронов) разгоняются до сравнительно небольшой энергии.

Энергия ускоренных ядер тем больше и тем легче их разгонять, чем больше у них отобрано электронов. Поэтому, попав через ионопровод в малый циклотрон, восьмизарядные ионы сразу же натываются на тонкую металлическую фольгу, пройдя сквозь которую они теряют еще по 20 электронов. Полученный пучок уже 28-зарядных ионов ксенона проходит второй цикл ускорения, приобретая энергию порядка 900 Мэв, для получения которой потребовался бы циклотрон гигантских размеров (см. *Трансурановые элементы*).

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ. Астрономов и астрофизиков уже давно интересует происхождение особых тонковолокнистых туманностей, состоящих из очень длинных полос, напоминающих вуаль, одна из которых хорошо видна в созвездии Лебедя. Лишь в последнее время удалось установить, что эти светящиеся полосы являются следствием распространения в массе межгалактического газа (сильно разреженного водорода) ударных волн, температура и давление в которых, видимо, в миллионы раз превышают температуру и давление, развиваемые при взрыве самой мощной водородной бомбы. Распространяясь с огромной скоростью, эти волны вызывают свечение газа, т. е. излучение электромагнитных волн видимого света и радиоволн.

А что, если перенести условия такого грандиозного космического процесса на Землю? Ученым удалось найти способы в земных условиях получать ударные волны в газах, при которых развивается пока еще «небольшая» температура — порядка нескольких миллионов градусов. Но и эта температура скрывает в себе весьма важные физические процессы, представляющие несомненный интерес и для физиков-атомников. В частности, речь идет о трубчатой камере, в которой можно создавать ударные (взрывные) волны в газе, развивающие на короткое время огромные давления. Ее действие основано на известном факте, что при быстром сжатии

газ нагревается. При скорости взрывной волны, превышающей в четыре раза скорость звука (331 м/сек), газ по фронту ударной волны нагревается до 1000°C . При скорости, превышающей скорость звука в 10 раз, ударная волна может нагреть газ до 6000°C , а при скорости в 620 раз больше скорости звука, температура достигает уже миллиона градусов.

В своем наипростейшем виде взрывная камера имеет форму трубы, разделенной тонкой металлической (медной) перепонкой на две части. В одной из них взрывается смесь водорода с кислородом, благодаря чему создается высокое давление, растущее до тех пор, пока не разрывается разделяющая трубу перепонка. Тогда в газе, заключенном во второй половине трубы, возникает мощная ударная волна. Еще большее давление можно получить с помощью электрического разряда огромной силы.

О серьезных изменениях, которые претерпевают при этом атомы газа, свидетельствует наблюдаемое в окошечке, устроенном в конце ударной трубы, ослепительно яркое свечение в тех местах, на которые приходится максимальная плотность сжатия газа в ударной волне. Направленный в спектрограф пучок этого света позволяет определить температуру газа и давление в нем.

Наряду с термоядерной реакцией, возбуждаемой в сильно разреженном газе — смеси, например, дейтерия с тритием (см. *Термоядерная реакция, Токамак*) ударные волны при достаточной их мощности могут явиться способом осуществления термоядерной реакции в более плотных газовых смесях. За последние годы учеными Колумбийского университета (США) разработаны устройства для получения ударных волн в дейтерии со скоростью в 3200 и даже более раз превышающей скорость звука, что, по их утверждению, позволяет наблюдать признаки возникновения в газе термоядерной реакции, обнаруживаемой по возникновению в ней признаков нейтронного излучения. Успех этого направления позволил бы построить термоядерный реактор будущего, работающий короткими импульсами.

УРОВНИ ЭНЕРГИИ АТОМА «Планетарная» модель строения атома (см. *Атома модели*) очень приблизительно описывает картину взаимного расположения ядра и вращающихся вокруг него электронов. Представить себе поведение электронов и их взаимодействие с ядром атома и атомом в целом оказывается значительно легче, если перейти от образных понятий оболочек, орбит, траекторий вращения, скоростей и т. п. к понятию уровней энергии.

Каждому месту в пространстве, занимаемому вращающимся вокруг собственной оси и вокруг ядра атома электроном, соответствует строго определенный уровень энергии. И находится на том или ином уровне электрон может только в том случае, если количество энергии, отделяющее его от уровня энергии другого электрона (а следовательно, и расстояния от ядра атома), строго равно кванту излучения или целому числу квантов, но ни в коем случае не половине, четверти или любой дробной доле кванта. Расположение электронных оболочек и расстояния от ядра атома определяются не каким-то строгим геометрическим построением, как, например, в кристаллах, а только уровнями энергии электронов, расположенных на данных оболочках. На одном и том же уровне энергии в атоме может находиться не более двух электронов.

Для атома любого химического элемента существует ряд устойчивых (стационарных) состояний, в каждом из которых электрон обладает вполне определенным запасом энергии, иначе, находится на определенном энергетическом уровне. Когда атом находится в одном из таких стационарных состояний, он не излучает никакой энергии. Такое излучение возможно только целыми квантами и только в том случае, если электрон возвращается с одной из орбит неустойчивого (возбужденного) состояния атома на орбиту, соответствующую его нормальному, устойчивому состоянию. Энергия излученных квантов света при этом в точности равна разности первоначальной и конечной энергии.

УРОВНИ ЭНЕРГИИ ЯДРА АТОМА. По аналогии с уровнями энергии атома, где главными носителями энергии являются электроны, уровнем энергии ядра атома называют относительно устойчивые состояния ядра, при которых оно обладает вполне определенным запасом энергии. Для того чтобы вывести ядро из данного устойчивого состояния, ему необходимо добавить извне некоторое количество энергии. Это может произойти при его столкновении с быстрой частицей, при поглощении гамма-кванта или нейтрона.

Например, при лобовом столкновении быстрого нейтрона с ядром атома бора-11, если энергия нейтрона меньше $2,3 \text{ Мэв}$, взаимодействие будет носить упругий характер: частицы просто отскочат друг от друга, нейтрон потеряет часть своей кинетической энергии и замедлится. Если же энергия нейтрона будет превышать $2,3 \text{ Мэв}$, то ядро атома бора его поглотит и, придя в возбужденное состояние, через некоторое время испустит полученный излишек энергии в виде кванта гамма-излучения.

Ф

ФОТОН

ФОТОН — квант энергии видимого и невидимого света, рентгеновского и гамма-излучений, обладающий одновременно свойствами частицы и волны. Не имеет массы покоя и может двигаться со скоростью света, т. е. 300 000 км/сек. Фотон не несет на себе никакого электрического заряда, поэтому электрически он нейтрален. Так как электромагнитные волны любой частоты могут излучаться только строго определенными порциями — квантами, то энергия фотона строго зависит от частоты излучения и равна $E = h\nu$, где E — энергия фотона; h — постоянная Планка; ν — частота излучения.

Например, фотоны с длиной волны $1 \cdot 10^{-10}$ см имеют частоту $3 \cdot 10^{20}$ колебаний в секунду (герц). Энергия фотона, выраженная в электронвольтах, равна примерно 1,2 Мэв. Чем выше частота волны, тем больше энергия фотона. Фотон видимого света обладает энергией всего лишь в 2 эв, фотоны ультрафиолетовых лучей имеют энергию в диапазоне от 3 до 100 эв.

Фотоны с энергиями, значительно превышающими 100 эв, называют гамма-квантами.

При определенных условиях фотон, обладающий достаточно большой энергией, может образовать пару частиц электрон — позитрон.

ФЕРМИИ. Наше знакомство с атомом, а особенно с его ядром, основано исключительно на косвенных методах исследования. Приближенной моделью строения ядра атома служит капельная модель, согласно которой плотность ядра считается постоянной, а само ядро имеет отчетливо выра-

женную пограничную поверхность. Следовательно, чем больше размер ядра, тем больше в нем уместается нуклонов. Поскольку ядро, как и капля жидкости, имеет форму сферы, то объем его пропорционален кубу радиуса, а радиусы различных атомных ядер изменяются пропорционально кубическим корням из числа нуклонов в ядре. Например, если в большом ядре атома число нуклонов в восемь раз превышает число нуклонов в маленьком ядре, то радиус большого ядра должен быть вдвое больше радиуса маленького. По этой причине размеры атомных частиц чаще всего определяют по их радиусу, а не по диаметру. Радиус ядра атома измеряют в единицах, названных *ф е р м и* — в честь известного итальянского физика Э. Ферми $1 \text{ ферми} = 10^{-13} \text{ см}$, что условно соответствует радиусу ядра атома водорода (протона).

ФОТОЭМУЛЬСИОННЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ. Еще со времени открытия рентгеновских лучей и явления радиоактивности было известно, что эти невидимые глазу излучения воздействуют на фотографическую пластинку во много раз сильнее, чем самые яркие лучи видимого света.

Чувствительная к свету эмульсия фотографической пластинки или пленки состоит обычно из мельчайших зерен бромистого серебра, взвешенных в тонком слое прозрачной желатиновой массы. Зерна химического соединения брома и серебра совершенно прозрачны. Когда на зерна бромистого серебра фотоэмульсии действуют кванты света, то они выбивают электроны из кристалла бромистого серебра, вследствие чего атомы чистого серебра оказываются свободными. После проявления их скопления выглядят черными.

Такое же воздействие оказывают на молекулы бромистого серебра любые электрически заряженные частицы, обладающие энергией, достаточной для ионизирования или даже расщепления ядер атомов серебра. Проходя через фотоэмульсию, они оставляют на ней следы ионизированных молекул серебра, которые после проявления пластинки выглядят под микроскопом в виде цепочки из крапинок темного серебра на фоне прозрачной эмульсии.

Поскольку даже альфа-частицы, излучаемые радиоактивными веществами, оставляют след длиной около 50 *мкм* (0,05 *мм*), а толщина эмульсии обычных пластинок равна всего 20 *мкм*, то цепочка следов частиц, движущихся вертикально к плоскости пластинки, не уместается в слое эмульсии, не говоря уже о частицах, летящих со значительно большей скоростью. Советский физик Л. В. Мысовский первым предложил изготавливать пластинки со слоем эмульсии толщиной

Ф

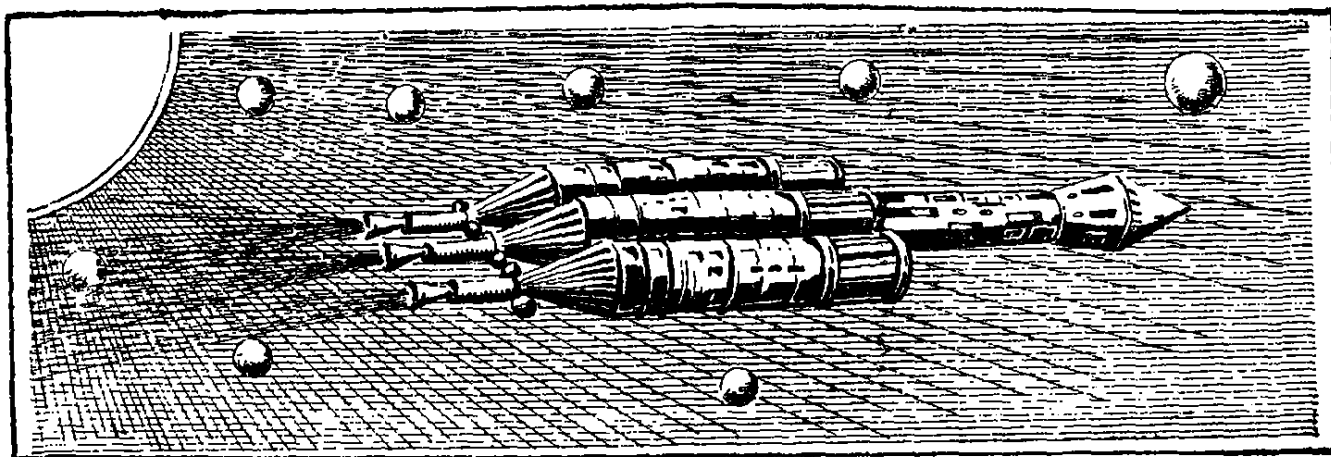
400—600 мкм. В тех случаях, когда ожидаемый пробег частицы может оказаться еще более длинным, применяют пакеты, состоящие из многих слоев эмульсии

ФОТОННАЯ РАКЕТА. Как известно, при делении ядер атомов урана или плутония высвобождается огромное количество энергии — примерно 22,9 млн. *квт·ч* на 1 кг делящегося вещества. Но даже и это колоссальное количество энергии составляет всего лишь 0,1% скрытой в веществе (вернее, эквивалентной массе вещества) энергии, получаемой по знаменитой формуле взаимосвязи массы и энергии Эйнштейна: $E = mc^2$. Даже при термоядерной реакции слияния ядер легких атомов в более тяжелые ядра высвобождается всего около 1% скрытой энергии!

В природе известен только один процесс, в ходе которого вся масса участвующего вещества превращается в излучение — фотоны, не имеющие массы покоя, но зато движущиеся со скоростью света — 300 000 км/сек. Это процесс аннигиляции — самоуничтожение двух частиц с противоположными физическими свойствами, обычных в нашем мире частиц и так называемых античастиц, например электронов и позитронов, протонов и антипротонов (см. *Антивещество*). При такой реакции высвобождается уже вся скрытая в веществе энергия или, согласно приведенной выше формуле Эйнштейна, 25 млрд. *квт·ч* на каждый килограмм вещества!

Еще несколько десятилетий назад П. Н. Лебедев доказал, что свет, обладающий помимо энергии еще и массой, оказывает вполне определенное, хотя и незначительное, давление. А раз так, то мощный поток фотонов, создаваемый фантастически огромной лампой, излучающей в каком-либо направлении море света, должен сообщать ей непрерывно действующее ускорение. Такой, пока еще тоже фантастический, ракетный двигатель мыслится в виде ядерной установки огромной мощности, непрерывно вырабатывающей частицы и их античастицы, например протоны и антипротоны. В специальной камере эти частицы встречаются, взаимно уничтожаются, а образовавшиеся фотоны, собранные с помощью огромного зеркала, выбрасываются из хвостовой части ракеты в нужном направлении. Поток света и создаст реактивную тягу.

Теоретически двигатель такого вида является энергетически самым совершенным, эффективным и экономичным из всех, какие только можно себе представить, ибо в процессе аннигиляции частиц в свет превращается практически 100%



скрытой в веществе энергии, а сами фотоны движутся с предельно возможной в природе скоростью света.

Однако перед учеными будущего стоят неизмеримо более трудные задачи. Главные из них таковы. В нашем мире обычных элементарных частиц получать античастицы — дело хотя и очень трудное, но еще возможное. Удержать же их так, чтобы они не вступили тут же в ядерную реакцию с окружающими их антагонистами, — дело почти безнадежное. А ведь их нужно как-то довести до камеры сгорания, помещаемой в фокусе зеркала ракеты.

Чтобы тяга такого двигателя имела реальную величину, в свет должны превращаться довольно ощутимые количества античастиц. Процесс аннигиляции и превращения вещества в свет будет совершаться при такой безумно высокой температуре, которую вряд ли когда сможет выдержать, мгновенно не испарившись, любое самое фантастически жаропрочное вещество зеркала. Ведь вспышка света будет несравнимо более яркой и мощной, чем вспышка при взрыве многомегатонной водородной бомбы.

Однако гадать, каковы будут достижения науки и техники даже через несколько десятилетий, нельзя. Нет сомнений, что наука далекого, а возможно только отдаленного будущего, решит и эту, безусловно, головокружительную задачу. Поэтому, несмотря на, казалось бы, безнадежные сейчас перспективы, ученые все же уделяют идее создания фотонной ракеты, пока еще очень отвлеченной и больше похожей на мечту, значительное внимание.

Почему так заманчиво создание фотонной ракеты, даже мечта о ней?

Космические расстояния, равные десяткам и сотням световых лет, отделяющие нас от ближайших звездных миров, не говоря уже о расстояниях до других галактик, не сулят че-

Ф

ловечеству надежд вырваться когда-нибудь из плена неумолимого течения времени. Ведь даже двигаясь со скоростью света, ракета летела бы до самой близкой к нам звезды в течение четырех с половиной лет! И только двигатель, позволяющий ракете двигаться с околосветовой скоростью, делает реальной мечту когда-нибудь достичь миров, лежащих за пределами Солнечной системы.

ФАЗОТРОН (синхроциклотрон) — ускоритель заряженных частиц, в котором применен так называемый принцип автофазировки, предложенный советским ученым В. И. Векслером.

Суть этой идеи заключается в том, что при определенных условиях и правильном подборе ускоряющих электрических и управляющих магнитных полей можно каждую разгоняемую частицу заставить двигаться так, что, несмотря на ее возможные индивидуальные отклонения, она все-таки придет к концу пути с максимальной заданной энергией. Достигается это тем, что, например, для компенсации релятивистского эффекта (утяжеления частиц при скоростях движения, приближающихся к скорости света), что является главной причиной нарушения синхронизации в циклотроне, частота ускоряющего напряжения, подводимого к ускоряющему промежутку, постепенно снижается.

Изменение частоты подбирается таким образом, чтобы импульсы напряжения поступали на ускоряющий промежуток с каждым оборотом частицы все позднее и позднее, в точном соответствии с ее релятивистским «утяжелением» и постепенным замедлением темпов набора скорости.

Ц

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ. Одно из самых замечательных научных достижений XX века — открытие цепных реакций: в 1913 г. — химических, а спустя три десятилетия — ядерных. Речь идет о химичес-

ких реакциях, которые, однажды начавшись, далее продолжают поддерживать сами себя до полного истощения участвующих в них веществ. Реакции эти могут быть самоподдерживающимися на каком-либо исходном уровне или разветвляющимися по какой-либо, например геометрической, прогрессии.

Примером первой, неразветвляющейся химической реакции может служить реакция соединения водорода с хлором. Эти элементы имеют столь большое тяготение друг к другу, что атом водорода легко отрывает от молекулы хлора и присоединяет к себе один из двух ее атомов или, наоборот, молекула хлора отрывает и присоединяет к себе от молекулы водорода один из ее двух атомов. Оставшийся свободным атом хлора тотчас же восполняет эту потерю, оторвав себе один из двух атомов оказавшейся по соседству другой молекулы водорода, и т. д.

Так продолжается до тех пор, пока все атомы хлора не присоединят к себе по одной молекуле водорода или, наоборот, атомы водорода — по молекуле хлора.

Пример разветвляющейся химической реакции. — соединение водорода с кислородом, когда атом водорода отрывает и присоединяет к себе один из атомов молекулы кислорода. Образуется так называемый свободный радикал OH . Оставшийся свободным второй атом из молекулы кислорода тотчас же отрывает и присоединяет к себе один из двух атомов молекулы водорода, в результате чего образуется еще один свободный радикал OH и один свободный атом водорода.

В результате всей этой операции остается уже два свободных атома водорода, каждый из которых начинает свою ветвь отрывов и присоединений ато-

мов кислорода. Это второе поколение оставляет после себя уже четыре свободных атома водорода, те в свою очередь — 8, следующие — 16 и т. д., т. е. количество свободных атомов, готовых начать свою отдельную ветвь размножения, удваивается с каждым поколением, безудержно нарастая, как снежная лавина. Кончается все это или полным исчерпанием исходных газов, или мощным взрывом. Короче говоря, каждая вступившая в реакцию единица вызывает реакцию у K других единиц. Затем каждая из этих K единиц вызывает реакцию еще у K единиц, т. е. в реакцию будет вовлечено уже K^2 единиц, и т. д. Число K в этом случае называют коэффициентом размножения. Если этот коэффициент по каким-либо причинам окажется меньше единицы, реакция станет постепенно затухать, если больше единицы — нарастать. В случае, когда значение K равно точно единице, темп реакции останется на одном и том же первоначально заданном или начатом уровне.

ЦЕРН — сокращенное обозначение Европейского центра ядерных исследований (Conseil Européen de Recherche Nucléaire). Местонахождение вблизи г. Женева в Швейцарии. ЦЕРН располагает рядом ускорителей, самый крупный из которых позволяет получать частицы с энергией до 30 млрд. эв. Ведется строительство ускорителя на энергию 300 млрд. эв.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ (РЕЗОНАНСНЫЕ) УСКОРИТЕЛИ — ускорители заряженных частиц, движущихся по замкнутым орбитам. Ускорение осуществляется путем многократного прохождения частиц через ускоряющие промежутки, где частицам передается энергия от переменного электрического поля, изменяющего свою частоту в такт с периодом обращения частиц. К циклическим резонансным ускорителям относятся: циклотрон, фазотрон, синхрофазотрон, синхротрон (см. *Ускорители частиц*).

ЦИКЛОТРОН — ускоритель протонов, альфа-частиц, дейтронов, в котором частицы получают ускорение от электрического поля — переменного по амплитуде, но постоянного

по частоте. Управляет движением частиц и фокусирует их тоже постоянное по времени магнитное поле, создаваемое мощным электромагнитом. Частота ускоряющего поля подбирается так, чтобы частица, двигаясь по инерции внутри одного из двух полых электродов в виде половинки диска — дуантов, попадала в промежуток между ними каждый раз в те моменты, когда электрическое поле между ними как бы «подстегивает» частицу, которая с каждым оборотом внутри дуанта ускоряется все больше и больше.

Предельная энергия, достижимая на обычных циклотронах, ограничивается 25—30 Мэв. Это объясняется тем, что при больших скоростях (энергиях) начинает сказываться релятивистский эффект — возрастание массы частиц по мере приближения скорости частиц к скорости света, что нарушает синхронизацию (совпадение по времени) между вращением частицы в дуантах и поступлением импульсов переменного электрического поля от генератора на ускоряющий промежуток.

Чтобы увеличить энергию частиц, ускоряемых в циклотроне, приходится идти на различные технические усложнения, например искусственно изменять по амплитуде напряженность магнитного поля, создаваемого электромагнитом.

Циклотроны, у которых вместо частоты ускоряющего напряжения изменяется величина магнитного поля, называют синхротронами.

ЦИКЛОТРОННЫЙ ТАНДЕМ (см. *Ускоритель многозарядных ионов*).

4

4

ЧЕРЕНКОВА—БАВИЛОВА ЭФФЕКТ
ЧЕРЕНКОВА СЧЕТЧИКИ

ЧЕРЕНКОВА — БАВИЛОВА ЭФФЕКТ — свечение, появляющееся в некоторых веществах, когда через них пролетает частица, движущаяся со скоростью, превышающей скорость распространения света в данном веществе.

Этот эффект свечения был открыт советским физиком П. А. Черенковым и теоретически объяснен С. И. Вавиловым.

Новое излучение оказалось поистине замечательным. Оно распространяется не во все стороны, а в конусе, ось и раскрытие которого совпадают с направлением движения частиц. Величина угла при вершине конуса строго зависит от скорости движения частицы и коэффициента преломления вещества для определенной длины волны излучаемого света.

Благодаря этому стало возможным применить данное явление в приборах для измерения скорости и направления полета быстрых заряженных частиц — электронов, протонов, мезонов, так как яркость излучения возрастает с увеличением скорости возбуждающей его частицы и прямо пропорциональна квадрату ее электрического заряда.

В 1958 г. за это выдающееся открытие и разработку теории излучения советским ученым П. А. Черенкову, И. М. Франку и И. Е. Тамму была присуждена Нобелевская премия по физике.

ЧЕРЕНКОВА СЧЕТЧИКИ — детекторы быстрых заряженных частиц — электронов, протонов, мезонов и гамма-квантов высокой энергии, основанные на регистрации черенковского излучения. В этих детекторах улавливается, многократно усиливается и регистрируется или весь свет, излученный частицей, или часть света, испускаемого лишь под строго определенным углом к направлению движения частицы. Пропуская исследуемые частицы последовательно через батарею таких счетчиков, легко установить их скорость, а в сочетании с другими счетчиками и приборами — массу, заряд и другие характеристики.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД. Так называется наименьший электрический заряд в природе, который уже нельзя разделить на более мелкие части. Он служит одной из важнейших характеристик любых заряженных элементарных частиц: электронов, протонов, позитронов, мезонов и т. д., независимо от того, какой заряд электричества они на себе несут — положительный или отрицательный, и равен $4,8029 \cdot 10^{-10}$ электростатической единицы или $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона (к). Электрический заряд любого заряженного тела может быть только кратен элементарному заряду и всегда представляет сумму элементарных положительных или отрицательных зарядов атомных частиц, из которых состоит данное тело. Э

ЭЛЕКТРОН — легчайшая элементарная частица вещества, несущая на себе отрицательный электрический заряд наименьшей возможной величины, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ к. Масса электрона — $9,11 \cdot 10^{-28}$ г. Электроны образуют отрицательно заряженную оболочку атомов всех элементов. Электрон, испущенный ядром, принято называть бета-минус-частицей (e^-), а сам процесс испускания — бета-минус-распадом (см. *Атом электричества — электрон*).

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ СИЛЫ — силы взаимного притяжения или отталкивания, действующие между неподвижными или равномерно движущимися зарядами. В повседневной практике эти силы сравнительно невелики. Но в масштабах раз-

меров и масс частиц микромира и на расстояниях их взаимодействия друг с другом, равных стомиллионным и миллиардным долям сантиметра, эти силы потрясающе огромны.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — сложный физический процесс перехода энергии из области, непосредственно входящей в систему атома, в окружающее этот атом пространство. Любой движущийся или колеблющийся электрический заряд, естественно связанный с какой-либо определенной частицей (электроном, протоном, мезоном и т. д.), при всяком изменении ее скорости создает вокруг себя изменяющееся магнитное поле, которое в свою очередь вызывает появление изменяющегося электрического поля, и т. д. Возникшее переменное электромагнитное возмущение, состоящее как бы из последовательно «переливающихся» одно в другое электрических и магнитных полей, распространяется от места возникновения во все стороны со скоростью света $300\,000\text{ км/сек}$, унося с собой определенное количество энергии.

Такое электромагнитное возмущение называют **электромагнитной волной**. В технике чаще всего пользуются терминами «частота электромагнитных колебаний» ν (число колебаний в единицу времени) и «длина волны» λ , которые связаны соотношением $\nu = \lambda \nu$, где ν — скорость света.

Самым важным является то, что количество энергии, переносимой электромагнитной волной, растет с увеличением частоты колебаний. Эта энергия, выраженная в эргах, определяется формулой $E = h\nu$, где h — постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-27}\text{ эрг} \cdot \text{сек}$; ν — частота колебаний, гц . Так, энергия электромагнитной волны фиолетового света вдвое больше энергии волны красного света.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. Сейчас уже нет нужды доказывать, что все вещества состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из ядра и электронов, ядра — из протонов и нейтронов. А из чего состоят протоны, нейтроны и электроны? В свое время эти частицы называли элементарными, т. е. неделимыми, полагая, что при дальнейшем делении они могут превращаться во что угодно другое, но только не в какие-то иные частицы, т. е. их нельзя построить из других, более элементарных частиц.

Тем не менее ученые примерно лет десять назад приступили к упорному и систематическому штурму тайны строения элементарных частиц и в первую очередь нуклонов — протонов и нейтронов.

Как и вообще в ядерной физике, для этого открывались, собственно, два основных направления. Первое — попытаться разбить, раздробить, если возможно, элементарную частицу на какие-то ее составные (если таковые имеются) части. Единственный способ достичь этого — разгонять другие такие же частицы до скоростей, насколько возможно близких к скорости света, а затем обстреливать этими «снарядами» элементарные частицы в атомах других веществ, например ускоренными протонами — ядра атомов ионизированного водорода (тоже протоны), протонами или альфа-частицами — протоны и те же альфа-частицы и т. п. Требуемые для этого энергии (порядка сотен миллионов и миллиардов электрон-вольт) могли быть получены только с помощью мощных ускорителей заряженных частиц. Сначала большим достижением считались ускорители, разгоняющие заряженные частицы до энергий в десятки миллионов, затем в сотни миллионов и, наконец, в десятки миллиардов электронвольт.

Второй путь — это, если так можно выразиться, путь «прощупывания» строения элементарных час-

тиц. Заключается он в известном еще из оптики явлении, что чем мельче рассматриваемый предмет, тем короче должна быть длина волны света электромагнитного излучения, освещающего этот предмет. Если волна окажется длиннее такого предмета, она просто его обогнет, и мы ничего не увидим, если короче, то она отразится, и мы увидим освещенный предмет. Поэтому максимальное оптическое увеличение можно получить, освещая изучаемый предмет ультрафиолетовыми лучами, невидимыми человеческому глазу, но могущими быть зафиксированными фотопластинкой.

После открытия де Бройлем волновых свойств у любых движущихся с большой скоростью частиц предоставилась возможность создать электронный микроскоп, в котором ускоренные до энергий 100 кэв и больше электроны позволяют рассматривать тела, имеющие поперечник всего в несколько ангстрем (1 ангстрем равен 10^{-8} см).

Согласно выведенной де Бройлем формуле, чем тяжелее частица и чем быстрее она летит, тем более короткая длина волны ставится ей в соответствие. Выходило, что если ускорить пучок электронов до энергии порядка нескольких сот миллионов электронвольт, то их волна станет столь короткой и сопоставимой с размерами ядерных частиц, что ею можно как бы «прощупать» строение ядра атома. По отражению и рассеянию этих волн удалось определить размеры составляющих это ядро нуклонов. А если поток электронов разогнать до энергии порядка нескольких десятков миллиардов электронвольт, то длина волны электронов станет во много раз короче поперечника нуклонов.

С помощью таких волн предоставится возможность установить строение и самих протонов и нейтронов.

С тех пор, как на вооружение ученых начала поступать мощная «атомная артиллерия», открытия последовали одно за другим, и в первую очередь были получены новые частицы. Энергии в миллионы электронвольт оказалось достаточно, чтобы среди осколков «микрোকатастроф» обнаружить положительно заряженный электрон — позитрон. Ускорители на сотни миллионов электронвольт позволили получать искусственным путем мезоны, впервые обнаруженные в составе космических лучей.

Создание ускорителей на энергии в миллиарды электронвольт привело к открытию античастиц — антипротона, антинейтрона и других частиц, по физическим свойствам полностью противоположных обычным элементарным частицам — протону, нейтрону и др.

К настоящему времени известно уже 16 элементарных частиц и примерно столько же античастиц. Если же включить в этот список еще и очень короткоживущие частицы, то общее количество известных элементарных частиц достигнет примерно 200! Большинство этих частиц неустойчиво. Спустя ничтожно короткое время они распадаются, превращаясь после ряда радиоактивных распадов с испусканием бета-частиц в немногие, уже устойчивые частицы с меньшей массой: электроны, протоны и нейтрино, или в соответствующие им античастицы, которые в принципе также устойчивы (см. *Бета-распад*).

Насколько удалось установить до сего дня, ни одну из известных элементарных частиц нельзя разложить на более мелкие составные части. Все они считаются элементарными потому, что под этим понимается отсутствие у них структуры.

К числу неустойчивых принадлежат два класса частиц. К одному из них относятся частицы тяже-

лее электрона, но легче протона. Их называют мезонами. К другому классу принадлежат частицы тяжелее протона. Их называют гиперонами. При распаде гиперонов всегда образуются нуклоны. Известны мезоны следующих типов: мю-мезоны, пи-мезоны и K -мезоны. Масса мю-мезона составляет примерно $1/8$ массы протона, масса пи-мезона — примерно $1/7$ и масса K -мезона — около половины массы протона. Мю-мезоны могут быть лишь отрицательными или положительными. Нейтрального мю-мезона не существует. Не считая массы, мю-мезон, по-видимому, полностью подобен электрону, и его можно рассматривать как тяжелый электрон. Однако в природе других тяжелых электронов не встречается.

Античастица отрицательного мю-мезона (μ^-) — положительный мю-мезон (μ^+). Вследствие существования универсального взаимодействия отрицательный мю-мезон должен распадаться на электрон и два нейтрино ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$) с периодом полураспада $2,2 \cdot 10^{-6}$ сек.

Благодаря этому взаимодействию все три частицы имеют много общего, и поэтому их называли лептонами.

Пи-мезоны бывают отрицательные, положительные и нейтральные (π^- , π^+ , π^0). Античастицей по отношению к положительному пи-мезону является отрицательный пи-мезон. Подобно фотону нейтральный пи-мезон тождествен со своей античастицей.

Предсказанный японским физиком Юкавой в 1935 году — за 12 лет до его открытия — пи-мезон ответствен за появление в ядре атома так называемых ядерных сил. Ими непрерывно обмениваются между собой нуклоны, примерно так же, как проявление электрических сил объясняется непрерывным испусканием и поглощением электри-

ческим зарядом квантов электромагнитного излучения. Пи-мезоны легко получить путем соударений протонов с энергией в несколько сот миллионов электронвольт. В этом случае происходит прямое превращение кинетической энергии нуклонов в массу покоя пи-мезона.

Возможна целая гамма разнообразных реакций:

а) протон + протон = протон + нейтрон + положительный пи-мезон;

б) протон + нейтрон = протон + протон + отрицательный пи-мезон;

в) гамма-квант + протон = нейтрон + положительный мезон;

д) гамма-квант + нейтрон = протон + отрицательный пи-мезон и т. д.

Получаемые на мощных ускорителях частиц заряженные пи-мезоны (время жизни $2,56 \cdot 10^{-8}$ сек) распадаются по следующим схемам: положительный пи-мезон — положительный мю-мезон + нейтрино или позитрон + нейтрино; отрицательный пи-мезон — отрицательный мю-мезон + антинейтрино или электрон + антинейтрино. Нейтральный пи-мезон (время жизни $1,8 \cdot 10^{-16}$ сек) распадается значительно быстрее, но только на два фотона.

Сравнительно недавно открыт K -мезон. Известны положительные и нейтральные K -мезоны (K^+ и K^0) с соответствующими античастицами: отрицательный \bar{K}^- и нейтральный \bar{K}^0 -мезоны. Благодаря большой массе K -мезон имеет и больше различных возможностей распада. Время жизни заряженного K -мезона равно $1,23 \cdot 10^{-8}$ сек (см. Мезоны).

Гиперонов — элементарных частиц тяжелее протонов — существует три разновидности. Их обозначают заглавными буквами греческого алфавита: Λ (ламбда), Σ (сигма) и Ξ (кси).

И совсем недавно была открыта еще одна элементарная частица: омега-минус-частица. Все гипероны распадаются на нуклоны. У каждого гиперона существует античастица с противоположным знаком (см. *Гипероны*).

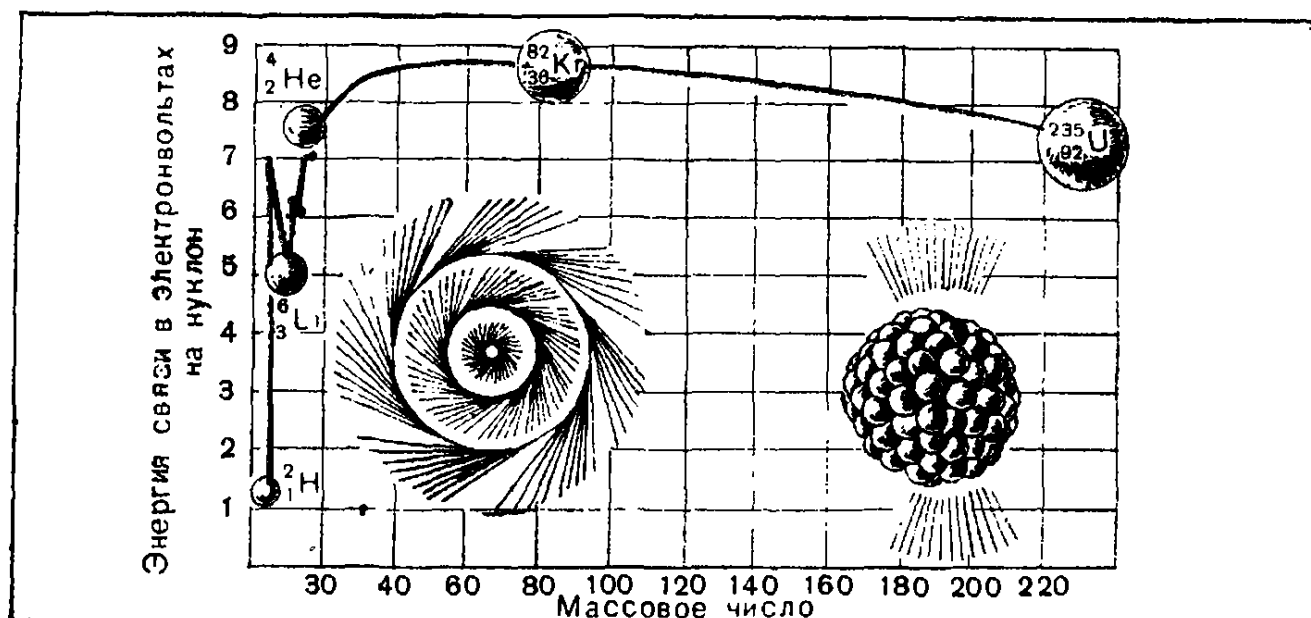
Мир элементарных частиц оказывается исключительно богатым как разнообразием самих частиц, так и видами их взаимодействий и взаимопревращений.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА АТОМА. Чтобы иметь возможность судить о количестве энергии, которая могла бы быть высвобождена при перестройке — ином расположении элементарных частиц в ядрах атомов, ученые составили таблицу средней энергии (в электронвольтах), запасенной каждым нуклоном в ядрах атомов.

Таблица позволяет установить, в каких случаях эта энергия могла бы быть высвобождена, а в каких — нет, т. е. высчитать разность между энергией связанного состояния некоторой совокупности ядерных частиц и энергией такого состояния, когда эти частицы разделены и удалены друг от друга.

Из графика видно, что самое большое значение средней энергии связи, равное примерно $8,6 \text{ Мэв}$ на нуклон, приходится на ядра атомов химических элементов, занимающих почти всю середину таблицы Д. И. Менделеева. И какими бы способами мы ни перестраивали ядра этих атомов — делили и складывали их вновь, — затрачиваемая на эту работу энергия будет равняться высвобождаемой при любом ином расположении частиц или даже превышать ее, следовательно, никакой выгоды от таких операций мы не получим.

Зато элементы, находящиеся в начале и в самом конце таблицы, т. е. самые легкие и самые тяжелые,



отличаются значительными колебаниями средней величины энергии связи.

Например, полная энергия связи ядра атома гелия, состоящего из четырех нуклонов, равна $28,2 \text{ Мэв}$ — по 7 Мэв на каждый нуклон. Полная же энергия связи ядра атома дейтерия, состоящего из двух нуклонов, равна $2,28 \text{ Мэв}$. И если бы удалось из двух ядер атомов дейтерия сложить ядро атома гелия, то реальный выигрыш в энергии на каждом таком атоме составил бы $23,6 \text{ Мэв}$!

В 1 кг гелия имеется $1,505 \cdot 10^{26}$ атомов. При сложении его из ядер дейтерия должна выделиться энергия, равная $1,505 \cdot 10^{26} \cdot 23,64 = 35,6 \cdot 10^{26} \text{ Мэв}$. Чтобы получить ее обычным путем, нужно сжечь $13\,600 \text{ т}$ бензина!

Другой пример. Полная энергия связи ядра атома урана-235, состоящего из 235 нуклонов, равна 1780 Мэв (по $7,6 \text{ Мэв}$ на нуклон). Энергия связи получающихся после его деления двух осколков, которые являются ядрами более легких элементов из середины периодической таблицы, значительно выше (по $8,6 \text{ Мэв}$ на нуклон). Вместе с выбрасываемыми 2—3 нейтронами она равна примерно

2000 Мэв. Следовательно, разница в количестве энергии между ядром атома урана и двумя его осколками составит около 200 Мэв. При делении же всех ядер одного килограмма урана-235 выделится энергия, которую можно получить лишь при сжигании 1800 т бензина или 2500—3000 т угля.

Таким образом, при реакции слияния ядер легких элементов на 1 кг реагирующего вещества высвобождается примерно в восемь раз больше энергии, чем при реакции деления ядер тяжелых элементов.

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ (ВЗАИМОСВЯЗЬ) МАССЫ И ЭНЕРГИИ. Одно из самых основных свойств любого материального тела — наличие у него массы. В классической физике под массой понималось количество материи. При этом материя атомов считалась абсолютно однородной, не обладающей никакими свойствами кроме «непроницаемости» и инерции, т. е. свойствами сопротивляться внешним усилиям. Масса рассматривалась как мера инерции тел, состоящих из атомов. Считалось, что движение тел совершенно не меняет величины его массы, что масса во всех случаях движения остается абсолютно неизменной.

Начало новому учению о массе положили опыты русского физика П. Н. Лебедева, доказавшего, что свет оказывает давление на поверхность падения.

Из механики известно, что всякое давление, производимое телом на какое-либо другое тело, равно произведению массы этого тела на скорость изменения его скорости в процессе взаимодействия со вторым телом. Наличие светового давления привело к мысли о том, что свет, как и обычные тела, должен обладать массой, так же, как и скоростью. Это столь же неизбежно, как наличие массы и скорости у

пули, ударяющейся о препятствие. Масса теперь, оказывается, связана не только с обычными телами, состоящими из атомов, но и со светом. Позже советский физик С. И. Вавилов пришел к выводу, что световое давление равно энергии света, разделенной на его скорость. Если энергию света обозначить буквой E , массу света m , а скорость света c , то получим выражение

$$E/c = mc \text{ или } E = mc^2.$$

Согласно теории относительности Эйнштейна, это выражение справедливо не только для света, но и для любого другого вида энергии. Поэтому в приведенной формуле можно считать, что E соответствует любому виду энергии, m — массе любого материального объекта, в том числе и света, c — скорости света. Эта формула получила не совсем удачное название «эквивалентности массы и энергии», вскоре истолкованное буржуазными физиками-идеалистами на свой лад в качестве доказательства превращения материи в энергию и обратно. Но такое толкование не отвечает действительному смыслу данного закона. Более правильно его было бы назвать законом относительности или взаимосвязи массы и энергии.

Это уравнение не утверждает, что масса m может быть превращена в энергию E , а только показывает, что объект с массой m одновременно обладает и энергией E .

Принцип эквивалентности массы и энергии дает точное количественное значение энергии, отвечающей данной массе. Для вычисления этого количества следует только помножить массу тела на квадрат скорости света. Именно здесь ученые столкнулись впервые с захватывающим дух и потрясающим воображение фактом: в теле, обладающем массой в

один килограмм, сосредоточена энергия, которую можно было бы получить, сжигая примерно три миллиона тонн угля! Достаточно сказать, что овладение термоядерной реакцией, которой суждено снять с человечества заботу об источниках энергии на вечные времена, позволит высвободить только 1 % этой скрытой в веществе энергии, реакция деления ядер атомов урана или плутония — 0,1 %, а обычная реакция горения — только 0,00000001 %!!!

Теория относительности, кроме того, установила такую зависимость массы тела от скорости его движения:

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

где m_0 — масса тела или частицы в состоянии покоя (масса покоя); m — масса того же тела или частицы в состоянии движения со скоростью v ; c — скорость света. Так как выражение под корнем $1 - v^2/c^2$ меньше единицы, то, следовательно, масса движущегося тела m всегда больше массы тела, находящегося в покое (m_0). Эта формула показывает, таким образом, что масса оказывается не постоянной, а возрастает с увеличением скорости движения тела. А увеличение скорости движения тела означает в то же самое время увеличение его кинетической энергии. Следовательно, возрастание массы тела в зависимости от увеличения скорости его движения можно, согласно приведенной выше формуле, понимать как зависимость массы тела от его кинетической энергии. Чем больше кинетическая энергия тела, тем больше его масса. Имея в виду эту зависимость, можно сказать, что масса тела есть мера содержащейся в нем энергии. Эта связь массы и энергии выражается формулой $E = mc^2$. При этом приходится различать массу, которой обладает час-

тица, находящаяся в покое, и ту массу, которую она приобретает, придя в движение. Отсюда масса частицы, находящейся в покое, получила особое название — масса покоя, или собственная масса.

Кванты света, например, или, иначе, фотоны, совсем не имеют массы покоя, однако они обладают массой. Фотоны отличаются от таких элементарных частиц, как протоны, электроны, позитроны, еще и тем, что они не имеют электрического заряда и, кроме того, не могут двигаться со скоростью, отличающейся от скорости света.

Поэтому те частицы (или тела, состоящие из частиц), которые в отличие от фотонов обладают массой покоя, принято называть веществом. Те же материальные объекты, которые не имеют массы покоя (фотоны), вообще говоря, к веществу не относятся. Однако они так же материальны, как и вещественные частицы.

Применительно к конкретному случаю ядерных реакций, например к делению ядра атома урана или плутония при поглощении им нейтрона, никаких изменений в суммарном количестве материи, имеющейся в природе, не происходит.

Если учесть, что частицы расщепляемого ядра и вызвавший это расщепление нейтрон первоначально находились в движении и что в результате расщепления получены два неравных осколка и высвобождено несколько нейтронов, имеющих большие скорости, то усложняются только формулы вычисления энергий и масс участвующих в этом событии частиц. Но конечный результат будет один и тот же — сумма всех энергий и масс до реакции точно равна сумме всех энергий и масс после реакции. Таким же образом при аннигиляции — уничтожении — электрона и позитрона можно убедиться,

что суммарная энергия и масса получившихся фотона или фотонов точно равна суммарной энергии и массе «уничтоженных» электрона и позитрона.

Следовательно, масса и энергия — лишь два различных свойства материи, присущие определенным ее состояниям.

ЭКРАНИРОВАНИЕ ОТ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ. Для защиты (экранирования) от рентгеновского и гамма-излучений служат наиболее плотные и тяжелые вещества (свинец, бетон, кирпич и т. п.). Экранирование от нейтронов осуществляется веществами, богатыми ядрами атомов водорода или углерода (вода, графит, бетон и т. д.), многократные столкновения с которыми резко замедляют их скорость, или с ядрами атомов, жадно поглощающих нейтроны, например бора, кадмия, бериллия и др.

Экран может быть и многослойным, составленным из веществ сначала замедляющих, а затем поглощающих нейтроны. Эффективное экранирование альфа- и бета-частиц не представляет особых трудностей ввиду их сравнительно малой проникающей способности.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА — образное название устройства для получения направленного потока электронов в вакууме. Отличается от обычной электронной выпрямительной или усилительной лампы, имеющей нить накала или накаливаемый катод и ускоряющий электрод, наличием дополнительных электродов, фокусирующих (сжимающих) электроны в узкий луч. Наиболее широко применяется в конструкциях всевозможных электроннолучевых измерительных, индикаторных и телевизионных трубок.

В ядерной технике «электронные пушки» применяют в качестве первичного источника электронов для последующего ускорения их в бетатронах, электронных синхротронах, линейных ускорителях и других устройствах, где требуются особо плотные потоки электронов.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР (см *Реакторы*) — ядерный реактор, главное назначение которого — производство тепла для выработки электрической энергии.

ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКИ НА ЗЕМНОМ ШАРЕ. Энергетические ресурсы на земном шаре подразделяются в основном на два вида: топливные (уголь, нефть и др.) и нетоплив-

ные (энергия падающей воды, энергия ветра и др.). Кроме того, источники энергии условно делятся на возобновляемые и невозобновляемые. Ниже приводятся данные по этим видам источников энергии

Невозобновляемые источники (топливо)

	Условное топливо. млрд. т	тыс. млрд. квт·ч
Уголь	10 660	86 250
Нефть	120	970
Природный газ	60	490
Торф	560	4 550
Растительное топливо	600	4 800
Уран и торий	65 000	527 000

Непрерывно восстанавливающиеся и практически вечные источники

	тыс. млрд. квт·ч
Солнечное излучение	1 500 000
Морские приливы и волнение	70 000
Ветер	17 360
Тепло Земли	289
Энергия рек	33

ЭНЕРГИЯ АТОМНОГО ВЗРЫВА. Энергия атомного взрыва в атмосфере распределяется следующим образом: световое излучение — 30%, ударная волна — 50%, проникающая радиация — 5%, радиоактивные осадки — 15%

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ (нейтрона, протона, электрона и т. д.) — энергия, необходимая для полного отделения данной частицы от ядра.

ЭНЕРГИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЕЗД. В настоящее время общепринято считать, что основным источником баснословно огромной и неиссякаемой энергии звезд являются происходящие в их недрах термоядерные реакции последовательного превращения легких элементов в более тяжелые, сопровождающиеся выделением в окружающее пространство потока частиц и электромагнитного излучения в широчайшем диапазоне частот. При этом предполагается, что наиболее распространенным элементом в начале эволюции обозреваемой Все-

ленной был водород, который при определенных условиях может собираться в облака, достаточно плотные, чтобы в них начали проявляться силы притяжения, ведущие к еще большему сжатию водородного газа, сопровождающегося дальнейшим ростом давления, а следовательно, и его температуры. Когда же температура и давление в центре зарождающейся звезды достигают определенного значения (миллионы градусов и миллиарды атмосфер соответственно), в нем возникают термоядерные реакции, ведущие к еще большему увеличению давления. Вследствие этого дальнейшее сжатие звезды замедляется и начинается ее медленное «горение», длящееся многие миллиарды лет. На этой стадии эволюции звезды происходит бурное соединение ядер атомов водорода в ядра атомов гелия.

После «выгорания» большей части водорода под действием гравитационных сил газ начинает снова сжиматься, что приводит к еще большему давлению и подъему температуры в центре звезды, достаточных для того, чтобы ядра атомов гелия начали сливаться в более тяжелые ядра атомов углерода, кислорода, неона.

При дальнейшем сжатии звезды и повышении давления и температуры начинают образовываться еще более тяжелые ядра вплоть до кальция.

При температуре около 4 млрд. градусов образуются ядра элементов с атомными массами от 50 до 60 (хром, железо и др.).

По расчетам ученых, наше Солнце находится в самой первой стадии звездной эволюции, при которой четыре протона (ядра атомов водорода) соединяются в ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, с испусканием двух позитронов и двух нейтрино. При этом выделяется 24,7 млн. эв энергии в виде электромагнитного излучения, которая и поддерживает светимость Солнца. Это так называемый протон-протонный цикл. Ученые полагают, что солнечная энергия может выделяться в ходе двух различных повторяющихся циклов (цепочек) термоядерных реакций — водородного и углеродного циклов. В ходе последнего также происходит превращение четырех протонов в ядро атома гелия, но в качестве ускорителя процесса участвует еще и углерод.

ЭРСТЕД. Принято считать, что в пространстве, где проявляются физические свойства магнитных сил, в отличие от той части пространства, где эти силы ничем себя не проявляют, присутствует магнитное поле. Такое поле в каждой точке пространства характеризуется особой величиной, назы-

ваемой напряженностью магнитного поля. За единицу напряженности принимается единица, названная эрстед, в честь датского физика Ганса Христиана Эрстеда, открывшего 15 февраля 1820 г. магнитное действие электрического тока.

Создаваемые в настоящее время искусственные электромагниты, использующие свойства сверхпроводимости (см. *Сверхпроводимость*), позволяют получать магнитные поля колоссальной напряженности — сотни тысяч и даже миллионы эрстед (напряженность магнитного поля Земли меньше одного эрстеда), которые широко применяются для исследования самых разнообразных магнитных явлений: получения сверхнизких температур, анализа атомных частиц по их массе в масс-спектрометрах, в камерах Вильсона, пузырьковых и других ионизационных камерах. при исследованиях элементарных частиц в ускорителях всех видов и множестве других физических и технических приборов.

Я

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ
ЯДРО АТОМА
ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Я

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ — более правильное и точное научное название энергии, выделяющейся при реакциях деления ядер атомов тяжелых элементов (урана, плутония) или слияния ядер атомов самых легких элементов (водорода) в ядра атомов более тяжелых элементов (гелия), чем получившее большее распространение название «атомная энергия».

ЯДРО АТОМА — внутренняя часть атома, в которой сосредоточена почти вся его масса. Состоит из нуклонов — протонов и нейтронов (за исключением ядра атома водорода, состоящего всего лишь из единственного протона). Полное число протонов и нейтронов в ядре определяет атомный вес элемента,

число протонов — его атомный номер в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Каждое ядро атома характеризуется определенной энергией связи, удерживающей частицы, из которых оно сложено, все вместе.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ — самопроизвольные или искусственные преобразования одних ядер атомов в другие, связанные с перестройкой структуры ядер или изменением количества нуклонов в них. Ядерные реакции могут сопровождаться: полным распадом всего ядра атома при попадании в него частицы, обладающей огромной энергией (скоростью); поглощением другой частицы, обычно нейтрона; делением ядра на две неравномерные части; испусканием протонов, нейтронов, альфа-частиц и гамма-квантов (см. *Цепная реакция*). К ядерным реакциям относится и реакция синтеза — образование ядер атомов более тяжелых элементов (например, гелия) в процессе слияния ядер более легких элементов (ядер водорода), сопровождающаяся выделением энергии на 1 кг реагирующего вещества, в семь раз большей, чем при реакции деления ядер атомов тяжелых элементов (см. *Термоядерная реакция*).

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. По законам физики электрические силы, притягивающие отрицательно заряженные электроны к положительно заряженному ядру атома, должны были бы заставлять собранные в ядре положительно заряженные частицы — протоны — разлетаться в стороны друг от друга.

Однако вопреки этим законам протоны, находясь в пределах ядра атома, вместо того чтобы разлетаться, почему-то удерживаются все вместе и зачастую столь сильно, что нужно приложить огромную энергию, для того чтобы их разъединить или выбить из ядра хотя бы один протон.

Что же это за таинственные, никому до сих пор неведомые силы?

Эти силы не могут быть электрическими, так как даже если бы у половины протонов в ядре атома положительные заряды вдруг поменялись на отрицательные, то и в этом случае они стали бы притягиваться друг к другу с силами, лишь раз в сорок слабее тех сил, которые фактически удерживают одинаково заряженные протоны в ядре атома. Следовательно, силы эти не электрические. Может быть, силы тяготения? Но они оказываются еще менее приемлемыми, так как силы тяготения, существующие между двумя частицами в ядре атома, вследствие их малости в 10^{37} раз слабее сил, удерживающих частицы на самом деле.

Современная физическая теория считает, что взаимодействие между электрически заряженными телами и частицами осуществляется испускаемыми и поглощаемыми ими фотонами, что и создает силы электрического притяжения или отталкивания.

Значительно труднее представить себе явно необычные силы, действующие на элементарные частицы, из которых сложено ядро атома. Взаимодействие двух ядерных частиц, как показали многочисленные опыты, зависит не только от расстояния между ними, но и от скорости движения этих частиц относительно друг друга, равно как и от направления вращения каждой из этих частиц. Больше того, имеются силы, действующие между тремя, четырьмя и большим количеством частиц одновременно.

Следует особо подчеркнуть, что эти силы совершенно не зависят от электрических зарядов частиц. Протон и протон, нейтрон и нейтрон, протон и нейтрон — все они удерживаются друг возле друга

примерно с одинаковой силой. Самое же замечательное то, что эти силы действуют в очень ограниченных пределах. На расстоянии, равном, например, 10^{-13} см (одна стотысячная радиуса всего атома), два протона под действием ядерных сил в сорок раз сильнее притягиваются, чем отталкиваются под действием электрических сил. Если же это расстояние увеличится всего лишь в четыре раза, ядерные силы притяжения становятся уже равными электрическим силам отталкивания. Увеличение этого расстояния в 25 раз приведет к тому, что электрические силы отталкивания превьсят ядерные силы притяжения уже в ... миллион раз!

С другой стороны, на расстояниях значительно меньше $0,5 \cdot 10^{-13}$ см притягивающее действие ядерных сил резко обрывается, и начинают действовать более мощные отталкивающие силы.

Так же как и в случае с электрическими силами, взаимодействие между ядерными частицами носит характер некоего обмена какими-то другими частицами, чем-то похожими на фотоны. Такую мысль впервые высказал советский физик академик И. Е. Тамм.

В 1935 г. японский физик Х. Юкава на основе накопившегося теоретического и опытного материала высказал идею, что роль кванта, связывающего вместе ядерные частицы, выполняет новая материальная частица, названная им мезоном. Он предсказал и свойства этих частиц, которыми должны обмениваться протон и нейтрон, чтобы привести к появлению огромных сил, действующих на чрезвычайно коротких расстояниях и только в пределах ядра атома. Эти обменные частицы, чтобы выполнить свое пазначение, должны сами сильно взаимодействовать с протонами и нейтронами независимо от их зарядов.

Согласно общим принципам квантовой механики, силы, действующие на далеких расстояниях, подобные электромагнитным, могут передаваться только частицами, не имеющими массы покоя, т. е. которые могут существовать, только двигаясь со скоростью света. Такими частицами, как сказано выше, являются фотоны.

Силы же, действующие на чрезвычайно коротких расстояниях, согласно тем же законам квантовой механики, должны передаваться частицами, имеющими массу даже в состоянии покоя. Эта масса должна быть тем больше, чем короче радиус действия данных сил.

Для сил с радиусом действия около 10^{-13} см масса таких частиц должна быть примерно в двести раз больше массы электрона.

Для того чтобы эти частицы могли осуществлять такие обменные функции между различными нуклонами ядра атома, они должны быть электрически заряженными. Когда взаимодействуют между собой протон и нейтрон, то протон излучает положительно заряженный мезон, который и поглощается нейтроном. В этом процессе протон теряет свой положительный заряд и становится нейтроном, в то время как нейтрон приобретает положительный заряд и превращается в протон. Такой же результат, естественно, получается, если нейтрон излучает отрицательный мезон, который поглощается протоном.

Предположение о существовании положительного и отрицательного мезонов было высказано Юкавой в соответствии с общими принципами современной физики, состоящими в том, что для любой элементарной заряженной частицы в природе должна существовать и противоположная ей по заряду другая частица.

Первые такие частицы, получившие название мю-мезонов, были обнаружены в космическом излучении. Их масса равна 207 массам электрона. Однако вскоре выяснилось, что эти частицы не то, что ожидали. Они слабо взаимодействовали с протонами и нейтронами, в силу чего не могли служить переносчиками внутренних сил. Кроме того, они оказались крайне неустойчивыми. Среднее время их жизни равняется всего $2,2 \cdot 10^{-6}$ сек. При распаде такого мезона возникает электрон или позитрон в зависимости от заряда самого мезона. Подсчеты энергии, выделяющейся при таком распаде, и баланса масс показали, что при этом должны возникать по крайней мере еще две частицы, не имеющие заряда, с массой, равной нулю или близкой к нему, т. е. не имеющие массы покоя. Эти частицы оказались нейтрино. После нескольких лет основательной путаницы и недоразумений только в 1948 г. Пауэллом, Оккиалини и Латтесом (англичанин, итальянец и бразилец) были открыты мезоны, действительно ответственные за существование обменных сил между ядерными частицами. Их назвали пи-мезонами. Масса пи-мезонов оказалась в 273 раза больше массы электрона.

Условия образования, существования и последующие превращения пи-мезона имеют очень сложный характер. Обнаруженный впервые в космическом излучении пи-мезон в результате торможения в веществе распадается на две частицы — описанный выше мю-мезон и нейтрино.

Дальше мю-мезон замедляется, а затем тоже распадается, образуя электрон и два нейтрино. Сталкиваясь с ядром атома, быстрый пи-мезон способен его разрушить. В отличие от мю-мезонов тяжелые пи-мезоны сильно взаимодействуют с частицами, составляющими ядра атомов, — нуклонами. Именно

они и оказались предсказанными еще в 1935 г. квантами электромагнитного поля. Однако, для того чтобы все сходилось точно, необходимо было существование еще и незаряженного, нейтрального пи-мезона, ответственного за взаимодействие между протоном и протоном, а также между нейтроном и нейтроном, т. е. в тех случаях, когда ни один из нуклонов не превращается в другой. Протон, естественно, не может приобрести второго положительного заряда. Следовательно, любой заряженный мезон не в состоянии осуществлять взаимодействие между протонами.

Вскоре в космическом излучении были обнаружены и эти недостающие нейтральные мезоны, масса которых превышает массу электрона в 264 раза, но которые не имеют никакого электрического заряда.

Существование нейтрального пи-мезона, в частности, объясняет независимость действия внутриядерных сил от зарядов частиц, входящих в ядро атома. Эти мезоны тоже живут очень недолго и распадаются на два фотона.

Следовательно, в образовании и существовании внутриядерных сил «повинны» три вида частиц, излучаемых и поглощаемых нуклонами ядра атома: положительные, отрицательные и нейтральные тяжелые пи-мезоны.

ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР — установка, в которой осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер атомов тяжелых элементов. Ядерные реакторы используют для выработки электрической энергии, получения мощных пучков нейтронов, применяемых при различных научных исследованиях, изготовления искусственных радиоактивных изотопов с разной интенсивностью излучения и сроками жизни, для облучения различных веществ с целью изменить их физические и химические свойства, а также для превращения неделящихся изотопов урана-238 и тория-232 в ядерное го-

рючее — плутоний-239 и уран-233 (см. *Атомный (ядерный) реактор, Реакторы*).

ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО — вещества, ядра которых делятся под действием медленных нейтронов: природный изотоп уран-235, искусственный изотоп уран-233 и искусственный элемент плутоний-239. Ядерное топливо служит для получения энергии, обычно тепла, в ядерном реакторе.

К ядерному топливу будущего могут быть отнесены водород и литий.

ЯДЕРНАЯ ТЕХНИКА — отрасль современной техники с применением ядерной энергии. Используется для нужд народного хозяйства страны и ее обороны.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА — раздел современной физики, посвященный изучению атомных ядер, ядерных процессов и элементарных частиц, участвующих в ядерных процессах и реакциях. Ядерная физика является научной и экспериментальной основой ядерной техники и атомной промышленности.

На базе ядерной физики возникли новые отрасли науки: радиохимия, радиационная химия, новые методы определения «возраста» ископаемых в геологии и археологии и многие другие.

ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ — современные виды оружия, действие которого основано на использовании огромной энергии, главным образом взрывной, высвобождающейся при ядерных реакциях при делении ядер атомов тяжелых элементов и синтезе ядер атомов самых легких элементов (водорода) в ядра атомов более тяжелых элементов (гелий). К ядерному оружию относятся и так называемые боевые радиоактивные вещества — обычно радиоактивные продукты деления ядер тяжелых элементов.

Итак, мы добрались до конца буквы Я и до конца этой книги. Собственно говоря, большую часть того, что мы намеревались рассказать и объяснить в ней, можно было бы уместить в этой очень емкой для затронутых нами вещей букве Я: «ядро атома», «ядерная энергия», «ядерная физика», «ядерный реактор», «ядерная техника» и т. д. Поэтому по изложенным в начале книги соображениям, а также потому, что русский алфавит, как и многие другие языки мира, начинается с буквы А, а не Я, нам

пришлось львиную долю материала, начинающегося со слова «ядро», начать со слова «атом». Это позволило все остальное уже более равномерно распределить по другим буквам алфавита.

* *
*

Возвращаясь к тому, что писалось в начале этой маленькой энциклопедии, с душевным трепетом обращается к читателю автор: удалось ли ему возбудить интерес и любопытство к одной из самых захватывающих областей современной науки — атомной физике и энергетике? Не возникла ли у читателя потребность, а возможно, и необходимость обратиться к какой-либо обстоятельной научно-популярной книге по атомной физике, чтобы пополнить свои знания?

Если такая необходимость назрела, что, безусловно, порадует и автора, и издателей, мы предлагаем небольшой список научно-популярных книг, предназначенных для читателей с различной подготовкой.

ДЛЯ НАЧАЛЬНОГО ОЗНАКОМЛЕНИЯ

- Адлер И. Внутри ядра. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1968.
Арташкин В. Н., Ушаков Б. А. Необыкновенные превращения атомной энергии. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1966.
Бобров Л. В. Тени невидимого света. М., Атомиздат, 1964.
Васильев М. В., Станюкович К. П. Сила, что движет мирами. М., Атомиздат, 1969.
Гарднер М. Теория относительности для миллионов. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1967.
Корякин Ю. И. Биография атома. М., Госатомиздат, 1961.
Коттон Э. Семья Кюри и радиоактивность. Пер. с франц. М., Атомиздат, 1964.

ДЛЯ БОЛЕЕ ПОДГОТОВЛЕННОГО ЧИТАТЕЛЯ

- Асташенков П. Т. Атомная промышленность. М., Госатомиздат, 1962.
Гладков К. А. Энергия атома. М., Детгиз, 1968.
Кнорре Е. С. Путешествие в мир трансуранов. М., Атомиздат, 1971.
Прощенко А. Н. Покорение атома. М., Атомиздат, 1967.
Юв Д. История нейтрона. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.

ДЛЯ ПОДГОТОВЛЕННОГО ЧИТАТЕЛЯ

- Гродзенский Д. Э. Радиобиология. Изд. 3-е. М., Атомиздат, 1966.
В глубь атома. Сборник. М., Из-во АН СССР, 1965.
Волчек О. Изотопы на службе человека. М., Физматгиз, 1958.
Зелиг К. Альберт Эйнштейн. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1966.
Калинин В. Ф. Термоядерный реактор будущего. М., Атомиздат, 1966.

- Мухин К. Н.** Занимательная ядерная физика. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1972.
- Мякишев Г. Я.** Элементарные частицы М., «Просвещение», 1968.
- Франк-Каменецкий Д. А.** Плазма — четвертое состояние вещества. Изд. 3-е. М., Атомиздат, 1968.
- Сенченков А. П.** Атомные ракеты и проблемы освоения космоса. М., Атомиздат, 1964.
- Сиборг Г.** Искусственные трансурановые элементы. Пер. с англ. Под ред. А. К. Лаврухиной. М., Атомиздат, 1965.
- Трифонов Д. Н.** Границы и эволюция периодической системы. М., Госатомиздат, 1963.
- Трифонов Д. Н.** Радиоактивность вчера, сегодня, завтра. М., Атомиздат, 1966.
- Щелкин К. И.** Физика микромира. Изд. 3-е. М., Атомиздат, 1968.

Кирилл
Александрович
ГЛАДКОВ

Атом от А до Я

Редактор
Г. В. Чернышова

Художник
Ю. Л. Макеев

Худ. редактор
А. Т. Кирьянов

Техн. редакторы
Е. И. Мазель
И. Н. Подшебякин

Корректор Л. В. Галкина

Сдано в набор 30/V 1973 г.
Подписано в печать 18/X 1973 г.
Т-14829. Формат 70×100/32.
Бумага типографская № 2.
Усл.-печ. л. 10,96. Уч.-изд. л.
13,46. Тираж 240 000 экз. Зак.
изд. 69323. Зак. тип. 443. Цена
44 коп. Атомиздат, 103031 Мос-
ква, К-31, ул. Жданова, 5/7.

Ярославский полиграфком-
бинат «Союзполиграфпрома»
при Государственном коми-
тете Совета Министров СССР
по делам издательств, поли-
графии и книжной торговли.
Ярославль, ул. Свободы, 97.