

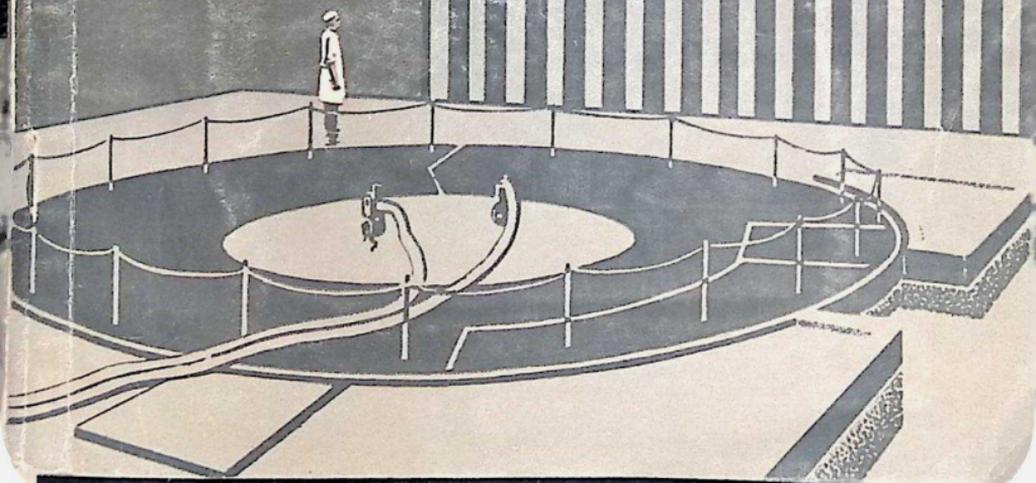
Библиотечка
В ПОМОЩЬ ЛЕКТОРУ

№ 12

Д. ЧЕРНАВСКИЙ, В. ШАБАНСКИЙ

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

сп/1471/5.



В ПОМОЩЬ ЛЕКТОРУ

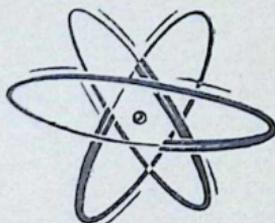
530.14:

4-49

62

Д. ЧЕРНАВСКИЙ, В. ШАБАНСКИЙ

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ



Государственное издательство
культурно-просветительной литературы
Москва—1956

5/12410/8

К.

ВВЕДЕНИЕ

Менее 15 лет прошло с тех пор, как был создан первый атомный котел, но сейчас невозможно представить себе ни одной области науки или техники, на которую прямо или косвенно развитие ядерной физики не наложило бы свой отпечаток. Таких темпов освоения и развития не знало еще ни одно научное изобретение.

Высокие темпы освоения атомной энергии достигнуты в Советском Союзе. Как показала Женевская конференция 1955 года по мирному использованию атомной энергии, за 10 лет советские ученые сумели догнать (а в некоторых отношениях и перегнать) ученых западных стран.

Согласно новому пятилетнему плану, уже в 1956—1960 годах в СССР будут построены атомные электростанции общей мощностью в 2,5 миллиона квт; это более чем в пять раз превышает мощность Днепрогэса. Предполагается и широкое использование атомной энергии на транспорте. В частности, будет построен специальный ледокол, работающий на атомной энергии.

В дальнейшем роль атомной энергии в жизни человека еще более возрастет. Можно думать, что со временем атомная энергия полностью вытеснит такие горючие ископаемые, как уголь и нефть, станет одним из основных источников энергии на земле.

Большую роль в деле освоения атомной энергии сыграли кропотливые научные изыскания, проведенные в последние 40—50 лет. Многие исследования, которые еще совсем недавно казались абстрактными и далекими от жизни, неожиданно приобрели большую актуальность. Поэтому и сейчас наряду с промышленным внедрением атомной энергетики широким фронтом ведутся научные исследования в области ядерной физики и элементарных частиц.

Природа не сразу раскрывает свои тайны человеческому разуму. Современные средства исследования мира ядер — мощные ускорители элементарных частиц — это сложнейшие и дорогостоящие машины, создание которых требует не только коллективных усилий ученых и инженеров, но и становится возможным лишь на основе широко развитой промышленности и высокого уровня техники.

Круг вопросов, с которыми связана атомная энергия, в настоящее время настолько широк, а области применения атомной энергии настолько разнообразны, что в одной книжке эти вопросы могут быть изложены лишь вкратце.

Предлагаемая книга может служить пособием для лекторов. Однако в процессе написания авторы старались изложить материал по-возможности популярно, чтобы сделать брошюру доступной и менее сведущему читателю. С этой целью более трудные для понимания или носящие иллюстративный характер моменты даются мелким шрифтом с таким расчетом, чтобы их можно было при желании опустить при первом чтении: дальнейшему освоению материала это не мешает.

На тему об атомной энергии написано уже немало популярных брошюр (многие из них перечислены в конце книги). Настоящая брошюра несколько отличается по своему характеру от предыдущих. В ней широко использовались материалы Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. Кроме того, подробно освещен ряд вопросов, которые обычно в популярной литературе опускаются.

Так, например, в работу включен большой раздел об ускорителях (обычно этот вопрос затрагивают лишь вскользь). Довольно подробно изложены методы регистрации заряженных частиц. Включен раздел «Природа ядерных сил», в котором в популярной форме излагается мезонная теория ядерных сил. Вопрос о природе ядерных сил стоит в современной науке несколько особняком. Наука нашла способы использовать ядерные силы, но так и не выяснила окончательно их природу. Однако сейчас этот пробел в наших знаниях становится все ощутимее, и значение теории ядерных сил все возрастает. Раздел, посвященный этой проблеме в настоящей брошюре, имеет целью познакомить читателя с современным состоянием вопроса.

Гораздо подробнее, чем в других брошюрах, разобрана «лучевая болезнь» и меры борьбы с ней. Этот раздел тоже обычно обходится стороной, несмотря на его большую значимость. Дается по возможности детальное представление о термоядерных реакциях.

При изложении материала авторы стремились не только наглядно описать то или иное явление, но и дать в некоторых случаях количественные оценки. Это придает большую убедительность сообщаемым фактам.

Брошюра, как мы надеемся, сможет быть полезной как для сведущего, так и для совершенно не подготовленного читателя.

ГЛАВА I

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Окружающие нас тела состоят из мельчайших частиц — атомов. Отдельные атомы, группируясь определенным образом, соединяются в молекулы. Все многообразие встречающихся в природе веществ и их свойств объясняется различным строением молекул. Сложные вещества, молекулы которых состоят из разнородных атомов, химическим путем могут быть разложены на простые, молекулы которых состоят из однородных атомов. Таких простых веществ — элементов — ограниченное количество. В настоящее время их насчитывается 101 (включая элементы, полученные искусственным путем в лаборатории). Например, вода есть сложное вещество, которое разлагается на элементы — кислород и водород — газы со свойствами, совершенно отличными от воды. Молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Молекулы и атомы по своим размерам настолько малы, что их нельзя увидеть ни в какой микроскоп. Так, диаметр атома водорода составляет около 10^{-8} см. Число атомов в 1 куб. см вещества очень велико. Например, для металлов оно доходит до громадного значения 10^{22} . Легко представить себе, насколько это большая величина: такого количества зерен проса хватило бы, чтобы покрыть всю поверхность земного шара слоем толщиной около 1 м.

Вес атомов в граммах ничтожен. Атом водорода, например, весит $1,66 \cdot 10^{-24}$ грамма.

Атомы различных элементов отличаются друг от друга как по величине, так и по весу. Принято пользоваться относительным атомным весом, то есть числом, показывающим, во сколько раз атом данного элемента тяжелее самого легкого атома — водорода (говоря более точно, за единицу атомного веса принимается $1/16$ веса одного атома кислорода, который приблизительно в 16 раз тяжелее атома водорода).

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН МЕНДЕЛЕЕВА

Еще до того как стало известно строение атома, был открыт периодический закон изменения свойств атомов различных элементов ростом атомного веса. Этот закон был сформулирован великим рус-

ским ученым Д. И. Менделеевым в 1869 году. Его открытие сыграло огромную роль в науке о строении вещества и в овладении атомной энергией.

Д. И. Менделеев расположил все известные элементы в таблицу в порядке возрастания атомного веса. Каждый элемент вписан в клеточку с определенным порядковым номером. На первом месте, например, стоит водород (H) с атомным весом 1,008, на втором — гелий (He) с атомным весом 4,003 и т. д.

Удалось разделить все элементы на ряд периодов и расположить их один под другим. Оказалось, что изменения химических свойств в каждом периоде повторяются, а элементы, расположенные один под другим, обладают сходными химическими свойствами. Они образуют группу элементов. Всего имеется 9 групп. Первая группа объединяет наиболее типичные металлы. С ростом номера группы элементы постепенно теряют металлические свойства, переходя в ярко выраженные металлоиды (седьмая группа)¹. В девятой, или, как ее иногда называют, нулевой, группе расположены инертные газы, обладающие свойством инерции, то есть не вступающие ни в какие химические соединения.

Во время открытия периодического закона было известно несколько более 60 элементов. Д. И. Менделеев, с гениальной прозорливостью определив места еще не открытых элементов в периодической таблице, оставил некоторые клеточки пустыми, описав свойства этих элементов и определив их атомные веса. Так было с элементом галием, открытым в 1875 году, то есть 6 лет спустя после предсказания Менделеева, элементом скандием, открытым еще через 5 лет, и элементом германием, открытым в 1886 году.

Дальнейшее изучение свойств атома блестяще подтвердило систему Менделеева и вскрыло глубокий смысл порядкового номера элементов в системе. Менделеев задолго предугадал одно из основных, определяющих данных каждого элемента — атомное число.

Периодическую таблицу см. на вкладке.

СТРОЕНИЕ АТОМА

Согласно современным представлениям атом имеет сложное строение, напоминающее строение солнечной системы. В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются с громадной скоростью отрицательно заряженные частицы — электроны, образующие так называемую электронную оболочку атома.

Диаметр ядра (порядка 10^{-13} см) в десятки тысяч раз меньше диаметра атома, то есть удвоенного среднего расстояния от ядра до электронной оболочки. Если мысленно атом увеличить до размеров

¹ Металлоиды — элементы, не обладающие характерными признаками металлов.

нового здания Московского университета, то ядро представится в виде шарика размером с вишню.

Электроны удерживаются около ядра электрическими силами притяжения, существующими между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженным ядром, подобно тому как удерживаются около солнца планеты благодаря силам тяготения, существующим между телами. Заряд ядра в обычных условиях всегда равен заряду окружающих ядро электронов. Таким образом, атом электрически нейтрален.

Масса электрона приблизительно в 1840 раз меньше массы самого легкого ядра — ядра атома водорода. Поэтому практически вся масса атома сосредоточена в его ядре, окруженном значительно менее плотным электронным облаком.

Оболочка простейшего атома — атома водорода — состоит всего из одного электрона. Атом гелия имеет 2 электрона, лития — 3 и т. д. Атом урана имеет в своей оболочке 92 электрона. Число электронов в атоме каждого элемента всегда совпадает с порядковым номером (атомным числом) этого элемента. Так как электрон имеет вполне определенный заряд, а заряд ядра равен заряду электронов, то атомное число указывает на заряд ядра¹. Чем больше вес ядра (атомный вес элемента), тем больше и заряд ядра. Правда, в некоторых случаях эта зависимость может нарушаться. Так, вес ядра кобальта больше, чем никеля, в то время как заряд ядра кобальта (27) меньше, чем заряд ядра никеля (28).

При химических реакциях атомы соприкасаются друг с другом лишь своими электронными оболочками. Поэтому ясно, что химические свойства данного элемента определяются строением электронных оболочек и в первую очередь числом электронов во внешнем слое этой оболочки. Это число изменяется с изменением заряда ядра, чем и объясняется связь химических свойств с зарядом ядра (порядковым номером). Таким образом, главный отличительный признак атомов — это заряд их ядер.

Во время открытия периодического закона главным отличительным признаком атомов всех элементов был атомный вес, потому что о заряде ядра еще ничего не знали. Именно поэтому Менделеев располагал элементы в порядке возрастания их атомных весов. Однако он не придавал этому признаку решающего значения, а учитывал всю совокупность физико-химических свойств этих элементов. Основываясь на этом, он поместил кобальт на 27-е место, а никель — на 28-е, несмотря на то, что атомный вес кобальта больше, чем никеля. То же самое произошло с теллуром и иодом (атомные номера 52 и 53). Такое расположение находится в полном соответствии с современными представлениями об определяющей роли заряда ядра в химических свойствах элементов.

¹ Наименьший в природе заряд электрона получил название элементарного заряда. Он равен $4,8 \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц. В атомной физике принято любые электрические заряды измерять в элементарных зарядах. Другими словами, заряд электрона в атомной физике принят за единицу.

Современное представление о строении ядра позволило ответить и на другой вопрос: почему с ростом порядкового номера элемента периодически повторяются химические свойства элементов? Дело в том, что электроны располагаются вокруг ядра несколькими слоями и в каждом из них может находиться лишь ограниченное число электронов. Так, например, в первом слое может находиться не больше 2 электронов, во втором — не больше 8 и т. д. По мере роста порядкового номера происходит заполнение этих слоев, или оболочек, электронами. Электроны, содержащиеся во внешней оболочке, наименее прочно связаны с ядром. Именно они определяют химические свойства элементов. А так как с ростом порядкового номера число электронов во внешней оболочке периодически повторяется, повторяются и химические свойства элементов¹.

ГЛАВА II

АТОМНОЕ ЯДРО

Правильное представление о строении ядра сложилось не сразу. Из того факта, что заряд ядер есть целое кратное заряду ядра атома водорода², естественно было предположить, что в состав ядер различных элементов входит ядро водорода. Это предположение было подтверждено результатами бомбардировки ядер атомов различных элементов так называемыми альфа-частицами. Ядра этих элементов разрушались, высвобождая ядра водорода. Впоследствии было показано, что ядро атома водорода, так же как и электрон, — простейшая частица, то есть оно не состоит из каких-либо более мелких частиц. Ядро атома водорода получило название протона.

Так как в 30-х годах нашего века не были известны какие-либо другие элементарные частицы, помимо протона и электрона, то предполагали, что ядра различных элементов состоят из протонов и электронов. В этом случае атомный вес элемента определялся числом протонов, входящих в состав ядра, а заряд — суммарным зарядом положительных протонов и отрицательных электронов, нейтрализующих часть положительного заряда протонов. Предположение, что электроны наряду с протонами входят в состав ядра, делало понятным тот факт, что заряд ядер всех элементов (за исключением водорода) меньше, чем атомный вес.

Эта точка зрения подтверждалась главным образом тем, что при распаде некоторых ядер из них вылетают электроны, и была одно

¹ Иногда с ростом заряда ядра (а следовательно, и числа электронов в оболочке) происходит заполнение не внешней, а внутренних электронных оболочек. Так как такие элементы обладают одним и тем же числом электронов во внешней оболочке, то их химические свойства очень сходны. Известны два ряда таких элементов — ряд лантанидов (порядковые номера 58—71) и актинидов (порядковые номера 90—101).

² Заряд ядра водорода положителен и численно равен заряду электрона, принятому за единицу.

время общепризнанной. Однако в дальнейшем были проделаны эксперименты, которые резко противоречили электронно-протонной модели ядра и не могли быть ею объяснены.

Решение вопроса о строении ядра, снявшее существовавшие противоречия, было найдено лишь после открытия Чадвиком в 1932 году новой элементарной частицы — нейтрона. Вес и размеры нейтрона почти равны весу и размерам протона. Но в отличие от протона нейтрон — незаряженная, нейтральная частица. Вскоре после открытия нейтрона было установлено, что ядра атомов различных элементов состоят из протонов и нейтронов. Такая модель ядра подтверждалась многочисленными экспериментальными данными.

Простейшее ядро — ядро атома водорода — состоит всего из 1 протона. Ядро атома гелия состоит из 2 протонов и 2 нейтронов. Более сложные ядра состоят из большего числа протонов и большего числа нейтронов. Так, например, ядро атома урана включает всего 238 тяжелых частиц (нуклонов)¹, среди которых 92 протона и 146 нейтронов. Из таблицы Менделеева сразу можно определить, сколько протонов и нейтронов входит в ядро данного элемента. Округляя атомный вес до целого числа A (так называемое массовое число), мы узнаем количество нуклонов в ядре². Количество нейтронов легко определить, вычитая из массового числа число протонов (число протонов соответствует атомному номеру Z).

При написании химического символа какого-либо элемента часто указывают на эти два числа. Так, например, углерод обозначается следующим образом: ${}^6_{12}\text{C}$, где массовое число (или общее число нуклонов) $A=12$, а атомный номер (заряд ядра, или число протонов) $Z=6$. Следовательно, число нейтронов $N=A-Z=6$.

ИЗОТОПЫ

Существуют вещества, которые в химическом отношении ведут себя совершенно одинаково, однако их атомные веса различны. Такие элементы с различными атомными весами получили название изотопов. Изотопы одного элемента помещаются в одной и той же клеточке периодической таблицы Менделеева («изос» — по-гречески «равный», «топос» — «место»). Зная строение ядра, легко понять, чем отличаются ядра различных изотопов одного и того же элемента. Число протонов у них должно быть одинаковым (так как оно определяет число электронов во внешнем слое электронной оболочки и тем самым химические свойства данного вещества), а число

¹ Протоны и нейтроны в совокупности принято называть одним словом — нуклоны.

² Тот факт, что атомный вес, приведенный в таблице Менделеева, в отличие от заряда не принимает целочисленных значений для различных элементов, за исключением кислорода, масса ядра которого условно была принята за 16 массовых единиц, будет разъяснен ниже, при знакомстве с изотопами и, далее, — с энергией связи в ядре.

нейтронов — различное, в соответствии с атомным весом этих изотопов.

Изотопы найдены у большинства химических элементов. Так, например, кальций имеет 6 изотопов, сера — 4, олово — 10, кадмий — 8 и т. д.

Химические элементы, встречающиеся в природе, представляют собой на самом деле смеси различных изотопов этого элемента. Процентное содержание каждого изотопа в различных химических соединениях какого-либо элемента приблизительно одинаково. Поэтому атомные веса элементов, которые по сути дела есть средние из атомных весов изотопов этих элементов, не зависят от того, из каких химических соединений эти элементы выделены. Например, газ неон состоит из смеси двух изотопов с атомными весами 20 и 22 (${}_{10}\text{Ne}^{20}$, ${}_{10}\text{Ne}^{22}$) в такой пропорции, что средний атомный вес неона равен 20,2. Эта же цифра приведена в таблице Менделеева. Уже первые определения истинных атомных весов отдельных изотопов, произведенные ученым Астоном с точностью до 0,001, показали, что эти атомные веса выражаются почти целыми числами¹ по отношению к массе атома кислорода, принятой за 16. Химический же атомный вес, будучи средним весом различных изотопов, как видно из таблицы Менделеева, для некоторых элементов может значительно отличаться от целого числа.

Наряду с изотопами, встречающимися в природе в естественных условиях, — устойчивыми изотопами, могут быть получены искусственным путем изотопы неустойчивые, которые с течением времени распадаются, превращаясь в устойчивые изотопы. Таким образом, в последние годы были получены изотопы почти всех элементов.

Самый легкий элемент — водород — имеет два устойчивых изотопа: ${}^1\text{H}$ — «обыкновенный» водород, ядро которого состоит из 1 протона, и ${}^2\text{H}$, или ${}^2\text{D}$ — тяжелый водород, или дейтерий, ядро которого (дейтерон) состоит из 1 протона и 1 нейтрона. В обычном водороде, встречающемся в природе, процентное содержание тяжелого водорода составляет менее 0,02 процента. Тяжелый водород, так же как и легкий, может соединяться с кислородом, образуя так называемую тяжелую воду. Тяжелая вода содержится в обычной воде приблизительно в таком же процентном отношении, как и тяжелый водород в легком.

Тяжелый водород — это единственный встречающийся в природе изотоп, атомный вес которого на 100 процентов отличается от веса основного изотопа. Поэтому обе разновидности водорода и их соединения ведут себя в различных химических и физических процессах явно не одинаковым образом. Так, например, точка замерзания тяжелой воды не 0° , как у обычной, а $3,8^\circ$; точка кипения не 100° , а $101,4^\circ$. В тяжелой воде не могут жить растения и животные организмы.

Искусственным путем был получен еще один изотоп водорода — тритий (${}^3\text{H}$), который в природе почти не встречается. Ядро трития

¹ Не в точности целыми из-за энергии связи (см. ниже).

состоит из 1 протона и 2 нейтронов. Оба эти изотопа водорода имеют большое значение в производстве термоядерной энергии и создании термоядерного оружия.

В настоящее время основным источником получения атомной энергии служит уран. Уран встречается в природе в виде смеси трех изотопов с атомными весами 238, 235, 234. Процентное содержание этих изотопов, соответственно, — 99,3 процента, 0,7 процента и 0,005 процента. Особое значение имеет уран-235, который является основным материалом для получения атомной энергии.

Так как изотопы одного и того же элемента не отличаются друг от друга в химическом отношении, они не могут быть разделены химическим путем. В основе методов разделения изотопов лежит разница в их атомных весах.

Для большинства изотопов элементов, за исключением водорода, разница в атомных весах очень мала. Так, например, для изотопов углерода ${}^6\text{C}^{12}$ и ${}^6\text{C}^{13}$ эта разница равна 8,35 процента, а для изотопов урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ и ${}_{92}\text{U}^{235}$ — всего 1,2 процента. Поэтому разделение изотопов связано с большими трудностями.

Электромгнитный метод разделения изотопов использует свойство заряженных частиц двигаться в магнитном поле по кривой траектории с радиусом кривизны тем меньшим, чем меньше масса частицы при прочих равных условиях. Таким путем не только разделяют частицы с разной массой, но и с большой точностью определяют их массу (в масспектрометрах) и процентное содержание в общей смеси. Для разделения таким способом изотопов положительные ионы (атомы, лишенные электрона) исследуемого элемента ускоряют в электрическом поле и направляют пучок этих ионов в камеру с магнитным полем. Однако таким методом можно собрать лишь ничтожное количество вещества — порядка тысячных долей микрограмма в час.

Для производства атомной энергии приходится либо полностью разделять изотопы урана, либо увеличивать процентное содержание ${}_{92}\text{U}^{235}$ (обогащать уран) в больших количествах. Один из наиболее распространенных методов разделения урана — метод газовой диффузии.

Известно, что средняя энергия хаотического движения частиц в смеси газов с различным атомным весом $mv^2/2$, где m — масса, а v — средняя скорость частицы, одинакова для всех частиц и определяется температурой смеси. Поэтому частицы с меньшей массой будут обладать большей средней скоростью. Если такую смесь пропускать через пористую перегородку, то благодаря тому, что легкие частицы быстрее проходят через поры, смесь обогатится легким изотопом. Но такое обогащение очень мало, и для полного разделения приходится много раз повторять эту операцию.

Установка, служащая для разделения изотопов урана, — большой завод с очень точным оборудованием. Газообразное соединение урана десятки тысяч раз пропускают через целую систему пористых перегородок. Производство таких перегородок требует большой точности и высокого уровня техники. Создание требуемого для работы пониженного давления во всей системе достигается применением громадного числа насосов.

Имеются и другие методы разделения изотопов. Упомянем метод центрифугирования, при котором более тяжелая компонента смеси, помещенной в быстро вращающийся цилиндрический сосуд, под действием силы инерции концентрируется у стенок сосуда, а более легкая — ближе к центру. Для разделения жидких соединений изотопов можно пользоваться тем их свойством, что более легкие атомы легче испаряются, обогащая таким образом жидкость тяжелой компонентой.

Для получения тяжелой воды, а следовательно, и тяжелого водорода пользуются электролизом (пропусканием тока через раствор воды, при котором вода разлагается на кислород и водород), в результате чего вода обогащается дейтерием, а освобожденный газообразный водород — легким водородом. Получение тяжелой воды связано с потреблением большого количества энергии, ввиду чего заводы для получения тяжелой воды располагаются в местах, где можно получить дешевую электроэнергию.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

При знакомстве с моделью ядра, состоящего из протонов и нейтронов, может возникнуть вопрос: какие силы заставляют нуклоны концентрироваться в такую компактную массу, как атомное ядро? Радиус ядра очень мал — около 10^{-13} см. Электрические силы отталкивания, существующие между одноименно заряженными протонами и увеличивающиеся с уменьшением расстояния между заряженными частицами, должны были неминусом привести к разлету ядра, ибо силы тяготения между частицами гораздо меньше электрических сил. Однако разлета ядер не происходит. Это значит, что нуклоны в ядре удерживаются какими-то неизвестными силами притяжения иной природы, отличной от природы сил тяготения и электрических сил. Свойства этих ядерных сил до настоящего времени изучены не во всех подробностях. С достоверностью можно утверждать следующее.

Во-первых, ядерные силы действуют одинаково как на протоны, так и на нейтроны. Во-вторых, эти силы велики лишь на очень малых расстояниях, порядка 10^{-13} см, резко ослабевая по сравнению с электрическими силами с увеличением расстояния, так что практически на расстояниях, больших, чем 10^{-12} см, они не действуют. Если, например, 2 протона в ядре гелия удалить друг от друга каким-либо образом на расстояние, большее, чем радиус действия ядерных сил, то протоны разлетятся благодаря электрическим силам отталкивания.

Ядерные силы исключительно велики. Если вообразить себе вещество, состоящее сплошь из нуклонов, то есть вещество, все частицы которого притягиваются друг к другу колоссальной величины ядерными силами, то нитка толщиной в человеческий волос из этого вещества смогла бы выдержать груз до сотен тысяч тонн.

Можно приблизительно оценить энергию ядерных сил (то есть

работу, которую могут совершить эти силы). На близких расстояниях энергия ядерных сил, уравнивающих электрические силы отталкивания 2 протонов, должна быть не меньше, чем электрическая энергия протонов, то есть работа, которую необходимо совершить над этими протонами при сближении их на такое расстояние. Электрическую энергию протонов легко подсчитать. Так как потенциальная энергия отталкивания двух зарядов e на расстоянии r равна $U = \frac{e^2}{r}$, то, учитывая, что заряд протона $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ абсолютным единицам, а расстояние между протонами $r_{\text{я}} \sim 10^{-12}$ см, получим, это электрическая энергия отталкивания протонов

$$U_{\text{я}} \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ эрг} \sim 10^6 \text{ эв} = 1 \text{ мэв прот.}$$

Энергия ядерных сил, как ясно из сказанного, должна быть не меньше, а больше этой величины. Для наглядности сравним энергию ядерных сил с энергией электрических атомных сил, удерживающих электроны на расстояниях $r_{\text{а}} \sim 10^{-8}$ см и проявляющихся при различных химических реакциях. Тогда получим

$$U_{\text{я}}/U_{\text{а}} \sim r_{\text{а}}/r_{\text{я}} \sim 10^5.$$

Таким образом, энергия ядерных сил, удерживающих нуклоны в компактной массе, в сотни тысяч и миллионы раз больше электрических сил, удерживающих электронную оболочку около ядра.

Поясним более подробно, что представляет собой единица энергии электронвольт (эв), широко используемая в ядерной физике. Это энергия, которую получает электрон, разгоняемый электрическим полем с разностью потенциалов в 1 вольт. Приняты также единицы 1 мэв = 10^6 эв (миллион электронвольт) и 1 бэв (миллиард электронвольт). Эти атомные единицы энергии очень малы по сравнению с привычными для нас единицами:

$$1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 4,5 \cdot 10^{-23} \text{ втч} = 3,8 \cdot 10^{-23} \text{ ккал.}$$

Такое соотношение между единицами получается потому, что в атомной физике приходится иметь дело с очень малым количеством вещества, с отдельными элементарными частицами или ядрами, обладающими ничтожной массой. Для того чтобы получить правильное представление о соотношении между величиной энергии, которой обладает какая-либо элементарная частица, и привычной для нас величиной энергии больших масс, следует отнести эти величины к соответствующим количествам вещества (их массам). Так, например, если сравнить энергию кинетического движения электрона с массой $m \sim 10^{-27}$ г, равную

$$\epsilon_m = \frac{mv^2}{2},$$

с энергией какого-либо тела с массой M , движущегося с такой же скоростью,

$$\epsilon_M = \frac{Mv^2}{2},$$

то получим, что

$$\epsilon_m = \frac{M}{m} \epsilon_m.$$

Если энергия электрона $\epsilon_m = 1$ мэв (что является вовсе небольшой энергией для современных ускорителей частиц, с которыми мы познакомимся в дальнейшем), то кинетическая энергия тела весом в 1 г, движущегося со скоростью электрона, будет

$$\epsilon_m = \frac{10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}{10^{-27}} = 1,6 \cdot 10^{21} \text{ эрг} = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ втч.}$$

Такую энергию электростанция типа Днепрогэс (мощностью 10^8 вт) вырабатывает в течение почти 20 суток.

Иногда с энергией сопоставляют определенную температуру. Молекулы газа при абсолютной температуре T обладают средней энергией хаотического движения U (кинетической энергией), равной $3/2 kT$, где k — постоянная Больцмана, равная

$$1,4 \cdot 10^{-16} \frac{\text{эрг.}}{\text{град.}}$$

Поэтому энергии в 1 эв соответствует температура

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 \text{ эв}}{k} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-16}} = 7733^\circ \text{ К (градусов Кельвина)} = \\ = 7480^\circ \text{ С (градусов Цельсия).}$$

Газ из частиц, хаотически движущихся с энергией 1 мэв, будет иметь температуру около 10^{10} градусов.

Свойство ядерных сил действовать лишь на малых расстояниях объясняет тот факт, что в природе встречается ограниченное количество различных элементов. С увеличением атомного веса, то есть числа нуклонов в ядре, увеличивается объем ядра. Следовательно, увеличивается расстояние между некоторыми протонами, а вместе с тем резко уменьшаются ядерные силы притяжения между ними, в то время как электрические силы отталкивания, спадающие сравнительно медленно с увеличением расстояния между заряженными частицами, уменьшаются на ничтожную величину. Такое ядро становится неустойчивым и может распасться из-за электрических сил отталкивания между протонами либо самопроизвольно, либо под действием внешнего возмущения.

В естественных условиях существуют ядра вплоть до $Z=92$ (уран). Теоретически было показано, что в принципе могут существовать неустойчивые ядра и с еще большим числом протонов. В последние годы были получены искусственным путем ядра с атомными номерами от $Z=93$ до $Z=101$ — так называемые трансурановые (заурановые) элементы. На Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии три последних элемента назвали именами великих ученых: фермий ($Z=99$), эйнштейний ($Z=100$) и менделевий ($Z=101$).

Для изучения свойств ядер необходимо уметь воздействовать на них. Химические способы для этой цели непригодны, ибо при химических реакциях, как мы уже отмечали, взаимодействуют лишь электронные оболочки отдельных атомов. Ядра же этих атомов находятся на очень больших расстояниях друг от друга по сравнению с радиусом действия ядерных сил. Поэтому ядра при химических реакциях не изменяются. Для того чтобы воздействовать на ядро, необходимо проникнуть внутрь ядра. Это могут осуществлять элементарные частицы, в частности протоны или нейтроны, либо ядра легких атомов — дейтероны (ядра атома тяжелого водорода), или альфа-частицы (ядра атома гелия).

Однако, для того чтобы подойти к ядру на расстояние действия ядерных сил, заряженные частицы сначала должны преодолеть электрические силы отталкивания. Поэтому энергия частиц, бомбардирующих ядро, также должна быть очень большой — порядка нескольких миллионов электронвольт. Если пытаться получить частицы с такой энергией разогреванием, то потребовалось бы нагревать материалы до колоссальных температур — около 10^{10} градусов С.

Однако «снаряды» для бомбардировки ядер с достаточной энергией существуют. Это, во-первых, частицы, вылетающие при естественном распаде неустойчивых тяжелых ядер, энергия которых может быть больше миллиона электронвольт¹, во-вторых, космические лучи, представляющие собой поток частиц с громадной энергией (доходящей до $10^{17} \div 10^{18}$ эв), падающий на землю из космического пространства.

Этот последний источник широко используется физиками для изучения ядерных превращений. Но интенсивность космического излучения сравнительно мала. Поэтому большое развитие получила идея искусственного ускорения частиц с помощью различных устройств. Силой, разгоняющей заряженные частицы, служит электрическое поле.

Первыми ускорителями для получения быстрых частиц явились высоковольтные установки, позволяющие создавать постоянную разность потенциалов до 1 миллиона вольт и выше. Среди них особое значение имеет электростатический генератор, изобретенный Ван-де-Граафом. Идея этой установки не сложна. Два полых металлических шара специальным способом заряжаются разноименным электрическим зарядом. Разность потенциалов, существующая между этими шарами, разгоняет заряженные частицы до больших скоростей. Величина заряда шаров лимитируется напряжением, при котором происходит разряд электричества через воздух. Величина пре-

¹ Подобной энергией, например, обладают альфа-частицы, вылетающие из ядра при радиоактивном распаде. Однако такие энергии позволяют альфа-частицам проникнуть лишь в легкие ядра (вплоть до калия—Z-19), так как силы отталкивания между альфа-частицей и ядром растут с увеличением заряда ядра.

дельного напряжения может быть повышена за счет увеличения давления, что затрудняет разряд. Построенные до настоящего времени электростатические генераторы дают частицы с энергией до 8,5 мэв. Хотя такой генератор значительно уступает современным ускорительным машинам в отношении энергии ускоренных частиц, он все же до настоящего времени остается ценным вспомогательным средством для ядерных исследований. Его преимущество — в высокой однородности и строгой контролируемости энергии получаемых с его помощью быстрых частиц.

Более энергичные частицы можно получать в линейном ускорителе. В этой машине частицу заставляют проходить сравнительно небольшую ускоряющую

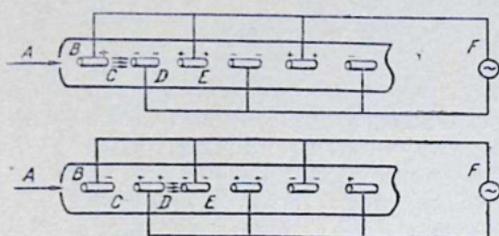


Рис. 1

разность потенциалов не один раз, а многократно. Принцип действия этой машины можно пояснить на примере первого линейного ускорителя, построенного в 30-х годах. Он представляет ряд цилиндрических секций, соединенных между собой так, как это показано на рис. 1. К концам проводов прилагается высокое (порядка десятков киловольт) переменное напряжение, так что сосед-

ние секции оказываются в каждый данный момент разноименно заряженными. Заряженные частицы, попадая в первую секцию ускорителя, не испытывают внутри нее действия каких-либо сил. При переходе от первой секции ко второй частицы ускоряются и затем в второй секции движутся с постоянной скоростью. Частота подаваемого напряжения подбирается так, что за время прохода частицам второй секции направление поля между секциями успевает измениться и при переходе от второй секции к третьей частицы снова ускоряются. Так повторяется много раз.

Недостатком такого первоначального варианта линейного ускорителя была его большая длина. Он давал энергию частиц до нескольких миллионов электронвольт.

Современные линейные ускорители сильно отличаются по своему устройству от первоначального варианта. Энергия протонов в них достигает 30 мэв при длине ускорителя в 12 метров.

Получить более быстрые протоны таким способом уже трудно, хотя и существуют проекты протонных ускорителей до 600 мэв.

Поэтому возникла мысль «загнуть» траекторию, чтобы частица, пройдя ряд ускоряющих промежутков, возвращалась назад и проходила их снова. Осуществить эту идею удалось в циклотроне при помощи магнитного поля.

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле перпендикулярно к силовым линиям, действует так называемая сила Лоренца, направленная перпендикулярно как к силовым линиям, та

и к скорости движения частицы. По величине эта сила равна

$$F = \frac{e}{c} v H.$$

Она не изменяет скорости частицы, но заставляет ее двигаться по окружности. Чем больше скорость и энергия частицы, тем больше будет радиус окружности. Период вращения частицы (то есть время одного оборота) в магнитном поле не зависит от скорости частицы, а зависит только от ее массы:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi \frac{cM}{eH}.$$

Поэтому, если частицу поместить в магнитное поле и постепенно увеличивать ее энергию, частота обращения частицы будет оставаться прежней.

Циклотрон устроен следующим образом. В магнитное поле помещены два полых полуцилиндра (дуанты), внутри которых вращаются частицы. Между

дуантами имеется переменное электрическое поле. Частота его подобрана так, что напряжение поля между дуантами меняется на противоположное за время, пока частица описывает полуокружность.

Таким образом, за один оборот частица успевает ускориться дважды. Радиус окружности движения частицы все время увеличивается, так что за

время ускорения частица по спирали проходит от центра до краев дуантов (рис. 2). Предельная энергия частиц в циклотроне зависит от радиуса машины. Протонам с энергией 10 мэв соответствует радиус 50 см. Наибольшая энергия протонов, достигнутая в циклотроне, равна 22 мэв при разности потенциалов между дуантами 410 киловольт. Предел энергии, достижимой в циклотроне, связан с ростом массы частиц при увеличении их скорости. Этот эффект был предсказан теорией относительности.

До сих пор мы считали, что масса частицы m_0 во время ускорения остается постоянной, а энергия равна

$$\epsilon = \frac{m_0 v^2}{2}.$$

В действительности, однако, все эти положения верны лишь приближенно, тогда, когда скорость частицы гораздо меньше скорости света. Правильную зависимость массы и энергии от скорости дает теория относительности, развитая замечательным ученым современности А. Эйнштейном. Согласно этой теории, масса увеличивается с ростом скорости частицы v по формуле

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

где m_0 — масса частицы в покое.

Из этой формулы видно, что масса m заметно отличается от m_0 (массы покоя) только при скоростях, близких к скорости света

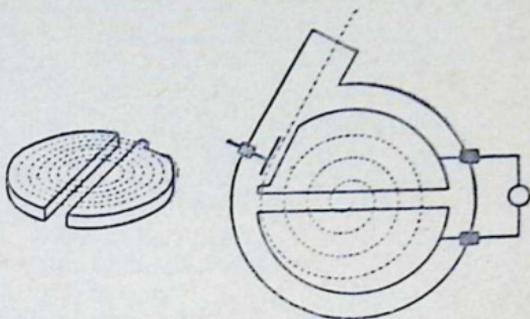


Рис. 2

БИБЛИОТЕКА
УзСХИ

При скоростях, близких к скорости c , режим работы циклотрон нарушается, так как период обращения частицы вследствие роста массы уменьшается и частица будет «отставать» от поля. Энергия при которой начинается это «отставание», зависит от массы частицы и от разности потенциалов между дуантами. Для протона эта предельная кинетическая энергия довольно высока (20—30 мэв). Для электрона из-за его малой массы эта энергия почти в 2000 раз меньше $\sim 0,02$ мэв.

Поэтому электроны в циклотроне никогда не ускоряют, а пользуются для этого специальной машиной — бетатроном (быстрые электроны называются иногда бета-частицей, отсюда и название машины). В этой установке ускоряющее электрическое поле само создается быстро изменяющимся магнитным потоком. Машина представляет собой магнит, вокруг которого расположена полая кольцевая трубка. Ускорять на такой машине тяжелые частицы, например протоны, невыгодно, так как для этого потребовалось бы слишком сильное магнитное поле.

Мысль о том, как усовершенствовать циклотрон и достичь энергий больше 1 бэв, давно привлекала внимание ученых. Существовала простая и легкий путь для этого: уменьшать по мере ускорения частоту внешнего электрического поля или увеличивать напряженность магнитного так, чтобы частицы проходили промежутки между дуантами каждый раз в момент, когда поле было там направлено по движению частицы, то есть, как говорят, чтобы они находились в «фазе с полем».

Однако многим ученым этот путь казался невозможным.

Действительно, можно изменять магнитное поле так, чтобы ускоряющее поле все время было в фазе с одной частицей, но как будут вести себя остальные? Многим казалось, что другие частицы, скорости которых хоть немного отличается от скорости данной частицы, рано или поздно выйдут из резонанса и затормозятся. Таким образом, существовало опасение, что производительность такой машины, то есть число ускоренных частиц на выходе, будет ничтожно мала, практически равна нулю. В 1944 году советский физик В. И. Векслер, а вскоре, независимо от него, и американский физик Э. Мак-Миллан высказали идею, как можно осуществить такой процесс и не «потерять» по дороге основную массу частиц.

Если поместить группу частиц в переменное электрическое поле так, чтобы поле немного опережало частицы¹, то такая группа будет, как говорят, «обладать устойчивостью по частотам». Это значит, что если какая-либо частица случайно отстанет от группы, то она в промежутке получит большее угловое ускорение, в результате чего догонит своих «товарищей». Если же какая-нибудь частица опередит группу, то она получит меньшее ускорение, в результате чего другие частицы всегда догонят ее. При достаточно плавном изменении частоты электрического поля или величины магнитного поля ус-

¹ То есть так, чтобы максимальная напряженность между дуантами наступала не в момент прохождения частицами ускоряющего промежутка, а немного раньше этого.



Рис. 3

тойчивость по частотам обращения будет сохраняться и частицы не будут «выходить из фазы».

На основе этой идеи были построены машины двух типов. В одних магнитное поле остается постоянным, но постепенно уменьшается частота электрического поля — такие машины называются фазотронами, или синхроциклотронами. В других, называемых синхротронами, меняется величина магнитного поля. Самый мощный в мире фазотрон, построенный в Советском Союзе, находится в Институте ядерных проблем (рис. 3). Он дает протоны с энергией 680 мэв и может давать альфа-частицы с энергией 840 мэв. Диаметр магнита этого ускорителя — 6 метров, а вес — 7000 т. Получать частицы с энергией больше 1 бэв в машинах такой конструкции уже трудно, так как вес магнита и его стоимость становятся слишком большими.

В современных ускорителях для получения протонов с энергией, большей 1 бэв, одновременно увеличивают магнитное поле и частоту электрического. Называются они с и н х р о ф а з о т р о н а м и. Можно подобрать изменение величины магнитного поля и частоты электрического таким образом, чтобы радиус орбиты оставался постоянным. Магнитное поле в центре машины теперь уже не нужно, и его можно «убрать». Поэтому магнит в синхрофазотроне делается не сплошной, а кольцевой, что сильно облегчает и удешевляет конструкцию.

Самый мощный из действующих синхрофазотронов находится в университете в Беркли (Калифорния) (рис. 4). Диаметр его — 30 метров. В этом ускорителе получают протоны с энергией до 6 миллиардов эв. Весь процесс ускорения в синхрофазотроне длится

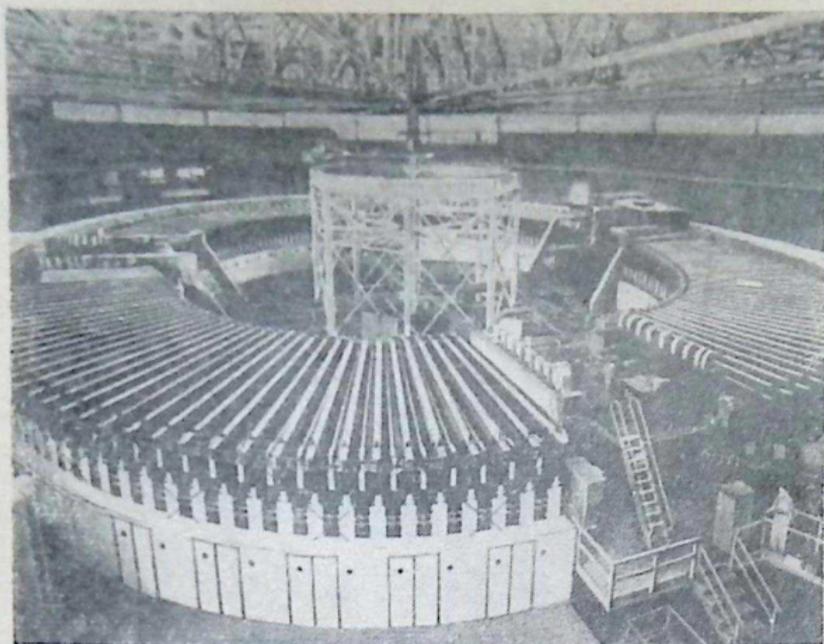


Рис. 4

свыше секунды, но за это время частица успевает пройти путь в несколько сотен тысяч километров. Присутствие в рабочей камере других, незаряженных, частиц (например, молекул воздуха) сильно мешает работе ускорителя, поэтому в камере поддерживается высокий вакуум.

Современный ускоритель потребляет столько энергии, что для его обслуживания нужна электростанция средней величины. Жидкого воздуха (необходимого для поддержания и создания высокого вакуума) установка требует так много, что в некоторых случаях вблизи строят специальный завод, вырабатывающий жидкий воздух.

Из сказанного ясно, что под словом «ускоритель» нужно понимать целый завод из нескольких корпусов с очень сложным и дорогим оборудованием.

В настоящее время в СССР заканчивается строительство самого большого в мире ускорителя протонов, который будет давать протоны с энергией 10 бэв. Вес его магнита достигает 36 тысяч т. Кроме того, проектируется ускоритель на 50 бэв.

РЕГИСТРАЦИЯ ЧАСТИЦ

При помощи быстро летящих частиц можно воздействовать на ядра, изучать взаимодействие элементарных частиц при их столкновениях и т. д. Но для того чтобы знать, что происходит при изучае-

мых взаимодействиях, необходимо уметь регистрировать энергию, направление движения как падающей частицы, так и частиц, получающихся в результате взаимодействия падающей частицы с ядром. Эти объекты слишком малы, чтобы обнаружить их с помощью микроскопа. Однако регистрировать и «видеть» эти частицы все же можно при помощи специальных приборов. Устройство этих приборов основано на свойствах быстро летящих заряженных частиц взаимодействовать с электронной оболочкой атомов, вышибая из нее отдельные электроны, превращая атом в положительный ион, либо возбуждая атомы. Последнее означает, что один или несколько электронов атома, которым падающая частица сообщила при столкновении часть своей энергии, перешли на более удаленные от ядра орбиты. В этом состоянии электрон обладает избыточной энергией, которую он, переходя на прежнюю орбиту под действием притяжения ядра, отдает в форме излучения кванта¹ света. Такие переходы, совершаемые внешними (наиболее удаленными от ядра) электронами, дают видимую часть спектра света. Подобное возбуждение происходит и при столкновении атомов друг с другом. Вот почему при высокой температуре начинают светиться газы. При внутренних переходах электронов, расположенных ближе к ядру, испускаются более энергичные, невидимые глазом рентгеновские кванты.

Регистрация пучка электронов происходит, например, в электронно-лучевых трубках типа обыкновенных телевизионных трубок, где на экране, покрытом специальным флуоресцирующим веществом, кинетическая энергия электронов преобразуется в световую энергию. Отдельная заряженная частица также производит вспышку (спинтилляцию) на экране, которую можно наблюдать невооруженным глазом. Это наиболее старый и простой метод подсчета частиц. В последнее время этот метод возродился, но уже с применением высокочувствительного фотоэлектрического устройства — фотоумножителя, который безотказно регистрирует даже очень слабые вспышки.

В качестве приборов, обнаруживающих и исследующих излучение, получили широкое применение ионизационные камеры и счетчики заряженных частиц. Ионизационная камера представляет собой конденсатор, к пластинам которого приложено определенное напряжение. Воздух (или другой газ), который находится между обкладками конденсатора, в отсутствие ионизирующего излучения является изолятором. С появлением ионов, возникших в результате воздействия излучения на молекулы газа, в цепи батареи — конденсатор появляется ток, который может быть усилен специальными радиотехническими устройствами и измерен. При определенных условиях величина тока пропорциональна числу появившихся ионов. Поэтому по силе тока можно судить об интенсивности попавшего в камеру излучения. Если интенсивность излучения очень мала и образующе-

¹ По современным представлениям, свет состоит из мельчайших частиц квантов, обладающих вполне определенной энергией, зависящей от длины световой волны. Подробнее об этом см. следующий раздел.

гося числа ионов недостаточно для создания заметного тока, ионизационная камера непригодна для регистрации.

Другой регистрирующий прибор — счетчик Гейгера — Мюллера, позволяющий регистрировать ионизацию, произведенную даже одной частицей, — представляет собой баллончик, наполненный каким-либо газом при пониженном давлении. В баллон вмонтированы два электрода: катод — цилиндрическая трубка, соединенная с отрицательным полюсом батареи, и анод — нить, проходящая внутри



Рис. 5

трубки и соединенная с положительным полюсом батареи (рис. 5). Основное отличие в устройстве счетчика от камеры заключается в том, что на электроды счетчика подается гораздо большее напряжение, чем на пластинки конденсатора в камере. При попадании в счетчик заряженной частицы атомы газа ионизируются. Под действием разности потенциалов, существующей между нитью и цилиндром, освобожденные в результате ионизации электроны движутся к аноду, а положительные ионы — к катоду.

Так как давление в трубке пониженное, то среднее расстояние между атомами газа сравнительно велико. Это позволяет электронам при большой разнице потенциалов между электродами разогнаться в поле при пролете от одного атома к другому до энергии, достаточной для ионизации этого атома. Затем с первоначальными и вновь «освобожденными» электронами повторяется то же. На следующем этапе уже появляются 4 электрона и т. д. Электронная «ламина» быстро развивается (за время $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек), и к аноду приходит уже громадное количество электронов. Между электродами возникает разряд. Такое явление называют пробоем. Соответствующий импульс тока усиливается так же, как и в случае камеры.

Подобные счетчики могут отдельно зарегистрировать свыше тысячи частиц в секунду. Счетчики Гейгера — Мюллера применяются для счета как тяжелых частиц (альфа-частицы, протоны), так и электронов. Ими можно пользоваться также для счета энергичных квантов света — так называемых гамма-лучей. В этом случае первичная ионизация получается за счет электрона, вырванного гамма-квантом из стенки счетчика (фотоионизация). Специально видоизмененные счетчики (пропорциональные счетчики) могут не только обнаруживать ионизирующее излучение, но, так же как и ионизационные камеры, определять его энергию.

Энергия излучения, независимо от характера этого излучения (будь то поток электронов, протонов, альфа-частиц или гамма-квантов), пропорциональна количеству возникших в результате действия этого излучения ионов. За единицу энергии, или дозы ионизирующего

излучения, принята такая доза гамма-излучения, под действием которой в 1 куб. см воздуха при температуре 0° и давлении 760 мм ртутного столба образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов (что соответствует поглощению 83 эргов энергии граммом воздуха). Эта единица называется рентген. Доза рентгеновского излучения, получаемая человеком при просвечивании грудной клетки, — около 15—20 рентгенов в минуту.

Одним из самых важных орудий экспериментатора в области ядерной физики служит камера Вильсона. Действие ее также основано на свойствах быстро летящих заряженных частиц ионизировать атомы. Однако ионы, появившиеся в результате пролета частицы, обнаруживаются здесь другим образом: в камере Вильсона используется свойство пересыщенного пара конденсироваться на ионах.

Известно, что пар сам по себе прозрачен. То, что мы наблюдаем в виде облаков или «пара», идущего из чайника, на самом деле не пар, а мельчайшие капельки, в которые пар сконденсировался. Чистые пары не конденсируются даже в состоянии пересыщения. Для возможности конденсации необходимо наличие пыли. Каждая пылинка служит центром конденсации, около которого образуются мельчайшие капельки жидкости. Вильсон показал, что при определенных условиях в воздухе, очищенном от пыли, такую же роль «зародышей тумана» могут играть ионы.

Эта идея используется в камере Вильсона, которая представляет собой сосуд, заполненный насыщенными парами. Пересыщенный пар получается при резком охлаждении, которое наступает, если быстро увеличить объем, занимаемый парами. Если в этот момент пролетает ионизирующая частица, то она оставляет за собой видимый след из мельчайших капелек сконденсированного на ионах пара. Этот след достигает места, в котором частица затормозится. Он бывает достаточно протяженным, так как при столкновении с атомом частица отдает ничтожную долю своей энергии. Например, если учесть, что энергия ионизации — несколько электронвольт, частица с энергией в 1 мэв истратит свою энергию приблизительно за 10^6 столкновений. В газе при атмосферном давлении частица испытает такое число столкновений и полностью затормозится на пути в несколько сантиметров. В более плотных веществах (в жидкости, в твердых телах) этот путь будет соответственно меньше. Отдельные следы частиц могут быть сфотографированы. По густоте сконденсированных капелек, образующих след, можно судить о скорости движения частицы. Если поместить камеру в магнитное поле, то по искривлению траектории пролетающей частицы можно установить заряд и импульс.

Продолжительность «рабочего» времени в камере непосредственно после расширения — около 0,1 секунды. Для того чтобы зафиксировать какое-нибудь редкое событие, пришлось бы повторять эту операцию очень много раз без всякой уверенности в том, что желаемое событие не произошло в течение «мертвого» времени камеры (времени, необходимого для того, чтобы с помощью электрического поля удалить из камеры ионы и поднять в ней давление). Поэтому

для подобных исследований камеру соединяют со счетчиками, которые автоматически расширяют камеру непосредственно после пролета через них ожидаемой частицы. Камера может «выжидать» таким образом редкое событие часами.

В последнее время получил распространение другой метод регистрации путей быстро заряженных частиц — метод толстослойных пластинок, разработанный советскими физиками Л. В. Мысовским и А. П. Ждановым. Быстро летящая заряженная частица, попадая в эмульсию фотографической пластинки, подобно свету, делает зерна эмульсии, встречающиеся на ее пути, способными к проявлению. Так как эмульсия — гораздо более плотная среда, чем пар, путь, проходимый частицами в эмульсии прежде чем они затормозятся, значительно короче, чем в камере Вильсона. Так, например, альфа-частица с энергией порядка 1 мэв проходит в эмульсии расстояние около 20—50 микрон.

Более энергичные частицы, однако, могут проходить в эмульсии расстояние в несколько сантиметров и больше, прежде чем остановятся. Проследить траектории быстрых частиц до момента их остановки в тонкой эмульсии можно лишь в том случае, если частицы движутся в пластинке в плоскости эмульсии. След частицы в фотоэмульсии также гораздо тоньше, чем в камере Вильсона, и изучается с помощью микроскопа.

Метод толстослойных пластинок обладает перед камерой Вильсона тем преимуществом, что у пластинок нет «мертвого времени». Пластинка фиксирует все события, происходящие за какой-то длительный промежуток времени, в то время как камера Вильсона может «прозевать» событие, происшедшее в «мертвое время», то есть непосредственно после срабатывания камеры. С другой стороны, такая регистрация пластинкой всех частиц без разбора затрудняет изучение пластинки.

Описанные выше методы пригодны для обнаружения заряженных частиц. Но как же обнаружить нейтральную частицу — нейтрон? Нейтрон, не обладающий электрическим зарядом, не взаимодействует с электронной оболочкой атомов и, следовательно, не может ионизировать их. Поэтому для обнаружения (как говорят, детектирования) нейтронов приходится пользоваться косвенными методами, регистрирующими действие нейтронов на ядра.

Во-первых, это действие может приводить к ядерным реакциям. При реакции нейтрона с бором (${}^5\text{B}^{10}$) высвобождается альфа-частица. Поэтому для обнаружения нейтронов могут применяться счетчики Гейгера — Мюллера или ионизационные камеры, наполненные газообразными соединениями бора (BF_3).

Во-вторых, нейтроны могут быть обнаружены по вызываемой ими искусственной радиоактивности, которая регистрируется с помощью счетчиков.

В-третьих, нейтроны могут быть зарегистрированы по протонам отдачи следующим образом. Если пропускать нейтроны через слой парафина, содержащего большое количество водорода, то в результате упругих столкновений нейтронов с ядрами атомов водорода по-

следние вышибаются из слоя парафина, приобретая значительную скорость. Эти протоны отдачи могут быть обнаружены в камере Вильсона. По длине пробега протонов можно определить их энергию, а следовательно, и энергию нейтронов.

Интересна в этой связи история открытия нейтрона. Еще в 1930 году Боте и Бэккер обратили внимание, что при бомбардировке некоторых легких элементов (в частности, бериллия) альфа-частицами возникает глубоко проникающее (жесткое) излучение.

Сначала думали, что это излучение представляет энергичные гамма-кванты. Однако предположение о квантовой природе этого излучения приводило к противоречивым выводам. С одной стороны, из опытов по поглощению в свинце энергия предполагаемого гамма-излучения оценивалась в 5 мэв. С другой стороны, Ирен и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что это излучение, проходя через слой парафина, создает протоны отдачи, длина следа которых в камере Вильсона достигала 26 см. Зная законы взаимодействия гамма-квантов с протонами, можно было оценить по энергии протонов отдачи энергию гамма-квантов. Она оказалась равной 50 мэв.

Это противоречие было разрешено Чадвиком, который, пропуская сильное излучение, получаемое при бомбардировке легких ядер альфа-частицами через слои различных газов, и изучая таким образом скорости ядер отдачи с различной массой, установил, что ядра отдачи с полученными скоростями могут создаваться не гамма-квантами, а лишь частицами с конечной массой покоя, равной массе протона. Это и были новые частицы — нейтроны.

ПРИРОДА ЯДЕРНЫХ СИЛ И НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ

Взаимодействие ядерных частиц — нейтронов и протонов — друг с другом очень сильно отличается по своему характеру от всех доселе известных нам взаимодействий. Электрические заряды, например, взаимодействуют друг с другом по закону Кулона, то есть сила взаимодействия зарядов q обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = \frac{q^2}{r^2},$$

а энергия взаимодействия (или, иначе, потенциальная энергия, или потенциал) обратно пропорциональна первой степени расстояния:

$$U = \frac{q}{r}.$$

Сила тяготения подчиняется тому же закону с тем лишь отличием, что «зарядом» в этом случае служит масса частицы с некоторым коэффициентом. Из этого закона следует, что хотя сила и убывает с расстоянием, но очень медленно, так что даже на больших расстояниях взаимодействие ощутимо.

Иначе ведут себя ядерные силы. Как показывает опыт, эти силы велики только на очень малых расстояниях $r \sim 10^{-13}$ см, а на больших расстояниях практически не действуют:

$$U_{\text{я}} \approx \frac{r}{q_{\text{я}} e^{r_0}}.$$

где $r_0 \sim 10^{-13}$ см, q_n — некоторый коэффициент («ядерный заряд»), а $e \approx 2,7$. Эта формула показывает, что если расстояние между нуклонами превышает r_0 , например, в 10 раз, то энергия взаимодействия уменьшается не в 10, а в $e^{10} \sim 10$, то есть в 10 тысяч раз.

Как только стал известен этот факт, сразу же появился вопрос: чем объяснить такое резкое качественное отличие ядерных сил от электрических сил и сил тяготения? Этот вопрос тесно переплетается с другим, не менее интересным, но возникшим значительно раньше вопросом, именно: как передается любое взаимодействие? Хорошо известно, что если два одноименных заряда поместить на каком-либо расстоянии друг от друга, то они будут отталкиваться. Что же заставляет их отталкиваться друг от друга, каким образом один из зарядов «узнает» о присутствии другого? Разумеется, через «ничего» сила передаваться не может, следовательно, должен быть какой-то материальный носитель взаимодействия. Но как он? Ответить на этот вопрос стало возможным только сравнительно недавно — после появления новых теорий: квантовой механики и теории относительности.

По современным представлениям электрическое поле, осуществляющее взаимодействие между зарядами, состоит из особых частиц — квантов, напоминающих по характеру световые кванты. Кванты электромагнитного поля движутся всегда со скоростью света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Согласно теории относительности частицы, движущиеся со скоростью света, должны иметь бесконечно малую массу покоя¹.

Как учит квантовая механика, квант представляет собой одновременно и частицу и волну. Поэтому про каждый квант можно сказать, что он имеет определенную энергию ε , импульс, и в то же время про него же можно сказать, что он имеет определенную длину волны λ и характерную для нее частоту колебаний ν . Скорость движения любой волны равна произведению длины волны на частоту колебаний, а так как кванты движутся всегда со скоростью света c , то

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Частота ν связана с энергией кванта ε соотношением Планка

$$\varepsilon = h\nu,$$

где h — постоянная Планка, имеющая размерность действия и равная $h = 6,06 \cdot 10^{-27}$ эрг. сек.

Кванты являются переносчиками взаимодействия между зарядами. Представить себе это можно следующим образом. Один из зарядов испускает квант, а другой заряд поглощает этот квант. Если заряды находятся на расстоянии r друг от друга, то взаимодействие переносится главным образом квантами, длина волны которых λ по порядку величины равна расстоянию r ($\lambda \approx r$). Энергия такого кванта

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \sim \frac{hc}{r},$$

Кванты, длина волны которых меньше r , просто не будут «долетать» от одного заряда к другому, так как любой квант не может «отлететь» от своего источника на расстояние, большее длины его волны. Кванты, длина волны которых много больше r , хотя и «долетают» до другого заряда, будут вносить малый вклад во взаимодействие, так как энергия их относительно мала.

¹ Действительно, энергия движущейся частицы, по теории относительности,

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

при $v \rightarrow c$ стремится к бесконечности при любой конечной массе m_0 , за исключением случая $m_0 \rightarrow 0$. Поэтому, если частица движется со скоростью света, а энергия ее конечна, это означает, что масса ее m_0 равна нулю.

Таким образом, на малых расстояниях взаимодействие переносят «энергичные» кванты, а при увеличении расстояния r — более «слабые» кванты. Так как масса m_0 квантов равна нулю, то в принципе заряд может испускать и поглощать сколько угодно «слабые» кванты. Этим же объясняется тот факт, что электрическое взаимодействие сравнительно медленно уменьшается с расстоянием.

Что касается сил тяготения, то их переносчиками являются специальные кванты гравитационного поля, так называемые гравитоны. Масса покоя гравитонов тоже равна нулю, так что в этом отношении они ведут себя подобно фотонам — квантам электромагнитного поля.

Поле ядерных сил резко отличается от электромагнитного и гравитационных полей. На основании того факта, что ядерные силы действуют только на малых расстояниях, известный советский ученый И. Е. Тамм в 1934 году высказал предположение, что кванты, переносящие взаимодействие между протонами и нейтронами, должны иметь в отличие от световых квантов не равную нулю массу покоя m_0 . Действительно, если $m_0 \neq 0$, то наименьшая энергия, которую может иметь такой квант, согласно теории относительности, равна

$$\varepsilon = m_0 c^2.$$

Следовательно, наибольшее расстояние r_0 , на которое может отлететь такой квант от нуклона, равно

$$r_0 = \frac{hc}{\varepsilon_{\min}} = \frac{h}{m_0 c}.$$

Поэтому взаимодействие, осуществляемое такими квантами, будет сильным лишь в том случае, если нуклоны находятся на расстоянии, меньшем чем r_0 .

Масса частиц (квантов), осуществляющих взаимодействие, должна быть, конечно, меньше массы протона и нейтрона.

До 1937 года из «легких» частиц были известны только электрон и позитрон (антиэлектрон) — частица с массой, равной массе электрона, обладающая положительным элементарным зарядом¹. Сначала ученые предполагали, что переносчиками ядерных сил служат именно эти частицы. Однако расстояние (или, как его называют, радиус действия ядерных сил), вычисленное по формуле

$$r_0 = h/m_{0\text{эл}} c \sim 10^{-11} \text{ см},$$

оказалось почти в 300 раз больше экспериментального значения.

В 1935 году японский физик Юкава высказал новую гипотезу. Он предположил, что в природе существуют новые, еще не известные частицы, масса которых примерно в 300 раз больше массы электрона. Ядерные силы, по мнению Юкавы, должны переноситься именно этими частицами. Для этого нуклоны должны быть способны излучать и поглощать эти частицы при определенных условиях.

В то время проверить гипотезу Юкавы непосредственно в лабораторных условиях было невозможно. Действительно, чтобы заставить протон излучать эту предполагаемую частицу, на него нужно было бы затратить энергию, по крайней мере равную

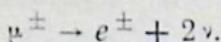
$$\varepsilon_0 = m_0 c^2 \sim 300 m_{0\text{эл}} c^2 \sim 10^8 \text{ эв},$$

то есть бомбардировать ядро протоном, энергия которого превосходила бы $10^8 \text{ эв} = 100 \text{ мэв}$. В те времена искусственных источников частиц столь высокой энергии еще не было. Однако в распоряжении ученых всегда находился естественный источник частиц очень высокой энергии — космические лучи. Если новые частицы существуют, они, несомненно, должны были бы рождаться в любом

¹ У нуклонов (нейтрона и протона), как указывает теория, тоже должны быть античастицы. Однако, несмотря на то, что теория давно предсказывала это, обнаружен антипротон был недавно, в конце 1955 года, то есть значительно позже, чем позитрон.

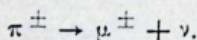
веществе под действием космических лучей. Поэтому именно в космических лучах стали искать новые частицы.

Вскоре (в 1937 г.) в камере Вильсона, помещенной в магнитном поле, были обнаружены следы новых частиц. Масса их, определенная по кривизне следа в магнитном поле и величине ионизации, оказалась равной $m_0 \approx 200 m_{\text{эл}}$. При этом были обнаружены две разновидности этих частиц: с положительным и отрицательным элементарным электрическим зарядом. Эти частицы были названы мезонами (от греческого слова «мезо» — «промежуточный»). Новая частица оказалась нестабильной, она быстро распадалась (период полураспада $\sim 10^{-6}$ сек.) на электрон (позитрон) и две нейтральные частицы — нейтрино:



Некоторое время после открытия мезонов с массой $m \approx 200 m_{\text{эл}}$ думали, что это и есть те частицы, о которых говорил Юкава, но вскоре выяснилось, что это не так. Оказалось, что новые частицы не поглощаются и не испускаются нуклонами и вообще взаимодействуют с ними крайне слабо. У физиков появилось недоверие к теории Юкавы. Многим казалось, что теория ядерных сил приводит к неверным предсказаниям. Однако в 1947 году в фотоластинках, экспонированных в космических лучах, Поуэллом были обнаружены следы новой частицы. Поуэлл заметил, что мезоны с массой $200 m_{\text{эл}}$ сами получают в результате распада другой, более тяжелой частицы. Оценивая ее массу (по плотности зерен и рассеянию), он нашел, что эта масса близка к $280 m_{\text{эл}}$. Новые частицы (с массой $280 m_{\text{эл}}$) распались на две частицы: одну с массой $200 m_{\text{эл}}$ и другую — нейтральную частицу с исчезающе малой массой (нейтрино).

Чтобы не путать новые частицы друг с другом, частицу с массой $200 m_{\text{эл}}$ стали называть μ -мезоном (мю-мезон), вторую же, с массой около $300 m_{\text{эл}}$ π -мезоном (пи-мезон). В этих символах распад π -мезона на μ -мезон и нейтрино можно записать в виде



Новая частица π -мезон обладает всеми свойствами, которые предсказывала для нее теория Юкавы; в частности, π -мезон способен излучаться и поглощаться нуклонами и ядрами. Вскоре после открытия их в космических лучах π -мезоны стали получать искусственным образом. Для этого ядра углерода были подвергнуты бомбардировке протонами с энергией выше 400 мэв. В результате образовались как заряженные, так и нейтральные π -мезоны. Сейчас свойства π -мезонов изучаются в основном именно этим путем.

Таким образом, хотя и не сразу, теория Юкавы получила заслуженное признание.

Дальнейшее развитие теории ядерных сил, основанной на предположении, что ядерные взаимодействия осуществляются π -мезонами, натолкнулось на ряд трудностей. Было неясно, возникают ли эти трудности из-за некоторого дефекта самой теории или из-за существования других, еще не открытых частиц, которые тоже могли бы служить переносчиками ядерного взаимодействия. По этой причине, а также в результате успеха открытия μ -мезонов — частиц, которые вовсе не предсказывались теорией Юкавы, продолжались интенсивные поиски новых частиц. Развитие техники ускорителей и регистрации частиц в последние годы позволило установить существование еще целого ряда новых частиц. Наиболее важные из них следующие:

а) τ -мезоны (тау-мезоны) — частицы с массой покоя около $1000 m_{\text{эл}}$; они распадаются на три π -мезона;

б) V^0 -частицы — нейтральные частицы с массой $2200 m_{\text{эл}}$ (тяжелые протоны); они распадаются на протон и π -мезон ($V^0 \rightarrow p + \pi$);

в) θ^0 -мезоны (тэта-ноль-мезоны) — нейтральные частицы с массой $800 m_{\text{эл}}$, распадающиеся на два π -мезона;

г) K -мезоны — заряженные частицы с массой $1200 m_{\text{эл}}$, распадающиеся на μ -мезоны и θ^0 -частицу ($K^- \rightarrow \mu^- + \theta^0$). Время распада всех новых частиц — порядка 10^{-8} сек. Некоторые из этих частиц (например, τ -мезоны и K -частицы)

тоже могут служить переносчиками ядерного взаимодействия. Какую роль играют эти новые частицы в ядерных силах, еще не ясно. Но новейшие исследования открывают широчайшие перспективы изучения природы и свойств элементарных частиц.

ГЛАВА IV

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И РАДИОАКТИВНОСТЬ

При химических реакциях происходит либо замена одних атомов в молекулах другими (реакция замещения), либо образование сложных молекул из более простых (реакция синтеза), либо распад сложных молекул (реакция разложения). При этом ядра атомов, которые находятся на громадных расстояниях друг от друга по сравнению с радиусом действия ядерных сил, а следовательно, и свойства самих атомов не претерпевают изменений.

При химических реакциях не происходит превращения одного элемента в другой, что отражается на символической записи этой реакции. Так, например, реакция соединения 2 молекул водорода с 1 молекулой кислорода в 2 молекулы воды записывается следующим образом: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$. (Напомним, что значок справа внизу химического символа означает число атомов данного элемента, входящих в молекулу). Как видно из записи, в ходе реакции сохраняется число атомов каждого элемента.

Под ядерными реакциями подразумевают изменения самих ядер (либо самопроизвольные, либо вследствие их взаимодействия друг с другом или с элементарными частицами), выражающиеся в увеличении или уменьшении заряда или массы ядра, то есть числа протонов или нейтронов. При этом один элемент превращается в другой. Так, например, если удалить протон из ядра гелия, состоящего из 2 протонов и 2 нейтронов, получится ядро другого элемента — лития.

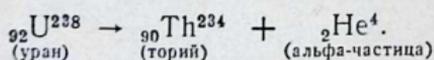
Ядерные реакции происходят в природе в естественных условиях. Мы уже говорили, что тяжелые ядра неустойчивы и подвержены распаду. Распад этот идет путем испускания особого рода излучения. Такой самопроизвольный распад тяжелых ядер получил название радиоактивного распада.

Открытие радиоактивности урана в 1896 году Беккерелем и последовавшее затем в 1898 году открытие полония и радия и изучение их радиоактивности Марией и Пьером Кюри положило начало целой цепи исследований подобного рода. В дальнейшем было выяснено, что распадаться способны все самые тяжелые элементы, занимающие конец периодической системы (после свинца). При распаде один тяжелый элемент, излучая какие-либо частицы, переходит в другой, тот в свою очередь переходит в третий, и так далее до тех пор, пока не образуется нерадиоактивный свинец. Было выяснено, что радиоактивное излучение может быть трех типов. Одни радио-

активные элементы испускают положительно заряженные альфа-лучи (состоящие из ядер гелия), другие — отрицательные бета-лучи (поток электронов), третьи — гамма-лучи, напоминающие по своим свойствам очень жесткие (глубоко проникающие) рентгеновские лучи.

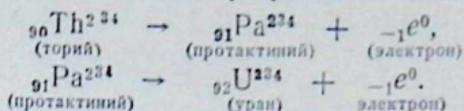
Радиоактивный распад можно назвать естественной ядерной реакцией. Ядро радия «само» испускает альфа-частицу и превращается в радон. Ускорить или замедлить этот процесс обычными внешними воздействиями (например, нагреванием, сильным увеличением давления, помещением радиоактивного вещества в магнитное поле) невозможно. Поэтому, несмотря на то, что открытие ядра в атоме произошло через 15 лет после открытия и изучения радиоактивности, еще тогда было ясно, что радиоактивность вызывается процессами, происходящими в глубине атома. Нельзя указать, какие именно из имеющихся ядер радиоактивного вещества распадутся в данный момент времени. Распад того или иного ядра происходит, как говорят, по закону случая. Зато можно с уверенностью предсказать среднее число распадающихся ядер в секунду: оно будет тем больше, чем большее количество радиоактивного вещества имеется в нашем распоряжении. Доля распавшихся в единицу времени ядер по отношению ко всем имеющимся — величина постоянная, зависящая только от свойств данного радиоактивного вещества. Среднее время, за которое распадается половина имеющегося вещества, — тоже величина постоянная и является очень важной характеристикой любого радиоактивного вещества. Это время называется периодом полураспада. Чем больше период полураспада вещества, тем, следовательно, реже распадаются его ядра, тем стабильнее само вещество. Период полураспада известных радиоактивных веществ колеблется в очень широких пределах: от 10^{-8} сек. до 10^{10} лет. Для радия, например, период полураспада равен 1622 годам, для урана-238 — $4,5 \cdot 10^9$ лет, для урана-235 — $8,5 \cdot 10^8$ лет.

Ядерные реакции записываются подобно химическим реакциям. Но в отличие от последних при ядерных реакциях один элемент может превратиться в другой. Однако и здесь справедлив закон сохранения вещества и закон сохранения заряда, что отражается на символическом обозначении реакции: суммарный заряд и массовое число ядер или частиц, вступающих в реакцию, равны соответственно суммарному заряду и массовому числу ядер или частиц — продуктов реакции. Приведем для примера реакцию распада урана-238, обладающего альфа-радиоактивностью. При испускании альфа-частицы ядро урана теряет 2 протона и 2 нейтрона, превращаясь в ядро элемента тория:



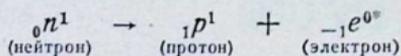
Суммарный заряд ($Z=90+2$) и число нуклонов ($A=234+4$) продуктов реакции те же, что и у исходного ядра.

Ядро этого изотопа тория тоже неустойчиво и путем двукратного бета-распада с периодом 24 дня превращается в изотоп урана-234:



Подобная цепочка радиоактивных превращений продолжается дальше и завершается устойчивым изотопом свинца ($Z=82$). Тот факт, что в природе встречаются радиоактивные элементы с очень маленьким периодом полураспада, которые, казалось бы, должны исчезнуть за время геологической эпохи земли (порядка 10^9 лет), объясняется тем, что эти элементы непрерывно пополняются за счет распада более тяжелых элементов. Их распространенность в природе пропорциональна периоду распада: чем короче период, тем менее они распространены. Родоначальниками этих цепочек превращений радиоактивных семейств служат такие долго живущие (порядка $10^9 \div 10^{10}$ лет) изотопы, как уран-238, уран-235, торий-232.

Реакция бета-распада, при которой из ядра вылетает электрон, казалось бы, противоречит протонно-нейтронной модели ядра, описанной в предыдущих разделах, и подтверждает теорию давно отброшенной электронно-протонной модели. На самом деле это не так. Дело в том, что электронов в ядре действительно нет, но они рождаются в процессе распада ядра при превращении одного из нейтронов ядра в протон, наподобие того, как рождается квант света при переходе электрона атома из возбужденного состояния в невозбужденное. Реакция идет по следующей схеме:



Именно такое превращение имеет место в приведенном примере бета-распада тория и протактиния: нейтрон превращается в протон, увеличивая заряд ядра на единицу, а родившийся при этом электрон вылетает из ядра.

Подобное превращение испытывают нейтроны в ядрах с избыточным количеством нейтронов по сравнению с устойчивым или более долго живущим изотопом (так, например, в приведенной реакции торий-243, распадающийся за 24 дня, гораздо менее устойчив, чем изотоп тория с меньшим числом нейтронов—торий-232). Однако нейтроны превращаются в протоны и в свободном состоянии. Поэтому говорят, что нейтрон бета-радиоактивен. Время, которое нейтрон живет в свободном состоянии, самопроизвольно превращаясь в протон, есть период полураспада нейтрона (порядка 12 минут).

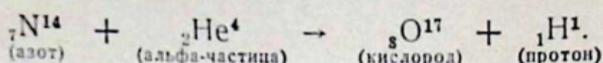
Долгое время ученые могли лишь наблюдать ядерные реакции, и то лишь один из типов возможных реакций — самопроизвольный распад тяжелых ядер, но не имели возможности ни повлиять на них, ни тем более осуществлять искусственные ядерные процессы.

Для того чтобы осуществить ядерную реакцию, необходимо воздействовать на ядра. До создания ускорителей единственными сна-

* Иногда протон изображается и так: ${}_1\text{H}^1$ (ядро атома водорода).

рядами, которыми можно было пытаться бомбардировать ядра, были альфа-частицы, вылетающие при радиоактивном распаде из тяжелых ядер с энергией, достаточной для их проникновения в наиболее легкие ядра.

Первая ядерная реакция, происходящая под действием альфа-лучей, была открыта Резерфордом (в 1919 г.). При обстреле ядер азота ${}^7\text{N}^{14}$ альфа-частицами вылетали быстрые протоны. Реакция идет по схеме:



Фотография этого процесса в камере Вильсона изображена на рис. 6. Расходящиеся линии — это следы альфа-частиц; длинный тонкий след, идущий вправо назад из точки столкновения альфа-частицы с ядром азота, принадлежит протону; короткий след, выходящий из той же точки, — ядру ${}^8\text{O}^{17}$.

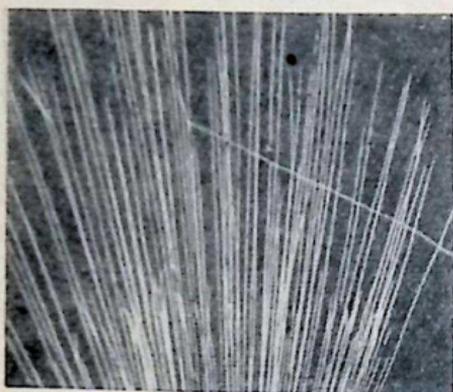


Рис. 6

С появлением ускорителей, в которых наряду с альфа-частицами могли ускоряться другие заряженные частицы (протон, дейтерон, электрон), причем до энергий, в тысячи раз больших, чем дают естественные источники, возможности осуществления ядерных реакций неизмеримо возросли.

Первая реакция, которая была осуществлена с помощью искусственно ускоренных протонов, — это расщепление ядра ${}^7\text{Li}^7$ на две альфа-частицы. Реакция идет по схеме:

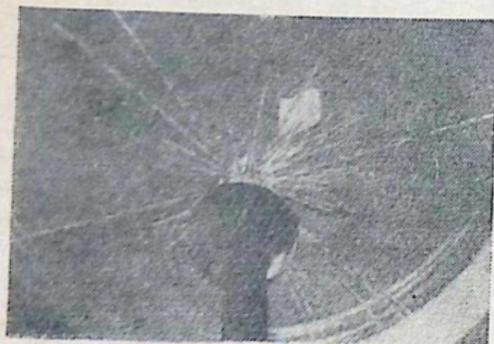
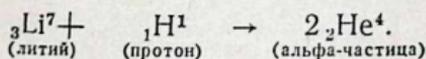


Рис. 7

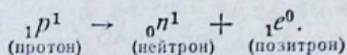
Вильсоновская фотография этого процесса изображена на рис. 7, где хорошо видны противоположно направленные следы разлетающихся альфа-частиц.

Нейтроны, будучи незаряженными частицами, гораздо легче, чем другие частицы, проникают в ядро, и с их помощью осуществляют самые разнообразные реакции.

Нейтроны с энергией в несколько мэв (до 12 мэв) можно получить бомбардировкой бериллия альфа-частицами, то есть осуществляя реакцию, при изучении которой и был открыт нейтрон. Пучки нейтронов с большей энергией могут быть получены бомбардировкой различных ядер заряженными частицами, выходящими из ускорителей.

Бомбардируя различными частицами ядра элементов, можно получить изотопы элементов, не встречающиеся в природе в естественных условиях. В основном это неустойчивые изотопы, подверженные радиоактивному распаду. Ядра искусственно радиоактивных изотопов имеют в своем большинстве избыток либо протонов, либо нейтронов. В случае избытка нейтронов в ядре, как мы уже видели, наиболее вероятен бета-распад с выделением электрона в процессе превращения нейтрона в протон. В случае же избытка в ядре протонов, протон может превратиться в нейтрон, при этом образуется положительно заряженная частица с массой, равной массе электрона. Эта частица, все свойства которой тождественны свойствам электрона, за исключением заряда, получила название позитрона¹.

Распад протона можно записать следующим образом:



Превращение протона в нейтрон происходит лишь в ядре в отличие от обратного самопроизвольного распада нейтрона на протон и электрон. Ядра, в которых осуществляется такое превращение, β^+ -радиоактивны, то есть испускают позитроны.

Первые искусственно радиоактивные элементы, полученные в 1934 году супругами Ирэн и Фредериком Жолио-Кюри, обладали именно таким типом радиоактивности.

Бомбардировкой ядер различных элементов в настоящее время получены радиоактивные изотопы всех элементов. Однако примене-

¹ Позитрон (или антиэлектрон) был предсказан Дираком задолго до его открытия. Гамма-квант большой энергии (более мэв) при взаимодействии с ядром может превратиться в электронно-позитронную пару. Наряду с образованием пар возможен и обратный процесс — исчезновение (аннигиляция) пары при столкновении электрона с позитроном и превращение ее в 2 гамма-кванта. Современная теория указывает, что наряду со многими известными в настоящее время элементарными частицами должны существовать античастицы, отличающиеся от своих прототипов знаком электрического заряда. Однако рождение тяжелых античастиц в отличие от позитрона возможно лишь при очень больших энергиях. Совсем недавно в университете в Беркли, где находится самый мощный из современных действующих ускорителей, при бомбардировке медной мишени протонами с энергией 6,3 бэв ($6,3 \cdot 10^9$ эв) было обнаружено давно предсказываемое теорией рождение пары — протона и антипротона. Рождение антипротона — крайне редкое явление для энергии порядка 6 бэв.

Завершение постройки ускорителя на 10 бэв в СССР даст возможность подробно изучить свойства этой частицы. В принципе можно представить себе антиатом, состоящий из антипротонных ядер и позитронной оболочки. Может быть, наряду с искусственными трансурановыми элементами человек создаст искусственные антиэлементы с порядковыми номерами минус 1, минус 2 и т. д. Соединение этих антиэлементов с элементами должно было бы сопровождаться выделением громадной энергии за счет аннигиляции антипротонов с протонами.

ние для этих целей ускорителей не может дать дешевые радиоизотопы в нужном количестве, которые могли бы быть использованы в промышленности. Дешевые искусственные изотопы легко получаются, как мы увидим, при работе уранового котла.

ДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Приведенные выше примеры ядерных реакций характерны тем, что получающиеся в результате реакции ядра не сильно отличаются по массе и заряду от исходных ядер (за исключением самых легких). Бомбардировка нейтронами тяжелых ядер и в первую очередь урана привела к открытию важнейшего типа ядерных реакций — реакции деления тяжелых ядер на два сравнимых по массе осколка.

Экспериментальным путем такие реакции деления были обнаружены в 1938—1939 годах, и это открытие может быть поставлено в ряд с самыми замечательными открытиями в физике и химии. Заслуга этого открытия принадлежит ряду исследователей, в том числе Ферми, который со своими сотрудниками положил в 1934 году начало работам, приведшим к этому открытию, а также супругам Кюри, Гану, Лизе Мейтнер, Штрассману и другим ученым.

Возможность деления тяжелых ядер под действием внешнего возмущения, например при бомбардировке нейтронами, станет понятна, если учесть, что тяжелые ядра неустойчивы: короткодействующие ядерные силы притяжения в большом ядре с трудом компенсируют сильно возросшие с зарядом электрические силы отталкивания между протонами. Под действием нейтрона, сообщившего ядру дополнительную энергию, тяжелое ядро переходит, как говорят, в возбужденное состояние и распадается на два (реже на три) осколка, которые благодаря электрическим силам отталкивания разлетаются в стороны с большой скоростью. Легче всего делится под действием нейтронов уран-235. Деление урана-235 вызывается даже медленными нейтронами. Это значит, что ядро изотопа урана-235 особенно неустойчиво по отношению к реакции деления и достаточно нейтрону сообщить ядру незначительное количество энергии, чтобы вызвать деление.

Советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак обнаружили, что деление урана может происходить так же, как и радиоактивные превращения, самопроизвольно, без внешнего воздействия (как говорят, спонтанно). Процесс самопроизвольного деления очень медленный. Период реакции деления порядка 10^{16} лет, то есть значительно больше периода радиоактивного распада (порядка 10^9 лет). Это значит, что в куске урана массой в 1 кг (около $3 \cdot 10^{24}$ атомов) происходит 5—6 актов самопроизвольного деления в секунду.

Осколки деления урана сравнимы по массе. Наиболее вероятное отношение масс двух осколков — $2/3$. Такими осколками могут быть, например, криптон ($Z=36$) и барий ($Z=56$).

Осколки, получающиеся в результате деления, чаще всего радиоактивны. С ростом порядкового номера Z массовое число (число нуклонов в ядре) A элементов растет быстрее, чем заряд. Поэтому осколки ядра с меньшими порядковыми номерами, чем исходное ядро, будут обладать избыточными нейтронами, что приведет, как мы видели раньше, к бета- и гамма-радиоактивному распаду. Так, например, устойчивые изотопы криптона и бария с наибольшими массовыми числами ${}_{36}\text{Kr}^{86}$ и ${}_{56}\text{Ba}^{138}$ имеют в сумме 132 нейтрона, в то время как ${}_{92}\text{U}^{235}$ имеет 143 нейтрона, то есть на 11 нейтронов больше. Два или три из этих нейтронов выделяются в процессе самого деления, остальные же нейтроны, содержащиеся в осколках, вызывают цепь радиоактивных превращений с различными периодами распада. Эти осколки из-за большого излишка нейтронов наряду с обычной радиоактивностью обнаруживают и особый тип радиоактивности, отличный от альфа-, бета- и гамма-распада, непосредственно излучая нейтроны с периодом испускания в несколько секунд. Деление тяжелых ядер под действием нейтронов на два сравнимых по массе осколка — очень важный тип реакций, которые осуществляются искусственным путем в атомных котлах и атомных бомбах.

ЭНЕРГИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

При различных физических и химических процессах, происходящих в природе, энергия постоянно превращается из одной формы в другую: потенциальная энергия совокупности тел может перейти в кинетическую энергию движения, кинетическая энергия может быть преобразована в тепловую форму энергии, которая есть не что иное, как энергия хаотического движения множества молекул, последняя может превратиться в химическую, электрическую энергию и т. д.

При химических реакциях также происходит превращение энергии из одной формы в другую. Некоторые химические реакции идут с выделением энергии (экзотермические реакции). К ним относятся почти все реакции горения (соединение различных веществ с кислородом), в том числе реакция соединения водорода с кислородом с образованием воды — взрыв гремучего газа. С выделением тепла идут такие реакции, как реакция разложения взрывчатого вещества тринитротолуола (его сокращенно называют тол, или тротил), молекула которого довольно сложна и состоит более чем из 200 атомов; подобная же реакция происходит при вспышке спичечной головки.

К другому типу относятся реакции, которые идут с поглощением энергии, — эндотермические реакции. Для того чтобы такая реакция шла, необходимо затрачивать энергию, например подогревать раствор реагирующих веществ, при разложении воды пропускать электрический ток и т. д.

Выделение и превращение энергии происходит в том случае, если какие-либо силы совершают работу. Так, энергия падающей воды, которая может быть преобразована в электрическую энергию на гидростанции, образуется за счет работы силы тяжести.

При химических реакциях превращение энергии происходит за счет сил, связывающих атомы в молекулы, в конечном счете — сил электрического происхождения. При эндотермической реакции поглощаемая энергия тратится на работу, совершаемую против молекулярных сил. При экзотермической реакции эти силы совершают положительную работу и энергия выделяется. Потенциальная энергия такой системы уменьшается, превращаясь в тепловую энергию хаотического движения молекул. Общий признак, ориентировочно определяющий характер химической реакции, может быть сформулирован следующим образом: энергия выделяется в том случае, если молекулы веществ, получающихся в результате реакции, более прочно связаны, чем молекулы исходных веществ.

Количество энергии, выделяемой при химических реакциях, может быть измерено экспериментально. Так, энергия, выделяемая при образовании 1 г воды, $Q \approx 4$ ккал. Энергия, выделяемая при сгорании 1 г высококачественного угля, $Q \approx 7$ ккал.

Различные ядерные реакции также могут идти как с выделением так и с поглощением энергии. Как и в случае химических реакций первые называют экзотермическими, вторые — эндотермическими реакциями. Превращение энергии при ядерных реакциях происходит в результате совместного действия ядерных сил притяжения между нуклонами и электрических сил отталкивания между протонами. Так как энергия этих сил, действующих на ядерных расстояниях, в миллионы раз больше энергии молекулярных сил, действующих на атомных расстояниях, то выделяемая или поглощаемая при ядерных реакциях энергия в миллионы раз больше химической.

Примером эндотермической ядерной реакции может служить приведенная в разделе «Ядерные реакции и радиоактивность» реакция получения кислорода путем бомбардировки азота альфа-частицами. В результате реакции на каждое ядро поглощается энергия $Q = 1,13$ мэв.

Реакция расщепления ядра лития протоном с образованием двух ядер гелия, приведенная в том же разделе, является экзотермической реакцией, при которой выделяется энергия $Q = 17,25$ мэв на ядро, или $Q = 5 \cdot 10^7$ ккал на грамм. Энергия, выделяемая 1 г вещества при какой-либо ядерной реакции, может легко быть подсчитана, если известна энергия, выделяемая при элементарном акте (на одно ядро). Для этого сначала подсчитывают энергию, приходящуюся на грамм-атом реагирующих веществ (грамм-атом — это количество вещества в граммах, численно равное атомному весу). Число атомов в 1 грамм-атоме для любых элементов постоянно и равно $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ (число Авогадро). Для реакции расщепления лития протоном энергия, приходящаяся на 1 грамм-атом реагирующих элементов ($7 \text{ г } {}_3\text{Li}^7$ и $1 \text{ г } {}_1\text{H}^1$), $Q = 17,25 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}$ мэв или, если учесть

что $1 \text{ мэв} = 3,8 \cdot 10^{-17} \text{ ккал}$, $Q \approx 4 \cdot 10^8 \text{ ккал}$. Энергия, приходящаяся на 1 г , $Q_1 \approx \frac{4}{8} \cdot 10^8 \text{ ккал} \approx 5 \cdot 10^7 \text{ ккал}$.

Таким образом, энергия, выделяющаяся при образовании 1 г геллия из лития, более чем в 10 миллионов раз превышает химическую энергию образования 1 г воды из кислорода и водорода.

При делении ядра урана также выделяется энергия в форме кинетической энергии осколков и вылетающих при реакции нейтронов. Эта энергия равна $Q=200 \text{ мэв}$, то есть в десятки раз больше энергии, выделяемой на одно ядро при реакции легких ядер. Однако, если сравнивать энергию, приходящуюся не на одно ядро, а на определенное количество вещества (или на 1 нуклон), то при распаде 1 г урана выделяющаяся энергия $Q=2 \cdot 10^7 \text{ ккал}$, то есть почти в три раза меньше, чем энергия расщепления лития, и в 5 миллионов раз больше, чем химическая энергия образования воды. Имеются некоторые реакции с легкими ядрами, при которых выделяемая энергия еще больше, чем энергия расщепления лития, с ними мы познакомимся в разделе, посвященном термоядерным реакциям.

Энергию распада ядра урана можно приближенно оценить таким же путем, каким мы ранее оценивали энергию ядерных сил двух протонов. Когда процесс деления завершен и осколки удалились на расстояние r , при котором ядерные силы перестают играть роль, электрические силы совершают положительную работу. Эта работа и есть выделяемая при распаде ядра энергия. Как показывает эксперимент, радиус действия ядерных сил для любого ядра (в том числе и для осколков деления урана) может быть выражен формулой

$$r_{\text{я}} = 1,5 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{A} \text{ см},$$

где A — число нуклонов в ядре. Считая для простоты, что ядро ${}_{92}\text{U}^{235}$ делится на два равных осколка с $Z=46$ и $A=235/2 \approx 120$, получим, что для осколков $r_{\text{я}} \approx 0,75 \cdot 10^{-12} \text{ см}$, а расстояние между осколками $r=2r_{\text{я}} \approx 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}$.

Электрическая энергия осколков, находящихся на таком расстоянии, или работа, совершаемая электрическими силами при разлете осколков из такого положения

$$Q = \frac{(Ze)^2}{r} = \frac{(46 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10})^2}{1,5 \cdot 10^{-12}} \approx 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ эрг} \approx 200 \text{ мэв}.$$

При такой энергии распада ядра получим, что энергия распада грамм-атома урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ $Q=200 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ мэв} = 4,6 \cdot 10^9 \text{ ккал}$, а энергия распада 1 г урана

$$Q_1 = \frac{4,6}{235} 10^9 \text{ ккал} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ ккал}.$$

Энергию, выделяемую или поглощаемую при ядерных реакциях, можно определить экспериментальным путем, зная энергию бомбардирующей частицы и энергию продуктов реакции. Последняя определяется по длине следов, оставляемых ядром и образующейся частицей в камере Вильсона или в фотоэмульсии. Если при химической реакции происходит выделение энергии в случае образования более прочно связанных молекул, то точно так же при ядерных реакциях энергия выделяется в том случае, если в результате реакции

образуются ядра с более прочно связанными нуклонами. Когда известна сила связи нуклонов в различных ядрах, можно предсказать характер той или иной реакции. Закон Эйнштейна о взаимосвязи массы и энергии, будучи применен к ядрам, позволяет не только качественно предсказывать характер ядерных реакций, но с большой точностью определять количество энергии, выделяемой или поглощаемой в различных реакциях. Этот закон утверждает, что энергия, выделяющаяся при каком-либо процессе, связана с уменьшением массы всей системы соотношением

$$\Delta E = \Delta m : c^2,$$

где $c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ — скорость света в пустоте.

В привычных для нас процессах превращение энергии происходит в таких малых количествах, что относительное изменение массы систем $\Delta m/m$ практически невозможно обнаружить. Так, например, принимая во внимание, что при образовании 1 г воды выделяется 4 ккал = $1,7 \cdot 10^{11}$ эрг, найдем для изменения массы величину

$$\Delta m = \Delta E/c^2 \sim 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ г.}$$

Масса изменяется меньше, чем на одну миллиардную часть. При ядерных реакциях, как мы видели, 1 г вещества выделяет в миллионы и десятки миллионов раз большую энергию. Это дает изменение массы на $1/100$, $1/1000$ г, то есть на проценты и десятые доли процентов от собственной массы. Такое изменение массы легко может быть обнаружено с помощью масспектрометров, которыми можно измерять массы ядер с точностью до сотысячных и даже миллионных долей атомного веса.

При образовании ядра из нуклонов потенциальная энергия системы нуклонов уменьшается на величину освобожденной атомной энергии. При этом уносится некоторая доля массы частиц, из которых создается ядро. Поэтому масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, образующих это ядро. Вот почему массы ядер не выражаются в точности целыми числами. Зная массы ядер и нуклонов, всегда можно найти разность между суммарной массой нуклонов, составляющих ядро, и массой ядра. Энергия, соответствующая этой разнице масс, называется энергией связи.

Удобной характеристикой ядер служит величина энергии связи, приходящейся на один нуклон $\frac{\Delta E}{A}$. Чем больше эта величина, тем более прочно ядро, тем больше энергии выделяется на нуклон при образовании ядра. При реакциях, идущих в направлении увеличения энергии связи на нуклон, энергия выделяется. Из рис. 8, где изображена зависимость $\frac{\Delta E}{A}$ от массового числа A , видно что наиболее устойчивыми, обладающими наименьшей потенциальной энергией, являются элементы от аргона ($_{18}\text{Ar}^{40}$) до олова ($_{50}\text{Sn}^{120}$). При реакциях, где в качестве исходного ядра употребляются эти элементы, не может быть получена энергия в сколько-нибудь значи-

тельном количестве. Эти элементы пассивны с ядерной точки зрения. Наоборот, при распаде тяжелых ядер (перемещение в правой части кривой влево) и в преобладающем числе случаев синтеза ядер из более легких (перемещение в левой части кривой вправо) энергия выделяется. При этом синтез легких ядер, как видно из кривой рис. 8, имеет преимущество перед распадом тяжелых: при образовании гелия из водорода энергия связи возрастает в 7 раз больше, чем при делении ядер урана на два осколка со средними массами.

Энергия связи $\Delta E/A$ у легких ядер испытывает колебания, достигая максимумов у ${}^2\text{He}^4$, ${}^4\text{Be}^8$, ${}^6\text{C}^{12}$, ${}^8\text{O}^{16}$, указывая на существование у этих ядер прочных устойчивых группировок из 2 нейтронов и 2 протонов. Поэтому энергия может

выделяться не только при синтезе этих ядер из более легких, но и при распаде тех соседних с ними ядер, энергия связи которых меньше (минимумы на кривой $\Delta E/A$). Пример подобной реакции представляет разобранная ранее реакция образования ${}^2\text{He}^4$ из ${}^3\text{Li}^7$.

Если учесть, что в системе взаимодействующих частиц силы направлены так, что стремятся уменьшить потенциальную энергию системы, то есть, в случае ядер, увеличить энергию связи, приходящуюся на нуклон, возникает вопрос, почему в природе не произошло превращения тяжелых и легких ядер в ядра с промежуточным атомным весом — в ядра, пассивные в энергетическом отношении. Это объясняется относительной устойчивостью существующих в природе ядер. Нужно сначала затратить энергию для того, чтобы вывести эти ядра из устойчивого состояния, возбудить ядро. Однако из-за большой энергии возбуждения (порядка нескольких мэв) в естественных условиях на земле не происходит процессов, в которых ядру сообщалась бы требуемая энергия. Аналогичное рассуждение справедливо и для химических реакций. Так, при комнатной температуре смесь кислорода и водорода не будет реагировать, несмотря на то, что молекулы этих газов обладают меньшей энергией связи, чем молекула воды. Это объясняется относительной устойчивостью молекул этих газов. Необходимо затратить некоторую работу, чтобы вывести молекулы из устойчивого состояния. Этого можно достигнуть нагреванием смеси до температуры, при которой молекулы начнут диссоциировать на отдельные атомы. Только в этом случае силы взаимодействия между атомами приведут к образованию более прочно связанных молекул воды. Реакция происходит очень быстро, в форме взрыва.

Так как энергия химических реакций сравнительно мала, то в земных условиях постоянно происходит превращение одних ве-

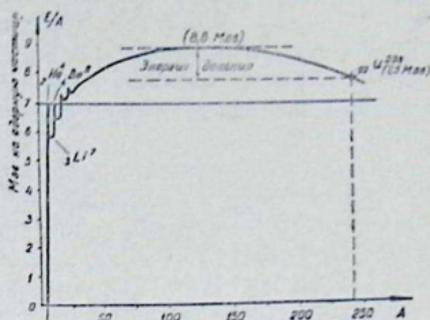


Рис. 8

щества в другие. В отличие от богатства химических превращений ядерный мир на земле без вмешательства человека почти «мертв». Единственные ядерные реакции, происходящие на земле в естественных условиях, — это распад тяжелых ядер путем радиоактивного излучения. В результате такого распада за геологическую эпоху (10^9 лет) исчезли трансурановые элементы (наиболее долго живущий из них — нептуний ${}_{93}\text{Np}^{237}$ обладает периодом полураспада $2,2 \cdot 10^6$ лет), которые, возможно, существовали на земле в далеком прошлом. Громадные запасы энергии, заключенные в ядрах, природа на земле тратит так скупо, что нечего и говорить о промышленном использовании этого естественного источника. Так, например, все имеющиеся на земле запасы урана путем естественного радиоактивного деления за сутки дают энергию, которой едва бы хватило, чтобы вскипятить ведро воды. Между тем кусочек урана размером не больше спичечной коробки при полном распаде смог бы дать энергию, достаточную, чтобы провести состав из Владивостока в Москву.

Экзотермические ядерные реакции, осуществляемые в лабораториях путем бомбардировки различных элементов заряженными частицами, еще не давали возможности использовать их энергию в промышленных целях. Хотя энергия, выделяющаяся при превращении некоторых ядер, могла быть в десятки раз больше, чем энергия бомбардирующей заряженной частицы, это еще не давало выигрыша в энергии, так как в лучшем случае только одна из 10 тысяч ускоренных частиц попадает в ядро и вызывает реакцию. Не спасают положения и нейтроны, которые легко могут проникать в ядра, так как при получении нейтронов все равно необходимо пользоваться ускоренными заряженными частицами, на что практически затрачивается энергии во много раз больше, чем ее получается в результате распада тяжелых ядер.

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Тот факт, что при делении урана из его ядра вылетают 2—3 нейтрона, позволил осуществить так называемую цепную ядерную реакцию деления урана. Заслуга осуществления этой реакции принадлежит целой группе физиков, и в первую очередь выдающемуся итальянскому ученому Ферми.

Сущность цепной реакции заключается в следующем. Допустим, что в куске урана-235 появился свободный нейтрон. Будучи захвачен ядром урана-235, он вызовет деление ядра, в результате чего появятся два энергичных осколка и еще 2—3 нейтрона; каждый из последних, будучи захвачен ураном-235, испускает еще 2—3 нейтрона и т. д. Таким образом, число нейтронов будет возрастать, а энергия выделяться до тех пор, пока не израсходуются все ядра урана-235.

Возникает вопрос, при каких условиях может протекать этот процесс (что касается существования первого нейтрона, от которого

возникает цепная реакция, то о нем можно не беспокоиться; даже в результате спонтанного распада в куске урана имеется всегда несколько свободных нейтронов).

Во-первых, изотоп урана-235 должен быть выделен из общей смеси изотопов¹. Отделение урана-238 необходимо потому, что его ядра тоже способны поглощать нейтроны, но при этом они не делятся, а претерпевают ряд превращений. Поглощая нейтроны, уран-238 уменьшает их концентрацию, отчего цепная реакция прекращается.

Во-вторых, необходимо, чтобы уран был очень чистым. Большинство элементов способно поглощать нейтроны, поэтому их содержание в уране должно быть очень малым. Такие же элементы, как литий (Li), бор (B), кадмий (Cd) и др., которые поглощают нейтроны особенно жадно, практически должны полностью отсутствовать. Количество примесей в уране не должно превышать тысячных долей процента. С такими высокими требованиями к чистоте химическая промышленность и металлургия столкнулись впервые, поэтому на первых порах получение столь чистого урана представляло значительную трудность.

В-третьих, для того чтобы в куске чистого урана-235 развилась цепная реакция, нужно иметь кусок достаточно большой величины. Дело в том, что ядра урана-235, как уже указывалось, очень малы по сравнению с размерами атома; ядра занимают ничтожную часть объема атома (только 10^{-13} часть его). Если кусок урана невелик, то нейтрон имеет большую вероятность не попасть ни в одно из ядер урана-235 и вылететь наружу. Напротив, если кусок урана достаточно велик, то вылететь наружу, не задев ни одного ядра, нейтрону уже трудно; в какое-нибудь ядро урана он обязательно попадет и вызовет его деление.

Таким образом, существует некоторый критический размер куска урана; в меньшем куске реакция не идет, а в большем уже идет достаточно быстро.

Критические размеры куска урана-235 — около 5 см (диаметр шара), а критическая масса — около 1 кг.

Если взять кусок урана-235 с массой, больше критической, то в нем цепная реакция развивается с громадной быстротой. Весь кусок прореагирует за миллионные доли секунды. При этом выделится колоссальное количество энергии (в виде тепла) и произойдет очень сильное разогревание. Таким образом, цепная реакция внутри куска урана-235 представляет собой не спокойное горение, а взрыв огромной силы. Поэтому уран-235 называют иногда ядерным взрывчатым веществом. Кроме урана-235, в качестве ядерных взрывчатых веществ могут применяться уран-233 (${}_{92}\text{U}^{233}$) и плутоний-239 (${}_{94}\text{Pu}^{239}$). Эти элементы тоже способны делиться с испусканием нейтронов и участвовать в цепной реакции. Критическая масса и энергия, выделяющаяся при их делении, примерно те же, что и для урана-235. Все перечисленные элементы могут применяться в атомной бомбе.

¹ Как мы увидим ниже, цепная реакция в смеси изотопов при определенных условиях также может идти, но значительно сложнее, чем в чистом уране-235

ГЛАВА V

РАБОТА АТОМНОГО КОТЛА

Для использования атомной энергии в мирных целях необходимо было научиться осуществлять цепную реакцию не в чистом уране-235, получение которого из природного урана очень дорогостоящая и трудная задача, а в естественной смеси изотопов. Кроме того, необходимо было замедлить реакцию так, чтобы ею можно было управлять. Обе эти задачи были решены одновременно благодаря идее замедления нейтронов.

Основной «недостаток» изотопа U^{238} состоит в том, что он захватывает нейтрон без последующего деления. Однако вскоре был установлен очень интересный факт: уран-238 захватывает преимущественно быстрые нейтроны с энергией от 7 до 200 эв. Медленные, так называемые тепловые, нейтроны ядро урана-238 почти не захватывает, и поэтому для медленных нейтронов изотоп 238 уже не является помехой для цепной реакции. Таким образом, для того чтобы уменьшить «вредное» влияние изотопа урана-238, достаточно замедлить нейтроны.

Процесс замедления заключается в том, что быстрые нейтроны, сталкиваясь с какими-либо легкими ядрами, передают им часть кинетической энергии. При столкновении с тяжелыми ядрами нейтроны передают в среднем энергию во много раз меньше, чем при столкновении с ядрами, имеющими массу, близкую к массе нейтрона. Это можно проиллюстрировать на примере бильярдных шаров: шар, сталкиваясь с другим шаром, равным ему по массе, при лобовом ударе останавливается, полностью передав энергию другому шару, при столкновении же с бортом бильярда, обладающим гораздо большей массой, шар практически не теряет свою энергию, а лишь изменяет направление движения. Поэтому от замедлителя требуется, чтобы его ядра были достаточно легки и, разумеется, не поглощали нейтронов. Чтобы практически израсходовать всю свою энергию, нейтрону достаточно нескольких десятков соударений с каким-либо легким веществом. Таких веществ известно несколько: тяжелая вода¹, бериллий и углерод. Наилучшим из них является тяжелая вода D_2O , состоящая из тяжелого водорода (дейтерия) и кислорода. К сожалению, это самый дорогой из всех упомянутых замедлителей.

Система из урана и замедлителя получила название уранового котла, или реактора. Принципиальная схема котла очень проста. Чтобы познакомиться с ней, рассмотрим схему первого в СССР реактора, построенного в 1946 году. Он был сооружен исключительно для научных целей, основная из которых была — выяснить, воз-

¹ В обычной воде водород захватывает нейтроны, превращаясь в тяжелый водород, и тем самым затрудняет цепную реакцию.

можно ли в принципе цепная реакция в системе из природного урана и графитового замедлителя.

Этот реактор представляет собой шар радиусом 3 м, заполненный графитовыми кирпичами. Внутри него на расстоянии 20 см друг от друга помещались стержни из металлического урана (естественная смесь изотопов) диаметром 3—4 см.

Сверху этот шар был окружен слоем графита толщиной 80 см. Назначение этого слоя — отражать нейтроны, идущие из котла, обратно. Быстрые нейтроны, вылетая из уранового стержня, проходят большой путь в графите и к другому стержню подходят уже замедленными, поэтому нейтроны там поглощаются не ураном-238, а ядрами урана-235, что вызывает деление их с испусканием новых нейтронов. Таким образом, в котле осуществляется цепная реакция. Критические размеры такой системы значительно больше критических размеров чистого урана-235. В первом реакторе они составляли несколько метров. Вес реактора доходил до нескольких сот тонн. Управление реактором осуществлялось с помощью кадмиевых стержней. Металл кадмий обладает свойством поглощать нейтроны. Поэтому при погружении стержня в реактор цепная реакция в котле угасает, при удалении стержня — возобновляется.

Чтобы защитить людей от вредного действия нейтронов, этот котел был сооружен в подземелье и на поверхность выходила только часть его.

Основное требование, предъявляемое к материалам, из которых изготовляется реактор, — это чистота. Чем чище графит и уран, тем меньше критические размеры котла. Небольшие же примеси таких веществ, как кадмий, литий или бор, жадно поглощающих нейтроны, делают графит практически непригодным для реактора.

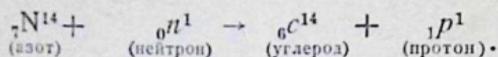
Интересно отметить, что, когда немецкие исследователи пытались построить атомный котел (еще до 1945 г.), им не удалось получить достаточно чистого графита. Они даже думали, что получить его вообще невозможно. Поэтому немцы пошли по пути использования тяжелой воды, что затянуло их исследования. Построить котел им так и не удалось.

Первый котел, построенный в СССР, так же как и первый в мире американский котел, построенный группой ученых под руководством Ферми в 1942 году, был очень несовершенен, он даже не имел специальной охлаждающей системы и поэтому работал на очень низкой мощности.

Современные промышленные атомные котлы (хотя с тех пор прошло не более 10 лет) отличаются от своего «прародителя» не меньше, чем современный паровоз от машины Уатта. Котел обязательно снабжен охлаждающей системой. Вода или какой-нибудь другой теплоноситель протекает по специальным каналам через работающий реактор и охлаждает его. Затем это тепло передается пару, который и приводит во вращение турбины. Конструкции котлов будут описаны ниже, но прежде хотелось бы сказать несколько слов о том, что может дать современный реактор.

Самое ценное — это та энергия, которую можно получить при эксплуатации котла. Но этим его значение не исчерпывается. При работе котла образуется много радиоактивных изотопов. Эти искусственные радиоактивные вещества находят в науке и технике очень широкое применение, и значение их в хозяйстве растет с каждым годом.

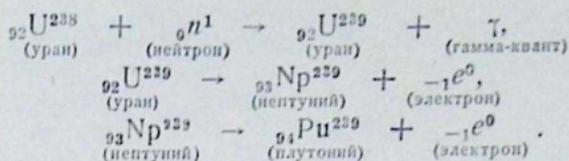
Методы получения искусственных радиоизотопов очень просты. Большинство из них получается нейтронной бомбардировкой естественных атомов. Например, облучая нейтронами природный азот (${}^7\text{N}^{14}$), можно легко получить радиоуглерод по реакции:



Для практического осуществления этой реакции достаточно по каналам котла пропустить раствор какого-либо азотсодержащего соединения (например, азотнокислого аммония NH_4NO_3). Получающийся изотоп углерода ${}^6\text{C}^{14}$ бета-активен (с периодом полураспада 5700 лет). Он находит широкое применение при химических и биологических исследованиях. Аналогичным путем могут быть получены радиоизотопы серы-35, фосфора-32, натрия-24, кобальта-60. Сера, фосфор и натрий бета-активны с периодом полураспада соответственно 87 дней, 14 дней и 15 часов. Очень широкое применение получил изотоп кобальта-60, который, помимо электронов, испускает очень жесткие (1,3 мэв) гамма-лучи с периодом полураспада 5,3 года. Он применяется в медицине (при лечении рака), в технике, где с успехом заменяет рентгеновские установки, и т. д. В новой пятилетке намечено широкое использование в нашей стране радиоактивных изотопов в промышленности, сельском хозяйстве и медицине, в частности для контроля за качеством материалов, для управления производственными процессами и автоматического регулирования этих процессов, а также для диагностики и лечения различных болезней. К концу пятилетки количество радиоактивных изотопов, полученных в атомных реакторах, будет эквивалентно приблизительно 10 тысячам т радия. «Если вспомнить, что во всем мире к началу работ по атомной энергии имелось только несколько килограммов радия, то станет ясным, что за истекшее время в деле использования радиоактивных веществ происходит крупнейшая революция» (из речи И. В. Курчатова на XX съезде КПСС). Кроме радиоактивных изотопов, в котле образуются трансураниевые элементы. Из них наиболее важным является плутоний, который образуется в результате поглощения ураном-238 нейтрона с последующими превращениями.

Уран-238 превращается в радиоактивный изотоп ${}_{92}\text{U}^{239}$, который после испускания электрона (с периодом полураспада около 24 минут) переходит в новый элемент — нептуний ${}_{93}\text{Np}^{239}$. Этот элемент тоже радиоактивен и, испуская электроны с периодом полураспада 2,33 дня, переходит в другой, новый элемент — плутоний (${}_{94}\text{Pu}^{239}$).

Символически эти реакции могут быть записаны следующим образом:



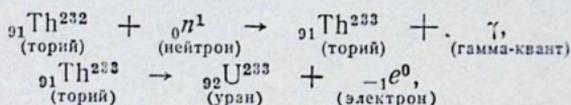
Плутоний уже сравнительно стабилен, его период полураспада—2400 лет. Искусственные элементы нептуний и плутоний, как и другие трансурановые элементы, в большом количестве стало возможным получать лишь в котле.

Промышленное значение из всех новых элементов имеет плутоний. Он обладает свойством делиться под действием нейтронов, испуская при этом еще несколько нейтронов, точно так же, как уран-235, и поэтому тоже может служить активным ядерным горючим.

Мы видим, что котел при работе, сжигая одно активное вещество — уран-235, — создает взамен его другой столь же активный продукт. Восполняется ли убыль урана-235 образовавшимся плутонием частично или полностью, это зависит от условий работы котла.

Получение активного ядерного горючего плутония в чистом виде сейчас проще и дешевле, чем получение чистого урана-235. Это происходит потому, что выделить образовавшийся плутоний из урана гораздо легче (ввиду различия их химических свойств), чем разделить изотопы урана-235 и урана-238.

Так же как и плутоний, в котле может быть получено еще одно активное делящееся вещество — уран-233. Если в котел внести природный элемент — торий-232, то под действием нейтронов в котле пойдет реакция:



в результате которой образуется изотоп урана-233. Отделить его от тория химическим путем не представляет труда.

Уран-233 и плутоний-239, так же как и уран-235, используются в качестве «ядерного» горючего в атомных бомбах. При производстве и хранении ядерного взрывчатого вещества следует соблюдать правила безопасности, в частности нельзя допускать, чтобы активное вещество скапливалось где-либо в количестве, превышающем его критическую массу. В противном случае неизбежен взрыв. Поэтому переплавка плутония и урана, хранение и другие операции могут производиться лишь в очень маленьких сосудах, вмещающих меньше 1 кг металла. Если эти меры предосторожности приняты, обращение с ядерным горючим совершенно безопасно.

КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРОВ

Хотя принцип действия всех реакторов одинаков, конструкции их в деталях могут сильно отличаться в зависимости от назначения и условий работы реактора. Чтобы познакомиться с котлом, предназначенным в основном для производства энергии, рассмотрим реактор, работающий на советской атомной электростанции. Постройка ее была закончена в 1954 году, и 27 июля 1954 года станция дала первый ток.

В котле этой станции в качестве горючего используется слегка обогащенный уран (содержание U^{235} доходит до 5 процентов), а в качестве замедлителя — графит.

Весь котел помещен в герметический стальной кожух (рис. 9 и 10), заполненный графитом. Центральная часть графитовой кладки

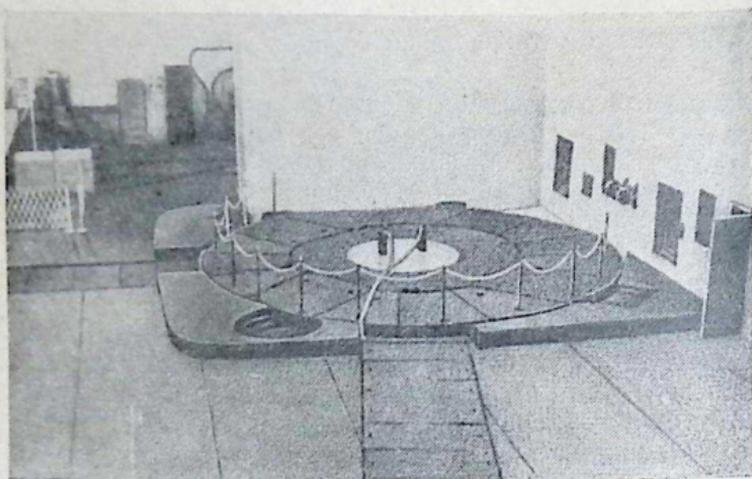


Рис. 9

пронизана рабочими каналами — стальными тонкостенными трубками, внутри которых помещены урановые стержни (всего таких каналов 128). Полный вес урановых стержней, загружаемых одновременно, — 550 кг. Располагаются каналы так, что их совокупность образует цилиндрическую активную зону размером 150×170 см. По этим же каналам циркулирует и охлаждающая котел вода.

Основное назначение теплоносителя (в данном случае воды) состоит в том, чтобы охлаждать котел и передавать взятую у него тепловую энергию другим агрегатам, превращающим это тепло в электроэнергию. На нашей атомной электростанции принята так называемая двухконтурная система охлаждения. Это значит, что вода, циркулирующая через реактор, сама к турбинам не подходит, а в теплообменнике передает свое тепло другой воде, которая уже пре-

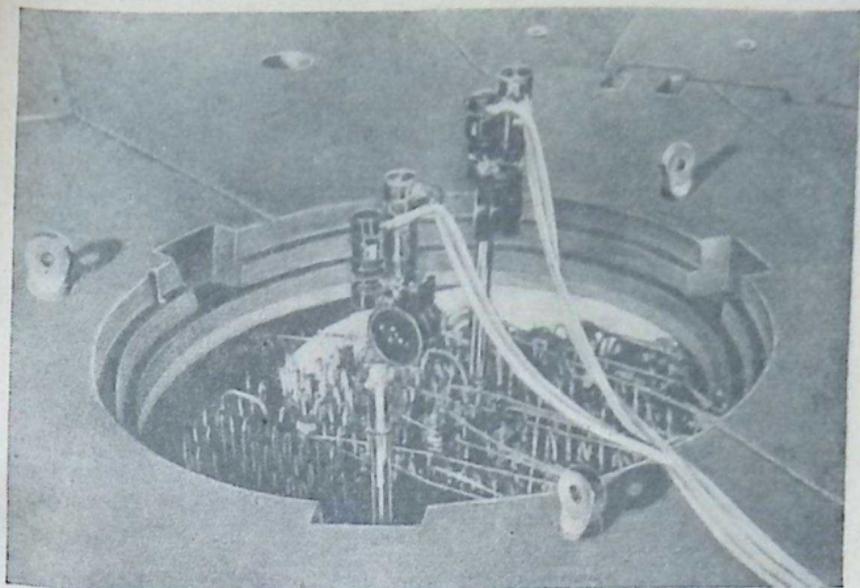


Рис. 10

образуется в пар и приводит в действие турбины, вращающие динамомашину. Двухконтурная система охлаждения устроена потому, что вода, проходящая через реактор, заражается радиоактивными примесями и пускать ее прямо в турбины значило бы подвергать опасности радиоактивного заражения как сами турбины, так и персонал, обслуживающий их. Вода вторичного контура практически уже не радиоактивна, и работать с ней совершенно безопасно.

Температура воды первичного контура при выходе из реактора достигает 270°C . Чтобы при этой температуре вода не закипела, во всем первичном контуре поддерживается высокое давление — 100 атм. (температура кипения при таком давлении составляет 309°C). Циркуляция воды первичного контура осуществляется специальными мощными насосами. Вода вторичного контура, получая тепло в теплообменнике, превращается в пар и нагревается до температуры $255\text{—}260^{\circ}\text{C}$. Давление во всем вторичном контуре значительно ниже, чем в первичном, — около 12,5 атм. Вода первичного контура охлаждается в теплообменнике до 190°C и затем через насосы снова поступает в реактор. Вода вторичного контура в виде пара, нагретого до 260°C , поступает в турбогенератор и приводит во вращение турбину.

Весь котел, а также основная часть первичного водяного контура окружены так называемой биологической защитой, назначение которой — оградить персонал от действия нейтронного и гамма-излучения котла. Для этого котел с боков окружен водяной рубашкой толщиной 100 см, замедляющей и поглощающей нейтроны, и, кроме

того, толстой бетонной стеной (около 3 м), поглощающей гамма-излучение.

Сверху котел защищен графитовым отражателем и несколькими слоями чугуна и стали. Уровень радиоактивности как около котла, так и во всех помещениях станции контролируется ионизационными камерами и счетчиками. Если доза радиоактивности превосходит допустимую, то в помещении автоматически включаются световая и звуковая сигнализация. Сигналы об этом поступают также на центральный пульт управления. Все помещение станции тщательно вентилируется, а зараженный воздух выбрасывается в высокую трубу.

Современный котел, как это уже видно из предыдущего, — сооружение столь сложное, что управление им превращается в исключительно ответственную задачу.

Любая, даже незначительная, авария устраняется с большим трудом. Поэтому, чтобы избежать аварий при работе котла, за ним должен быть установлен самый тщательный контроль. Управление котлом и контроль за его работой осуществляются на расстоянии с центрального пульта управления, куда поступают все сведения о работе котла.

Скорость движения воды должна быть достаточно большой — около 300 т в час. В противном случае вода может перегреться, проходя через реактор, и закипеть, что вызовет аварию котла.

Все оборудование первичного контура должно быть в высокой степени герметичным, для того чтобы полностью исключить малейшую возможность течи. При перепаде давления в 100 атм. это сделать не так просто. С таким требованием промышленность столкнулась впервые. Особенно трудно было создать насосы высокой мощности и в то же время герметичные настолько, чтобы полностью исключить опасность просачивания воды, находящейся под давлением в 100 атм., через сальниковые уплотнения наружу. Для предотвращения возможной аварии в этих местах на насосах были созданы внешние гидравлические затворы, то есть на сальниковые уплотнения были надеты специальные водяные рубашки, наполненные обычной водой. В них специальными подпиточными насосами создавалось давление в 100 атм., компенсирующее внутреннее давление радиоактивной воды.

Основной характеристикой работы котла служит температура воды при выходе из реактора. На центральный пульт выведены показания термометров каждого из каналов. Повышение температуры свидетельствует об увеличении интенсивности цепной реакции. Регулирование ее производится специальным кадмиевым стержнем: опускание его уменьшает интенсивность, поднятие — увеличивает. Положение этого стержня фиксируется с точностью до 0,1 мм.

Другим показателем служат давление и объем воды в первичном контуре; уменьшение объема свидетельствует об образовании течи. В этом случае работу котла необходимо прекратить, что достигается спусканием аварийного кадмиевого стержня. Все эти процессы автоматизированы: например, уменьшение объема автомати-

чески вызывает опускание аварийного стержня и т. д. Благодаря применению автоматики все управление котлом может быть осуществлено одним человеком.

При управлении котлом учитывается, что содержание активного изотопа урана-235 в котле за время его работы уменьшается (за счет выгорания), а содержание вредных примесей — осколков деления (или, как говорят, радиоактивного шлака) увеличивается. Поэтому необходимо специальное устройство для поддержания мощности котла на одном и том же уровне. Для этой цели, кроме регулирующих кадмевых стержней, в котле имеется несколько так называемых компенсационных стержней из карбида бора (бор, так же как и кадмий, жадно поглощает медленные нейтроны). С момента начала работы котла, когда количество урана больше критического, эти стержни опущены глубоко и сдерживают цепную реакцию. Затем, по мере выгорания и загрязнения урана, эти стержни постепенно поднимаются. К концу работы, когда уран «выгорел» достаточно глубоко (в котле электростанции глубина выгорания не так уже велика: содержание урана-235 падает с 5 процентов до 4,2 процента), котел останавливается, урановые стержни заменяются новыми. Эта операция производится с помощью специального крана. Срок работы стержня — около 2,5 месяца, замена стержней длится 2—3 дня.

Совершенно особую и чуть ли не самую трудную проблему атомной энергетики составляет проблема обращения с высокоактивными образцами. С этой проблемой сталкиваются при ремонте котла и при различных исследованиях как деталей котла, так и материалов, специально облученных в котле в целях выяснения результата действия нейтронов на тот или иной материал. Все части работающего реактора — стальные трубки, урановые стержни и т. п. — становятся радиоактивными. Эта активность сохраняется затем долгое время и после прекращения работы котла. Активность отдельных деталей может быть очень велика — до 50 тысяч кюри¹.

Излучение деталей достигает миллиона рентгенов в минуту. Подходить близко к ним, разумеется, нельзя. Чтобы обращаться с подобными деталями, созданы специальные механизмы — манипуляторы. Эти механизмы служат как бы продолжением рук человека (иногда их называют «автоматическими руками»). С их помощью человек может, находясь в безопасности, под защитой бетонной стены, взять необходимую вещь, переместить ее в другое место, вставить в станок, распилить, просверлить и т. д. Сейчас уже созданы копирующие манипуляторы, способные воспроизводить все движения человеческой руки. Следить за всеми операциями можно либо через перископическое устройство, либо с помощью телевизионной установки.

Исследование высокоактивных образцов и деталей (активность 20—25 тыс. кюри) ведется в специальных так называемых «горя-

¹ Кюри — единица радиоактивности. 1 кюри — количество радиоактивности, эквивалентное излучению 1 г радия (37 млрд. частиц в секунду).

чих» лабораториях. В них имеется ряд камер, в которых происходит механическая обработка, шлифовка образцов и т. п. Заходить в эти камеры во время работы, разумеется, нельзя. В каждой камере находится манипулятор, управление которым производится из специальной «операционной» комнаты, отделенной от рабочей камеры бетонной и чугунной защитой. Внутри рабочая камера выложена полированной нержавеющей сталью. После работы вся камера вместе со станками и приборами промывается водой и раствором азотной кислоты. Для химических исследований существует аналогичная «горячая» аналитическая лаборатория.



Рис. 11

Работа с менее активными образцами (порядка 1 кюри) уже значительно проще. Здесь можно обходиться без манипулятора, но меры предосторожности безусловно принимаются. Все сотрудники работают в специальных халатах из пластмассы, которые после работы промываются растворами кислот и щелочей¹. Работа с образцами ведется в специальных перчаточных шкафах. Для защиты от радиоактивной пыли применяются специальные скафандры из плексигласа и воздухонепроницаемые костюмы из пластмассы (рис. 11). Воздух к такому костюму подается из специального резервуара. Чтобы человек чувствовал себя в этом костюме свободно, через костюм надо ежеминутно прокачивать 150—200 литров воздуха. За каждым сотрудником атомной станции установлен самый тщательный ежедневный врачебный контроль.

В последнее время, чтобы уменьшить радиоактивность материалов (и тем самым опасность радиоактивного заражения), стремятся употреблять металлы, не способные захватывать нейтроны и делаться радиоактивными. Из таких материалов известны цирконий и бериллий.

¹ Интересно отметить, что в этих халатах не должно быть обычных наточных швов, поэтому «сшивание» отдельных частей в них производится специальной высокочастотной сваркой пластмассы.

Первая атомная электростанция бесперебойно проработала уже больше года. Разумеется, она еще несовершенна: мощность ее невелика, и электроэнергия, вырабатываемая ею, еще сравнительно дорога. Но опыт ее работы представляет исключительную ценность, и на его основе уже запроектированы станции на 100 тысяч и 200 тысяч кв (по мощности сравнимые с Днепрогэсом). В атомных котлах этих станций будут учтены недостатки их предшественника.

Среди недостатков можно отметить следующие. В описанном котле используется обогащенный уран (содержание урана-235 составляет 5 процентов по сравнению с 0,7 процента в естественной смеси), который сравнительно с природным ураном — дорогое ядерное горючее. Кроме того, цепная реакция в нем идет на очень медленных нейтронах, быстрых нейтронов там очень мало, так что плутоний почти не образуется. Вода в качестве теплоносителя — не лучший материал. Действительно, даже при давлении в 100 атм. температуру котла нельзя поднять выше 309° С (температура кипения при давлении 100 атм.). Если в качестве теплоносителя использовать газ (например, гелий) или, еще лучше, расплавленный металл (например, натрий), то температура котла может быть более высокой, что положительно скажется на воспроизводстве плутония.

Вместо графита можно было бы выбрать другой замедлитель, например тяжелую воду. Это дало бы возможность уменьшить размеры активной зоны котла до 40—50 см (так как путь, на котором нейтроны замедляются до нужных скоростей в воде, меньше, чем в графите). Правда, температура работы такого котла должна быть более низкой, и тяжелая вода слишком дорогой продукт, так как в естественной воде ее очень мало.

Возможен также котел, работающий на обычной воде, но тогда необходимо использовать не природный, а обогащенный уран с содержанием изотопа-235 около 10 процентов¹. Вода в этих реакторах служит одновременно и замедлителем, и отражателем, и теплоносителем.

В Советском Союзе построено два таких реактора (о чем сообщалось на Женевской конференции). Они предназначены как для научных исследований, так и для производства радиоактивных изотопов. В этом отношении они даже удобнее графитового котла, так как плотность потока нейтронов в них больше. Для получения радиоактивных изотопов внутри активной зоны котла (состоящей из ряда урановых стержней) делается ряд горизонтальных и вертикальных каналов, по которым пропускаются растворы разных соединений. Мощность таких котлов сравнительно невелика — около 2000 кв².

¹ Обогащенный уран должен применяться потому, что естественная вода поглощает тепловые нейтроны.

² Приводится тепловая мощность. Поэтому эту цифру следует сравнивать с соответствующей тепловой мощностью графитового котла электростанции, составляющей 30 тысяч кв.

Конструкции зарубежных реакторов разнообразны, и некоторые особенности каждого из них объясняются тем или иным назначением реактора.

Американский атомный котел, демонстрировавшийся на Женевской конференции, представляет собой бак, внутри которого помещен небольшой блок из урановых стержней. Вода в этом котле служит одновременно и замедлителем, и отражателем, и биологической защитой (слой воды в 6 м эквивалентен слою бетона в 3 м). Для показательных целей такой котел очень удобен, так как через прозрачный слой воды можно видеть все детали устройства реактора, а по специальному свечению, вызываемому в воде быстрыми электронами, можно следить за его работой. Подобный же демонстрационный реактор установлен на нашей промышленной выставке, открывшейся в Москве летом 1956 года.

Однако промышленные котлы в Америке предпочитают делать той же конструкции, что и у нас. Сообщалось, например, что в Америке запроектирован котел мощностью в 60 тысяч кв, горючим веществом которого будет уран, замедлителем — графит, а теплоносителем — вода (то есть котел такой же, как и наш).

В Англии строят котлы несколько иной конструкции. Вместо воды там предпочитают использовать газообразное охлаждение гелием. Преимущество такого теплоносителя состоит в том, что даже при высоких температурах (300°C) давление газа невелико. Недостаток газообразного теплоносителя — в его малой теплоемкости (по сравнению с водой). Поэтому газ приходится пропускать через котел с колоссальной скоростью.

Реакторы принципиально иной конструкции тоже возможны. Очень интересен, например, однородный, или, как его называют, гомогенный, реактор. В перечисленных выше конструкциях уран и замедлитель располагались отдельно: уран в виде стержней вводился в замедлитель. Возможны, однако, и такие реакторы, в которых уран равномерно распределен в замедлителе. Если взять раствор какой-либо соли урана или взвесь окиси урана в тяжелой воде, то в такой системе тоже разовьется цепная реакция. Эта конструкция реактора имеет ряд преимуществ перед обычной. Таким реактором легче управлять, легче осуществлять теплообмен и т. д.

Особенно интересен так называемый кипящий гомогенный реактор. Принцип его действия очень прост: в котле поддерживается такая температура, что вода доводится до кипения и затем в виде пара поступает в теплообменник (температура воды определяется режимом работы и в первую очередь давлением). В теплообменнике она отдает свое тепло воде другого контура, конденсируется и в виде жидкости возвращается в реактор. В такой схеме вода первого контура циркулирует под действием тепла без помощи насосов. Недостаток такого типа реакторов в том, что они не могут работать при очень высокой температуре, как и все реакторы с водяным теплоносителем.

До недавнего времени горючим веществом в котлах был главным образом уран-235. Образование плутония шло слабо и не компенсиро-

ровало убыль урана-235 даже в котлах, специально приспособленных для получения плутония. Однако в настоящее время уже создаются котлы, в которых плутония образуется не меньше, а даже больше, чем убывает урана-235 (бридинговые котлы, или размножители). Образование плутония в них идет тем же путем, что и в обычных котлах.

Коэффициент воспроизводства активного вещества в бридинговых реакторах достигает 1,5 (то есть плутония образуется в полтора раза больше, чем «сгорает» урана-235). Такой высокой степени воспроизводства в размножителях удается достигнуть в основном в результате более полной очистки урана от вредных примесей, поглощающих нейтроны, обогащения урана и уменьшения содержания замедлителя, то есть благодаря переходу к работе на более быстрых нейтронах. Все эти меры уменьшают вероятность захвата нейтронов вредными примесями и увеличивают вероятность поглощения нейтронов ураном-238 и, следовательно, коэффициент воспроизводства. Благодаря малому содержанию замедлителя и высокой чистоте урана критические размеры активной зоны таких реакторов невелики, а рабочая температура может быть очень большой. Недостаток этих реакторов в том, что для работы их используется сильно обогащенный уран с содержанием активного вещества урана-235 или плутония от 20 до 50 процентов. Таким образом, в процессе работы бридингового котла, помимо выделения энергии, происходит восстановление горючего материала: убывает лишь количество урана-238 или тория. Другими словами, «горючим» в таких котлах служит уран-238 или торий, а активное делящееся вещество играет роль катализатора. Бридинговый котел гораздо выгоднее обычного, так как в нем «сжигаются» не дорогостоящие изотопы, а значительно менее ценные продукты. Можно смело сказать, что будущее принадлежит котлам такого типа.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНЫХ КОТЛОВ

Какие же преимущества имеет атомная электростанция перед обычными тепловыми станциями, работающими на угле или нефти? Уже сейчас, на заре века атомной энергии, стоимость атомной электроэнергии не сильно отличается от стоимости «обычной».

В недалеком будущем, когда бридинговые котлы найдут широкое применение, стоимость атомной энергии значительно снизится. Ввиду высокой калорийности атомного горючего расход его ничтожен. Так, для станции мощностью в 200 тысяч киловатт потребуется около 1 т природного урана в год. Аналогичная по мощности станция, работающая на угле, поглощала бы эшелон топлива в день.

Интересно привести сравнительные данные угольной электростанции на 100 тысяч кв и атомной станции, запроектированной в СССР на ту же мощность. (Эти данные заимствованы из доклада Д. И. Блохинцева на Женевской конференции.)

Показатели	Единица измерения	Угольная электростанция	Атомная электростанция
Вес машины и механизмов	т	2 700	700
Вес металлоконструкций	"	1 250	200
Вес трубопроводов и арматуры	"	300	200
Вес обмуровки и кладки (для атомной станции—графитовая кладка)	"	1 500	500
Вес механизмов топливного склада	"	250	—
Вес подвижного состава	"	300	—
Объем бетонных и железобетонных работ	м ³	4 000	9 000
Объем зданий (без турбинного цеха)	"	75 000	50 000
Площадь застройки	га	15	5
Расход мощности на собственные нужды	квт	8 000	5 000

Что касается стоимости электроэнергии, то она по проекту будет примерно одинакова для обеих станций. Если же электростанции строить в труднодоступной местности, вдалеке от источников сырья, то преимущество атомной станции очевидно.

По новому пятилетнему плану в нашей стране предусмотрено построить в течение 1956—1960 годов атомные электростанции общей мощностью в 2—2,5 миллиона квт. Сооружение атомных электростанций будет производиться в первую очередь в районах, не имеющих собственной топливной базы. В частности, намечено построить две атомные электростанции общей мощностью в 1 миллион квт на Урале и атомную электростанцию в 400 тысяч квт вблизи Москвы. Мощность электростанций, которые будут пущены в текущей пятилетке, сравнима с мощностью крупнейших в мире электростанций, например Куйбышевской. Мощности этих атомных станций превосходят планируемые мощности атомных станций в США и Англии. При этом строительство атомных станций в нашей стране не предполагает использования какого-либо типового проекта станций, а разворачивается в порядке большого эксперимента. Будет построено до 10 типов атомных реакторов мощностью от 50 до 200 тысяч квт каждый: на быстрых и медленных нейтронах, на нейтронах промежуточных энергий, с замедлителем из графита, бериллия, тяжелой и простой воды, с газовым, водяным и металлическим охлаждением. Будет построен мощный реактор с использованием тория.

Освоение атомной энергии колоссально расширяет энергетические ресурсы. Запасы только активного изотопа-235 по калорийности в 10 раз превосходят запасы угля и нефти. Если же учесть, что благодаря бридинговому процессу будет возможно получать энергию, «сжигая» уран-238 и торий, то запасы ядерного горючего увеличатся более чем в 100 раз. В случае же использования термоядерных реакций, при которых «сжигаются» такие вещества, как водород и литий, запасы атомного горючего станут практически

неограниченными. Можно думать, что в недалеком будущем использование ядерного горючего для получения электроэнергии целиком вытеснит употребление для этой цели такого ценного сырья, как уголь и нефть.

Помимо использования атомной энергии на электростанциях, ее можно будет использовать и для других целей — в качестве источника энергии на транспорте. Основная остающаяся на этом пути трудность — это большой вес атомного котла. Препятствием служит не столько вес самого котла (сейчас уже можно сконструировать на обогащенном уране котел очень малых размеров и небольшого веса), сколько вес толстой бетонной оболочки (биологической защиты), на которую и приходится основная доля тяжести. В настоящее время котел может быть использован либо на стационарной установке, либо на достаточно больших транспортных сооружениях.

В Америке уже построена подводная лодка «Наутилус»¹, снабженная двигателем, работающим на атомной энергии. Это самая большая и самая быстроходная из существующих подводных лодок. Длина ее — 91 м, а скорость под водой 37 км/час. Эта лодка была построена не сразу. В первой (опытной) модели проблема защиты персонала от нейтронного излучения котла не была решена еще полностью. Эта модель испытывалась в вырытом специально для этой цели водоеме в пустыне Айдахо. В реакторе атомной подводной лодки применен ряд технических новшеств. Так, вся охлаждающая система котла построена из специальных циркониевых труб. Цирконий — ранее почти не применявшийся в технике металл — характерен тем, что ядра его атомов не поглощают нейтронов и не становятся радиоактивными. Это уменьшает опасность поражения экипажа лучевой болезнью. В окончательной модели подводной лодки проблема защиты была решена удовлетворительно, и лодка успешно совершила уже несколько рейсов.

Преимущества атомной подводной лодки перед обычной очевидны. Обычная подводная лодка должна время от времени всплывать, для того чтобы с помощью своих дизель-моторов зарядить аккумуляторные батареи (под водой дизели, естественно, долго работать не могут). Атомная подводная лодка не нуждается в этом, так как атомному котлу (в отличие от дизеля) воздух не нужен. Поэтому атомная подводная лодка может находиться под водой практически неограниченное время. Необходимый для дыхания людей кислород легко может быть получен, например, электролизом воды. Атомная подводная лодка может принимать участие в арктических экспедициях, где ее роль трудно переоценить.

В нашей стране в текущей пятилетке будет построен ледокол с атомным двигателем, проект которого уже разработан. Это будет корабль нового типа. С помощью такого корабля легче будет освоить для судоходства высокоширотные трассы и значительно

¹ Это название заимствовано из известной книги Жюль Верн «80 000 километров под водой», в которой описана фантастическая для того времени подводная лодка «Наутилус».

продлить сроки навигации в северных морях. Применение атомной энергии для двигателя даст ледоколу громадные преимущества по сравнению с ледоколом, питающимся углем или нефтью. Ледокол с атомной силовой установкой будет превосходить такой же по величине ледокол, работающий на обычном топливе, по длительности плавания без захода в порты для бункеровки в 10—12 раз, а по мощности — более чем в 1,5 раза.

На обычных ледоколах до 30 процентов водоизмещения судна используется под запасы топлива, которые на отдельных судах достигают 3 000 т. Суточный расход топлива таких ледоколов — около 100 т. Поэтому обычный ледокол не может отходить от портов на длительное время. На атомном ледоколе суточный расход атомного горючего исчисляется граммами. Поэтому район плавания его становится практически неограниченным. Ледокол может не заходить в порты в течение 2—3 лет. Та часть водоизмещения корабля, которая отводится обычно для хранения запасов топлива, в атомном ледоколе может быть использована для увеличения мощности двигателя. Мощность главных двигателей в новом ледоколе будет достигать 44 тысяч л. с., а водоизмещение корабля — 16 тысяч т. Такой ледокол сможет проводить караваны кораблей в тяжелых арктических льдах, непроходимых для обычных судов.

С трибуны XX съезда КПСС академик Курчатов призвал широко развить работы в текущей пятилетке по атомным силовым установкам не только для ледокола, но и для других кораблей, для авиации и сухопутного транспорта.

ГЛАВА VI

УСТРОЙСТВО АТОМНОЙ БОМБЫ

Цепная реакция в чистом уране-235, плутонии-239 и уране-233 развивается с громадной быстротой, если эти изотопы находятся в количестве, большем, чем их критическая масса. Поэтому они могут применяться в качестве «ядерного» взрывчатого вещества в так называемой атомной бомбе.

Атомная бомба представляет собой стальной баллон, внутри которого на некотором расстоянии друг от друга расположены полушария одного из перечисленных выше изотопов. Масса каждого полушария меньше критической. Поэтому в положении, когда полушария раздвинуты, цепная реакция не идет. В момент взрыва, который при помощи часового или иного механизма может быть заранее определен, полушария быстро сближаются друг с другом. Быстрое сближение полушарий достигается тем, что их «выстреливают» друг в друга, для чего за каждым полушарием помещается заряд обычного взрывчатого вещества. Два полушария, слипаясь, образуют один сплошной кусок, масса которого уже больше критиче-

ской. В тот же момент происходит взрыв. Применение взрывчатых веществ для соединения полушарий вызвано тем, что сближение полушарий урана должно происходить очень быстро, в противном случае в первые же моменты полушария будут отброшены один из другого и не прореагируют полностью. Для этой же цели служит массивная стальная рубашка, предотвращающая преждевременное разбрасывание ядерного горючего. Кроме того, чтобы в первые моменты взрыва процесс развивался быстрее и реакция шла полнее, урановые полушария помещают в графитовую оболочку, отражающую нейтроны и увеличивающую их концентрацию в уране. Однако, несмотря на все эти меры, полностью исключить потери оказывается невозможным и значительная часть ядерного горючего в бомбе пропадает.

Несмотря на кажущуюся простоту, атомная бомба в действительности представляет собой довольно сложное и тяжелое устройство. Вес ее может колебаться от нескольких сот килограммов до нескольких тонн. Вес самого ядерного горючего составляет ничтожную часть от всего веса бомбы, львиная доля которого приходится на стальную оболочку.

ДЕЙСТВИЕ АТОМНОГО ОРУЖИЯ И ЗАЩИТА

Мощность атомной бомбы вычисляют в так называемом тротиловом эквиваленте, то есть в количестве взрывчатого вещества, тротила, при сгорании которого выделилось бы столько же энергии, сколько при полном сгорании ядерного горючего вещества, заключенного в атомной бомбе.

Обычно в атомной бомбе в результате очень быстрого разлета оболочки бомбы все вещество не успевает прореагировать. Заряд, эквивалентный 20 тысячам т тротила, по видимому, наимыгоднейший заряд для атомной бомбы, с точки зрения наиболее полного его сгорания. Бомбы с такой мощностью носят название номинальных. Такие именно бомбы были сброшены в 1945 году на Хиросимо и Нагасаки.

Мощность атомных бомб (их калибр) может колебаться в некоторых пределах. Наряду с номинальными атомными бомбами известны бомбы «малого» калибра (тротиловый эквивалент около 5 000 т) и большого калибра (до 100 тысяч т тротила).

Иногда встает вопрос: можно ли приготовить атомную бомбу очень малого калибра? Из предыдущего ясно, что это сделать принципиально невозможно, так как масса урана в ней во всяком случае должна превосходить критическую, иначе бомба не взорвется.

Приготовить атомную бомбу очень большого калибра тоже невозможно. Для этого нужно было бы брать слишком большие куски урана, чего сделать нельзя, так как их масса до соединения должна быть меньше критической. Таким образом мощность атомной бомбы, как говорят, «ограничена сверху».

В момент взрыва в бомбе и непосредственно вблизи нее развивается очень высокая температура — несколько десятков миллионов градусов. Благодаря столь высокой температуре значительная доля энергии взрыва (около 20 процентов) выделяется в виде света. Вспышка света длится несколько секунд и бывает видна на рас-

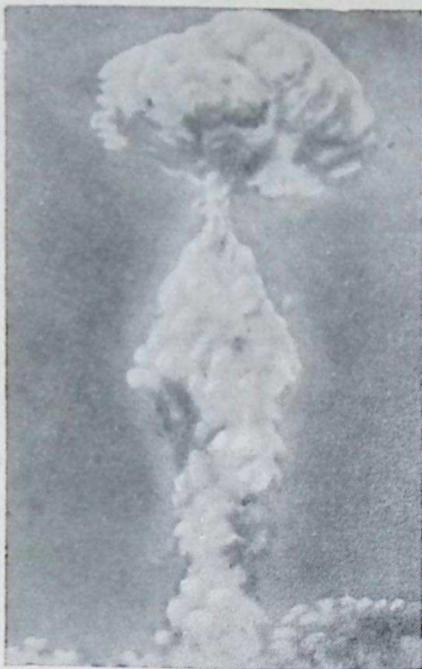


Рис. 12

стоянии нескольких сот километров. На месте взрыва возникает ослепительно белый шар, который затем вытягивается, превращаясь в характерное грибовидное облако, состоящее из раскаленных газов (рис. 12). Это облако быстро поднимается на высоту 5—10 км и более и только там начинает постепенно рассеиваться. В момент взрыва давление в эпицентре поднимается до нескольких миллионов атмосфер, что вызывает очень мощную ударную волну, распространяющуюся во все стороны со скоростью, превышающей в начальные моменты скорость звука (330 м в секунду). На создание ударной волны идет около половины энергии взрыва. Волна является самым разрушительным фактором взрыва.

Кроме света и ударной волны, при взрыве выделяется масса нейтронов и гамма-лучей (так называемое проникающее

излучение). Нейтроны излучаются главным образом только в первые моменты взрыва; напротив, гамма-лучи продолжают интенсивно испускаться облаком в течение последующих 10 секунд за счет распада радиоактивных осколков деления ядер урана.

Под действием выделяющихся при взрыве нейтронов и гамма-лучей в месте взрыва образуется множество искусственных радиоактивных элементов, распад которых создает так называемую остаточную радиацию. Зараженный радиоактивными элементами воздух интенсивно рассеивается в атмосфере, поэтому заражение атмосферы в этом смысле не представляет опасности. Длительную остаточную радиоактивность (до 2 недель) испытывают вещества, входящие в состав земного покрова. Если взрыв произведен достаточно низко, то в воздух поднимается масса земли в виде радиоактивной пыли, которая может переноситься в атмосфере на большие пространства, и, осаждаясь, заражать отдаленные от места взрыва районы. Такой пылью, образованной при испытательном наземном взрыве водород-

ной бомбы, произведенном США на одном из островов Японского моря в 1954 году, были поражены японские рыбаки.

Ударная волна, свет и радиоактивность — три основных поражающих фактора при взрыве атомной бомбы. Действие их таково.

Ударная волна движется от центра взрыва (или его эпицентра, если взрыв произошел не на земле, а в воздухе) к периферии, постепенно ослабевая. Вблизи от места взрыва она обладает колоссальной разрушительной силой и сохраняет ее примерно на расстоянии 1 км от центра. Все постройки обычного типа на этом расстоянии разрушаются. Специальные постройки усиленного типа (железобетон) ударной волной разрушаются меньше, а на подземные укрепления она почти не действует. Глубокие подземные убежища типа метро не разрушаются, даже если они находятся непосредственно под местом взрыва. На человеческий организм сама волна действует не сильно, во всяком случае на расстоянии более 800 м — не смертельно. Поэтому в открытой местности ударная волна представляет гораздо меньшую опасность, чем вблизи каких-либо построек, могущих разрушиться.

Дальность действия и сила ударной волны зависят от того, где произошел взрыв. Наиболее мощная ударная волна возникает при так называемом воздушном взрыве, происшедшем на высоте 300—400 м. При наземных взрывах ударная волна распространяется на значительно меньшее расстояние от центра взрыва.

Вспышка света при взрыве атомной бомбы так ярка, что может вызвать пожары, если деревянные постройки находятся на расстоянии 1—2 км от места взрыва. Если свет попадает на незащищенное тело, это вызывает серьезные ожоги. Однако защита от действия света сравнительно проста: лист из негорючего непрозрачного материала толщиной 0,5 см уже служит надежной защитой даже на расстоянии 500 м. На больших расстояниях (3 км) хорошо защищает от ожога даже плотная одежда, предпочтительно белого цвета (так как такая одежда лучше отражает лучи).

Проникающее излучение, образующееся в момент взрыва (в основном гамма-лучи и нейтроны), попадая на человека, вызывает лучевую болезнь. Развивается лучевая болезнь не сразу, а через несколько часов, а иногда и дней после поражения.

Остаточная радиация (радиоактивная пыль, зараженная земля, вода и т. п.) тоже может вызвать лучевую болезнь, особенно если радиоактивная пыль попадает внутрь организма. Остаточная радиация, если не приняты меры предосторожности, в некотором смысле даже более опасна, чем более интенсивное проникающее излучение, так как последнее длится только около 10 секунд, пыль же и земля в месте взрыва сохраняют свою активность примерно в течение 2 недель после взрыва. Остаточная радиация и проникающее излучение сходны по своему действию с действием химических отравляющих веществ. Наибольшее заражение местности и образование радиоактивной пыли происходит при подземном и наземном (невысоко над землей) взрывах. Чтобы усилить действие радиоактивности, бомбу можно начинять кобальтом. В момент взрыва основной изотоп ко-

бальта ($^{27}\text{Co}^{59}$) поглощает нейтроны и переходит в радиоактивный изотоп $^{27}\text{Co}^{60}$, излучающий гамма-лучи большой мощности (порядка 1 мэв). Период полураспада кобальта-60 — 5,3 года, так что активность продуктов взрыва в этом случае сохраняется значительно дольше, чем при взрыве обычной атомной бомбы. Кроме кобальта, для этой цели могут служить и некоторые другие элементы. Таким образом, так называемая «кобальтовая» бомба не является какой-то особой бомбой, а представляет собою обычную атомную бомбу, радиоактивное действие которой значительно усилено.

Для защиты от радиоактивной пыли могут употребляться те же средства, что и для противохимической защиты, то есть противогаз и комбинезон. Правда, химической дегазации (в смысле нейтрализации зараженных веществ, покрывающих предметы и кожные покровы, как это делается в случае обычных отравляющих веществ) при радиоактивном заражении провести нельзя, так как никакими химическими средствами уничтожить радиоактивность невозможно. Поэтому для дезактивации предметов их просто тщательно обмывают. Убежища, снабженные воздухоочистителем, тоже надежно защищают от действия радиоактивной пыли.

ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ

Лучевая болезнь может поразить человека не только при взрыве атомной бомбы, но и в других случаях.

При работе с атомными котлами не исключены различные несчастные случаи или аварии, при которых сотрудники могут получить большую дозу нейтронного или гамма-облучения. Особенно много таких несчастных случаев было в Америке в самом начале проведения работ над атомной энергией. Тогда еще плохо представляли, сколь опасны ионизирующее и нейтронное излучение. Сейчас уже многое прояснилось, но проблему лучевой болезни отнюдь нельзя еще считать решенной.

Непосредственной причиной лучевой болезни служат те ионы (то есть заряженные атомы), которые создаются в человеческом организме при попадании в него быстрых электронов (бета-излучения, альфа-лучей или жесткого гамма-излучения).

Ионы вызывают изменение структуры крови и белка (как говорят, происходит «денатурация» белка), что в свою очередь влечет за собой нарушение деятельности всего организма. От того, сколько ионов образовалось в организме, зависит, будет ли болезнь протекать в легкой или тяжелой форме.

Ионизирующая способность излучения измеряется в специальных единицах — рентгенах. При небольшой дозе облучения (150—200 рентгенов) лучевая болезнь протекает в сравнительно легкой форме и кончается полным выздоровлением больного. Очень маленькие дозы, меньше 0,05 рентгена в день, не опасны для человека и не вызывают каких-либо болезненных явлений. Доза в 0,05 рент-

гена в день считается предельно допустимой, если облучение производится ежедневно. Однако при нерегулярном облучении организм совершенно безболезненно переносит значительно большие дозы облучения. Поэтому просвечивание, при котором облучение достигает 15—20 рентгенов в минуту, совершенно безопасно и не оставляет никаких последствий. Что касается врачей, которые производят рентгеноскопию грудной клетки визуально, без помощи фотопленки, то вредное воздействие на них гамма-лучей значительно ослабляется в результате уменьшения интенсивности излучения после прохождения через просвечиваемый объект и экран. Правила гигиены труда рентгенологов предусматривают такую продолжительность рабочего времени, чтобы доза облучения не превышала предельно допустимую.

В естественных условиях человек (и любое животное) тоже подвергается постоянному ионизирующему облучению космическими лучами. Однако такая естественная доза составляет всего 0,0004 рентгена в день.

Нейтроны сами по себе, попадая в организм, не создают ионов, так как они не заряжены (но, с точки зрения возникновения лучевой болезни, они не менее, а, пожалуй, даже более опасны, чем другие виды облучения). Нейтроны поглощаются ядрами различных атомов организма, после чего эти атомы делают радиоактивными и сами излучают электроны или гамма-лучи. Время жизни (период полураспада) таких атомов может быть достаточно большим. Таким образом, нейтроны создают в организме внутренний и долго действующий источник ионизации, что, конечно, опаснее внешнего облучения. Особенно опасен в этом отношении радиофосфор-32, излучающий электроны с периодом полураспада 14,3 дня, который скапливается в костном мозге и разрушает его. Опасен также и натрий-24 (бета-активен, период полураспада — 14,8 часа), который, находясь в крови, разрушает ее.

Течение лучевой болезни весьма своеобразно: непосредственно после облучения (часа через 2—3) пострадавший чувствует себя плохо, затем это ощущение проходит, и несколько дней (а иногда и недель) человек кажется здоровым. Затем наступает третий, самый опасный период болезни: быстро повышается температура, больной впадает в обморочное состояние. Этот период длится около недели и нередко кончается смертью.

Объясняется это следующим образом. Денатурация белка, вызываемая ионизирующим облучением, — тоже в некотором смысле цепная реакция. Если в организме немного пораженных молекул белка, то он с этим справляется. Если же число денатурированных частиц велико (или если они все время накапливаются, как, например, бывает при нейтронном поражении), то в организме наступают такие изменения, что дальнейшая денатурация идет «сама», даже без воздействия облучения. Процесс этот в отличие от ядерной цепной реакции идет медленно — несколько дней. В конце концов кровь в организме почти вовсе перестает создаваться, и это вызывает тяжелую, третью фазу болезни. В этот период организму опасна не столько

сама болезнь, сколько внешняя инфекция. Даже легкое заражение почти смертельно, так как основные защитники нашего организма — белые кровяные тельца — в этот момент почти не создаются, и организм практически беззащитен.

До недавнего времени медицина не имела средств борьбы с лучевым синдромом (так в медицине называют эту болезнь), особенно если пострадавший получил большую дозу облучения. Доза в 400 рентгенов считалась смертельной. Однако наши медики нашли методы борьбы даже с тяжелой формой лучевой болезни. На Женевской конференции сообщалось об исцелении больного, получившего дозу в 450 рентгенов.

Это не значит, что в медицине найдено какое-то новое лекарство против лучевой болезни: меры борьбы были все те же, то есть переливание крови, впрыскивание пенициллина, стрептомицина (чтобы защитить организм от инфекции) и т. д. Наиболее важным для лечения оказались своевременность этих мер и последовательность операций.

Это только первые шаги в лечении лучевой болезни. Сейчас ведутся поиски новых, более радикальных средств. Вместе с этим развивается и техника безопасности, прогрессируют методы контроля над реакторами, исключая несчастные случаи.

ГЛАВА VII

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

При достаточно высоких температурах энергия хаотического движения частиц становится настолько большой, что может произойти реакция соединения легких ядер. Реакции соединения (синтеза) легких ядер при высоких температурах, идущие с выделением энергии, получили название термоядерных реакций.

Для того чтобы произошла реакция синтеза ядер, исходные ядра должны подойти друг к другу на расстояние действия ядерных сил. Этому препятствуют электрические силы отталкивания между протонами. Чтобы преодолеть эти силы, ядра должны обладать очень большой энергией. Легче всего это препятствие могут преодолеть легкие ядра, обладающие наименьшим зарядом. Как мы уже видели, для протонов эта энергия составляет около 1 мэв, что равно 10^6 эв. Для того чтобы средняя энергия хаотического движения частиц газа достигала этой величины, необходимо было бы газ разогреть до температуры $0,8 \cdot 10^{10}$ К.

При оценках энергии образования нового ядра из двух протонов кинетическая энергия протонов приравнивалась к потенциальной энергии электрического отталкивания. Однако в действительности при столкновении ядер одно ядро с некоторой вероятностью сможет проникнуть в сферу действия ядерных сил другого ядра даже в том случае, если его кинетическая энергия меньше, чем энергия электри-

ческих сил отталкивания. Это свойство присуще лишь очень маленьким объектам, то есть микрообъектам, таким, как ядра или элементарные частицы, движение которых подчиняется законам, отличным от привычных для нас законов движения массивных тел. Так, например, для всех очевидно, что катящийся по ровному месту шарик не сможет на своем пути преодолеть покатый барьер в том случае, если шарик обладает кинетической энергией движения, меньшей, чем потенциальная энергия этого шарика на высоте барьера. В мире же микрочастиц проникновение (как говорят, просачивание) через барьер возможно с некоторой вероятностью и в том случае, когда энергия движения частицы меньше, чем потенциальная энергия барьера. В силу этих законов ядро сможет с определенной вероятностью проникать в сферу действия ядерных сил другого ядра при энергиях, меньших, чем потенциальная энергия барьера, образованного электрическими силами отталкивания. Для протонов вероятность проникновения достаточно велика уже при энергиях около $(10 \div 20) \cdot 10^3$ эв (вместо 10^6 эв). Это соответствует температуре $T = (0,8 \div 1,6) \cdot 10^8$. Если при температуре $T \sim 10^{10}$ реакция соединения протонов должна была бы произойти мгновенно, то при температуре $T \sim 10^8$ градусов реакция протекает в конечное время. Это объясняется тем, что ядра с энергией $(10 \div 20) \cdot 10^3$ эв преодолевают барьер не «наверняка», а с некоторой вероятностью.

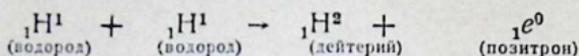
Оценивая температуры, при которых с той или иной скоростью могут протекать определенные ядерные реакции, надо учитывать и то обстоятельство, что в действительности при любой температуре наряду с частицами, обладающими средней энергией, имеются частицы с самыми различными энергиями: как с большими, чем средняя энергия, так и с меньшими¹. Поэтому и при температурах, более низких, чем 10^8 имеется определенная часть протонов с энергией, достаточной для осуществления термоядерной реакции.

В земных условиях никаких ядерных реакций, за исключением радиоактивного распада, не происходит. Означает ли это, что вся вселенная бедна ядерными превращениями так же, как и земля? Условия на звездах резко отличаются от условий на земле. Астрофизические данные говорят, что в центральных областях солнца температура доходит почти до 20 миллионов ($2 \cdot 10^7$) градусов, плотность вещества — до 70—80 г/см³. При такой температуре и плотности давление исчисляется в сотнях миллиардов (10^{11}) атмосфер. Масса, излучаемая солнцем в течение года, достигает $1,4 \cdot 10^{14}$ т. Это соответствует колоссальной энергии. В то время, когда не было еще известно о ядерных источниках энергии, предполагали, что энергии звезд пополняется за счет их сжатия. Однако этот источник энергии явно недостаточен. По нему возраст солнца определяется в 20 миллионов ($2 \cdot 10^7$) лет, в то время как известно, что возраст земной

¹ Именно этим объясняется, например, свечение газов, нагретых до 2—3 тысяч градусов, несмотря на то, что соответствующая средняя энергия хаотического движения атомов $E \approx kT \cdot 4 \cdot 10^{-13}$ эрг $\approx 0,2$ эв, что значительно меньше энергии возбуждения электронной оболочки атомов (несколько электронвольт).

коры, образование которой происходило несомненно на более поздних этапах развития вселенной, чем образование солнца, — около $2 \cdot 10^9$ лет. Естественно предполагать, что в звездах происходят ядерные превращения с выделением энергии. При таких высоких температурах легкие ядра полностью ионизированы, то есть теряют все электроны. Тем самым осуществляются условия соединения легких ядер при их столкновении друг с другом.

Можно оценить характерное время реакции или время жизни различных ядер. Если концентрация водорода на солнце — 35 процентов, что соответствует астрофизическим данным, то расчет показывает для реакции синтеза водорода

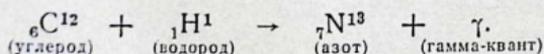


характерное время около $3 \cdot 10^9$ лет.

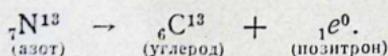
Тяжелый водород быстро путем последовательного присоединения 2 протонов соответственно за 2 и 0,2 секунды превращается в гелий. Оценки показывают, что образование ядер, более тяжелых, чем ядра гелия, из легких элементов мало вероятно, поэтому существование более тяжелых элементов в составе звезд объясняется их возникновением на более ранних этапах развития вселенной.

Образование гелия из водорода в некоторых звездах может происходить и другим путем. Дело в том, что трудность непосредственного соединения ядер водорода в ядро дейтерия возникает не только из-за того, что протонов с энергией, необходимой для их сближения на ядерные расстояния при температуре в 10^7 °, сравнительно мало, но и по другим причинам. При этой реакции один из протонов должен превратиться в нейтрон с испусканием позитрона. Как мы знаем, такое превращение легче всего происходит в ядрах с избытком протонов. Однако ядра, составленного из 2 протонов, даже очень неустойчивого, не существует. Поэтому, для того чтобы произошло образование дейтерона (ядро дейтерия), один из протонов должен «успеть» превратиться в нейтрон за то короткое время, пока они находятся на близком расстоянии друг от друга. Все это сильно снижает вероятность процесса образования дейтерия.

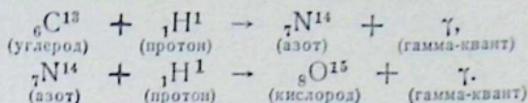
Наличие углерода в составе звезд может в некоторых случаях облегчить синтез водорода в гелий. Путь образования гелия представляет собой целую цепочку ядерных превращений (так называемый углеродно-азотный цикл). Углеродно-азотный цикл начинается с реакции присоединения протона к ядру углерода ${}_6\text{C}^{12}$, в результате чего образуется азот ${}_7\text{N}^{13}$ и выделяется энергичный гамма-квант:



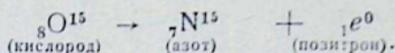
Азот путем β^+ (позитронного) распада с периодом 10 минут превращается в более устойчивый изотоп углерода ${}_6\text{C}^{13}$:



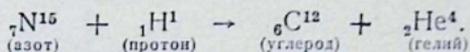
Этот изотоп углерода в свою очередь последовательно присоединяет к себе 2 протона и образует неустойчивый изотоп кислорода ${}^8\text{O}^{15}$.



Кислород ${}^8\text{O}^{15}$, испуская позитрон за 126 секунд превращается в устойчивый изотоп азота



Наконец, ядро азота ${}^7_7\text{N}^{15}$, сталкиваясь с протоном, распадается на ядро углерода ${}^6_6\text{C}^{12}$ и ядро гелия ${}^2_2\text{He}^4$:



В зависимости от конкретных условий на различных звездах может осуществляться тот или иной путь соединения водорода в гелий. По современным взглядам, на солнце непосредственное соединение водорода преобладает над углеродно-азотным циклом.

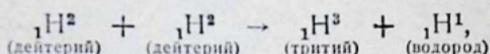
Энергия, выделяемая при образовании ядра гелия из четырех ядер водорода, равна 26 мэв на ядро, или $1,25 \cdot 10^8$ ккал на 1 г гелия. Эта величина согласуется с величиной энергии, излучаемой звездами. Таким образом, источником энергии, излучаемой звездами, служат термоядерные реакции синтеза водорода в гелий.

Можно ли осуществить термоядерную реакцию на земле? До создания атомной бомбы нельзя было себе даже и представить возможность получения таких громадных температур, которые требуются для термоядерных реакций. При взрыве же атомной (урановой или плутониевой) бомбы температура достигает десятков миллионов градусов и давление повышается до нескольких миллионов атмосфер, то есть создаются условия, очень сходные с теми, какие существуют в недрах звезд. При таких температурах возможна реакция образования гелия из водорода. Однако столь высокие температуры и давление поддерживаются в течение очень малого промежутка времени — порядка миллионных долей секунды. Время же, характерное для реакции ядер водорода при температуре $2 \cdot 10^7$, исчисляется миллиардами ($3 \cdot 10^9$) лет. Таким образом, «поджечь» водород с помощью атомной бомбы невозможно.

Соединение дейтерия с водородом и трития с водородом при тех же температурах происходит уже гораздо быстрее, — соответственно за 2 и 0,2 секунды. Такой результат можно понять, если учесть, что ядерные силы притяжения между дейтерием и тритием, с одной стороны, и протонами — с другой, увеличиваются по сравнению с ядерными силами, действующими между двумя протонами за счет увеличения числа нейтронов в тяжелых изотопах, в то время как электрические силы, препятствующие соединению, остаются прежними. Кроме того, при соединении дейтерия и трития с протоном не происходит превращения протона в нейтрон.

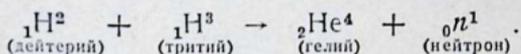
В условиях звезд дейтерий и тритий не существуют в сравнимом с водородом количестве: они образуются в процессе соединения водорода и тут же превращаются при высоких температурах в ядра гелия. Обладая запасом тяжелого водорода или трития, можно было бы создать смесь из дейтерия и водорода или из трития и водорода в соизмеримых количествах (при обычных температурах в такой смеси, разумеется, никакой реакции не происходит). Однако и такую смесь нельзя было бы «поджечь» атомной бомбой, ибо время реакции смеси при температуре в $2 \cdot 10^7$ К (секунды и десятые доли секунды) слишком велико, чтобы за время взрыва успело прореагировать ощутимое количество смеси.

Реакция соединения дейтерия с дейтерием с образованием трития



при которой выделяется энергия $Q = 3,98$ мэв, идет при температуре $2 \cdot 10^7$ К еще быстрее, чем соединение дейтерия с водородом или трития с водородом. Однако скорость и этой реакции недостаточна для того, чтобы успело прореагировать значительное количество тяжелого водорода.

Единственная термоядерная реакция, которая протекает достаточно быстро при температуре взрыва атомной бомбы, — это соединение дейтерия с тритием:



Энергия, выделяющаяся при таком образовании ядер гелия (16,8 мэв), достаточна для создания цепной реакции. Реакция развивается за миллионные доли секунды и продолжается до тех пор, пока все вещество либо не прореагирует, либо не разлетится. Температура повышается приблизительно до 100 миллионов градусов. При такой температуре с достаточной скоростью идет и реакция образования трития из дейтерия¹.

Устройство водородной бомбы можно представить себе следующим образом. В центральной части бомбы помещена атомная бомба, которая должна служить своеобразным «детонатором» при производстве взрыва. «Детонатор» окружен «взрывчатым веществом» — смесью дейтерия и трития. Все это заключено в тяжелую стальную оболочку.

Взрыв атомной бомбы поднимает температуру смеси до величины, при которой происходит соединение дейтерия с тритием. Эта реакция в свою очередь еще выше поднимает температуру, что дает возможность соединиться дейтерию с дейтерием (при этом образуется тритий, тут же соединяющийся с дейтерием). Именно поэтому в общей смеси трития может употребляться значительно меньше, чем дейтерия. Это очень удешевляет стоимость водородной бомбы.

¹ Возможно, идет также реакция образования двух ядер гелия из ядра лития и водорода.

Производство тяжелого водорода путем электролиза воды, как мы видели, сравнительно дешево, в то время как тритий — дорогостоящий продукт, который может быть получен лишь в котлах. При этом время хранения трития ограничено (период полураспада трития равен 12 годам).

В водородной бомбе может содержаться любое количество реагирующего материала (в отличие от атомной, где количество урана или плутония лимитировано критической массой). Практический предел увеличению мощности водородной бомбы ставит быстрота разлета реагирующей массы. В результате колоссального повышения температуры и давления содержимое бомбы разлетается, не успев прореагировать полностью. Для увеличения эффективности бомбы необходимо поэтому заключить ее в возможно более прочную стальную оболочку. Взрыв водородной бомбы характеризуется теми же, но значительно более сильными поражающими факторами, что и взрыв атомной бомбы: ударная волна, световое излучение и проникающая радиация.

Впервые водородная бомба была испытана США на одном из островов Тихого океана в конце 1952 года. Она была еще сравнительно мало эффективна. 20 августа 1953 года было опубликовано правительственное сообщение об успешном испытании водородной бомбы в СССР. В 1954 году в Японском море США произведено испытание бомбы, гораздо более мощной, чем в 1952 году. В результате взрыва был уничтожен маленький коралловый остров. Так как взрыв был произведен на поверхности земли (что позволило неограниченно увеличить вес бомбы за счет стальной оболочки, а следовательно, и силу взрыва), образовалось большое количество радиоактивных продуктов. Облако радиоактивной коралловой пыли было перенесено в атмосфере на громадное пространство и выпало в районе, далеком от места взрыва, поразив при этом находящиеся в том районе японских рыбаков. Это вызвало справедливое возмущение всех миролюбивых людей.

26 ноября 1955 года ТАСС сообщило об успешно проведенных испытаниях нового типа атомного и термоядерного оружия в СССР, которые «полностью оправдали соответствующие научно-технические расчеты, показав важные новые достижения советских ученых и инженеров. Последний взрыв водородной бомбы был самым мощным из всех взрывов, проведенных до сих пор. В целях предотвращения радиоактивных воздействий взрыв был произведен на большой высоте. При этом проводились широкие исследования по вопросам защиты людей».

Учитывая ранее сказанное, нетрудно понять, что производство воздушного эффективного взрыва водородной бомбы сопряжено с гораздо большими трудностями, чем наземного. Поэтому не удивительно, что, например, обозреватель английской газеты Чэпман Пинчер заявил по этому поводу: «Метод, с помощью которого русские взорвали свою бомбу на большой высоте, и ее воздействие удивляют военных специалистов. Они считают это поразительным техническим достижением». Мощность взрыва равнялась несколь-

ким миллионам тонн тротилового эквивалента, что гораздо больше, чем мощность атомной бомбы (номинальная мощность атомной бомбы равна 20 тысячам тонн тротила).

Наряду с сообщением об указанных испытаниях, проведенных в СССР в интересах обеспечения нашей безопасности, ТАСС заявило, что Советский Союз попрежнему будет добиваться запрещения всех видов атомного и водородного оружия.

В настоящее время многочисленные ученые, в том числе и советские, работают над проблемой осуществления термоядерной реакции управляемого типа, над проблемой постепенного выделения энергии. В случае осуществления управляемой термоядерной реакции открылся бы практически неисчерпаемый источник энергии, так как на земле имеются громадные запасы таких легких элементов, как водород и литий. При термоядерных реакциях освобождается энергии больше, чем при любых других. Это хорошо видно из таблицы, в которой приведены величины энергии, выделяющейся на 1 г реагирующих веществ в различных химических и ядерных реакциях.

Название реакции	Ход реакции	Количество энергии на 1 г (в ккал.)
Взрыв гремучего газа	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$	4
Горение первосортного угля	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	7
Деление урана		$2 \cdot 10^7$
Образование трития из дейтерия	${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_1p^1$	$2 \cdot 10^7$
Распад лития под действием протона	${}_3\text{Li}^7 + {}_1p^1 \rightarrow 2{}_2\text{He}^4$	$5 \cdot 10^7$
Образование гелия из трития и дейтерия	${}_1\text{H}^3 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_0n^1$	$7 \cdot 10^7$
Образование гелия из водорода	$4{}_1\text{H}^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + 2{}_1e^0$	$1,2 \cdot 10^8$

Для осуществления управляемой термоядерной реакции необходимо прежде всего отказаться от применения атомной бомбы в качестве источника высоких температур.

Имеются две возможности получения высоких температур в очень маленьком объеме. Первая из них заключается в фокусировании ударных гидродинамических волн. Температура в фокусе может стать достаточно большой. Вторая возможность заключается в использовании искры или сильноточной дуги, в которых при применении специальных устройств может быть достигнута температура до 60 тысяч градусов и выше. Наиболее обещающими, однако, в настоящее время представляются попытки вызвать реакцию путем бомбардировки термоядерного горючего мощными пучками заряженных частиц, получаемых в сильноточных ускорителях.

Трудно сейчас сказать, каким именно путем можно будет осуществить управляемую термоядерную реакцию, но нужно надеяться, что человечество впишет в историю и эту замечательную страницу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда в 1831 году Михаил Фарадей делал в английской академии наук доклад о только что открытом им явлении индукции, один из ученых спросил, какое практическое значение могут иметь эти опыты. Фарадей ответил, что очень трудно сказать, кем будет только что родившийся ребенок. Сейчас мы знаем, что явление индукции легло в основу электромотора, динамомашин и вообще всей современной электротехники. Таким образом, «ребенка» Фарадея ждало великое будущее.

То же самое можно сказать и об атомной энергии. Разница только в том, что даже при рождении атомной энергетики никто не сомневается в значении этого открытия.

Сперва освоение атомной энергии сравнивали с открытием паровой машины или электричества. Сейчас уже видно, что роль атомной энергии значительно больше, ее скорее можно сравнить с открытием человечеством огня.

Это не значит, что атомная энергия вытеснит все остальные виды энергии. Напротив, сейчас, например, ведутся весьма интенсивные работы по прямому использованию солнечной энергии. Найдены уже такие вещества (типа полупроводников), которые способны превращать значительную долю падающей на них световой энергии прямо в электрическую. Этот источник энергии в будущем несомненно будет широко использоваться.

Таким образом, вряд ли атом в будущем станет единственным источником энергии. Гораздо важнее то, что атомная энергия и все связанное с ней, проникая во все области техники, качественно изменяют их.

В настоящей брошюре мы попытались изложить более или менее подробно современное состояние атомной энергетики и ближайшие перспективы ее развития. Вместе с тем мы избегали заходить слишком далеко в прогнозах на будущее и считали основной задачей — ознакомить читателя с современным состоянием проблемы не только с практической, описательной стороны, но также и с теоретической.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При подготовке лекции на тему об атомной энергии прежде всего надо учитывать состав аудитории.

Нередко приходится сталкиваться с разнородной аудиторией. В этом случае необходимо при изложении материала проявлять некоторую гибкость: подавать материал в такой форме, чтобы он был доходчив для совершенно неподготовленного слушателя и интересен для слушателя, имеющего некоторое представление об атомной энергии.

В начале лекции, рассчитанной на 1 час 30 минут, надо остановиться на строении атома и атомного ядра. Это совершенно необходимо для понимания дальнейшего материала неподготовленным слушателем, а для слушателя, уже знакомого с этим вопросом, небезинтересны будут сравнительные цифры и примеры, приводимые при этом, ибо, как показывает опыт, даже для знакомого в какой-то степени с этой областью слушателя сравнительные примеры оказываются неожиданными. Этому разделу следует уделить минимально необходимое время.

После такой предварительной подготовки аудитории можно перейти к изложению основного материала — рассказу об атомной энергии и возможностях ее использования. Выбор материала по тому или иному вопросу должен решаться самим лектором в соответствии с предварительными пожеланиями аудитории. Если лекция специально не посвящена военному использованию атомной энергии, то не следует увлекаться изложением внешней картины атомного взрыва, поражающих факторов и т. д. (хотя сказать несколько слов об этом надо, но не в ущерб изложению основного материала).

Одна из задач лекции состоит в ознакомлении слушателя с некоторыми понятиями и фактами из области атомной энергии, которые часто встречаются в печати, и с перспективами развития атомной энергетики. Для того чтобы эта цель была достигнута, необходимо наряду с наглядными, легко запоминающимися аудиторией фактами дать слушателю представление о современных научных и технических основах ядерной энергетики.

Для подготовки к лекции, помимо настоящей брошюры, рекомендуем следующую литературу.

ЛИТЕРАТУРА

- Атомное оружие. Сборник статей. М., Воениздат, 1954.
- Балабанов Е. М. Ядерные реакторы. М., Из-во «Знание», 1955.
- Гольданский В. И. Новые химические элементы. М., Из-во «Знание», 1955.
- Китайгородский А. И. Строение вещества и его энергия. М., Воениздат, 1955.
- Коломенский А. А. и Рубин Н. Б. Ускорители заряженных частиц. Журн. «Природа», 1955, № 11.
- Лешковцев В. А. Атомная энергия. М., Гостехиздат, 1955.
- Лэп Ральф. Новая сила. Об атомах и людях. М., Из-во иностр. литературы, 1954.
- Мезенцев В. Народы требуют запрещения атомного и водородного оружия. М., Госполитиздат, 1955.
- Михайлов В. А. Физические основы получения атомной энергии. М., Воениздат, 1955.
- Михайлов В. А. и Мюртычев М. Г. Атомная энергия и перспективы ее использования. М., Из-во «Знание», 1955.
- Нейман М. Б. Применение радиоактивных изотопов в промышленности. М., Из-во «Знание», 1955.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>Глава I</i>	
Строение вещества	5
Периодический закон Менделеева	5
Строение атома	6
<i>Глава II</i>	
Атомное ядро	8
Изотопы	9
Ядерные силы	12
<i>Глава III</i>	
Ускорители	15
Регистрация частиц	20
Природа ядерных сил и новые частицы	25
<i>Глава IV</i>	
Ядерные реакции и радиоактивность	29
Деление тяжелых ядер	34
Энергия ядерных реакций	35
Цепная реакция	40
<i>Глава V</i>	
Работа атомного котла	42
Конструкции реакторов	46
Перспективы использования атомных котлов	53
<i>Глава VI</i>	
Устройство атомной бомбы	56
Действие атомного оружия и защита	57
Лучевая болезнь	60
<i>Глава VII</i>	
Термоядерные реакции	62
Заключение	69
Методические указания	70
Литература	71

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ ЧЕРНАВСКИЙ
И ВЕЛИОР ПЕТРОВИЧ ШАБАНСКИЙ

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Редактор О. И. Коломийцева
 Художник-оформитель Я. Г. Днепров Техн. редактор Н. Л. Юсфина
 Корректор Л. И. Добкина
 Сдано в набор 7/IV-56 г. Подп. к печати 3/VII-56 г. Форм. бум. 60×92^{1/16}.
 Физ. печ. л. 4,5 + 1 вкл. Усл. печ. л. 4,5 Уч.-изд. л. 5,02
 Тираж 37.500 АО 8371 Изд. инд. ПЛ-84 Цена 1 р. 20 к.

Госкультпросветиздат, Москва, проезд Владимирова, 9-а
 Заказ № 537. 1-я типография Профиздата. Москва, Крутицкий вал, 18

Периоды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В										D		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII					
1	H ¹ Водород 1,0080	(H)									He ² Гелий 4,003		
2	Li ³ Литий 6,940	Be ⁴ Бериллий 9,013	B ⁵ Бор 10,82	C ⁶ Углерод 12,010	N ⁷ Азот 14,008	O ⁸ Кислород 16,000	F ⁹ Фтор 19,00				Ne ¹⁰ Неон 20,183		
3	Na ¹¹ Натрий 22,997	Mg ¹² Магний 24,32	Al ¹³ Алюминий 26,98	Si ¹⁴ Кремний 28,09	P ¹⁵ Фосфор 30,975	S ¹⁶ Сера 32,066	Cl ¹⁷ Хлор 35,457				Ar ¹⁸ Аргон 39,944		
4	K ¹⁹ Калий 39,100	Ca ²⁰ Кальций 40,08	Sc ²¹ Скандий 44,96	Ti ²² Титан 47,90	V ²³ Ванадий 50,95	Cr ²⁴ Хром 52,01	Mn ²⁵ Марганец 54,93	Fe ²⁶ Железо 55,85	Co ²⁷ Кобальт 58,94	Ni ²⁸ Никель 58,69			
	Cu ²⁹ Медь 63,54	Zn ³⁰ Цинк 65,38	Ga ³¹ Галлий 69,72	Ge ³² Германий 72,60	As ³³ Мышьяк 74,91	Se ³⁴ Селен 78,96	Br ³⁵ Бром 79,916				Kr ³⁶ Криптон 83,8		
5	Rb ³⁷ Рубидий 85,48	Sr ³⁸ Стронций 87,63	Y ³⁹ Иттрий 88,92	Zr ⁴⁰ Цирконий 91,22	Nb ⁴¹ Нобий 92,91	Mo ⁴² Молибден 95,95	Tc ⁴³ Технеций [68]	Ru ⁴⁴ Рутений 101,7	Rh ⁴⁵ Родий 102,91	Pd ⁴⁶ Палладий 106,7			
	Ag ⁴⁷ Серебро 107,880	Cd ⁴⁸ Кадмий 112,41	In ⁴⁹ Индий 114,76	Sn ⁵⁰ Олово 118,70	Sb ⁵¹ Сурьма 121,76	Te ⁵² Теллур 127,61	J ⁵³ Йод 126,91				Xe ⁵⁴ Ксенон 131,3		
6	Cs ⁵⁵ Цезий 132,91	Ba ⁵⁶ Барий 137,36	La ⁵⁷ Лантан 138,92	Hf ⁵⁸ Гафний 178,6	Ta ⁵⁹ Тантал 180,88	W ⁶⁰ Вольфрам 183,92	Re ⁶¹ Рений 186,31	Os ⁶² Осний 190,2	Ir ⁶³ Иридий 193,1	Pt ⁶⁴ Платина 195,23			
	Au ⁷⁹ Золото 197,2	Hg ⁸⁰ Ртуть 200,61	Tl ⁸¹ Таллий 204,39	Pb ⁸² Свинец 207,21	Bi ⁸³ Висмут 209,00	Po ⁸⁴ Полоний 210	At ⁸⁵ Астатий [210]				Rn ⁸⁶ Радон 222		
7	Fr ⁸⁷ Франций [223]	Ra ⁸⁸ Радий 226,05	Ac ^{**89} Актиний 227	(Th)	(Pa)	(U)							
* ЛАНТАНИДЫ													
Ce ⁵⁴ Церий 140,13	Pr ⁵⁹ Прометий 140,90	Nd ⁶⁰ Неодим 144,27	Pm ⁶¹ Прометий [147]	Sm ⁶² Самарий 150,43	Eu ⁶³ Европий 152,0	Gd ⁶⁴ Гадолиний 157,9	Tb ⁶⁵ Тербий 158,9	Dy ⁶⁶ Диспрозий 162,46	Ho ⁶⁷ Гольмий 164,94	Er ⁶⁸ Эрбий 167,2	Tm ⁶⁹ Тулий 168,9	Yb ⁷⁰ Иттербий 173,04	Lu ⁷¹ Лютеций 174,99
** АКТИНИДЫ													
Th ⁹⁰ Торий 232,12	Pa ⁹¹ Протактиний 231	U ⁹² Уран 238,07	Np ⁹³ Нептуний [237]	Pu ⁹⁴ Плутоний [239]	Am ⁹⁵ Америций [243]	Cm ⁹⁶ Кюрий [247]	Bk ⁹⁷ Берклий [247]	Cf ⁹⁸ Калифорний [251]	Es ⁹⁹ Эйнштейний [255]	Fm ¹⁰⁰ Фермий [255]	Md ¹⁰¹ Менделеевский [256]		

ГОСКУЛЬТПРОСВЕТИЗДАТ

ВЫШЕЛ ИЗ ПЕЧАТИ АЛЬБОМ:

***Иван Владимирович Мичурин —
великий преобразователь***

Составитель Х. К. Еникеев. 78 таблиц и брошюра с пояснительным текстом. 30 000 экз., цена 55 рублей.

В этом красочно иллюстрированном альбоме, посвященном великому преобразователю природы — И. В. Мичурину, показан жизненный путь ученого; приведены основные положения мичуринского учения и освещены практические достижения ученого по выведению новых сортов растений. Раскрыто значение мичуринского учения для развития биологической науки; рассказано об успехах последователей Мичурина в нашей стране.

Издание рассчитано на массового читателя, может служить также иллюстрированным пособием при проведении лекций и докладов, посвященных вопросам мичуринского учения и развитию садоводства в нашей стране.

Альбомы продаются в магазинах книготоргов и высылаются по почте наложенным платежом отделами «Книга — почтой» республиканских, краевых и областных книготоргов.

В случае отсутствия на местах необходимо послать письменный заказ по адресу: Москва, Моховая, 17, магазин № 2 Москниготорга.