



Обменное взаимодействие. Так называется взаимодействие двух физических систем или частиц, возникающее в результате непрерывного обмена ими между собой и какой-то еще другой, третьей частицей, общей для них обоих. Например, ядерные силы, действующие между нуклонами ядра атома, являются следствием обмена между нуклонами частицей, называемой π -мезоном (см. «Ядерные силы»).

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

Однако в ряде случаев, например для транспортных целей (ядерные реакторы для морских судов, подводных лодок, самолетов и т. д.), для получения очень плотных потоков нейтронов, для удлинения времени работы реактора без перезарядки и т. д., размеры реактора должны быть предельно уменьшены. В этих случаях в загружаемом в реактор природном уране искусственно увеличивают количество его делящегося изотопа — урана-235, полученного путем сложного и дорогого разделения изотопов урана на специальных заводах.

Такое искусственное увеличение доли делящегося изотопа в обычном уране и называют его обогащением.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Стр.



Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева _____	93
Период полураспада _____	95
Протон _____	96
Протонная радиоактивность _____	97
Позитрон (положительный электрон) _____	98
Плазма — четвертое состояние вещества _____	98

Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева. 6 марта 1869 г. на заседании русского физико-хими-

ческого общества Д. И. Менделеев впервые прочитал свое сообщение «Опыт системы элементов, основанный на их атомном и химическом сходстве».

То, о чем рассказывалось в этом сообщении, вызвало огромную сенсацию в научных кругах и принесло ее автору и русской науке мировую славу, ибо знаменовало начало нового этапа в развитии науки на подступах к атомному веку.

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

Ну, а что в этом случае считать самым главным?

Менделеев выбрал вес атома. Записав атомный вес и химические свойства элементов на обороте своих визитных карточек, Менделеев долго и упорно раскладывал их в тысячах самых мыслимых и немыслимых комбинаций.

Решение загадки стало пробиваться, когда расположенные в порядке нарастания атомных весов химические элементы он стал разбивать еще и на горизонтальные группы. Сходные по своим химическим свойствам элементы, оказываясь один под другим, стали повторяться, подчиняясь некоторому, видимо, общему для них всех и простому закону.

«...Когда я расположил элементы в соответствии с величинами их атомных весов, начиная с самых малых, — вспоминал позже Д. И. Менделеев, — то стало очевидно, что в их свойствах существует периодичность. Я назвал периодическим законом взаимные соотношения между свойствами элементов и их атомными весами; эти соотношения применимы ко всем элементам и имеют периодическую природу».

На первых порах строго вертикальных столбиков у него никак не получалось. И, убежденный в существовании совершенно точной периодичности, ученый пошел на исключительно смелый шаг. Там, где в горизонтальном ряду какой-либо элемент не располагался точно под своим химическим двойником, он утверждал, что или общепринятые атомные веса элементов ошибочны и их нужно пересмотреть, или же там должны стоять другие элементы, до сего времени еще не открытые. Для

них он просто оставлял в своей таблице свободные места. Более того, зная «соседей» по вертикали вверх и вниз, Менделеев с удивительной точностью предсказал химические свойства этих недостающих и еще не открытых элементов.

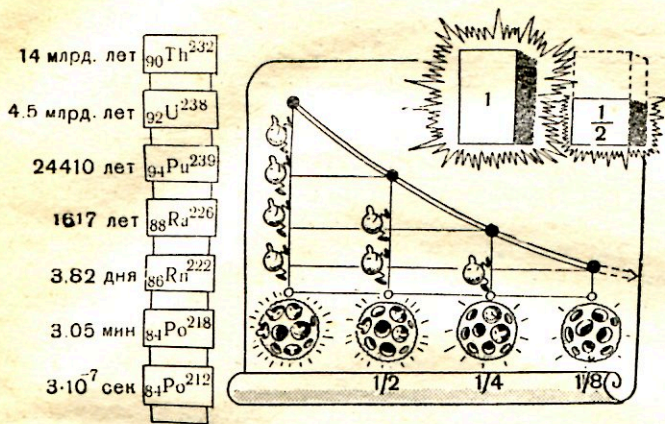
Это убеждение великого ученого блестяще подтвердилось. В 1875 г. был открыт элемент галлий, в 1879 г. — скандий и в 1886 г. — германий.

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

По ряду других, порой очень тонких признаков периодичность свойств химических элементов натолкнула ученых на другую, еще более смелую мысль: а правильно ли утверждение, что атом является неделимой частицей материального мира, последней ступенькой на пути в микрокосмос? Что лежит в основе различия в атомных весах и химических свойствах элементов? Нельзя ли попытаться проникнуть и внутрь самого атома, узнать, из чего он сложен? Не распространяются ли и на его устройство закономерности великого периодического закона? Тем более, что, как считал и сам Д. И. Менделеев, «легко предположить, что ныне нет еще возможности показать, что атомы простых тел суть сложные существа, образованные сложением некоторых еще меньших частей». По его представлениям, «мир атомов устроен так же, как мир небесных светил, со своими солнцами, планетами и спутниками».

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

Период полураспада. Важной величиной, характеризующей радиоактивное вещество, является период его полураспада — время, за которое распадается половина исходного вещества. Например, если половина его распадается за четыре дня, то и период полураспада принимается равным четырем дням. Через следующие четыре дня распадается половина остающегося количества, через восемь дней его останется только $\frac{1}{4}$, через 12 дней — $\frac{1}{8}$ и т. д. Чтобы радиоактивность снизилась до 1%



исходного вещества, должно пройти примерно семь периодов полураспада.

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

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

Один грамм урана содержит в себе около $2,5 \cdot 10^{21}$ атомов. Однако из этого астрономического количества в секунду распадается только около 12 тыс. атомов. Поэтому период полураспада урана исключительно долг — около 4,5 млрд. лет. У тория он еще дольше — более 14 млрд. лет! Время полураспада радия-226—620 лет, радона—3,82 дня, полония-218—3,05 мин, полония-212— $3 \cdot 10^{-7}$ сек, некоторых элементарных частиц — миллионные и миллиардные доли секунды.

Протон — одна из немногих устойчивых элементарных частиц, входящая наряду с нейтроном в состав всех ядер атомов химических элементов, за исключением самого легкого изотопа водорода, ядро которого состоит только из одного протона.

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

Хотя протон несет одинаковый с электроном элементарный электрический заряд (но противоположный по знаку), масса его в 1836 раз больше массы электрона. В тех случаях, когда нет необходимости обязательно указывать на заряд любой из ядерных частиц, протон наравне с нейтроном носит более общее название — нуклон. Это тем более оправдано, что сейчас уже не остается никаких сомнений, что и протон, и нейтрон являются различными физическими состояниями одной и той же элементарной частицы. При поглощении ядром атома энергии извне и последующем распаде, протон внутри ядра может превратиться в нейтрон. Этот процесс сопровождается рождением еще одной частицы — позитрона, частицы, масса которой в точности равна электрону, но несущей противоположный, положительный, электрический заряд, и еще одной незаряженной (нейтральной) частицы — *нейтрино*, не имеющей массы покоя и движущейся только со скоростью света. При превращении нейтрона в протон из ядра атома вместо позитрона выбрасывается электрон и опять-таки нейтрино.

Протонная радиоактивность. До недавнего времени в науке были известны следующие основные виды радиоактивного распада ядер атомов. Три из них: испускание альфа-частиц (ядер атомов гелия), бета-частиц (электронов) и гамма-лучей — известны еще со времен Марии и Пьера Кюри. Еще один вид распада — самопроизвольное («спонтанное») деление ядер атомов урана с испусканием нейтронов, электронов и гамма-квантов — был открыт советскими учеными Флеровым и Петряком в 1940 г. и, наконец, испускание нейтронов продуктами деления ядер урана — запаздывающих нейтронов — спустя короткое время после того, как это деление уже произошло.

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

в 1962 г. Существуют еще несколько видов распада: К-захват, изомерные переходы, позитронный распад, замедленные протоны и др.

Позитрон (положительный электрон) — открытая в 1932 г. элементарная частица, идентичная по свойствам (масса, величина заряда и т. д.) электрону, но имеющая не отрицательный, а положительный заряд, вследствие чего она является *античастицей* электрона — первой из серии открытых после нее античастиц. Позитрон возникает при аннигиляции двух или трех квантов гамма-излучения или в процессе бета-распада атомов ядер и неустойчивых ядерных частиц. При встрече позитрона с электроном обе частицы аннигилируют — уничтожаются. В результате этой реакции образуются два или три кванта гамма-излучения (фотона).

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

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

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

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

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

Газ, в котором под действием исключительно высокой температуры произошло разделение вещества на носящиеся с бешеной скоростью и сталкивающиеся между собой и со стенками сосуда свободные электроны, совершенно оголенные ядра атомов и атомы, по какой-то случайности все еще удерживающие некоторую толику своих электронов, стали называть «плазмой». «Идеальная» плазма с разделенными полностью атомными частицами соответствует температуре в несколько десятков миллионов градусов. Везде, где вещество чрезвычайно горячо, оно находится в плазменном состоянии.

Однако плазма — это не просто нагретое до сверхвысокой температуры вещество. Это совершенно иное его физическое состояние, проявляющее целый ряд важных и даже просто необыкновенных свойств.



Например, плазменное состояние газообразного вещества может возникать и при менее высоких и даже относительно низких температурах в зависимости от состава, структуры и степени разрежения газа. Пламя свечи, свечение ламп холодного света, электрическая дуга, электрический разряд, огненная струя, вырывающаяся из сопла реактивного двигателя или ракеты, ослепительный след, оставляемый молнией, — все это далеко не полный перечень явлений, при которых человек прямо или косвенно имеет дело, а порой и использует для дела четвертое, плазменное, состояние вещества.

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

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

В целом плазма нейтральна, так как она содержит одинаковое количество отрицательно и положительно заряженных частиц. Но взаимодействие этих зарядов придает плазме потрясающее разнообразие свойств, не похожих ни на какие свойства газов.

При некоторых условиях она может проводить электрический ток лучше, чем медь, течь как вязкая жидкость, вступать в реакции с другими веществами как сильный химический раствор. Более того, плазма легко управляется электрическими и магнитными полями.

В необыкновенно короткий срок физика плазмы стала одной из ведущих областей научного прогресса, главным образом в связи с исследованиями термоядерной реакции, получаемой пока только в мгновенной вспышке раскаленной до температуры в несколько сот миллионов градусов плазмы, при взрыве водородной бомбы (см. «Термоядерная реакция»).

Пи-мезон — неустойчивая элементарная частица с массой около 273 массы электрона. Существует три вида таких частиц: положительный и отрицательный пи-мезоны, обладающие электрическими зарядами, рав-

ными по абсолютной величине электрическому заряду электрона, и нейтральный пи-мезон. Масса заряженных пи-мезонов равна 273 массам электрона, нейтрального пи-мезона — несколько меньше — 264 массы электрона. Пи-мезон рождается на нуклонах или ядрах под действием бомбардировки нуклонами и гамма-лучей большой энергии. Время жизни заряженного пи-мезона — около $2,5 \cdot 10^{-8}$ сек. Чаще всего пи-мезон распадается на мю-мезон и нейтрино. Время жизни нейтрального пи-мезона не превышает 10^{5-1} сек, после чего он распадается на два фотона. В отличие от мю-мезонов пи-мезоны активно взаимодействуют с атомными ядрами. Они, в частности, ответственны за существование ядерных сил. Обмениваясь пи-мезонами, нуклоны ядра удерживаются все вместе, несмотря на существование огромных сил отталкивания между положительно заряженными протонами, стремящихся «взорвать» ядро изнутри.

Плутоний — химический элемент с порядковым номером 94 и атомным весом 239, впервые полученный человеком в ходе управляемой реакции деления ядер урана.

Как известно, использование атомной энергии человеком началось с урана-235, который был и остается важнейшим видом ядерного горючего. Можно было бы иметь гору природного урана, но не использовать ни капли заключенной в нем энергии, если бы в нем не содержался его делящийся изотоп уран-235. Этот изотоп одинаково хорошо делится нейтронами любых энергий. Однако в природном металле его очень мало — всего 0,7%. Остальные 99,3% составляет изотоп уран-238, который делится только быстрыми нейтронами. Зато уран-238 отлично поглощает промежуточные нейтроны с энергией от 1 до 10 эв. И тут начинаются чудеса. Если с помощью замедлителя — графита, тяжелой или обычной воды и других веществ — замедлить до этой энергии выбрасываемые при делении ядер изотопа урана-235 быстрые нейтроны, то, захватив такой медленный нейтрон, ядро атома урана-238 приходит в сильно возбужденное состояние и, распадаясь, превращается в конечном итоге в плутоний, период полураспада которого равен уже 24,40 года. Самое замечательное то, что он становится как бы двойником урана-235 — также делится и быстрыми, и медленными нейтронами. А это позволяет в ходе выгорания урана-235 одновременно превратить некоторую толику практически не делящегося урана-238 в делящийся плутоний-239. Так постепенно, выжигая в ядерном реакторе уран-235 (0,7%) и полученный побочным путем плутоний-239 (естественно, меньше 0,7%), можно незаметно переработать в ядерное горючее значительную долю и природного урана-238.

Чистый плутоний-239 — сильно ядовитое вещество, легко загорается на воздухе. Распадаясь, он испускает альфа-частицы с энергией около 5 Мэв.

Особо опасно попадание плутония внутрь организма, так как он естественным путем не выводится, а длительное внутреннее облучение альфа-частицами приводит к тяжелым формам лучевой болезни и даже гибели организма.

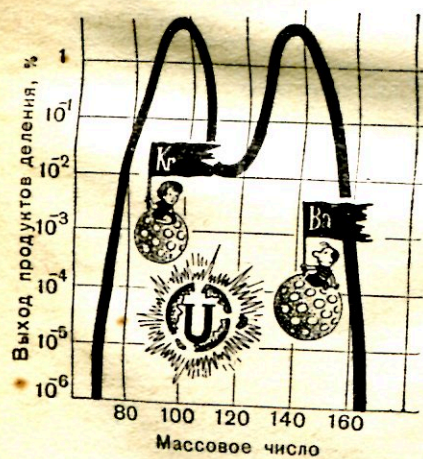
Пневмокостюм — специальный костюм, предназначенный для работы в атмосфере, загрязненной радиоактивными веществами — пылью, газами, аэрозолями. Защитные свойства костюма обеспечиваются тем, что внутри его непрерывно поступает воздух, находящийся под несколько большим давлением, чем окружающая атмосфера: это исключает возможность проникновения радиоактивных частиц внутрь пневмокостюма. Костюм позволяет свободно передвигаться и некоторое время работать в заражен-

ных помещениях, легко отмывается от приставших снаружи радиоактивных частиц, имеет принудительное (как у водолазов) или автономное (от баллонов) питание воздухом.

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

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

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



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

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

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

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

На эти вопросы камера Вильсона ответа не дает.

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

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

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

Если же начать кипятить очень чистую воду в сосуде с идеально отполированными стенками, избегая всяческих, даже самых ничтожных толчков и сотрясений, то воду можно «перегреть» без каких-либо признаков кипения. Однако стоит теперь лишь слегка толкнуть сосуд или каким-либо другим способом нарушить покою такой перегретой воды, как она мгновенно вскипает.

Это явление и навело физиков на мысль использовать не облачко невидимого пара в камере Вильсона, а перегретую жидкость.

Достаточно какой-либо заряженной частице пролететь сквозь такую жидкость и произвести ионизацию ее молекул, как эти молекулы на всем протяжении пути частиц становятся центрами образования паровых пузырьков, т. е. жидкость на этом пути мгновенно вскипает.

Если теперь успеть достаточно быстро сделать фотографический снимок, то мы увидим на нем цепочки пузырьков — такие же следы частиц, как и те, которые можно наблюдать в обычной камере Вильсона.

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

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

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

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

Заполняющий пузырьковую камеру сжиженный, а следовательно, находящийся под большим давлением газ тоже идеально прозрачен. Но если это давление уменьшить до критической величины, при которой жидкость не вскипает только потому, что в ней нет центров, способствующих образованию пузырьков, — пылинок, заряженных частиц и т. п., то стоит заряженной частице пролететь сквозь такую сверхчувствительную, готовую мгновенно вскипеть жидкость, как ее ионизированный след, густо облепленный пузырьками газа, становится видимым.

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

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

Важность достоинств новой камеры становится особенно понятной, если мы вспомним, что ученым при помощи мощных ускорителей частиц сейчас удается придать этим частицам такие скорости и энергии, какие уже не встречаются у естественных или искусственных радиоактивных веществ, а скоро, видимо, будут и соизмеримы со скоростью и энергией космических частиц.

Именно благодаря использованию камер Вильсона и других сходных по устройству и действию установок происходит большинство открытий в области современной физики.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Радий _____	105
Радиоактивность _____	106
Радиоактивность искусственная _____	107
Радиоактивные изотопы _____	107
Радиоактивные семейства _____	108
Радиоактивность наведенная _____	109
Реакторы _____	116

Р

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

Неизвестное до того времени вещество оказалось поистине удивительным. Оно непрерывно испускало обладающие огромной проникающей способностью невидимые лучи. Под действием таинственных лучей, так же как и под действием рентгеновских, ярко светились в темноте экраны, покрытые сернистым цинком, платино-синеродистым барием и другими веществами, засвечивались фотографические пластинки.

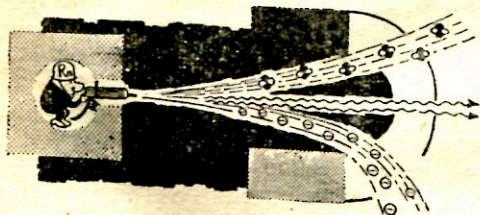
Ничтожно малые количества этого элемента, не превышающие миллиардных долей грамма, можно было обнаружить по ионизации воздуха, которую вызывало их излучение. Новое излучение оказывало сильное воздействие на живые организмы и в ряде случаев становилось опасным для здоровья людей. Все эти столь необыкновенные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

Радий является продуктом распада цепочки элементов, начинающихся ураном-238, и состоит из четырех природных изотопов с массовыми числами 228, 226, 224 и 223 (средний атомный вес 226,05). Наиболее долгоживущий изотоп — радий-226 — излучает альфа-частицы с энергией 4,78 Мэв с периодом полураспада 1617 лет. Испускание альфа-частиц сопровождается гамма-излучением с энергией 0,188 Мэв. Благодаря высокой энергии испускаемых альфа-частиц радий вместе с полонием-210 (энергия альфа-частиц еще выше — 5,3 Мэв) в течение длительного времени — до создания ускорителей заряжен-

ных частиц и ядерных реакторов — представляли собой «главный калибр атомной артиллерии» для обстрела ядер атомов всех легких элементов периодической таблицы Менделеева. Именно с их помощью была открыта возможность превращения одних элементов в другие, обнаружено существование нейтрона, осуществлено подавляющее большинство важных открытий атомного века. Испускаемые радием гамма-лучи с энергией 190 кэв в течение долгого времени служили единственным источником для борьбы с самым страшным заболеванием человека — раком, а также для просвечивания металлических изделий и т. д.

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

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



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

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

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

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

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

Радиоактивные изотопы. Число получающихся в результате деления урана и плутония элементов оказалось очень большим по разнообразию и по видам радиоактивных излучений: длительных или короткоживущих, мощных и слабых, порознь или вместе, практически в любых сочетаниях. Например, стронций-90 (5,3% выхода) распадается наполовину в течение 25 лет и излучает только бета-частицы с энергией 0,63 Мэв, а образующийся одновременно с ним дочерний элемент иттрий-90 распадается наполовину уже за 62 ч, зато излучает бета-

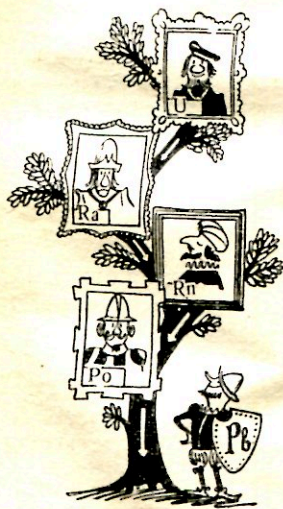
частицы с энергией 2,3 Мэв. Ни тот, ни другой не излучают сильно проникающих гамма-лучей. Цирконий-95 с периодом полураспада 65 дней излучает бета-частицы двух видов: с энергией 0,39 Мэв (98%) и немного (2%) с энергией 1 Мэв и одновременно три вида гамма-лучей с энергиями: 0,73 Мэв (93%), 0,23 Мэв (93%), 0,92 Мэв (7%); дочерний элемент ниобий-95 с периодом полураспада 35 дней излучает бета-частицы с энергией 0,15 Мэв и гамма-лучи с энергией 0,76 Мэв. Здесь можно подметить общее для всех них правило: самой высокой энергией излучения обладают самые короткоживущие изотопы и, наоборот, самой низкой — самые долгоживущие.

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

Родоначальником первой цепочки является уран-238, который заканчивает свой распад изотопом обычного свинца-206. Вторая цепочка начинается торием-232, превращающимся в конечном счете в изотоп свинца-208, третья цепочка — актиния-235 или актино-урана-235 — заканчивается свинцом-207.

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

Четвертое радиоактивное семейство начинается с искусственно получаемого радиоактивного сверхтя-



желого «зауранового», или «трансуранового», элемента плутония-241, переходит затем в цепочку урана-235 и кончается тоже устойчивым таллием-205.

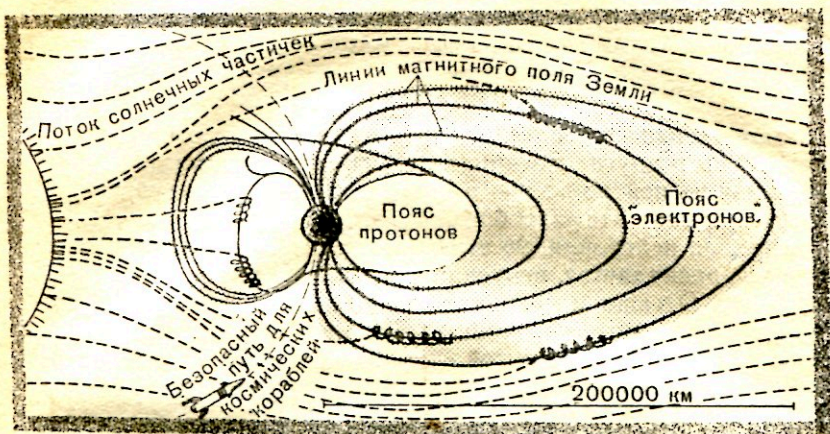
Радиоактивность наведенная — радиоактивность воздуха, воды, почвы и других материалов, возникающая под действием облучения их нейтронами — в ядерных реакторах, ускорителях или при взрывах атомных бомб.

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

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

Радиационные пояса Земли (пояса Ван Аллена — Вернова). После открытия *космических лучей* — потоков частиц, падающих на Землю извне, — прогресс в этой новой и исключительной области физики почти целиком зависел от высоты, на которую удавалось поднять сложные приборы и счетчики над Землей. Для этой цели с успехом использовались высокогорные обсерватории-лаборатории, воздушные шары, шары-зонды, стратостаты. Однако даже предельная достигнутая высота (20—80 км) все же не выводила приборы за границы сравнительно плотных слоев атмосферы, что в свою очередь сильно затрудняло возможность выделить из регистрируемого потока большого разнообразия частиц самую важную их часть — первичные космические лучи.

И не удивительно, что в числе полезного груза ракет, впервые вырвавшихся за пределы земной атмосферы, в пустоту космического простран-



ства, главное место занимают всевозможные установки для изучения заряженных частиц. Первые же сигналы показаний приборов, автоматически переданные по радио на Землю, вызвали удивление ученых. На некоторых высотах космические лаборатории попадали в области, густо насыщенные заряженными частицами, обладающими очень большой энергией, резко отличными от наблюдавшихся ранее космических лучей — и первичных, и вторичных. В этом явлении, обнаруженном при запусках как советских, так и американских спутников, некоторое время смущало резкое расхождение в получаемых данных — случай в точных науках довольно редкий. Вскоре, однако, недоумение рассеялось. Советский ученый Вернов и почти одновременно с ним американский физик Ван Аллен установили, что земной шар окружен в экваториальной плоскости двумя, а по последним сведениям даже тремя сравнительно четко отделенными друг от друга поясами — нечто вроде гигантских бубликов, густо заселенных заряженными частицами разных зарядов, энергий и масс. Плотность частиц изменяется от края до края каждого пояса, причем космическое пространство в обе стороны от полюсов от них практически свободно. После обработки данных первых запусков ракет и полетов спутников стало ясно, что речь идет о заряженных частицах, захваченных магнитным полем Земли.

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

далее к противоположному полюсу, откуда начинается движение в обратном направлении. Частица оказывается как бы в гигантской «магнитной ловушке» планеты.

Первый такой пояс начинается на высоте примерно 500 км над западным и 1500 км над восточным полушарием Земли. Самая сильная концентрация частиц этого пояса — его «ядро» — находится на высоте двух-трех тысяч километров. Верхняя граница этого пояса достигает трех-четырёх тысяч километров над поверхностью Земли. Второй пояс частиц простирается от 10—11 тыс. до 40—60 тыс. км с максимальной плотностью частиц на высоте 20 тыс. км. Внешний пояс начинается на высоте 60—75 тыс. км.

Приведенные границы поясов определены пока еще только приблизительно и, видимо, в каких-то границах периодически изменяются. Закономерности этих изменений и пытаются установить ученые, систематически засылая многочисленные спутники с измерительной аппаратурой на разную высоту.

Отличаются эти пояса друг от друга тем, что первый из них, самый близкий к Земле, состоит из положительно заряженных протонов, обладающих очень большой энергией — порядка 100 Мэв. Их смогла захватить и удержать только самая плотная часть магнитного поля Земли. Второй пояс состоит главным образом из электронов с энергией «всего лишь» 30—100 кэв. В третьем поясе, где магнитное поле Земли самое слабое, удерживаются частицы с энергией 200 эв и более. Если учесть, что обычные рентгеновские лучи, применяемые кратковременно для медицинских целей, обладают энергией 30—50 кэв, а мощные установки для просвечивания огромных слитков и глыб металла — от 200 кэв до 2 Мэв, можно легко представить, какую смертельную опасность представляют эти пояса, особенно первый и второй, для всего живого и для космонавтов будущего при полетах на другие планеты. Вот почему сейчас ученые столь упорно и тщательно пытаются уточнить месторасположение и форму этих поясов, распределение частиц в них. Пока ясно лишь одно. Коридорами для выхода обитаемых космических кораблей на трассы к другим мирам будут области, близкие к магнитным полюсам Земли, свободные от частиц больших энергий.

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

Мы даже и не подозреваем, каким надежным щитом являются для человека и вообще для всего живого на Земле прозрачная и почти неосознаваемая атмосфера и совсем невидимое и неосязаемое магнитное поле пла-

неты. А к той сравнительно незначительной части излучений, которым все же удастся прорваться сквозь двойную природную броню Земли, живая материя и ее венец — человечество — за сотни миллионов лет своей эволюции полностью приспособились, и трудно даже фантазировать, какие бы формы приняла жизнь на планете, если бы она не была полностью защищена от всех видов космического излучения. Выход человека в космическое пространство сразу лишает его спасительного щита атмосферы и магнитного поля и подвергает воздействию всех видов излучения сразу.

Особенно опасно излучение радиационных поясов Земли из-за большой плотности и высокой энергии захваченных в них электронов. Ударяясь о стенки и любые металлические предметы космического корабля, все электроны с энергиями выше 10 кэв порождают так называемое *тормозное излучение* — рентгеновские лучи, которые, так же как и частицы, ионизируют вещество клеток организма человека и в зависимости от дозы облучения вызывают их разрушение и гибель. Проще всего было бы защититься от этих излучений, увеличив толщину стенок кабины космонавтов, покрыв их, например, толстым слоем свинца. Но это недопустимо утяжелит космический корабль. По сообщениям зарубежной печати, ученые пытаются решить проблему путем создания вокруг корабля по аналогии с земным шаром искусственного магнитного или электрического поля, достаточно сильного, чтобы отклонить в сторону встречные частицы. Одновременно ученые ищут и другие способы защиты, например лекарственные вещества, устраняющие или резко уменьшающие вредное влияние радиации на клетки организма. Некоторые ученые считают, что если погрузить космонавтов в гипнотический сон или даже охладить до состояния анабиоза, при котором все жизненные функции организма сильно затормаживаются, а следовательно, резко уменьшается и потребление кислорода, то в той же степени будет уменьшен и вред, наносимый клеткам ионизирующим излучением.

Радиоактивные осадки (радиоактивное загрязнение биосферы) — заражение атмосферы, местности, почвы, источников воды, различных сооружений радиоактивными веществами, происходящее в результате ядерных взрывов или распыления в воздухе радиоактивных отходов атомной промышленности.

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

Радиобиология — раздел биологической науки, изучающий изменения в животных и растительных организмах, происходящие в результате воздействия на них ионизирующей радиации. Радиобиология изучает тончайшие первичные механизмы действия ионизирующей радиации на живые клетки, поражения и необратимые изменения в клетках и осложнения, возникающие в организмах в результате воздействия ионизирующих излу-

ний, а также влияние излучений на наследственные изменения, проявляющиеся у потомства облученных организмов.

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

Радиохимия — наука, изучающая проблемы получения, разделения, очистки и определения радиоактивных веществ, а также методы измерения их основных свойств, химию ядерных реакций, при которых возникают и распадаются радиоактивные элементы. Радиохимия пользуется своеобразными методами, отличными от методов обычной химии, так как радиоактивное излучение веществ позволяет применять многие физические методы анализа с помощью всевозможных счетчиков частиц.

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

Современный период развития радиохимии связан самым тесным образом с использованием ядерных реакторов и как источника нейтронов, и как средства для производства искусственных радиоактивных изотопов любых элементов с самыми разнообразными физическими свойствами, а также мощных ускорителей, позволяющих получать искусственные трансураниевые химические элементы.

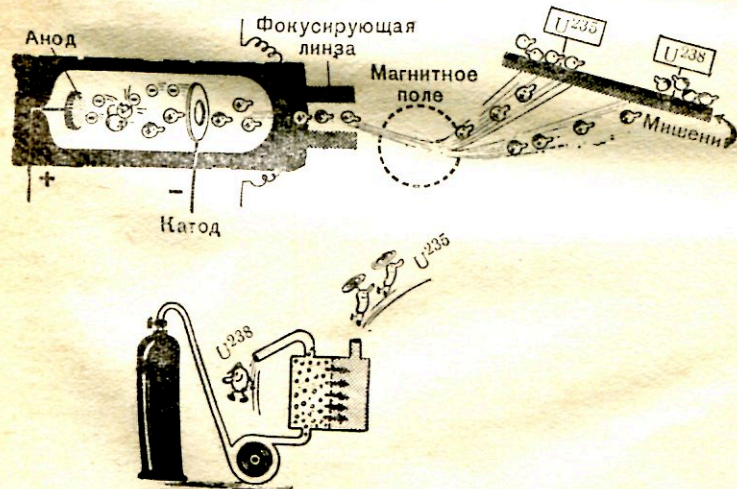
В связи с развитием мощной атомной промышленности радиохимия изучает и разрабатывает технологические процессы получения исходного радиоактивного сырья, восстановления отработанного в реакторах ядерного топлива, разделения продуктов деления и многие другие задачи и проблемы.

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

Если некоторое количество газообразного вещества (подлежащей разделению смеси изотопов) поместить в откачанную от воздуха трубку с двумя впадинами в нее электродами, к которым приложено высокое напряжение, то можно наблюдать следующую картину. По ряду причин в любом объеме газа всегда имеется какое-то количество свободных электронов, выбитых из атомов при столкновении некоторого числа атомов друг с другом. Под действием сильного электрического поля, создаваемого положительно заряженным анодом, эти свободные электроны тотчас же устремятся к положительно заряженному аноду. Сталкиваясь по пути с нейтральными атомами газа, электроны, уже набравшие большую скорость, будут их ионизировать — выбивать новые электроны. Выбитые электроны, ставшие тоже свободными, в свою очередь также устремятся к аноду и по пути начнут отрывать от встречных атомов свои порции электронов. В результате через трубку потечет электрический ток, сила которого будет зависеть от степени ионизации газа.

Ну, а как в это время будут себя вести положительные ионы — ядра атомов газа? Они устремятся в обратную сторону, к отрицательно заряженному катоду трубки — тоже с большой скоростью, но значительно медленнее электронов, ибо их масса в несколько тысяч раз больше массы электронов.

Если в катоде трубки сделать отверстие, то часть разогнавшихся до большой скорости ионов проскочит сквозь это отверстие и вырвется из него в виде узкого ионного луча. На пути у такого луча можно поставить несколько кольцевых электродов, к которым подведено дополнительное отрицательное напряжение для того, чтобы еще больше увеличить скорость ионов. Далее пучок ионов попадает в сильное магнитное поле. А любая заряженная частица, взаимодействуя с магнитным полем, изменяет на-



правление своего движения. Естественно, что ионы, имеющие различную массу, под действием магнитного поля будут отклоняться по-разному. Чем легче изотоп, тем сильнее будет искривлена траектория его полета. Если теперь поставить на пути пучка ионов слегка отрицательно заряженную мишень — металлическую пластинку, то каждый сорт ионов станет откладываться на разных участках пластинки.

Повторив такую операцию многократно, можно разделить элемент на составляющие его изотопы с любой степенью чистоты. На этом принципе и работает довольно сложный прибор — масс-спектрограф Астона, названный так по имени его изобретателя, английского физика.

С помощью этого прибора ученые исследовали почти все химические элементы периодической таблицы Менделеева: у одних элементов оказалось небольшое число изотопов, у других — более десятка (см. «Изотопы»).

Но одно дело — разделить неуловимо малые количества изотопов, другое — набрать достаточное их количество для изготовления атомной бомбы или использования в ядерном реакторе.

Более продуктивным оказался следующий метод. Из физики известно, что молекулы любой смеси газов имеют в среднем одну и ту же кинетическую энергию. Но это вовсе не означает, что все они движутся с одной и той же скоростью. Одни молекулы в результате многочисленных столкновений движутся быстрее, другие — медленнее, более легкие молекулы — вообще быстрее, чем более тяжелые.

Движущиеся быстрее легкие молекулы поэтому и чаще налетают на стенки сосуда, в котором заключена смесь газов, создавая в нем и различное давление: более высокое для легких молекул, более низкое — для тяжелых. Если одну из стенок сосуда изготовить из вещества с множеством микроскопических пор, то за некоторый отрезок времени из такого сосуда улетучится наружу несколько больше легких молекул газа, чем тяжелых. Просочившийся и собранный снаружи газ окажется на какую-то долю легче, чем оставшийся в сосуде. Такое избирательное пропускание более легких молекул газа через пористые стенки сосуда называют газовой диффузией.

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

Чтобы использовать этот способ для разделения изотопов природного урана, его нужно превратить в газ. Единственным газообразным соединением урана является шестифтористый уран, который и используют для разделения природной смеси изотопов урана-238 и урана-235.

Существует несколько других способов разделения изотопов, например центрифугирование, разделение в сверхзвуковом потоке, вытекающем из сопла, и другие, но все они пока недостаточно разработаны и поэтому не получили широкого применения.

РЕАКТОРЫ. Уран-графитовый реактор — первый и ставший как бы классическим основной тип ядерного реактора, в котором ядерное горючее размещено в замедлителе нейтронов — графитовых блоках. Благодаря малому поглощению нейтронов в графите реакторы такого типа обладают довольно высоким коэффициентом использования тепла и широко применяются в промышленных установках, предназначенных как для производства плутония, так и для выработки электрической энергии.

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

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

Реакторы на быстрых нейтронах — общее название ядерных реакторов, в которых деление ядерного топлива — сильно обогащенного урана-235 и плутония-239 — осуществляется быстрыми нейтронами с энергией 1 Мэв и выше. Такой реактор не содержит замедлителя. Обычно реакторы на быстрых нейтронах имеют малые размеры, но большую загрузку топлива. Существует целый ряд конструкций таких реакторов, например импульсный, размножительный (бридерный) и др.

Импульсный реактор. Представьте себе два куска плутония (их масса несколько меньше критической массы), установленных так, чтобы между ними оставалась щель (достаточная для того, чтобы не началась цепная ядерная реакция). В этой щели со скоростью пять тысяч оборотов в минуту вращается диск с укрепленным на нем кусочком урана-235. В тот ничтожно короткий момент, когда кусочек урана-235 влетает в щель и оказывается между кусками плутония, масса всей комбинации из ядерного горючего оказывается выше критической, и в ней начинается взрывная цепная реакция. Тогда...

Взрыва не произойдет, ибо за какую-то малую долю секунды до возможного взрыва кусочек урана выскакивает из щели, и цепная реакция столь же быстро угасает. Но в момент «противостояния» плутония и урана выбрасывается, как вспышка молнии, сгусток быстрых нейтронов.

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

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

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

И перед учеными встала новая проблема: каким путем выгоднее всего и технически проще высвободить скрытую в недрах атома энергию — прямым, предварительно отделяя от природной смеси урана 0,7% его дра-

гощенного делящего изотопа — урана-235 (см. «Разделение изотопов») или возбуждая в нем (вернее, «усмиряя») саморазвивающуюся цепную ядерную реакцию деления урана-235 в неразделенной природной смеси урана? Если при этом искусственно замедлить энергию выбрасываемых при делении ядер атомов урана-235 нейтронов до скорости, при которой большинство их будет усиленно поглощаться ядрами атомов урана-238, то, претерпев короткую цепочку радиоактивных распадов, ядра атомов урана-238 превратятся в ядра атомов не существующего в природе искусственного радиоактивного элемента плутония-239, который делится нейтронами любых энергий — от тепловых до быстрых.

Что при этом теряется? Выжигая из природной смеси 0,7% урана-235, можно превратить в плутоний-239 несколько меньшее количество урана-238 (0,3—0,5 от 0,7%).

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

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

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

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

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

Допустим, в реакторе «сгорит» 1 кг где-то ранее полученного обычным способом плутония-239. Каждый его атом, расколовшись надвое, «выстрелит» двумя-тремя быстрыми нейтронами с энергией более 1 Мэв. Один нейтрон, скажем, в среднем будет израсходован на поддержание хода цепной реакции в самом плутонии, а от 1,5 до 2 нейтронов застрянут в ядрах урана-238, превратив их сперва в нептуний-239, а затем в плутоний-239. В конечном счете в урановом «зеркале» появится, предположим, от 0,5 до 1 кг плутония-239.

Если этот 1 кг плутония-239 снова заложить в такой же реактор, то в плутоний превратится уже 2 кг урана-238. Короче говоря, вместо 1/140 части

природного урана в нем можно использовать в несколько раз больше, а со временем и все 100%!

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

Реактор на промежуточных нейтронах — ядерный реактор, в котором деление ядер атомов урана вызывается нейтронами промежуточных энергий от 1 кэв до 0,5 Мэв.

Реактор на медленных (тепловых) нейтронах — любой вид ядерного реактора, в котором подавляющее большинство делений ядерного топлива происходит путем захвата медленных (тепловых) нейтронов, для чего используют замедлители (вода, графит, тяжелая вода), снижающие энергию нейтронов примерно до 0,03 эв.

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

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

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

Реактор с органическим замедлителем и теплоносителем — ядерный реактор, в котором в качестве замедлителя и теплоносителя используют органические вещества, например дифенил, терфенил и др. Главные преимущества применения таких веществ: возможность значительно уменьшить активную зону реактора и снизить требования к прочности корпуса; отпадает опасность коррозии тепловыделяющих элементов и других деталей; уменьшается поглощение нейтронов.

Реактор с тяжелой водой — ядерный реактор, у которого замедлителем служит тяжелая вода. Данный тип реактора особенно пригоден для научных исследований, так как позволяет получать в активной зоне очень большие количества нейтронов.

Реактор бассейнового типа — ядерный реактор, в котором тепловыделяющие элементы в виде набора кассет погружены на дно большого бассейна, вода которого служит одновременно и охладителем рабочей зоны, и замедлителем нейтронов. Используют его главным образом для исследовательских целей и приготовления радиоактивных изотопов.

Реактор на жидком топливе — ядерный реактор, в котором ядерное топливо используют в жидком виде — в виде раствора солей урана или плутония или в виде тонкой взвеси делящихся веществ в какой-либо другой жидкости. Жидкость, в которой растворено или взвешено ядерное топливо, служит одновременно и замедлителем нейтронов, и теплоносителем, отводящим тепло от рабочей зоны. Реактор такого типа имеет то преимущество, что удаление продуктов деления и неиспользованной части ядерного горючего и введение свежего горючего можно осуществлять постепенно и непрерывно, без необходимости останавливать реактор на перезарядку. Однако такие преимущества одновременно усложняют конструкцию реактора и затрудняют его работу, так как для непрерывной регенерации топлива необходимо добавлять специальный узел, в котором постоянно должна находиться часть циркулирующего через реактор делящегося материала. По этой же причине значительно увеличивается объем биологической защиты.

Резоны — частицы с необычно коротким сроком жизни (около 10^{-24} сек), открытые в 1962 г. с помощью новых гигантских ускорителей одновременно в СССР и США. Ввиду столь малого срока жизни ученые склонны рассматривать их не как своеобразное подсемейство элементарных частиц, а скорее как некую мгновенную промежуточную и крайне неустойчивую форму существования «нормальных» элементарных частиц.

Рекомбинация — обратное соединение атомов в молекулы вещества, распавшихся («диссоциировавших») под действием внешних сил, например очень высоких температур.

Рентгеновские лучи (лучи Рентгена) — электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны — примерно от 0,06 до 20 \AA [одни ангстрем (Å) равен одной стомиллионной доле сантиметра [10^{-8}]]. Образуются при торможении (столкновении) потока быстрых электронов в веществе (см. «Тормозное излучение»). При этом может возникнуть сплошной спектр излучения рентгеновских лучей — от самых коротких до самых длинных, хотя подавляющая часть испускаемых веществом лучей будет тем короче, чем выше энергия (скорость) бомбардирующих его электронов. В тех случаях, когда энергия электронов настолько велика, что заставляет переходить с орбиты на орбиту электроны, расположенные на самых «глубоких», внутренних электронных оболочках атомов, испускаются так называемые характеристические лучи, спектр которых не сплошной, а линейчатый.

Эта особенность позволяет на основании спектра рентгеновских лучей, испускаемых тем или иным веществом, при облучении его потоком быстрых электронов определять ряд его физических свойств и детали строения этого вещества. Рентгеновские лучи могут преломляться, отражаться, претерпевать дифракцию и интерференцию, но только в тех веществах, в которых расстояния между атомами примерно такие же, как и длина применяемых рентгеновских лучей, т. е. главным образом в кристаллах.

Рентген — очень важная в ядерной технике величина, показывающая степень ионизации вещества под действием рентгеновского или гамма-излучения или, что одно и то же, количество поглощенных им излучений. Эта величина равна излучению, при котором в 1 см^3 воздуха при обычном атмосферном давлении и 0°C образуются заряды (ионы) обоих знаков величиной в одну электростатическую единицу каждый. Один рентген соответ-

ствует образованию в 1 см³ воздуха 2,1 миллиона пар ионов. Чтобы образовать одну пару ионов в воздухе, каждому фотону излучения необходимо затратить 32,5 эв энергии. Величина излучения, измеренная в рентгенах, имеет важное значение для определения безопасных и опасных доз, которыми можно облучать живые организмы.

Доза ионизирующих излучений, отличных от рентгеновского или гамма-излучений (альфа- и бета-частицы, протоны, нейтроны и т. д.), измеряется единицей, называемой физическим эквивалентом рентгена (*фэр*). Но так как биологическое воздействие таких частиц на живые организмы различно, оно измеряется другой единицей, названной биологическим эквивалентом рентгена (*бэр*).

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

С

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Синтеза ядерная реакция	120
Спин (электрона)	120
Стимулирующее действие излучений	121

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

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

Спин (электрона). Помимо энергии, связанной с движением вокруг ядра атома, электрон обладает еще и дополнительной энергией, связанной с вращением вокруг своей оси наподобие волчка, откуда и происходит слово «спин» (спин — по-английски «верчение»). Поскольку же электрон имеет электрический

заряд, то при его вращении возникает круговой электрический ток, а следовательно, и магнитное поле, превращающее электрон в маленький электромагнитик, имеющий два магнитных полюса. Так как электрон может вращаться в разных направлениях — по часовой стрелке и против нее, то он может пребывать в двух различных энергетических, или, как говорят, спиновых, состояниях. Спин электрона вызывает ряд дополнительных взаимодействий, играющих исключительно важное значение в физических свойствах атома.

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

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

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

Свободный пробег частицы — расстояние между двумя последовательными столкновениями частицы с другими частицами в процессе движения ее в какой-либо среде, например в газе или ином веществе.

Синхрофазотрон — тип ускорителя частиц (см. «Ускорители частиц»). В этом типе ускорителя тяжелых заряженных частиц в отличие от циклотрона и фазотрона применено переменное управляющее магнитное поле.

периодически нарастающее и спадающее до некоторой начальной величины. Это позволяет частице двигаться не по спиральной, как в циклотроне и фазотроне, а по круговой орбите постоянного радиуса. Каждому увеличению напряженности управляющего магнитного поля здесь соответствует и вполне определенное нарастание частоты ускоряющего напряжения, что позволяет все чаще и чаще «подхлестывать» все быстрее и быстрее летящую по одной и той же орбите частицу. При таких условиях движения можно сделать магнитную систему в виде кольца, собранного из отдельных электромагнитов. Однако для достижения высоких энергий ускоряемых частиц требуется и очень большая электромагнитная система. Магнит синхрофазотрона в Дубне, ускоряющего частицы до энергии 10 млрд. эв (10 Гэв), весит около 35 тыс. т.

Дальнейшее увеличение энергии в ускорителе такого типа потребовало бы применения еще более мощных магнитных систем. Поэтому ищутся и разрабатываются более совершенные принципы работы ускорителей. В частности, многие трудности удалось преодолеть за счет применения принципа жесткой фокусировки, предложенного советским ученым Векслером. Суть ее заключается в увеличении магнитного «обжатия» пучка ускоряемых частиц со всех сторон с помощью управляющего магнитного поля особой, специально подобранной формы. В отличие от старых ускорителей с «мягкой» фокусировкой, когда частицы фокусировались магнитной системой одновременно и в вертикальном и горизонтальном направлениях, в ускорителях с «жесткой» фокусировкой применено «разделение труда». Магниты поочередно фокусируют частицы то в вертикальном, то в горизонтальном направлении. Это позволяет осуществить более точную фокусировку потока частиц и резко уменьшить размеры камеры и вес магнита. Для этого применяют магниты, в которых поле резко нарастает с увеличением радиуса. Такая конструкция значительно уменьшает размах отклонений частиц при их движении в вакуумной камере и позволяет еще больше сократить размеры вакуумной камеры и магнитной системы.

Принцип жесткой фокусировки применяют во всех крупнейших ускорителях, построенных за последние годы. Будет он использован и в самом большом в мире ускорителе на 60—70 Гэв, сооружаемом в г. Серпухове.

Стерилизация пищевых продуктов. Способность радиоактивных излучений подавлять жизнедеятельность и уничтожать ряд болезнетворных бактерий и других паразитов позволила разработать несколько методов стерилизации пищевых продуктов не только в готовом, но и в сыром виде, в частности сырое мясо, свежую рыбу и др. В медицине лучевую стерилизацию применяют для обеззараживания хирургических инструментов, перевязочных материалов, питательных сред при микробиологических исследованиях, питьевой воды и т. д.

Стронций — химический элемент с порядковым номером 38 и атомным весом 87,63. Относится к щелочным металлам. Имеет четыре стабильных изотопа: стронций-84 (0,56%), стронций-86 (9,86%), стронций-87 (7,02%) и стронций-88 (82,56%).

При делении ядер урана образуется целое семейство радиоактивных изотопов стронция, главным образом стронций-89 с периодом полураспада 50,5 дня, испускающий бета-частицы с энергией 1,463 Мэв, и стронций-90 с периодом полураспада 27,7 года, испускающий бета-частицы с энергией 0,61 Мэв.

Печальную известность стронций-90 получил потому, что является опасным осадком, выпадающим на поверхность Земли после взрывов атомных бомб. Растворяясь в воде, он всасывается растениями, которые поедаются домашними животными, а через их молоко попадает в организм человека. Будучи химически близким к кальцию, стронций-90 откладывается в костях человека, создавая постоянное внутреннее облучение костной ткани и заключенного в ней костного мозга.

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

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

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

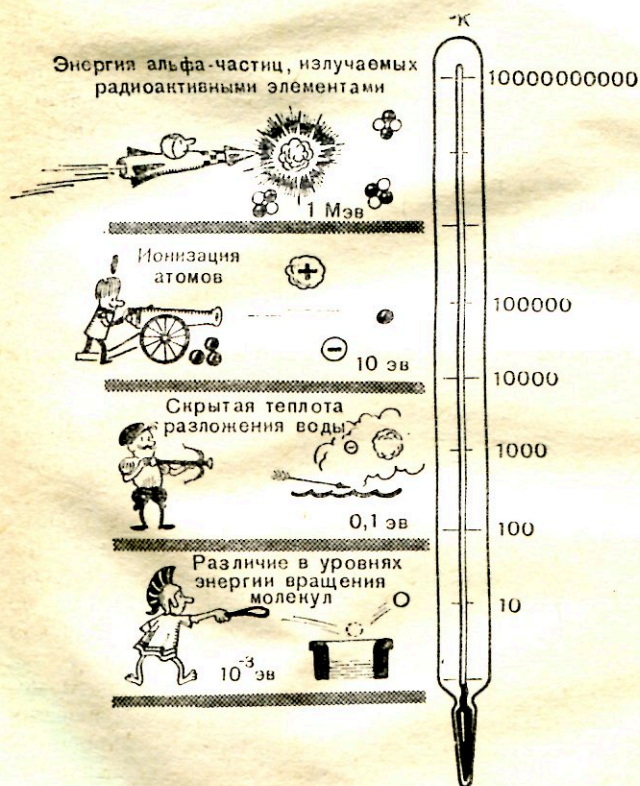
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Тепло _____	123
Температура _____	124
Термоядерная реакция _____	126
Трансурановые элементы _____	132

T

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

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



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

Отсюда вывод: каждой энергии частицы или совокупности частиц соответствует своя скорость движения, а следовательно, и число столкновений с другими частицами и, как результат, разная температура. Поэтому, чтобы судить о состоянии вещества, важно знать самую исходную характеристику энергии его частиц. А температура совокупности этих частиц является уже следствием средней энергии их движения.

Тщательные измерения энергетических уровней частиц показали, что энергии движения частицы, равной 1 эв , соответствует температура $11\,600$ градусов. Чтобы оторвать, например, электрон от атома водорода, нужно затратить энергии $13,53 \text{ эв}$. Следовательно, чтобы осуществить ту же самую операцию, только нагревая атомы вещества, нужно было бы поднять их температуру значительно выше $10\,000$ градусов. Такова связь между энергией, выраженной в электронвольтах, и энергией, выраженной в градусах.

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

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

Здесь необходимо сделать одно очень существенное замечание. Главной характеристикой тепловой энергии является то, что это энергия беспорядочного движения и столкновения частиц, движения как попало, во все стороны, независимо от

времени. Только при таком естественном беспорядочном распределении направлений скоростей и числа столкновений частиц мы имеем право отождествлять это движение с температурой газообразной системы частиц.

Совсем другую физическую картину мы будем наблюдать при движении потока частиц в вакууме, всех в одном направлении, например частиц, разгоняемых в ускорителях до энергии, допустим, равной 1 Гэв (1 млрд. эв).

При таких энергиях мы, казалось бы, должны получить температуру состоящего из этих частиц газа, равную 10 миллионам миллиардов градусов. Однако мы этого не наблюдаем, так как движение частиц носит организованный характер. Все они движутся в одном направлении, мало сталкиваясь друг с другом, что резко отличается от беспорядочного теплового движения частиц, какое происходило бы в газе при такой скорости составляющих его частиц. Поэтому мы успешно можем определить энергию этих частиц (что нам, собственно говоря, и нужно), но ничего не можем сказать о температуре этого потока частиц. Да и знать ее не существенно: она будет незначительна. Но зато мы можем точно сказать, какова будет температура совокупности этих частиц, когда они обрушатся на какую-либо мишень, т. е. когда организованное движение их превратится в хаотическое. Она и будет равна миллионам миллиардов градусов.

Термоядерная реакция. Что это за реакция?

Возьмем условно случай образования ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$ путем слияния двух ядер тяжелого водорода ${}^2_1\text{H}$. Условно потому, что осуществить такую реакцию, о чем будет сказано ниже, пока труднее, чем другие. Выделяющаяся при этом энергия $23,64 \text{ Мэв}$ является разницей между полной энергией связи ядра атома гелия ($28,2 \text{ Мэв}$), удерживающей вместе четыре нуклона, и полной энергией связи двух ядер тяжелого водорода (по $2,28 \text{ Мэв}$ каждый), удерживающей лишь по два нуклона в ядре.

Как видим, чтобы высвободить столь огромное количество энергии, нужно солидно и «потратиться». В этом пока ничего удивительного нет. Самое неприятное заключается в следующем: слияние двух ядер тяжелого водорода возможно в том случае, если энергия каждого из них будет не менее 20 кэв . А ее они могут приобрести только в том случае, если дейте-

рий нагреть до температуры порядка 200 млн. градусов! Это очень и очень много, если учесть, что при обычной комнатной температуре тепловая энергия частиц воздуха равна только 0,25 электронвольта! (см. «Тепло» и «Температура»). Только при такой температуре, существующей лишь в недрах очень горячих звезд, станет возможным преодолеть взаимное отталкивающее действие двух положительно заряженных ядер тяжелого водорода и «втолкнуть» их в сферу действия других, еще более мощных и уже притягивающих внутриядерных сил.

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

Поскольку добиться слияния ядер атомов легких элементов в ядра более тяжелых атомов — водорода в гелий — и получить нужную для этого энергию движения частиц мы можем лишь при температурах в сотни миллионов градусов, когда все.



что есть в природе, даже при более низких температурах превращается в плазму, становится вполне понятным, почему после длительных исследований ученые пришли к убеждению, что решение проблемы управляемой термоядерной реакции скрыто среди многочисленных тайн плазменного состояния вещества.

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

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

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

Напомним, что все вышеизложенные рассуждения мы вели условно, ибо не сказали самого главного: где взять источник тепла, чтобы нагреть нашу плазму до температуры недр звезды — 200 млн. градусов?

Делу помогла... молния.

В холодном состоянии газ — отличный изолятор электричества, но до поры до времени.

Уже при сравнительно невысоком электрическом напряжении в сильно разреженном газе может происходить так называемый газовый разряд. Младший представитель огромного семейства газоразрядных устройств — хорошо всем известная световая реклама.

Но что если попробовать сквозь наполненную разреженным газом трубку, обладающую огромным запасом прочно-

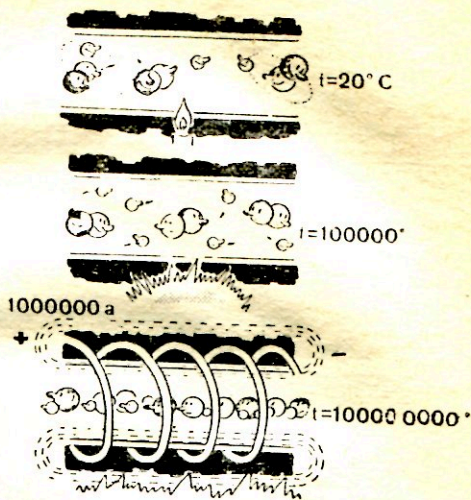
сти, разрядить батарею конденсаторов, заряженных до колоссально высокого напряжения — порядка пяти-шести миллионов вольт?

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

Что такое газовый разряд в трубке, наполненной разреженным газом? Упорядоченное на короткий отрезок времени движение электрически заряженных частиц — свободных электронов, всех в одном направлении, а положительных ионов — в противоположном направлении.

А что такое организованное движение электронов? Электрический ток. А мы знаем, что вокруг проводника, по которому протекает электрический ток, возникает кольцевое магнитное поле. И чем сильнее ток, тем сильнее будет создаваемое им вокруг самого себя магнитное поле. Если такой текущий в одном направлении ток пропустить по пучку параллельных проводников, то магнитное поле с большой силой немедленно сожмет их вместе. Идеально ионизированная плазма и является по сути дела довольно рыхлым пучком проводников.

А раз так, то непрерывно нарастающее, по мере увеличения силы тока сквозь плазму, кольцевое магнитное поле, образующееся вокруг трубки, начнет сжимать рыхлую плазму в тоненький плазменный шнур, уменьшая ее объем, а тем самым



еще больше увеличивая ее температуру и давление, так как число взаимных столкновений атомных частиц в малом объеме плазмы резко возрастает. И, что самое главное, магнитный кулак, сжимающий плазму, отрывает ее от стенок трубки, прекращая утечку через нее тепла в окружающее пространство. А это в свою очередь еще больше поднимает температуру плазмы. А если прекратилась мощная бомбардировка стенок трубки бушующими частицами, то прекращается и давление на них — отпадает неразрешимая задача создания трубок с фантастической прочностью стенок.

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

Ничего этого, конечно, не произойдет и произойти не может. Во-первых, плазма создается в сравнительно ничтожном объеме к тому же еще и сильно разреженного газа. И даже если бы во всем ее объеме сразу возникла взрывная термоядерная реакция, сила взрыва была бы ограниченной, во всяком случае безопасной.

Далее. От температур, которые можно получить, разогревая плазму таким способом, до требуемых для реакции синтеза 200 млн. градусов дистанция пока еще слишком велика.

Правда, если применять вместо одного только дейтерия смесь дейтерия и трития, необходимая для возникновения термоядерной реакции температура существенно уменьшится, и она возможна даже при нескольких десятках миллионов градусов.

Ну, а как установить, что такая реакция осуществилась во время разряда? По возникновению нейтронного излучения. При слиянии двух ядер атомов тяжелого водорода (дейтерия) образуется ядро изотопа гелия-3 и выбрасывается или протон, или нейтрон, одновременно возникает гамма-излучение и выделяется энергия, равная 3,2 Мэв. Если один из атомов дейтерия заменить атомом сверхтяжелого водорода (тритием), то образуется ядро гелия (альфа-частица), испускается один нейтрон и немного гамма-лучей. В этом случае выделяется

14,6 Мэв энергии. Слияние ядра атома сверхтяжелого водорода трития с протоном дает альфа-частицу и энергию 19,8 Мэв, наконец, при синтезе ядра лития-6 с ядром тяжелого водорода образуется две альфа-частицы и выделяется энергия 22,4 Мэв.

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

Магнитное поле, к сожалению, оказалось не идеальной невидимой стенкой, удерживающей плазму в самом центре трубки. Во-первых, может случиться так, что отдельные частицы плазмы, сталкиваясь друг с другом в бесконечных комбинациях скоростей и энергий, могут случайно приобрести столь большую энергию, что их в конце концов выбросит сквозь любое самое сильное магнитное поле к стенке сосуда.

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

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

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

пути незримую и пока неизвестно из чего состоящую, скорее даже условную, магнитную силовую «линию».

Выстрелим пучком электронов или положительно заряженных ионов дейтерия сбоку в большую, тщательно откачанную от воздуха трубу, вокруг которой размещены огромные катушки, создающие внутри нее сильное магнитное поле. Частицы тотчас же начнут «навиваться» на линии этого поля, сталкиваться друг с другом и нагреваться. Если теперь будем увеличивать силу магнитного поля, то, сжимаясь, оно начнет сжимать и гирлянды навившихся на линии этого поля заряженных частиц. Число их столкновений друг с другом увеличится, поднимется и температура плазмы. Если на концах такой трубы — магнитной ловушки — создать еще более сильное магнитное поле, то заряженные и завивающиеся по спирали частицы отскочат от него и начнут свое движение обратно, с тем чтобы, повстречавшись с такой же магнитной стенкой или «зеркалом» на другом конце стены, еще раз начать обратное движение. Так и будут качаться взад и вперед вдоль линий магнитного поля частицы, набираясь под действием сжимающего их магнитного поля энергии, а с нею и повышая температуры всей плазмы. Установка, действующая на этом принципе, называется «Огра». Она разработана в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Частицы плазмы можно заставить двигаться и вдоль бесконечной (кольцевой) трубки, сжимая ее не поперечным, а продольным магнитным полем. Для устранения некоторых недостатков такую «баранку» можно скрутить еще один раз и получить «восьмерку». Это и будет «стелларатор», с которым больше всего работают американские ученые.

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

Трансурановые элементы. Попытки Э. Ферми и его молодых коллег в середине 30-х годов создать новые, еще более тяжелые, чем уран, химические элементы, бомбардируя его нейтронами, поначалу увели ученых довольно далеко в сторону, и, лишь свершив почетный и полный сенсационных открытий круг, лежащий через легкие осколки урана-235, удалось обнаружить существование и новых, действительно сверхтяжелых заура-

новых искусственных элементов — нептуния-239 (№ 93) и плутония-239 (№ 94). Однако попытки получения более тяжелых элементов не удалось, так как выяснилось, что энергии и свойств любых имевшихся в распоряжении ученых частиц, в том числе и всемогущего нейтрона, для этой цели совершенно недостаточно. И лишь с вводом в действие мощных ускорительных установок, разгоняющих частицы до энергии в сотни миллионов и миллиарды электронвольт, один за другим стали появляться новые искусственные трансурановые элементы с атомными номерами от 95 до 104: америций-243 (1945 г.), кюрий-247, берклий-247, калифорний-249, эйнштейний-254, 100-й элемент, названный в честь Э. Ферми — фермий-253, 101-й элемент, открывающий счет новой сотне, названный в честь великого русского химика менделеевием-256, nobelий-254 и, наконец, открытые совсем недавно лоуренсий-257 и 104-й элемент, еще не получивший названия.

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

В естественных земных породах они не встречаются. Некоторые из этих элементов были получены в столь ничтожном количестве (17 атомов!), что для определения их свойств понадобились самые точнейшие средства современной радиохимии.

Тепловыделяющий элемент — самый основной и важный узел ядерного реактора, с помощью которого в активную зону вводится ядерное горючее и отводится от него тепло.

Обычный тепловыделяющий элемент состоит из сердечника в форме цилиндра, содержащего делящийся материал, и металлической оболочки.

Тепловыделяющие элементы могут собираться в сборки — пакеты, каскады и т. д.

Главной заботой конструкторов реакторов является создание и использование для тепловыделяющих элементов таких материалов, которые предельно долго не изменяли бы своей механической прочности, физических свойств, геометрических размеров под действием высоких температур и механических напряжений, интенсивной нейтронной бомбардировки и мощного гамма-излучения.

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

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

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

В силу этих причин наиболее часто применяемыми теплоносителями пока еще являются дистиллированная вода и значительно реже — тяжелая вода.

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

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

Торий — тяжелый природный радиоактивный химический элемент, занимающий 90-е место в периодической таблице Менделеева, с атомным весом 232,05. Металлический торий состоит практически из одного изотопа — тория-232, так как на все остальные его 13 изотопов приходится менее 1%.

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

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

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

Тормозное излучение. Если летящая с большой скоростью частица поглотит откуда-то извне некоторое количество энергии, то это тотчас же отразится на скорости ее движения — она увеличится на соответствующую данной энергии строго определенную величину. В случае же резкого замедления — «торможения» — высвобождающаяся энергия будет испускаться в виде квантов рентгеновского излучения. Такое излучение и называется «тормозным».

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

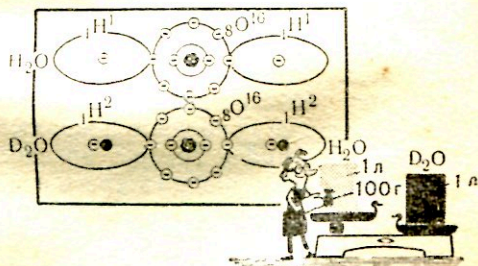
Треки — следы элементарных частиц, зафиксированные в регистрационных камерах (камере Вильсона, пузырьковой и других камерах), в фотоэмульсиях.

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

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

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

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



Тяжелая вода является отличным замедлителем нейтронов. В ядерных реакторах она одновременно используется в качестве замедлителя и теплоносителя.

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

У

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Управляемая цепная реакция деления _____	136
Управляемая термоядерная реакция (ядерный синтез) _____	139
Уран _____	139
Ускорители частиц _____	140

Управляемая цепная реакция деления. Представим себе, что в делящийся изотоп урана-235 влетел один-единственный нейтрон. Попав в одно из ядер атома урана-235, он разделит его на две части. При этом высвобождается относительно огромное количество энергии — примерно 200 Мэв. Но самое важное заключается в том, что в результате расщепления ядра атома урана-235 на две части будет выброшено два свободных нейтрона, которые разделят два ядра с образованием уже четырех нейтронов. Эти четыре нейтрона разделят четыре новых ядра урана-235. Четыре ядра выбросят уже 8 нейтронов, способных разделить такое же количество ядер атомов урана. Далее процесс деления и высвобождения нейтронов пойдет лавинообразно, удваиваясь при каждом новом поколении. Одним словом, начнется саморазвивающаяся цепная ядерная реакция деления.

Чтобы сразу определить, как быстро будет нарастать такая реакция в каком-либо куске делящегося вещества, вводят особую величину, называемую *коэффициентом* размножения нейтронов K .

Этот коэффициент показывает, во сколько раз каждое последующее поколение появляющихся нейтронов больше предыдущего, иначе говоря, во сколько раз увеличивается нейтронный поток после каждого использования очередной порции народившихся на свет нейтронов.

Если эта величина будет хоть на тысячную долю процента больше единицы, количество нейтронов, а вместе с ним и число

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

Как же в таком случае осуществить управляемую цепную ядерную реакцию?

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

Однако есть пути для создания цепной реакции и в естественном уране.

Проблема состоит в том, чтобы сразу же после каждого деления ядра урана-235 каким-то способом замедлить нейтроны до такой энергии, при которой они уже не будут все захватываться ядрами атомов урана-238. Тогда часть нейтронов, замедленных до тепловых энергий, сможет разделить нужное для поддержания хода цепной реакции число ядер атомов урана-235, а нейтроны, не успевшие замедлиться до тепловых энергий, будут поглощены ядрами урана-238. Отсюда возникла новая задача: найти такие средства или такое вещество, которое позволяло бы замедлить свободные нейтроны до тепловых скоростей — порядка $0,03 \text{ эв}$ — и при этом само бы не поглощало нейтронов.

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

Из законов механики следует, что если скорость движущегося тела замедлять путем упругих столкновений его с другим неподвижным или медленно движущимся телом, то наибольшее количество энергии теряется (передается другому телу) в том случае, когда массы сталкивающихся тел одинаковы или

близки друг другу. Поэтому для замедления нейтронов лучше всего применять ядра легких атомов, например водорода, масса которого почти равна массе нейтрона. Наилучшими замедлителями по совокупности свойств: малому поглощению нейтронов, эффективности замедления, минимальной стоимости и удобству эксплуатации — являются тяжелая вода, чистый графит и даже обычная дистиллированная вода. Эффективное замедление нейтронов достигается в так называемых гомогенных реакторах, где ядерное горючее равномерно распределено в замедлителе. Избежать усиленного поглощения ядрами урана-238 нейтронов, замедленных до резонансной энергии (скорости), в этом случае не удастся. Поэтому, чтобы возбудить цепную реакцию, количество делящегося изотопа урана-235 должно быть соответственно увеличено.

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

Расстояния между тепловыделяющими элементами подбирают такие, чтобы нейтроны, выброшенные при делении ядер урана-235, поглощались ядрами урана-238 не все сразу. Часть их, пролетая сквозь слой замедлителя (графита), должна успеть в нем замедлиться до тепловых скоростей (0,03 эв), минуя резонансные скорости (1—7 эв), и, понав в соседний слиток урана, спокойно разделить ядро атома урана-235, избежав поглощения его по пути ядром атома урана-238. Естественно, что вызванное этим большое рассредоточение урана-235 требует значительного увеличения количества природного урана, необходимого для образования *критической массы*. Для этого в реактор приходится закладывать несколько десятков и даже сотен тонн природного урана.

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

Совершенно неожиданно делу помогло наличие так называемых *запаздывающих нейтронов*.

Дело в том, что два-три нейтрона, выбрасываемые при делении ядер урана-235, появляются не все сразу, а в разное

время. Сначала вылетают мгновенные нейтроны, составляющие примерно 99% их общего числа, и лишь потом остальные — 1% нейтронов — с запозданием примерно от 0,0001 до нескольких десятков секунд.

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

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

Следовательно, число безвозвратно теряемых нейтронов резко сократится. В результате такой экономии нейтронов можно соответственно уменьшить загрузку реактора ядерным горючим.

Управляемая термоядерная реакция (ядерный синтез).

Осуществить термоядерную реакцию — реакцию синтеза (слияния) ядер атомов легких элементов в ядро атомов более тяжелых элементов (гелий) — удалось пока только одним путем — в виде взрыва водородной бомбы огромной разрушительной силы. Большой пользы человечеству такая взрывная реакция, естественно, не приносит. Поэтому ученые упорно добиваются возможности получения контролируемой, т. е. управляемой термоядерной реакции, вернее, замедления ее хода до такой степени, чтобы можно было использовать ее уже для практических целей, в первую очередь, видимо, для выработки электрической энергии, так как при реакции синтеза энергии выделяется в восемь раз больше, чем при реакции деления на единицу веса исходных продуктов.

Уран — радиоактивный природный элемент, занимающий 92-е место в периодической системе Менделеева, с атомным весом 238,07. Уран — металл серебристого цвета, легко под-

дается механической обработке. Температура плавления 1130°C . Хорошо окисляется на воздухе, воспламеняется в обычной атмосфере при температуре около 100°C . Состоит из смеси трех изотопов: урана-238 (99,27%), урана-235 (0,72%) и урана-234 (0,006%). Уран-238 и уран-235 являются родоначальниками семейств естественных радиоактивных элементов, которые после длинного ряда последовательных распадов превращаются в устойчивые (стабильные) изотопы свинец-206 и свинец-207. Период полураспада урана-238 равен 4,5 млрд. лет, урана-235 — 710 млн. лет и урана-234 — 250 тыс. лет.

Целый ряд изотопов урана может быть получен искусственным путем, но из них наиболее важен уран-233, образующийся в результате нейтронной бомбардировки тория-232. Уран-233 также легко делится как быстрыми, так и медленными нейтронами. Эта триада элементов — один естественный и два искусственных — и является тем, что называется *атомным (ядерным) горючим*.

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

Мы знаем, что, попав в электрическое поле, любая заряженная частица постепенно ускоряет свое движение, а влетев в магнитное поле, начинает закручиваться вокруг мысленно представляемых нами линий этого поля. Эти особенности, взятые порознь или в комбинации, и натолкнули на мысль использовать их для создания тяжелой атомной артиллерии — ускорителей заряженных частиц. В первом случае частицу разгоняют прямолинейно. Ускорители такого вида называют линейными. Во втором случае частицы одновременно закручиваются еще и по спирали. Ускорители этого вида называют циклическими, т. е. повторяющимися.

Линейный ускоритель — это длинная прямая труба, тщательно откачанная от воздуха. Внутри нее друг за другом установлено большое число электродов — металлических трубок, хорошо изолированных от главной трубы. Длина каждого электрода по мере удаления от входного конца ускорителя

постепенно увеличивается. На каждые два соседних электрода подают сравнительно невысокое переменное электрическое напряжение от специального генератора колебаний высокой частоты.

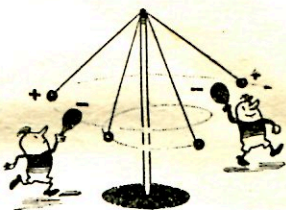
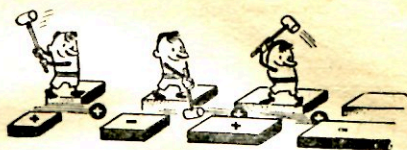
Когда первый электрод в какой-то момент оказывается заряженным, допустим, положительно, то расположенный следом за ним электрод будет заряжен отрицательно.

Дальше снова идет трубка, заряженная положительно, а следующая за ней — отрицательно, и так до конца ускорителя. Напряжение на электродах непрерывно меняют так, чтобы положительные и отрицательные заряды как бы бежали один в догонку за другим вдоль электродов ускорителя.

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

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

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



Пролетев всю длину ускорителя, порция электронов разгоняется до скорости, близкой к скорости света, и приобретает энергию, измеряемую сотнями миллионов и даже миллиардами электронвольт. Через установленное в конце трубы непроницаемое для воздуха окошечко порция ускоренных электронов направляется в специальные установки для облучения ими исследуемых веществ.

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

Порция подлежащих ускорению заряженных частиц впрыскивается в самом центре воображаемой спирали. Сначала они набирают скорость довольно быстро, но потом этот процесс замедляется, а затем и прекращается вовсе, так как чем больше скорость движения частиц приближается к скорости света, тем тяжелее и тяжелее они становятся и начинают постепенно отставать от меняющего свой знак электрического напряжения на дуантах. Предел наступает где-то около 20—30 Мэв. Такие установки называют циклотронами.

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

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

Сначала были построены установки на 2,9 и 6,2 Гэв (млрд. эв) в США, затем на 10 Гэв в г. Дубне (СССР), наконец, на 25 Гэв в г. Берне (Швейцария) и на 33 Гэв в г. Брукхейвене (США). В СССР сооружается поистине гигантский, самый мощный в мире ускоритель на энергию 60—70 Гэв и ведутся работы над еще более мощными установками.

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

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

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

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

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



1	50 млрд. атомов ^{14}C
1/2	25 млрд. через 5568 лет
1/4	12500 млн. через 11000 лет
1/8	6000000 через 18000 лет

Углерод радиоактивный. Счет на сотни миллионов и миллиарды лет ведут астрономы, геофизики, геологи. Другая часть ученых заинтересована в определении более коротких отрезков времени — тысячелетий. Здесь приходится обращаться к методу, как это ни покажется странным, космического происхождения — к применению в качестве геологических часов радиоактивного углерода-14.

Природный углерод, соединения которого являются основой всех живых организмов, состоит из двух стабильных изотопов: углерода-12 (98,892%) и углерода-13 (1,108%). В очень ничтожных количествах в атмосфере обнаруживается еще и радиоактивный изотоп этого элемента — углерод-14 — неземного происхождения. Откуда он берется?

Наша планета подвергается непрерывной бомбардировке космическими лучами — частицами, обладающими огромной энергией, измеряемой десятками и сотнями тысяч миллиардов электронвольт (см. «Космические лучи»). Эти частицы разбивают подвернувшиеся им на пути ядра атомов воздуха, образуя вместе с осколками нейтроны. Нейтроны захватываются ядрами других атомов, в том числе и ядрами азота-14. Возникает ядерная реакция, в результате которой образуется изотоп углерод-14. Период полураспада такого углерода равен 5760 годам.

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

Вездесущий ветер, а также взаимная диффузия газов основательно перемешивают молекулы газа, содержащего меченые радиоактивные атомы углерода, с молекулами обычного углекислого газа.

Далее все идет обычным порядком: углекислоту поглощают растения, а животные и люди потребляют эти растения в пищу вместе с попавшим в них радиоактивным углеродом.

Теперь предположим, что где-то и когда-то заболело, прекратило принимать пищу и погибло животное. Или было срублено дерево. 5760 лет спустя ученый археолог или палеонтолог обнаружил при раскопках сохранившуюся кость этого животного или кусок дерева от постройки.

Радиоактивный углерод в организм животного или в растение после его гибели, естественно, больше не поступает, а тот, что был накоплен до этого, начинает постепенно распадаться и исчезать. Половина первоначально накопленного углерода-14 исчезнет через 5760 лет, половина оставшегося количества — еще через 5760 лет и т. д.

Но какое количество радиоактивности следует принять за исходное? Дело в том, что содержание в обычном природном углероде его «космического» изотопа в течение миллионов лет не изменилось, ибо в природе давно достигнуто равновесие между вновь образующимися и распадающимися атомами углерода.

Следовательно, остается определить лишь разницу между радиоактивностью углерода-14, обнаруживаемого в ископаемых останках животных и растений, и его радиоактивностью в окружающей нас живой материи.

Любое животное или растение, живущее сегодня, содержит в 1 г углерода ткани или клетчатки столько же радиоактивных атомов углерода-14, сколько содержало их погибшее 5760 лет назад животное или срубленное дерево, а именно около 50 млрд. атомов. Но в ископаемых останках это количество, допустим, уменьшилось наполовину. Значит, животное или дерево погибло 5760 лет назад. Если бы радиоактивных атомов осталось только $\frac{1}{4}$, мы могли бы сказать, что возраст этих останков равен 11,0 тыс. лет и т. д.

Этот метод был проверен на образцах тканей, взятых от египетских мумий, и на других археологических находках, время погребения которых было точно известно.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Стр.



Фотон

145

Фотон — квант энергии видимого и невидимого света, рентгеновских и гамма-лучей, обладающий одновременно свойствами частиц и волн. Не имеет массы покоя и может двигаться только со скоростью света, т. е. 300 000 км/сек. Фотон

не несет на себе никакого электрического заряда, поэтому электрически он нейтрален. Так как электромагнитные волны любой частоты могут излучаться только строго определенными порциями — квантами, то энергия фотона строго зависит от частоты излучения и равна

$$E = h\nu,$$

где E — энергия фотона; h — постоянная Планка; ν — частота излучения.

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

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

Чувствительная к свету эмульсия фотографической пластинки или пленки состоит обычно из мельчайших зерен бромистого серебра, взвешенных в тонком слое прозрачной желатиновой массы. Зерна химического соединения брома и серебра совершенно прозрачны. На внешней электронной оболочке атома брома расположено семь электронов, следовательно, до полного заполнения этой оболочки — восемь электронов — ему не хватает одного электрона. У атома серебра, наоборот, на этой оболочке находится всего один электрон, в силу чего связь между этими двумя атомами оказывается весьма прочной.

Когда на зерна бромистого серебра фотоэмульсии действуют кванты света, то они выбивают эти связывающие электроны из кристалла бромистого серебра, вследствие чего атомы чистого серебра оказываются свободными и после проявления — непрозрачными, а их скопления выглядят черными.

Помимо квантов света электроны из бромистого серебра выбиваются любыми электрически заряженными частицами, обладающими энергией, достаточной для ионизирования или даже расщепления ядер атомов серебра. Проходя через фотоэмульсию, они оставляют на ней следы ионизированных молекул серебра, которые после проявления пластинки выглядят под микроскопом в виде цепочки из крапинок темного серебра на фоне прозрачной эмульсии.

Поскольку даже альфа-частицы, излучаемые радиоактивными веществами, оставляют след длиной около 50 мк (0,05 мм), а толщина эмульсии обычных пластинок равна всего 20 мк, то цепочка следов частиц, движущихся вертикально к плоскости пластинки, не умещается в слое эмульсии, не говоря уже о частицах, летящих со значительно большей скоростью. Советский физик Мысовский первым предложил изготавливать пластинки со слоем эмульсии толщиной 400—600 мк. В тех случаях, когда ожидаемый пробег частицы может оказаться еще более длинным, применяют пакеты, состоящие из многих слоев эмульсии.

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

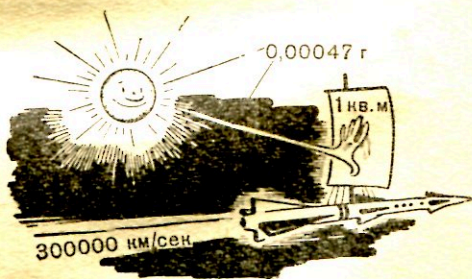
В природе известен только один процесс, в ходе которого вся масса участвующего вещества превращается в излучение — фотоны, не имеющие массы покоя, но зато движущиеся со скоростью света — 300 000 км/сек. Это процесс аннигиляции — самоуничтожение двух частиц с противоположными физическими свойствами, обычных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

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

Теоретически двигатель такого вида является энергетически самым совершенным, эффективным и экономичным, какой только можно мыслить, ибо в процессе аннигиляции частиц в свет превращаются практически 100% скрытой в веществе энергии, а сами фотоны движутся с предельно возможной в природе скоростью света.

Однако перед учеными будущего стоят неизмеримо трудные задачи. Главные из них таковы. В нашем мире обычных элементарных частиц получать античастицы — дело хотя и очень трудное, но еще возможное. Но удержать их так, чтобы они не вступили тут же в ядерную реакцию с окружающими их антагонистами, — дело почти безнадежное. А ведь их нужно как-то довести до камеры сгорания, помещаемой в фокусе зеркала ракеты.

Чтобы тяга такого двигателя имела реальную величину, в свет должны пре-



вращаться довольно ощутимые количества вещества. Процесс аннигиляции и превращения вещества в свет будет совершаться при такой безумно высокой температуре, которую вряд ли когда сможет выдержать, мгновенно не испарившись, любое самое фантастически жаропрочное вещество зеркала. Ведь вспышка света будет несравнимо более яркой и мощной, чем вспышка при взрыве мегатонной водородной бомбы.

Однако гадать, каковы будут достижения науки и техники даже через несколько десятилетий, нельзя. Нет сомнений, что наука далекого, а возможно, только отдаленного будущего решит и эту, безусловно, головокружительную задачу. Поэтому, несмотря на, казалось бы, безнадежные сейчас перспективы, ученые все же уделяют идее создания фотонной ракеты, пока еще очень отвлеченной и больше похожей на мечту, значительное внимание.

Почему так заманчиво создание фотонной ракеты, даже мечта о ней?

Космические расстояния, равные десяткам и сотням световых лет, отделяющие нас от ближайших звездных миров, не говоря уже о расстояниях до других галактик, не сулят человечеству надежд вырваться когда-нибудь из плена неумолимого течения времени. Ведь даже двигаясь со скоростью света, ракета летела бы до самой близкой к нам звезды в течение четырех с половиной лет! И только двигатель, позволяющий ракете двигаться с околосветовой скоростью, делает реальную мечту когда-нибудь достичь миров, лежащих за пределами солнечной системы.

Фазотрон (синхроциклотрон) — ускоритель заряженных частиц, в котором применен так называемый принцип автофазировки, предложенный советским ученым В. И. Векслером. Суть этой идеи заключается в том, что при определенных условиях и правильном подборе ускоряющих электрических и управляющих магнитных полей можно каждую разгоняемую частицу заставить двигаться так, что, несмотря на ее возможные индивидуальные отклонения, она все-таки придет к концу пути с максимальной заданной энергией. Достигается это тем, что, например, для компенсации релятивистского эффекта (утяжеления частиц при скоростях движения, приближающихся к скорости света), что является главной причиной нарушения синхронизации в циклотроне, частота ускоряющего напряжения, подводимого к ускоряющему промежутку, постепенно снижается.

Изменение частоты подбирается таким образом, чтобы импульсы напряжения поступали на ускоряющий промежуток с каждым оборотом частицы все позднее и позднее, в точном соответствии с ее релятивистским «утяжелением» и постепенным замедлением темпов набора скорости.

Ц

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Стр.

Цепная реакция _____

148

Цепная реакция. Одним из самых замечательных научных достижений XX века является открытие цепных реакций — сначала в 1913 г. химических, а спустя три десятилетия ядерных. Речь идет о химических реакциях, которые, однажды на-

чавшись, далее продолжают поддерживать сами себя до полного исчерпания участвующих в них веществ. Реакции эти могут быть самоподдерживающимися на каком-либо исходном уровне или разветвляющимися по какой-либо, например геометрической, прогрессии.

Примером первой, неразветвляющейся химической реакции может служить реакция соединения водорода с хлором. Эти элементы имеют столь большое тяготение друг к другу, что атом водорода легко отрывает от молекулы хлора и присоединяет к себе один из двух ее атомов или, наоборот, молекула хлора отрывает и присоединяет к себе от молекулы водорода один из ее двух атомов. Оставшийся свободным атом хлора тотчас же восполняет эту потерю, оторвав себе один из двух атомов оказавшейся по соседству другой молекулы водорода, и т. д. Так продолжается до тех пор, пока все атомы хлора не присоединят к себе по одной молекуле водорода или, наоборот, атомы водорода — по молекуле хлора.

Примером разветвляющейся химической реакции является соединение водорода с кислородом, когда атом водорода отрывает и присоединяет к себе один из атомов молекулы кислорода. Образуется так называемый свободный радикал OH . Оставшийся свободным второй атом из молекулы кислорода тотчас же отрывает и присоединяет к себе один из двух атомов молекулы водорода, в результате чего образуется еще один свободный радикал OH и один свободный атом водорода.

В результате всей этой операции остается уже два свободных атома водорода, каждый из которых начинает свою ветвь отрывов и присоединений атомов кислорода. Это второе поколение оставляет после себя уже четыре свободных атома водорода, те в свою очередь — 8, следующее — 16 и т. д., т. е. количество свободных атомов, готовых начать свою отдельную ветвь размножения, удваивается с каждым поколением, безудержно нарастая, как снежная лавина. Кончается все это или полным исчерпанием исходных газов, или мощным взрывом. Короче говоря, каждая вступившая в реакцию единица вызывает реакцию у K других единиц. Затем каждая из этих K единиц вызывает реакцию еще у K единиц, т. е. в реакцию будет вовлечено уже K^2 единиц, и т. д. Число K в этом случае называют коэффициентом размножения. Если этот коэффициент по каким-либо причинам окажется меньше еди-

ницы, реакция станет постепенно затухать, если больше единицы — нарастать. В случае, когда значение K равно точно единице, темп реакции остается на одном и том же первоначально заданном или начатом уровне.

Циклотрон — ускоритель протонов, альфа-частиц, дейтронов, в котором частицы получают ускорение от электрического поля — переменного по амплитуде, но постоянного по частоте. Управляет движением частиц и фокусирует их тоже постоянное по времени магнитное поле, создаваемое мощным электромагнитом. Частота ускоряющего поля подбирается так, чтобы частица, двигаясь по инерции внутри одного из двух полых электродов в виде половинки диска — дуантов, попала в промежуток между ними каждый раз в те моменты, когда электрическое поле между ними как бы «подстегивает» частицу, которая с каждым оборотом внутри дуанта ускоряется все больше и больше.

Предельная энергия, достижимая на обычных циклотронах, ограничивается 25—30 Мэв. Это объясняется тем, что при больших скоростях (энергиях) частиц начинает сказываться релятивистский эффект — возрастание массы по мере приближения скорости частиц к скорости света, что нарушает синхронизацию (совпадение по времени) между вращением частицы в дуантах и поступлением импульсов переменного электрического поля от генератора на ускоряющий промежуток.

Чтобы увеличить энергию частиц, ускоряемых в циклотроне, приходится идти на различные технические усложнения, например искусственно изменять по амплитуде напряженность магнитного поля, создаваемого электромагнитом.

Циклотроны, у которых вместо частоты ускоряющего напряжения изменяется величина магнитного поля, называют *синхротронами*.

Циклические (резонансные) ускорители — ускорители заряженных частиц, которые движутся по замкнутым орбитам, а ускорение осуществляется путем многократного прохождения частиц через ускоряющие промежутки, где происходит передача частицам энергии от переменного электрического поля, изменяющего свою частоту в такт с периодом обращения частиц. К циклическим резонансным ускорителям относятся: циклотрон, фазотрон, синхрофазотрон, синхротрон (см. «Ускорители частиц»).

4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Стр.

Черенкова—Вавилова эффект _____ 150

Черенкова — Вавилова эффект — свечение, появляющееся в некоторых веществах, когда через них пролетает частица, движущаяся со скоростью, превышающей скорость распространения света в данном веществе. Этот эффект свечения был открыт советскими физиками П. А. Черенковым и С. И. Вавиловым.

Новое излучение оказалось поистине замечательным. Оно распространяется не во все стороны, а в виде конуса, ось которого совпадает с направлением движения частиц. Величина угла при вершине конуса строго зависит от скорости движения частицы и коэффициента преломления вещества для определенной длины волны излучаемого света. Благодаря этому стало возможным применить данное явление в приборах для высокой точности измерения скорости и направления полета быстрых заряженных частиц — электронов, протонов, мезонов, так как яркость излучения возрастает с увеличением скорости возбуждающей его частицы и прямо пропорционально квадрату ее электрического заряда.

Черенкова — Вавилова счетчик. Излучение Черенкова — Вавилова стало основой целого семейства счетчиков быстрых частиц — электронов, протонов, мезонов и гамма-квантов высокой энергии. В них улавливается, многократно усиливается и регистрируется или весь свет, излученный частицей, или свет, испускаемый лишь под строго определенным углом к направлению движения частицы. Пропуская исследуемые частицы последовательно через батарею таких счетчиков, легко установить их точную скорость, а в сочетании с другими счетчиками и приборами — массу, заряд и другие характеристики.

В 1958 г. за это выдающееся открытие и разработку теории излучения советским ученым П. А. Черенкову, И. М. Франку и И. Е. Тамму была присуждена Нобелевская премия по физике.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

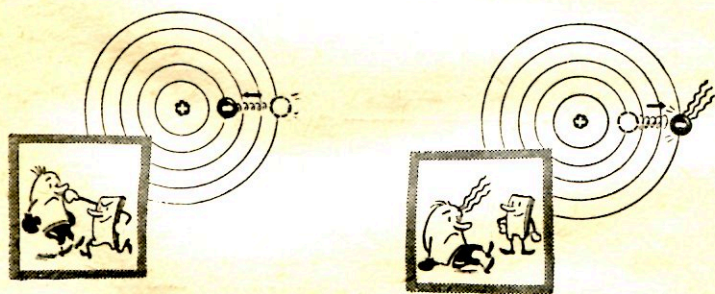
	Стр.
Элементарный электрический заряд	151
Электростатические силы	152
Электромагнитное излучение	152
Элементарные частицы	153
Энергия связи ядра атома	157
Эквивалентность (взаимосвязь) массы и энергии	158

Элементарный электрический заряд. Так называется наименьший электрический заряд в природе. Он служит одной из важнейших характеристик любых заряженных элементарных частиц: электронов, протонов, позитронов, мезонов и т. д., независимо от того, какой заряд электричества они на себе несут —

положительный или отрицательный, и равен $4,8029 \cdot 10^{-10}$ электростатической единицы. Электрический заряд любого тела может быть только кратен элементарному заряду и всегда представляет сумму элементарных положительных или отрицательных зарядов атомных частиц, из которых состоит данное тело.

Электростатические силы — силы взаимного притяжения или отталкивания, действующие между неподвижными или равномерно движущимися зарядами. В повседневной практике эти силы сравнительно невелики. Но в масштабах размеров и масс частиц микромира и на расстояниях их взаимодействия друг с другом, равных стомиллионным и миллиардным долям сантиметра, эти силы потрясающе огромны.

Электромагнитное излучение — сложный физический процесс перехода энергии из области, непосредственно входящей в систему атома, в окружающее этот атом пространство. Любой движущийся или колеблющийся электрический заряд, естественно связанный с какой-либо определенной частицей (электроном, протоном, мезоном и т. п.), при всяком изменении ее скорости создает вокруг себя изменяющееся магнитное поле, которое в свою очередь вызывает появление изменяющегося электрического поля, и т. д. Возникшее переменное электромагнитное возмущение, состоящее как бы из последовательно «переливающихся» одно в другое электрических и магнитных полей, распространяется все дальше и дальше от места возникновения во все стороны со скоростью света — $300\,000$ км/сек, унося с собой определенное количество энергии.



Такое электромагнитное возмущение называют электромагнитной волной. В технике чаще всего пользуются терминами «частота электромагнитных колебаний в секунду» (получается от деления скорости света на длину волны) и «длина волны» в метрах или сантиметрах (получается при делении скорости света на частоту колебаний в секунду).

Самым важным является то, что количество энергии, переносимой электромагнитной волной, не одинаково, а растет с увеличением частоты колебаний. Эта энергия, выраженная в эргах, определяется формулой $E = h \nu$, где h — постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек; ν — частота колебаний в секунду. Так, энергия электромагнитной волны фиолетового света вдвое больше энергии волны красного света.

Элементарные частицы. Сейчас уже нет нужды доказывать, что все вещества состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из ядра и электронов, ядра — из протонов и нейтронов. А из чего состоят протоны, нейтроны и электроны? В свое время эти частицы называли элементарными, т. е. неделимыми, полагая, что при их дальнейшем делении они могут превращаться во что угодно другое, но только не в какие-то иные частицы.

Тем не менее, ученые примерно лет десять назад приступили к упорному и систематическому штурму тайны строения элементарных частиц и в первую очередь нуклонов — протонов и нейтронов.

Как и вообще в ядерной физике, для этого открывались собственно два основных направления. Первое — попытаться разбить, раздробить, если возможно, элементарную частицу на какие-то ее составные (если таковые имеются) части. Единственный способ достичь этого — разгонять другие такие же частицы до скоростей, насколько возможно близких к скорости света, а затем обстреливать этими «снарядами» элементарные частицы в атомах других веществ, например ускоренными протонами — ядра атомов ионизированного водорода (тоже протоны), протонами или альфа-частицами — протоны и те же альфа-частицы и т. п. Требуемые для этого энергии (порядка сотен миллионов и миллиардов электронвольт) могли быть получены только с помощью мощных ускорителей заряженных частиц. Сначала большим достижением считались ускорители, разгоняющие заряженные частицы до энергий в

десятки миллионов, затем в сотни миллионов и, наконец, в десятки миллиардов электронвольт.

Второй путь — это, если так можно выразиться, путь «прощупывания» строения элементарных частиц. Заключается он в известном еще из оптики явлении, что чем мельче рассматриваемый предмет, тем короче должна быть длина волны света электромагнитного излучения, освещающая этот предмет. Если волна окажется, длиннее такого предмета, она просто его обогнет, и мы ничего не увидим, если короче, то она отразится, и мы увидим освещенный предмет. Поэтому максимальное оптическое увеличение можно получить, освещая изучаемый предмет ультрафиолетовыми лучами, невидимыми человеческому глазу, но могущими быть зафиксированными фотопластинкой.

После открытия де Бройлем волновых свойств у любых движущихся с большой скоростью частиц предоставилась возможность создать электронный микроскоп, в котором ускоренные до энергий 100 кэв и больше электроны позволяют рассматривать тела, имеющие поперечник всего в несколько ангстрем (1 ангстрем равен 10^{-8} см).

Согласно выведенной де Бройлем формуле, чем тяжелее частица и чем быстрее она летит, тем короче становится соответствующая ей длина волны. Выходило, что если ускорить пучок электронов до энергии порядка нескольких сот миллионов электронвольт, то их волна станет столь короткой и сопоставимой с размерами ядерных частиц, что ею можно как бы «прощупать» строение ядра атома. По отражению и рассеянию этих волн определяют размеры составляющих это ядро нуклонов. А если поток электронов разогнать до энергии порядка один-два миллиарда электронвольт, то длина волны электронов станет во много раз короче поперечника нуклонов. С помощью таких волн предоставится возможность установить строение и самих протонов, и нейтронов.

С тех пор, как на вооружение ученых начала поступать мощная «атомная артиллерия», открытия стали делаться одно за другим, и в первую очередь новых частиц. Энергии в миллионы электронвольт оказалось достаточно, чтобы среди осколков «микроркатастроф» обнаружить положительно заряженный электрон — *позитрон*. Ускорители на сотни миллионов электронвольт позволили получать искусственным путем *мезоны*, до этого впервые обнаруженные в составе космических

лучей. Создание ускорителей на энергии в миллиарды электронвольт привело к открытию существования античастиц — антипротона, антинейтрона и других частиц, по физическим свойствам полностью противоположных обычным элементарным частицам — протону, нейтрону и др.

К настоящему времени известно уже 16 элементарных частиц и примерно столько же античастиц. Если же включить в этот список еще и очень короткоживущие частицы, то общее количество известных элементарных частиц достигнет примерно 40!

Большинство этих частиц неустойчиво. Спустя ничтожно короткое время они распадаются, превращаясь после ряда радиоактивных распадов с испусканием бета-частиц в немногие, уже устойчивые частицы с меньшей массой: электроны, протоны, гамма-кванты и нейтрино — или в соответствующие им античастицы, которые в принципе также устойчивы (см. «Бета-распад»).

Насколько это удалось установить по сей день, ни одну из известных элементарных частиц нельзя разложить на более мелкие составные части. Все они считаются элементарными потому, что под этим понимается отсутствие у них структуры.

К числу неустойчивых принадлежат два класса частиц. К одному из них относятся частицы тяжелее электрона, но легче протона. Их называют *мезоны*. К другому классу принадлежат частицы тяжелее протона. Их называют *гипероны*. При распаде гиперонов всегда образуются *нуклоны*. Известны мезоны следующих типов: мю-мезоны, пи-мезоны и *K*-мезоны. Масса мю-мезона составляет примерно $\frac{1}{8}$ массы протона, масса пи-мезона — примерно $\frac{1}{7}$ и масса *K*-мезона — около половины массы протона. Мю-мезоны могут быть лишь отрицательными или положительными. Нейтрального мю-мезона не существует. Не считая массы, мю-мезон, по-видимому, полностью подобен электрону, и его можно рассматривать как тяжелый электрон. Однако в природе других тяжелых электронов не встречается.

Античастицей отрицательного мю-мезона μ^- является положительный мю-мезон μ^+ . Вследствие существования универсального взаимодействия отрицательный мю-мезон должен распадаться на электрон и два нейтрино ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$) с периодом полураспада $2,2 \cdot 10^{-6}$ сек. Благодаря этому взаи-

действительно все три частицы имеют много общего, и поэтому их назвали лептонами.

Пи-мезоны бывают отрицательные, положительные и нейтральные (π^- , π^+ , π^0). Античастицей по отношению к положительному пи-мезону является отрицательный пи-мезон. Подобно фотону нейтральный пи-мезон тождествен со своей античастицей.

Предсказанный японским физиком Юкавой в 1935 г.— за 12 лет до своего открытия — пи-мезон ответствен за появление в ядре атома так называемых *ядерных сил*. Ими непрерывно обмениваются между собой нуклоны, примерно так же, как проявление электрических сил объясняется непрерывным испусканием и поглощением электрическим зарядом квантов электромагнитного излучения. Пи-мезоны легко получить путем соударений протонов с энергией в несколько сот миллионов электронвольт. В этом случае происходит прямое превращение кинетической энергии нуклонов в массу покоя пи-мезона.

Возможна целая гамма разнообразных реакций:

а) протон + протон = протон + нейтрон + положительный пи-мезон;

б) протон + нейтрон = протон + протон + отрицательный пи-мезон;

в) гамма-квант + протон = нейтрон + положительный мезон;

г) гамма-квант + протон = протон + нейтральный пи-мезон;

д) гамма-квант + нейтрон = протон + отрицательный пи-мезон и т. д.

Получаемые на мощных ускорителях частиц заряженные пи-мезоны распадаются по следующим схемам: положительный пи-мезон → положительный мю-мезон + нейтрино или позитрон + нейтрино; отрицательный пи-мезон → отрицательный мю-мезон + антинейтрино или электрон + антинейтрино с периодом полураспада $1,56 \cdot 10^{-8}$ сек. Нейтральный пи-мезон распадается значительно быстрее, но только на два фотона, с периодом распада около 10^{-8} сек.

Одной из новых частиц, открытых в последнее время, является К-мезон. Известны положительные и нейтральные К-мезоны (K^+ и K^0) с соответствующими античастицами: отрицательный K^- - и нейтральный K^0 -мезоны. Благодаря боль-

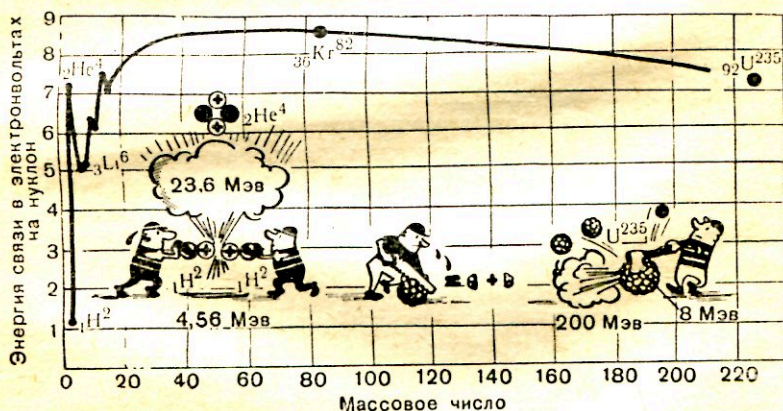
шой массе K -мезон имеет и больше различных возможностей распада. Период распада заряженного K -мезона равен $0,85 \cdot 10^{-8}$ сек.

Гиперонов — элементарных частиц тяжелее протонов — существует три разновидности. Их обозначают заглавными буквами греческого алфавита: Λ (лямбда), Σ (сигма) и Ξ (кси). Все гипероны распадаются на нуклоны. У каждого гиперона существует античастица с противоположным знаком.

Мир элементарных частиц оказывается исключительно богатым как разнообразием самих частиц, так и видами их взаимодействий и взаимопревращений.

Энергия связи ядра атома. Чтобы иметь возможность судить о количестве энергии, которая могла бы быть высвобожденной при перестройке — ином расположении элементарных частиц в ядрах атомов, ученые составили таблицу средней энергии (в электронвольтах), запасенной каждым нуклоном в ядрах атомов. Таблица позволяет установить, в каких случаях эта энергия могла бы быть высвобожденной, а в каких — нет, т. е. вычислить разность между энергией связанного состояния некоторой совокупности ядерных частиц и энергией такого состояния, когда эти частицы разделены и удалены друг от друга.

Из графика видно, что самая большая величина средней энергии связи, равная примерно 8,6 Мэв на нуклон, прихо-



дится на ядра атомов химических элементов, занимающих почти всю середину таблицы Менделеева. И какими бы способами мы ни перестраивали ядра этих атомов — делили и складывали их вновь, — затрачиваемая на эту работу энергия будет равняться высвобождаемой при любом ином расположении частиц или даже превышать ее, следовательно, никакой выгоды от таких операций мы не получим.

Зато элементы, находящиеся в начале и в самом конце таблицы, т. е. самые легкие и самые тяжелые, отличаются значительными колебаниями средней величины энергии связи.

Например, полная энергия связи ядра атома гелия, состоящего из четырех нуклонов, равна $28,2 \text{ Мэв}$ — по 7 Мэв на каждый нуклон. Полная же энергия связи ядра атома дейтерия, состоящего из двух нуклонов, равна $2,28 \text{ Мэв}$. И если бы удалось из двух ядер атомов дейтерия сложить ядро атома гелия, то реальный выигрыш в энергии на каждом таком атоме составил бы $23,6 \text{ Мэв}$!

В килограмме гелия имеется $1,505 \cdot 10^{26}$ атомов. При сложении его из ядер дейтерия должна выделиться энергия, равная $1,505 \cdot 10^{26} \cdot 23,64 = 35,6 \cdot 10^{26} \text{ Мэв}$. Чтобы получить ее обычным путем, нужно сжечь $13\,600 \text{ т}$ бензина!

Другой пример. Полная энергия связи ядра атома урана-235, состоящего из 235 нуклонов, равна 1786 Мэв (по $7,6 \text{ Мэв}$ на нуклон). Энергия связи получающихся после его деления двух осколков, которые являются ядрами более легких элементов из середины периодической таблицы, значительно выше (по $8,6 \text{ Мэв}$ на нуклон). Вместе с выбрасываемыми 2—3 нейтронами она равна примерно $2000,0 \text{ Мэв}$. Следовательно, разница в количестве энергии между ядром атома урана и двумя его осколками составит около 200 Мэв . При делении же всех ядер одного килограмма урана-235 выделится энергия, которую можно получить лишь при сжигании 1800 т бензина или $2500\text{—}3000 \text{ т}$ угля.

Таким образом, при реакции слияния ядер легких элементов высвобождается примерно в 8 раз больше энергии, чем при реакции деления ядер тяжелых элементов.

Эквивалентность (взаимосвязь) массы и энергии. Одним из самых основных свойств любого материального тела является наличие у него массы. В классической физике под массой понималось количество материи. При этом материя ато-

мов считалась абсолютно однородной, не обладающей никакими свойствами, кроме «непроницаемости» и инерции, т. е. свойствами сопротивляться внешним усилиям. Масса рассматривалась как мера инерции тел, состоящих из атомов. Считалось, что движение тел совершенно не меняет величины его массы, что масса во всех случаях движения остается абсолютно неизменной.

Начало новому учению о массе положили опыты русского физика П. Н. Лебедева, доказавшего, что свет обладает свойством давления.

Из механики известно, что всякое давление, производимое телом на какое-либо другое тело, равно произведению массы этого тела на изменение его скорости в процессе взаимодействия со вторым телом. Наличие светового давления привело к мысли о том, что свет, как и обычные тела, должен обладать массой, так же как и скоростью. Это столь же неизбежно, как наличие массы и скорости у пули, ударяющейся о препятствие. Масса теперь, оказывается, связана не только с обычными телами, состоящими из атомов, но и со светом. Позже советский физик С. И. Вавилов пришел к выводу, что световое давление равно энергии света, разделенной на его скорость. Если энергию света обозначить буквой E , массу света — m , а скорость света — c , то получим выражение

$$\frac{E}{c} = mc \text{ или } E = mc^2.$$

Теория относительности Эйнштейна показала, что это выражение справедливо не только для света, но и для любого другого вида энергии. Поэтому в приведенной формуле можно считать, что E соответствует любому виду энергии, m — массе любого материального объекта, в том числе и света, c — скорости света. Эта формула получила неудачное название «эквивалентности массы и энергии», вскоре истолкованное буржуазными физиками-идеалистами на свой лад в качестве доказательства превращения материи в энергию и обратно. Но такое толкование не отвечает действительному смыслу данного закона. Взаимосвязь между массой и энергией, устанавливаемая этой ныне ставшей знаменитой формулой, совсем не означает, что масса и энергия эквивалентны или что они могут превращаться одна в другую. Более правильно его было бы

назвать законом соотносительности или взаимосвязи массы и энергии.

Это уравнение не утверждает, что масса m может быть превращена в энергию E , а только то, что объект с массой m одновременно обладает и энергией E .

Принцип эквивалентности массы и энергии показывает точное количественное значение энергии, отвечающей данной массе. Для вычисления этого количества следует только помножить массу тела на квадрат скорости света. Именно здесь ученые столкнулись впервые с захватывающим дух и потрясающим воображение фактом: в теле, обладающем массой в один килограмм, сосредоточена энергия, которую можно было бы получить, сжигая примерно три миллиона тонн угля! Достаточно сказать, что овладение термоядерной реакцией, которой суждено снять с человечества заботу об источниках энергии на вечные времена, позволит высвободить только 1% этой скрытой в веществе энергии, реакция деления ядер атомов урана или плутония — 0,1%, а обычная реакция горения — только 0,0000001%!!!

Теория относительности, кроме того, установила такую зависимость массы тела от скорости его движения:

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

где m_0 — масса тела или частицы в состоянии покоя («масса покоя»); m — масса того же тела или частицы в состоянии движения со скоростью v ; c — скорость света. Так как выражение под корнем $1 - \frac{v^2}{c^2}$ меньше единицы, то, следовательно, масса движущегося тела m всегда больше массы тела, находящегося в покое (m_0). Эта формула показывает, таким образом, что масса оказывается не постоянной, а возрастает с увеличением скорости движения тела. А увеличение скорости движения тела означает в то же самое время увеличение его кинетической энергии. Следовательно, возрастание массы тела в зависимости от увеличения скорости его движения можно, согласно приведенной выше формуле, понимать как зависимость массы тела от его кинетической энергии. Чем больше кинетическая энергия тела, тем больше его масса.

Имея в виду эту зависимость, можно сказать, что масса тела есть мера содержащейся в нем энергии. Эта связь массы и энергии выражается формулой $E = mc^2$. При этом приходится различать массу, которой обладает частица, находящаяся в покое, и ту массу, которую она приобретает, придя в движение. Отсюда масса частицы, находящейся в покое, получила особое название — масса покоя или собственная масса.

Кванты света, например, или, иначе, фотоны, совсем не имеют массы покоя, однако они обладают массой. Фотоны отличаются от таких элементарных частиц, как протоны, электроны, позитроны, еще и тем, что они не имеют электрического заряда и, кроме того, не могут двигаться со скоростью, отличающейся от скорости света.

Поэтому те частицы (или тела, состоящие из частиц), которые в отличие от фотонов обладают массой покоя, принято называть веществом. Те же материальные объекты, которые не имеют массы покоя (фотоны), вообще говоря, к веществу не относятся. Однако они так же материальны, как и вещественные частицы.

Применительно к конкретному случаю ядерных реакций, например к делению ядра атома урана или плутония при поглощении им нейтрона, никаких изменений в суммарном количестве материи, имеющейся в природе, не происходит.

Если учесть, что частицы расщепляемого ядра и вызвавший это расщепление нейтрон первоначально находились в движении и что в результате расщепления получены два неравных осколка и высвобождено несколько нейтронов, имеющих большие скорости, то усложняются только формулы вычисления энергий и масс участвующих в этом событии частиц. Но конечный результат будет один и тот же — сумма всех энергий и масс до реакции точно равна сумме всех энергий и масс после реакции. Таким же образом при «аннигиляции» — уничтожении электрона и позитрона — можно убедиться, что суммарная энергия и масса получившихся фотона или фотонов точно равна суммарной энергии и массе «уничтоженных» электрона и позитрона.

Следовательно, масса и энергия — лишь два различных свойства материи, присущих определенным ее состояниям.





«Электронная пушка» — образное название устройства для получения направленного потока электронов в вакууме. Отличается от обычной электронной выпрямительной или усилительной лампы, имеющей нить накала

или накаливаемый катод и ускоряющий электрод, наличием дополнительных электродов, фокусирующих (сжимающих) электроны в узкий луч. Наиболее широко применяется в конструкциях всевозможных катодно-лучевых измерительных, индикаторных и телевизионных трубок.

В ядерной технике «электронные пушки» применяют в качестве первичного источника электронов для последующего ускорения их в бетатронах, электронных синхротронах, линейных ускорителях и других устройствах, где требуются особо плотные потоки электронов.

Энергетический ядерный реактор (см. «Реакторы») — ядерный реактор, главное назначение которого — производство тепла для выработки электрической энергии.

Энергии источники на земном шаре. Энергетические ресурсы на земном шаре подразделяются в основном на два вида: топливные (уголь, нефть и др.) и нетопливные (водная энергия, энергия ветра и др.). Кроме того, источники энергии условно делятся на возобновляемые и невозобновляемые. Ниже приводятся данные по этим видам источников энергии.

Горючее		Мировые запасы, т	Энергия, квт·ч
 Нефть Природный газ		$0,12 \cdot 10^{12}$	$0,97 \cdot 10^{15}$
		$0,06 \cdot 10^{12}$	$0,49 \cdot 10^{15}$
 Уголь		$10,7 \cdot 10^{12}$	$86,0 \cdot 10^{15}$
 Уран Торий		$6,5 \cdot 10^{12}$	$527 \cdot 10^{15}$
 Солнечная энергия на Землю за год			$1500 \cdot 10^{15}$
Мировое потребление энергии в год			$3 \cdot 10^{12}$

Невозобновляемые источники (топливо)

	Условное топливо, млрд. т	тыс. млрд. квт-ч
Уголь _____	10 660	86 250
Нефть _____	120	970
Природный газ _____	60	490
Торф _____	560	4 550
Растительное топливо _____	600	4 800
Уран и торий _____	65 000	527 000

Непрерывно восстанавливающиеся и практически вечные источники

	тыс. млрд. квт-ч
Солнечное излучение _____	1 500 000
Морские приливы и волнение _____	70 000
Ветер _____	17 360
Тепло Земли _____	289
Энергия рек _____	33

Энергия связи (нейтрона, протона, электрона и т. д.) — энергия, необходимая для полного отделения данной частицы от ядра.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

	Стр.
Ядерная энергия _____	163
Ядро атома _____	164
Ядерные реакции _____	164
Ядерные силы _____	164

Я

Ядерная энергия — более правильное и точное научное название энергии, выделяющейся при реакциях деления ядер атомов тяжелых элементов (урана, плутония) или слияния ядер атомов самых легких элементов (водорода) в ядра атомов более тяжелых элементов (гелия), чем получившее большее распространение название *атомная энергия*.

Ядро атома — внутренняя часть атома, в которой сосредоточена почти вся его масса, состоит из нуклонов — протонов и нейтронов (за исключением ядра атома водорода, состоящего

всего лишь из единственного протона). Полное число протонов и нейтронов в ядре определяет атомный вес элемента, число протонов — его атомный номер в периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Каждое ядро атома характеризуется определенной *энергией связи*, удерживающей частицы, из которых оно сложено, все вместе.

Ядерные реакции — самопроизвольные или искусственные преобразования одних ядер атомов в другие, связанные с перестройкой структуры или изменением количества нуклонов в них. Ядерные реакции могут сопровождаться: полным распадом всего ядра атома при попадании в него частицы, обладающей огромной энергией (скоростью); поглощением другой частицы, обычно нейтрона; делением ядра на две неравномерные части; испусканием протонов, нейтронов, альфа-частиц и гамма-лучей (см. «*Цепная реакция*»). К ядерным реакциям относится и реакция синтеза — образование ядер атомов более тяжелых элементов (например, гелия) в процессе слияния ядер более легких элементов (ядер водорода), сопровождающаяся выделением энергии, в восемь раз большей, чем при реакции деления ядер атомов тяжелых элементов (см. «*Термоядерная реакция*»).

Ядерные силы. По законам физики электрические силы, притягивающие отрицательно заряженные электроны к положительно заряженному ядру атома, должны были бы заставлять собранные в ядре положительно заряженные частицы — протоны — разлетаться в стороны друг от друга.

Однако вопреки этим законам протоны, находясь в пределах ядра атома, вместо того чтобы разлетаться, почему-то удерживаются все вместе и зачастую столь сильно, что нужно приложить огромную энергию для того, чтобы их разъединить или выбить из ядра хотя бы один протон.

Что же это за таинственные, никому до сих пор неизвестные силы?

Эти силы не могут быть электрическими, так как даже если бы у половины протонов в ядре атома положительные заряды вдруг поменялись на отрицательные, то и в этом случае они стали бы притягиваться друг к другу с силами, лишь раз в сорок слабее тех сил, которые фактически удерживают одинаково заряженные протоны в ядре атома. Следовательно,

силы эти не электрические. Может быть, силы тяготения? Но они оказываются еще менее приемлемыми, так как силы тяготения, существующие между двумя частицами в ядре атома, вследствие их малости в 10^{37} раз слабее сил, удерживающих частицы на самом деле.

Современная физическая теория считает, что силами, осуществляющими взаимодействие между электрически заряженными телами и частицами, являются испускаемые и поглощаемые ими фотоны, что и создает силы электрического притяжения или отталкивания. Значительно труднее представить себе явно необычные силы, действующие на элементарные частицы, из которых сложено ядро атома.

Взаимодействие между двумя ядерными частицами, как показали многочисленные опыты, зависит не только от расстояния между ними, но также от скорости движения этих частиц относительно друг друга, равно как и от направления вращения каждой из этих частиц. Больше того, имеются силы, действующие между тремя, четырьмя и большим количеством частиц одновременно.

Следует особо подчеркнуть, что эти силы совершенно не зависят от электрических зарядов частиц. Протон и протон, нейтрон и нейтрон, протон и нейтрон — все они удерживаются друг возле друга примерно с одинаковой силой. Самое же замечательное то, что эти силы действуют в очень ограниченных пределах. На расстоянии, равном, например, 10^{-13} см (одна стотысячная радиуса всего атома), ядерные силы притягивают два протона в сорок раз сильнее, чем они отталкиваются друг от друга под действием двух одинаковых положительных электрических зарядов. Если же это расстояние увеличится всего лишь в четыре раза, ядерные силы притяжения становятся уже равными электрическим силам отталкивания. Увеличение этого расстояния в 25 раз приведет к тому, что электрические силы отталкивания превьсят ядерные силы притяжения уже в ... миллион раз!

С другой стороны, на расстояниях значительно меньше $0,5 \cdot 10^{-13}$ см притягивающее действие ядерных сил резко обрывается, и они превращаются в еще более мощные отталкивающие силы.

Так же как и в случае с электрическими силами, взаимодействие между ядерными частицами носит характер некоего обмена какими-то другими частицами, чем-то похожими на

фотоны. Такую мысль впервые высказал советский физик академик И. Е. Тамм.

В 1935 г. японский физик Хидеки Юкава, опираясь на накопившийся теоретический и опытный материал, высказал идею, что роль кванта, связывающего вместе ядерные частицы, выполняет новая материальная частица, названная им мезоном. Он предсказал и свойства этих частиц, которыми должны обмениваться протон и нейтрон, чтобы привести к появлению огромных сил, действующих на чрезвычайно коротких расстояниях и только в пределах ядра атома. Эти обменные частицы, чтобы выполнить свое назначение, должны сами сильно взаимодействовать с протонами и нейтронами независимо от их зарядов.

Согласно общим принципам квантовой механики, силы, действующие на далекие расстояния, подобные электромагнитным силам, могут переноситься только частицами, не имеющими массы покоя, т. е. которые могут существовать, только двигаясь со скоростью света. Такими частицами, как сказано выше, и являются фотоны. Фотон и обретает массу, т. е. свойство частицы, двигаясь со скоростью света.

Силы же, действующие на чрезвычайно коротких расстояниях, согласно тем же законам квантовой механики, должны передаваться частицами, имеющими массу даже в состоянии покоя. Эта масса должна быть тем больше, чем короче радиус действия данных сил.

Для сил с радиусом действия около 10^{-13} см масса таких частиц должна быть примерно в двести раз больше массы электрона.

Для того чтобы эти частицы могли осуществлять такие обменные функции между различными нуклонами ядра атома, они должны быть электрически заряженными. Когда взаимодействуют между собой протон и нейтрон, то протон излучает положительно заряженный мезон, который и поглощается нейтроном. В этом процессе протон теряет свой положительный заряд и становится нейтроном, в то время как нейтрон приобретает положительный заряд и превращается в протон. Такой же результат, естественно, получается, если нейтрон излучает отрицательный мезон, который поглощается протоном.

Предположение о существовании положительного и отрицательного мезонов было высказано Юкавой в соответствии с общими принципами современной физики, состоящими в том,

что для любой заряженной частицы в природе должна существовать и противоположная ей по заряду другая частица.

Первые такие частицы, получившие название μ -мезонов (мю-мезонов), были обнаружены в космическом излучении. Их масса равнялась 207 массам электрона.

Однако вскоре выяснилось, что эти частицы были не тем, что ожидали. Они слабо взаимодействовали с протонами и нейтронами, в силу чего не могли служить переносчиками внутриядерных сил. Кроме того, они оказались крайне неустойчивыми. Средний срок их жизни равняется всего $2,2 \cdot 10^{-6}$ сек. При распаде такого мезона возникает электрон или позитрон в зависимости от заряда самого мезона. Подсчеты энергии, выделяющейся при таком распаде, и «баланса» масс показали, что при этом должны возникать по крайней мере еще две частицы, не имеющие заряда, с массой, равной нулю или близкой к нему, т. е. не имеющие массы покоя. Эти частицы и оказались *нейтрино*. После нескольких лет основательной путаницы и недоразумений только в 1948 г. Поуэллом, Оккиалини и Латтесом (англичанин, итальянец и бразилец) были открыты мезоны, действительно ответственные за существование обменных сил между ядерными частицами. Их называли π -мезонами (пи-мезонами). Масса π -мезонов оказалась в 273 раза больше массы электрона.

Условия образования, существования и последующие превращения π -мезона имеют очень сложный характер. Обнаруженный впервые в космическом излучении π -мезон в результате торможения в веществе распадается на две частицы — описанный выше μ -мезон и нейтрино.

Дальше μ -мезон также замедляется, а затем тоже распадается, образуя электрон и два нейтрино. Сталкиваясь с ядром атома, быстрый π -мезон способен его разрушить. В отличие от μ -мезонов тяжелые π -мезоны сильно взаимодействуют с частицами, составляющими ядра атомов, — нуклонами. Именно они и оказались предсказанными еще в 1933 г. квантами ядерного поля, подобно тому как фотоны являются квантами электромагнитного поля. Однако для того, чтобы все сходилось точно, необходимо было существование еще и незаряженного, нейтрального π -мезона, ответственного за взаимодействие между протоном и протоном, а также между нейтроном и нейтроном, т. е. в тех случаях, когда ни один из нуклонов не превращается в другой. Протон, естественно, не может погло-

тить положительный мезон, так как он не может приобрести второго положительного заряда. Следовательно, любой заряженный мезон не в состоянии осуществлять взаимодействие между протонами.

Вскоре в космическом излучении были обнаружены и эти недостающие нейтральные мезоны, масса которых превышает массу электрона в 264 раза, но которые не имеют никакого электрического заряда.

Существование нейтрального π -мезона, в частности, объясняет независимость действия внутриядерных сил от зарядов частиц, входящих в ядро атома. Эти мезоны тоже живут очень недолго и распадаются на два фотона. Следовательно, в образовании и существовании внутриядерных сил «повинны» три вида частиц, излучаемых и поглощаемых нуклонами ядра атома: положительные, отрицательные и нейтральные тяжелые π -мезоны.

Ядерный реактор — установка, в которой осуществляется управляемая ценная реакция деления ядер атомов тяжелых элементов. Ядерные реакторы используют для выработки электрической энергии, получения мощных пучков нейтронов, применяемых при различных научных исследованиях, изготовления искусственных радиоактивных изотопов с разной интенсивностью излучения и сроками жизни, для облучения различных веществ с целью изменения их физических и химических свойств, а также для превращения неделящихся изотопов урана-238 и тория-232 в ядерное горючее — плутоний-239 и уран-233 [см. «Атомный (ядерный) реактор»].

Ядерное топливо — вещества, ядра которых делятся под действием медленных нейтронов: природный изотоп уран-235, искусственный изотоп уран-233 и искусственный элемент плутоний-239. Ядерное топливо служит для получения энергии, обычно тепла, в ядерном реакторе.

Ядерная техника — отрасль современной техники, имеющая дело с ядерной энергией и использующая ее для нужд народного хозяйства страны и ее обороны. Различают прямое и косвенное применение ядерной техники. К первому относятся реакции деления ядер атомов ряда элементов с целью получения больших количеств энергии, обычно электрической (ядерная энергетика), к косвенному использованию — многочисленные применения продуктов распада ядер радиоактивных изотопов и их излучений — в промышленности, науке, медицине, сельском хозяйстве, технике. К ядерной технике относятся также реакторостроение, промышленные методы разведки и добычи естественных делящихся элементов — урана и тория, получение металлического урана и его сплавов, разделение изотопов и другие аналогичные процессы, разработка и производство всех видов установок, машин, аппаратов и приборов, применяемых в атомной промышленности и технике.

Ядерная физика — часть современной физики, посвященная изучению атомных ядер, ядерных процессов и элементарных частиц, участвующих в

ядерных процессах и реакциях. Ядерная физика является научной и экспериментальной основой ядерной техники и атомной промышленности.

Ядерная физика условно подразделяется на следующие разделы: общие свойства и структура ядер; ядерные силы; спонтанные (самопроизвольные) превращения ядер; ядерные реакции; физика элементарных частиц; физика нейтронов; экспериментальная методика ядерной физики.

На базе ядерной физики возникли новые отрасли науки: радиохимия, радиационная химия, новые методы определения «возраста» ископаемых в геологии и археологии и многие другие.

Ядерное оружие — современные виды оружия, действие которого основано на использовании огромной энергии, главным образом взрывной, высвобождающейся при ядерных реакциях [деление ядер тяжелых элементов и синтез ядер атомов самых легких элементов (водорода) в ядра атомов более тяжелых элементов (гелий)]. К ядерному оружию относятся и так называемые боевые радиоактивные вещества — обычно радиоактивные продукты деления ядер тяжелых элементов.

Итак, мы добрались до конца буквы Я и до конца этой книги. Собственно говоря, большую часть того, что мы намеревались рассказать и объяснить в ней, можно было бы уместить в этой очень емкой для затронутых нами вещей букве Я: «ядро атома», «ядерная энергия», «ядерная физика», «ядерный реактор», «ядерная техника» и т. д.

Поэтому по изложенным в начале книги соображениям, а также потому, что русский алфавит, как и многие другие языки мира, начинается с буквы А, а не Я, нам пришлось львиную долю материала, начинающегося со слова «ядро», начать со слова «атом». Это позволило все остальное уже более равномерно распределить по другим буквам алфавита.

* *
*

Возвращаясь к тому, что писалось в начале этой маленькой «энциклопедии», с душевным трепетом обращается к читателю автор: удалось ли ему возбудить интерес и любопытство к одной из самых захватывающих областей современной науки — атомной физике и энергетике? Не возникла ли у читателя потребность, а возможно, и необходимость обратиться к какой-либо обстоятельной научно-популярной книге, чтобы пополнить свои знания?

Если такая необходимость назрела, что, безусловно, пора-
дует и автора, и издателей, мы предлагаем небольшой список
научно-популярных книг, предназначенных для читателей с
различной подготовкой.

а) Для начального ознакомления

Беккерман И. М. Невидимое оставляет след. М., Атомиздат,
1964.

Бобров Л. В. Тени невидимого света. М., Атомиздат, 1964.

Буянов А. Ф. Ядра, атомы, молекулы. М., Госатомиздат, 1962.

Гарднер М. Теория относительности для миллионов. Перев. с англ.
М., Атомиздат, 1965.

Корякин Ю. И. Биография атома. М., Госатомиздат, 1961.

Коттон Э. Семья Кюри и радиоактивность. Перев. с франц. М.,
Атомиздат, 1964.

б) Для более подготовленного читателя

Асташенков П. Т. Атомная промышленность. М., Госатомиздат,
1962.

Гладков К. А. Энергия атома. М. Детгиз, 1958.

Месси Г. Новая эра в физике. Перев. с англ. М., Атомиздат, 1965.

Проценко А. Н. Покорение атома. М., Атомиздат, 1964.

Юз Д. История нейтрона. Перев. с англ. М., Атомиздат, 1964.

в) Для подготовленного читателя

Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М., Госатомиз-
дат, 1963.

Атом для мира. Сборник. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Гродзенский Д. Э. Радиобиология. 2 изд. М., Госатомиздат,
1963.

В глубь атома. Сборник. М., Изд-во АН СССР, 1965.

Волчек О. Изотопы на службе человека. М., Физматгиз, 1958.

Зелиг К. Альберт Эйнштейн. Перев. с немецк. М., Атомиздат, 1964.

Лаврухина А. К., Колесов Г. М. Образование химических
элементов в космических телах. М., Госатомиздат, 1962.

Сенченков А. П. Атомные ракеты и проблемы освоения космоса.
М., Атомиздат, 1964.

Сиборг Г. Искусственные трансурановые элементы. Перев. с англ.
М., Атомиздат, 1965.

Трифонов Д. Н. Границы и эволюция периодической системы.
М., Госатомиздат, 1963.

Трифонов Д. Н. Если бы не было урана и тория. М., Изд-во
АН СССР, 1963.

Щелкин К. И. Физика микромира. 2 изд. М., Атомиздат, 1965.

Янг Ч. Элементарные частицы. М., Госатомиздат, 1963.

Кирилл Александрович Гладков
АТОМ от А до Я

Тематический план 1965 г., № 73

Редактор **А. Ф. Алябьев**
Обложка художника **Б. Г. Дударева**
Иллюстрации художника **К. И. Невлер**
Художественный редактор
А. С. Александров
Технический редактор **С. М. Попова**
Корректор **Л. П. Балюк**

Сдано в набор 20/VIII 1965 г.
Подписано в печать 19/II 1966 г.
Бумага 60 × 84¹/₁₆, типографская № 2.
Печ. л. 11
Уч.-изд. л. 10,2. Заказ изд. 1267
Тираж 80 000 экз. Т-01487. Цена 31 коп.
Заказ тип. 3475.

Атомиздат, Москва, К-31,
ул. Жданова, 5/7.

Типография «Красный пролетарий»
Политиздата,
Москва, Краснопролетарская, 16.

В 1966 г. Атомиздат выпускает следующие научно-популярные книги:

Артакин В. Н., канд. техн. наук, Ушаков Б. А. НЕОБЫКНОВЕННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ. Изд. 2, переработ. и доп., 8 л., 24 коп.

Величайшее достижение человеческого гения — открытие электрической энергии. Но чтобы получить ее, надо химическую энергию угля, нефти или газа превратить в тепловую, тепловую — в механическую, а уже механическую — в электрическую. А для этого обязательно нужны паровые котлы и турбины или двигатели внутреннего сгорания, электрогенераторы, громоздкое вспомогательное оборудование. Поэтому ученые и инженеры так упорно работают над упрощением этого цикла, чтобы решить проблему, как ядерную энергию непосредственно превратить в электрическую.

Эта книга — живой, увлекательный рассказ о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую, о том, как для этого используют радиоактивные изотопы, полупроводники, термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи, магнетогидродинамические генераторы, плазменные реакторы. Читатель узнает в ней о замечательных перспективах, которые открывают перед человечеством получение электроэнергии методами непосредственного преобразования.

Арцимович Л. А., академик АН СССР. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. Изд. 2, переработ. и доп., 10 л., 30 коп.

Книга академика Л. А. Арцимовича посвящена весьма актуальной проблеме современной физики — плазме, т. е. особому состоянию вещества, когда оно является смесью заряженных и нейтральных частиц. В ней популярно излагается теория плазмы и раскрываются увлекательные перспективы применения плазмы для получения термоядерной энергии, прямого преобразования тепла в электричество и использования ее во многих областях науки и техники.

Книга написана живым, образным языком, она вполне доступна пониманию людей со средним образованием и, несомненно, вызовет большой интерес у самого широкого круга читателей.

Первое издание книги встретило очень теплый прием и быстро разошлось.

Дубинин Н. П., чл.-корр. АН СССР, В. С. Губарев.
НИТЬ ЖИЗНИ (Очерки о генетике). 10 л., 30 коп.

Почему сын похож на отца? Как избавиться от многих наследственных заболеваний, против которых врачи сегодня бессильны? Как сказываются последствия атомных взрывов на потомстве жителей Хиросимы и Нагасаки? Чем знамениты полиплоиды? Генетический барьер в космосе... Можно ли его преодолеть?

На эти и многие другие вопросы, связанные с генетикой, отвечает книга. Она состоит из нескольких очерков, рассказывающих о различных проблемах генетики — отрасли науки, бурно развивающейся в наши дни.

Авторы — известный советский ученый-биолог Н. П. Дубинин и журналист В. С. Губарев. Книга написана в популярной форме, о сложнейших биологических проблемах рассказывается просто и понятно.

Ауэрбах Ш. ГЕНЕТИКА. Перев. с англ. 13 л., 85 коп.

В наш век генетика — одна из наиболее интересных и замечательных своими перспективами и широкими горизонтами наук. Изучение факторов, влияющих на наследственность, овладение инструментами направленного воздействия на наследственность — вот те задачи, которые занимают умы биологов.

Имя английского ученого, члена Английской академии наук Шарлотты Ауэрбах уже известно широкому кругу советских читателей, интересующихся вопросами радиационной биологии. Прекрасный популяризатор, она написала в 1956 году книгу «Радиационная генетика», которая была переведена на русский язык и издана Атомиздатом в 1959 году.

Новая книга Ш. Ауэрбах, написанная на высоком научном уровне, очень популярно и доходчиво рассказывает читателю о науке генетике, ее достижениях, задачах, трудностях и чрезвычайно больших перспективах. Ее с интересом прочтут самые широкие круги читателей.

Гродзенский Д. Э., канд. мед. наук. РАДИОБИОЛОГИЯ. Изд. 3, переработ. и доп., 12 л., 56 коп.

В третьем издании книги, как и в первых двух, дан очерк современного состояния проблемы воздействия ионизирующих излучений на живые организмы. В ней рассмотрены физические свойства этих излучений, их химическое действие, влияние на клетку и на целый организм, вопросы химической защиты от излучений и воздействия на наследственные свойства организма. Приведены данные о практическом использовании достижений радиобиологии в медицине и в различных областях народного хозяйства.

В третье издание внесены исправления и дополнения с учетом новых теорий и фактов, возникших и добытых в последние годы. Расширен раздел о радиационном факторе в космосе.

Характер изложения делает книгу интересной и доступной для тех, кто приступает к изучению радиобиологии, работает с источниками ионизирующего излучения и вообще желает быть в курсе развития одного из важнейших разделов биологической науки — радиобиологии.

Зелиг К. АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН. Перев. с нем. Изд. 2. 14 л., 90 коп. Второе издание лучше оформлено, на переплете — портрет Эйнштейна.

Великим преобразователем естествознания назвал Альберта Эйнштейна В. И. Ленин. Действительно, его теория относительности вызвала революцию в физике, по-новому представила понятия о пространстве и времени. Идеи Эйнштейна глубоко проникли в естественные науки и дали мощный толчок для бурного развития.

В книге описывается большой и своеобразный жизненный путь великого физика. Автор приводит много интересных фактических материалов, освещающих жизнь Эйнштейна. Описаны многочисленные встречи ученого с людьми различных национальностей, профессий, взглядов. Рассказывается о невзгодах и лишениях, перенесенных Эйнштейном, о том, что гитлеровцы приговорили его к смертной казни и он был вынужден эмигрировать в Америку.

Нарисованный К. Зелигом портрет Эйнштейна — это портрет живого, любознательного, ищущего человека громадного ума и высокой активности, с его характером, сомнениями, противоречиями...

Эта книга — одна из лучших об А. Эйнштейне; первое ее издание разошлось очень быстро, что говорит об интересе, проявленном к ней самым широким кругом читателей.

Кузин А. М., чл.-корр. АН СССР, **Березина Н. М.,**
канд. биол. наук. **АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ В СЕЛЬСКОМ**
ХОЗЯЙСТВЕ. Изд. 2, перераб. и доп., 6 л., 18 коп.

В популярной форме излагаются сведения по использованию атомной энергии в сельском хозяйстве.

Подробно рассматриваются эффекты действия больших доз радиации, убивающих клетки, и возможности использования этих доз для стерилизации вакцин в ветеринарии, консервирования пищевых продуктов. Дается общее представление о мутагенном действии ионизирующей радиации и использовании этого свойства при селекции новых форм сельскохозяйственных растений, устойчивых к вирусным заболеваниям, а также рассматриваются области применения и эффективность использования ионизирующих излучений в различных отраслях сельского хозяйства.

Первое издание книги было тепло встречено читателями.

Книга рассчитана на широкий круг читателей — агрономов, студентов сельскохозяйственных и биологических специальностей, а также на лиц, интересующихся применением излучений в сельском хозяйстве.

История сел атом. оружия

Лоуренс У. Л. ЛЮДИ и АТОМЫ. Перев. с англ. 11 л.,
55 коп.

Автор — физик, журналист и редактор по вопросам науки газеты «Нью-Йорк таймс» Уильям Л. Лоуренс рассказывает об открытии расщепления ядер урана, повествует о начале атомного века, описывает историю создания атомного оружия в США. Он останавливается и на перспективах мирного использования ядерной энергии.

Живо и интересно рассказывает Лоуренс о ядерно-физических исследованиях крупнейших ученых мира: итальянца Э. Ферми, датчанина Н. Бора, французенки И. Жолио-Кюри и других физиков, внесших значительный вклад в использование атомной энергии. Параллельно автор популярно излагает основные принципы экспериментальных физических исследований.

Книга интересна и полезна самому широкому кругу читателей.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

На складе Атомиздата
имеется:

✓ **Буянов А. Ф. ЯДРА, АТОМЫ, МОЛЕКУЛЫ.** 1962 г.,
367 стр., цена 73 коп.

Атом, который раньше считали неделимым кирпичиком мироздания, оказался наполненным движущимися и взаимодействующими частицами. Раскрыв строение атома, ученые глубже познают окружающий нас мир.

Чем дальше мы проникаем в мир атома и молекул, тем больше сил и явлений природы ставится на службу человеку. Из атома и их частиц состоят пылинки и горы, вода и воздух, планеты и звезды, т. е. вся Вселенная.

Проникнув в глубины строения микромира — атома, ученые поставили на службу человеку энергию, которая в миллионы раз превышает энергию, содержащуюся в угле и нефти.

Автор живо и образно рассказывает о новейших достижениях физики и химии. Химики пошли от атома «вширь», синтезируя молекулы-карлики и молекулы-гиганты, и находятся сейчас на пороге создания живой материи — белка. Физики пошли от атома «вглубь», проникая в атом и его ядро. Изучая их строение, физики познали многие явления в природе, обогатили человечество потрясающими открытиями, имеющими уже сейчас практическое применение в таких областях, как радиоэлектроника, использование атомной энергии и др.

Исследуя строение молекул, ученые открыли пути создания материалов с такими свойствами, которыми не обладают природные материалы. А изучение строения живой клетки дало им возможность охранить людей от множества болезней, продлить человеческую жизнь.

Книга рассчитана на самый широкий круг читателей.

Заказы на книги направляйте по адресу: Москва, В-71, Ленинский проспект, 15, Союзкнига, отдел научно-технической литературы или в Атомиздат по адресу: Москва, К-31, ул. Жданова, 5/7.

АТОМИЗДАТ

Цена 31 коп.

