

обошлось менее чем в 3 млн. долларов, причем из этой суммы 2 млн. долларов стоил запас тяжелой воды.)

Активная зона графитового реактора на 4000 квт Окриджской лаборатории представляет собой графитовый куб со стороной 8 м, т. е. объемом 640 м^3 ; в нем имеется 1248 рабочих каналов, образующих квадратную решетку с расстоянием между центрами каналов около 20 см; в эти каналы помещают стержни из природного урана диаметром 2,8 см. Аналогичны размеры брукхейвенского графитового реактора на 30 000 квт. Для загрузки подобных реакторов требуется 40—50 т природного урана.

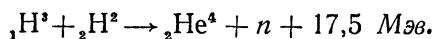
Применение обогащенного урана во много раз уменьшает необходимые размеры активной зоны и ее загрузку ураном. Так, уран-графитовый реактор на 30 000 квт первой в мире атомной электростанции СССР имеет цилиндрическую активную зону высотой 1,7 м и диаметром 1,5 м, т. е. объемом всего 4 м^3 , и работает при загрузке 0,55 т урана, обогащенного изотопом U^{235} до 5%.

Плотность потока тепловых нейтронов в активной зоне графитовых реакторов на природном уране составляет $(1 \sim 5) \cdot 10^{12} \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сек}$. В тяжеловодных реакторах на природном уране достигается плотность потока в $5 \cdot 10^{14} \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сек}$. Такая же плотность потока тепловых нейтронов получается и в графитовых реакторах при использовании достаточно обогащенного урана.

§ 119. Термоядерные реакции

Только самые легкие и самые тяжелые элементы, стоящие в самом начале и в конце периодической системы Менделеева, пригодны для осуществления самоподдерживающейся ядерной реакции.

Деление ядер урана и плутония дает большой энергетический эффект, но еще бóльший энергетический эффект (если относить его не к грамм-атому, а к 1 кг) дает синтез гелия из атомов водорода. Реакция такого ядерного синтеза была рассмотрена в качестве примера в § 110; это образование ядер гелия из ядер тяжелого и сверхтяжелого водорода, т. е. образование альфа-частицы и нейтрона из дейтона и тритона (ядра трития), когда освобождается энергия 17,5 Мэв:

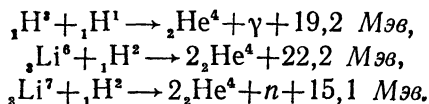


При указанной реакции на 1 кг смеси тяжелых изотопов водорода выделяется энергия

$$E = \frac{1000}{5} \cdot 17,5 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 3,83 \cdot 10^{-17} = 80 \cdot 10^9 \text{ ккал.}$$

Это количество энергии в 4 раза превосходит то, которое выделяется при делении ядер 1 кг урана.

Большая энергия освобождается также и при других реакциях синтеза ядер гелия:



Во всех перечисленных реакциях налетающая частица является заряженной. Поэтому для проникновения в ядро ей нужно преодолеть кулоновское отталкивание заряда ядра. Так как высота кулоновского потенциального барьера в данных случаях невелика, то даже при сравнительно небольших энергиях налетающей частицы существует хотя и весьма малая, но все же отличная от нуля вероятность просачивания налетающей частицы (протона, дейтона) в ядра трития или лития.

При облучении лития дейтонами с энергиями в десятые доли мегаэлектронвольта эффективные сечения реакции образования гелия имеют порядка сотых и тысячных долей барна ($\sigma = 10^{-26} - 10^{-27} \text{ см}^2$). При энергиях 0,1—0,5 Мэв только один из десятков миллионов дейтонов проникает в ядро лития и приводит к образованию гелия.

Выход реакции $\text{H}^3 + p \rightarrow \text{He}^4 + \gamma$ ничтожно мал; даже при энергии протонов порядка 1 Мэв эффективное сечение составляет десяти-тысячные доли барна.

Наибольший выход имеет первая из приведенных выше реакций $\text{H}^3 + \text{H}^2 \rightarrow \text{He}^4 + n$. При облучении тяжелого водорода ядрами сверхтяжелого водорода (тритонами) с энергией порядка 0,1—0,2 Мэв эффективное сечение процесса составляет несколько барнов (для 0,1 Мэв $\sigma \approx 1,1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, для 0,2 Мэв $\sigma \approx 5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$). Но и при таких величинах эффективных сечений число случаев столкновений исходных ядер, приводящих к синтезу гелия, мало.

При тепловых скоростях налетающей частицы — даже для температур в тысячи и десятки тысяч градусов — выход всех подобных реакций синтеза практически равен нулю. Минимальные энергии частиц порядка 0,01 Мэв, когда эффект просачивания через кулоновский барьер легчайшего ядра начинает играть заметную роль и выход реакции значительно увеличивается, соответствуют звездным температурам в десятки миллионов градусов. При $T = 20 \cdot 10^6$ градусов $\frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 20 \cdot 10^6 = 4,14 \cdot 10^{-9} \text{ эрг} = 0,0026 \text{ Мэв}$, т. е. энергия 0,01 Мэв почти в 4 раза превышает среднюю энергию теплового движения при температуре 20 миллионов градусов, и, следовательно, при указанной температуре энергией 0,01 Мэв обладает только небольшая часть частиц.

Вероятность реакции, вызываемой заряженными частицами, и в частности реакций синтеза гелия, резко возрастает, когда энергия налетающих частиц становится близкой к высоте кулоновского

барьера. На диаграмме, где по оси абсцисс отложена энергия налетающей частицы, кривая, характеризующая вероятность реакции $\text{H}^3 + \text{H}^2 \rightarrow 2\text{He}^4 + n$, круто поднимается вверх при 0,5—1,0 Мэв (на рис. 424 кривая А). На том же рисунке кривой В обозначено максвеллово распределение энергии при температуре T порядка 20 миллионов градусов. Переменная ординаты этих кривых, мы получаем кривую АВ, которая определяет относительное число ядерных превращений, происходящих при температуре T и вызываемых частицами с энергией, соответствующей абсциссе этой

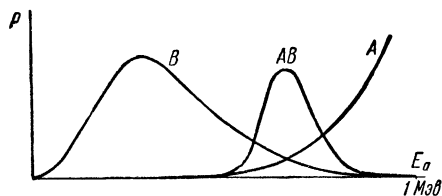


Рис. 424. А — вероятность реакции синтеза гелия, В — кривая максвеллова распределения.

кривой. С наибольшей вероятностью реакция происходит при больших энергиях относительного движения частиц, но по максвеллову распределению число таких частиц незначительно. Поэтому, как показывает кривая АВ, при температуре порядка 20 миллионов градусов основную роль в реакции синтеза ядер

гелия играют частицы (H^2 и H^3) с энергией, в несколько раз (примерно в 3—4 раза) превышающей среднюю энергию теплового движения.

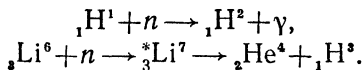
При повышении температуры число частиц, имеющих вследствие теплового движения энергию, достаточную для преодоления кулоновского отталкивания между ядрами, все возрастает и выход реакции все увеличивается. Подобного рода реакции, не развивающиеся самопроизвольно при обычных температурах, но проходящие с выделением энергии и имеющие возрастающий выход при высоких температурах, называют *термоядерными реакциями*.

При температурах меньше миллиона градусов термоядерные реакции, перечисленные выше, а тем более реакции с участием ядер, имеющих большой заряд, протекают так медленно, что выделение энергии, освобождающейся при реакции, практически не влияет на температуру реагирующих веществ. Но чем выше температура, тем больше выход термоядерной реакции. При достаточно высокой температуре, порядка нескольких десятков миллионов градусов, выделение энергии прореагировавшими ядрами вызывает значительное повышение температуры реагирующих веществ, что немедленно сказывается в увеличении выхода реакции и приводит к дополнительному выделению энергии, а следовательно, и к еще большему повышению температуры. Таким образом, *термоядерная реакция, возбужденная выше некоторой критической температуры, зависящей от природы и степени тепловой изоляции реагирующих веществ, развивается с самоускорением* и при огромном выделении

энергии завершается в ничтожные доли секунды. Такой термоядерный взрыв реализуется в *водородных бомбах*.

В массивной оболочке водородной бомбы заключены урановая или плутониевая бомба и вещества, превращающиеся при термоядерной реакции в гелий — тяжелый и сверхтяжелый изотопы водорода (дейтерий и тритий) в виде соединений с литием. Для того чтобы вызвать термоядерную реакцию в такой системе, сначала производят взрыв урановой или плутониевой бомбы. Это приводит к резкому повышению температуры, обеспечивающему возможность синтеза гелия. Чем больше масса дейтерия, трития и лития (причем величина масс не ограничена какими-либо критическими размерами, как это имеет место для делящихся веществ), тем большая энергия выделяется при взрыве водородной бомбы).

Для выработки тяжелого и сверхтяжелого изотопов водорода, применяемых в водородной бомбе, используют ядерные реакторы¹⁾, с помощью которых получают интенсивные потоки медленных нейтронов, необходимые для осуществления реакций:



Получаемый указанным путем (как и любым другим способом) тритий радиоактивен и испытывает бета-превращение (${}_1\text{H}^3 \rightarrow {}_2\text{He}^3 + e^-$) с периодом полураспада около 12 лет. Но если получающийся из трития изотоп гелия облучать тепловыми нейтронами, то снова образуется тритий: ${}_2\text{He}^3 + n \rightarrow {}_1\text{H}^3 + p$. Производство изотопов водорода, подобно производству плутония, сопряжено с большими затратами средств и времени. Расходы на строительство завода по производству трития в США (на берегу реки Саванны) превысили стоимость всех заводов и предприятий такой крупной корпорации, как «Дженерал моторс».

В последние годы большое число исследований направлено на изыскание способов, которые позволяли бы стабилизировать термоядерную реакцию и управлять ее интенсивностью, аналогично тому как это удалось сделать в реакторах для цепного процесса деления ядер. Чтобы создать термоядерный реактор, необходимо: 1) осуществить в каком-то объеме контролируемое нагревание газа до миллионов и десятков миллионов градусов; 2) устранить возможность таких потерь тепла, которые приводили бы к немедленному охлаждению этого сверхнакаленного газа. Второе условие практически означает, что активная зона термоядерного реактора не должна соприкасаться со стенками реактора, которые, понятно, не могут быть нагреты до подобных температур и при соприкосновении с газом, находящимся в активной зоне,

¹⁾ Применяют также метод электролиза воды, о котором было сказано на стр. 423.

будут вызывать мгновенное его охлаждение. По-видимому, реализация указанных условий возможна только в плазме газового разряда (т. II, § 45, 1959 г.; в пред. изд. § 52). Натяжение магнитносилковых линий тока, охватывающих канал тока, при большей величине тока отрывает газоразрядную плазму от стенок и сжимает ее в «шнур» (*пинчэффект*). При большой плотности тока температура разреженного ионизированного газа в разрядном шнуровом канале может быть доведена до миллионов, а возможно, и десятков миллионов градусов.

В 1956 г. академик И. В. Курчатов сообщил о проведенном в СССР экспериментальном и теоретическом изучении ядерных процессов в плазме газоразрядного шнура. Это сообщение вызвало серию публикаций английских, американских и других физиков, причем обнаружилось, что в ряде лабораторий опыты проводились в одном и том же направлении.

Трудность решения задачи заключается в том, что газоразрядный шнур неустойчив: его сужения в отдельных местах и прогибы приводят к соприкосновению со стенками реактора, что ведет к охлаждению плазмы. Для повышения устойчивости применяют стабилизирующие магнитные поля: продольные и охватывающие. Эксперименты последних лет (1957—1958 гг., на установках «Зета» в Харуэлле, на серии установок «Колумб» в Лос-Аламосе, на установках «Огра» и «Альфа» в СССР и др.) показали, что при импульсах тока порядка ста тысяч — миллиона ампер в шнуре газового разряда развиваются очень высокие температуры, однако еще не достаточные для стимулирования термоядерных реакций, и наблюдается испускание нейтронов (числом 10^7 и более на каждый импульс тока), но эти нейтроны еще не термоядерного происхождения, а вызываются процессами, которые связаны с неустойчивостью шнура.

Фронт упомянутых исследований все время расширяется, так как пока не найдено другого пути, а создание термоядерного реактора справедливо считают самой актуальной и самой грандиозной задачей физики.

§ 120. Применение ядерных реакций

Первым применением ядерных реакций было использование радиоактивных вод и радиоактивных грязей, а вслед за тем и радиоактивного облучения в лечебных целях. Начиная со второй половины 30-х годов (после того как были открыты явления индуцированной радиоактивности, § 92), терапевтические учреждения многих стран мира стали систематически изучать лечебное действие различных радиоактивных изотопов. В послевоенные годы, когда благодаря ускорительным аппаратам и ядерным реакторам в широких масштабах налажилось производство радиоактивных изотопов, их применение прочно вошло в медицинскую практику и помогло восстановить здоровье, а во многих случаях и спасти жизнь большому числу людей. Например, при заболевании слизистых оболочек и злокачественных болезнях крови в лечебных целях дают принимать внутрь или вводят внутривенно радиоактивный изотоп фосфора P^{32} (в виде раствора фосфорнокислого натрия). Радиоактивным изотопом иода I^{131} лечат заболевания щитовидной железы. Для лечения ряда других болезней часто применяют радиоактивные изотопы: Au^{188} , Mn^{52} , Cs^{137} , Ce^{144} .