

НАУЧНО-
★
ПОПУЛЯРНАЯ
БИБЛИОТЕКА

ВОЕННОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА



Е. М. БАЛАБАНОВ

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА

Е. М. БАЛАБАНОВ

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1963

6П2. 8

Б 20

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мечты о будущем всегда опережают настоящее. Но все же любой фантаст опирается на достижения науки и техники своего времени; эти достижения — отправная точка любой фантазии. Ведь не мог же Жюль Верн перешагнуть через границы своего века и описать вместо «Наутилуса» капитана Немо атомную подводную лодку. Однако талантливый романист был мастером научно-фантастического рассказа, описывая машины, которые мы сейчас уже считаем обычными.

История человечества изобилует поразительными победами над природой. Человек покорил энергию Солнца в большинстве ее проявлений. Он научился использовать аккумулированную в недрах Земли солнечную энергию, перегородил плотинами могучие реки и заставил их вращать мощные турбогенераторы, создал новые вещества, которых никогда не было в природе, построил приборы, в миллионы раз чувствительнее наших органов чувств. Разум человека проник в микромир атома и макромир далеких галактик. Началось успешное освоение космоса: созданы искусственные спутники Земли и новые искусственные планеты солнечной системы, на космических кораблях советские люди Юрий Гагарин и Герман Титов первыми проникли в космическое пространство, а Андриян Николаев и Павел Попович совершили многодневный групповой космический полет.

Нас уже не удивляет тот бесконечный перечень различных научных открытий, технических достижений и изобретений, которые сделаны людьми нашего века. И мы всегда смотрим вперед. Но все же, если бы четверть века тому назад кто-нибудь написал увлекательную книгу о нашем настоящем, например о промышленных атомных электростанциях или об атомном ледоколе, то мечты автора, наверное, назвали бы фантазией. Ведь

еще в 1935 г. ни один физик не знал, как подойти к проблеме использования атомной энергии. А сегодня в нашей стране уже работают атомные электростанции, по Северному морскому пути ведет корабли атомный ледокол «Ленин», в мощных реакторах образуется искусственное ядерное топливо для промышленных установок, производятся радиоактивные вещества, применяемые в промышленности, сельском хозяйстве и медицине.

О чем же мечтают физики теперь?

Что бы ни создавал человек — машины для облегчения своего труда, новые средства передвижения, ракеты для освоения космоса, — везде нужна энергия. Освоенные запасы энергии на Земле не так уж велики. Предполагаемых запасов угля, нефти и природного газа при быстро растущей колоссальной потребности в энергии хватит не более чем на 100—150 лет. Да и, кроме того, эти вещества являются весьма ценным химическим сырьем и, по-видимому, через несколько десятков лет будет считаться варварством сжигать химическое горючее в топках паровых котлов. На Земле имеются большие ресурсы белого угля — водной энергии, но, несомненно, энергия рек сравнительно скоро будет полностью освоена. Дальнейший технический прогресс и жизнь человечества будут зависеть от других источников энергии и в первую очередь от того, насколько хорошо люди сумеют использовать энергию атомного ядра.

Сейчас мы умеем получать ядерную энергию, используя только ядра урана и тория в ядерных реакторах. Но тяжелых элементов не очень много, и мы не можем таким путем получать энергию в изобилии. Кроме того, добыча урана или тория является весьма трудоемкой и громоздкой задачей.

Однако ядерную энергию можно получать не только из тяжелых ядер, но и из легких, в ядерном синтезе. Запасы такого горючего на Земле практически неисчерпаемы. Но реакциями синтеза легких ядер — термоядерными реакциями — человек пока еще не умеет управлять. Решение этой задачи составляет проблему № 1 современной физики.

Для того чтобы познакомить неподготовленного читателя с этой грандиозной задачей, нам пришлось бы пройти слишком длинный путь. Поэтому, чтобы не начинать издалека, автор принимает, что читателю извест-

ны основные сведения об атоме и атомном ядре, и лишь вкратце напомнит о строении этих частиц.

Некоторые трудности, возникающие при изложении процессов, происходящих в микромире, обойти нельзя. Да и в этом нет необходимости. Подготовка, которую получает школьник при 10—11-летнем образовании, вполне достаточна, чтобы понять механику микромира. А если иногда придется подумать, а может быть, и прибегнуть к помощи знакомого школьного учебника, то это только полезно. Знания, полученные с некоторым трудом, лучше усваиваются и запоминаются.

I. АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

АТОМ РЕЗЕРФОРДА

Все окружающие нас вещества, как известно, построены из атомов различных видов. В настоящее время насчитывается сто два вида атомов.

Атомы долгое время считались неделимыми элементарными частицами. Однако сравнительно большое число атомов и их различные свойства давно наводило на мысль, что атомы являются различными соединениями других, более простых частиц. В настоящее время достоверно известно, что атом — действительно сложное сочетание ряда других частиц.

Начало успешному изучению внутреннего строения атома было положено в конце прошлого века, когда была открыта радиоактивность. Исследования этого явления с несомненностью показали, что при радиоактивном распаде атомы одних элементов, излучая ядра гелия (альфа-частицы) и другие частицы, превращаются в атомы других элементов. Но радиоактивные излучения не только говорят нам о превращениях атомов, об их сложном строении, но и дают возможность проникнуть в атом и изучить его сложную структуру.

В своих исследованиях строения атома английский физик Резерфорд использовал альфа-частицы радиоактивного излучения. Изучая прохождение этих частиц через тонкие металлические листки, Резерфорд заметил, что большинство частиц проходит через листок, не изменяя заметно своего направления. Лишь иногда, по-видимому, происходит столкновение альфа-частицы с какой-либо частицей атома, и тогда обе частицы разлетаются в разные стороны подобно столкнувшимся бильярдным шарам. Отсюда Резерфорд сделал вывод, что атом —

это не сплошь заполненный каким-либо тяжелым веществом объем; лишь малая часть этого объема препятствует прохождению альфа-частицы и вызывает ее отклонение от прямолинейного пути, этот малый объем есть ядро атома.

Так возникла модель атома Резерфорда, которая впоследствии была уточнена датским физиком Нильсом Бором.

Атом представляет собой маленькую планетарную систему. В центре ее находится очень малая, но весьма тяжелая частица — атомное ядро, имеющее положительный электрический заряд. В ядре сосредоточена почти вся масса атома. Вокруг ядра на сравнительно больших расстояниях движутся легкие частицы — электроны, несущие отрицательный заряд. В целом атом нейтрален, т. е. не имеет электрического заряда. Поэтому число электронов в атомах равно количеству положительных элементарных зарядов ядра. Заряд ядра численно равен номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.

Схемы строения наиболее простых атомов приведены на рис. 1. Атом самого легкого элемента — водорода — состоит из двух частиц; вокруг ядра водорода вращается один электрон. У гелия — второго элемента периодической системы — вокруг ядра вращаются два электрона; у кислорода — восемь электронов. Чем тяжелее атом, тем сложнее его строение.

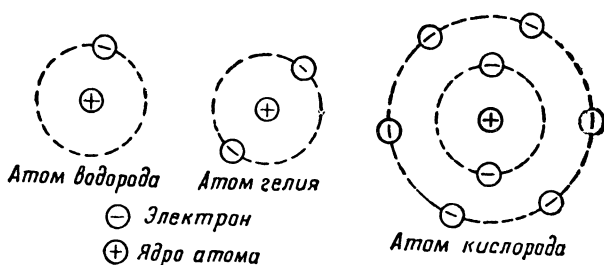


Рис. 1. Вот так можно представить себе схемы наиболее простых атомов

Дальнейшие исследования показали, что по своей структуре атом значительно сложнее, чем это следует из теории Резерфорда — Бора. Современные квантовые

представления отвергают простую механическую модель атома, однако в рамках нашего изложения эту наглядную модель вполне можно использовать.

Важно напомнить, что электроны в атоме связаны с ядром электростатическими силами притяжения и для того, чтобы перевести хотя бы один электрон на более удаленную орбиту или совсем оторвать его от ядра, надо применить некоторые усилия, т. е. передать атому дополнительную энергию: возбудить, или ионизовать, его. Энергия, которую надо затратить на отрыв электрона от атома, численно равна так называемой энергии связи. Каждый электрон в атоме имеет вполне определенную энергию связи. Естественно, что чем ближе электрон к ядру, тем сильнее он связан с атомом и тем большую величину имеет его энергия связи.

ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ АТОМНОЕ ЯДРО?

После того как было открыто сложное строение атома, внимание физиков было перенесено на атомное ядро. Так же как и атомы, ядра обладают различными свойствами, которые могут быть объяснены различной их структурой. Надо было найти те «кирпичики», или более простые частицы, из которых состоят ядра всех элементов.

При помощи весьма остроумных приборов — масс-спектрографов — физики сумели очень точно измерить массы разных атомов и ядер. Оказалось, что веса всех ядер измеряются числами, кратными весу ядра атома водорода. Поэтому естественно было предположить, что ядра всех элементов состоят из разного количества ядер водорода — протонов. Но протон имеет положительный заряд, равный по абсолютной величине отрицательному заряду электрона. Отсюда ядро с атомным весом M должно, очевидно, иметь M элементарных положительных зарядов. Для того чтобы атом был в целом нейтрален, его электронная оболочка должна, казалось бы, содержать M электронов. Но это не так: число наружных электронов в атоме значительно меньше, чем число кажущихся протонов в ядре. Пришлось сделать предположение, что остальные электроны находятся внутри атомного ядра. Это как будто соответствовало действительности: бета-лучи, получающиеся при радиоактивном рас-

паде ядер, есть не что иное, как поток очень быстрых электронов. Однако гипотеза о протонно-электронной структуре ядра противоречит многим экспериментальным фактам. И когда в 1932 г. был открыт нейтрон — частица, не имеющая электрического заряда, масса которой близка к массе протона, — стало ясно, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов.

Схемы строения простых ядер показаны на рис. 2. Наиболее простым является ядро водорода: оно состоит из одного протона. Ядро гелия состоит из четырех частиц: двух протонов и двух нейтронов. Чем тяжелее атом, тем сложнее строение его ядра. Ядро урана, например, состоит из 238 ядерных частиц — 92 протонов и 146 нейтронов.

Общее число протонов и нейтронов (объединяющее название — «нуклоны») в ядре атома равно массовому числу A^* . Количество протонов в ядре равно числу электронов, находящихся в электронной оболочке атома, т. е. атомному номеру Z . Зная массовое число и номер химического элемента в периодической системе, легко определить количество нейтронов в ядре атома:

$$N = A - Z.$$

Заряд ядра определяется количеством протонов, и любое уменьшение или увеличение их числа вызывает изменение числа электронов в электронной оболочке атома. Поэтому изменение числа протонов меняет химические свойства атома, происходит превращение атома одного элемента в атом другого.

Удаление или прибавление нейтронов в ядре не приводит к образованию нового химического элемента, так как заряд и, следовательно, номер элемента в периодической системе остаются прежними. Такие атомы — изо-

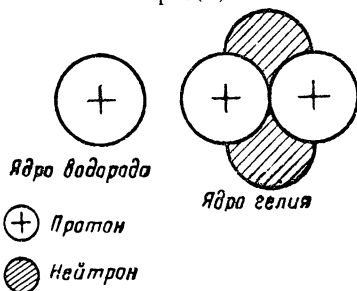


Рис. 2. Схемы строения простых атомных ядер

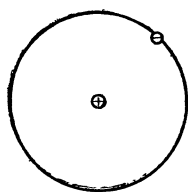
* Округленный до целых чисел атомный вес.

топы — отличаются один от другого массами и, обладая одинаковыми химическими свойствами, являются разновидностями одного и того же химического элемента.

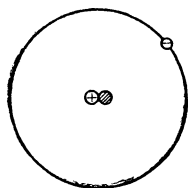
Почти каждый химический элемент, встречающийся в природе, представляет собой смесь различных изотопов.

У водорода, например, три изотопа (рис. 3). В ядре каждого изотопа водорода имеется один протон, и поэтому во всех атомах имеется по одному электрону, которые уравнивают положительный заряд ядра. Дейтерий — устойчивый изотоп водорода с массовым числом 2 — содержится в природном водороде в количестве 0,018%, ядро его атома, называемое дейтоном, состоит из одного протона и одного нейтрона. Ядро сверхтяжелого водорода — трития — состоит из трех частиц: одного протона и двух нейтронов; оно называется тритоном. Трития в природной смеси водорода почти нет, в настоящее время его можно получать в довольно больших количествах в ядерных реакторах. Изотопы водорода играют особую роль как горючее в термоядерных реакциях.

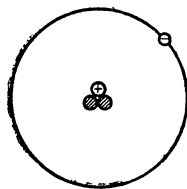
Сейчас физикам известно около 300 устойчивых и примерно 1000 радиоактивных изотопов различных элементов.



Легкий водород



Дейтерий



Тритий

Рис. 3. Изотопы водорода

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Что удерживает частицы в атомном ядре?

В ядре, как установлено, имеются нейтроны и протоны. Положительные протоны могут только отталкиваться, а отнюдь не стягивать ядерные частицы в очень маленькое ядро. Силы отталкивания, действующие между протонами, очень велики. Простой расчет показывает, что давление, развиваемое в ядре электростатическими силами, эквивалентно многим миллиардам атмосфер. Совершенно очевидно, что в ядре действуют и другие

силы, не только уравнивающие электростатические силы отталкивания протонов, но и обуславливающие огромную прочность атомных ядер. Такие силы принято называть ядерными. О природе этих сил известно пока немного. Известно, в частности, что в то время, как электростатические силы отталкивания действуют между протонами ядра на сравнительно больших расстояниях, ядерные силы действуют на очень малых расстояниях между любыми соседними ядерными частицами.

Японский физик Юкава, создавая свою теорию ядерных сил, предположил, что в ядре между протонами и нейтронами существует непрерывный обмен особыми частицами — мезонами. Один из нуклонов испускает эту частицу, другой ее поглощает. Таким образом, мезоны связаны с каждым нуклоном и обуславливают действие ядерных сил между ними.

Но надо было найти такую частицу. И вот в 1937 г. появилось сообщение, что в космических лучах найдены частицы, обладающие подходящей мезону массой — около 300 электронных масс. Однако радость физиков была преждевременной, так как вновь открытая частица — мю-мезон — очень слабо взаимодействовала с ядрами атомов и поэтому, естественно, не могла играть роль связующего звена между протоном и нейтроном. Десять долгих лет физики усиленно искали другую частицу. Наконец, ее след был обнаружен в эмульсии фотопластинки, облученной космическими лучами высоко в горах. Эта частица оказалась несколько тяжелее мю-мезона и была названа пи-мезоном.

Пи-мезон живет очень недолго — несколько миллиардных долей секунды, т. е. примерно в 100 раз меньше, чем мю-мезон, и затем превращается в мю-мезон, излучая при этом очень легкую нейтральную частицу — нейтрино. Вот почему физики так долго не могли обнаружить пи-мезоны, существование которых предполагал Юкава. По-видимому, пи-мезоны и обуславливают действие между протонами и нейтронами ядерных сил.

Ядерные силы имеют некоторое сходство с химическими силами, которые также являются обменными, т. е. обуславливаются обменом частиц. Для примера можно взять ион молекулы водорода, состоящий из атома водорода и ядра атома (рис. 4). В ионе имеются два протона, вокруг которых вращается один электрон. Такой

ион является вполне устойчивым образованием, и сила, которая определяет его устойчивость, есть результат взаимодействия двух протонов с одним общим электроном.

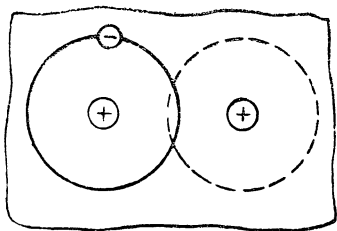


Рис. 4. Ион молекулы водорода. Два протона обмениваются одним электроном

По-видимому, электрон вращается то вокруг одного, то вокруг другого протона. Здесь, так же как и в ядерных системах, сила связана с обменом частиц, с переходом электрона от одного протона к другому.

Прочность твердых тел, как известно, определяется электростатическими силами, действующими между атомами в веществе. Но ядерные силы в миллион раз больше электростатических. Во столько же раз ядерное вещество прочнее самой крепкой стали.

Ядерное вещество обладает также колоссальным удельным весом (плотностью). Мы привыкли иметь дело с веществами, удельный вес которых не превышает 23. Кубический же сантиметр ядерного вещества весит больше 100 млн. т, т. е. удельный вес его равен 10^{14} г/см³.

Эти огромные прочность и плотность объясняются ядерными силами, которые стягивают нуклоны в очень плотную и маленькую частицу — ядро.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Из элементарной механики известно, что при движении какого-либо тела, происходящем под действием силы, всегда выделяется энергия. Химическая или ядерная энергия также получается в результате движения частиц под действием сил.

Представим себе, что нам удалось каким-либо образом схватить ядерную частицу и удалить ее на очень большое расстояние от ядра. Так как до этого частица прочно удерживалась ядерными силами, то, для того чтобы ее удалить, необходимо произвести работу, затратить энергию. Один из основных законов природы — закон сохранения и превращения энергии — говорит о том, что энергия не уничтожается и не возникает из ничего.

Поэтому работа, затраченная на удаление частицы, будет компенсирована энергией, которая выделится тогда, когда эта или другая частица вновь присоединится к ядру.

Таким образом, каждая частица в ядре связана с вполне определенной энергией, и значение этой энергии может быть вычислено, если каким-либо способом удастся измерить энергию ядра до и после удаления частицы. В этом случае мы определим энергию, которая называется энергией связи частицы в ядре. Очевидно, что полная энергия связи численно равна работе, необходимой для разделения ядра на все составные частицы.

На рис. 5 показана кривая зависимости энергии связи от массового числа ядер. На оси ординат отложены средние значения энергии связи, приходящиеся на одну ядерную частицу, т. е. $\frac{E}{A}$, где E — энергия связи ядра, а на оси абсцисс — массовое число A .

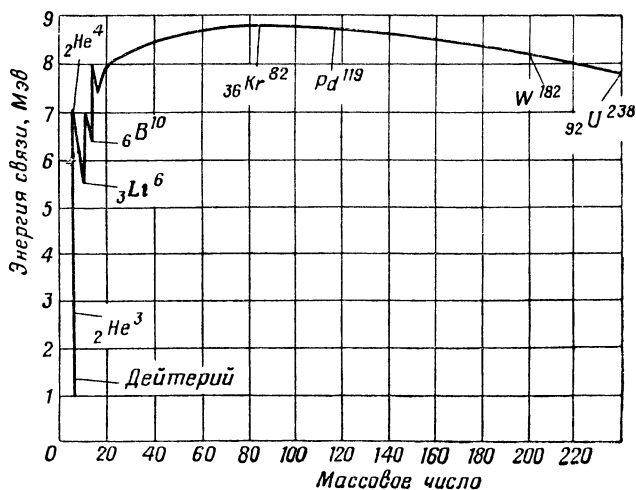


Рис. 5. Кривая энергии связи атомных ядер

Энергия связи является по существу отрицательной величиной, так как увеличение энергии связи ядра приводит к уменьшению его внутренней энергии, т. е. к более устойчивому состоянию. Переход из менее устойчи-

вого состояния в более устойчивое всегда сопровождается выделением энергии.

Кривая энергии связи (рис. 5) указывает, что мы можем ожидать выделения энергии только в таких ядерных превращениях, в результате которых будут образованы самые устойчивые ядра — ядра средней величины, т. е. при соединении (синтезе) легких ядер или при делении тяжелых.

Закон взаимосвязи массы и энергии дает возможность вычислить энергию связи для различных ядер. Если при образовании ядра выделилась энергия, то, очевидно, с этой энергией выделилась масса, которую можно подсчитать по известному уравнению

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

т. е.

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Величина знаменателя $c^2 = 9 \cdot 10^{10}$ (квадрат скорости света в пустоте в *км/сек*) показывает, что нужно очень большое выделение энергии, чтобы можно было заметить маленькое изменение массы Δm .

Например, в химической реакции образования воды выделяется довольно большая энергия, и можно утверждать, что масса молекулы воды меньше массы двух атомов водорода и одного атома кислорода. Но энергия, выделяющаяся в химических реакциях, все же недостаточно велика, чтобы было можно даже очень точными приборами обнаружить это различие в массах. В ядерных же реакциях энергии выделяется в миллионы раз больше, чем в химических, и поэтому изменение массы, получающееся в ядерных реакциях, будет значительным. Физики научились очень точно определять массы частиц, и оказалось, что масса любого ядра всегда меньше суммы масс протонов и нейтронов, составляющих это ядро.

Возьмем, к примеру, ядро гелия. Оно состоит из двух протонов и двух нейтронов. За атомную единицу массы в атомной физике обычно принимают $1/16$ массы атома кислорода, равную $1,662 \cdot 10^{-24}$ г. В таких единицах масса ядра гелия равна 4,004. Сумма же масс всех четырех частиц будет 4,034. Таким образом, при образовании ядра гелия наблюдается уменьшение массы, равное 0,03. Пользуясь формулой взаимосвязи массы и энергии, можно

определить, какой энергии соответствует это уменьшение массы. При образовании 1 кг гелия убыль массы составляет 80 г; при этом выделяется энергия, равная примерно $4,47 \cdot 10^{28}$ Мэв, или $1,7 \cdot 10^{11}$ больших калорий, что равноценно теплу, получающемуся при сгорании 20 тыс. т угля.

Выделившаяся при образовании ядра энергия равна энергии связи, и в общем случае ее можно определить из равенства

$$\Delta E = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] c^2,$$

где Z — число протонов;

$A - Z$ — число нейтронов;

m_p и m_n — массы соответственно протона и нейтрона;

$m_{\text{я}}$ — масса ядра.

Легко подсчитать, что одна атомная единица массы соответствует 931 Мэв энергии. Поэтому, выражая убыль массы в атомных единицах, получим

$$\Delta E = 931 \cdot \Delta m \text{ Мэв.}$$

Наибольшая энергия должна, очевидно, выделяться при образовании средних ядер. При образовании из протонов и нейтронов, например, 1 кг хрома выделяется энергия, равная $2,1 \cdot 10^{11}$ больших калорий.

II. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

ХИМИЧЕСКИЕ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Химики умеют сравнительно легко, комбинируя химические элементы, создавать различные вещества. Однако, как мы уже знаем, сфера действия химии ограничивается электронной оболочкой атомов, точнее, наружными, так называемыми валентными, электронами. При самых сложных и интенсивных химических реакциях ядра атомов остаются неизменными.

Казалось бы, чего проще — взять сосуд и, поместив в него смесь различных атомов (ядер), наблюдать не только химические, но и ядерные реакции. Но между этими двумя типами реакций существует весьма большое различие. Прежде всего площадь, занимаемая атомным ядром, в сотни миллионов раз меньше площади атома, и поэтому вероятность столкновения ядра с ядром ничтожно мала по сравнению с вероятностью встречи атомов.

Еще более существенную роль играет электростатическое отталкивание между двумя одноименно заряженными ядрами. Сила отталкивания между двумя ядрами равна

$$\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2},$$

где Z_1 и Z_2 — атомные номера вступающих в реакцию ядер, а r — расстояние между ними.

Так как два ядра, прежде чем они вступят в реакцию, должны приблизиться друг к другу на расстояние, примерно равное 10^{-13} см, то сила отталкивания становится очень большой, особенно для тяжелых ядер. Даже для легких ядер сила отталкивания настолько велика,

что для ее преодоления необходимо, чтобы энергия ядер была равна миллионам электроновольт. В то же время, для того чтобы произошла химическая реакция, т. е. взаимодействие атомов, их энергия не должна превышать одного электроновольта. Даже при нормальной температуре значительная часть атомов имеет такую энергию, и они вступают в химическую реакцию. Вероятность же того, что два ядра при обычной температуре (20°C) будут иметь энергию, равную миллионам электроновольт, ничтожно мала, и поэтому практически наблюдать ядерные реакции в смеси двух видов ядер невозможно.

Для совершения ядерных реакций ядра должны обладать большой кинетической энергией. Известно два метода осуществления таких реакций.

Во-первых, в лабораторных условиях можно получить быстрые легкие ядра на специальных аппаратах — ускорителях. Здесь протоны, дейтоны или альфа-частицы ускоряются до энергии порядка миллионов электроновольт. Эти частицы, попадая в различные вещества, преодолевают отталкивающие электростатические силы и входят в область притяжения ядерных сил.

Во-вторых, ускорять атомы и ядра можно не только на ускорителях. Для этого достаточно повышать температуру, нагревать какое-либо вещество. При этом ядра, так же как и молекулы, приобретают большую энергию. Если этой энергии достаточно для преодоления отталкивающих сил, то может произойти слияние ядер — ядерная реакция.

Второй метод осуществления ядерных реакций нас интересует особо, ниже он будет рассмотрен подробнее.

КУЛОНОВСКИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР

Итак, для того чтобы совершилась ядерная реакция между двумя ядрами, одно из этих ядер (бомбардирующая частица) должно проникнуть в другое (ядро-мишень). Только лишь после этого между ядерными частицами (протонами и нейтронами) начинают действовать мощные ядерные силы притяжения, благодаря которым и происходит ядерная реакция.

Однако пока заряженная ядерная частица находится на больших расстояниях от ядра-мишени, между ними

действуют лишь электростатические силы отталкивания одноименных зарядов, описываемые известным законом Кулона

$$F = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2}.$$

Рассмотрим потенциальную энергию отталкивания, т. е. ту работу, которую надо совершить для того, чтобы сблизить ядра до расстояния r между центрами. Эта энергия согласно законам электродинамики выражается формулой

$$U = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}.$$

На рис. 6 изображена зависимость потенциальной энергии системы, состоящей из двух ядер, от расстояния между их центрами. Энергия отталкивания возрастает по мере сближения ядер и достигает при их соприкосновении максимального значения:

$$U_{\max} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2}.$$

Поскольку радиусы ядер R_1 и R_2 связаны приближенно соотношением с массовым числом ядер A ($R = 1,4 \cdot 10^{-13} \sqrt[3]{A}$), то

$$U_{\max} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{1,4 \cdot 10^{-13} (\sqrt[3]{A_1} + \sqrt[3]{A_2})}.$$

Если учесть значение $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ CGSE и перейти к единицам энергии $Mэв$, то получим

$$U_{\max} \approx \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt[3]{A_1} + \sqrt[3]{A_2}} Mэв.$$

Если кинетическая энергия E бомбардирующей частицы больше U_{\max} , то такая частица свободно проникает в ядро-мишень. Положение существенно меняется, если энергия частицы меньше U_{\max} .

Таким образом, кривая энергии электростатического

отталкивания показывает, что вокруг ядра-мишени образуется своеобразный потенциальный барьер, препятствующий проникновению частиц в ядро.

Пусть, например, энергия бомбардирующей частицы равняется E_1 . Такая частица «ударяется» о потенциальный барьер при $r=r_1$ и по законам классической механики должна отразиться назад. Так и происходит в подавляющем числе случаев. Однако квантовая механика указывает на возможность проникновения частицы-волны сквозь потенциальный барьер как бы путем перехода по «туннелю». Но вероятность проникновения в ядро такой так называемой «подбарьерной» частицы резко убывает с уменьшением ее энергии, т. е. с ростом длины «туннеля».

Если в качестве примера возьмем цинк ($Z_2 = 30$; $A_2 = 65$), то можем легко подсчитать, что для проникновения альфа-частицы ($Z_1 = 2$; $A_1 = 4$) в его ядро существует потенциальный барьер с максимальной высотой $10,5 \text{ Мэв}$. Эта энергия соответствует наибольшей энергии альфа-частиц, испускаемых при радиоактивном распаде. По-видимому, альфа-частицы с достаточной вероятностью могут производить ядерные реакции только на легких ядрах — ядрах элементов начала периодической системы.

Резкое падение потенциальной энергии (рис. 6) при $r = R_1 + R_2$, т. е. при соприкосновении ядер, объясняется действием ядерных сил. Мы знаем, что эти силы много больше электростатических сил и действуют в пределах ядра. Естественно, что при $r = R_1 + R_2$ ядерные силы не только компенсируют отталкивающие электростатиче-

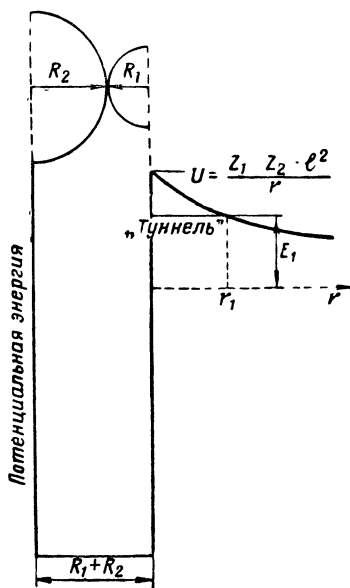


Рис. 6. Потенциальная энергия системы, состоящей из двух ядер. Вокруг ядер образуется потенциальный барьер, который надо преодолеть ядрам при сближении

ские силы, но и заставляют ядра сливаться под действием сил притяжения.

То, что потенциальная энергия при $r = R_1 + R_2$ становится отрицательной, указывает на действие сил притяжения, а не отталкивания. Здесь имеет место потенциальная «яма». Учитывая, что ядерные силы действуют только между соседними частицами, можно считать эту «яму» приблизительно прямоугольной, т. е. на всем протяжении ядра действуют одинаковые по величине силы притяжения.

ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Известно, что одни ядерные реакции протекают очень быстро, другие идут с исчезающе малой скоростью. Необходимо как-то характеризовать ядерные реакции. Легче всего это сделать, определив вероятность осуществления ядерной реакции.

Предположим, что бомбардирующая частица имеет энергию, большую, чем высота потенциального барьера. Тогда эта частица беспрепятственно проникнет внутрь ядра и произведет ядерную реакцию. Очевидно, что в этом случае вероятность ядерной реакции определится вероятностью встречи бомбардирующей частицы с ядром. Последняя величина прямо зависит от площади сечения атомного ядра.

Представим себе ядро в виде цели, обстреливаемой градом пуль — бомбардирующими частицами. При этом будем считать, что наше бомбардирующее орудие выпускает I пуль в секунду по площади размером 1 см^2 . Если бы ядро занимало всю обстреливаемую площадь (1 см^2), то, очевидно, в одну секунду все I бомбардирующих частиц попали бы в ядро. Но площадь сечения ядра всего лишь πR^2 , и на нее попадет пуля во столько раз меньше, во сколько площадь ядра меньше одного квадратного сантиметра, т. е. среднее число ядерных реакций, происходящих в одну секунду, будет

$$n = \frac{S}{1} \cdot I = S \cdot I.$$

Если на бомбардируемой площади находится N ядер, то и число ядерных реакций будет, естественно, больше, а именно:

$$n = S \cdot I \cdot N.$$

Таким образом, число ядерных реакций, происходящих в одну секунду, при прочих равных условиях прямо пропорционально площади сечения ядра. Например, если орудие выпускает всего одну бомбардирующую частицу в секунду на цель площадью в 1 см^2 и на этой цели находится одно ядро, то среднее число ядерных реакций, происходящих в одну секунду, или, что то же самое, вероятность превращения ядра, будет

$$n = S,$$

т. е. площадь сечения ядра равна вероятности совершения ядерной реакции в течение одной секунды для одного ядра, бомбардируемого потоком в одну частицу через 1 см^2 в секунду.

На самом же деле все гораздо сложнее. По целому ряду причин не все сечение ядра может быть использовано для подхода к бомбардирующей частице и необходимо ввести понятие так называемого эффективного сечения ядерных реакций. Эффективное сечение σ может быть много меньше геометрической площади ядра S и прежде всего вследствие действия отталкивающих электростатических сил. За единицу эффективного сечения σ ядра принимается один барн, равный 10^{-24} см^2 , что соответствует по порядку величине площади сечения ядра. Эффективное сечение ядерных реакций под действием заряженных частиц даже при энергиях, превышающих высоту кулоновского потенциального барьера, обычно в десятки и сотни раз меньше, чем один барн.

До сих пор мы говорили только о попадании в ядро бомбардирующей частицы и рассматривали так называемое полное эффективное сечение ядра независимо от того, какая ядерная реакция произойдет затем. Но после того, как ядро поглотит добавочную частицу с достаточно большой энергией, ядро оказывается сильно возбужденным и могут произойти различные ядерные реакции. Естественно, что сумма вероятностей всех возможных реакций не может быть ни больше, ни меньше вероятности проникновения бомбардирующей частицы в ядро. Поэтому если, например, $\sigma_{\text{д}}$ — вероятность проникновения частицы в ядро (полное эффективное сечение) — и ядро может распадаться тремя различными способами, то

$$\sigma_{\text{д}} = \sigma_1 + \sigma_{\text{II}} + \sigma_{\text{III}},$$

где σ_I , σ_{II} и σ_{III} — эффективные сечения трех различных типов ядерных реакций. Отсюда следует, что каждое из эффективных сечений реакций различного типа меньше полного сечения.

Было бы неправильно думать, что различные реакции, происходящие с возбуждением ядра, равновероятны, т. е. их сечения равны. Для данного ядра в определенных условиях может быть наиболее вероятна реакция одного или двух типов и сечения остальных реакций ничтожно малы.

Имеется особый класс ядерных реакций, для которых кулоновский потенциальный барьер ядра, т. е. электростатические силы отталкивания, не играет никакой роли. Это — ядерные реакции с нейтронами. Нейтрон не имеет электрического заряда и поэтому не взаимодействует с зарядом ядра. Благодаря этому даже самый медленный нейтрон может проникнуть в ядро и совершить ядерную реакцию. Вероятность взаимодействия между ядром и нейтроном в действительности гораздо больше для медленных нейтронов (с энергией порядка сотых долей электронвольта), чем для быстрых (с энергией несколько мегаэлектронвольт). Сечения нейтронных реакций для медленных нейтронов могут быть во много раз больше геометрической площади ядра и достигают сотен и даже тысяч барн.

МЕХАНИЗМ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Напомним, что ядро состоит из плотно связанных протонов и нейтронов. Мерой этой связи служит средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон. Эта энергия для большинства ядер приблизительно равна 8 Мэв . Если кинетическая энергия бомбардирующей частицы больше энергии связи нуклона в ядре, то такая частица имеет возможность вырвать одну или несколько ядерных частиц в ядре. Таким образом, частица с большой энергией, попадая в ядро, взаимодействует только с одним или малым количеством нуклонов.

Нас, однако, будет интересовать другой обширный класс ядерных реакций, когда бомбардирующая частица имеет энергию, значительно меньшую энергии связи нуклона в ядре. В этом случае попадающая в ядро частица уже не может вырвать нуклон из ядра. В результате

столкновения частицы и ядра получается новое ядро с бóльшим числом нуклонов. Это промежуточное ядро, как мы будем его называть, находится в возбужденном состоянии. Это значит, что его энергия больше энергии того же ядра в нормальном состоянии. Энергия возбуждения равна сумме кинетической энергии бомбардирующей частицы и ее энергии связи с промежуточным ядром. Для того чтобы перейти в нормальное состояние, такое ядро должно испустить какую-либо частицу. Этой частицей может быть фотон гамма-излучения, какой-либо нуклон либо группа нуклонов (альфа-частица).

Промежуточное ядро реально существует, и это доказывается достаточно длительным временем его «жизни». Однако здесь следует учесть ядерный масштаб времени, который связан с размером ядра и скоростью влетающих в ядро частиц. За ядерное время физики принимают время пролета быстрой частицы сквозь ядро. Если диаметр ядра равен примерно 10^{-12} см, а скорость частицы порядка 10^9 см/сек, то ядерное время

$$\frac{10^{-12}}{10^9} = 10^{-21} \text{ сек.}$$

Опыт показывает, что промежуточное ядро живет очень долго — около 10^{-14} сек. В обычном масштабе времени, где за единицу принята секунда, промежуточное ядро существовало бы 10^7 сек, т. е. около 4 месяцев.

В момент образования промежуточного ядра энергия его возбуждения сосредоточена на захваченной ядром-мишенью частице. Но в результате интенсивного воздействия в ядре эта добавочная энергия быстро распределяется между частицами. Этим распределением управляют законы случая, или, как говорят физики, законы статистики. Поэтому если в данный момент энергия возбуждения распределена между двумя или бóльшим количеством нуклонов, то в следующий момент она может распределиться между другими нуклонами или опять сконцентрироваться на одном из них. По прошествии некоторого времени отдельный нуклон или группа нуклонов (альфа-частица) в промежуточном ядре может приобрести энергию, достаточную для вылета. Это и будет распад промежуточного ядра.

Примерно то же происходит и при испарении нагретой жидкости. Если бы вся энергия жидкости была равно-

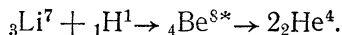
мерно распределена между всеми молекулами, никакого испарения не было бы. Энергии молекул оказалось бы недостаточно, чтобы преодолеть силы поверхностного натяжения. Но закон статистики действует и здесь. Случайно для той или иной молекулы и «закономерно» для всего объема жидкости часть молекул получает большую порцию энергии и вылетает за пределы жидкости, образуя над ее поверхностью пар.

Энергия может быть распределена между нуклонами ядра самым различным способом. Очень маловероятно, чтобы она сосредоточилась на отдельном нуклоне в количестве, достаточном для его вылета за пределы промежуточного ядра. Для этого нужно очень большое время, в миллион раз превосходящее время образования промежуточного ядра, — время пролета бомбардирующей частицы в ядре-мишени.

Из того факта, что промежуточное ядро «очень долго» находится в возбужденном состоянии, следует, что его распад не зависит от того, каким способом образовалось промежуточное ядро. Способ образования промежуточного ядра «забыт», и способ его распада определяется только свойствами этого ядра и его энергией возбуждения.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА ЛЕГКИХ ЯДРАХ

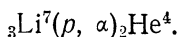
Прежде чем рассказать о различных ядерных реакциях, введем их общепринятые обозначения. Для примера возьмем реакцию, происходящую при бомбардировке лития протонами (ядрами водорода):



Ядра различных элементов записываются обычными химическими символами. Вверху символа, справа, пишется массовое число ядра, а внизу, слева, — атомный номер, или заряд ядра. В левой части записи обозначаются ядра, вступающие в реакцию (${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1$). Стрелка, направленная в правую часть, указывает, какое ядро получается в результате ядерной реакции. Это ядро может находиться в возбужденном состоянии, на что указывает значок *. Так, в результате соединения изотопа ${}_3\text{Li}^7$ с ядром водорода ${}_1\text{H}^1$ получается возбужденное ядро бериллия ${}_4\text{Be}^{8*}$; это ядро распадается на два ядра гелия

(${}^2_2\text{He}^4$) — альфа-частицы. Легкие частицы, получающиеся в результате реакции, — электрон, позитрон и нейтрино — имеют особые обозначения: ${}_{-1}\beta^0$, ${}_{+1}\beta^0$ и ν^0 . Так как массы этих частиц очень малы по сравнению с массами ядер, вверху символа, справа, ставится 0. Естественно, что сумма массовых чисел и зарядов ядер, находящихся в правой и левой частях записи ядерной реакции, должна оставаться постоянной вследствие законов сохранения массы и электрических зарядов.

Применяется также сокращенная запись. Рассмотренная реакция может быть записана так:



В этом случае перед скобкой ставится ядро-мишень. В скобках первой обозначена бомбардирующая частица, затем — вылетающая частица (их может быть несколько). За скобками пишется результирующее ядро. Бомбардирующие частицы — протон, дейтрон, тритон (ядра различных изотопов водорода) — и вылетающие частицы — альфа-частица, нейтрон и гамма-квант — обозначаются соответственно p , d , t , α , n и γ ; у этих частиц массовое число и заряд не пишутся.

Нас будут особо интересовать ядерные реакции синтеза легких ядер, в которых, как мы уже знаем, выделяется большая энергия.

На рис. 7 приведены значения средней энергии связи для ядер с массовым числом меньше 8. Здесь бросается в глаза особая прочность ядер гелия. По видимому, наиболее устойчивая ядерная комбинация состоит из двух протонов и двух нейтронов.

Пользуясь рис. 7, можно легко вычислить, какую энергию можно получить при различных реакциях на легких ядрах. Наибольшая энергия выделится, когда четыре ядра легкого изотопа водорода — прото-

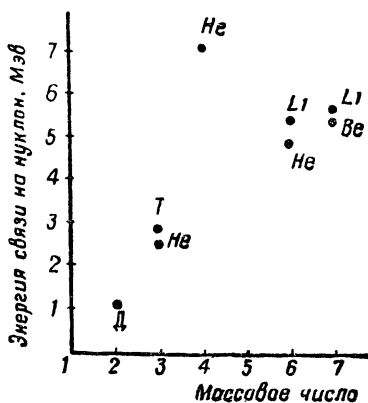
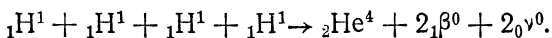


Рис. 7. Энергия связи легких ядер

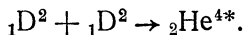
ны с энергией связи, равной нулю, — соединятся в ядро гелия, обладающее энергией связи, равной 28 Мэв (7 Мэв на один нуклон). При этом должна иметь место следующая ядерная реакция:



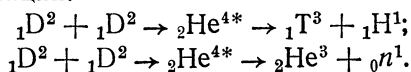
При образовании каждого ядра гелия выделится 28 Мэв энергии.

Однако совершенно невероятно, чтобы вдруг встретились сразу четыре протона и образовали одно ядро гелия. Такая реакция, как мы узнаем позже, состоит из целого ряда последовательных промежуточных реакций, в результате которых получается ядро гелия.

Следующим после протона ядром с наименьшей энергией связи является дейтон — ядро тяжелого водорода. Естественно ожидать, что наибольшая энергия выделится в реакции слияния двух дейтонов, при которой образуется ядро гелия:

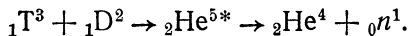


При этом, как следует из рис. 7, энергия возбуждения ядра гелия будет около 24 Мэв. Конечно, ядро с такой энергией возбуждения не может долго существовать, оно выбрасывает протон или нейтрон, в результате образуется ядро либо трития (сверхтяжелого изотопа водорода), либо изотопа гелия с массовым числом 3. Таким образом, при слиянии двух дейтонов могут протекать две реакции:



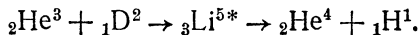
В первой реакции выделяется около 4 Мэв энергии, во второй — 3,25 Мэв.

Очень большая энергия выделяется в ядерной реакции ядра трития с дейтоном:



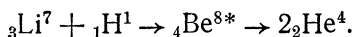
Из рис. 7 видно, что энергия этой реакции больше 17 Мэв. Большую часть энергии, примерно 14 Мэв, забирает нейтрон.

Почти такая же энергия получается в реакции ядра легкого изотопа гелия с дейтоном:



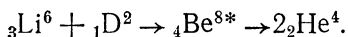
И здесь большую часть энергии уносит наиболее легкая частица — протон.

Среди других возможных реакций на легких ядрах следует обратить внимание на реакции с изотопом лития. Например, в уже знакомой нам реакции ядра тяжелого изотопа лития (${}^7_3\text{Li}$) с протоном образуется неустойчивое ядро бериллия (${}^8_4\text{Be}^{*}$). Это ядро распадается на два ядра гелия с большим выделением энергии:



Обычно всю энергию реакции — больше 17 Мэв — уносят две альфа-частицы.

Ядро бериллия с массовым числом 8 получается также в реакции легкого изотопа лития ${}^6_3\text{Li}$ с дейтоном:



Здесь каждая альфа-частица получает энергию, примерно равную 11 Мэв.

Кроме этих реакций на легких ядрах, может быть и много других. Однако большинство из них либо вообще идет с очень малой вероятностью, либо имеет заметную вероятность (эффективное сечение) при очень больших энергиях бомбардирующих частиц. Поэтому использование их для получения энергии весьма затруднительно.

Таким образом, в качестве горючего при ядерном синтезе могут быть в основном использованы все изотопы водорода (${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{D}$, ${}^3_1\text{T}$), легкий изотоп гелия (${}^3_2\text{He}$) и оба естественных изотопа лития (${}^6_3\text{Li}$, ${}^7_3\text{Li}$). Однако этих сведений о ядерных реакциях совершенно недостаточно, чтобы выбрать ту или иную из них для получения атомной энергии. Большое количество выделяющейся энергии в реакции не может быть основным признаком для этого выбора. Необходимо знать, какова вероятность ядерной реакции и при каких энергиях бомбардирующих частиц она идет.

Мы уже знаем, что для того, чтобы осуществилась ядерная реакция, взаимодействующие частицы должны преодолеть потенциальный барьер, обусловленный электростатическими силами отталкивания, действующими между одноименно заряженными частицами. Чем больше заряд ядра, тем труднее осуществить ядерную реакцию, тем большей скоростью должны обладать вступающие в реакцию частицы. Легче всего осуществить реак-

ции между самыми легкими ядрами — ядрами изотопов водорода. Но ядра представляют собой квантовые частицы и для слияния необязательно должны обладать энергией, большей, чем высота потенциального барьера; они могут проникнуть сквозь барьер, и, как мы увидим позже, именно эти подбарьерные реакции особенно интересуют физиков.

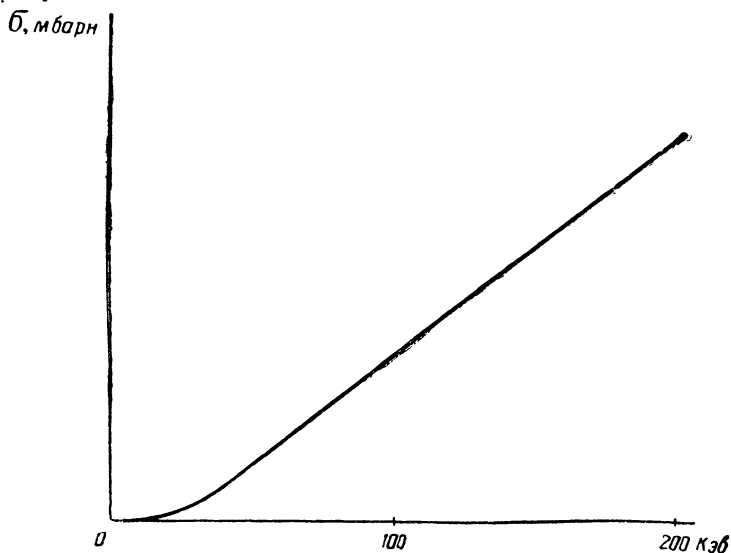


Рис. 8. Зависимость эффективного сечения реакции ${}^1_0\text{D}^2 (d, n) {}^2_0\text{He}^3$ от энергии дейтронов

Большую роль играет резонансный характер ряда ядерных реакций. При некоторых значениях энергии сталкивающихся ядер вероятность ядерной реакции, ее эффективное сечение увеличиваются во много раз. Происходит явление, аналогичное резонансу в радиотехнических, звуковых и механических устройствах. Во многих случаях даже при близкой к резонансной энергии сталкивающихся частиц эффективное сечение получает заметное значение и такая реакция уже может быть использована.

Теоретически еще не всегда можно предсказать эффективное сечение ядерной реакции и его зависимость от энергии сталкивающихся ядер. Но многочисленные экспериментальные исследования дают достаточно пол-

ные сведения для того, чтобы судить, пригодна или нет ядерная реакция для получения энергии. Эти исследования проводятся на ускорителях, где мишени, состоящие из легких элементов, бомбардируются частицами с различной энергией.

Так, например, эффективные сечения реакций ${}_1D^2(d, n){}_2He^3$ и ${}_1D^2(d, p){}_1T^3$ примерно равны и очень сильно возрастают с увеличением энергии бомбардирующих дейтронов. При небольших энергиях эффективное сечение этих реакций приблизительно пропорционально квадрату энергии дейтронов (рис. 8); для дейтронов с энергией 15 кэв эффективное сечение равно $1,3 \cdot 10^{-4}$ барн, а для дейтронов с энергией 300 кэв — $5 \cdot 10^{-2}$ барн.

Реакция ${}_1T^3(d, n){}_2He^4$ имеет резонансный характер. Ее эффективное сечение в максимуме при энергии дейтрона 105 кэв равно примерно 5 барн; оно достаточно велико — приблизительно 0,1 барн — при энергии дейтронов порядка 10 кэв (кривая на рис. 9).

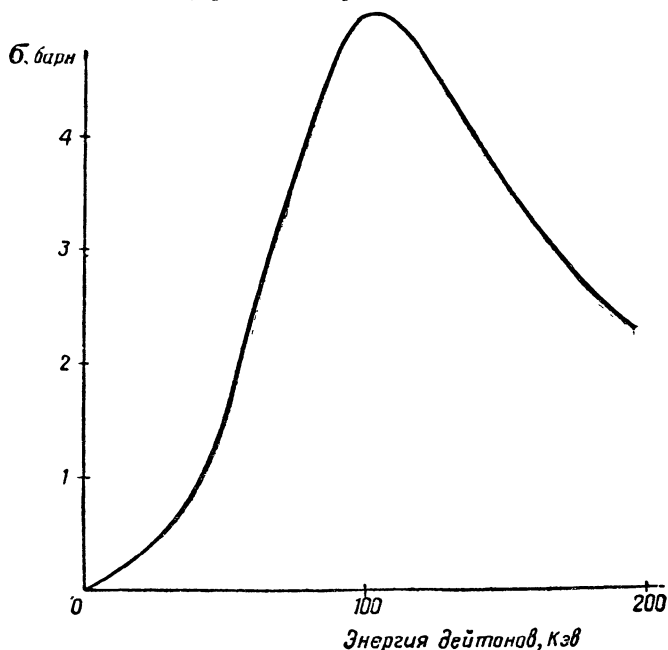


Рис. 9. Зависимость эффективного сечения реакции ${}_1T^3(d, n){}_2He^4$ от энергии дейтронов

Примерно такой же характер имеет зависимость эффективного сечения от энергии реакции ${}^2\text{He}^3(d, p){}^2\text{He}^4$. Здесь резонансный максимум достигается при большей энергии дейтронов и эффективное сечение меньше.

Эффективные сечения ядерных реакций ${}^3\text{Li}^6(d, \alpha){}^2\text{He}^4$ и ${}^3\text{Li}^7(p, \alpha){}^2\text{He}^4$ имеют значения около 10^{-4} *барн* для энергии дейтронов и протонов порядка нескольких килоэлектронвольт.

Таким образом, легче всего идет ядерная реакция ${}^1\text{T}^3(d, n){}^2\text{He}^4$, дающая большую энергию. Остальные рассмотренные реакции имеют меньшую вероятность, и, для того чтобы скорость их была заметной, нужна большая энергия бомбардирующих частиц.

III. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ

Для осуществления ядерных превращений физики очень долго пользовались альфа-частицами, выбрасываемыми ядрами радиоактивных элементов при естественном их распаде. Однако для осуществления многих ядерных реакций необходимы также протоны и дейтроны с большими энергиями, которые при радиоактивных превращениях не получают.

Заряженные частицы можно ускорять в электрическом поле. Их энергия пропорциональна разности потенциалов электродов, между которыми они пролетают. Для протона эта энергия, выраженная в электронвольтах, численно равна разности потенциалов в вольтах. Для того чтобы, например, получить протон с энергией 1 Мэв, надо заставить его «падать» в электрическом поле с разностью потенциалов в один миллион вольт.

Казалось бы, можно на ускорителях, проводя различные ядерные реакции, получать атомную энергию для практического использования. Но тогда необходимо было бы, чтобы получаемая атомная энергия была больше энергии, затраченной на ускорение заряженных частиц, т. е. создать атомный двигатель. К сожалению, этого сделать нельзя. Даже если предположить, что нет никаких потерь при ускорении заряженных частиц и преобразования атомной энергии в другие виды энергии не происходит, такой аппарат не даст никакого выигрыша в энергии.

Для примера возьмем наиболее выгодную реакцию ${}^3_1\text{T}^3(d, n){}^4_2\text{He}^4$. Опыт подтверждает, что в этом случае лучше всего мишень из трития бомбардировать дейтронами с энергией в 300 кэв (0,3 Мэв). Каждая ядерная

реакция такого типа даст 17 Мэв атомной энергии. Если ускоритель дает ионный ток в один ампер, то это соответствует $1,6 \cdot 10^{19}$ дейтонов в секунду. В один час на их ускорение затрачивается $0,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{19} \cdot 3600 = 1,72 \cdot 10^{22} \text{ Мэв}$, или 760 квт-ч . Однако энергии получим гораздо меньше. В лучшем случае при бомбардировке тритиевой мишени потоком дейтонов силой в один ампер число ядерных реакций, происходящих в одну секунду, не превышает 10^{14} . В этих реакциях за один час выделится энергии $\cdot 10^{14} \cdot 17 \cdot 3600 = 6,2 \cdot 10^{18} \text{ Мэв}$, или около $0,25 \text{ квт-ч}$, что составляет всего лишь $0,033\%$ энергии, затраченной на ускорение заряженных частиц. Если бы каждый дейтон совершил ядерную реакцию, то на ускорителе можно было бы получить огромную энергию. В этом случае в каждую секунду происходило бы $1,6 \cdot 10^{19}$ ядерных реакций и за один час выделилось бы энергии $1,6 \cdot 10^{19} \cdot 17 \cdot 3600 \text{ Мэв}$, или $43\,000 \text{ квт-ч}$, что в 57 раз больше затраченной энергии. В этом случае установка могла бы давать ядерную энергию для практических целей.

Куда же расходуется энергия заряженных частиц и почему не все заряженные частицы производят ядерные реакции?

Чтобы ответить на эти вопросы, вспомним, что ядра занимают всего лишь одну тысячемиллиардную часть объема вещества. Конечно, заряженная частица, прежде чем достигнуть ядра, много раз столкнется с атомом и это может привести к различным последствиям. Атом может получить часть энергии от заряженной частицы, и скорость его увеличится. Сталкиваясь с соседними атомами, этот атом быстро передаст им полученную от заряженной частицы энергию, которая непосредственно переходит в тепло, и вещество мишени нагревается.

Но так как заряженная частица обладает большой энергией, то чаще могут произойти столкновения другого рода. Например, заряженная частица передает часть своей энергии электронам атома. Если этой энергии будет достаточно, чтобы электрон вылетел за пределы атома, то произойдет ионизация атома. Оказывается, что в среднем на каждую ионизацию атома расходуется около 35 эв энергии заряженной частицы. Так, например, альфа-частица с энергией около 7 Мэв на своем коротком пути в воздухе (7 см) образует 200 тыс. ионов.

В другом случае электрон, получивший энергию от частицы, просто перейдет с нижней орбиты атома на верхнюю — произойдет возбуждение атома. Через короткий промежуток времени электрон вернется на основную орбиту, атом излучит квант света. Поскольку эффективное сечение ионизации и возбуждения атома в миллионы раз больше, чем любое ядерное взаимодействие, естественно, что в подавляющем числе случаев заряженная частица потеряет свою энергию в электронных оболочках атомов, не будучи в состоянии дойти до ядра.

Таким образом, в обычных условиях заряженные ядерные частицы, обладающие энергией, достаточной для преодоления кулоновского потенциального барьера и осуществления ядерной реакции, очень быстро теряют свою энергию на ионизацию и электронное возбуждение атомов среды и, наконец, останавливаются, захватывая электроны и превращаясь в нейтральные атомы. В результате вероятность ядерного взаимодействия для заряженных частиц даже большой энергии оказывается невелика.

Ионизационные потери энергии делают заряженные частицы видимыми в камере Вильсона или в толсто-слойных фотоэмульсиях; именно ионизация и электронное возбуждение приводят к газовому разряду в счетчиках Гейгера-Мюллера и к появлению вспышки света в сцинтилляционных счетчиках. Но все эти процессы, необходимые для регистрации заряженных частиц, являются совершенно пустой тратой энергии, приводящей к резкому уменьшению вероятности их ядерного взаимодействия.

Какой же путь проходят заряженные частицы в веществе мишени?

Для этого, очевидно, надо знать расположение атомов, с которыми вступают во взаимодействие частицы. Очевидно, чем больше плотность вещества, тем тесней расположены атомы. Для простоты предположим, что имеем дело с веществом, плотность которого равна 1 г/см^3 . Тогда, как показывают расчеты и эксперимент, зависимость средней длины пути, например, протонов от их энергии, т. е. так называемый ионизационный пробег частиц, может быть выражена кривой I , показанной на рис. 10. До встречи с ядром и осуществления ядерной реакции протоны должны также пробежать некоторый

путь (ядерный пробег), длина которого определяется плотностью расположения ядер и вероятностью ядерного взаимодействия — эффективным сечением реакции. Длина этого пробега зависит от энергии частиц и может

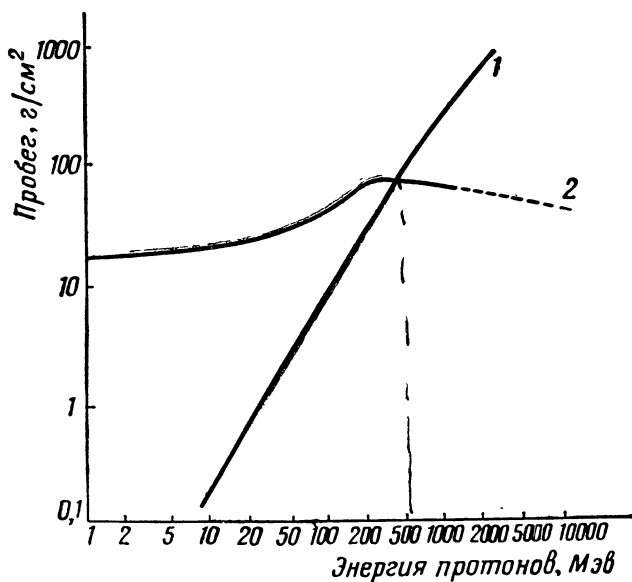


Рис. 10

Кривая 1 — зависимость ионизационного пробега от энергии быстрых заряженных частиц в веществе. Кривая 2 — зависимость ядерного пробега от энергии тех же частиц. Оба пробега одинаковы лишь при энергии в несколько сотен мегаэлектронвольт. При меньших энергиях заряженная частица, раньше чем вступит в ядерную реакцию, потеряет всю свою энергию на ионизацию атомов

быть приближенно выражена кривой 2, показанной на том же рис. 10. При энергии протонов в несколько сотен мегаэлектронвольт оба пробега одинаковы; при меньших энергиях протонов ионизационный пробег значительно меньше ядерного, он жестко ограничивает путь, проходимый заряженными частицами в веществе, и время жизни этих частиц в виде движущихся ионов. Например, при энергии 20 МэВ средний ионизационный пробег протонов в веществе с плотностью 1 г/см³ всего 0,8 см, а ядерный пробег — около 20 см. Это значит, что подавляющее большинство протонов с энергией 20 МэВ,

прежде чем вступить в ядерную реакцию, теряют всю энергию на ионизацию и останавливаются. Процесс взаимодействия заряженных частиц с веществом происходит чрезвычайно быстро. Так, например, протоны с энергией в 10 Мэв в фотоэмульсии превращаются в оставившиеся атомы водорода через $2 \cdot 10^{-11}$ сек, а протоны с энергией 0,2 Мэв тормозятся за $3 \cdot 10^{-13}$ сек.

Потеря энергии заряженных частиц на ионизацию и обуславливает невозможность практического получения атомной энергии на ускорителях.

САМОПОДДЕРЖИВАЮЩАЯСЯ РЕАКЦИЯ СИНТЕЗА

Необходимую для сближения ядер скорость можно сообщить ядрам не только в ускорителях. Известно, что скорость частиц растет с температурой, и поэтому, нагревая какое-либо вещество, в принципе можно получить такие же быстрые частицы, как и в ускорителях. Встречаясь на своем пути одна с другой, эти частицы, преодолевая силы отталкивания или пройдя сквозь «туннель» в кулоновском потенциальном барьере, будут соединяться. Если к тому же выделяющаяся в таких реакциях энергия достаточна, чтобы поддержать температуру, которая соответствует необходимой скорости частиц в веществе, то будет осуществлен самоподдерживающийся ядерный процесс соединения — термоядерная реакция.

С аналогичным явлением в области химических реакций человек знаком давно. Более того, использование такого рода химических процессов, в частности процесса горения, играет исключительно важную роль в нашей жизни. Для того чтобы процесс горения начался, необходимы определенные условия. Так, если наполнить какой-либо объем водородом и кислородом, то сама по себе эта смесь не загорится и вода не образуется. Для осуществления реакции достаточно к смеси поднести горящую спичку; дальше реакция будет сама себя поддерживать за счет тепла, выделяющегося при горении водорода.

Казалось бы, можно таким же образом поступить и со смесью ядер каких-либо легких элементов: «поджечь» такую смесь, а дальше процесс будет самоподдерживающимся. Но для «зажигания» термоядерной реакции нуж-

на очень высокая температура (порядка многих десятков миллионов градусов). Только тогда скорость некоторой части легких ядер будет достаточна для преодоления электростатических сил отталкивания и осуществления ядерных реакций.

ГОРЯЧЕЕ ВЕЩЕСТВО

Чтобы понять разницу между «обычными» условиями и условиями, когда вещество нагрето до десятков миллионов градусов, надо вдуматься в смысл понятия «остановившиеся ядра».

Такие ядра на самом деле не покоятся, а находятся в непрерывном тепловом движении, наиболее вероятная энергия которого при абсолютной температуре T равняется KT , где K — постоянная Больцмана, равная $8,61 \cdot 10^{-5}$ эв на градус. При комнатной температуре эта энергия составляет всего 0,025 эв. Находящиеся в тепловом движении частицы обладают, естественно, не одинаковыми, а самыми разнообразными значениями энергии и соответственно скорости. Величина KT характеризует наиболее вероятную энергию теплового движения; средняя же его энергия равна $3/2 KT$. Многие частицы имеют энергию, значительно превышающую среднее значение.

Распределение частиц по скоростям их теплового движения было теоретически рассмотрено еще в прошлом веке английским ученым Д. Максвеллом. Такое распределение показано на рис. 11, где отмечены наиболее вероятная и средняя скорости теплового движения. Распределение в области скоростей, значительно превышающих среднюю скорость, обычно называют «хвостом» максвелловского распределения.

При температуре в десятки миллионов градусов средняя энергия теплового движения частиц исчисляется уже килоэлектронвольтами, а «хвост» максвелловского распределения достигает десятков килоэлектронвольт. В таких случаях атомы даже тяжелых элементов оказываются сильно ионизированными, а атомы легких элементов — полностью ионизированными.

Все частицы такого газа — как атомные ядра, так и вырванные из атомов свободные электроны — находятся в тепловом движении и обладают, следовательно, энер-

гиями порядка нескольких килоэлектронвольт и даже десятков килоэлектронвольт. Эти энергии все еще ниже высоты кулоновского потенциального барьера, равного 400—500 кэв даже для взаимодействия ядер разных изотопов водорода. Однако вероятность проникновения одного ядра в другое сквозь кулоновский барьер при столкновении ядер быстро увеличивается с ростом энергии. Так, например, для двух ядер дейтерия эта вероятность при $E = KT = 1,7 \text{ кэв}$ ($T = 20$ млн. градусов) оказывается в 10^{47} раз больше, чем при $E = KT = 17 \text{ эв}$ ($T = 200$ тыс. градусов).

Надо еще учесть, что чем выше температура, чем интенсивнее тепловое движение, тем чаще происходят столкновения ядер, в том числе и ядер, находящихся в «хвосте» максвелловского распределения, для которых вероятность проникновения сквозь кулоновский барьер относительно велика.

Благодаря всему этому температуры в десятки и сотни миллионов градусов оказываются достаточными, чтобы обеспечить протекание целого ряда термоядерных реакций. При этом термоядерные реакции в зависимости от их индивидуальных особенностей (например, от высоты кулоновского барьера, величины сечения и т. п.) проходят с различными скоростями.

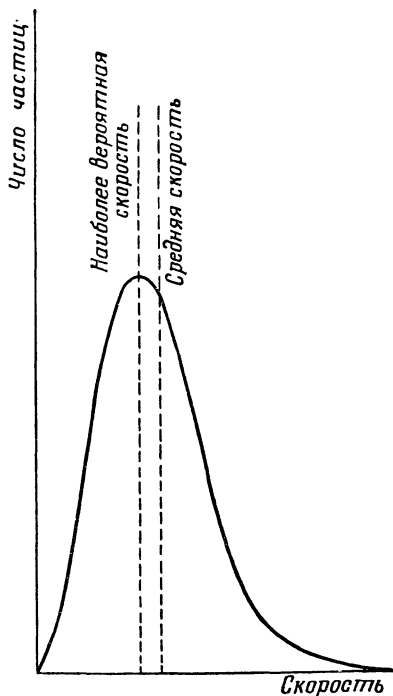


Рис. 11. Распределение частиц по скоростям их теплового движения. Из кривой видно, что большое число частиц имеет скорость, значительно превышающую среднюю скорость теплового движения

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ ВЗРЫВ

Для эффективного протекания реакций соединения даже самых легких ядер требуются температуры порядка десятков миллионов градусов. Поэтому долгое время не могло быть и речи об осуществлении на Земле искусственных термоядерных реакций. Лишь с появлением атомной бомбы, в центре которой при взрыве развивается нужная температура, возникла возможность инициирования искусственных термоядерных реакций, т. е. «поджога» термоядерной «горючей смеси» атомным запалом.

Вследствие того что взрыв атомной бомбы продолжается всего около одной микросекунды, в качестве искусственных термоядерных реакций должны быть выбраны такие, зажигание которых требует не более микросекунды. Высокий кулоновский барьер затрудняет протекание термоядерных реакций, и поэтому при осуществлении быстрых термоядерных реакций при десятках миллионов градусов речь может идти лишь об использовании различных изотопов самых легких элементов — водорода, гелия и лития.

Поскольку различные изотопы водорода являются обязательными составными частями термоядерной «горючей смеси», бомба, в которой осуществляется иницирование атомным запалом искусственных термоядерных реакций, получила название «водородной». Не следует, конечно, понимать это так, что все термоядерное взрывчатое вещество бомбы обязательно состоит из изотопов водорода и тем более только из собственно водорода, т. е. легкого изотопа ${}^1\text{H}^1$.

Используемые в водородной бомбе материалы должны быть относительно дешевыми и доступными. Среди изотопов легких элементов этому требованию лучше всего удовлетворяют легкий изотоп водорода ${}^1\text{H}^1$ и изотоп лития ${}^7\text{Li}^7$. Тяжелый водород — дейтерий ${}^2\text{D}^2$ — менее доступен, так как в естественной смеси изотопов водорода он содержится в малых количествах (0,018%), а выделение его в чистом виде связано с трудоемким разделением изотопов водорода. Еще более трудно доступны изотоп лития ${}^6\text{Li}^6$ и сверхтяжелый водород — тритий ${}^3\text{T}^3$. Тем не менее все они могут являться составными частями термоядерной «горючей смеси».

Так как продолжительность атомного взрыва, а следовательно, и термоядерной реакции исчисляется миллионными долями секунды, то к «горючей смеси» водородной бомбы предъявляются и такие требования: она должна быть по возможности более компактной, с высокой теплопроводностью и малой теплоемкостью. Эти условия обеспечивают быстрое и полное нагревание смеси до сверхвысоких температур. Однако требования высокой теплопроводности и малой теплоемкости смеси, естественно, сильно ограничивают применение в водородной бомбе химических соединений с тяжелыми элементами. Тяжелые элементы не только играли бы роль нейтрального балласта, поскольку они сами не вступают в термоядерные реакции, но и существенно снижали бы достигаемые температуры, так как значительная часть энергии должна была бы расходоваться не на разогрев смеси, а на ионизацию тяжелых атомов; для нагревания смеси до определенной температуры понадобилось бы большее количество энергии, теплоемкость смеси возросла бы.

В связи с необходимостью иметь смесь высокой плотности и теплопроводности нецелесообразно использовать в водородной бомбе газообразные изотопы водорода при обычном давлении. Значительный выигрыш в плотности достигается сжатием газа до высоких давлений или его сжижением. Плотность жидкого водорода равняется $0,007 \text{ г/см}^3$, т. е. почти в 800 раз выше плотности газа при атмосферном давлении и комнатной температуре. Однако использование сильно сжатого или жидкого водорода в водородной бомбе сопряжено с рядом конструктивных трудностей, например с необходимостью еще до взрыва разрушить стенки системы, содержащей жидкий или сжатый газ, поскольку в эти стенки обязательно входят тяжелые ядра. Поэтому, коль скоро водород не является единственной составной частью термоядерной «горючей смеси», наиболее удобно использовать химические соединения водорода с другими элементами, не включающими балластные ядра. Вполне подходящим соединением такого рода является гидрид лития LiH — твердое соединение с плотностью $0,82 \text{ г/см}^3$.

Поскольку в водородной бомбе могут использоваться два изотопа лития и три изотопа водорода, то суще-

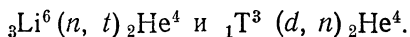
ствуется шесть различных вариантов использования гидрида лития: Li^6H , Li^7H , Li^6D , Li^7D , Li^6T и Li^7T .

В литературе обсуждалась также возможность введения в водородную бомбу дейтерия и трития в виде их соединения с изотопами урана и плутония, используемыми в атомном запале термоядерной реакции: UD_3 и UT_3 или PuD_3 и PuT_3 .

Так как атомный запал (атомная бомба) дает высокие температуры в очень малое время, то, как уже говорилось, надо найти такие термоядерные реакции, которые могут протекать при температурах в десятки миллионов градусов за очень короткие промежутки времени — порядка миллионных долей секунды. Оказывается, что даже в случае, если плотность вещества при термоядерном взрыве будет очень большой, имеется только одна реакция, которая может быть непосредственно вызвана атомным взрывом, — это реакция между дейтерием и тритием ${}_1\text{T}^3(d, n){}_2\text{He}^4$. Поэтому эта реакция является обязательным этапом в развитии взрыва водородной бомбы.

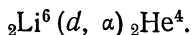
Однако если учесть высокую стоимость трития, сложность его получения и хранения, то трудно предположить, чтобы водородная бомба основывалась только на дейтериево-тритиевой смеси. По-видимому, реакция дейтерия с тритием является лишь промежуточным звеном в развитии термоядерного взрыва. Эта реакция воспринимает инициирующее действие атомного взрыва и приводит к дальнейшему повышению температуры; в результате оказываются возможными и другие реакции, например реакция ${}_1\text{D}^2(d, p){}_1\text{T}^3$, поддерживающая наличие трития в смеси, или же реакции с различными изотопами лития.

Взрыв атомной бомбы («запала» водородной бомбы), являющийся цепным процессом деления ядер урана, сопровождается образованием нейтронов. Так как и в реакции дейтерия с тритием образуются нейтроны, то не исключено, что в термоядерной реакции с Li^6D существенную роль играет цикл из следующих двух реакций:



В первой реакции образуется тритий, эффективно взаимодействующий затем с дейтерием (с восстановлением нейтрона). Таким образом, этот цикл включает

высокоэффективное термоядерное взаимодействие дейтерия с тритием и в то же время не требует введения трития извне. Поэтому возможно, что все содержимое водородной бомбы может ограничиваться атомным запалом и дейтеридом лития Li^6D . Наличие нейтронов обеспечивает образование трития и его взаимодействие с дейтерием. При этом температура резко возрастает (по имеющимся в литературе данным, до 300 млн. градусов) и оказывается возможным непосредственное взаимодействие:



По сообщениям зарубежной печати, только в термоядерном взрыве, произведенном американцами в атолле Эниветок на Тихом океане в ноябре 1952 г., использовалась реакция между дейтерием и тритием. При этом была взорвана, собственно говоря, не бомба, а специально собранная установка, весившая 65 т. Дейтерий и тритий применялись в этой установке либо в виде сжиженных газов, либо в виде воды. Что же касается более поздних термоядерных взрывов, произведенных американцами, то, по имеющимся в литературе данным, это уже были взрывы бомб, не содержащих введенного извне трития, а наполненных дейтеридом лития.

IV. ВЕЩЕСТВО В ЧЕТВЕРТОМ СОСТОЯНИИ

КАК ВЕЩЕСТВО ПЕРЕХОДИТ ИЗ ОДНОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ

Окружающие нас вещества, как известно, могут находиться в различных состояниях. Вода, например, в зависимости от температуры окружающей среды может быть в твердом (лед), жидком и газообразном (пар) состоянии. То же самое примерно происходит и с другими веществами.

Какое-либо вещество, находясь в твердом или жидком состоянии, имеет приблизительно одну и ту же плотность. Это значит, что в одном и том же объеме жидкого и твердого вещества содержится близкое по количеству число молекул и атомов; атомы в обоих состояниях вещества «упакованы» одинаково плотно. Никакие, даже значительные изменения температуры окружающей среды не могут существенно изменить объем или плотность твердого или жидкого вещества.

Другое дело газообразное состояние. Любое твердое или жидкое вещество при переходе в газообразное состояние очень резко изменяет свою плотность; плотность вещества уменьшается в тысячи раз. Если, например, 1 л воды весит 1 кг, то 1 л водяных паров весит немного больше 1 г. Окружающие условия могут очень сильно изменять объем и плотность газа. Увеличивая давление, можно во много раз уменьшить объем данного количества газа, и, наоборот, при уменьшении давления может беспределенно увеличиваться объем газа и уменьшаться его плотность.

Чем же объяснить такое различие между твердым (жидким) и газообразным состояниями одного и того же вещества?

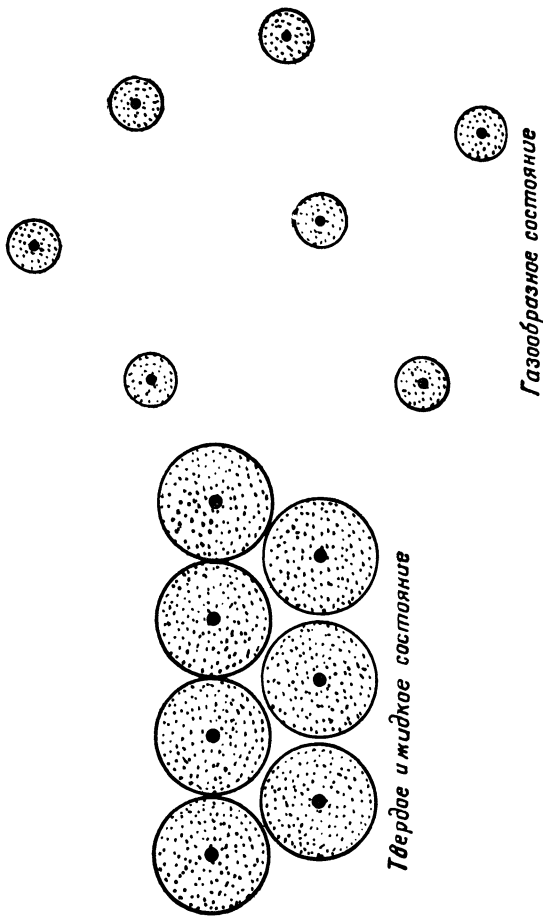


Рис. 12. Примерное расположение атомов в твердом, жидком и газообразном состояниях веществ

На рис. 12 показаны упрощенные схемы расположения атомов веществ, находящихся в плотном (твердом и жидком) и газообразном состояниях. Как видно, атомы в твердом и жидком веществах располагаются вплотную друг к другу. Среднее расстояние между молекулами приблизительно равно их диаметру, поэтому очень трудно сжимать твердые и жидкие вещества; сжатие противодействуют мощные электрические силы отталкивания. Разрушить твердое вещество также трудно, так как атомы связаны мощными электростатическими силами, но уже притяжения. Что касается верхних электронов атомов, то они становятся общими для нескольких атомов и одновременно взаимодействуют с несколькими ядрами. Действием электростатических сил и объясняются малая сжимаемость и большое сцепление атомов твердых и жидких тел. В газах же, напротив, среднее расстояние между молекулами обычно во много раз больше их размеров, поэтому газы можно сравнительно легко сжимать внешним давлением. Между атомами и молекулами газов не действуют электростатические силы.

Почему же газы стремятся занять как можно больший объем? Если поместить газ в сосуд, то стенки этого сосуда будут испытывать давление газа, которое является результатом бомбардировки непрерывно движущихся молекул. Очевидно, «расталкивающие силы» в газах определяются движением молекул, которые, сталкиваясь друг с другом, разлетаются в разные стороны и благодаря этим столкновениям стремятся занять как можно большее пространство. Если газ не окружен какими-либо препятствующими разлету молекул стенками, то он расширяется беспредельно. Скорость этого расширения зависит от скорости движения молекул, т. е. от температуры газа.

Переход вещества из одного состояния в другое в конечном счете определяется температурой вещества. При температуре, близкой к абсолютному нулю (-273°C), скорость движения и колебания молекул очень малы и практически все вещества находятся в твердом кристаллическом состоянии. Молекулы в таком веществе располагаются в правильном порядке, образуя решетки различной геометрической структуры. Такие тела обладают значительной прочностью и стремятся сохранять ранее

приданную им форму. По мере повышения температуры вещества молекулы в кристаллической решетке ускоряют свои колебания вокруг положения равновесия и в конце концов покидают свои места. Кристаллические связи разрываются, вещество делается менее прочным; молекулы уже могут передвигаться на большие расстояния, скорость их теплового движения растет. Так происходит переход веществ из твердого состояния в жидкое. Этот переход для различных веществ наблюдается при различных температурах: для водорода, например, он имеет место при температуре, близкой к абсолютному нулю, а для ряда металлов — при очень высоких температурах.

В жидкости молекулы «упакованы» также очень плотно, но они обладают большей свободой движения, и поэтому жидкость не сохраняет своей формы, обладает текучестью и стремится занять форму сосуда, в котором она размещается. При любой температуре жидкого вещества всегда найдется некоторое количество молекул (атомов), обладающих большой скоростью. Если энергия этих частиц достаточна для преодоления сил поверхностного натяжения, то они будут вылетать за поверхность жидкости, т. е. будет происходить испарение.

При дальнейшем повышении температуры средняя скорость молекул внутри жидкости увеличивается. Все большее число молекул имеет возможность покинуть поверхность жидкости, скорость испарения увеличивается, и в конце концов вся жидкость переходит в газообразное состояние.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ

Электропроводность веществ определяется в основном наличием свободных электронов. Как видно из рис. 13, электроны внешних атомных оболочек в твердых и жидких веществах находятся на примерно равных расстояниях от ядер различных атомов. Поэтому действующие на них электростатические силы уравновешены, и эти так называемые свободные электроны могут практически беспрепятственно передвигаться между атомами в веществе. Чем больше свободных электронов, тем меньше электрическое сопротивление вещества. Электро-

проводность ряда жидкостей (растворов) объясняется также наличием свободных ионов — молекул, у которых есть избыток или недостаток электронов.

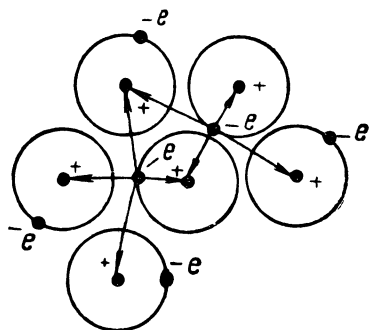


Рис. 13. В твердых и жидких телах силы, действующие на наружные электроны, примерно уравновешены. Поэтому в таких веществах электроны могут сравнительно свободно перемещаться. В газе таких свободных электронов нет

Но любое электропроводящее вещество, переходя в газообразное состояние, теряет свою электропроводность. В газе все электроны прочно связаны с атомами, свободных электронов нет, и поэтому газ является непроводящим веществом — идеальным диэлектриком. Обычно очень слабая электропроводность газов объясняется присутствием в газе разрушенных в результате различных процессов атомов — ионов и электронов. Разрушение атомов

газа объясняется тем, что в газ проникают радиоактивное излучение и кванты света, которые обычно называют «посторонним ионизатором». Эти частицы, производя ионизацию атомов, образуют в газе свободные носители зарядов.

Не следует думать, что число ионов при длительном облучении газа непрерывно возрастает. Одновременно с ионизацией идет и обратный процесс — рекомбинация ионов, т. е. образование нейтральных атомов из положительных ионов и отрицательных электронов. Чем больше ионов и электронов, тем больше вероятность их встречи в объеме газа и тем быстрее идет процесс рекомбинации. Поэтому очень быстро после начала облучения создается равновесие, при котором число вновь образующихся в единицу времени ионов будет в среднем равно числу рекомбинированных атомов, и в единице объема газа будет находиться некоторое постоянное количество ионов.

Обычно в атмосфере всегда имеются ионы. В зависимости от местных условий их насчитывается примерно

$10^2 - 10^4$ в 1 см^3 газа. Это очень немного, учитывая, что в этом же объеме находится примерно $3 \cdot 10^{19}$ нейтральных молекул. На больших высотах газ ионизирован значительно сильнее. Коротковолновое излучение Солнца, в основном не достигающее поверхности Земли из-за поглощения его атмосферой, образует на высоте 100 км большое количество ионов: в 1 см^3 газа насчитывается 10^8 ионов при наличии 10^{14} нейтральных молекул газа.

Представим себе, что мы находимся в физической лаборатории и проводим опыт, схема которого приведена на рис. 14. К электродам C и D , находящимся в газе,

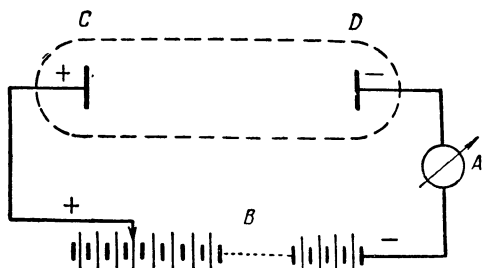


Рис. 14. Схема опыта по измерению электропроводности газов

приложена некоторая разность потенциалов V от регулируемого источника напряжения B . Ток, проходящий в газе через электроды, измеряется прибором A . Практически мы здесь измеряем сопротивление газового промежутка $C - D$.

Чтобы убедиться, что это так, построим на графике (рис. 15) зависимость величины тока I от напряжения на электродах V . Когда разность потенциалов на электродах равна нулю, тока нет, ионы могут с одинаковой вероятностью попасть на любой из электродов. Если на электроды будет приложено напряжение, ионы, имеющие положительный заряд, начнут двигаться к отрицательному электроду D (рис. 14), а отрицательные ионы и электроны устремятся к положительному электроду C , через прибор A потечет электрический ток. Повышая разность потенциалов на газовом промежутке, можно заметить, что ток растет приблизительно так, как показано на

рис. 15, а затем принимает постоянное значение, несмотря на увеличение напряжения на электродах.

Причина этого явления сразу не совсем понятна. Когда мы имеем дело с проводником, обладающим со-

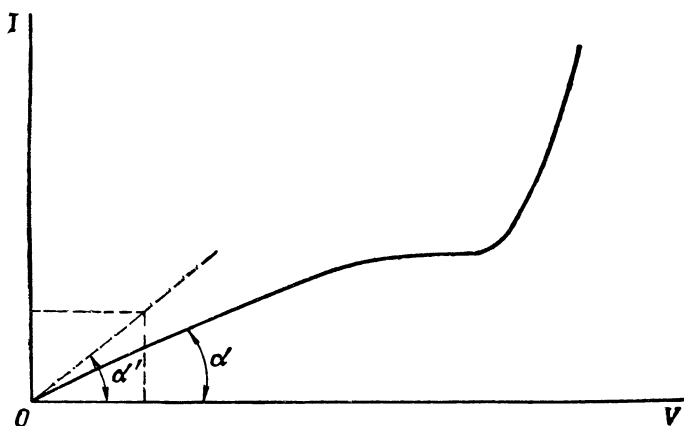


Рис. 15. Зависимость электрического тока через газ от напряжения на электродах. Вольтамперная характеристика газового разряда

противлением R' , то для того, чтобы заставить двигаться электроны, необходимо к концам проводника приложить некоторую разность потенциалов. Эта разность потенциалов определяется известным законом Ома

$$I = \frac{V}{R'}$$

Если бы мы строили график для проводника, то получили бы прямую (пунктирная линия на рис. 15), наклон которой характеризовал бы сопротивление проводника. Действительно,

$$\frac{V}{I} = R' = \operatorname{ctg} \alpha'$$

т. е. сопротивление равно котангенсу угла наклона прямой. Совсем по-другому дело обстоит с газами. В них весьма ограниченное число носителей заряда — ионов — определяется интенсивностью посторонних ионизаторов. Если в одном кубическом сантиметре газового промежутка в одну секунду за счет посторонних ионизаторов

образуется n_e ионов, то легко сообразить, что ток между электродами должен быть равен

$$I = n_e \Omega,$$

где Ω — объем газового промежутка. Однако сравнение этой величины с полученной нами экспериментальной кривой показывает, что ток достигает постоянного значения только при достаточно большой разности потенциалов. При меньших значениях разности потенциалов газовый промежуток подчиняется закону Ома и его сопротивление равно R .

Все это становится понятным, если учесть, что в газе идет не только ионизация за счет различных излучений, но и рекомбинация сталкивающихся ионов противоположных знаков. Ионы движутся не только под действием сил электрического поля, но и участвуют в общем тепловом хаотическом движении молекул газа, причем скорость хаотического движения может быть значительно больше скорости направленного движения. Поэтому при малой разности потенциалов вероятность встречи ионов очень велика и рекомбинация происходит очень часто. В этом случае ток в газовом промежутке определяется разностью между числом ионов, образующихся в одну секунду, и числом рекомбинировавших ионов за это же время, т. е.

$$I = (n_e - n_r) \Omega.$$

Этот ток очень мал. Но с увеличением напряжения скорость направленного движения ионов увеличивается, они меньше время находятся в газовом промежутке и вероятность встречи двух ионов уменьшается. Поэтому значение n_r — числа рекомбинировавших ионов в одну секунду в 1 см^3 — уменьшается и ток растет до тех пор, пока практически рекомбинация не будет иметь место. Тогда между электродами установится постоянное значение тока

$$I = n_e \Omega.$$

Что же произойдет, если мы все же будем увеличивать напряжение?

Для того чтобы удобнее было проводить наблюдения, несколько изменим условия опыта, в частности изолируем газовый объем от внешнего и поместим электроды

в стеклянную трубку с разреженным газом. В этом случае, двигаясь в электрическом поле, электрон (или ион) постепенно набирает скорость, увеличивает кинетическую энергию. Однако, сталкиваясь на своем пути с нейтральными молекулами, он все время растрчивает энергию — передает часть ее молекулам. Но все же электрон «упрямо» стремится вперед, в направлении электрического поля, и под его действием опять увеличивает свою скорость. Пока энергия электрона мала, могут происходить только упругие столкновения электрона с атомом. При этом электрон резко изменяет направление движения и очень небольшую часть энергии передает тяжелой частице. Но картина меняется, если электрон за время своего свободного пробега между двумя столкновениями успел набрать кинетическую энергию, достаточную, чтобы перевести какой-либо электрон в атоме с нормального уровня на возбужденный. В этом случае удар уже будет неупругим, электрон при ударе возбудит атом, который через очень короткий промежуток времени испустит квант света. Следовательно, при повышении напряжения на электродах чувствительные оптические приборы регистрируют излучение света.

Дальнейшее увеличение разности потенциалов на электродах должно привести к ионизации атомов при соударении с электронами. В этом случае электрон должен приобрести на длине свободного пробега энергию, достаточную для того, чтобы оторвать электрон от нейтрального атома. Электрический ток в трубке начнет возрастать, так как увеличивается число носителей заряда. Носители заряда образуются уже не только за счет посторонних ионизаторов, но и вследствие ионизации первичными электронами нейтральных атомов газа. В свою очередь выбитые из атомов вторичные электроны, двигаясь к аноду, приобретают достаточную энергию и образуют все новые и новые ионы. Вместо одного электрона на пути к аноду возникает лавина электронов, состоящая уже из 10, 100 и даже 1000 новых электронов. (Увеличение тока отмечено крутой кривой на рис. 15.)

Не следует, однако, думать, что в трубке возник самостоятельный электрический разряд. Если мы трубку изолируем от внешних влияний и внешние излучения не будут производить первичных ионов, то ток в трубке прекратится. Газовый разряд возникнет только тогда, когда

трубка сама начнет производить первичные ионы. Это произойдет очень скоро после небольшого дальнейшего повышения напряжения на электродах.

До сих пор мы говорили только о легких частицах — электронах. Но при ионизации атомов, кроме электрона, остается тяжелая частица, у которой не хватает электрона, — положительный ион. Медленно движущийся ион слабо ионизирует нейтральный атом. Но, ударяясь о катод, он выбивает из металла свободные электроны. Выбитые электроны устремляются к аноду и на своем пути образуют новые лавины электронов. Теперь уже ток в трубке не зависит от действия посторонних ионизаторов. Ток достигает большой величины и очень быстро растет с увеличением напряжения на электродах. Происходит электрический разряд в газе.

ПЛАЗМА

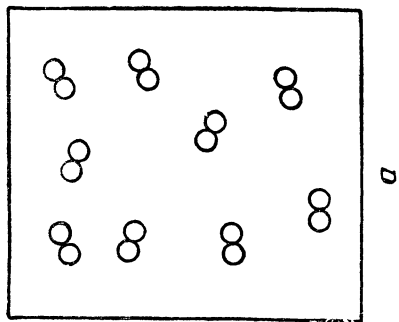
В рассмотренном примере газ в трубке значительно изменил свои свойства: он стал проводить электрический ток, т. е. в нем наряду с нейтральными атомами и молекулами появилось большое количество заряженных частиц. При проведении данного опыта можно наблюдать сильное свечение в трубке, которое никак не соответствует температуре газа: ведь трубка практически остается холодной. Это новое, необычное для нас состояние вещества физики назвали плазмой. Основные свойства плазмы определяются уже не нейтральными атомами, а заряженными частицами — электронами, ионами и фотонами (квантами света), непрерывно излучаемыми нейтральными атомами газа, заполняющего газоразрядную трубку. Атомы и молекулы делятся на электроны, ионы, фотоны и атомные ядра; образуется электронно-ядерный газ, скорость частиц которого намного превышает среднюю тепловую скорость атомов и молекул обычного газа.

Мы знаем, что температура обычного вещества определяется скоростью движения его частиц. Как же определить температуру вещества, находящегося в состоянии плазмы? Здесь, очевидно, надо ввести понятия температур отдельных составляющих плазмы.

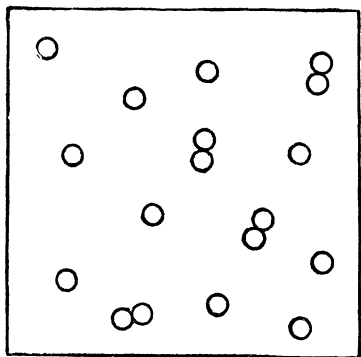
Наибольшей скоростью в рассмотренном нами случае газового разряда обладают электроны, их температура

будет значительно выше температуры всех остальных частей плазмы. Ионная температура намного ниже электронной, но все же выше температуры нейтрального газа. В качестве примера рассмотрим дугу, возникающую при работе ртутного выпрямителя. Здесь большая часть светящегося газа представляет собой плазму, электронная температура достигает $20\,000^\circ\text{K}$, а ионная 3000°K . В то же время температура ртутного пара в выпрямителе имеет температуру всего лишь $400\text{—}500^\circ\text{K}$. Плазма с различной температурой составляющих частей (неизотермическая) не может существовать без внешнего притока энергии, так как она никогда не находится в тепловом равновесии. Если не подводить энергию к электродам газового разряда, то плазма в конце концов перестанет существовать. Непрерывные столкновения электронов, ионов и нейтральных атомов приведут к перераспределению энергии и к нейтрализации ионов.

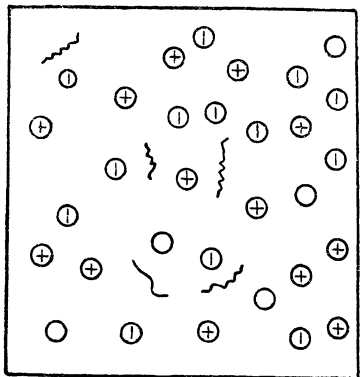
Однако может существовать плазма другого характера, где температура электронов, ионов и нейтральных атомов одинакова. Обычные газы при сравнительно низкой (несколько сот градусов) температуре состоят из сложных частиц, представляющих собой двухатомные молекулы (рис. 16, а) для чистых элементов или более сложные молекулы для различных химических элементов. Если заключенный в каком-то объеме газ нагревать до температуры в несколько тысяч градусов, то будет наблюдаться разрушение молекул и вместо чистого двухатомного газа в объеме будет уже смесь двухатомного и одноатомного газов (рис. 16, б). При большой скорости теплового движения молекул их столкновения приводят к разрушению молекулярной связи, молекулы разделяются на составные атомы. Однако атомы еще не разрушаются, так как связь электрона с ядром значительно прочнее, нежели молекулярные связи. При дальнейшем нагревании газа будет увеличиваться хаотическая скорость движения его атомов и молекул. Средняя энергия таких атомов равна $3/2 kT$. Очевидно, когда эта энергия будет больше работы, необходимой для ионизации, при столкновении атомов может происходить отрыв электронов, в результате которого появятся свободные электроны и ионы. Но при температуре T имеются атомы, энергия которых значительно больше $3/2 kT$. Таким



а



б



в

Рис. 16

а — двухатомный газ при температуре в сотни градусов; б — при тысячах градусов молекулы распадаются и образуется одноатомный газ; в — газ при десятках тысяч градусов. Это уже плазма. Она содержит ионы, электроны, гамма-кванты и нейтральные атомы

образом, ионизация начнется значительно раньше, чем будет иметь место равенство

$$^{3/2}KT = W_i,$$

где W_i — энергия ионизации атомов газа.

Различные газы имеют энергию ионизации в пределах от 10 до 25 эв. Для водорода эта величина равна 13,6 эв. Для того чтобы средняя энергия теплового движения атомов была больше, чем энергия ионизации атома водорода, должно выполняться неравенство

$$^{3/2}KT > W_i \text{ или } ^{3/2}KT > 13,6 \text{ эв.}$$

Учитывая, что постоянная Больцмана $K = 8,61 \cdot 10^{-5}$ эв/град, легко подсчитать, что температура водорода должна быть порядка 100 000° К. Однако ионизация начнется значительно раньше и уже при температуре в несколько десятков тысяч градусов в газе будут находиться не только нейтральные атомы, но и электроны и ионы.

Таким образом, газ, нагретый до высокой температуры, представляет собой плазму (рис. 16, в). Число ионов в плазме непрерывно увеличивается с ростом температуры до тех пор, пока все атомы не будут полностью ионизированы.

У тяжелых атомов вокруг ядра вращается много электронов, для отрыва которых от ядра необходима энергия различной величины. Чем ближе к ядру находится электрон, тем труднее его оторвать. Но при сверхвысоких температурах в конце концов все электроны отделятся от ядер и газ будет состоять только из электронов и ядер. Это уже будет плазма несколько другого характера.

Все частицы плазмы находятся в тепловом равновесии: температуры электронного, ионного и нейтрального газов равны между собой. В идеальном случае, когда плазма не будет отдавать энергию во внешнее пространство, она может существовать весьма долго, так как обмен энергией между частицами не ведет к уменьшению количества ионов и электронов в газе и к понижению температуры горячей плазмы. В действительности же плазма всегда отдает энергию, хотя бы в виде излучения, и, следовательно, ее энергия должна обязательно пополняться за счет источника внутри плазмы.

Итак, плазма представляет собой совершенно особое состояние вещества, и мы вправе наряду с твердым, жидким и газообразным считать его четвертым состоянием вещества.

С плазмой в природе и технике мы встречаемся очень часто.

Ионизированные газы всегда сопутствуют любому пламени. Правда, в пламени свечи, керосиновой лампы ионов немного. Но в пламени газовой сварочной горелки, при сгорании смеси в цилиндрах двигателя автомобиля, в пламени реактивных двигателей образуется плазма, содержащая большое количество заряженных частиц. Плазма возникает также при большом взрыве, например атомной бомбы.

Естественно, что мы всегда являемся свидетелями возникновения плазмы при прохождении электрического тока через газы. Электропроводность газа непосредственно связана с получением плазмы в газовом разряде. Это имеет место в лампах дневного света, световых реклам, медицинских ртутных лампах и т. п.

Электрическая искра — молния — также представляет собой кратковременно существующую плазму. Повидимому, шаровые молнии — редко встречающееся явление природы — представляют собой сгустки высокоионизированного газа, т. е. плазмы.

С колоссальным количеством плазмы мы встречаемся при рассмотрении строения Вселенной. Солнце по существу является гигантским шаром из горячей плазмы. Наблюдаемые астрономами протуберанцы есть не что иное, как извержения солнечного вещества, т. е. плазмы. Наружная оболочка Солнца сравнительно холодная — около 6000°C , содержит всего лишь $0,01\%$ ионов. Однако по мере углубления в солнечную массу температура быстро возрастает. В центре Солнца, где температура достигает миллионов градусов, газ полностью ионизирован, там имеются лишь «голые» ядра и электроны. То же самое можно сказать о звездах.

Таким образом, по крайней мере в видимой нам части Вселенной плазма является основным видом вещества. Для примера можно взять солнечную систему. Массы всех холодных планет, комет, астероидов и космической пыли, принадлежащих этой системе, составляют ничтожную часть массы Солнца. Солнечная си-

стема по крайней мере на 99% состоит из горячей плазмы. В ближайшей к нам области Вселенной — галактике — твердое и жидкое вещество составляет примерно 0,1% всей массы; масса рассеянного газа (туманности) — около 10% массы всей галактики. Все остальное вещество находится в четвертом состоянии, т. е. в виде плазмы.

Совершенно ясно, что, поскольку термоядерные реакции могут идти только при сверхвысоких температурах, плазма и все явления, происходящие в ней, представляют совершенно особый интерес для научных исследований в этой области.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА СОЛНЦЕ

Задолго до осуществления искусственных термоядерных реакций теория их была использована для объяснения происхождения солнечной (и звездной) энергии. В качестве исходного предположения для такого объяснения было принято, что на Солнце и в звездах происходят последовательные циклы ядерных реакций, конечным результатом которых является превращение водорода в гелий.

Проверкой правильности предположений о механизме термоядерных реакций на Солнце и в звездах служит сопоставление расчетных данных с результатами прямых астрофизических наблюдений. Из всех окружающих нас звезд астрономам и астрофизикам лучше всего известно Солнце. Не удивительно поэтому, что разные предположения о звездных термоядерных реакциях прежде всего «примеряются» к Солнцу, сравниваются с различными сведениями о Солнце.

Согласно современным астрофизическим воззрениям звезды образуются в результате притяжения частиц холодного разреженного газа, находящегося в мировом пространстве. Такое притяжение возникает за счет действия сил тяжести, т. е. является гравитационным притяжением, и работа, происходящая под действием сил тяжести, приводит, естественно, к выделению тепла. Никакого теплового обмена с окружающей средой в начальной стадии возникновения звезды еще нет, и поэтому выделение тепла вызывает разогрев центральной части образующегося уплотнения. Когда в рождающейся звез-

де появляется перепад температур, возникает и направленное наружу лучеиспускание. Постепенно, по мере уплотнения, первоначально прозрачный газ становится непрозрачным телом, излучающим с поверхности энергию.

Но всякое излучение энергии должно происходить за счет какого-то ее источника. На первых порах, пока звездное вещество испытывает сильнейшее всестороннее сжатие, таким источником оказывается энергия этого сжатия, высвобождающаяся при действии сил тяжести. Но по истечении миллионов лет плотность звездного вещества достигает определенного постоянного значения, т. е. силы сжатия перестают совершать какую бы то ни было работу. Значит, возникают какие-то новые источники энергии, которая излучается поверхностью звезды. Этими источниками, по-видимому, и являются термоядерные реакции.

Солнце, по всей вероятности, может служить примером звезды, уже прошедшей стадию сжатия и излучающей ныне энергию за счет термоядерных реакций. Общая мощность энергии, излучаемой Солнцем, составляет около $3,8 \cdot 10^{33}$ эрг/сек, т. е. $3,8 \cdot 10^{23}$ квт. Это означает, что каждую секунду масса Солнца уменьшается примерно на 4,3 млн. т. Такая огромная мощность излучения связана, однако, не с быстротой выделения энергии, а с колоссальными количествами солнечного вещества. Скорость выделения солнечной энергии на 1 г (единицу) массы оказывается, наоборот, поразительно малой — всего 1,9 эрг/сек. Чтобы вскипятить в течение суток один стакан воды, понадобилось бы взять не менее 5 т солнечного вещества, а для освещения комнаты двадцатипятисвечевой лампочкой — около 20 т.

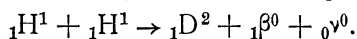
В настоящее время принято, что температура в центре Солнца близка к 13 млн. градусов, а плотность вещества составляет 70—100 г/см³, причем около 80% вещества по весу приходится на долю водорода; из более тяжелых ядер преобладает гелий. На долю углерода и азота приходится около 0,6% веса Солнца.

Начиная с 1938 г. в литературе широко обсуждаются два механизма звездных термоядерных реакций, приводящих к образованию гелия из водорода.

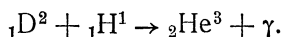
Первый возможный путь такого образования — протонно-протонный цикл — был впервые предложен в США

Г. Бете и К. Кричфилдом. Согласно их представлениям протонно-протонный цикл состоит из следующих последовательных превращений.

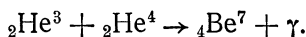
Вначале происходит слияние двух протонов, что приводит к образованию ядра дейтерия — дейтона; эта реакция сопровождается испусканием позитрона и нейтрино:



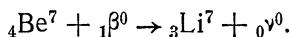
Дейтон соединяется с протоном, образуя ядра изотопа гелия ${}_2\text{He}^3$; при этом избыток энергии выделяется в виде гамма-кванта:



Следующим звеном цикла является реакция между ядрами двух изотопов гелия — ${}_2\text{He}^3$ и ${}_2\text{He}^4$, приводящая к образованию ядра бериллия ${}_4\text{Be}^7$ и испусканию гамма-кванта:



Образовавшееся ядро бериллия захватывает электрон, что приводит к возникновению ядра лития, а избыток энергии уносит нейтрино:

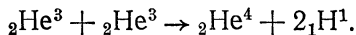


Наконец, цикл завершается реакцией взаимодействия ядра лития ${}_3\text{Li}^7$ с протоном. Образующееся составное ядро распадается на два ядра гелия:



В итоге из четырех протонов образуется ядро обычного гелия.

Однако в 1951 г. В. Фаулер и Т. Лауритсен в США и независимо от них Э. Шацман во Франции высказали предположение, что примерно в 100 раз более вероятным продолжением первых двух реакций протонно-протонного цикла является взаимодействие ядер



Такой вариант протонно-протонного цикла схематически показан на рис. 17.

Вторая реакция рассмотренного выше цикла происходит в среднем через шесть секунд, тогда как взаимодействие ядер ${}_2\text{He}^3$ наступает примерно через миллион лет,

а протоны вступают во взаимодействие друг с другом лишь спустя около 14 млрд. лет.

Мы начали рассматривать протонно-протонный цикл с реакции слияния двух протонов. Однако не следует это

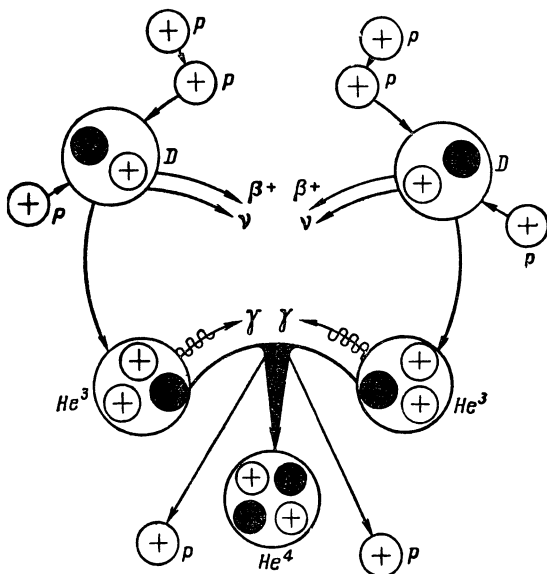


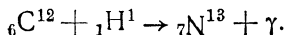
Рис. 17. Протонно-протонный цикл ядерных реакций на Солнце

понимать так, что процесс образования дейтона и есть обязательно начало цикла. Поскольку цикл этот является замкнутым, мы могли начать его рассматривать с любой реакции; в действительности в недрах Солнца протекает одновременно масса всевозможных реакций. Поэтому то огромное, по нашим земным представлениям, время, которое отделяет один этап ядерных превращений от другого и в целом определяет продолжительность всего цикла, не может «помешать» Солнцу непрерывно излучать огромное количество энергии.

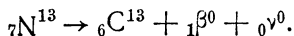
То же самое можно сказать и в отношении другого цикла — углеродно-азотного.

В 1939 г. Г. Бете предложил цикл термоядерных реакций, называемый углеродно-азотным или циклом Бете. При высоких температурах Солнца быстрый про-

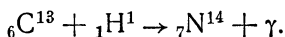
тон может проникнуть в ядро углерода ${}_6\text{C}^{12}$; при этом образуется ядро азота ${}_7\text{N}^{13}$, которое излучает некоторую часть своей энергии в виде гамма-кванта:



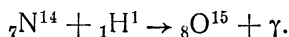
Азот ${}_7\text{N}^{13}$ является неустойчивым изотопом. В среднем через 14 мин после образования этого ядра один из его протонов превращается в нейтрон, испуская позитрон и нейтрино. В результате радиоактивного распада образуется изотоп углерода с атомным весом 13:



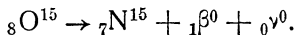
Примерно каждые 2,7 млн. лет в ядро ${}_6\text{C}^{13}$ может проникнуть протон, что приведет к образованию устойчивого ядра ${}_7\text{N}^{14}$:



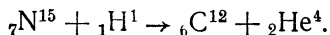
Только приблизительно через 32 млн. лет ядро ${}_7\text{N}^{14}$ захватит протон и превратится в кислород ${}_8\text{O}^{15}$, испустив гамма-квант:



Ядро ${}_8\text{O}^{15}$ в результате радиоактивного распада очень быстро, в среднем по истечении 3 мин, испускает позитрон и нейтрино и превращается в ядро ${}_7\text{N}^{15}$:



Конечная реакция происходит примерно через 100 тыс. лет: ядро ${}_7\text{N}^{15}$ поглощает протон, испускает гамма-квант и распадается на ядро ${}_6\text{C}^{12}$ и альфа-частицу (ядро ${}_2\text{He}^4$):



В среднем через 13 млн. лет ядро углерода может поглотить протон и тогда весь цикл реакций начнется снова.

Цикл Бете показан на рис. 18.

Заметим, что различные ядра, участвующие в обоих циклах, играют роль или «катализатора» (${}_6\text{C}^{12}$ во втором цикле) или промежуточных продуктов (${}_1\text{D}^2$, ${}_2\text{He}^3$, ${}_4\text{Be}^7$, ${}_3\text{Li}^7$ — в первом цикле; ${}_7\text{N}^{13}$, ${}_6\text{C}^{13}$, ${}_7\text{N}^{14}$, ${}_8\text{O}^{15}$ — во втором), и их количество в результате всех превращений не изменяется.

Как протонно-протонный, так и углеродно-азотный циклы дают один и тот же результат и сопровождаются огромным энерговыделением — $4,3 \cdot 10^{-5}$ эрг на каждое ядро гелия, т. е. 700 тыс. квт-ч на грамм-атом (4 ϵ) гелия.

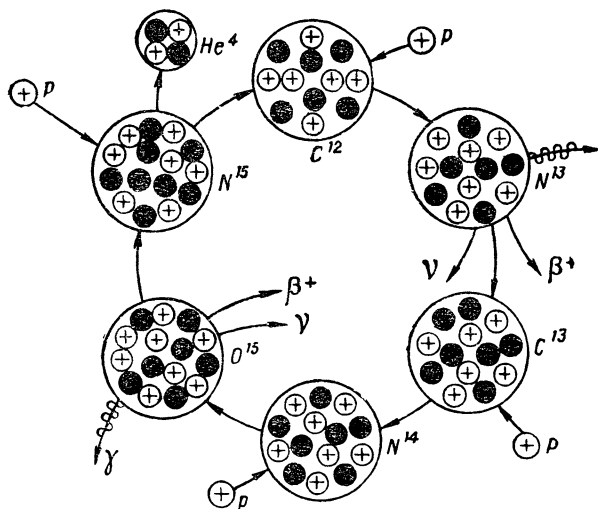


Рис. 18. Ядерные превращения углеродно-азотного цикла на Солнце (цикл Бете)

Естественно, что в результате ядерных реакций содержание водорода на Солнце уменьшается. После того как весь водород израсходуется, выделение энергии за счет этих циклов прекратится и, если будут невозможны другие ядерные реакции, Солнце погаснет. Но опасаться этого незачем, так как на Солнце столько водорода, что его хватит, как показывают подсчеты, на сотни миллиардов лет.

V. СОЛНЦЕ НА ЗЕМЛЕ

ПРОБЛЕМА № 1

Мы приходим к удивительному выводу. Оказывается, человечество за все время своего существования всегда использовало ядерную энергию — энергию Солнца. Действительно, до овладения атомной энергией, каким бы источником энергии мы ни пользовались, его происхождение всегда неразрывно было связано с Солнцем.

Однако Земля получает ничтожную часть энергии ядерных реакций, происходящих на Солнце. Еще меньшую часть этой энергии полезно расходует мы для наших нужд. И, безусловно, наступило время, когда человек уже не может удовлетвориться сравнительно небольшими источниками энергии. Растущая колоссальная потребность в энергии заставляет думать о других источниках, о создании, образно выражаясь, Солнца на Земле.

Не правда ли, это звучит фантастически? Но ведь совсем недавно относили к области фантастики и электростанции, использующие ядерную энергию деления урана, и двигатели на атомном горючем. И если мы сумеем получить управляемую термоядерную реакцию, подобную реакциям, происходящим на Солнце, тогда проблема создания Солнца на Земле станет реальной действительностью.

Забота человечества о расширении энергетических ресурсов является исключительно актуальной. Очень интересные и убедительные данные привел на Первой Женевской международной конференции по мирному использованию атомной энергии (1955 г.) индийский ученый Хоми Баба. Он сообщил, что только за первую половину XX века население земного шара увеличилось

с 1,5 до 2,3 млрд. человек, а, по предположениям экспертов, в 2000 г. численность населения составит от 3,5 до 5 млрд. человек. Если учесть, что потребление энергии на душу населения в развитых индустриальных странах уже теперь составляет более 20 *квт-ч* и, конечно, будет все время расти, то необходимость в значительном увеличении источников энергии становится совершенно очевидной.

Очень серьезным шагом в разрешении этой проблемы явилось величайшее открытие человеческого разума — высвобождение атомной энергии. Однако при всей грандиозности запасов энергии, таящихся в естественных расщепляющихся материалах — в уране и тории (эти запасы превышают примерно в 20—30 раз наличные резервы угля, нефти и газа), они все же ограничены. Кроме того, добыча, обогащение и приготовление делящегося ядерного горючего сопряжены со значительными трудностями. Создать изобилие энергии, необходимое для человечества, эти материалы не могут.

При оценке запасов энергии синтеза легких ядер речь идет поистине об астрономических цифрах. В самом деле, в гидросфере (в океанах, морях, озерах, реках и т. п.), масса которой равна $1,4 \cdot 10^{18}$ т, содержится почти 25 000 млрд. т дейтерия, а при превращении лишь одного грамма дейтерия в гелий (в результате реакций ${}_1^2\text{D}^2(d, p){}_1^3\text{T}^3$, ${}_1^3\text{T}^3(d, n){}_2^4\text{He}^4$) выделяется энергия в 100 тыс. *квт-ч*. Достаточно сказать, что всего 6% энергии первого (и наиболее слабого) из произведенных до сих пор термоядерных взрывов хватило бы для прорытия Панамского канала, где пришлось вынуть 183 млн. *м*³ грунта.

Вот почему с полным основанием получение управляемой термоядерной реакции ученые называют «проблемой № 1».

До сих пор ученые располагают единственным средством, позволяющим получать температуру в миллионы градусов, необходимую для осуществления термоядерных реакций, — это взрыв атомной бомбы. Но для промышленных целей, конечно, невозможно применить взрыв атомной бомбы. Поэтому надо найти способ «зажигать» термоядерные реакции, не прибегая к атомному взрыву, т. е. построить прибор, позволяющий получать температуру в десятки миллионов градусов.

ИСКУССТВЕННАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Для того чтобы шла реакция горения, необходимо нагреть вещество до точки воспламенения, тогда реакция будет сама себя поддерживать. В малом объеме горючего сделать это очень трудно. Если даже какую-то часть такого объема удастся нагреть до температуры воспламенения, то энергия, выделяющаяся в результате химической реакции, будет рассеиваться в виде излучения света или испарения быстрых молекул и воспламенения не будет. Для малых объемов горючего вещества температура воспламенения значительно выше. Для полезного использования химической энергии горения нужно, кроме того, иметь возможность регулировать скорость реакции и отводить получаемое тепло.

Таким образом, для промышленного использования химического топлива необходимы три условия: первое — топливо должно иметь температуру выше точки воспламенения; второе — объем топлива должен быть достаточно большим, чтобы шла самоподдерживающаяся реакция; третье — скорость реакции горения должна быть регулируемой, а избыток энергии, получающийся в реакции, должен быть отведен для приведения в движение каких-либо машин.

То же самое необходимо для получения и использования термоядерных реакций, где «сгорает» ядерное топливо — вещества, содержащие легкие ядра. Но для того, чтобы началась термоядерная реакция, температура воспламенения ядерного горючего должна быть значительно выше температуры воспламенения химического горючего, т. е. порядка сотен миллионов градусов.

Для иллюстрации этого положения воспользуемся мысленным опытом, предложенным американским физиком Р. Поста. При нормальном давлении начнем нагревать 1 л дейтерия. Предположим, что сосуд, в котором содержится газ, способен выдерживать огромные температуры и давления.

Средняя скорость молекул дейтерия при комнатной температуре сравнительно невелика — примерно 10^5 см/сек, что соответствует кинетической энергии, равной 0,025 эв. Мы знаем, что при таких энергиях ядерные реакции идти не могут. Но даже если нагреть сосуд до $10\,000^\circ\text{C}$, то и в этом случае не будем наблюдать ни

одного акта ядерной реакции ${}_1\text{D}^2(d, p){}_1\text{T}^3$ или ${}_1\text{D}^2(d, n){}_2\text{He}^3$. При этой температуре дейтерий будет представлять собой одноатомный газ, так как все его молекулы распадись. Мы сможем иногда наблюдать разрушения отдельных атомов: электроны будут переходить на возбужденные уровни или совсем отрываться от атомов; при переходе электронов обратно в нормальное состояние будут испускаться кванты света, т. е. газ в сосуде будет излучать. Но, несмотря на то что давление в сосуде при этом достигнет 50 *атм*, а скорость атомов более 10^6 *см/сек*, никакого разрушения атомных ядер наблюдаться не будет.

Если нагревать газ дальше (до температуры $100\,000^\circ\text{C}$), то наш мысленный сосуд будет испытывать давление более 1000 *атм*. Вещество в сосуде перейдет в четвертое состояние — плазму, образованную из электронов, скорость которых достигает 10^9 *см/сек*, и тяжелых ядер дейтерия — дейтонов, движущихся со скоростью 10^7 *см/сек*. Но даже при такой скорости ядра не подойдут близко друг к другу, они не смогут преодолеть мощные электростатические силы отталкивания. Правда, всегда найдутся ядра, скорость которых окажется немного и мы сможем наблюдать одну ядерную реакцию в среднем за каждые 100—200 лет. В сосуде будет холодная плазма. Когда температура плазмы достигнет миллиона градусов, скорость ядерных реакций возрастет в 10^{19} раз. Однако и в этом случае выход ядерной энергии будет настолько мал (всего лишь около одной тысячной ватта на литр плазмы), что будет незаметен.

При 100 млн. градусов скорость реакции становится большой. Но сосуд выдерживает почти два миллиона атмосфер. Электроны движутся со скоростью, равной половине скорости света (150 тыс. *км/сек*), а дейтоны со скоростью $2,5 \cdot 10^8$ *см/сек*. Все же и при этой колоссальной температуре ядерные реакции сами себя не будут поддерживать. Это кажется странным, так как за очень короткое время (порядка секунды) все дейтоны вступают в ядерные реакции, в объеме сосуда выделяется огромная мощность — более 100 млн. *квт*. Но как только мы уберем источник тепла, плазма охладится и реакции прекратятся. Ведь то же самое происходит при нагревании маленького кусочка угля. Сам он не горит, но

если поместить его в пламя газовой горелки, постепенно все его молекулы вступят в химическую реакцию с кислородом.

Только при температуре 300 млн. градусов начинается воспламенение плазмы, состоящей из дейтронов и электронов. Здесь термоядерная реакция будет сама себя поддерживать. Но вспышка длится миллионные доли секунды, и за это время мощность достигает 10^{12} квт. Это, конечно, взрывной процесс. Даже если бы нам и удалось нагреть газ до такой температуры, мы не смогли бы управлять мгновенной термоядерной реакцией.

Это первое затруднение на пути осуществления управляемой термоядерной реакции. Однако оно все же может быть преодолено, если применять разреженный газ при давлении не более 0,1 мм рт. ст. В этом случае в объеме содержится меньшее количество газа и создается возможность управлять термоядерной реакцией. Выделение энергии уже не будет столь быстрым и большим, давление при температурах в миллионы градусов не является колоссальным, да и нагревать объем с разреженным газом легче. Запас тепла при температуре даже в сотни миллионов градусов в 1 м разреженного до 0,1 мм газа (плазмы) очень мал — около 1800 калорий. Понадобится около 20 л такой плазмы, чтобы вскипятить стакан чаю.

МАГНИТНЫЙ СОСУД

Когда речь идет о сложности проблемы разогрева того или иного выделенного объема вещества до сверхвысоких температур, имеют в виду отнюдь не то, что для такого разогрева требуется какая-то большая энергия. Напротив, эта энергия весьма мала. Так, например, для разогрева изолированного от окружающей среды 1 г дейтерия до миллиона градусов требуется всего 2 квт-ч, т. е. в 50 тыс. раз меньше, чем может затем выделиться за счет термоядерной реакции в дейтерии. Однако необходимое для такого разогрева количество энергии чрезвычайно сильно возрастает в результате теплового обмена разогреваемого вещества с окружающей средой.

Как же происходит этот тепловой обмен?

При температурах порядка миллионов градусов атомы и молекулы газа обладают огромными скоростями и

«разбегаются» в разные стороны. Тепло, возникающее в результате беспрестанных столкновений частиц газа друг с другом и со стенками сосуда, переходит от газа к стенкам сосуда, в котором происходит нагревание. Естественно, что в этом случае будет затрачиваться огромная энергия на нагревание сосуда; нагреть же газ до нужной температуры не удастся. Кроме того, тепловой обмен происходит за счет теплового излучения, интенсивность которого для непрозрачных (абсолютно черных) тел пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Но плазма является прозрачным веществом, и ее излучение растет с температурой значительно медленнее. Поэтому при сравнительно малых температурах, которые должны быть пройдены в ходе разогрева вещества, вносимая извне энергия в основном определяется тепловым движением частиц.

Поскольку средняя энергия теплового движения частиц при температуре T равняется, как уже говорилось, $3/2 kT$, уравнение, связывающее энергию Q (эрг/см³), вносимую извне в единицу объема нагреваемого вещества, и температуру этого вещества, имеет вид

$$Q = \frac{3}{2} kTN,$$

где N — число частиц в 1 см³.

Эффективность дальнейшего разогрева вещества определяется количеством частиц, между которыми делится вносимая извне энергия. Если дать возможность заключенным в сосуд (объемом Ω) $N\Omega$ «нагретым» частицам беспрепятственно обмениваться энергией с гораздо большим числом молекул окружающей среды (за счет соударений с «холодными» молекулами стенок сосуда), то полученная температура окажется значительно ниже той, которая была бы без теплообмена. В связи с этим возникает сложнейшая задача теплоизоляции разогреваемого до сверхвысоких температур газообразного вещества, представляющего собой плазму, от стенок сосуда, в котором оно находится. Расчеты показывают, что потери энергии при теплообмене со стенками без специальной теплоизоляции делают невозможным повышение температуры сверх 10—100 тыс. градусов.

Но где найти материал, способный выдержать температуры в сотни тысяч и миллионы градусов? Как удерж

жать в плазме быстрые «нагретые» частицы, чтобы они успели вступить в ядерное взаимодействие раньше, чем отдадут свою энергию в тепловых столкновениях с другими, «холодными» частицами?

Плазма, как уже говорилось, состоит из движущихся отдельно друг от друга заряженных частиц: положительных атомных ядер и отрицательных электронов. Задача, следовательно, заключается в том, чтобы удержать заряженные частицы вместе, так как при их разлете, естественно, будет уходить энергия, заключенная в объеме газа.

В 1950 г. советские физики И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров предложили для термоизоляции плазмы высокой температуры применять магнитное поле.

Магнитное поле можно представить как поток магнитных силовых линий, направление которых в каждой точке пространства совпадает с направлением поля, а их густота определяет интенсивность (напряженность) его. В магнитном поле заряженные частицы движутся не прямолинейно, а по окружности. Очень важно, что окружности, которые описывают заряженные частицы, «нанизаны» на определенные силовые линии; частицы как бы приклеены к силовым линиям магнитного поля, которые их крепко удерживают. Чем сильнее магнитное поле, тем меньше радиус окружности, по которой будут двигаться заряженные частицы. Правда, при столкновении эти частицы перемещаются, но отходят друг от друга не дальше чем на длину радиуса окружности. При сильном магнитном поле потеря энергии плазмой за счет соударений частиц с холодными стенками сосуда уменьшается в десятки и сотни тысяч раз.

Однако функции магнитного поля этим не ограничиваются. Плазма — проводящее вещество. Если бы проводимость ее была равна бесконечности, то внешнее магнитное поле не могло бы проникнуть внутрь плазмы: при возрастании магнитного поля в плазме возникали бы бесконечно большие токи электромагнитной индукции. Но плазма обладает некоторым сопротивлением, и внешнее магнитное поле все же будет проникать внутрь плазмы. Как показывают исследования, это «просачивание» магнитного поля в плазму происходит довольно медленно. Для кратковременных процессов, длящихся тысячные и даже миллионные доли секунды, можно при-

нимать, что на плазму действует полное магнитное давление.

В магнитном поле, кроме того, заряженные частицы, составляющие плазму, приобретают упорядоченное движение, т. е. возникает электрический ток, который сам создает магнитное поле. Это магнитное поле будет ослаблять внешнее магнитное поле.

Таким образом, внешнее магнитное поле оказывает давление на плазму. Если это давление будет больше обычного газокINETического давления, то плазма будет сжиматься. Частицы внутри плазмы, отклоняющиеся от направления своего движения, будут поворачиваться обратно. Заряженные частицы нагретой до миллионов градусов плазмы оказываются как бы в магнитном сосуде, стенки которого не боятся сверхвысоких температур и способны удерживать плазму при высоком давлении. Подсчитано, что можно создать такие магнитные поля, которые могут противостоять давлению горячей плазмы в 10 000 атм.

НА ПЕРЕДНЕМ КРАЕ НАУКИ

После того как И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров высказали свою идею, физики вспомнили, что с подобным явлением, правда в меньшем масштабе, — с так называемым пинч-эффектом, они встречались при исследовании разряда.

В самом деле, в ртутной дуге и при некоторых других формах электрического разряда возникающая там плазма благодаря сильному магнитному полю сжимается в узкий шнур. При этом сжатии, так же как это имеет место при обычном сжатии газа, происходит повышение температуры. Однако при сравнительно малых токах, которые до сих пор использовались в газовом разряде, температура плазменного шнура достигала всего лишь десятка тысяч градусов; эта температура весьма далека от той, которая необходима для термоядерных реакций.

Для получения температуры порядка миллионов градусов нужны токи в сотни тысяч и даже миллионы ампер. Такой ток можно пропустить через плазму разрядной трубки только при напряжении в несколько десятков тысяч вольт. Достаточно перемножить значение тока и

напряжения, чтобы убедиться, что мощность, требуемая для питания установки, превосходит мощность самых больших гидроэлектростанций Советского Союза. Выход может быть найден в том, чтобы через разрядную трубку пропускать мощные токи в виде импульсов, длящихся миллионные доли секунды. Тогда при колоссальной мгновенной мощности средняя мощность, необходимая для питания установки, получается вполне приемлемой величины. Кроме того, как уже указывалось, при кратковременных процессах магнитное поле не проникает внутрь плазмы, и она особенно эффективно сжимается наружным магнитным давлением.

Много нового и чрезвычайно интересного открыли советские физики при исследовании сверхмощных разрядов. Применяя специальные, очень остроумные измерительные приборы, они обнаружили, что газ в трубке стягивается в узкий плазменный шнур, оторванный от стенок сосуда. Плазма испытывает резкие колебания, связанные с последовательным сжатием и разрежением. В сосуде возникают ударные волны с невиданной скоростью распространения — несколько сот километров в секунду. Температура плазменного шнура в момент наибольшего сжатия достигает миллиона градусов.

Казалось бы, что теперь путь к овладению термоядерной реакцией открыт. На практике же решение этой проблемы оказывается чрезвычайно трудным делом, требующим использования новейших достижений различных областей науки. На этом пути ученым предстоит решить еще очень много трудных задач.

Отвлечемся, однако, от пока еще не преодоленных трудностей и представим себе, что нам удалось создать магнитное поле, удерживающее плазменный шар (рис. 19). Во избежание охлаждения плазмы сделаем так, чтобы ее частицы не достигали холодных металлических стенок, барьер создадим магнитным полем.

К сожалению, создание подобной установки встречает большие препятствия. Весьма существенным препятствием является то, что шаровая конфигурация плазмы и магнитного поля неустойчива. Поскольку силовые линии магнитного поля представляют собой кривые, обращенные вогнутостью к плазме, напряженность поля будет уменьшаться с увеличением расстояния от поверхности плазмы. Поэтому если в плазме произойдет не-

большая деформация и плазменная поверхность прогнется наружу, то на новой границе магнитное поле, а следовательно, и давление будут меньше. Деформация будет расти до тех пор, пока вся плазма не вытечет через прорытый ею в магнитном поле «туннель».

Наоборот, плазма была бы устойчивой, если бы вся ее наружная поверхность была вогнутой. В этом случае при малейшем прогибе поверхности плазмы наружу магнитное давление в месте деформации будет расти и стремиться восстановить прежнюю конфигурацию плазмы. Но создать магнитный сосуд только с вогнутой поверхностью нельзя; можно уменьшить выпуклую часть поверхности плазмы, создав сложную конфигурацию магнитного поля, и тем самым увеличить устойчивость плазмы.

Существует еще целый ряд явлений, приводящих к вытеснению плазмы из магнитного сосуда. Прежде всего не все частицы горячей плазмы имеют одинаковую скорость: одни движутся быстрее, другие медленнее. Более быстрые частицы будут легче проникать сквозь магнитное поле и уходить из плазмы. Вместе с этими частицами плазма будет терять энергию, т. е. охлаждаться. Кроме того, в плазме имеются отрицательные частицы — электроны и положительные — ионы. На какой-то небольшой промежуток времени может произойти соединение электронов и ионов, и тогда образуется быстро движущийся нейтральный атом. Правда, при следующих столкновениях такой атом вновь распадается, но даже очень короткого времени, когда вместо двух частиц в плазме будет нейтральный атом, на который магнитное

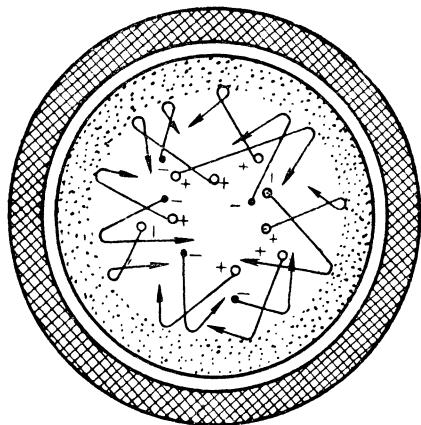


Рис. 19. Плазменный шар удерживается магнитным полем. Уходящие частицы заворачиваются магнитным полем обратно в область плазмы

поле не действует, достаточно, чтобы он беспрепятственно прошел к холодной стенке.

Все это приводит к тому, что плазма и магнитное поле будут проникать друг в друга, и, если количество плазмы непрерывно не пополнять, она в конце концов вытечет. Термоядерная реакция уже не будет сама себя поддерживать.

Возможно, выгоднее плазменный шнур?

При пинч-эффекте в газоразрядной трубке в результате прохождения тока через газ появляется магнитное поле, силовые линии которого сжимают ионизированный газ (плазму), отрывая его от стенок трубки (рис. 20, а). Чем больше ток, тем сильнее сжимается плазменный шнур и выше его температура. Советским физикам удалось получить плазму с температурой больше миллиона градусов. Однако в этом опыте высокая температура наблюдалась всего лишь миллионную долю секунды, и, как только плазменный шнур сжимался, он тут же начинал разваливаться и, касаясь стенок трубки, быстро охлаждался.

Неустойчивость плазменного шнура можно объяснить различными явлениями. Прежде всего любое небольшое искривление плазменного шнура будет всегда увеличиваться, так как с вогнутой стороны (рис. 20, б) магнитное поле больше и будет давить на шнур сильнее. В результате шнур развалится, достигнув стенок трубки. Кроме того, на плазменном шнуре может возникнуть так называемая перетяжка (рис. 20, в) вследствие того, что сжатие в одной или нескольких точках несколько больше. Далее процесс нарастает опять-таки в результате более сильного магнитного давления в месте сужения, и шнур разрывается на части.

Сжимающийся плазменный шнур в газовом разряде находится в неустойчивом равновесии примерно так же, как неустойчив конус, поставленный на вершину. Известно, что любое самое малое отклонение конуса приводит к его падению. То же происходит с плазменным шнуром: любое самое малое изменение положения или формы шнура приводит к его полному разрушению. По этой причине не удалось получить в разрядной трубке самоподдерживающейся реакции.

Можно ли сделать устойчивым плазменный шнур в газоразрядной трубке?

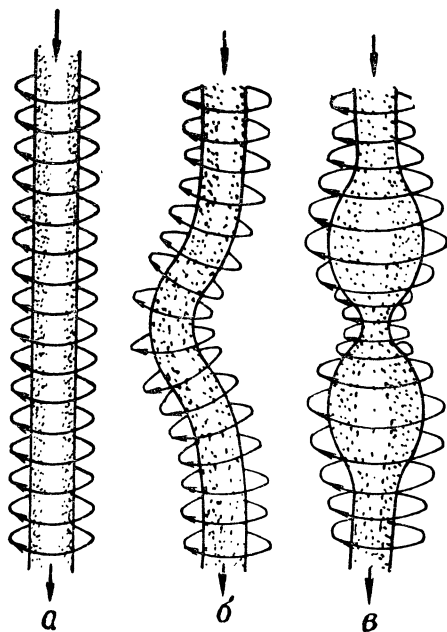


Рис. 20

a — при прохождении тока через газ появляется магнитное поле, силовые линии которого имеют вид окружностей и сжимают плазму в узкий шнур (направления тока и магнитного поля указаны стрелками); *б* — любое небольшое искривление плазменного шнура будет всегда увеличиваться, так как с вогнутой стороны магнитное поле больше и будет давить на шнур сильнее; *в* — возникшая перетяжка плазменного шнура увеличивается, так как в месте сужения магнитное поле сильнее

Не вдаваясь в подробное рассмотрение, скажем, что, по-видимому, эта задача полностью неразрешима. Но можно сделать плазменный шнур более устойчивым, применив достаточно сильное внешнее магнитное поле вдоль самого шнура (рис. 21). Это поле будет до некоторой степени противодействовать изгибу и перетяжке шнура, т. е. создавать его жесткость. Улучшить устойчивость процесса можно также, сделав стенки газоразрядной камеры проводящими (рис. 22). В этом случае изгиб плазменного шнура создаст в близлежащей про-

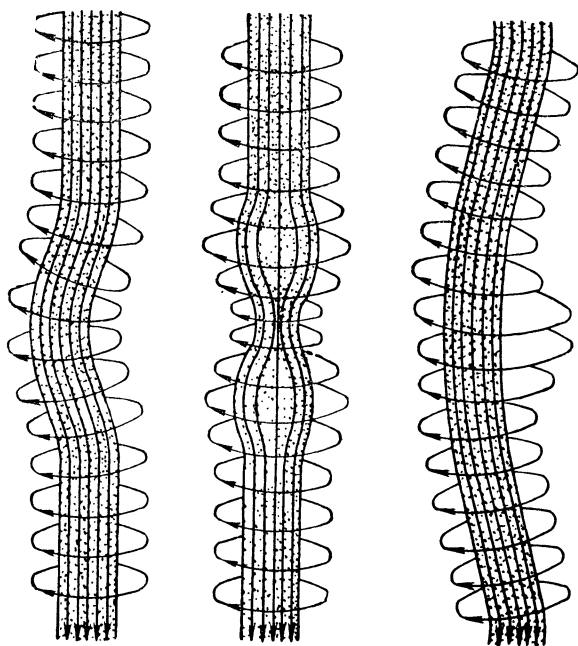


Рис. 21. Можно сделать плазменный шнур более устойчивым, применив сильное внешнее магнитное поле вдоль шнура (продольные линии). Изгиб или перетяжка плазменного шнура приводит к растяжению силовых линий, которому противодействует внешнее магнитное поле

водящей стенке токи, магнитные поля которых будут противодействовать искривлению шнура. Однако все эти меры не дают возможности получить самоподдерживающегося процесса в разрядной трубке. Импульсный разряд, длящийся миллионные доли секунды, не приводит к равновесному состоянию, при котором магнитное давление уравнивается газовым давлением в плазменном шнуре. Для равновесного состояния плазмы необходимо более медленное (порядка 1 мсек) возрастание тока. Но тогда сжатие уже не носит характера ударной волны, как это имеет место в импульсном разряде. При более медленном нагревании плазму надо

тщательно оберегать от соприкосновения с холодными стенками. Это невозможно сделать с прямой разрядной трубкой, так как, помимо всех других факторов, плазменный шнур охлаждается на концах трубки в месте соприкосновения с металлическими электродами.

Естественно, что физики перешли к исследованиям кольцевых безэлектродных трубок, разряд в которых возбуждается индукцией в переменном магнитном поле. На этом принципе в Советском Союзе была построена установка «Альфа» (рис. 23), а в Англии — установка «Зета» (рис. 24) с тороидальными трубками.

Установки типа «Альфа» и «Зета» имеют трубчатые металлические камеры, согнутые в виде огромных бубликов (торов). Камеры заполняются дейтерием при давлении от 10^{-3} до 10^{-4} мм рт. ст., затем в них возбуждается разряд, длящийся около 4 мсек с током до 200 тыс. ампер. Ток нагревает газ, а магнитное поле тока сжимает полученную плазму, не давая ей соприкоснуться с холодными стенками камеры. Упрощенная схема возбуждения газового разряда в безэлектродной камере показана на рис. 25.

Легко понять, что газ в кольцевой трубке фактически является вторичной обмоткой трансформатора, состоящей из одного витка. Возникновение тока в обмотке электромагнита возбуждает соответствующий ток в газе, т. е. возбуждает газовый разряд.

В тороидальном плазменном шнуре имеют место все те же неустойчивости, которые наблюдаются в прямой трубке. Положение частично улучшается применением магнитного поля, возбуждаемого специально-

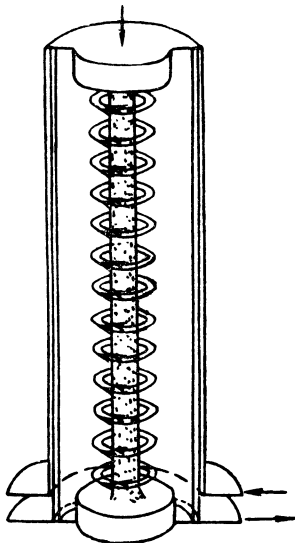


Рис. 22. Устойчивость плазменного шнура можно также увеличить, сделав стенки газоразрядной трубки проводящими. В этом случае изгиб плазменного шнура создает в ближайшей стенке токи, магнитные поля которых будут противодействовать искривлению шнура

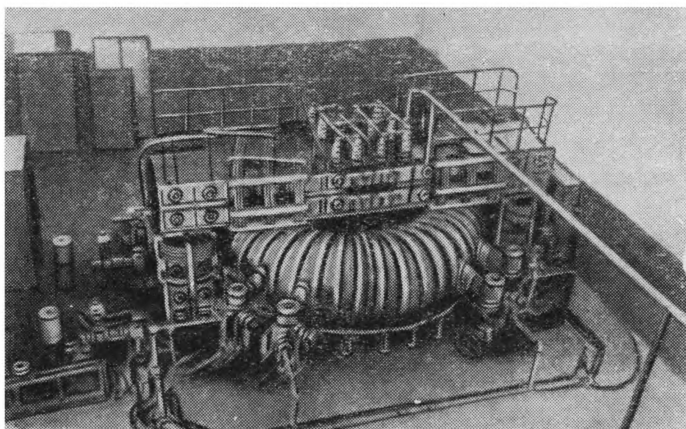


Рис. 23. Установка «Альфа»

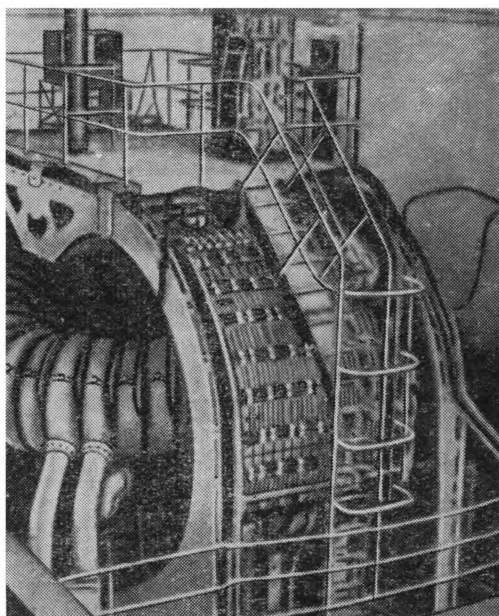


Рис. 24. Установка «Зета»

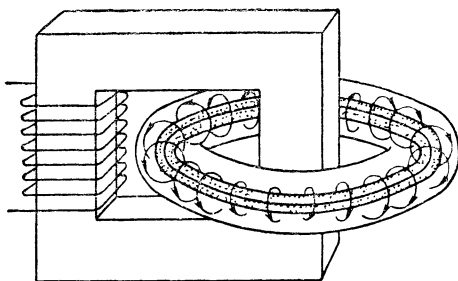


Рис. 25. Газ в кольцевой трубке является вторичной обмоткой трансформатора, состоящей из одного витка

ми катушками, надетыми на тор. Однако осуществить достаточно устойчивую плазменную конфигурацию не удастся, и поэтому на этих установках термоядерная реакция также получена не была.

Горячую плазму можно получить не только в газовом разряде. Предположим, что мы имеем дело с некоторым откачанным до высокого вакуума непроницаемым объемом. Если в этот объем впускать предварительно ускоренные заряженные частицы обоих знаков (электроны и ядра), то там может накопиться достаточное количество частиц, и газ, состоящий из этих частиц, станет плазмой. Частицы будут сталкиваться одна с другой, движение их превратится в хаотическое, температура плазмы будет соответствовать средней скорости движения заряженных частиц. И так как мы предположили, что в объеме нет медленных частиц обычного газа, то попадающие туда частицы не теряют своей скорости.

Предварительно ускорять частицы можно на различного типа ускорителях. Очень просто, например, получить большое количество дейтонов с энергией 100 кэВ. Скорость таких частиц соответствует температуре газа около миллиарда градусов.

Таким образом, казалось бы, нетрудно создать горячую плазму с любой самой высокой температурой. Главная трудность заключается в создании такого сосуда, который бы удерживал частицы вместе и позволял накапливать их в достаточном количестве.

В качестве сосуда для быстрых заряженных частиц пригодна опять-таки только магнитная ловушка. Ловушка должна представлять собой некоторый объем, заполненный магнитным полем довольно сложной формы. Это поле образуется электрическим током, протекающим во внешних обмотках ловушки.

Если в качестве ловушки взять цилиндрическую трубку, то расположенная на ней равномерная обмотка создает продольное магнитное поле, силовые линии которого будут направлены параллельно образующим цилиндра. Очевидно, что такое поле будет удерживать частицы от поперечных движений, так как частицы «сцеплены» с силовыми линиями. Но этот «сосуд» будет также неудачен ввиду того, что с торцов он совершенно открыт. Необходимо иметь заглушки, а для этого на концах трубы надо резко увеличить магнитное поле, сделав обмотку более густой (или пропустить там больший ток). Подобная конструкция представляет собой магнитное зеркало, и основная масса частиц горячей плазмы отражается в сильном магнитном поле обратно в центральную часть ловушки. Трудность заключается в том, чтобы впускать частицы в такую ловушку.

Магнитные стенки ловушки имеют внутренние и внешние стороны. Если мы хотим, чтобы заряженные частицы не уходили из ловушки, магнитное поле должно быть достаточно велико. Но тогда и с внешней стороны частицы не смогут попасть в ловушку, так как магнитное поле будет поворачивать их обратно. Можно сделать «отверстие» в магнитной стенке и через это отверстие впускать (инжектировать) быстрые ионы. Однако в этом случае, как показывают расчеты, через очень короткое время все ионы опять возвратятся на инжектор и уйдут из плазмы, находящейся в ловушке. Вместе с частицами «уйдет» и энергия.

Советские физики нашли правильное решение задачи впуска частиц в магнитную ловушку. В известной самой большой в мире магнитной ловушке «Огра» (рис. 26) они впускают через инжектор тяжелые молекулярные ионы; в ловушке молекулярные ионы распадаются благодаря соударению с остатками газа на две частицы — атомный ион и нейтральный атом. Атомные ионы — новые заряженные частицы — имеют массу и энергию в

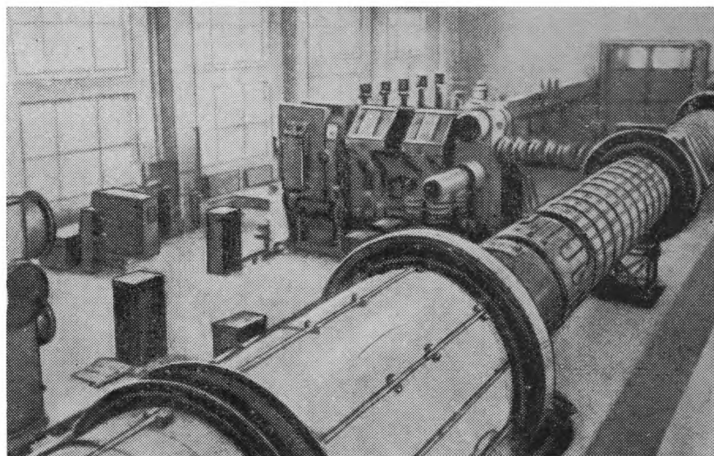


Рис. 26. Магнитная ловушка «Огре»

два раза меньше, чем первоначальные частицы, и не возвращаются на инжектор, а постепенно накапливаются и создают горячую плазму.

Однако магнитные пробки недостаточно совершенны. Они все же пропускают заряженные частицы, обладающие движением в определенных направлениях. Так как в процессе столкновений частицы обмениваются скоростями, а следовательно, меняют свои направления, то постепенно все частицы вытекают через пробки из ловушки.

Исследования на «Огре» дадут ученым много новых интересных данных о свойствах плазмы. Но, к сожалению, можно сказать заранее, что таким путем, без применения особых, еще не известных приемов, не удастся создать устойчивую горячую плазму с параметрами, необходимыми для осуществления термоядерных реакций.

Значительной трудностью во всех исследованиях является получение сверхвысокого вакуума. Ничтожная примесь постороннего газа приводит к охлаждению плазмы. Заряженные частицы, сталкиваясь с нейтральными молекулами, передают им свою энергию. Газ начинает светиться, и вместе с этим уходит вся энергия

плазмы. Горячая плазма сама по себе мало излучает, но получить такую «черную» плазму можно только в почти космическом вакууме. Поэтому после получения обычного вакуума вступают в действие титановые насосы, где распыленный титан поглощает остатки газа. Чтобы удалить примеси из магнитной ловушки, ее корпус нагревают до высокой температуры, устанавливают специальные ловушки с жидким азотом, охлаждают титан до сверхнизких температур. Но все эти ухищрения, хотя и позволяют получать невиданный вакуум, не дают еще пока желаемого результата. Небольшое число заряженных частиц, проникающих к холодной стенке, выбивает из нее потоки тяжелых атомов, засоряющих плазму.

Советские физики занимают ведущее место в разработке проблем получения и использования управляемых термоядерных реакций. Доклад академика И. В. Курчатова в Харуэлле (Англия) в 1956 г. был первым сообщением о работах, ведущихся в этой области. Позднее в зарубежных научных журналах стали появляться статьи об исследованиях управляемого термоядерного синтеза. В настоящее время ученые всего мира свободно обсуждают свои достижения и трудности на международных конференциях.

Сейчас ведутся работы в различных направлениях, и еще неясно, каким путем удастся получить управляемую термоядерную реакцию. Однако нет сомнения, что поиски ученых увенчаются успехом. В ближайшие десятилетия, а может быть, и годы человечество овладеет энергией термоядерных реакций и получит новые неисчерпаемые источники энергии, значительно превосходящие запасы атомной энергии в уране и тории.

ЕЩЕ НЕМНОГО ФАНТАЗИИ

Даже если удастся получить сверхвысокие температуры, проблема «приручения» энергии термоядерных реакций еще не будет решена. Надо не только «зажечь» термоядерную реакцию, но и научиться управлять ею.

В настоящее время намечаются два пути возможного управления термоядерными реакциями.

Первый путь заключается в осуществлении медленного горения ядерной смеси, т. е. в создании искусственного Солнца на Земле. Однако это ставит перед учены-

ми еще одну довольно трудную задачу: научиться использовать энергию, получаемую при температуре в миллион градусов.

Сейчас мы еще далеки от каких-либо конструктивных решений, но все же можно представить себе, из каких примерно элементов может состоять термоядерный реактор — искусственное солнце (рис. 27). По-видимому, в

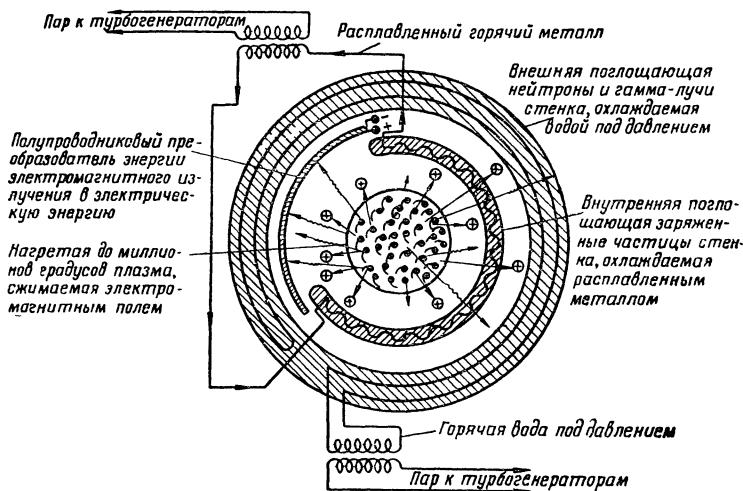


Рис. 27. Пока еще фантастический термоядерный реактор.

центре его будет находиться нагретая до миллионов градусов плазма, удерживаемая в малом объеме мощными электромагнитными полями. Ионы легких элементов, составляющих плазму, будут, сталкиваясь друг с другом, вступать в ядерные реакции, в результате которых выделится огромная энергия. Возможно, что с одного кубического сантиметра центрального объема плазмы удастся получить мощность до киловатта, или с одного кубического метра — миллион киловатт. Быстро движущиеся заряженные частицы и нейтроны отдадут часть энергии в центре плазмы, поддерживая тем самым необходимую для осуществления термоядерной реакции температуру. Основную же энергию частицы потеряют во внешнем объеме, вне электромагнитного поля. Эту энергию можно будет получать в виде тепла, выделен-

ного какой-либо поглощающей стеной, окружающей плазменный шар.

Но можно поступить иначе, частично превращая энергию заряженных частиц непосредственно в электрическую, минуя тепловой цикл. В этом случае частицы, поглощаясь каким-либо металлом, выбивают с поверхности его большое количество электронов, в результате металлическая стенка получает положительный заряд, который обуславливает возникновение электрического тока. Существуют и другие пути непосредственного превращения энергии термоядерных реакций в электрическую. В частности, энергию магнитного поля непрерывно движущейся горячей плазмы можно, по крайней мере частично, превратить в электрическую энергию в специальных проводниках, окружающих плазменный шар. Предварительные расчеты показывают, что таким путем, по-видимому, возможно использовать до 30% энергии термоядерных реакций.

При высоких температурах, получающихся в термоядерных реакциях, значительная часть энергии будет выделяться в виде электромагнитного излучения. Эту энергию также можно превращать в тепловую и электрическую. Исследования показали, что очень чистые кристаллы кремния, например, превращают в электрическую энергию около 11% падающей на них световой энергии. Весьма вероятно, что найдутся химические соединения, которые еще эффективнее будут преобразовывать энергию искусственных солнц в электричество.

Энергию искусственного термоядерного солнца можно использовать в фотосинтезе. Как известно, зеленые листья растений поглощают значительную долю падающей на них солнечной световой энергии. Благодаря фотосинтезу они создают запасы энергии в органических веществах. Эту энергию мы получаем при горении химического топлива. Возможно, в будущем будет выгодно с помощью термоядерных реакций и ускоренного фотосинтеза создавать искусственное химическое топливо, используя его затем как горючее на транспорте и электростанциях.

Создание на основе термоядерных реакций искусственных солнц может привести к эффективному изменению местного климата.

Искусственные солнца могут быть как неподвижные, так и подвижные, расположенные, например, на искусственных спутниках Земли.

Второй путь возможного управления термоядерными реакциями заключается в использовании малых взрывов «горючей» смеси легких элементов. Для этого надо будет зажигать смесь небольшими порциями; после того как выгорит первая порция, в аппарат впускается следующая и поджигается. Это напоминает работу двигателя внутреннего сгорания, например дизеля. Конечно, такой путь использования термоядерных реакций является менее выгодным, чем медленное горение: каждый раз для осуществления малого взрыва необходимо затратить часть энергии на получение сверхвысокой температуры смеси. Однако атомная энергия, получающаяся при каждом взрыве, будет во много раз больше затраченной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все энергетические источники, которые человек до сих пор знал, созданы Солнцем. Энергия Солнца накапливалась в течение миллионов лет в растениях, а теперь мы получаем эту энергию, используя в качестве горючего остатки древней растительности в виде угля, нефти и т. д. Вода испаряется также под действием солнечных лучей; выпадая в виде дождя, она скапливается, сливается в реки, энергия которых на гидростанциях превращается в электрическую. Солнце неравномерно нагревает различные слои атмосферы и тем самым создает потоки воздуха — ветры, приводящие в движение ветряные двигатели. Жизнь растений, животных и человека, движение воды и воздуха зависят, таким образом, от Солнца.

Что будет, когда Солнце погаснет, перестанет излучать энергию?

В романе английского писателя Уэллса «Машина времени» описан эпизод, в котором изобретатель посещает далекое будущее Земли. Угасающее Солнце освещает тусклым и багровым светом холодную Землю. Жизнь на планете умирает. Кругом жуткая тишина.

Задумывались ли вы над этим предсказанием талантливого писателя? А ведь он отобразил наше совсем недавнее представление о развитии и судьбе Земли и вообще солнечной системы.

Сейчас мы понимаем, что Уэллс допустил ошибку. Его изобретатель не смог бы вернуться из будущего Земли к себе домой, в мастерскую; он не смог бы убежать от страшного будущего Земли и был бы вынужден до конца жизни оставаться на холодной, не согреваемой лучами умирающего Солнца Земле.

Но будет ли это страшное будущее Земли? Должны ли опасаться будущие астронавты, что, вернувшись из длительного путешествия к звездам, застанут умирающую жизнь на их родной планете?

Конечно, нет! Мы уверены, что наша зависимость от Солнца временная. Не так далеко то время, когда основная энергия, необходимая человечеству, будет получаться не от Солнца. Как известно, созданные Солнцем уголь и нефть уже сейчас не являются единственным горючим. Атомные электростанции и двигатели используют не энергию Солнца, а энергию атомных ядер — ядерного горючего, обладающего колоссальной концентрацией энергии.

Пока мы умеем получать для промышленных целей только энергию деления тяжелых ядер. Широкое использование этого горючего ограничено не очень большими запасами на Земле урана и тория. И, конечно, огромную энергию, получаемую нашей планетой от Солнца, энергия деления тяжелых ядер заменить не сможет.

Заменить энергию Солнца сможет только энергия управляемого синтеза легких ядер — термоядерных реакций. Запасы горючего для термоядерных реакций неиссякаемы, и, как знать, может быть, скоро человек сумеет создать свои искусственные солнца, сумеет дополнить деятельность основного светила.

Солнце, так же как и другие звезды, получает свою энергию за счет ядерных реакций. Пройдут миллиарды лет, и Солнце «устанет», кончатся запасы его горючего. И тогда люди на Земле зажгут искусственные солнца.

Жизнь на Земле не прекратится.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
I. Атом и атомное ядро	6
Атом Резерфорда	—
Из чего состоит атомное ядро?	8
Ядерные силы	10
Энергия связи атомных ядер	12
II. Ядерные реакции	16
Химические и ядерные реакции	—
Кулоновский потенциальный барьер	17
Эффективные сечения ядерных реакций	20
Механизм ядерных реакций	22
Ядерные реакции на легких ядрах	24
III. Термоядерные реакции	31
Взаимодействие заряженных частиц с веществом	—
Самоподдерживающаяся реакция синтеза	35
Горячее вещество	36
Термоядерный взрыв	38
IV. Вещество в четвертом состоянии	42
Как вещество переходит из одного состояния в другое	—
Электрический разряд в газах	45
Плазма	51
Термоядерные реакции на Солнце	56
V. Солнце на Земле	62
Проблема № 1	—
Искусственная термоядерная реакция	64
Магнитный сосуд	66
На переднем крае науки	69
Еще немного фантазии	80
Заключение	81

Балабанов Ефим Михайлович
ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
Серия «Научно-популярная библиотека»
М., Воениздат, 1963. 88 с

Редактор *Чугасов А. А.*
Обложка художника *Жук А. Б.*

Технический редактор *Соломонок Р. Л.* Корректор *Текучева Л. А.*

Сдано в набор 29.11.62 г. Подписано к печати 26.2.63 г.
Формат бумаги 84×108¹/₃₂ — 2³/₄ печ. л. = 4,51 усл. печ. л. 4,09 уч.-изд. л.
Г-90284.

Изд № 6/3673. Тираж 35.000 ТП 63 г. Зак. 711.

1-я типография
Военного издательства Министерства обороны СССР
Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, дом 3

Цена 12 коп.

Цена 12 коп.