

его радиоактивные изотопы обладают столь малыми периодами полураспада ($O^{15}-\beta^+$, $T=2$ мин. 3,95 сек.; $O^{14}-\beta^+$, $T=1$ мин. 16,5 сек.; $O^{19}-\beta^-$, $T=29,4$ сек.), что работать с ними практически невозможно. В этом случае в качестве меченых атомов используются стабильные изотопы. В природной смеси изотопов O^{16} содержится в количестве 99,759%, O^{17} в количестве 0,037% и $O^{18}-0,204\%$. Обогащая кислород т я жел ы м и и з о т о п а м и, можно в дальнейшем по их относительной концентрации судить о путях следования изучаемого вещества.

Не так давно полагали, что, поглощая углекислоту, растения ассимилируют углерод, а кислород возвращают в атмосферу. С помощью меченого кислорода было установлено, что все атомы, входящие в молекулу CO_2 , ассимилируются растением. В атмосферу же выделяется кислород, полученный растениями из впитываемой корнями воды.

По тем же причинам, что и для кислорода, почти невозможно пользоваться радиоактивным азотом. Для исследования этого важного в живых организмах элемента использовали метод обогащения изотопом N^{15} , содержащимся в природном азоте в количестве 0,365%.

Методика применения стабильных изотопов сложнее, чем радиоактивных. Для определения их относительного содержания необходимо иметь специальные масс-спектрографы. Правда, в этом случае целью является не определение масс изотопов с большой точностью, но лишь нахождение их относительного содержания. Приборы, предназначенные для этого, много проще и дешевле.

В медицине пользуются избирательным биологическим действием ряда элементов. Так, например, иод после введения в организм концентрируется почти полностью и сравнительно быстро в щитовидной железе. Поэтому предпринимаются попытки лечить рак щитовидной железы при помощи J^{131} (β^- , $T=8,0$ дня, энергия 0,595 Мэв). Лечение производится «на месте», без попутного повреждения здоровых тканей. Этот же изотоп помогает в диагностике зоба.

Мы ограничим этими, к сожалению отрывочными, примерами перечень все растущего и в наши дни уже огромного круга применений радиоактивных излучений и меченых атомов в науке и народном хозяйстве.

§ 69. Термоядерные реакции

Термоядерные реакции — реакции синтеза атомных ядер, текущие при высоких температурах, — играют огромную роль в жизни вселенной, являясь основным источником энергии звезд. Большой интерес представляет и возможность реализации управляемых

термоядерных реакций, так как из всех известных науке превращений вещества, происходящих с выделением энергии, термоядерные реакции дают наибольшее ее количество на единицу массы используемого вещества. При образовании ядра гелия из двух дейтронов выделяется энергия, равная 24 Мэв . Зная массу дейтрона, легко подсчитать, что в килограмме дейтерия содержится $1,50 \cdot 10^{26}$ пар соединяющихся ядер. Энергия, которая выделилась бы при синтезе гелия из килограмма дейтерия, составляла бы, следовательно,

$$1,50 \cdot 10^{26} \cdot 24 = 3,6 \cdot 10^{27} \text{ Мэв} = 1,62 \cdot 10^8 \text{ квт-ч.}$$

В пересчете на дейтерий в обычной воде это дает примерно 610 квт-ч за счет дейтерия, содержащегося в 1 литре воды.

Для сравнения укажем, что это количество энергии, которое выделяется при сжигании ~ 672 литров бензина (а это требует еще около семи тонн кислорода).

Как велика температура, необходимая для быстрого течения термоядерной реакции? Для слияния дейтронов необходимо их сближение до расстояния $\sim 3 \cdot 10^{-13} \text{ см}$. На этом расстоянии потенциальная энергия их взаимодействия, другими словами, работа, которую надо произвести для их сближения, равна

$$U = \frac{(4,8 \cdot 10^{-10})^2}{3 \cdot 10^{-13}} \left[\frac{\text{г} \cdot \text{см}^3}{\text{сек}^2 \cdot \text{см}} \right] = 7,7 \cdot 10^{-7} \text{ эрг} = 4,8 \cdot 10^5 \text{ эв.} \quad (69.1)$$

Если эта работа производится двумя сталкивающимися дейтронами, то кинетическая энергия каждого должна составлять половину этой величины:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2} 7,7 \cdot 10^{-7} = \frac{3}{2} kT, \\ T \approx 2 \cdot 10^8 \text{ К,} \end{array} \right\} \quad (69.2)$$

т. е. для зажигания водородной бомбы необходима начальная температура в несколько миллиардов градусов.

В звездных недрах такие температуры развиваются лишь после длительной эволюции звезды, когда имевшийся в ее составе водород уже практически исчерпан. Термоядерные реакции в этих случаях связаны с превращениями средних и тяжелых элементов.

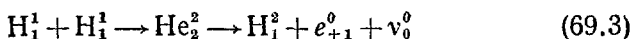
Особый интерес для нас представляют термоядерные реакции, протекающие на Солнце. Согласно современным представлениям Солнце богато водородом. Оценки содержания водорода различны, но даже по минимальным оценкам количество его составляет не менее 50% массы Солнца (равной $1,987 \cdot 10^{30} \text{ кг} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$). Температура центральной области Солнца заключена, по-видимому,

в пределах

$$1,2 \cdot 10^7 \text{ }^\circ\text{K} \leq T_{\odot} \leq 1,5 \cdot 10^7 \text{ }^\circ\text{K}.$$

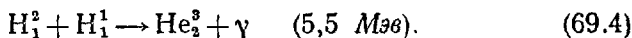
При такой температуре все легкие элементы полностью ионизованы, так что вещество представляет собой плазму — смесь протонов, электронов, легких ядер (в основном гелия) и небольшого количества средних и тяжелых ядер.

В этих условиях основной источник энергии связан с превращением водорода в гелий. В зависимости от температуры превращение $\text{H} \rightarrow \text{He}$ реализуется различными путями. При «низких» температурах $\sim 10^7$ °K доминируют реакции, при которых происходит непосредственный захват протонов протонами. При температурах $\sim 2 \cdot 10^7$ °K основную роль играет реакция, при которой синтез гелия реализуется с помощью ядер углерода и азота. При температуре солнечных недр эти реакции конкурируют, обеспечивая в сумме светимость Солнца. Мы опишем коротко обе эти реакции в том порядке, в котором они были упомянуты. Заметим, что первый тип превращений может реализоваться рядом способов; мы опишем один из них. Началом реакции является прямой захват одного протона дргим:



(ядро He_2^2 весьма неустойчиво, почти мгновенно превращается за счет позитронного распада в тяжелый водород).

Позитрон, сталкиваясь с электроном, превращается в излучение — «аннигилирует», так что энергия, уносимая позитроном, всегда в конечном итоге отдается в виде излучения. С учетом кинетической энергии позитрона, в среднем кванты излучения уносят 1,19 *Мэв* энергии. 0,25 *Мэв* уносится нейтрино. Далее реакция течет так:



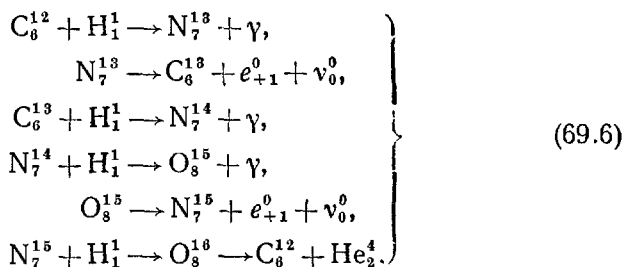
В отличие от первой реакции, эта вторая идет весьма быстро, так что количество ядер тяжелого водорода в звездах неизмеримо мало. Далее, из всех возможных наиболее вероятно следующая реакция:



Таким образом, конечным продуктом реакции синтеза водородных ядер оказывается гелий.

Как уже указывалось, при более высокой температуре превращение водорода в гелий идет с помощью ядер-катализаторов (пользуясь терминологией химиков) — углерода и азота, помогающих этой реакции, но в конечном итоге не меняющихся в числе. Этот процесс, называемый часто углеродным циклом, был впервые рассмотрен Бете.

Цикл протекает следующим образом:



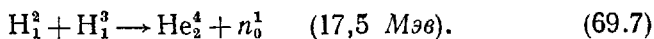
То обстоятельство, что в результате последней реакции не образуется кислород, объясняется следующим образом. Сумма масс $N_7^{15} + H_1^1$ значительно превышает массу O_8^{16} , излишек массы означает большой излишек энергии образовавшегося ядра, которая и высвобождается при делении O_8^{16} на C_6^{12} и He_2^4 . Таким образом, ядро углерода восстанавливается. На четыре поглощенных в процессе реакции протона происходит два превращения протон \rightarrow нейтрон (при позитронном распаде N_7^{13} и O_8^{15}). В результате из исходного материала — четырех протонов — получается одно ядро гелия. Из килограмма водорода получается в конечном итоге 993,0 г гелия. Сотые доли грамма уносятся нейтрино. Позитроны, аннигилируя с электронами, превращаются в излучение. Таким образом, суммарная масса излучения, возникающая при превращении одного килограмма водорода в гелий, составляет почти 7 г. Это отвечает энергии, равной примерно $1,75 \cdot 10^8$ квт-ч: количество энергии, вырабатываемое Куйбышевской ГЭС за год (10^{10} квт-ч), можно получить за счет превращения в гелий 57 кг водорода, — количества, содержащегося в 43 ведрах воды.

Заметим, что Солнце испускает в секунду $4 \cdot 10^6$ т излучения, что отвечает количеству энергии, которое Куйбышевская ГЭС могла бы выработать за 10 миллиардов лет. При массе Солнца $2 \cdot 10^{33}$ г и минимальном возможном содержании водорода количество его достаточно, чтобы поддерживать постоянной светимость Солнца в течение десятков миллиардов лет. За все это время масса Солнца уменьшится за счет излучения света на величину, не превышающую 0,7%.

Сколько-нибудь уверенных сведений о процессе образования других элементов, кроме гелия, в том числе самых тяжелых, которые в наших условиях лишь распадаются, пока еще нет, и обсуждение выдвигаемых гипотез здесь невозможно. Единственное, что можно утверждать, это что тяжелые элементы образуются при температурах, достигающих миллиардов градусов.

Термоядерные реакции дают большой выход энергии на единицу массы «горючего», чем любые другие превращения вещества, в том числе и деление тяжелых ядер. Поэтому возможность реализации таких реакций искусственным путем представляет большой интерес.

Первые искусственная термоядерная реакция была реализована в Советском Союзе в виде взрыва мощной водородной бомбы. Примерно через полгода аналогичный взрыв сумели осуществить в США. Как показал расчет, легче всего идет следующая реакция:



Поэтому заряд водородной бомбы представляет собой смесь тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития. Высокая температура, необходимая для быстрого и эффективного протекания реакции, достигается взрывами одной или нескольких обычных атомных бомб, содержащихся в водородной бомбе в качестве взрывателей. Энергия, выделяющаяся при взрыве одной водородной бомбы, эквивалентна энергии взрыва десятков миллионов тонн обычных взрывчатых веществ.

Особый интерес представляет возможность получения энергии для народного хозяйства за счет управляемой термоядерной реакции.

В недрах звезд при температурах в десятки миллионов градусов реакция протекает весьма медленно — весь цикл превращения ядер длится сотни миллионов и даже миллиарды лет. Высокая температура в недрах звезд, где протекает реакция, сохраняется в силу малой теплопроводности огромной толщи вещества звезды, окружающей центральный очаг. В искусственных условиях такая теплоизоляция невозможна и высокая температура вещества, необходимая для того, чтобы реакция шла, может существовать лишь при условиях достаточно быстрого ее течения, т. е. большой отдачи энергии. Расчет показывает, что даже при использовании наиболее легко синтезируемых тяжелых изотопов водорода, выделение энергии будет покрывать ее убыль, т. е. температура, необходимая для поддержания реакции, будет сохраняться за счет самой реакции, при значениях, не меньших чем $3,3 \cdot 10^8$ °К. Таким образом, первая задача, решение которой еще предстоит, состоит в получении (не в условиях взрыва, конечно) температуры в 350 миллионов градусов по меньшей мере. Вторая задача состоит в том, чтобы обеспечить теплоизоляцию горячей плазмы от стенок прибора. Это необходимо не только для уменьшения потерь тепла, но и потому, что никакое вещество не может остаться твердым при температуре термоядерной реакции. Метод преодоления этой трудности был указан советскими учеными,

академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом. Он состоит в том, чтобы изолировать весьма горячую плазму от стенок прибора с помощью магнитного поля.

Таким путем советским физикам удалось впервые превысить температуру в миллион градусов.

Высокая температура в плазме может быть получена при пропускании через нее очень мощного тока. При этом плазма будет почти полностью ионизована, в ней практически не будет содержаться нейтральных частиц. Магнитное поле вокруг канала, по которому течет ток, разогревающий плазму, имеет то же строение, как и магнитное поле обычного линейного тока (рис. 3.27). Заряженные частицы, из которых состоит плазма, при движении в сторону от канала разряда будут отклоняться этим магнитным полем

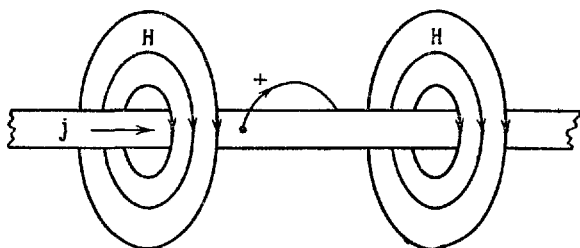


Рис. 3.27.

и возвращаться обратно. Тем самым стенки прибора защищаются от соприкосновения с частицами раскаленной плазмы, а последняя оберегается от связанных с этим потерь тепла.

При первых попытках реализовать эту идею импульс тока в сотни тысяч ампер (получаемый при разряде батарей мощных конденсаторов) пропускался через разреженный газ. Магнитное поле, возникающее вокруг канала разряда, быстро сжимало его.

По ряду признаков можно было судить, что в момент разряда температура плазмы достигала миллиона градусов — рекордной в лабораторных условиях величины, не достаточной, однако, для возникновения термоядерной реакции. Оказалось, что область разряда не устойчива. При быстром сжатии вещества магнитным полем возникает своеобразный гидравлический удар, разрушающий канал разряда. Кроме того, если даже исключить удар, все равно область разряда, удерживаемого собственным магнитным полем этого разряда, не является устойчивой. Возникающие деформации канала разряда (искривление, перетяжка или расширение) будут не сглаживаться, но, наоборот, увеличиваться. Это

объясняется увеличением давления со стороны магнитного поля повышенной напряженности (густоты силовых линий) и уменьшения давления поля уменьшенной напряженности. Предполагается, что область разряда может быть стабилизирована магнитным полем, параллельным оси разряда и созданным добавочным источником поля (рис. 3.28). Такое поле будет, во-первых, уменьшать скорость сжатия плазмы при возникновении разряда: при сжатии заряженные частицы будут тормозиться в своем движении к оси разряда. Тем самым будет устранен удар, разрушающий канал разряда. В отличие от собственного поля разряда, это внешнее магнитное поле будет, как это видно из рис. 3.28, выправлять искажения канала разряда. В области сжатия продольное магнитное поле будет создавать добавочное поперечное давление (рис. 3.28, б), в области искривления натяжение его будет стремиться выпрямить ось разряда (рис. 3.28, в).

Для того чтобы концы канала тока не соприкасались с электродами, следует создавать ток в виде кольца в тороидальной трубе. Вихревое электрическое поле создается переменным магнитным полем, направленным перпендикулярно к экваториальной

плоскости тора. Как и в бетатроне, кольцо разряда является как бы витком обмотки трансформатора, в котором переменное магнитное поле индуцирует э. д. с. Стабилизирующее магнитное поле с линиями напряженности, параллельными оси тора, создается током в специальной обмотке, намотанной на торе и представляющей собой тороидальный соленоид. В такой установке английские физики достигли температуры плазмы в несколько миллионов градусов. В настоящее время в ряде стран, в том числе в СССР, Англии, США, ведутся интенсивные работы по овладению управляемыми термоядерными реакциями.

Большого успеха добились в 1964 г. советские физики, впервые получившие устойчивую плазму (удерживавшуюся порядка $\sim 0,01$ сек!) с температурой около 10^7 °К.

Высказывается предположение, что, может быть, окажется возможным превратить энергию ядерного синтеза непосредственно

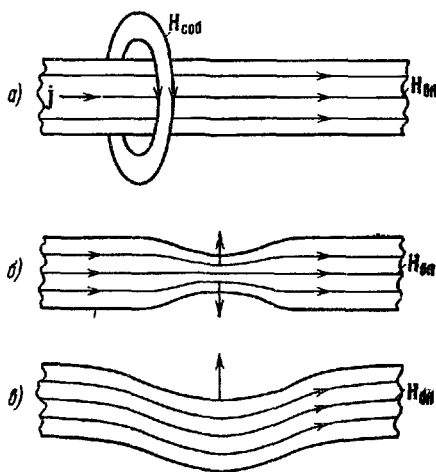


Рис 3.28

в электрическую энергию, минуя тепловую фазу. Такая возможность позволила бы избежать неприятного условия для к. п. д. машины, устанавливаемого вторым началом термодинамики. Указанную возможность предполагают реализовать так. Если бы удалось заставить плазму непрерывно пульсировать, то связанное с ней магнитное поле также периодически менялось бы и индуцировало бы в специальной обмотке переменную э. д. с., на что и тратилась бы вырабатываемая в процессе реакции энергия. Будущее, и, вероятно, ближайшее, покажет, каковы пути технической реализации всех этих идей.
