

цевина ядра не разрывается и уносится одним из осколков вместе с половиной нуклонов из внешних оболочек. Эта гипотеза находится в согласии с оболочечной и обобщенной моделями ядра.

#### § 41. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

При открытии деления ядер урана появились перспективы использования ядерной энергии. Тепловой нейтрон с энергией  $0,03 \text{ эв}$  освобождает энергию порядка  $200 \text{ Мэв}$ , иными словами, выделившаяся энергия в несколько миллиардов раз превышает затраченную энергию. Существенно, что этот процесс сопровождается освобождением нейтронов, способных вызвать деление других ядер урана и т. д. Таким образом, в принципе один нейтрон может дать начало разветвленной цепи делений, причем число ядер, участвующих в делении, будет быстро возрастать. Этим деление отличается от обычных ядерных реакций, в которых одна частица взаимодействует с одним ядром и на этом реакция заканчивается.

Начальный нейтрон играет роль спички, зажигающей горючий материал. Горение также представляет собой цепной процесс. При делении цепной процесс поддерживается нейтронами.

Подсчитаем энергию деления в единицах, используемых в технике. Энергия, освобождающаяся при делении одного ядра, равна  $200 \text{ Мэв} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ эрг} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ вт/сек}^{-1}$ . Мощность в один ватт создается делением  $3,1 \cdot 10^{10}$  ядер в сек.

Если делится один грамм-атом урана, т. е.  $235 \text{ г}$  урана, то выделяется энергия  $E = 6 \cdot 10^{23} \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} = 1,9 \cdot 10^{20} \text{ эрг} = 1,9 \times 10^{13} \text{ вт/сек} = 1,9 \cdot 10^{10} \text{ квт/сек} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ квт/час}$ .

При делении  $1 \text{ г}$  урана выделяется энергия, равная  $5 \cdot 10^6 / 235 = 2 \cdot 10^4 \text{ квт/час}$ . Чтобы получить такое же количество тепловой энергии, необходимо сжечь более трех тонн угля.

Время, требуемое для деления, мало и определяется временем захвата нейтронов  $\Delta t \sim 10^{-8} \text{ сек}$ . Для деления  $1$  грамм-атома урана надо иметь  $\sim 10^{24}$  нейтронов. Если первичное деление вызвал один нейтрон, а в одном акте деления число нейтронов удваивается, то образование  $10^{24}$  нейтронов происходит за  $80$  поколений. Они возникают за  $10^{-5} \text{ сек}$ . Эти рассуждения справедливы, если нет утечки нейтронов.

Что же произойдет в естественной смеси изотопов урана в результате одного акта деления? В одном акте деления испускается в среднем два или три нейтрона с энергией  $\approx 1 \text{ Мэв}$ . Эта энергия меньше порога деления  $U^{238}$ , поэтому будет делиться только  $U^{235}$ , которого в естественной смеси содержится всего  $0,7\%$ . В результате столкновений вылетевших нейтронов с ядрами первые будут замедляться и могут быть поглощены  $U^{235}$  или  $U^{238}$ . При этом уран-235 будет делиться, а уран-238 будет только уменьшать общее число нейтронов за счет реакции ( $n, \gamma$ ).

При энергии нейтронов  $E_n = 7 \div 200$  эв возникает особенно сильное резонансное поглощение их  $U^{238}$  (рис. 73). Оно оборвет цепную реакцию, не дав нейтронам замедлиться до тепловых энергий.

Так как урана-238 в 140 больше, чем 235-го, то в естественной смеси изотопов урана вероятность обрыва цепи преобладает над вероятностью разветвления, и цепная реакция не в состоянии развиваться ни на медленных, ни на быстрых нейтронах.

Эту трудность можно преодолеть двумя путями.

1. Уменьшать содержание  $U^{238}$ , т. е. обогащать смесь изотопом  $U^{235}$ .

2. Замедлять нейтроны легкими водородсодержащими веществами, чтобы они теряли энергию большими порциями и «проскакивали» через опасную область резонансов  $U^{238}$ . Однако обычный водород захватывает нейтроны, что увеличивает вероятность обрыва цепи. Поэтому для замедления нейтронов лучше использовать углерод (графит), дейтон (тяжелая вода) или бериллий, которые поглощают нейтроны слабее.

#### § 42. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Для поддержания цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон, получающийся при делении, вызвал вторичное деление. Минимальное условие состоит лишь в том, чтобы в среднем при делении каждого ядра производился по крайней мере один нейтрон, вызывающий деление следующего ядра.

Выше уже говорилось, что в единичном акте рождается в среднем  $\approx 2,5$  нейтрона, но часть из них исчезает за счет резонансного захвата ( $n, \gamma$ ) и утечки нейтронов из системы.

Минимальное условие возникновения цепной реакции удобно выразить, введя коэффициент размножения или коэффициент воспроизводства системы, определяемый как отношение числа тепловых нейтронов какого-либо одного поколения к числу тепловых нейтронов в предшествующем поколении:

$$K = \frac{n_i}{n_{i-1}}.$$

Система, в которой  $K=1$ , называется *критической системой*, в ней цепная реакция идет с постоянной скоростью.

Если  $K>1$ , то система называется *надкритической*; в ней осуществляется цепная реакция с нарастающей во времени интенсивностью. Если  $K<1$ , система называется *подкритической*; цепная реакция в ней затухает.

Скорость нарастания реакции определяется величиной коэффициента размножения  $K$  и временем, проходящим между двумя последовательными актами деления, т. е. средним временем жизни одного поколения нейтронов  $\tau$ .