

зывается одними нейтронами и сопровождается испусканием других нейтронов. При делении тяжелого ядра образуются два осколка среднего веса и дополнительно испускаются 2—3 нейтрона. Ядра, расположенные в середине таблицы Менделеева, наиболее устойчивы. У них число нейтронов лишь немногим больше числа протонов. У тяжелых ядер существенно  $N > Z$ , и поэтому образовавшиеся осколки сильно переполнены нейтронами. Выделившиеся при делении нейтроны, сталкиваясь с ураном, снова вызывают его деление. Этот процесс, называемый *цепной реакцией*, поддерживается в ядерных реакторах.

Образованные в реакторе нейтроны имеют энергетический спектр от 0 до 13 Мэв. В современных реакторах можно получить поток нейтронов до  $10^{19}$  нейтронов на  $1 \text{ см}^2$  в  $1 \text{ сек}$ .

### § 33. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

При прохождении нейтронов через вещество возникают следующие процессы:

- 1) упругое рассеяние нейтронов на ядрах мишени;
- 2) неупругое рассеяние;
- 3) захват нейтронов ядрами;
- 4) реакции подхвата.

В результате нейтроны в среде рассеиваются, поглощаются или размножаются (в процессе деления ядра).

В общем случае, если на тонкий слой вещества падает параллельный пучок нейтронов, после прохождения нормального к нему слоя толщиной  $x$  число нейтронов будет равно

$$v_x = v_0 e^{-\sigma n x},$$

где  $x$  — толщина вещества в  $\text{см}$ ;  $n$  — число ядер на  $1 \text{ см}^2$  вещества;  $v_0$  — число нейтронов в падающем пучке;  $\sigma = \sigma_{\text{поглощения}} + \sigma_{\text{рассеяния}}$ .

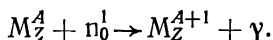
Рассмотрим различные виды взаимодействия нейтронов.

Для элементов с низким атомным номером первый возбужденный уровень обычно на 1 Мэв (или более) выше основного состояния. Поэтому в случае легких элементов упругое рассеяние нейтронов с энергией  $< 1 \text{ Мэв}$  более вероятно, чем неупругое рассеяние. С увеличением атомного номера минимальная энергия возбуждения ядра уменьшается примерно до 0,1 Мэв, и нейтроны с большей энергией могут испытывать как упругое, так и неупругое рассеяние. В реакциях ( $n, n'$ ) быстрые нейтроны сначала соединяются с ядром-мишенью, образуя составное ядро, затем испускается нейтрон с меньшей энергией, а ядро-мишень остается в возбужденном состоянии. Обычно возбуждение очень быстро снимается испусканием  $\gamma$ -лучей, но иногда возбужденное состояние является метастабильным, т. е. изомерным состоянием устойчивого изотопа.

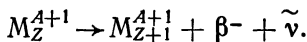
Поглощение нейтронов приводит к ядерным реакциям, в результате которых, в частности, возникает явление искусственной

радиоактивности и деления ядер. Приведем некоторые примеры ядерных реакций, идущих под действием нейтронов.

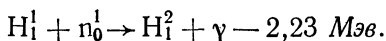
**Радиационный захват нейтрона (n, γ):**



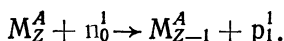
Возникающее ядро обычно является радиоактивным, так как отношение числа n к числу p в нем увеличивается и оно переходит в стабильное ядро за счет β<sup>-</sup>-распада



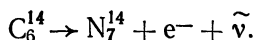
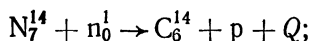
Как уже говорилось, такие реакции идут в основном под действием медленных нейтронов. Простейшая реакция подобного типа:



**Реакция с образованием протонов (n, p):**



Образованные ядра обычно β<sup>-</sup>-активны по той же причине. Например

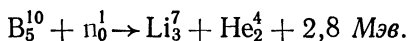


Здесь конечный продукт идентичен первоначальному изотопу мишени. Обычно эти реакции эндонергетические и идут под действием нейтронов с кинетической энергией более 1 Мэв. Лишь на легких ядрах они могут идти также от тепловых нейтронов, так как для некоторых изотопов энергия реакции положительна (например, для He<sup>3</sup> и N<sup>14</sup>) и, кроме того, потенциальный барьер, препятствующий вылету протона, относительно низок.

**Реакции с образованием α-частиц (n, α):**

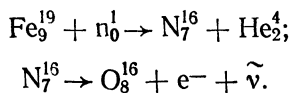


например,

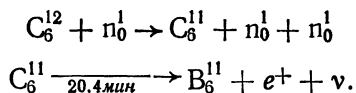


Такие реакции при малых энергиях нейтронов идут только на легких ядрах. Для того чтобы процесс (n, α) мог происходить на тяжелых ядрах, необходимо использовать нейтроны с большой энергией. Однако при этом более вероятно возникновение реакции (n, 2n). Так же как в предыдущих случаях, в результате вылета α-частицы увеличивается относительное содержание нейтронов по сравнению с исходным ядром, поэтому ядро продукт обычно β<sup>-</sup>-активно,

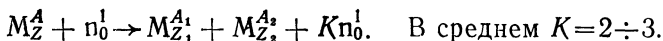
Например:



**Реакция с образованием двух или более нуклонов ( $n$ ,  $2n$ ), ( $n$ ,  $3n$ ), ( $n$ ,  $pn$ ).** Это пороговые реакции, которые идут при энергии нейтронов  $> 10$  Мэв. Вероятность таких реакций быстро возрастает с увеличением энергии падающего нейтрона. Примерно в 70% случаев образованное ядро распадается с испусканием позитрона или претерпевает  $K$ -захват, так как в этих случаях в ядрах увеличивается процентное содержание протонов, например:



**Реакции деления.** Обозначаются ( $n$ ,  $f$ ) (*fission* — деление)



Такие реакции для некоторых тяжелых элементов идут под действием нейтронов с энергией  $\sim 1$  Мэв, а для других — под действием даже тепловых нейтронов.

Более подробно реакции деления будут рассмотрены в следующей главе.

## § 34. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Поскольку нейтроны почти не взаимодействуют с электронами, они непосредственно производят очень слабую ионизацию — создают всего лишь одну пару ионов на одном метре пути, в то время как протоны с такой же энергией создают около одного миллиона пар ионов на метре того же вещества.

Таким образом, нейтроны нельзя обнаружить обычными приборами, основанными на ионизирующей способности заряженных частиц. Приходится использовать вторичные эффекты.

Регистрация нейтронов основана на двух принципах: во-первых, на наблюдении заряженных частиц, возникающих при ядерном взаимодействии нейтронов с веществом, вводимым в прибор, и, во-вторых, на использовании явления отдачи ядер легких элементов при столкновении их с нейтронами. Выбор метода зависит от энергии нейтрона: для медленных нейтронов пользуются методом ядерных взаимодействий, тогда как для быстрых — методом ядер отдачи.

**Метод наведенной активности.** При образовании и поглощении нейтронов часто образуются радиоактивные ядра, которые распадаются согласно общим законам радиоактивного распада. Измеряя