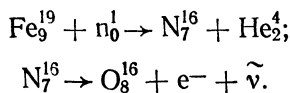
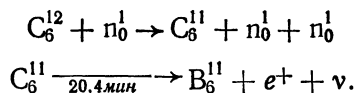


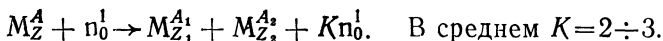
Например:



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 ~ 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

активность полученных таким образом источников, можно определить величину потока падающих нейтронов.

Рассмотрим, как меняется число активных ядер N со временем.

Если на образец падает ν нейтронов в секунду на 1 см^2 , а в слое вещества содержится n атомов/см², то при эффективном сечении захвата, равном σ за одну секунду, должно образоваться $\nu n \sigma$ активных атомов. Одновременно будет происходить распад этих атомов, и за время dt число распавшихся атомов равно $\lambda N dt$.

Следовательно, активность препарата

$$\frac{dN}{dt} = \nu n \sigma - \lambda N. \quad (100)$$

Решение этого уравнения, как известно, приводит к экспоненциальному закону, по которому при достаточно большом времени t

$$\frac{dN}{dt} \rightarrow 0,$$

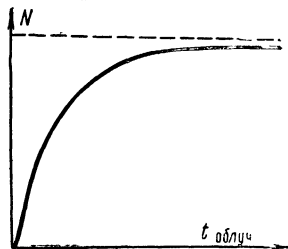


Рис. 77. Зависимость числа активных ядер от времени облучения

т. е. увеличение числа активных атомов полностью компенсируется распадом (рис. 77). Стационарное число активных атомов станет равным числу атомов, образованных за среднее время жизни τ

$$N_0 = \frac{\nu n \sigma}{\lambda} = \nu n \sigma \tau. \quad (101)$$

Величина λN_0 называется *активацией насыщения*. При $t \ll \tau$ можно считать

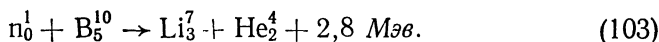
$$N = \nu n \sigma t.$$

В общем случае интегрируя уравнение (100), получим

$$N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (102)$$

Исследуя активность препарата, можно определять число падающих нейтронов ν . Иногда радиоактивные ядра возникают при фото-ядерных реакциях. По их активности также можно судить о количестве выделенных нейтронов. Однако этим методом нельзя получить сведения об энергетическом распределении нейтронов.

Борный метод. Очень важный метод регистрации нейтронов основан на свойствах бора поглощать нейтроны с энергией от тепловых до десятков кэВ (по закону $1/\nu$). При этом идет реакция:



Родившиеся α -частицы сильно ионизуют вещество и могут быть зарегистрированы приборами. Для этого можно использовать почти все имеющиеся детекторы, вводя в них соответствующим

способом бор: а) ионизационные камеры наполняются газом BF_3 ; б) стенки счетчиков Гейгера — Мюллера покрываются тонким слоем B_5^{10} ; в) в желатину фотоэмульсии добавляется бор; г) в сцинтиллятор добавляется бор.

Так как эффективные сечения реакции (103) при различных энергиях нейтронов известны, то, пользуясь борным методом, можно определять энергии нейтронов, измерять плотность нейтронов и др.

Регистрация с помощью делительных камер. Медленные нейтроны вызывают деление U_{92}^{235} . Осколки от деления имеют энергию порядка 100 Мэв, большую массу и малый пробег в веществе. Кроме того, они сильно ионизованы. Это позволяет использовать для регистрации нейтронов обычную ионизационную камеру, один электрод которой покрыт окисью урана, обогащенной U_{92}^{235} . Такие камеры получили название делительных.

Для детектирования быстрых нейтронов используют делительную камеру, стенки которой покрыты U_{92}^{238} , делящимся под воздействием этих нейтронов.

Метод ядер отдачи. Основным методом, позволяющим не только зарегистрировать нейтрон большой энергии, но и определить его импульс (энергию), является метод ядер отдачи (обычно — протонов отдачи).

Нейтрон, сталкиваясь с протоном, передает ему часть своей энергии и импульса (рис. 78). Пользуясь законами сохранения энергии и импульса при упругом ударе, можно определить как энергию падающего нейтрона, так и угол вылета рассеянного нейтрона:

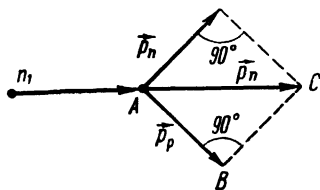


Рис. 78. Распределение импульсов при столкновении нейтрона с протоном

$$\begin{aligned} E_{n1} &= E_{n2} + E_p; \\ \vec{p}_{n1} &= \vec{p}_{n2} + \vec{p}_p. \end{aligned} \quad (104)$$

Из первого равенства следует

$$\frac{p_{n1}^2}{2m_n} = \frac{p_{n2}^2}{2m_n} + \frac{p_p^2}{2m_p};$$

видно, что поскольку $m_n \approx m_p$, то $\triangle ABC$ прямоугольный и $p_p = p_{n1} \cos \theta_n$. Отсюда получается для энергии

$$E_p = E_{n1} \cos^2 \theta_n. \quad (105)$$

Для эффективного использования этого метода в различные детекторы вводят водородосодержащие вещества:

а) пропорциональные счетчики наполняют водородом или помещают у одного конца счетчика парафин;

- б) камеру Вильсона наполняют водородом;
- в) фотопластинки не требуют специальной обработки благодаря тому, что водород уже входит в состав самой эмульсии;
- г) органический сцинтиллятор также содержит много водорода и поэтому может быть использован для регистрации протонов отдачи.

Существуют и другие методы детектирования нейтронов. Из сказанного выше уже видно, что регистрировать нейтроны труднее, чем заряженные частицы; в то же время медленные нейтроны проще регистрировать, чем быстрые. Поэтому часто выгодно сначала замедлять нейтроны.

§ 35. ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ

Простейшим типом ядерной реакции, происходящей под действием нейтронов, является упругое рассеяние, которое можно рассматривать как упругое соударение двух шаров: ядра и нейтрона. Выше были записаны законы сохранения для случая лобового столкновения (104). Энергия, теряемая нейтроном, переходит в кинетическую энергию ядра отдачи.

Доля энергии, передаваемая нейтроном ядру при лобовом столкновении η , после усреднения по углам вылета

$$\eta = \frac{4mM}{(m+M)^2}, \quad (106)$$

где m и M соответственно массы нейтрона и ядра. Очевидно, что η уменьшается с увеличением массы ядра. При $M \rightarrow \infty$ замедления вообще не будет (упругий удар шара о стенку).

Из формулы (106) следует, что $\eta_{\text{макс}} = 0,5$ при $M = m$, т. е. максимальная доля энергии теряется нейтроном при упругом рассеянии на протоне. Поэтому в качестве замедлителя везде, где это нужно, обычно используют водородсодержащие вещества. Однако ядра не только рассеивают, но и захватывают нейтроны в процессе замедления и это приходится учитывать при выборе вещества замедлителя.

Расчеты показывают, что средняя энергия нейтронов после одного столкновения с протоном (E_1) равняется половине первоначальной энергии (E_0):

$$\bar{E}_1 = \frac{1}{2} E_0.$$

После m соударений энергия нейтронов

$$\bar{E}_m = \left(\frac{1}{2}\right)^m E_0. \quad (107)$$

Замедление продолжается до энергий, соответствующих тепловому равновесию нейтронов со средой, т. е. до тех пор, пока их энергия в среднем не будет такой же, как у атомов среды.