

М. Г. МЕЩЕРЯКОВ

О ПОГЛОЩЕНИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ТЯЖЕЛЫМИ ЯДРАМИ

(Представлено академиком В. Г. Хлопиным 6 XI 1944)

Вероятность захвата быстрых нейтронов тяжелыми ядрами крайне мала по сравнению с вероятностью конкурирующего процесса неупругого рассеяния нейтронов. По Вайскопфу и Ивингу⁽¹⁾ для нейтронов с энергией $E > 1$ MeV и достаточно тяжелых ядер ($A > 50$) сечение процесса (h, γ) имеет вид:

$$\sigma(h, \gamma) = \pi R^2 \xi(E) \frac{\Gamma_\gamma}{\sum_\alpha \Gamma_\alpha},$$

где πR^2 — геометрическое сечение ядра, $\xi(E)$ — вероятность прилипания нейтрона к ядру; для $E > 1$ MeV $\xi(E) \sim 1$. Множитель $\Gamma_\gamma / \sum_\alpha \Gamma_\alpha$

представляет относительную вероятность распада компаунд-ядра посредством испускания γ -кванта; Γ_γ — парциальная ширина уровня для испускания γ -кванта. Суммирование берется по всем парциальным ширинам частиц, которые могут быть испущены компаунд-ядром.

Согласно оценке этих авторов, при $E = 1$ MeV для тяжелых ядер $\sigma(h, \gamma) \sim 10^{-26}$ см². Как и следовало ожидать, статистические модели компаунд-ядра приводят к заключению, что множитель $\Gamma_\gamma / \sum_\alpha \Gamma_\alpha$ является плавной функцией от энергии возбуждения и атомного веса. Отсюда, учитывая также и простые соображения о стабильности ядер, вытекает, что для быстрых нейтронов и тяжелых ядер вероятность процесса (h, γ) должна монотонно возрастать с увеличением атомного веса.

В описываемых ниже опытах по определению относительных значений сечений процесса (h, γ) для 19 элементов я пытался выяснить, в какой мере эти общие соображения оправдываются на опыте для нейтронов от реакции (d, d) . Измерение сечений процесса (h, γ) производилось для тех ядер, прилипание нейтронов к которым приводит к образованию известного радиоактивного изотопа.

Определение $\sigma(h, \gamma)$ по величине вызванной нейтронами радиоактивности имеет то преимущество перед определением $\sigma(h, \gamma)$ по суммарному ослаблению пучка нейтронов, что при этом исключаются из рассмотрения процессы упругого и неупругого рассеяния нейтронов. Однако этот способ имеет два недостатка: наличие поглощения β -электронов в толще мишени и стенках измерительного прибора, что заставляет производить измерение слоя половинного поглощения β -электронов в материале мишеней, и возможность образования изомерных активностей с очень короткими или очень длинными периодами. Найденное в таком случае сечение будет меньше истинного.

Облучение набора мишеней исследуемых элементов (Kahlbaum) производилось на циклотроне нейтронами от реакции (d, d). Максимальная энергия нейтронов, испущенных под углом 90° относительно направления ионного пучка, была равна $\sim 2,70$ MeV (энергия дейтронов равна 1 MeV). Наличие около места облучения мишеней больших масс железа (полюса магнита циклотрона) приводило к размытию спектра нейтронов в сторону меньших энергий. Так как средняя энергия неупруго рассеянного нейтрона приблизительно равна корню квадратному из энергии падающего нейтрона (²), энергия вторичных нейтронов должна быть порядка 1—1,5 MeV. Интенсивность источника нейтронов в месте облучения мишеней была эквивалентна ~ 20 кюри (Rh + Be). Широкий энергетический спектр нейтронов приводил к возможности захвата нейтронов на многие ядерные уровни, что исключало влияние резонансных эффектов и других особенностей, обусловленных свойствами индивидуальных ядерных состояний. В опытах с быстрыми нейтронами незначительная примесь медленных нейтронов, рассеянных окружающими предметами, содержащими водород, может совершенно исказить результаты.

В описываемых опытах при облучении мишеней вблизи камеры циклотрона не находились вещества, содержащие водород; мишени всегда окружались кадмием ($0,5$ г/см²) и бором ($1,5$ г/см² в виде B₄C). Тщательными контрольными опытами с родием и марганцем было найдено, что борный экран не вызывает уменьшения активности. Активность также не менялась при окружении мишени серебром слоем серебра и мишени йода слоем йода. Все это давало указание на отсутствие медленных (резонансных) нейтронов около камеры циклотрона.

Облучение мишеней V, Cu (5 мин. период), Rh и Ag производилось в течение 20 мин.; Mn, Br, J, Ba, Dy — в течение 2,9 часа. Остальные элементы, имевшие длительные периоды, облучались непрерывно 36,3 часа. Контрольными измерениями было показано, что колебания интенсивности нейтронного излучения в течение многих часов непрерывной работы циклотрона были порядка 10—15%. Активности мишеней, имевших одинаковые размеры (3×5 см²), измерялись на счетчиках Гейгера с точностью $\pm 3\%$. Обычно фон счетчиков не превышал 5% измеряемых активностей.

Сечение процесса (h, γ) вычислялось по формуле:

$$\sigma(h, \gamma) = \alpha \frac{NA}{\delta},$$

где N — активность мишени, толстой относительно поглощения β -электронов, A — атомный вес, δ — слой половинного поглощения β -электронов в материале мишени; значения δ для исследуемых элементов найдены на опыте и приведены в третьем столбце таблицы.

Так как геометрические условия облучения и измерения активностей всегда были одинаковы, коэффициент α для всех мишеней имеет одну и ту же величину. При измерении N вводились поправки, учитывающие: 1) конечную продолжительность времени облучения; 2) распад между концом облучения и началом измерения; 3) распространность исходного изотопа; 4) поглощение электронов в стенках счетчика (толщина стенок 0,1 мм Al). Для Br, взятого в виде P₂Br₂, и редких земель, взятых в виде окисей, учитывалось также присутствие в материале мишеней посторонних атомов. Результаты опытов приведены в четвертом столбце таблицы. Так как в этих опытах оценить точно число нейтронов было трудно, сечения процесса (h, γ) выражены в относительной шкале: $\sigma(h, \gamma)$ для ванадия положено равным единице. Учитывая большое число поправок, точность результатов должна быть порядка 20%. Для сравнения в пятом и шестом

Относительная шкала значений сечений процесса (h, γ)

Облучаемый изотоп	Период	δ г/см ²	$\sigma(h, \gamma)$ (d, d)	$\sigma(h, \gamma)$ (ThC'' γ - D)	$\sigma(h, \gamma)$ (Ra γ - Be)
Y ⁵¹	3,75 мин.	0,130	1	1	1
Mn ⁵⁵	2,5 часа	0,130	2	1	2,1
Ni		—	—	< 1	—
Cu ⁶³	12,8 часа	0,03	1,3	—	1,7
Cu ⁶⁵	5 мин.	0,14	2	~ 1	1
Zn ⁶⁸	13,8 часа	—	< 0,04	—	—
Zn ⁶⁸	1 час	—	< 0,04	—	—
As ⁷⁵	26,8 часа	0,14	10,4	9,2	15,2
Se		—	—	< 0,3	—
Br ⁷⁹	18 мин.	0,08	25,8	} 17,8	23,3
Br ⁷⁹	4,4 часа	0,08	12,6		12,9
Br ⁸¹	34 часа	—	—	< 3,3	—
Y ⁸⁹	60 час.	0,078	—	—	0,9
Rh ¹⁰³	44 сек.	0,096	20	—	—
Rh ¹⁰³	4,2 мин.	0,096	5,2	—	—
Pd ¹⁰⁸		—	—	27,8	—
Ag ¹⁰⁷	2,3 мин.	0,063	39,4	33,3	47,6
Ag ¹⁰⁹	24 сек.	0,112	55,8	51,1	—
In ¹¹⁵	54 мин.	0,038	—	—	22,4
Sb ¹²¹	2,8 дня	0,073	25,8	12,2	30
Te		—	—	< 1	—
J ¹²⁷	25 мин.	0,076	19,6	19,4	32,9
Ba ¹³⁸	86 мин.	—	< 0,1	0,2	—
La ¹³⁹	42 часа	0,06	3	—	2
Pr ¹⁴¹	19 час.	0,09	6,8	—	5,2
Eu ^{151,153}	6 час.	0,072	—	—	45,2
Tb ¹⁵⁹	2,5 часа	0,041	—	—	1
Tb ¹⁵⁹	3 мес.	0,04	—	—	85,7
Dy ¹⁶⁴	2,5 часа	0,035	13,8	< 7,8	—
Lu ¹⁷⁵	3,5 часа	0,036	—	—	81
W ^{184, 183}	23 часа	0,047	13,2	2,9	—
Ir ^{191, 193}	19 час.	0,07	—	—	62 или 95,2
Au ¹⁹⁷	2,7 дня	0,03	49,8	25,5	62
Te ^{203, 205}	2,5 мин.	0,06	—	~ 1	6,2 или 2,9
Bi ²⁰⁹	5 дней	—	< 0,04	—	—

столбцах таблицы приведены в такой же относительной шкале результаты опытов Хальбана и Коварского⁽³⁾ для нейтронов с энергией $0,220 \pm 0,04$ MeV (ThC'' γ - D) и результаты Гриффица⁽⁴⁾ для нейтронов с энергией 0,04 и 0,45 MeV (Ra γ - Be).

Сопоставление результатов описываемых опытов с данными Гриффица и Хальбана и Коварского показывает, что для нейтронов с энергией, лежащей в пределах от 0,04 до ~ 2 MeV вероятность процесса (h, γ) одинаково меняется с изменением атомного веса. К концу периодической таблицы наблюдается тенденция к возрастанию величины сечения процесса (h, γ), что согласуется с теоретическими выводами. Однако эта общая тенденция часто нарушается. Для некоторых ядер с нечетными Z и A (La, Pr, Bi), распределенных без видимого порядка по периодической таблице, вероятность процесса (h, γ) крайне мала. В некоторых случаях нарушение монотонного возрастания $\sigma(h, \gamma)$ с ростом атомного веса может быть кажущимся,

вызванным изомерией. Так, например, найденное сечение у одного из изотопов серебра меньше истинного, так как у серебра при облучении нейтронами кроме активностей с периодами 2,3 мин. и 24 сек. наблюдается изомерная активность с периодом ~ 225 дней. Производившиеся Гриффитом длительные облучения La и Pr, имеющих низкие сечения $\sigma(h, \gamma)$, не дало указаний на существование у этих ядер длительных изомерных периодов.

Наблюдающиеся нарушения монотонного возрастания $\sigma(h, \gamma)$ с ростом A может быть объяснено флуктуацией величины энергии связи нейтрона с ядром, в силу чего для соседних ядер множитель $\Gamma_\gamma / \Sigma \Gamma_\alpha$ будет различен. Допустимое предположение, что энергия связи нейтрона с ядром меняется в пределах 6—8 MeV, способно в некоторой мере объяснить наблюдающийся нерегулярный характер возрастания сечений захвата быстрых нейтронов тяжелыми ядрами с увеличением атомного веса. Все это не исключает, однако, возможности существования у некоторых ядер сильного запрета для процессов (h, γ) . Так, у висмута процесс (h, γ) должен привести к известному RaE. Все мои попытки заметить превращение $\text{Bi}^{209}(h, \gamma) \text{Bi}^{210}(\text{RaE})$ посредством облучения (d, d) -нейтронами, так же как и ранее делавшиеся многочисленные попытки ⁽⁵⁾ оказались неудачными, хотя известно, что реакция $\text{Bi}^{209}(d, p) \text{Bi}^{210}(\text{RaE})$ идет без труда с дейтонами 5 MeV ⁽⁶⁾.

Я благодарю академика И. В. Курчатова и члена-корреспондента АН СССР П. И. Лукирского за обсуждение результатов и сотрудников циклотронной лаборатории за помощь при облучении мишеней на циклотроне.

Радиевый институт
Академии Наук СССР

Поступило
6 XI 1944

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ V. Weisskopf and D. Ewing, Phys. Rev., **57**, 472 (1940). ² U. Weisskopf, Phys. Rev., **52**, 295 (1937). ³ H. von Halban and L. Kowarski, Nature, **142**, 392 (1938). ⁴ G. Griffiths, Proc. Roy. Soc., A, **170**, 513 (1939). ⁵ E. Amaldi, O. d'Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, F. Rasetti and E. Segrè, Proc. Roy. Soc., A, **143**, 522 (1935); J. McLennan, L. Grimmet and J. Read, Nature, **135**, 505 (1935); S. Sosnowski, C. R., **200**, 1027 (1935); P. Preiswerk and H. von Halban, C. R., **201**, 722 (1935); E. Andersen, Nature, **137**, 457 (1936).