

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<sup>(1)</sup> для нейтронов с энергией  $E > 1$  MeV и достаточно тяжелых ядер ( $A > 50$ ) сечение процесса  $(h, \gamma)$  имеет вид:

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

где  $\pi R^2$  — 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  $\gamma$ -кванта;  $\Gamma_\gamma$  — парциальная ширина уровня для испускания  $\gamma$ -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  $\sigma(h, \gamma) \sim 10^{-26}$  см<sup>2</sup>. 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  $(h, \gamma)$  должна монотонно возрастать с увеличением атомного веса.

В описываемых ниже опытах по определению относительных значений сечений процесса  $(h, \gamma)$  для 19 элементов я пытался выяснить, в какой мере эти общие соображения оправдываются на опыте для нейтронов от реакции  $(d, d)$ . Измерение сечений процесса  $(h, \gamma)$  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  $\beta$ -электронов в толще мишени и стенках измерительного прибора, что заставляет производить измерение слоя половинного поглощения  $\beta$ -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  $90^\circ$  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 (<sup>2</sup>), энергия вторичных нейтронов должна быть порядка 1—1,5 MeV. Интенсивность источника нейтронов в месте облучения мишеней была эквивалентна  $\sim 20$  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/см<sup>2</sup>) и бором ( $1,5$  г/см<sup>2</sup> в виде B<sub>4</sub>C). 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 ( $3 \times 5$  см<sup>2</sup>), измерялись на счетчиках Гейгера с точностью  $\pm 3\%$ . Обычно фон счетчиков не превышал 5% измеряемых активностей.

Сечение процесса ( $h, \gamma$ ) вычислялось по формуле:

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

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

Так как геометрические условия облучения и измерения активностей всегда были одинаковы, коэффициент  $\alpha$  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 PbBr<sub>2</sub>, 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 ( $h, \gamma$ ) 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 ( $h, \gamma$ )

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

столбцах таблицы приведены в такой же относительной шкале результаты опытов Хальбана и Коварского <sup>(3)</sup> для нейтронов с энергией  $0,220 \pm 0,04$  MeV (ThC'' $\gamma$  - D) и результаты Гриффица <sup>(4)</sup> для нейтронов с энергией 0,04 и 0,45 MeV (Ra $\gamma$  - 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 ( $h, \gamma$ ) одинаково меняется с изменением атомного веса. К концу периодической таблицы наблюдается тенденция к возрастанию величины сечения процесса ( $h, \gamma$ ), 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 ( $h, \gamma$ ) 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  $\sim 225$  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  $(h, \gamma)$ . Так, у висмута процесс  $(h, \gamma)$  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 <sup>(5)</sup> оказались неудачными, хотя известно, что реакция  $\text{Bi}^{209}(d, p) \text{Bi}^{210}(\text{RaE})$  идет без труда с дейтонами 5 MeV <sup>(6)</sup>.

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.

Радиовый институт  
Академии Наук СССР

Поступило  
6 XI 1944

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> V. Weisskopf and D. Ewing, Phys. Rev., **57**, 472 (1940). <sup>2</sup> U. Weisskopf, Phys. Rev., **52**, 295 (1937). <sup>3</sup> H. von Halban and L. Kowarski, Nature, **142**, 392 (1938). <sup>4</sup> G. Griffiths, Proc. Roy. Soc., A, **170**, 513 (1939). <sup>5</sup> 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).