

В. С. ДЕМЕНТИЙ и Д. В. ТИМОЩУК

ПОГЛОЩЕНИЕ $V_n + V_0$ НЕЙТРОНОВ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 13 IV 1940)

Данные о взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами до сих пор страдают весьма большой неопределенностью. Происходит это как из-за сложности самих явлений, так и по чисто методическим причинам. Незначительная величина эффектов, производимых быстрыми нейтронами по сравнению с медленными, делает затруднительной работу с ними, а почти неизбежная примесь медленных нейтронов (побочного происхождения) в пучке быстрых делает весьма затруднительной оценку энергии нейтронов, вызывающих тот или иной эффект.

По этим причинам до настоящего времени не разделены достаточно достоверно основные явления, сопровождающие прохождение быстрых нейтронов через вещество (упругое и неупругое рассеяние и поглощение). Так, в экспериментах, имеющих целью определение эффективных поперечников по уменьшению интенсивности приблизительно параллельного пучка нейтронов при прохождении некоторой толщины вещества, определяется суммарный поперечник для всех возможных процессов. В случае окружения источника быстрых нейтронов сферическим слоем вещества упругое рассеяние исключается, но полученный поперечник представляет (при применении детекторов на быстрые нейтроны: Si; Al; P) нижнюю границу для суммы поперечников поглощения и неупругого рассеяния, так как нейтроны, потерявшие некоторую долю начальной энергии, но не вышедшие из области чувствительности детектора, грубо говоря, им отмечаются, и, таким образом, этот процесс не учитывается.

Мы предприняли попытку измерить поперечники поглощения быстрых нейтронов с тем, чтобы при этом устранить другие виды взаимодействия. Кроме возможности более чистого изучения неупругого рассеяния, такой эксперимент дает вероятности эмиссии частиц различного рода из компаунд-ядра. Свободным от приведенных выше возражений является метод, основанный на измерении радиоактивности, образуемой при превращениях, вызываемых нейтронами. Интенсивность β -излучения искусственно образованного радиоактивного вещества в конечном счете пропорциональна интенсивности источника нейтронов и поперечнику поглощения. Поэтому, измерив начальную активность мишени из данного вещества при бесконечно длинном облучении нейтронами из источника известной интенсивности, введя различные поправки на поглощение электронов в мишени и геометрические условия, можно получить поперечник поглощения. Этот метод, следовательно, является непригодным в том случае, когда при захвате нейтрона данным ядром образуется стабильный изотоп или изомер

с очень длинным периодом полураспада. С этим ограничением метод является совершенно точным для реакции типа n, γ . Метод дает верхнюю границу для эндотермических реакций, так как в этом случае трудно оценить число нейтронов, активирующих данное вещество.

В наших опытах мы использовали источник нейтронов, представляющий смесь 200 мг Rn с бериллием. Число нейтронов, эмитируемых этим источником, было определено по методу Ферми и по измерению активности марганца, растворенного в большом сосуде с водой (Т. Д. Гундобина). Оба метода в пределах статистической ошибки дали совпадающие результаты ($4 \cdot 10^6 n/\text{сек}$). Исследованные вещества представляли собой в большинстве случаев цилиндрические мишени, внутри которых по оси помещался источник нейтронов. В некоторых случаях были употреблены плоские мишени и затем специальными экспериментами был найден коэффициент перехода от плоской геометрии к цилиндрической.

Для исключения влияния углового распределения нейтронов из источника довольно больших размеров (диаметр нашего источника равен 18 мм) наиболее активируемая мишень была облучена нейтронами на расстоянии 50 мм от центра источника. На таком расстоянии угловое распределение нейтронов при прохождении их через мишень может быть довольно точно учтено, и, следовательно, может быть получен переходный коэффициент от стандартного в наших опытах облучения в цилиндрической геометрии к плоской, легко рассчитываемой геометрии.

Число нейтронов, поглощаемых мишенью в единицу времени, равно числу радиоактивных атомов, распадающихся за единицу времени после бесконечно долгого облучения. Однако число отсчетов, даваемое счетчиком Гейгера-Мюллера, не равно числу распадов в мишени, так как часть электронов поглощается в мишени и стенках счетчика, а часть проходит мимо счетчика. Для учета геометрических факторов при измерении активности был определен коэффициент полезного действия счетчика путем измерения числа отсчетов, даваемых урановым стандартом с определенным количеством уранил-нитрата. Уранил-нитрат был нанесен тонким слоем на алюминиевую фольгу толщиной 0,05 мм. Поэтому поглощением электронов, а также отражением их от алюминиевой подкладки можно было пренебречь. Зная число β -распадов, происходящих в стандарте, и измеряя число отсчетов, даваемых счетчиком при установке стандарта в положение, аналогичное положению мишеней относительно счетчика, можно было определить долю электронов, отмечаемых счетчиком. Кроме того, вводилась поправка на поглощение электронов в мишени и стенках счетчика. Чувствительность счетной установки контролировалась на протяжении всего времени измерений. Коэффициенты поглощения электронов в мишенях были частично взяты из работы Гриффитса (1). В тех случаях, когда коэффициенты поглощения не были известны, был экспериментально определен коэффициент поглощения электронов в алюминии и затем по экспериментальной кривой, полученной Кразером (2), экстраполировался для данного элемента. В тех случаях, когда не был известен коэффициент поглощения в Al (необходимый для введения поправки на поглощение в стенках счетчика), но был известен для другого элемента (Гриффитс, Гейн и др.), таковой определялся аналогичным образом.

Коэффициент поглощения для β -лучей J^{128} взят из работы Курчатова с сотрудниками (4), для Ni^{63} взят средний коэффициент поглощения, полученный нами и Гейном, для Mn^{56} , Ag^{107} , Sb^{122} взято среднее значение между полученным нами и Гриффитсом, для остальных элементов нами были измерены коэффициенты поглощения β -лучей в Al и экстраполированы вышеуказанным способом для внесения поправки на поглощение в самой мишени.

Результаты измерений представлены в следующей таблице:

Изотоп	Концентрация	Реакция, ведущая к образованию радиоактивного изотопа	Период	К в см ² /г		Поперечник × 10 ²⁶ см		
				в Al	в миш.	*	по Гриффитсу	по Гальбану
Mg ²⁴	0,774	<i>n, p</i>	14 ^h	8,6	8,6	0,75	—	—
Al ²⁷	1,00	<i>n, p</i>	10 ^m	9,6	9,6	1,5	—	—
Al ²⁷	1,00	<i>n, α</i>	14 ^h	8,6	8,6	0,39	—	—
Si ²⁸	0,896	<i>n, p</i>	2,5 ^m	5,2	5,5	3,4	—	—
P ³¹	1,00	<i>n, p</i>	3 ^h	9,6	9,6	4,7	—	—
P ³¹	1,00	<i>n, α</i>	3 ^m	6,5	6,5	0,9	—	—
S ³²	0,96	<i>n, p</i>	15 ^d	9,4	11,8	13,8	—	—
Cl ³⁵	0,76	<i>n, α</i>	15 ^d	9,4	11,8	22,0	—	—
Mn ⁵⁵	1,00	<i>n, γ</i>	2,5 ^h	3,8	5,2	0,56	0,45	0,2
Fe ⁵⁶	0,93	<i>n, p</i>	2,5 ^h	3,8	5,1	0,47	—	—
Cu ⁶⁵	0,32	<i>n, γ</i>	5 ^m	3,8	4,9	0,4	0,21	0,2
Cu ⁶³	0,68	<i>n, p</i>	2,5 ^h	8,5	11,0	0,14	—	—
Zn ⁶⁶	0,272	<i>n, p</i>	5 ^m	3,8	5	0,37	—	—
Br ⁷⁹	0,51	<i>n, γ</i>	18 ^m	6,5	12,2	3,0	4,9	3,8
Br ⁷⁹	0,51	<i>n, γ</i>	4,2 ^h	6,5	12,2	2,4	2,7	—
Rh ¹⁰³	1,00	<i>n, γ</i>	44 ^m	4,3	7,3	4,3	—	—
Ag ¹⁰⁷	0,52	<i>n, γ</i>	2,3 ^m	6,7	9,4	6,0	40	7,2
Sb ¹²¹	0,56	<i>n, γ</i>	2,5 ^d	6,1	11,4	4,1	11,2	4,6
Tl ^{127, 129}	0,518	<i>n, γ</i>	55 ^m	16,4	33,7	4,4	—	—
Si ¹²⁷	1,00	<i>n, γ</i>	25 ^m	5,7	11,7	6,57	6,9	4,2
W ^{184, 186}	0,601	<i>n, γ</i>	1 ^d	10,7	22	1,0	—	—
Au ¹⁹⁷	1,00	<i>n, γ</i>	2,7 ^d	15,2	25,1	5,7	13,0	5,5
Sb ¹²¹	0,56	<i>n, 2n</i>	15 ^m	11,9	22,1	1,3	—	—

Значения поперечников, приведенные в восьмой графе таблицы, получены с учетом полного числа нейтронов, эмитированных источником. Как известно (5), при реакции Rn + Be испускаются не только быстрые нейтроны с энергией порядка нескольких MV, но в значительно большем количестве (5 раз) нейтроны с энергией до миллионо-электронвольт. Поперечники для реакций *n, p* и *n, α*, идущие только с нейтронами достаточно больших энергий (MV), должны быть, следовательно, увеличены в соответствующем отношении. Однако оценить долю активизирующих нейтронов очень трудно, и поэтому соответствующие данные имеют ориентировочный характер. Однако даже ориентировочные соображения показывают, что при больших энергиях процессы, ведущие к поглощению нейтронов, играют, особенно для легких ядер, большую роль. Так, для Cl поперечник поглощения, полученный с учетом доли активизирующих нейтронов, равен $1 \cdot 10^{-24}$ см², т. е. по величине равный поперечнику рассеяния нейтронов. Повидимому, то же имеет место и для других легких ядер, меньшая же величина поперечников обуславливается, очевидно, более высоким порогом соответствующей реакции.

Из таблицы видно, что с увеличением атомного веса поперечники для *n, p* и *n, α* реакций уменьшаются и поперечники для радиационного захвата нейтронов возрастают. Этого и следовало ожидать, так как, с одной стороны, с увеличением атомного веса потенциальный барьер ядра для заряженных частиц увеличивается и, с другой стороны, при увеличении числа частиц в ядре средняя плотность уровней возрастает, что согласно формуле, данной Бете (6) для поперечника поглощения нейтронов средних энергий,

$$\sigma \approx E^{-1/2} D^{-1},$$

* Данные получены при учете полного числа нейтронов, эмитированных источником.

где D —среднее расстояние между уровнями и E —энергия нейтронов, ведет к увеличению поперечника поглощения. Применение этой формулы к $Rn+Be$ нейтронам вполне закономерно, так как, как было указано выше, в спектре $Rn+Be$ нейтронов преобладает группа с энергией около 200 кV. Это подтверждается также тем, что полученные нами значения поперечников поглощения находятся в лучшем согласии с данными Гальбана для нейтронов с энергией 200 кV, чем с данными Гриффитса для нейтронов с энергией до 100 кV. Таким образом, общая тенденция к повышению поперечника для n, γ реакций с увеличением атомного веса, которая в согласии с данными Гриффитса и Гальбана следует из приведенной таблицы, в основном подтверждает справедливость формулы для нейтронов средних энергий.

Кроме того, из данных таблицы следует, что активируются (при реакции n, γ) почти исключительно ядра с нечетным числом частиц. Единственный элемент четного атомного веса, который в наших опытах дал заметную активность (вольфрам), относится к тяжелым элементам, для которых разница в поведении элементов с четным и нечетным числом частиц должна быть меньше. Однако даже для W поперечник поглощения значительно ниже, чем для элементов близкого нечетного атомного веса.

Факт активируемости, главным образом, элементов с нечетным атомным весом позволяет сделать следующие выводы. При попадании нейтрона в различные ядра энергия, которая при этом выделяется, зависит от того, какое компаунд-ядро образуется. При образовании компаунд-ядра с четным числом частиц выделяется, повидимому, большее количество энергии, так как большее число связей между ядерными частицами оказывается заполненным. Повидимому, наибольшее количество энергии выделяется при образовании компаунд-ядра с числом частиц $4n$. Благодаря большому количеству выделяемой энергии степень возбуждения ядра в этом случае будет значительно выше, чем при обычно принимаемой энергии возбуждения. Соответственно этому средняя плотность уровней для этих ядер значительно выше, чем для ядер другого типа. Происходящее при этом уменьшение среднего расстояния между уровнями ведет к повышению поперечника поглощения. Это объяснение находится в удовлетворительном согласии с данными Курчатова с сотрудниками⁽⁴⁾ для нейтронов с энергией около 1 MV, Гриффитса—для фотонейтронов с энергией около 100 кV, а также с данными активируемости элементов тепловыми нейтронами. Большие поперечники для поглощения медленных нейтронов некоторыми изотопами с четным числом частиц, повидимому, можно понять в предположении, что, несмотря на большие расстояния между уровнями энергии у соответствующих компаунд-ядер, некоторые из уровней могут оказаться вблизи нуля, что и приводит к большому поперечнику поглощения нейтронов в области малых энергий.

Выражаем благодарность А. И. Лейпунскому за помощь, оказанную нам при выполнении работы.

Украинский физико-технический
институт
Харьков

Поступило
8 IV 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Griffiths, Proc. Roy. Soc. A, 170, 513 (1939). ² Crowther, Kollgausch, Handbuch der Experiment. Physik (1927). ³ Neun, Physica, 4, 1224 (1937).
⁴ Курчатов и др. Доклад на всесоюзном совещании по атомному ядру в 1939 г. в Харькове. ⁵ Jergge, Proc. Roy. Soc., 164, 243 (1938). ⁶ Vethe, Rev. Mod. Phys., 9, 151 (1937).