

УДК 539.171.017.4

## Энергетическое и угловое распределения нейтронов, возникающих при бомбардировке $^{238}\text{U}$ нейтронами с энергией 2,47 МэВ

БАРЫБА В. Я., ЖУРАВЛЕВ Б. В., КОРНИЛОВ Н. В., САЛЬНИКОВ О. А.

Исследование взаимодействия нейтронов с энергией  $\sim 2,5$  МэВ с ядрами  $^{238}\text{U}$  важно для расчета быстрых реакторов, а также для выяснения механизма ядерных реакций и структуры ядра.

Результаты по неупругому рассеянию наряду с данными по сечению захвата для энергий нейтронов 0,8—2,5 МэВ требуют наибольшего уточнения для того, чтобы обеспечить погрешность  $\pm 2\%$  в расчете коэффициента воспроизводства быстрого реактора [1].

В некоторых работах отмечается значительная асимметрия в угловом распределении неупругорассеянных нейтронов, однако данные о величине этого эффекта противоречивы. Так, в работе [2] при энергии нейтронов 2,3 МэВ отношение сечений рассеяния для группы уровней  $-0,9 > Q > -1,35$  МэВ для углов 30 и 90° составляет  $\sim 1,5$  [3], при энергии 2 МэВ  $\sim 1,15$ .

Несомненный интерес представляет изучение зависимости формы спектра нейтронов деления от угла вылета нейтронов. Закономерности, полученные при начальной энергии  $\sim 2$  МэВ, позволяют более корректно выполнить экстраполяцию в область энергий 5—9 МэВ, где исследование спектров нейтронов деления затруднено.

Измерение угловых распределений и спектров, возникающих при взаимодействии нейтронов с энергией 2,47 МэВ с ядрами  $^{238}\text{U}$ , были выполнены методом времени пролета на ускорителе ЭГП-10М. Длительность импульса  $\sim 2$  нс, частота следования 5 МГц. Разрешение спектрометра  $\sim 3$  нс (ширина на полувысоте  $\gamma$ -пика). Пролетная база 497 см.

Для получения нейтронов использовалась реакция  $T(p, n)^3\text{He}$ . Источником нейтронов служила твердая тритиевая мишень толщиной

1,5 мг ( $\Delta E \approx 100$  кэВ). Для изготовления рассеивателей использовался металлический уран с четырехкратным обеднением по  $^{235}\text{U}$ . Рассеиватели представляли собой полые цилиндры высотой ( $H$ ), внешним радиусом ( $R_1$ ) и внутренним ( $R_2$ ) (табл. 1).

Для выделения вклада многократного рассеяния под углом 90° проводились измерения со всеми образцами. При измерении под углами 30, 60, 120, 150° использовался образец 3. Регистрация нейтронов осуществлялась детектором на основе стибьбена  $\phi 70$  мм,  $h = 50$  мм и ФЭУ-30 с компенсацией  $\gamma$ -лучей [4.] Принципиальная схема используемой электронной аппаратуры и описание детектора даны в работе [4]. Отличительной чертой является использование в стартовом канале дискриминатора, срабатывающего при фиксированной доле заряда [5]. Для мониторинга использовался сцинтилляционный детектор, регистрирующий лишь события, попавшие в интервал  $\sim 30$  нс вблизи момента времени, соответствующего прилету нейтронов с энергией 2,47 МэВ из мишени. Для контроля регистрировались показания всеволнового детектора и интегратора тока. Как

Размер рассеивателей, мм

Таблица 1

Номер образца	$R_1$	$R_2$	$H$
1	22,6	19,9	48,7
2	22,5	17,6	49,2
3	22,5	14,9	48,9

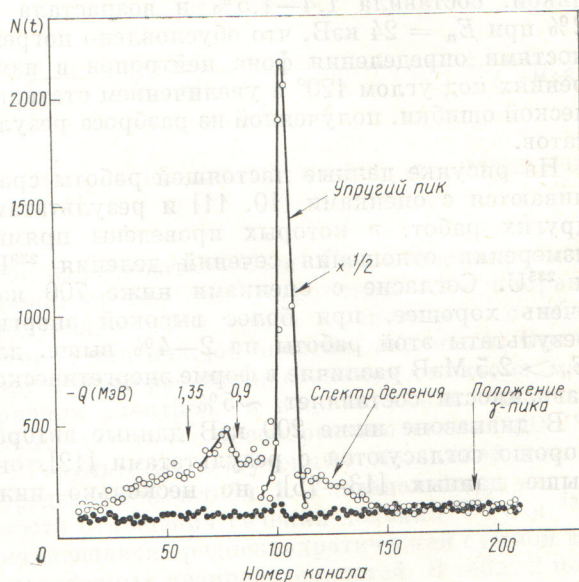


Рис. 1. Аппаратурные спектры, полученные под углом 90°: ○ — эффект плюс фон; ● — фон



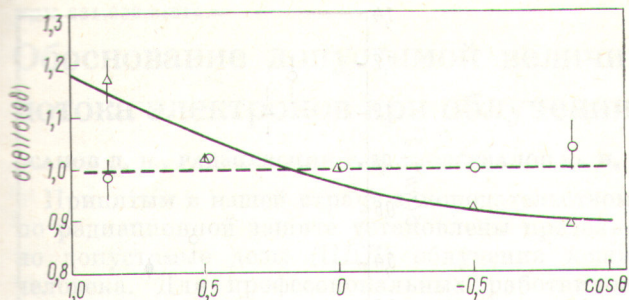


Рис. 2. Относительные угловые распределения неупругорассеянных нейтронов (Δ) и нейтронов деления (○)

и в работе [6], эффективность определялась по спектру мгновенных нейтронов деления <sup>252</sup>Cf. На основе результатов [7] и анализа опубликованных данных спектр Cf описывался формулой Террелла с параметром  $T = 1,42$  МэВ. Порог детектора 0,5 МэВ.

Типичный временной спектр под углом 90° показан на рис. 1. Обращает на себя внимание широкий пик, соответствующий возбуждению группы уровней с  $-0,9 > Q > -1,35$  МэВ и достаточно большая часть спектра нейтронов деления ( $E > 3$  МэВ), с помощью которой можно провести расчет абсолютных сечений и экстраполяцию спектра нейтронов деления в область малых энергий.

Для определения абсолютной величины сечения неупругого рассеяния использовали следующие значения:  $\sigma_f = 0,55$  б [8];  $\nu = 2,66$  [9]. Из измерений с образцами разной толщины, выполненных под углом 90°, методом, описанным в работе [7], извлекалась поправка на многократное рассеяние. Результаты расчета применяли для обработки спектров, полученных под остальными углами.

**Неупругое рассеяние.** На рис. 2 представлено относительное сечение  $\sigma(\theta)/\sigma(90^\circ)$  рассеяния нейтронов с возбуждением группы уровней  $-0,9 > Q > -1,35$  МэВ и результат описания полученной зависимости полиномами Лежандра:

$$\sigma(\theta)/\sigma(90^\circ) = 1/4\pi (a_0 + a_1P_1 + a_2P_2),$$

где  $a_0 = 12,57 \pm 0,23$ ;  $a_1 = 1,77 \pm 0,36$ ;  $a_2 = 0,59 \pm 0,50$ . Полное сечение неупругого рассеяния для этой группы уровней составляло  $380 \pm 25$  мб. В ошибку указанной выше величины включены: погрешность описаний угловых распределений полиномами 2%, полученная из ошибки угловых распределений 4–6%; погрешность нормировки 5% и интегрирования спектра 4%.

**Спектр нейтронов деления.** Часть спектра в области энергии 3–9 МэВ обусловлена нейтронами деления. Эта часть описывалась максвелловским распределением  $E^{1/2} \exp(-E/T)$ , и методом наименьших квадратов определялся параметр  $T$ . В табл. 2 приведены значения этого параметра для разных углов и образцов:  $\bar{T} = 1,33 \pm 0,04$  МэВ;  $\bar{E} = 3/2 \bar{T} = 1,995 \pm 0,060$  МэВ. Ошибка параметра  $\bar{T}$  получена как среднее квадратическое отклонение от  $T$  (в погрешность  $T$  не включена неопределенность в описании спектра <sup>252</sup>Cf).

Относительное угловое распределение нейтронов деления, проинтегрированных в интервале энергий 3–9 МэВ, и описание этого распределения полиномами Лежандра представлены на рис. 2 ( $a_0 = 12,66 \pm 0,15$ ;  $a_1 = -(0,27 \pm 0,22)$ ;  $a_2 = 0,09 \pm 0,30$ ). На рис. 3 изображены спектры нейтронов деления, полученные под углом 90°, и их описание максвелловским распределением с параметром  $T = 1,33$  МэВ.

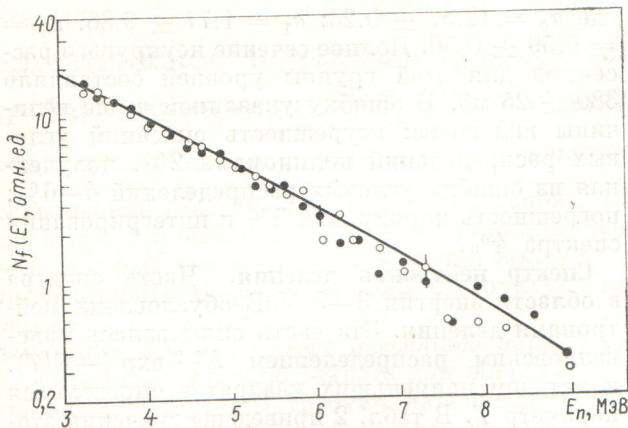
Полученное в настоящей работе сечение неупругого рассеяния с возбуждением группы уровней  $-0,9 > Q > -1,35$  МэВ не противоречит тенденции уменьшения этой величины при начальной энергии падающих нейтронов  $\sim 2$  МэВ (рис. 4). Отмеченная асимметрия в угловом распределении неупругорассеянных нейтронов подтверждает результаты работ [2, 3], хотя для надежного количественного описания нужны дополнительные исследования. Следует отметить определенные трудности в объяснении природы образования выделенной группы уровней и угловых распределений. В табл. 3 при-

Значение параметра  $T$

Таблица 2

Номер образца	Угол, град				
	30	60	90	120	150
2	—	—	1,28±0,04	—	—
3	1,31±0,05	1,36±0,05	1,32±0,04	1,38±0,05	1,33±0,04





Р и с. 3. Спектр нейтронов деления (90°) образцов 2 (●) и 3 (○): ———— — рассчитанный спектр с параметром  $T = 1,33$  МэВ

ведены значения параметра  $T$ , полученные при близких начальных энергиях. Согласие результатов удовлетворительное. В пределах точности эксперимента в этой работе не обнаружена какая-либо угловая зависимость в форме спектров и абсолютной величине эмиссии нейтронов деления, обладающих энергией 3—9 МэВ. Подобный вывод подтверждается теоретической оценкой. Как показано в работе [12], угловое

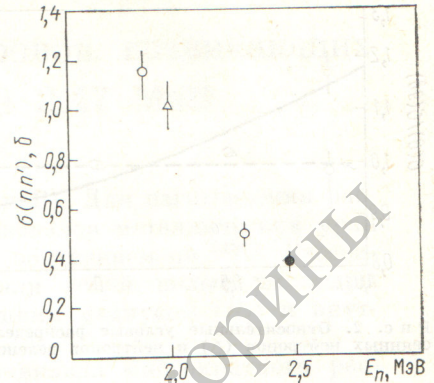
Значения параметра  $T$  Таблица 3

$E$ , МэВ	$T$ , МэВ	Литература
2,09	$1,285 \pm 0,03$	[10]
2,30	$1,230 \pm 0,06$	[2]
2,02	$1,290 \pm 0,02$	[11]
1,90	$1,350 \pm 0,06$	[2]
2,47	$1,330 \pm 0,04$	Настоящая работа

распределение нейтронов деления можно представить в виде

$$W(\theta) = \sum_i a_i b_i \left( \frac{2}{2i+1} \right) P_i(\cos \theta),$$

где  $a_i, b_i$  — коэффициенты разложения угловых распределений осколков относительно



Р и с. 4. Полное сечение рассеяния нейтронов с возбуждением группы уровней  $-0,9 > Q > -1,35$  МэВ: ○ — [2]; △ — [3]; ● — настоящая работа

направления падающего пучка и нейтронов относительно фиксированного направления разлета осколков. Воспользовавшись результатами работ [13, 14], можно получить  $W(0^\circ)/W(90^\circ) \approx 1,06$ .

Поступила в Редакцию 15/II 1977 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Усачев Л. Н. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика», Киев, 28 мая — 1 июня 1973.
- Knifer H., Coppola M. e.a. «Z. Phys.», 1971, bd. 244, S. 358.
- Batchelor R., Gilboy W. «Nucl. Phys.», 1965, v. 65, p. 236.
- Барыба В. Я. и др. Препринт ФЭИ-577, 1975.
- Нестеренко В. С. и др. Препринт ФЭИ-724, 1976.
- Бирюков Н. С. и др. Препринт ФЭИ-687, 1976.
- Барыба В. Я. и др. Препринт ФЭИ-671, 1976.
- Николаев М. Н. В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерные константы». Вып. 8. Ч. 1. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1972.
- Нурписов В. и др. Препринт ФЭИ-543, 1974.
- Barnard E.e.a. «Nucl. Phys.», 1965, v. 17, N 1.
- Almen E., Holmgvist V. In: Proc. IAEA Symp. «Nucl. Data for Reactors — 1970». Helsinki, 15—19 June 1970, v. 2, p. 93.
- Бирюков Н. С. и др. [8]. Вып. 12. Ч. 1. 1973.
- Simmons I., Henkel R. «Phys. Rev.», 1960, v. 120, p. 198.
- Borwman H., Thompson S. «Phys. Rev.», 1962, v. 126, p. 2120.