

## ПОГЛОЩЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ ЯДРАМИ УРАНА, СОПРОВОЖДАЕМОЕ ИСПУСКАНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Г.Е. Беловицкий, В.Н. Баранов, Д.А. Валишина, Н.В. Масленникова,  
К. Петижан \*)

УДК 539.172.58.12/16

*Впервые исследовано испускание заряженных частиц (p, d, t, α) при поглощении отрицательных мюонов ядрами урана, а также в процессе деления этих ядер. Получены угловые и энергетические распределения и вероятности эмиссии этих частиц.*

При захвате отрицательного мюона ядром происходит реакция:  $\mu^- + (A, Z) \rightarrow (A^*, Z - 1) + \nu_{\mu}$ . Большая часть высвобождаемой энергии ( $\sim 100$  МэВ) уносится нейтрино. Средняя энергия возбуждения ядра  $A^* \sim 20$  МэВ /1/. Снятие возбуждения ядра происходит в основном за счет эмиссии нейтронов. Испускание заряженных частиц изучалось в работах /2, 3/.

В настоящей работе впервые исследовалось поглощение отрицательных мюонов в  $^{238}\text{U}$ , сопровождаемое испусканием p, d, t, α. Поглощение мюона ураном идентифицировалось по делению ядра. В процессе деления также вылетают p, d, t, α /4/. Они отделялись от частиц, вылетающих до деления, на основе хорошо известного их углового распределения, которое не зависит от энергии первичной частицы и от атомного веса делящегося ядра /4/.

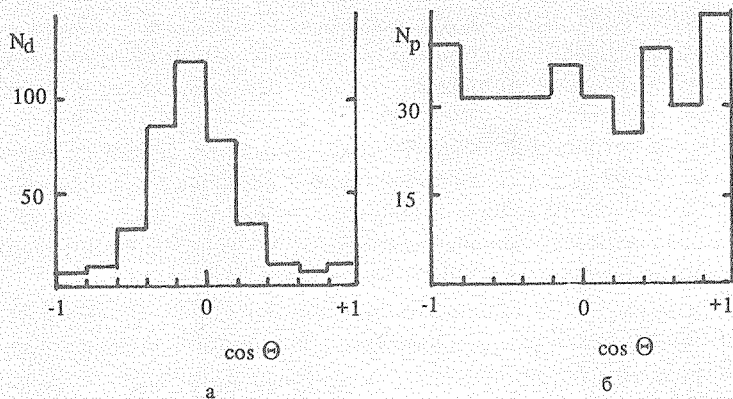
В качестве мишени и детектора частиц использовались фотоэмульсии толщиной  $\sim 150$  мкм, регистрировавшие протоны с энергией до 50 МэВ. Фотоэмульсии облучались в пучке  $\mu\text{E4}$  мюонами с импульсом  $P_{\mu} \sim 30$  МэВ/с в Швейцарском институте ядерных исследований. Плотность остановок мюонов  $\sim (4 \div 8) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

Было проанализировано  $3 \cdot 10^5$  делений урана мюонами. Среди них выявлено 1156 событий, в которых из точки деления вылетает заряженная частица.

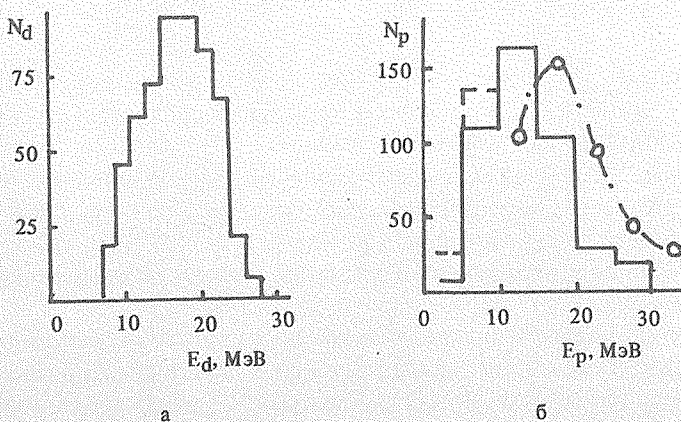
Все частицы по заряду были разделены на две группы:  $Z = 1$  ( $\mu$ , p, d, t) и  $Z = 2$  (альфа-частицы). Заряд и энергия частиц, останавливающихся в фотоэмульсии, определялись по ионизации и пробегу. Точность определения

\*) Швейцария, СН-5254, Виллиген.

энергии  $\sim 2\%$ . Все частицы с  $Z = 1$  считались протонами. Подавляющее большинство из них не останавливаются в фотослое, поэтому их энергия определялась с точностью до 20%. В реакциях, вызываемых мюонами, доля дейтронов и тритонов  $< 0,2$ . Поэтому энергетический спектр протонов заметно не искажается.



Р и с. 1. Угловое распределение альфа-частиц (а) и протонов (б).



Р и с. 2. Энергетический спектр альфа-частиц (а) и протонов (б).

Примесь пионов в пучке мюонов была незначительной ( $3 \cdot 10^{-4}$ ). Эффективность регистрации делений без вылета и с вылетом заряженных частиц оказалась одинаковой лишь для следов частиц, образующих угол с плоскостью фотоэмульсии  $\varphi_r < 45^\circ$ . Поэтому при расчетах вероятностей вылета заряженных частиц использовались частицы  $\varphi_r < 45^\circ$ .

*Альфа-частицы.* На рис. 1а приведено угловое распределение альфа-частиц относительно направления движения тяжелого осколка. Такое распределение типично для альфа-частиц, вылетающих в процессе деления /4/. Альфа-частицы, испускаемые до деления, должны иметь изотропное угловое распределение; их доля не превышает  $10 \div 15\%$  (при учете полярных альфа-частиц).

На рис. 2а представлен энергетический спектр альфа-частиц, полученный с помощью альфа-частиц, остановившихся в фотоэмульсии, с учетом того, что вероятность их остановок в фотослое зависит от длины пробега. Этот спектр характеризуется средней энергией  $E_\mu = 16,6 \pm 0,3$  МэВ и полной шириной на половине высоты (ПШПВ)  $11,7 \pm 0,4$  МэВ.

При делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами  $\bar{E}_\alpha = (15,9 \pm 0,2)$  МэВ и ПШПВ =  $9,9 \pm 0,3$  МэВ /5/. Это различие в  $\bar{E}_\alpha$  связано с присутствием в данном спектре альфа-частиц, испущенных до деления, которые обладают большей энергией.

Вероятности испускания альфа-частиц в процессе ( $N_\alpha = 312$ ) и до деления ( $N_\alpha = 55$ ) на один акт деления оказались равными:

$$W_{\mu\alpha f} = (0,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ и } W_{\mu f \alpha} = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}.$$

Значение  $W_{\mu f \alpha}$  близко к  $W_{nf\alpha}$  полученному при делении  $^{235}\text{U}$  нейтронами с  $E_n = 14$  МэВ /4/, что и следовало ожидать при одинаковом механизме эмиссии альфа-частиц в процессе деления.

*Протоны.* На рис. 1б приведено угловое распределение протонов относительно направления движения тяжелого осколка. Оно существенно отличается от углового распределения альфа-частиц (рис. 1а). Большая часть протонов испускается изотропно, что и следовало ожидать для частиц, вылетающих до деления /6/.

На рис. 2б приведен энергетический спектр протонов, испущенных до деления, пунктиром показан вклад протонов, испущенных в процессе деления.

Число протонов, испущенных до деления,  $N_{p1}$  равно общему числу протонов ( $N_p = 818$ ) за вычетом "фоновых" (протоны, испущенные в процессе деления, протоны от примеси пионов ( $\pi p f$ ) и неидентифицированные мюоны

конверсии, вылетающие из фотослоя). Общее число "фоновых" частиц  $N_{\Phi} = 165$ . Отсюда  $N_{p1} = 818 - 165 = 653$ , а вероятность их эмиссии  $W_{\mu pf} = (2,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ .

Вероятность вылета протона с последующим делением ядра на один захват мезона  $P_{\mu pf} = W_{\mu pf} W_{\mu f}$ . Так как вероятность деления ядер урана-238 мюонами  $W_{\mu f} = 0,07 \pm 0,01$  /6, 7/, то  $P_{\mu pf} = (0,17 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$ .

Расчетный спектр протонов /8/ приведен на рис. 26 штрих-пунктирной линией. Форма этого спектра находится в качественном согласии с экспериментальной, однако его максимум смещен на 5 МэВ в область больших энергий. Расчетные значения вероятностей  $P_{\mu pf} = 0,63 \cdot 10^{-3}$  и  $W_{\mu f} = 0,16$  /8/ оказались в 4 и 2 раза больше экспериментальных. Это указывает на необходимость дальнейшего развития теории поглощения мюонов тяжелыми ядрами.

Институт ядерных исследований

Поступила в редакцию 18 июня 1985 г.

АН СССР

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lifshitz M., Singer P. Phys. Rev., C 22, 2135 (1980).
2. Батусов Ю.А., Эрамжан Р.А. ЭЧАЯ, 8, 229 (1977).
3. Wyttenbach A. et al. Nucl. Phys., A 294, 278 (1978).
4. Адамов В.М. и др. Ядерная физика, 9, 732 (1969); 13, 939 (1971).
5. Грачев В.Т. и др. Ядерная физика, 32, 1186 (1980).
6. Беловицкий Г.Е. и др. ЖЭТФ, 29, 537 (1955); ЖЭТФ, 38, 404 (1960).
7. Ahmad S. et al. Phys. Lett., 92 B, 83 (1980).
8. Kozlowski T., Zglinski A. Nucl. Phys., A 305, 368 (1978).