

УДК 539.172.58

## ИСПУСКАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР УРАНА ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ПИОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1700 МэВ

Г. Е. Беловицкий, О. М. Штейнград

*Исследовалось деление ядер урана отрицательными пионами с энергией 1700 МэВ, сопровождаемое эмиссией заряженных частиц. Впервые наблюдался вылет заряженных частиц из осколков. Вероятность эмиссии составляет 0,8 на акт деления. Время жизни остаточного возбужденного ядра относительно деления оказалось сравнимым с временем жизни относительно эмиссии заряженных частиц.*

Деление ядер частицами большой энергии сопровождается испусканием заряженных частиц ( $Z = 1$  и  $2$ ). Эти частицы вылетают до деления – на каскадно-испарительной стадии процесса взаимодействия, при делении и после деления. Исследование эмиссии этих частиц может дать новую информацию о механизме деления и свойствах возбужденных осколков.

В опытах по делению ядер урана медленными отрицательными пионами и протонами с энергией 153 МэВ впервые был обнаружен вылет заряженных частиц малой энергии ( $E_p < 15$  МэВ), в основном, из тяжелых осколков. Вероятность эмиссии возрастает с увеличением асимметрии деления [1 – 3].

Целесообразно выяснить механизм и энергетическую зависимость эмиссии заряженных частиц из осколков, образующихся при делении ядер урана частицами больших энергий – отрицательными пионами с энергией 1700 МэВ.

Основное внимание уделено изучению угловых распределений заряженных частиц ( $Z = 1$  и  $2$ ) относительно направлений движения тяжелых осколков и первичного пучка пионов и энергетических распределений этих частиц.

В работе использовались бесподложечные толстослойные (толщиной до 300 мкм) фотоэмульсии низкой чувствительности, эффективно регистрирующие протоны с энергией до 10 МэВ, изготовленные в НИИХИМФОТОПРОЕКТ, загруженные ураном и облученные пучком отрицательных пионов с энергией 1700 МэВ в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ). Поток пионов, падавших перпендикулярно плоскости фотоэмульсии, составлял  $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Методика обработки фотоэмульсий и их просмотра под микроскопом описаны ранее в работах [1 - 4].

Было проанализировано  $N_f = 2280$  делений ядер урана-238 пионами. Среди них выявлено 1265 делений, сопровождаемых эмиссией от одной до десяти заряженных частиц. Измерялись пробеги легких ( $R_l$ ) и тяжелых ( $R_h$ ) осколков и заряженных частиц и углы между ними, а также с первичным пучком пионов. Кроме того, измерялась ионизация, вызываемая частицей (плотность зерен).

Массы и энергии определялись лишь для частиц, остановившихся в фотоэмульсии и образующих с плоскостью фотоэмульсии угол  $< 45^\circ$ . Измерение ионизации на следе частицы позволяло с помощью калибровочных кривых определить массу частицы, а с учетом ее пробега - энергию [4].

Результаты измерений вносились в ЭВМ, где с помощью небольшого пересчета определялись энергия и пространственные углы. Эти данные анализировались с помощью ряда программ, позволяющих построить всевозможные угловые и энергетические распределения с учетом различных поправок.

Среди зарегистрированных частиц присутствуют частицы, испущенные до деления, в процессе деления и из осколков. Частицами, испущенными в процессе деления, можно пренебречь, так как они составляют 1% от общего числа частиц.

Фотоэмульсии низкой чувствительности регистрировали протоны с энергией до 10 МэВ с эффективностью 100%. Подавляющее число частиц испущено из остаточного ядра в процессе испарения и из осколков.

Такой же вывод вытекает из измерений углового распределения частиц относительно направления первичного пучка пионов. Оказалось, что отношение числа частиц, испущенных вперед и назад относительно направления первичного пучка пионов, составляет  $1,06 \pm 0,05$ .

На рис. 1 приведено энергетическое распределение протонов, сопровождающих деление ядер урана пионами с энергией 1700 МэВ. Стрелками указаны высоты кулоновских барьеров для эмиссии протонов из ядер урана (13 МэВ) и из осколков (6 - 7 МэВ). Согласно известным экспериментальным данным для протонов, испущенных до деления из

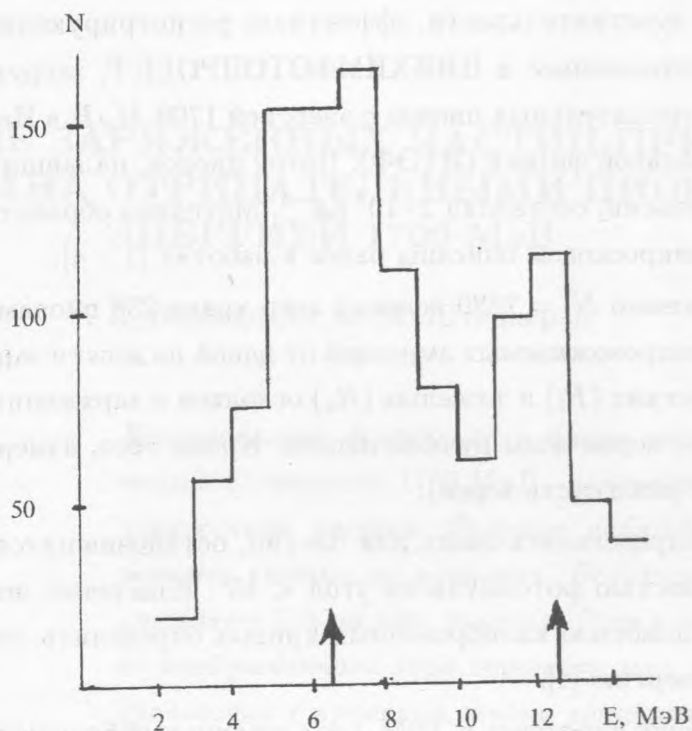


Рис. 1. Энергетическое распределение протонов.

покоящихся ядер урана, максимум в энергетическом распределении лежит при энергии 12 – 15 МэВ [1 – 5], а для покоящихся ядер, имеющих заряд  $Z \approx 45$ , соответствующих осколкам деления, максимум в спектре протонов лежит при энергии протонов 6 – 7 МэВ [5].

Поэтому энергетическое распределение протонов, приведенное на рис. 1, естественно разделить на два: для протонов с энергией менее 10 МэВ, испущенных из осколков, и протонов с энергией более 10 МэВ, испущенные из остаточного компаунд-ядра.

При этом оказалось, что частицы, испущенные из осколков, составляют 70% от всех зарегистрированных частиц. Эта величина оказалась практически одинаковой как для делений, сопровождаемых вылетом малого числа частиц (менее четырех), так и большого числа частиц.

Сдвиг указанной граничной энергии в сторону меньших значений ( $E_p < 9$  МэВ) мало изменяет эту величину. Примерно такой же результат получен и для других частиц

с  $Z = 1, 2$ .

Следует еще отметить, что энергетическое распределение протонов, испущенных в направлении движения тяжелых и легких осколков, оказалось одинаковым, что также указывает на эмиссию из неускоренных осколков.

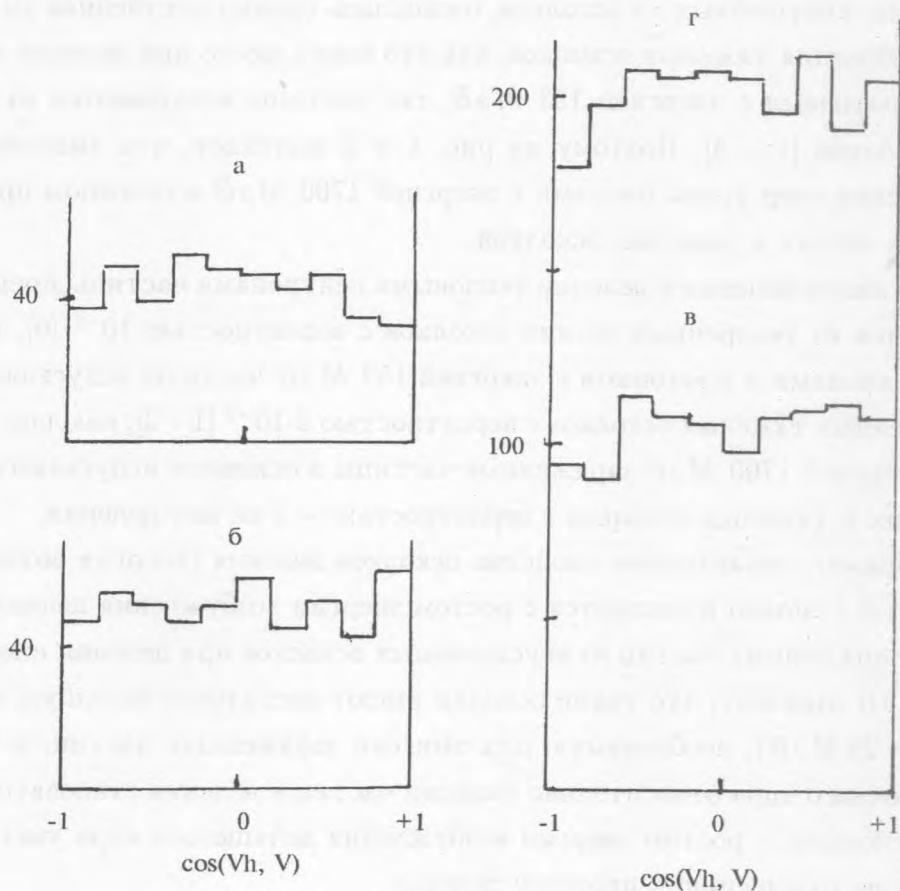


Рис. 2. Угловые распределения частиц относительно направления тяжелого осколка: а - для  $M_h/M_l < 1,15$ ; б - для  $1,15 < M_h/M_l < 1,3$ ; в - для  $M_h/M_l > 1,3$ ; г - для  $M_h/M_l > 1$ ;  $V, V_h$  - направления движения легких частиц и тяжелых осколков.

Вероятность эмиссии заряженных частиц из осколков составляет 0,8 на акт деления, что в 30 раз больше, чем при делении ядер урана медленными пионами и протонами с энергией 153 МэВ.

На рис. 2 приведены угловые распределения заряженных частиц относительно направления движения тяжелого осколка ( $V_h$ ) для разных значений асимметрии делений



$M_h/M_l \sim R_l/R_h$ , где  $M_h$  и  $M_l$  – массы тяжелого и легкого осколков.

Практически для всех значений асимметрии деления наблюдается изотропное угловое распределение частиц. Не видно преимущественной эмиссии частиц по направлению движения осколков. Известно, что для частиц, испускаемых до деления, это угловое распределение изотропно [4].

Для частиц, испущенных из осколков, ожидалась преимущественная эмиссия по направлению движения тяжелых осколков, как это имеет место при делении медленными пионами и протонами с энергией 153 МэВ, где частицы испускаются из ускоренных тяжелых осколков [1 – 3]. Поэтому из рис. 1 и 2 вытекает, что эмиссия частиц из осколков деления ядер урана пионами с энергией 1700 МэВ в основном происходит из неускоренных легких и тяжелых осколков.

При спонтанном делении и делении тепловыми нейтронами частицы преимущественно испускаются из ускоренных легких осколков с вероятностью  $10^{-5}$  [6], при делении медленными пионами и протонами с энергией 153 МэВ частицы испускаются в основном из ускоренных тяжелых осколков с вероятностью  $2 \cdot 10^{-2}$  [1 – 3], наконец при делении пионами с энергией 1700 МэВ заряженные частицы в основном испускаются из неускоренных легких и тяжелых осколков с вероятностью  $\sim 1$  на акт деления.

Таким образом, характерные свойства осколков деления (энергия возбуждения, деформация и т.п.) сильно изменяются с ростом энергии возбуждения делящегося ядра.

Эмиссия заряженных частиц из неускоренных осколков при делении пионами с энергией 1700 МэВ означает, что такие осколки имеют достаточно большую энергию возбуждения ( $> 20$  МэВ), необходимую для эмиссии заряженных частиц, и что времена жизни остаточного ядра относительно эмиссии частиц и деления становятся сравнимыми. Иными словами, с ростом энергии возбуждения делящегося ядра уменьшается его время жизни по отношению к процессу деления.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беловицкий Г. Е., Баранов В. Н., Петижан К. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 15 (1991); ЯФ, **55**, 2319 (1992).
- [2] Беловицкий Г. Е., Баранов В. Н., Штейнград О. М. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11 – 12, 3 (1993); ЯФ, **57**, 2140 (1994).
- [3] Беловицкий Г. Е., Баранов В. Н., Штейнград О. М. ЯФ, **58**, 2131 (1995).
- [4] Беловицкий Г. Е. и др., ЯФ, **43**, 1057 (1986).

- [5] Markel W. et al., Nucl. Phys. A, **485**, 445 (1988).
- [6] Nowicki L. et al., Nucl. Phys. A, **375**, 187 (1982).

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 17 мая 1996 г.