

УДК 539.172.58

ИСПУСКАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР УРАНА ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 153 МэВ

Г. Е. Беловицкий, В. Н. Баранов, О. М. Штейнград

Исследовалось деление ядер урана протонами с энергией 153 МэВ, сопровождаемое эмиссией заряженных частиц. Впервые наблюдался вылет заряженных частиц из тяжелых осколков, вероятность которого возрастает с ростом асимметрии деления и для тяжелых осколков составляет $\sim 10^{-2}$ на акт деления.

Деление ядер частицами большой энергии сопровождается испусканием заряженных частиц (изотопов водорода и альфа-частиц). Эти частицы вылетают до деления, в процессе деления и после него. Исследование эмиссии этих частиц может дать новую информацию о механизме деления и свойствах возбужденных осколков.

В опытах по делению ядер урана медленными пионами впервые обнаружена сильная анизотропия вылета заряженных частиц малой энергии ($E_p < 15$ МэВ), которая возрастает с увеличением асимметрии деления [1].

Целесообразно выяснить зависимость этого эффекта от природы и энергии первичной частицы, вызывающей деление ядра. В связи с этим нами были выполнены опыты по делению ядер урана протонами с энергией 153 МэВ. Основное внимание уделено изучению угловых распределений заряженных частиц относительно направлений вылета тяжелых осколков и первичного пучка протонов.

В работе использовались бесподложечные толстослойные (толщиной до 300 мкм) фотоэмульсии низкой чувствительности, изготовленные в НИИХИМФОТОПРОЕКТ, загруженные ураном и облученные на пучке протонов с энергией 153 МэВ в Институте теоретической и экспериментальной физики. Поток протонов, падающих перпендикулярно плоскости фотоэмульсии, составлял $(4 - 8) \cdot 10^7$ см⁻². Методика обработки фотоэмульсий и их просмотра под микроскопом описана в [2].

Было проанализировано 26500 делений ядер урана-238 протонами. Среди них выявлено 1400 делений, сопровождающихся эмиссией одной заряженной частицы, и 30, сопровождающихся эмиссией двух частиц. Измерялись пробеги легких (R_l) и тяжелых (R_h) осколков и заряженных частиц и пространственные углы между ними, а также относительно первичного пучка протонов. Кроме того, измерялась ионизация, вызываемая частицей (плотность зерен). При этих измерениях установлено, что в использовавшихся нами фотоэмульсиях низкой чувствительности регистрируются протоны с энергией от 1 до 12 МэВ, тритоны с энергией от 5 до 23 МэВ и альфа-частицы с энергией от 5 до 30–40 МэВ. Относительные выходы p, t и альфа-частиц в делениях, сопровождаемых их эмиссией, составляли примерно 10, 40 и 50%. В настоящей работе приведены результаты измерений угловых распределений частиц с $Z = 1$ и 2 (без разделения по массам и энергиям), а также осколков деления.

Угловое распределение тяжелых осколков относительно плоскости, перпендикулярной к первичному пучку протонов, оказалось симметричным, а число тяжелых осколков, испускаемых вперед и назад относительно пучка протонов, одинаковым ($1,06 \pm 0,07$). Этот результат согласуется с работой [3].

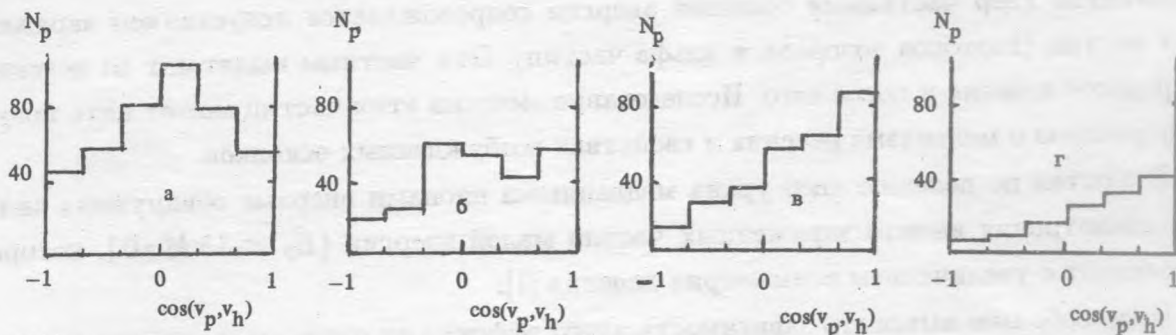


Рис. 1. Угловые распределения частиц относительно направления движения тяжелого осколка (V_h) (V_p – направление движения частицы): а) $M_h/M_l < 1.15$; б) $1.15 < M_h/M_l < 1.3$; в) $M_h/M_l > 1.3$; г) $M_h/M_l > 1.5$.

На рис. 1 приведены угловые распределения заряженных частиц относительно направления движения тяжелого осколка для разных значений асимметрии деления $M_h/M_l \sim R_l/R_h$, где M_h и M_l – массы тяжелого и легкого осколков. Видно, что с ростом M_h/M_l возрастает доля частиц, вылетающих по направлению движения тяжелого осколка. На рис. 1а для симметричных делений наблюдается интенсивный пик под углами $70^\circ - 110^\circ$ к линии разлета осколков. Такое угловое распределение характерно для заряженных частиц (t и α), испускаемых в процессе деления [4]. В то же время на этом

рисунке не видно эмиссии частиц под небольшими углами к направлению движения осколков.

На рис. 16 помимо изотропной части углового распределения наблюдается менее интенсивный пик под углами $70^\circ - 110^\circ$ и становится заметной эмиссия частиц в направлении движения тяжелых осколков.

На рис. 1в и 1г (в асимметричных делениях) наблюдается сильная направленность эмиссии частиц по движению тяжелого осколка. Поэтому естественно полагать, что эти частицы испускаются из тяжелых осколков и практически отсутствует эмиссия частиц из легких осколков. Этот результат является неожиданным, так как скорее следовало ожидать преимущественной эмиссии частиц по направлению вылета легкого осколка, у которого высота кулоновского барьера ниже, а скорость больше, чем у тяжелого осколка.

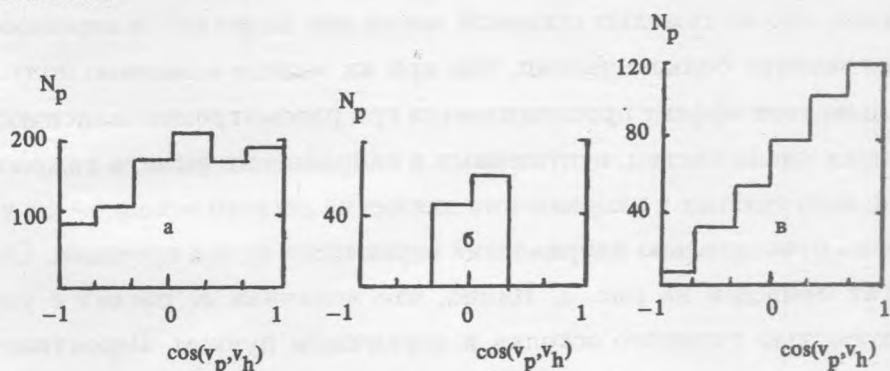


Рис. 2. Угловые распределения частиц относительно направления движения тяжелых осколков: а) суммарное угловое распределение (для $M_h/M_l \geq 1$); б) для частиц, испускаемых в процессе деления; в) для частиц, испускаемых из тяжелых осколков.

Суммарное угловое распределение, т.е. сумма данных, приведенных на рис. 1, представлено на рис. 2а. Его можно разложить на три компоненты: изотропную A_1 – содержащую частицы, испущенные до деления; компоненту A_2 – содержащую частицы, испущенные в процессе деления (под углами $70^\circ - 110^\circ$) (рис. 2б) и компоненту A_3 – содержащую частицы, испущенные из тяжелых осколков (рис. 2в). Анализ, аналогичный приведенному выше, но выполненный отдельно для распределений частиц, вылетающих в переднюю и заднюю полусферы относительно первичного пучка протонов, дал результаты, приведенные в таблице.

Т а б л и ц а 1

Зависимость вероятности эмиссии частиц от направления вылета относительно первичного пучка

	A_1	A_2	A_3
По пучку протонов	345	81	221
Против пучка протонов	165	42	117

Из таблицы видно, что для всех трех компонент преобладает эмиссия частиц в направлении пучка протонов, но причина этой направленности различная. Остановимся на компоненте A_3 .

Отношение числа частиц компоненты A_3 , испущенных вперед и назад, равно $2,0 \pm 0,2$. Это означает, что из тяжелых осколков, когда они вылетают в переднюю полусферу, испускается заметно больше частиц, чем при их вылете в заднюю полусферу.

Более детально этот эффект прослеживается при рассмотрении зависимости величины K – отношения числа частиц, испущенных в направлении вылета тяжелого осколка, к числу частиц, испущенных в направлении движения легкого осколка – от угла вылета тяжелого осколка относительно направления первичного пучка протонов. Соответствующий результат приведен на рис. 3. Видно, что величина K растет с уменьшением угла между скоростью тяжелого осколка и первичным пучком. Вероятность эмиссии заряженных частиц из тяжелых осколков составляет $\sim 10^{-2}$ на акт деления.

В работе впервые наблюдалась эмиссия заряженных частиц из тяжелых осколков при делении ядер урана протонами с энергией 153 МэВ . Вероятность эмиссии растет с увеличением массы осколка, а также с уменьшением угла вылета тяжелого осколка относительно первичного пучка протонов (рис. 3). Не наблюдалось заметной эмиссии заряженных частиц из легких осколков (рис. 1 и 2).

В работе [5] при делении ядер урана протонами с энергией 153 МэВ наблюдался преимущественный вылет нейтронов из тяжелых осколков. Было установлено, что нейтроны в С.Ц.М. осколка испускаются изотропно из полностью ускоренных осколков. Если принять, что и заряженные частицы испускаются из ускоренных тяжелых осколков в С.Ц.М. изотропно, то в Л.С.К. отношение числа заряженных частиц, вылетающих вперед и назад относительно направления движения тяжелого осколка, должно быть равным 1,7. В наших опытах это отношение возрастает с ростом асимметрии деления и при $M_h/M_l > 1,3$ достигает значения ~ 5 . Если бы анизотропия была связана только с кинематикой, следовало ожидать обратную зависимость, так как с увеличением

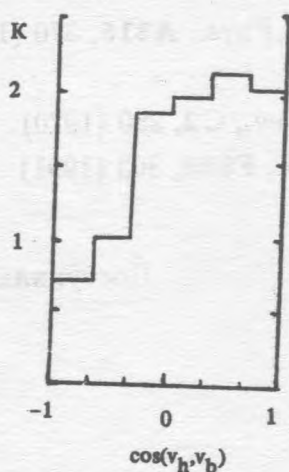


Рис. 3. Зависимость величины K – отношения числа частиц, испущенных в направлении движения тяжелых осколков, к числу частиц, испущенных в направлении легких осколков – от угла вылета тяжелых осколков относительно первичного пучка протонов (направление V_b).

массы осколка уменьшается его скорость, а следовательно, должна уменьшаться анизотропия вылета частиц. Поэтому мы полагаем, что преобладающая эмиссия частиц по направлению движения тяжелого осколка в основном обусловлена не кинематикой (движением осколка), а большой деформацией тяжелого осколка.

Согласно [6], деформация ядра благоприятствует вылету заряженной частицы в направлении оси деформации. В наших опытах наблюдается вылет частиц только в одну сторону. Это указывает на то, что тяжелые осколки обладают большой и несимметричной деформацией, которая возрастает с ростом массы осколка. Возможно, что анизотропия вылета заряженных частиц обусловлена частично и другими причинами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беловицкий Г. Е., Баранов В. Н., Петижан К. ЯФ, 55, 2319 (1992).
- [2] Беловицкий Г. Е. и др. ЯФ, 43, 1057 (1986).
- [3] Meadows J. W., Phys. Rev., 110, 1109 (1958).

- [4] D a k o w s k i M. et al., Nucl. Phys., **A315**, 370 (1979); C a r j a n N. et al., Phys. Rev., **C22**, 2008 (1980).
- [5] C h e i f e t z E. et al., Phys. Rev., **C2**, 250 (1970).
- [6] J w a m o t o A. et al., Z. Phys., **F338**, 303 (1991)

Поступила в редакцию 10 ноября 1993 г.