

УДК 539.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСЩЕПЛЕНИЯ ЯДЕР ВИСМУТА НА ТРИ СОИЗМЕРИМЫХ ПО МАССЕ ОСКОЛКА ГЭВ-НЫМИ ФОТОНАМИ

О.Ф. ПОГОСОВА, В.С. ПОГОСОВ

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван

(Поступила в редакцию 17 декабря 2010 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования процесса расщепления ядер ^{209}Bi на три соизмеримых по массе осколка тормозными фотонами с граничными энергиями 2 ГэВ и 4.5 ГэВ с помощью ядерной фотоэмульсии, имплантированной ядрами висмута. Проведено сравнение с данными на протонных пучках.

1. Введение

В отличие от обычных процессов деления среднетяжелых и тяжелых ядер, инициируемых частицами низких энергий, при промежуточных энергиях наблюдаются случаи, когда суммарная масса двух регистрируемых осколков заметно меньше массы ядра мишени, что свидетельствует о больших нуклонных потерях. Величина нуклонных потерь может достигать значений, необходимых для формирования третьего массивного осколка, соизмеримого с массами регистрируемых продуктов бинарного деления. Предполагается, что в этом случае имеет место развал ядра на три осколка, один из которых является ядерно-нестабильным и разваливается на отдельные нуклоны и легкие ядра еще на стадии ускорения массивных осколков под действием кулоновских сил. В пользу такого предположения указывает, в частности, и тот факт, что в некоторых случаях наблюдались события деления на три стабильных осколков. Возможность же спонтанного тройного деления ядер обсуждается со времени обнаружения бинарного деления (т.е. около семидесяти лет) вплоть до настоящего времени. Так, в относительно недавней работе [1], исходя из традиционных представлений о механизме процесса деления, комбинируя жидко-капельные и одночастичные свойства ядерной материи, авторы утверждают, что процесс спонтанного тройного деления среднетяжелых и тяжелых ядер можно наблюдать в современном эксперименте. В то же время, до сих пор нет экспериментальных доказательств существования подобного деления или деления при малых энергиях возбуждения.

Согласно другой точке зрения (см., например, [2]), процесс тройного деления возможен только при облучении ядер релятивистскими частицами. Она основана на экспериментальном изучении процессов деления под действием налетающих протонов. При низких энергиях количество частиц, сопровождающих

процесс бинарного деления, слишком мало для образования третьего осколка, сравнимого по массе с остальными двумя. При повышении энергии налетающих частиц наблюдаются случаи с множественностью, достаточной для образования полноценного третьего осколка. Именно при этих энергиях начинает регистрироваться и процесс тройного деления. Пороговый характер, по-видимому, свидетельствует об изменении свойств ядерной материи под действием релятивистских частиц по сравнению со свойствами, которые присущи ядерной материи в спонтанно делящемся ядре.

Экспериментальное исследование процессов тройного деления и процессов мультифрагментации, сопровождающих бинарное деление ядер, проводится уже несколько десятилетий. При этом, в качестве налетающих частиц использовались протоны и легкие ядра [3-6]. Первые и до сих пор единственные данные с фотонными пучками были получены нами [7]. Мы продолжили эти исследования и приводим ниже их результаты.

2. Методика эксперимента

Измерения проводились на пучке тормозных гамма-квантов Ереванского электронного синхротрона в 90-е годы. Облучались слои фотоэмульсии типа П9 толщиной ~ 100 мкм, имплантированные ядрами ^{208}Bi . Для повышения порога чувствительности фотоэмульсии ее перед проявлением обрабатывали 1%-ным раствором гидролизованной желатины. Подобная методика была разработана в Радиевом институте им. Хлопина (Санкт-Петербург) и успешно применялась в экспериментах, проведенных на протонных пучках в ПИЯФ (Гатчина) [3]. Ожидалось, что это позволит поднять порог чувствительности до уровня, соответствующего максимальным ионизационным потерям фрагментов с зарядом $Z = 10$, с целью надежного подавления фоновых событий, вызванных рассеянием осколков на ядрах C, N, O, входящих в состав эмульсии. Высокий порог чувствительности фотоэмульсии был необходим и для того, чтобы иметь возможность облучать ее потоком γ -квантов высокой интенсивности. Следует отметить, что фоновые условия здесь гораздо сложнее, чем в экспериментах, где используются, скажем, монохроматические пучки протонов, т.к. вклад в полезные события дает лишь высокоэнергичная часть спектра тормозного пучка гамма-квантов.

С целью проверки эффективности выбранной методики были проведены контрольные измерения на фотоэмульсии, не содержащей ядра висмута. Эти измерения подтвердили наши ожидания. Кроме того, оказалось, что такая методика позволяет облучать эмульсию потоком гамма-квантов высокой интенсивности (в реальных измерениях эмульсия облучалась потоком тормозных квантов 10^{12} эквивалентных фотонов и выше), сохраняя при этом возможность надежного ее просмотра. В основных измерениях облучалась стопка, содержащая слои с висмутом и без него. Наличие слоев без висмута позволило учесть эффекты взаимодействия гамма-пучка с ядрами серебра и брома, входящих в состав эмульсии. Ниже приводятся результаты исследований тройного деления ядер

висмута тормозными пучками гамма-квантов с граничными энергиями 2 ГэВ и 4.5 ГэВ, проведенных нами в Ереванском физическом институте.

3. Результаты измерений

В измерениях с пучком с граничной энергией 4.5 ГэВ было обработано 1284 бинарных событий в эмульсии без висмута. В эмульсии с висмутом обработано 420 событий бинарного коллинеарного деления и 667 событий бинарного неколлинеарного деления. В эксперименте с граничной энергией 2 ГэВ было обработано 60 событий бинарного деления в эмульсии без висмута и 1272 соответствующих событий, в том числе 123 с заметной неколлинеарностью, в эмульсии, содержащей висмут.

Для каждого события измерялась суммарная длина треков и угол между ними. Сравнение распределений по длинам треков, полученных на эмульсиях с висмутом и без него, в силу их существенного различия, позволяет получить соответствующее распределение для бинарного деления ядер висмута. Результаты исследования бинарного деления будут представлены нами в следующей статье. Здесь же мы остановимся на тройном делении, а для бинарного деления приведем лишь некоторые сравнительные данные.



Рис.1. Фотография неколлинеарного двулучевого события.

Трехлучевые события идентифицировались как акты тройного деления по признаку соизмеримости длин треков. Этот критерий выбран из следующих соображений. Трехлучевые события могут быть вызваны также и перерасеянием осколков бинарного деления на ядрах Ag и Br. Характерным для этих событий является то, что длина одного из треков, как правило, заметно превышает длины двух других. С другой стороны, основная энергия в тройном делении приобретает осколками за счет кулоновского расталкивания, и соизмеримые по массе осколки должны иметь в большинстве случаев тройного деления соизмеримые длины пробегов. Незначительность отклонения от компланарности трехлучевого события также является признаком тройного деления, т.к. скорость разлета осколков за счет сил расталкивания заметно превышает скорость ядра (или осколка), приобретаемую за счет передачи импульса со стороны налетающей

частицы. На рис.1 представлена типичная фотография двулучевого неколлинеарного события, а на рис.2 – трехлучевых событий, характерных для деления на три соизмеримых по массе осколка. Неколлинеарность двулучевых событий является характерным признаком наличия третьего нестабильного осколка. Однако следует отметить, что в работах [8,9] делается вывод о вкладе коллинеарных событий в процесс деления на три осколка.

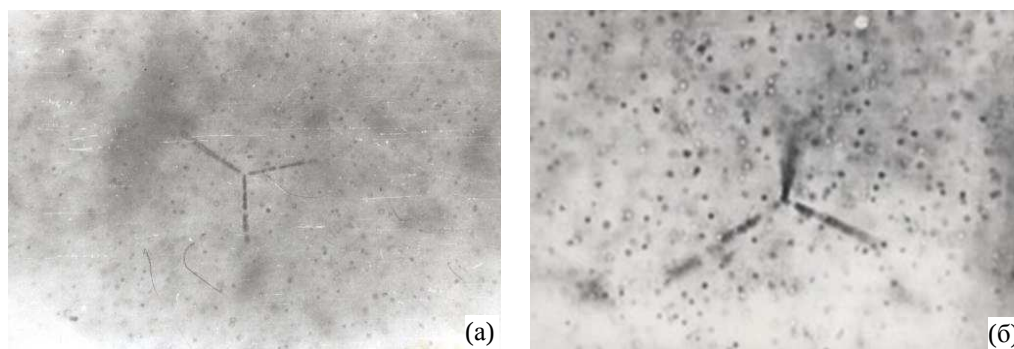


Рис.2. Фотографии компланарных трехлучевых событий со сравнимыми длинами треков.

Ниже в таблице приводятся некоторые результаты измерений.

$E_{\gamma\text{max}}$	$\langle R_2 \rangle$, мкм	$\langle R_3 \rangle$, мкм	$\langle \varphi_3 \rangle$, град	N_3/N_2
2 ГэВ	17.0 ± 0.4	28.0 ± 1.2	114 ± 5	$(2.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$
4.5 ГэВ	17.5 ± 0.7	29.0 ± 1.0	118 ± 4	$(9.0 \pm 0.7) \times 10^{-4}$

Здесь $\langle R_2 \rangle$ – средняя суммарная длина неколлинеарных двулучевых событий; $\langle R_3 \rangle$ – средняя суммарная длина трехлучевых событий; $\langle \varphi_3 \rangle$ – усредненный по всем парам треков угол в трехлучевых событиях; N_3/N_2 – отношение числа событий тройного деления N_3 к полному числу бинарных (включая коллинеарных) событий N_2 с учетом только статистической погрешности.

Соотношение между $\langle R_2 \rangle$ и $\langle R_3 \rangle$ хорошо согласуется с предположением о том, что отобранные трехлучевые события являются результатом тройного деления. В пользу этого свидетельствует также и то, что значения $\langle \varphi_3 \rangle$ в пределах погрешности близки к 120° , как и должно быть для компланарных событий.

Поясним теперь как получается отношение N_3/N_2 . Так, в фотоэмульсии, облученной гамма-пучком с граничной энергией 2 ГэВ, было просмотрено 10350 полей зрения, в которых общее количество событий, идентифицированных как события тройного деления, составило 26. В каждом поле зрения обнаружено в среднем 10.2 бинарных событий. Отсюда нетрудно получить, что $N_3/N_2 = (2.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$. Аналогичное отношение в эмульсии, облученной гамма-квантами с максимальной энергией 4.5 ГэВ, составило $(9.0 \pm 0.7) \times 10^{-4}$. Обработка имеющихся у нас данных облучения тормозными гамма-квантами с граничной

энергией 3 ГэВ позволит иметь более полную картину энергетической зависимости исследуемого процесса.

Существенный рост отношения при переходе от граничной энергии тормозного пучка гамма-квантов 2 ГэВ к 4.5 ГэВ согласуется с представлением о пороговом характере процесса деления ядер на три соизмеримых по массе осколка. Для сравнения заметим, что значение для аналогичного отношения, полученное при расщеплении ядер ^{238}U монохроматическими протонами с энергией 1 ГэВ, составило $(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-4}$.

Авторы выражают признательность Г.Е. Солякину (ПИЯФ, Гатчина), инициировавшему их интерес к проведенным исследованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.N.Poenaru, R.A.Gherghescu, W.Greiner. Acta Physica Hungaria, **18**, 313 (2003).
2. Б.Л.Горшков, Г.Е.Солякин. Препринт ПИЯФ, 2575 (2004).
3. Н.П.Филатов, Г.Е.Беловицкий, А.А.Жданов и др. Препринт ЛИЯФ, 1404 (1988).
4. А.А.Жданов, В.И.Захаров, А.В.Кравцов и др. Письма в ЖЭТФ, **54**, 311 (1991).
5. G.Remy, J.Ralarosy, R.Stein, M.Debeavais, J.Tripier. Nucl. Phys. A, **63**, 583 (1971).
6. Z.Todorovic, A.Djorjevich, S.Savovic. Acta Physica Polonica B, **34**, 4205 (2003).
7. В.И.Захаров, Р.Л.Кавалов, О.Ф.Погосова, В.С.Погосов. Препринт ЕФИ-1287(73)-90 (1990).
8. Г.Е.Солякин. Ядерная физика, **60**, 35 (1997).
9. Б.Л.Горшков, В.Р.Резник, Г.Е.Солякин. Письма в ЖЭТФ, **84**, 698, (2006).

ԳԷՎ-ԱԻՆ ՖՈՏՈՆՆԵՐՈՎ ԲԻՍՄՈՒՏԻ ՄԻՋՈՒԿՆԵՐԻ
ԵՐԵՔ ՀԱՄԵՄԱՏԵԼԻ ԶԱՆԳՎԱՅ ՈՒՆԵՑՈՂ ԲԵԿՈՐՆԵՐԻ
ՃԵՂՔՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Օ.Ֆ. ՊՈՂՈՍՈՎԱ, Վ.Ս. ՊՈՂՈՍՈՎ

Ներկայացված են 2 Գէվ և 4.5 Գէվ մաքսիմալ էներգիա ունեցող արգելակված ֆոտոն-ներով ^{209}Bi միջուկների երեք համեմատելի զանգված ունեցող բեկորների ճեղքման պրոցեսի փորձագիտական ուսումնասիրության արդյունքները՝ օգտագործելով բիսմութի միջուկներով իմպլանտացված ֆոտոէմուլսիան: Ներկայացված է համեմատությունը պրոտոնների փնջերով ստացված տվյալների հետ:

INVESTIGATION OF BISMUTH NUCLEI FISSION INTO THREE FRAGMENTS WITH COMPARABLE MASSES BY MEANS OF GeV ENERGY PHOTONS

O.F. POGOSOVA, V.S. POGOSOV

We present the results of experimental investigation of ^{209}Bi nuclei fission process into three fragments with comparable masses by bremsstrahlung photons with maximum energies 2 GeV and 4.5 GeV using nuclear emulsion implanted with bismuth nuclei. Comparison with proton beams data is presented.