

СИЛЬНО-АСИММЕТРИЧНОЕ ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР,
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОРИЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ
И ДЕЙТРОНАМИ

Ю.Ц.Оганесян, Ш.Гэрбиш, Ю.В.Лобанов,
Ю.С.Короткин, М.Юссонуа*

Описываются эксперименты по поиску эмиссии тяжелых кластеров из возбужденных ядер ^{234}Pa и ^{236}U при облучении ^{232}Th дейтронами и α -частицами с энергией $E_{\text{лаб.}} = 17$ и 34 МэВ соответственно. Показано, что в этих реакциях с сечением ~ 2 мкб образуются ядра с $A = 24$ и не образуются фрагменты с $A = 28$ ($\sigma \leq 0,1$ мкб). Для сопряженных тяжелых фрагментов получены верхние границы сечений от $3 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ мкб. Результаты опытов интерпретируются в рамках тройного деления с вылетом тяжелой частицы $A = 24$, в то время как для вероятности сильно-асимметричного двойного деления определен предел: $\Gamma_{\text{класт.}} / \Gamma_{\text{полн.}} \leq 3 \cdot 10^{-10}$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

The Extreme Asymmetric Fission of Nuclei
Produced in Reactions $^{232}\text{Th} + ^2\text{H}$, ^4He

Yu.Ts.Oganessian et al.

The experiments describe an emission of heavy clusters from excited ^{234}Pa and ^{236}U nuclei, which are produced in bombarding ^{232}Th targets by deuterons and α -particles with energies 17 and 34 MeV, respectively. It is shown that the nuclide with mass $A = 24$ emitted with ~ 2 microbarn cross section and the nuclide with mass $A = 28$ were not observed and the cross section was estimated to be lower than 0.1 microbarn. For its heavy fragments the upper level of cross section is obtained from $3 \cdot 10^{-2}$ to $3 \cdot 10^{-4}$ microbarn. The results of experiments are interpreted as ternary fission with the emission of heavy cluster $A = 24$, while the limit for probability of extreme asymmetric binary fission $\Gamma_{\text{clus.}} / \Gamma_{\text{tot.}} \leq 3 \cdot 10^{-10}$ was determined.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

* Институт ядерной физики, Орсе, Франция

Известно, что для α -радиоактивных изотопов Ra с массовыми числами 222, 223, 224 и 226 наблюдается с вероятностью 10^{-9} - 10^{-12} испускание кластера $^{-14}\text{C}^{1-3/}$. Для более тяжелых нуклидов ^{231}Pa , $^{232,233}\text{U}$ наблюдается эмиссия $^{24}\text{Ne}^{4-7/}$. Парциальный период такого типа распада зависит от нуклонного состава начального ядра и составляет, согласно экспериментальным данным, от $5 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{17}$ лет.

Представляется интересным исследовать это явление для возбужденных ядер, так как вероятность эмиссии кластера может резко возрасти с увеличением энергии ядра.

Если в основном состоянии конкурирующим каналом эмиссии кластера является α -распад, то при энергии $E^* \geq 10$ МэВ открываются другие каналы реакции /деление, эмиссия нейтронов и легких заряженных частиц/. Поэтому вероятность наблюдения искомого продукта будет определяться уже отношением ширин $\Gamma_{\text{класт}}$ к полной ширине распада возбужденного ядра. Можно полагать заранее, что величина $\Gamma_{\text{класт}}/\Gamma_{\text{полн.}} \ll 1$; однако тяжелая частица может быть зарегистрирована с высокой чувствительностью, соответствующей $\Gamma_{\text{класт}}/\Gamma_{\text{полн.}} > 10^{-9}$.

Ниже кратко описана постановка опытов и приведены результаты по поиску эмиссии кластеров с массовыми числами $A = 24$ и 28 из возбужденных ядер, образующихся при облучении ^{232}Th дейтронами и α -частицами с энергией 17 и 34 МэВ соответственно.

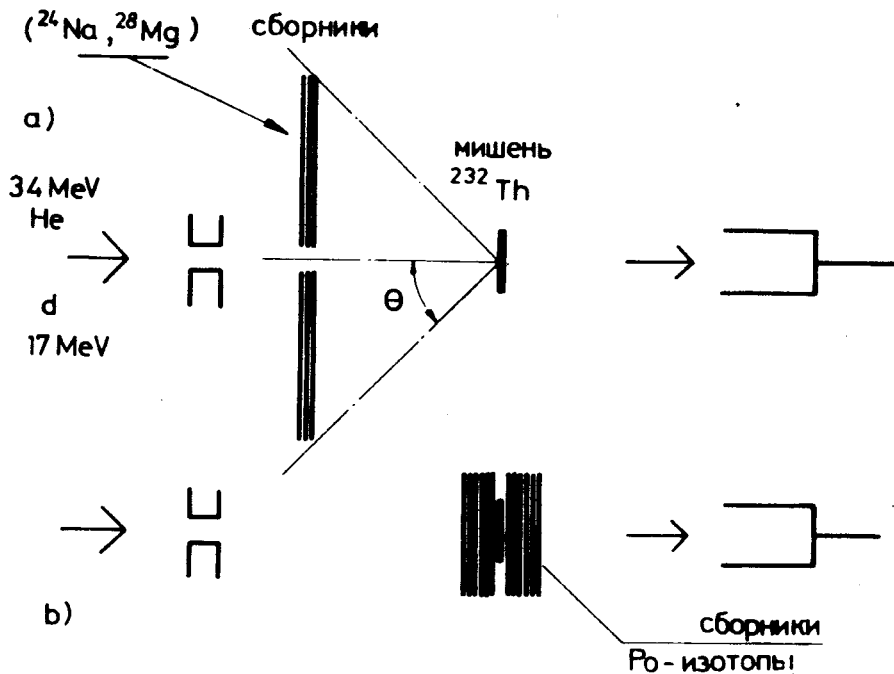
Схема опыта представлена на рисунке. Коллимированный пучок попадал на мишень из металлического ^{232}Th ($1,5 \text{ мг/см}^2$), покрытую слоем золота ($0,3 \text{ мг/см}^2$). В задней полусфере в угловом интервале $\Theta_{\text{лаб.}} = 180 \pm 60^\circ$ располагался пакет из медных или поликарбонатных сборников. После облучения из сборников радиохимически выделялись изотопы $^{24}\text{Na} / T_{1/2} = 15 \text{ ч/}$ и $^{28}\text{Mg} / T_{1/2} = 20,9 \text{ ч/}$, выход которых определялся по спектру гамма-квантов, измеренному на Ge(Li) -спектрометре.

В другом опыте Th-мишень закрывалась с двух сторон пакетами тонких углеродных фольг /по 6 в каждой стопке/ общей толщиной $0,5 \text{ мг/см}^2$. После облучения определялся выход изотопов Tl, Pb, Bi по их дочерним α -радиоактивным изотопам Po с помощью многодетекторного Si(Au)-спектрометра. Кроме того, измерялось распределение этих продуктов по толщине сборников ядер отдачи. Условия облучения и результаты представлены в таблице.

При бомбардировке Th дейтронами и ионами ^4He наблюдается эмиссия ядер с массой $A_{\text{класт.}} = 24$. Все изобары с $Z_{\text{класт.}}$ от 8 до 11 регистрируются в нашем эксперименте по долгоживущему нуклиду ^{24}Na . Для изобар с $A_{\text{класт.}} = 28$ (^{28}Mg) получена лишь верхняя граница образования на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ от выхода ^{24}Na .

Из распределения активности ^{24}Na по сборникам можно оценить среднюю кинетическую энергию этого ядра, которая составляет $40 \div 50$ МэВ, что значительно ниже кулоновской энергии этих фрагментов. При вылете последнего, с массой 24, имеющего такую энергию, из составного ядра ^{234}Pa или ^{236}U остаточные ядра с массой 210 или 212 будут обладать энергией отдачи 5-7 МэВ, и, следовательно, значительным пробегом в углеродных сборниках, окружающих мишень ($\sim 0,3$ мг/см 2).

Отметим, что среди долгоживущих нуклидов лишь изотопы Pb и Bi с массой 212 и изотопы Bi и Po с массой 210, 211 могут быть зарегистрированы в нашем опыте продолжительностью несколько часов.



В предположении асимметричного деления составного ядра они могут образоваться при эмиссии ^{24}Ne , ^{24}F /из ^{236}U / и ^{24}O , ^{24}N /из ^{234}Pa /.

Из эксперимента следует, что сечения образования тяжелых фрагментов $A = 210, 211, 212$ значительно ниже, чем для легких партнеров $A = 24$. Это означает, что выход ^{24}Na в основной доле случаев не связан с двухтелным процессом, а обусловлен другим механизмом, в частности, тройным делением ядер. К этому заключению приходят также авторы других работ^{8,9}, исследовавшие реакции $^{238}\text{U} + p$, ^4He при энергии бомбардирующих ионов от 15 до 600 МэВ.

Таблица

Реакция	Энергия нейтронов (МэВ)	Интегральная плотность нейтронов ($\times 10^{17}$)	Сборник осколков деления (шт.) Плотность ($\mu\text{т}/\text{см}^2$)	Число образовавшихся ядер						Сечения (в микробарнах) образования фрагментов с массой								
				Ca-24	Mg-28	Po-210	Po-211	Po-212	A=24	A=28	A=210	A=211	A=212					
$^{232}\text{Th} + \text{H}$	17	11.2	медь 2 8.96	$2 \cdot 10^7$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				поликарбонат	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$^{232}\text{Th} + \text{H}$	17	6.5	графит 6 0.1	$1 \cdot 10^7$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				графит	—	$\leq 1 \cdot 10^4$	≤ 16	≤ 70	—	—	≤ 0.03	$\leq 1.5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	—
$^{232}\text{Th} + \text{He}$	34	4.75	медь 3 8.96	$6 \cdot 10^6$	$\leq 5 \cdot 10^5$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				графит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		0.39	графит 6 0.1	—	$\leq 5 \cdot 10^4$	—	—	≤ 50	—	—	—	≤ 0.4	—	—	—	—	—	$\leq 3 \cdot 10^{-4}$

Тогда из сравнения наших данных для $^{236}\text{U}/E^* = 29$ МэВ/ с данными по тройному делению $^{235}\text{U} + n_0/E^* = 6$ МэВ/ следует, что выход частиц в области больших масс $A \geq 20$ существенно возрастает с ростом энергии возбуждения делящегося ядра.

Исследование этой закономерности представляет самостоятельный интерес и требует иной постановки опытов.

Возвращаясь к вопросу сильно-асимметричного деления ^{236}U ($A_{\text{тяж}}/A_{\text{легк.}} \approx 9$), можно определить по выходу изотопа ^{212}Po границу сечения этого процесса, которая составляет в нашем эксперименте $\sigma \leq 3 \cdot 10^{-34} \text{ см}^2$, что, в свою очередь, дает оценку величины отношения $\Gamma_{\text{класт.}}/\Gamma_{\text{полн.}} \leq 3 \cdot 10^{-10}$.

Расчеты по статистической модели распада возбужденного ядра урана-236, выполненные с использованием программы Алиса^{10,11}, дают соотношения $\Gamma_{\text{дел.}}/\Gamma_{\text{полн.}} = 0,72$, $\Gamma_{\text{альфа}}/\Gamma_{\text{полн.}} = 6 \cdot 10^{-5}$ и $\Gamma_{\text{класт.}}/\Gamma_{\text{полн.}} = 1 \cdot 10^{-10}$, что не противоречит результатам наших экспериментов.

Авторы благодарны академику Г.Н.Флерову за интерес к работе и ценные замечания при ее обсуждении, Р.Н.Сагайдаку за помощь при проведении экспериментов, а также Ю.П.Харитонову за помощь при определении выхода α -активных изотопов полония, Ю.А.Музычке и Б.И.Пустыльнику за расчеты ширин распада возбужденных ядер.

Литература

1. Rose H.J., Jones G.A. Nature, 1984, 307, p.245.
2. Александров Д.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, с.152.
3. Gales S. et al. Phys.Rev.Lett., 1984, 53, p.759.
4. Price P.B. et al. Phys.Rev.Lett., 1985, 54, p.279.
5. Sandulescu A. et al. In: JINR Rapid Comm., No.5-85, Dubna, 1985, p.5.
6. Третьякова С.П. и др. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 7-85, Дубна, 1985, с.23.
7. Warwick S.W. et al. Phys.Rev.C, 1985, vol.31, No.5, p.1984.
8. Haldrosen I. et al. J.Inorg.Nucl.Chem., 1981, 43, No.10, p.2197.
9. Iyer R.H., Cobble J.W. Phys.Rev., 1968, 172, p.1186.
10. Blann M., Plasil F. Report C00-3494,10, 1973.
11. Бейзин С.Д. и др. ЯФ, 1983, 37, с.809.

Рукопись поступила 16 сентября 1985 года.