

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2318/82

17/1-82

P7-82-19

М.Г.Иткис, Р.Калпакчиева, В.Н.Околович,
Ю.Э.Пенионжкевич, В.Н.Толстикова

О ВЛИЯНИИ ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ
И УГЛОВОГО МОМЕНТА
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ
СОСТАВНЫХ ЯДЕР ^{208}Po И ^{210}Po

Направлено в ЯФ

1982

Большой интерес для изучения влияния углового момента и энергии возбуждения на основные характеристики осколков деления - полную кинетическую энергию и массовые распределения - представляет исследование процесса деления одного и того же составного ядра, образованного в различных реакциях. Такие исследования несут важную информацию о динамике процесса деления, т.е. об эволюции делящейся системы от седловой точки до точки разрыва, и являются прямым источником данных о связи коллективных и одночастичных мод движения в процессе этой эволюции.

В настоящее время был выполнен ряд исследований влияния углового момента и энергии возбуждения на указанные характеристики осколков деления^{/1-7/}. Например, в работах^{/1-2/} было обнаружено некоторое различие в выходах осколков деления для реакций $^{232}\text{Th} + \alpha$ и $^{235}\text{U} + n$, обусловленное влиянием углового момента. Авторы^{/3,4/} при исследовании близких делящихся ядер ^{210}Po и ^{208}Po в реакциях с протонами, α -частицами и ионами ^{12}C и ^{16}O пришли к совершенно различным выводам. Так, в работе^{/3/} было показано, что полная кинетическая энергия осколков деления ^{210}Po возрастает с увеличением углового момента и энергии возбуждения, а дисперсия массового распределения и кинетической энергии является растущей функцией лишь энергии возбуждения и не зависит от углового момента. В работе же^{/4/} ни одна из указанных характеристик осколков деления ^{208}Po не зависит от энергии возбуждения и углового момента. В работе^{/5/} при делении ^{186}Os в реакциях (α, f) , $(^{12}\text{C}, f)$ и $(^{16}\text{O}, f)$ было обнаружено, что дисперсия кинетической энергии зависит от углового момента, в то время как дисперсия массового распределения и полная кинетическая энергия осколков от него не зависят. В недавних исследованиях деления ^{205}At в реакциях с ионами ^{20}Ne и ^{40}Ar ^{/6/} авторы пришли к противоположному выводу: о сильной зависимости ширины массового распределения от углового момента. Исследования более легких делящихся ядер ^{101}Rh , ^{110}Cd , ^{119}I и ^{129}Ba в реакции с ионами ^{12}C ^{/7/} не обнаружили сильной зависимости полной кинетической энергии от углового момента и энергии возбуждения. Полученное в данной работе увеличение кинетической энергии составило $\sim 0,7$ кэВ/ \hbar^2 .

Столь противоречивые результаты выполненных работ, отсутствие теоретического рассмотрения обсуждаемой проблемы и ее важность для углубления представлений о механизме процесса деле-

ния ядер побудили нас предпринять новые исследования влияния углового момента и энергии возбуждения на характеристики осколков деления ядер. В настоящей работе изучались массовые и энергетические распределения осколков деления составных ядер ^{208}Po и ^{210}Po , образованных в реакциях с ионами ^3He , ^{12}C и ^{16}O .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Исследования реакций $^{198}\text{Pt} + ^{12}\text{C}$, $^{192}\text{Os} + ^{16}\text{O}$ проводились на ускорителях У-200 и У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ при нескольких энергиях ионов. Энергия ионов варьировалась с помощью алюминиевых поглотителей либо изменением радиуса перезарядки ионов и измерялась по упругому рассеянию. Для выделения канала полной передачи импульса налетающего иона делящемуся ядру с последующим делением его на два осколка использовался корреляционный метод измерения кинетических энергий с помощью двух Si(Au) поверхностно-барьерных детекторов, расположенных под определенными углами к направлению падающего пучка^{18/}. Калибровка детекторов производилась по реакции $^{238}\text{U} + \alpha$ при энергии α -частиц 25 МэВ, а также с помощью ионов ^{132}Xe , упруго рассеянных под разными углами на тонкой мишени из ^{197}Au . Связь между энергией (Е) иона, его массой (М) и амплитудой сигнала (К) воспроизводилась хорошо известным выражением $E = (a + a'M)K + b + b'M$ ^{19/}. Быстро-медленная схема совпадений и амплитудный анализ позволили измерять двумерный спектр энергий продуктов реакции, далее обрабатываемый с помощью ЭВМ. Массы вычислялись из измеренных кинетических энергий в предположении о двухтелности процесса.

Реакции $^{204}\text{Pb} + ^3\text{He}$, $^{206}\text{Pb} + ^3\text{He}$ и $^{207}\text{Pb} + ^3\text{He}$ изучались на ускорителе У-150 ИЯФ АН КазССР в диапазоне энергий ^3He 50-60 МэВ. В качестве измерительной аппаратуры был использован двумерный спектрометрический тракт. Организация быстро-медленных совпадений позволяла получать двумерный спектр энергий осколков в условиях большого рассеянного фона заряженных частиц. Накопление информации осуществлялось при помощи измерительно-вычислительного комплекса ИВК-1, позволяющего в ходе эксперимента проводить окончательную обработку полученных спектров и, как следствие этого, контролировать стабильность работы поверхностно-барьерных детекторов и спектрометрических трактов. Калибровка детекторов в этих измерениях осуществлялась по энергетическому распределению осколков деления ^{252}Cf .

Спектрометрические мишени ^{198}Pt и ^{192}Os толщиной 100 мкг/см² каждая были изготовлены методом термического распыления в вакууме с помощью специально изготовленной электронной пушки, позволяющей получать практически любые тугоплав-

кие мишени необходимой толщины. В качестве подложки использовались алундовые пленки Al_2O_3 толщиной 20-30 мкг/см².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений в виде зависимостей выходов и полной кинетической энергии осколков от их масс для некоторых исследованных реакций представлены на рис. 1, 2. Кинетическая энергия осколков деления измерялась с точностью не хуже ± 2 МэВ. Относительная точность при этом составляла ± 1 МэВ.

Следует отметить, что измеряемая в эксперименте полная кинетическая энергия осколков деления несколько меньше истинной вследствие испарения мгновенных нейтронов из осколков. Поскольку нас интересует полная кинетическая энергия начальных осколков, то в случае симметричного деления получим $\bar{E}_k = \bar{E}'_k(1 + \bar{\nu}/A)$, где $\bar{\nu}$ - среднее полное число нейтронов, \bar{E}'_k - энергия конечных осколков. В настоящее время практически отсутствуют экспериментальные данные по среднему числу нейтронов в зависимости от массы осколков для легких делящихся систем. Поэтому оценки

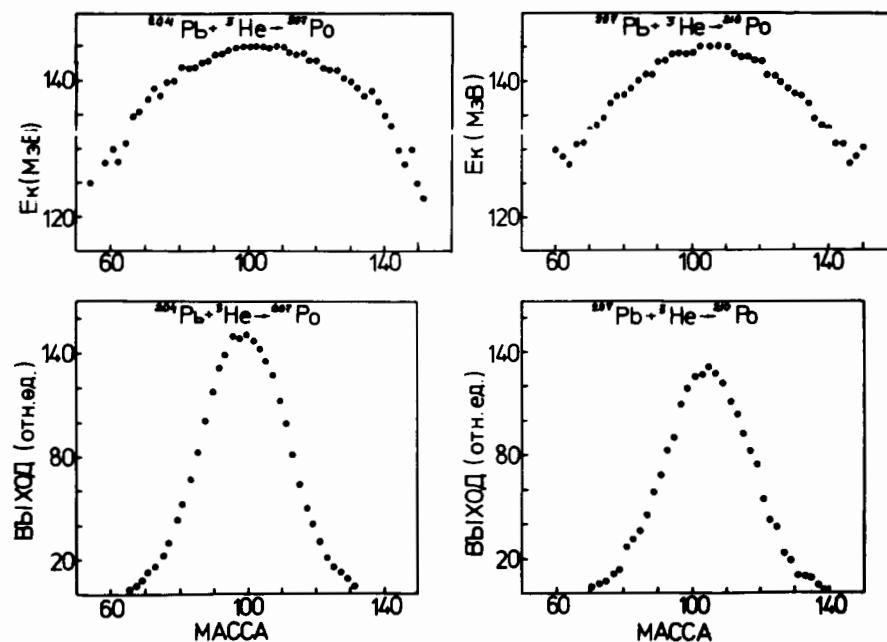


Рис. 1. Зависимости выходов и полной кинетической энергии осколков деления от их масс, полученные в реакциях $^{204}\text{Pb} + ^3\text{He}$ и $^{207}\text{Pb} + ^3\text{He}$.

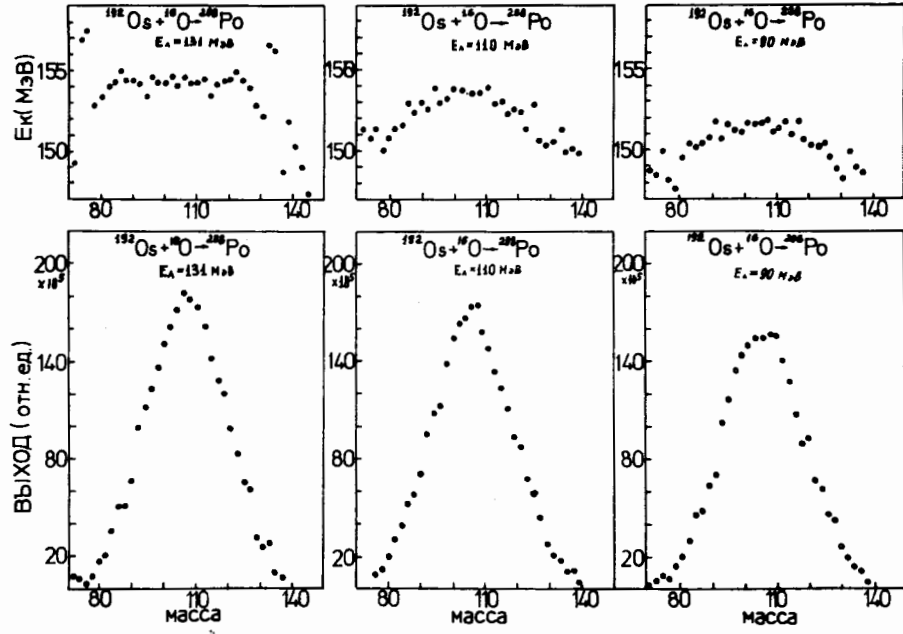


Рис. 2. Зависимости выходов и полной кинетической энергии осколков деления от их масс, полученные при облучении мишени из ^{192}Os ионами ^{16}O с энергиями 131, 110 и 90 МэВ.

среднего числа нейтронов для всех изучаемых реакций были сделаны на основе энергетического баланса конкретной реакции деления в предположении, что нейтроны испускаются только из образовавшихся осколков.

$$\bar{\nu} = \frac{E_f^* - E_\gamma}{2 \sum_i (B_{ni} + 2T_{fi})}$$

$E_f^* = E_{CN}^* - \bar{E}_k + Q$ - средняя энергия возбуждения осколков, E_γ - энергия, уносимая γ -квантами /8-10 МэВ/, E_{CN}^* - энергия возбуждения составного ядра, $Q = M_{CN} - (M_3 + M_4)$; B_{ni} , T_{fi} - энергия связи и температура осколка, испаряющего i -тый нейтрон.

В таблице приведены данные о средней полной кинетической энергии начальных осколков и ее дисперсии, ширине массового распределения для всех исследованных реакций. В той же таблице представлены результаты расчетов углового момента ℓ , реа-

Таблица

Реакция	E_{CN} , МэВ	E_{CN} , МэВ	T , МэВ	ℓ_{max} (\hbar)	E_{tot} , МэВ	\bar{E}_k , МэВ	$\sigma_{E_k}^2$, МэВ 2	σ_M^2 (а.е.м.) 2
$^{204}\text{Pb} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^{207}\text{Po}$	60	66,1	1,55	25	1,99	146,6	94,3	151
$^{206}\text{Pb} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^{209}\text{Po}$	60	66,7	1,52	25	1,97	146,6	89,0	144
$^{207}\text{Pb} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^{210}\text{Po}$	60	67,6	1,52	25	1,76	146,8	88,0	144
$^{192}\text{Os} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{208}\text{Po}$	131	101,8	1,98	57*	7,34	156,0	108,8	191,2
	110	92	1,82	51*	6,00	154,1	107,4	188,7
	90	64	1,46	44*	5,42	152,2	105,6	183,5
$^{198}\text{Pt} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{210}\text{Po}$	110,5	89,7	1,81	50*	4,92	153,7	120,3	180,0
	86	67,4	1,48	43*	3,93	151,2	115,0	172,0

* Для реакций с тяжелыми ионами приведены значения $\ell_{\text{кр}}$, которые рассчитывались по модели Басса /10/.

лизующегося в делящемся ядре, и его энергии вращения:

$$E_R = \frac{\hbar^2}{2J_{\parallel}} \cdot K^2 + \frac{\hbar^2}{2J_{\perp}} (I^2 - K^2) = \frac{\hbar^2}{2J_{\perp}} \ell^2 + \frac{T}{2},$$

где J_{\perp} - перпендикулярный момент инерции делящегося ядра^{/11/},
T - температура ядра в седловой точке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее интересный вывод настоящей работы, как видно из таблицы, заключается в том, что средняя полная кинетическая энергия осколков деления \bar{E}_k зависит от углового момента и энергии возбуждения делящейся системы. При этом увеличение \bar{E}_k составило около 3 кэВ/ \hbar^2 . Этот результат находится в хорошем согласии с данными Юника и др.^{/3/}, полученными для ^{210}Po при более низких значениях энергий возбуждения и угловых моментов, и подтверждает полуэмпирические расчеты Сиккеланда^{/12/}, в которых $\Delta E_k = 1,4 \pm 3$ кэВ/ \hbar^2 для достаточно легких делящихся систем. Из сопоставления данных таблицы о величинах \bar{E}_k , полученных в реакциях $^{192}\text{Os} + ^{16}\text{O}$ или $^{198}\text{Pt} + ^{12}\text{C}$ при различных энергиях возбуждения, и данных о \bar{E}_k для ^{208}Po или ^{210}Po , полученных при одинаковой энергии возбуждения, но разных угловых моментах, можно также заключить, что указанное изменение средней кинетической энергии осколков в основном обусловлено изменением углового момента делящегося ядра и, следовательно, \bar{E}_k слабо зависит от энергии возбуждения. Отсутствие подобной зависимости \bar{E}_k от углового момента при делении ^{208}Po в работе^{/4/}, по-видимому, обусловлено слишком большой толщиной используемых мишеней Os и Pt $\geq 0,5$ мг/см^{2/} и связанными с этим существенными ошибками при спектрометрии энергии осколков деления. Полученная в работе^{/6/} более слабая зависимость $E_k \leq 0,7$ кэВ/ \hbar^2 / от углового момента и энергии возбуждения для ядра ^{119}I при двух энергиях ионов ^{12}C - 107 и 197 МэВ - требует, по-видимому, уточнения и более детальных исследований, поскольку для этой области ядер существенные трудности представляет идентификация осколков деления составного ядра от продуктов фрагментации и глубоконеупругих передач. Кроме того, формы ядер в точке разрыва для ^{119}I и Po могут быть существенно различными. Из данных настоящей работы видно, что дисперсии кинетической энергии осколков $\sigma_{E_k}^2$ и массового распределения σ_M^2 увеличиваются с ростом как углового момента, так и энергии возбуждения. Следует, однако, сказать, что наблюдаемое увеличение $\sigma_{E_k}^2$ и σ_M^2 слабее, чем отмеченное в работе^{/7/} при делении ^{205}At , и примерно такое же, как в случае деления ^{186}Os в реакциях (α, f) и ($^{16}\text{O}, f$)^{/5/}.

Механизм влияния углового момента на значение \bar{E}_k можно понять, если предположить очень слабую связь коллективных и одночастичных степеней свободы, в таком случае вся энергия вращения делящейся системы перейдет в поступательное движение осколков. Однако, как видно из таблицы, наблюдаемое увеличение \bar{E}_k несколько превосходит по величине энергию вращения, реализующуюся в \bar{E}_k при переходе от случая деления ядра с малым угловым моментом /реакция ($^3\text{He}, f$) / к делению с максимальным угловым моментом /реакции ($^{16}\text{O}, f$) / при одинаковой температуре ядра в седловой точке. Это может быть связано с тем, что увеличение углового момента приводит к уменьшению барьера деления и соответственно к увеличению вероятности деления ядра по отношению к испусканию нейтронов. Учет такой конкуренции приведет к уменьшению \bar{E}_k в случае деления ядра с максимальным угловым моментом ($\ell = 57\hbar$) примерно на 2 МэВ.

Подводя итог обсуждению результатов настоящей работы, следует указать на необходимость детального исследования влияния углового момента и энергии возбуждения на характеристики осколков деления ядер не только в районе дважды магического ^{208}Pb , но и более "легких" ядер в области $Z=50-85$. Эти исследования, по-видимому, дадут ответ на вопрос, зависят ли массовые и энергетические распределения осколков от конфигурации делящегося ядра в седловой точке, которая для таких ядер очень близка к точке разрыва ядра на два осколка, а также послужат основой для теоретического рассмотрения обсуждаемой в работе проблемы.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность академику Г.Н.Флерову и профессору Ю.Ц.Оганесяну за поддержку исследований, Б.И.Пустыльнику за стимулирующие дискуссии, А.Я.Русанову и Е.Н.Грузинцеву за помощь в проведении эксперимента и обработке данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blocki J., Krogulski T. Nucl.Phys., 1968, A122, p.417.
2. Павлов А.Ф. и др. ЯФ, 1973, 17, с.1143.
3. Unik J.P., Cuninghame J.G., Croall I.F. Proc. 2nd IAEA Symp.Phys.Chem. Fission. Vienna, 1969, p.717.
4. Cuninghame J.G. et al. Proc. 4th IAEA Symp.Phys.Chem. Fission. Jülich, 1979, vol.1, p.551.
5. Plasil F. et al. Phys.Rev., 1966, 142, p.696.
6. Lebrun C. et al. Nucl.Phys., 1979, A321, p.207.
7. Namboodiri M.N. et al. Nucl.Phys., 1975, A252, p.163.
8. Зодан X. и др. ОИЯИ, P7-10671, Дубна, 1977.

9. Schmitt H.W., Kiker W.E., Williams C.W. Phys.Rev., 1965, 137, p.B837.
10. Bass R. Nucl.Phys., 1974, A231, p.45.
11. Струтинский В.М. ЯФ, 1965, 1, с.821.
12. Sikkeland T. Phys.Lett., 1970, 31B, p.451.

Иткис М.Г. и др.

P7-82-19

О влиянии энергии возбуждения и углового момента на характеристики осколков деления составных ядер ^{208}Po и ^{210}Po

С использованием корреляционной методики измерения энергий двух фрагментов изучались массовые и энергетические распределения осколков деления ^{208}Po и ^{210}Po в реакциях с ионами ^{16}O , ^{12}C и ^3He в широком диапазоне энергий. Наблюдалось увеличение полной кинетической энергии с ростом углового момента, что указывает на слабую связь одночастичных и коллективных мод движения в делящемся ядре, в результате чего энергия вращения переходит в основном в энергию поступательного движения осколков.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Itkis M.G. et al.

P7-82-19

On the Influence of the Excitation Energy and Angular Momentum on the Characteristics of Fission Fragments of ^{208}Po and ^{210}Po Compound Nuclei

By using the angular correlation method for measurement of the energies of two fission fragments, the mass and energy distributions of fragments in the fission of the compound nuclei ^{208}Po and ^{210}Po produced in reactions with ^{16}O , ^{12}C and ^3He ions of different energies have been measured. The fission fragment total kinetic energy is found to grow with the increase of the angular momentum. This may indicate that there is a weak connection between the single-particle and the collective modes of motion in the fissioning nuclei and as a result of this the rotational energy transforms mainly into translational motion of the fission fragments.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 января 1982 года.