

ИНКЛЮЗИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ($p, d, t, {}^4\text{He}$) В СПОНТАННОМ ДЕЛЕНИИ ${}^{248}\text{Cm}$

И.В.Кузнецов, М.П.Иванов, В.Ф.Кушнирук,
Ю.Г.Соболев, Г.В.Букланов

С помощью полупроводникового ($dE-E$)-телескопа измерены инклюзивные энергетические спектры частиц ($p, d, t, {}^4\text{He}$) в спонтанном делении ${}^{248}\text{Cm}$. Наиболее вероятные энергии и ширины энергетических распределений, в пределах экспериментальных ошибок, совпадают с имеющейся совокупностью данных для широкого круга ядер, испытывающих низкоэнергетическое деление. Измеренная относительная вероятность эмиссии длиннопробежных α -частиц согласуется с наблюдаемой зависимостью вероятности тройного спонтанного деления от параметра Z^2/A делящегося ядра для нуклидов с $Z \geq 96$. В спектре протонов наблюдается низкоэнергетическая компонента $E_p \leq 4$ МэВ, которая не может быть объяснена вкладом только от фоновых реакций (n, p) и (α, p).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ.

The Inclusive Energy Spectra of Light Charged Particles ($p, d, t, {}^4\text{He}$) from Spontaneous Fission of ${}^{248}\text{Cm}$

I.V.Kuznetsov et al.

A semiconductor $dE-E$ telescope was used to measure the inclusive energy spectra of light $p, d, t, {}^4\text{He}$ particles from spontaneous fission of ${}^{248}\text{Cm}$. The most probable energies and the widths of the energy distributions of particles within the limits of experimental errors are consistent with available data for a wide range of nuclei undergoing low fission processes. The measured relative probability of the long range α -particle emission is consistent with the observed dependence of the ternary spontaneous fission probability on the parameter Z^2/A of the fissioning nucleus for the nuclides with $Z \geq 96$. The proton energy spectra have a low-energy component with $E_p \leq 4$ MeV which cannot be explained as a contribution of the background (n, p) and (α, p) reactions.

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

Относительно редкие моды низкоэнергетического или спонтанного деления тяжелых ядер, в которых испускаются легкие заряженные частицы, являются предметом интенсивного экспериментального и теоре-

тического исследования с момента их открытия, поскольку представляют значительный интерес как для процесса деления, так и для теории ядерной материи в целом.

Сведения о результатах экспериментальных и теоретических исследований в этой области можно найти в обзорных работах [1—5].

К настоящему времени установлено, что энергетические спектры легких заряженных частиц (за исключением протонов) хорошо аппроксимируются гауссианами, наиболее вероятные энергии и ширины энергетических распределений частиц слабо зависят от параметра делимости Z^2/A в широком диапазоне зарядовых и массовых чисел Z и A делящихся ядер. С наибольшей вероятностью заряженные частицы вылетают почти перпендикулярно к оси разлета осколков деления. В экспериментах наблюдается повышенная вероятность ($\cong 25\%$) тройного спонтанного деления по сравнению с тройным делением под действием нейтронов или γ -квантов. Существующие теоретические модели испытывают трудности при попытках объяснить повышенную вероятность тройного спонтанного деления. В связи с этим представляет интерес расширение круга ядер, испытывающих тройное спонтанное деление, с целью изучения зависимости процесса эмиссии заряженных частиц от массы и заряда делящихся ядер. В данной работе впервые измерены инклюзивные энергетические спектры легких заряженных частиц (p, d, t, α), сопровождающих спонтанное деление ^{248}Cm , и относительная вероятность тройного спонтанного деления этого нуклида.

Идентификация и измерение энергии заряженных частиц проводилась с помощью $(\Delta E-E)$ -телескопа, состоящего из тонкого кремниевого поверхностно-барьерного ΔE -детектора (30 или 500 мкм) и толстого (4 мм) $\text{Si(Li)}E$ -детектора. Обогащенный источник ^{248}Cm (96%) интенсивностью $Y \cong 2 \cdot 10^3$ дел./с., нанесенный на тонкую титановую подложку, размещался на расстоянии 7 мм от телескопа, закрытого танталовой фольгой толщиной 19 мг/см^2 , достаточной для поглощения α -частиц естественного α -распада изотопов Cm. Электронная система сбора информации представлена на рис. 1а. Разрешение на запись события поступало от блока ВАП в случае совпадений логических сигналов временных отметок dE - и E -трактов в диапазоне 0,5 мкс.

Последующий «off-line» анализ производился при условии совпадений данных временных сигналов в интервале $\Delta t \cong 30$ нс. Энергетические спектры частиц получались путем суммирования оцифрованных сигналов от dE - и E -детекторов в соответствующих областях в двумерной « dE - E -матрице» (см. рис.1б) с учетом энергетических потерь частиц в поглотительных фольгах.

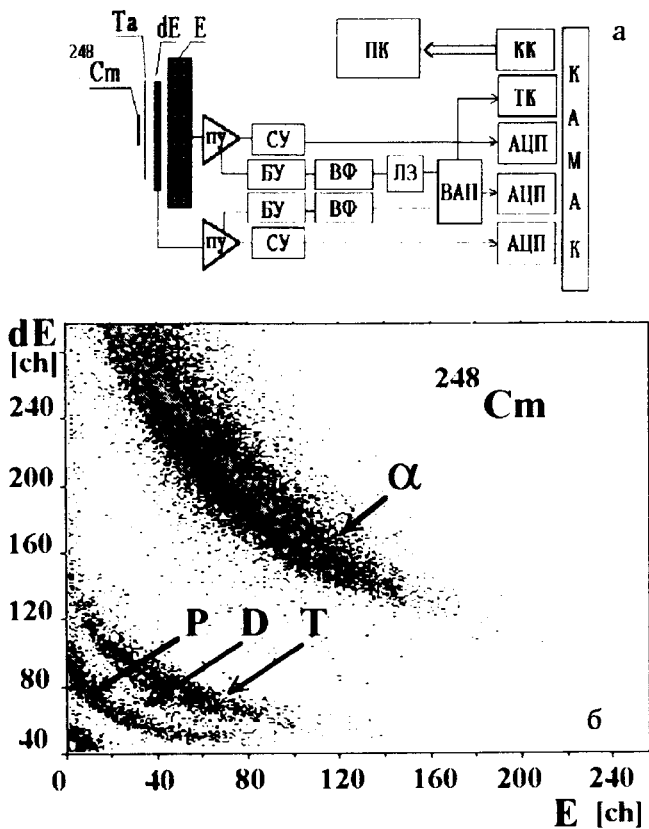


Рис.1. а) блок-схема электронной системы сбора информации, б) $(dE-E)$ -матрица частиц $p, d, t, {}^4\text{He}$

На рис.2 приведены спектры частиц $p, d, t, {}^4\text{He}$, измеренные в одной экспозиции. Гладкой кривой приведены результаты χ^2 -аппроксимации спектров гауссианами. Из рис.2 видно, что экспериментальные спектры d -, t -, ${}^4\text{He}$ -частиц хорошо описываются распределением Гаусса, а спектр протонов имеет сложную структуру. Подобная форма спектра протонов наблюдалась также в спонтанном делении ${}^{252}\text{Cf}$ [6,7]. Низкоэнергетическая компонента спектра протонов в указанных работах была отнесена к фоновым (n,p) - и (α, p) -реакциям на примесях материала поглотителей, источника и детекторов. Однако в работе [8] выход низкоэнергетических протонов в спонтанном делении ${}^{252}\text{Cf}$ авторы не смогли объяснить за счет фоновых реакций. Энергетический спектр протонов в области энергий $E_p \geq 4$ МэВ нами, так же, как и авторами работ [6,7],

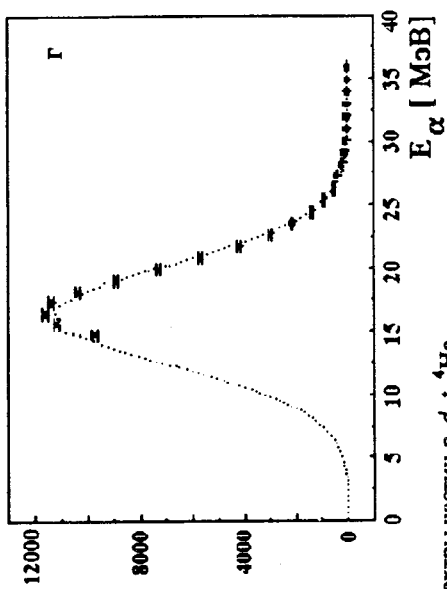
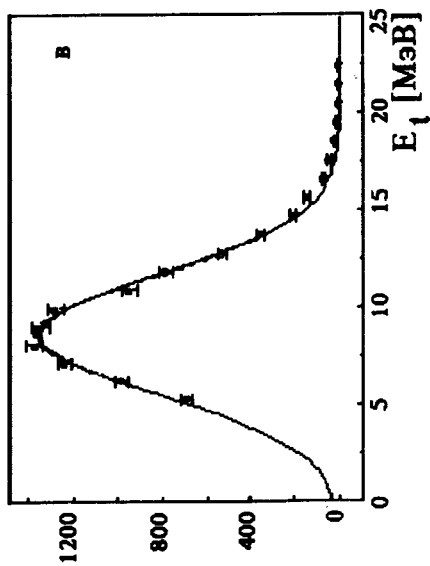
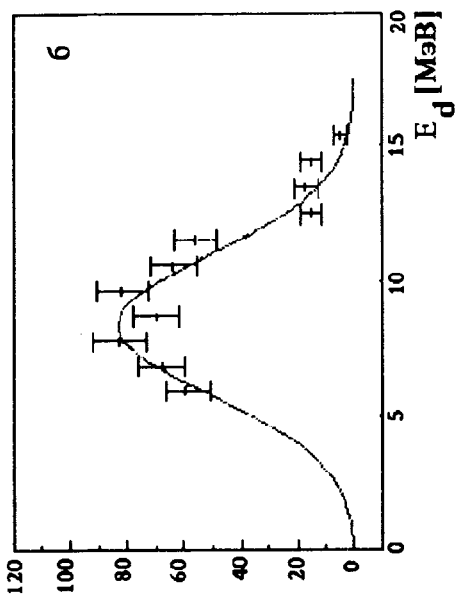
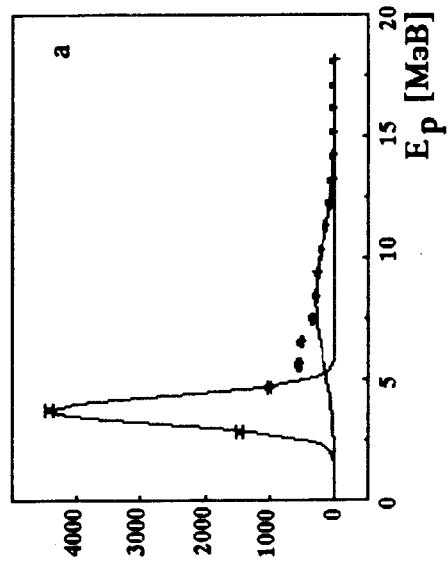


Рис.2. Энергетические спектры частиц p , d , t , ${}^4\text{He}$

фитировался гауссианом и был отнесен к протонам, связанными с тройным делением.

В таблице приведены полученные из измеренных спектров наиболее вероятные энергии, ширины энергетических распределений и относительные экстраполированные выходы легких заряженных частиц в сравнении с известными характеристиками частиц, сопровождающих спонтанное деление ^{252}Cf . Из таблицы видно, что параметры, описывающие энергетические характеристики частиц для деления ^{248}Cm и ^{252}Cf , в пределах экспериментальных ошибок, совпадают. На основании этого наблюдения можно предположить, что тройное спонтанное деление ^{248}Cm характеризуется теми же закономерностями, которые присущи тройному спонтанному делению ^{252}Cf и другим ядрам, испытывающим низкоэнергетическое тройное деление. Для измерения относительной вероятности эмиссии ^4He в тройном делении ^{248}Cm и ^{252}Cf сначала измерялся выход осколков деления с помощью dE -детектора телескопа, а затем, после установки танталовой фольги, выход α -частиц. Отношение выхода ^4He к двойному делению, усредненное по нескольким измерениям, составило $2,0 \pm 0,3$ и $3,0 \pm 0,3$ для ^{248}Cm и ^{252}Cf соответственно. На рис.3 приведены результаты наших измерений (от-

Таблица. Параметры энергетических спектров и выходы легких ядер

Частица	Измер. диапазон энергии, МэВ	Наиболее вероятн. энергия, МэВ	ПШПМ, МэВ	Экстрапол. выход на 10^4 ^4He	Лит.
^{248}Cm					
^1H	8,5—18,2	$8,3 \pm 0,5$	$5,7 \pm 0,5$	160 ± 20	*)
^2H	6,2—15,5	$8,4 \pm 0,5$	$6,2 \pm 0,6$	50 ± 5	*)
^3H	5,2—22,5	$8,7 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,2$	922 ± 18	*)
^4He	14,8—36,0	$16,4 \pm 0,2$	$9,5 \pm 0,3$	10^4	*)
*) — результаты настоящей работы					
^{252}Cf					
^1H	7,3—18,8	$7,8 \pm 0,8$	$6,8 \pm 0,8$	175 ± 30	[6]
^2H	5,3—21,5	$8,0 \pm 0,5$	$7,2 \pm 0,7$	68 ± 3	[8]
^3H	4,0—20,0	$8,3 \pm 0,1$	$7,0 \pm 0,1$	836 ± 12	[10]
^4He	8,3—37,3	$16,0 \pm 0,2$	$9,9 \pm 0,7$	10^4	[6]
^4He	8,0—28,0	$15,8 \pm 0,1$	$10,2 \pm 0,1$	10^4	[10]

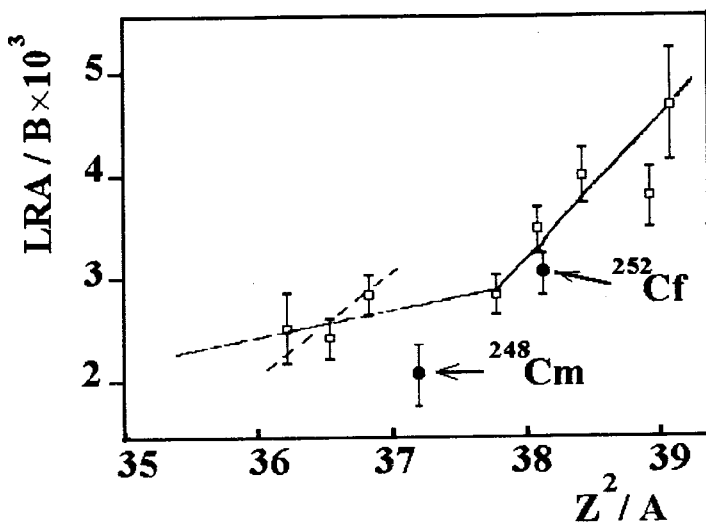


Рис.3. Вероятность эмиссии ^4He в зависимости от Z^2/A

меченные заполненными кружками) совместно с известными [9] данными по зависимости относительной вероятности эмиссии α -частиц от величины параметра Z^2/A делящегося ядра. Сравнение данных настоящей работы с литературными показывает, что крутой спад относительной вероятности тройного спонтанного деления сохраняется вплоть до величины параметра делимости $Z^2/A \cong 37$.

Для выяснения природы низкоэнергетической части протонного спектра были проведены дополнительные опыты:

Влияние (n,p) -реакций, вызываемых нейтронами деления в танталовой фольге и материале детекторов, исследовалось в эксперименте, в котором между источником ^{248}Cm и телескопом помещался танталовый поглотитель толщиной $\cong 1300 \text{ мг/см}^2$, останавливающий протоны с энергией $E_p \leq 25 \text{ МэВ}$ и α -частицы с $E_\alpha \leq 90 \text{ МэВ}$. В результате измерения было установлено, что верхняя граница вклада в низкоэнергетическую часть спектра протонов от (n,p) -реакций, вызываемых нейтронами деления, составила не более 10%.

С целью выяснения вклада протонов отдачи от α -частиц и осколков деления, непосредственно между источником ^{248}Cm и поглотительной фольгой (19 мг/см^2) помещалась майларовая фольга, содержащая $\cong 10^{18} \text{ см}^{-2}$ атомов водорода. В результате измерения было установлено, что вклад протонов отдачи от упругого рассеяния α -частиц и осколков

ков деления на водородосодержащих примесях в мишени и танталовой фольге пренебрежимо мал.

Таким образом, дополнительные опыты показали, что выход низкоэнергетических протонов невозможно объяснить только за счет фоновых реакций.

Для дальнейшего исследования механизма эмиссии низкоэнергетических протонов в спонтанном делении целесообразно провести эксперименты с более низким энергетическим порогом регистрации протонов в совпадении с осколками деления.

Авторы благодарны Ю.Э.Пенионжкевичу за постоянную поддержку при проведении настоящей работы, Б.И.Пустыльнику и Ю.В.Пяткову за полезные обсуждения, Э.М.Козулину и Ю.В.Лобанову за помощь в работе.

Литература

1. Перфилов Н.А. — Романов Н.Ф., Соловьев Э.И. — УФН, 1961, т.71, № 3, с.200.
2. Hyde E.K., — In: 'The Nuclear Properties of Heavy Elements, vol.III, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.G., 1964, p.131.
3. Halpern I. — Ann. Rev. Nucl. Sci., 1971, vol.21, p.245.
4. Гусев Ю.И., Селиверстов Д.М. — Материалы 25 Зимней школы ЛИЯФ 1990, Л.: ЛИЯФ, 1990, с.35.
5. Theobald J. — In: School-Seminar on Heavy Ion Physics, JINR, 7-93-274, Dubna, vol.1, p.262.
6. Cospers S.W., Cerny J., Gatti R.S. — Phys. Rev., 1967, vol. 154, p.1193.
7. Gavron A., Gazit Y. — Phys. Rev., 1974, vol.10, No.1, p.388.
8. Budzanovski A., Karcz W., Siwek A., Skwiczynska I., Wolski R. — Raport IFI N1509/PL, Krakow, 1990.
9. Wagemans C. — In: Proc. Int. Workshop on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, JINR, E7-52-95, Dubna, 1992, p.139.
10. Грачев В.Т., Гусев Ю.И., Селиверстов Д.М. — ЯФ, 1988, т.47, вып.3, с.627.

Рукопись поступила 19 июля 1994 года.