



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-206

P15-96-206

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

ИНКЛЮЗИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ  
И ВЫХОДЫ ЛЕГКИХ ЯДЕР  
В СПОНТАННОМ ДЕЛЕНИИ  $^{248}\text{Cm}$

Направлено в журнал «Ядерная физика»

1996

## Введение

Относительно редкие моды низкоэнергетического и спонтанного деления тяжелых ядер, в которых испускаются легкие заряженные частицы (ЛЗЧ), являются предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований с момента их открытия, поскольку эти исследования можно отнести к одним из основных источников информации о последней стадии деления ядра.

Сведения о современном состоянии проблемы изучения эмиссии ЛЗЧ при делении (тройное деление) можно найти в обзорной работе [1].

Наибольший объем экспериментальных данных получен при исследовании деления, сопровождающегося вылетом длиннопробежной альфа-частицы (ДАЧ) со средней кинетической энергией около 16 МэВ, поскольку вероятность такого события составляет около 90% от полной вероятности эмиссии ЛЗЧ.

Анализ этих данных [2] показывает, что выход ДАЧ увеличивается с увеличением параметра делимости  $Z^2/A$  и систематически выше для спонтанного деления по сравнению с вынужденным делением. Кроме этого, отмечено резкое увеличение выходов ДАЧ для  $Z^2/A > 38$  при спонтанном делении. Существующие теоретические модели не позволяют объяснить повышенную вероятность тройного спонтанного деления.

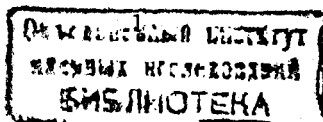
Экспериментальные данные по тройному спонтанному делению с эмиссией частиц более тяжелых, чем доминирующая альфа-частица, все еще очень скудны главным образом из-за очень низких выходов ( $\leq 10^{-5}$  на двойное деление). Для ЛЗЧ с  $A > 4$  данные по выходам и энергетическим распределениям получены в основном при вынужденном делении ядер нейтронами. Единственным спонтанно делящимся ядром, для которого были измерены выходы и энергии ЛЗЧ с  $A > 4$ , является  $^{252}\text{Cf}$ .

Поэтому представляет интерес исследование тройного деления у более широкого круга спонтанно делящихся ядер. В настоящей работе впервые измерены выходы и энергетические распределения изотопов  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$  и  $^8\text{He}$ , а также суммарные выходы и энергетические спектры ядер  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$ , испускаемых при тройном спонтанном делении ядра  $^{248}\text{Cm}$ .

## Экспериментальный метод

Идентификация и измерение энергии изотопов  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  и  $^4\text{He}$  проводилась с помощью полупроводникового  $dE-E$ -телескопа, состоящего из тонкого  $\text{Si}(\text{Au})$   $dE$ -детектора (30 и 500 мкм) и толстого (4 мм)  $\text{Si}(\text{Li})$   $E$ -детектора.

В измерениях использовался источник  $^{248}\text{Cm}$  интенсивностью  $2 \cdot 10^3$  делений/с. Источник представлял собой оксид кюрия (96,0%  $^{248}\text{Cm}$ , 3,8%  $^{246}\text{Cm}$ , и 0,2%  $^{244}\text{Cm}$ ) на подложке из 1,5-мкм  $\text{Ti}$ . Средняя толщина слоя источника составляла  $150 \text{ мкг/см}^2$  с разбросом по площади  $\leq 10\%$ . Для предотвращения попадания альфа-частиц естественного распада и осколков в детекторы источник закрывался танталовой фольгой толщиной  $19 \text{ мг/см}^2$ . Более детальное описание этой методики можно найти в работе [3].



При изучении эмиссии ядер He, Li и Be также использовался dE-E-метод. В этих измерениях в качестве dE - детектора была применена ионизационная камера, которая состояла из двух плоских параллельных электродов, отстоящих друг от друга на расстоянии 70 мм, и расположенной между ними сетки. Сетка из нихромовой проволоки толщиной 100 мкм с шагом 2 мм являлась собирающим электродом камеры. На одном из электродов закреплялся полупроводниковый Si(Au) E - детектор так, что покрытая золотом поверхность детектора находилась в одной плоскости с поверхностью электрода. Диаметр поверхности и толщина рабочего слоя E - детектора составляли соответственно 50 мм и 200 мкм. На другом электроде камеры устанавливался описанный выше источник  $^{248}\text{Cm}$ . В данном случае интенсивность источника составляла  $10^4$  делений/с. Для поглощения альфа-частиц естественного распада и осколков деления источник был закрыт алюминиевой фольгой толщиной 7,6 мг/см<sup>2</sup>. При измерениях dE ионизационная камера с E - детектором находилась в объеме, заполненном смесью газов (90% аргон + 10% метан) при давлении 0,2 атм. Подробное описание этой методики дано в работе [4].

При измерениях эмиссии изотопов  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$  и  $^8\text{He}$  описанный выше dE - детектор был заменен на аксиальную ионизационную камеру с сеткой Фриша. Полупроводниковый Si(Au) E - детектор устанавливался на катоде ионизационной камеры. Анод и катод камеры отстояли друг от друга на расстоянии 66 мм. Сетка, изготовленная из вольфрамовой проволоки толщиной 20 мкм с шагом 1 мм, располагалась на расстоянии 16 мм от анода. Источник  $^{248}\text{Cm}$  ( $10^4$  делений/с) закреплялся на расстоянии 23 мм от анода с противоположной от сетки стороны и при измерениях закрывался Al-фольгой толщиной 5,4 мг/см<sup>2</sup>. Помимо этой фольги ЛЗЧ из источника, прежде чем попасть в dE-E-телескоп, проходили Al-фольгу толщиной 1,9 мг/см<sup>2</sup>, установленную на аноде. Измерения были проведены при давлении газа (90% аргон + 10% метан) в камере 0,7 атм.

Энергетические спектры частиц получались путем суммирования оцифрованных сигналов от детекторов dE и E в соответствующих областях в двумерных dE-E-матрицах, при этом вводились поправки на потери энергии в фольгах и в газе в соответствии с таблицами [5].

### Результаты и обсуждение

На рис.1 и 2 приведены энергетические спектры p, d, t,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$  тройного деления  $^{248}\text{Cm}$ . Имеющиеся методики не позволяли разделить отдельные изотопы Li и Be, поэтому на рис.2 представлены суммарные энергетические спектры изотопов Li и Be, испускаемых при тройном делении  $^{248}\text{Cm}$ .

Гладкими кривыми показаны результаты  $\chi^2$ -аппроксимации экспериментальных спектров функцией Гаусса. Поскольку энергетический порог регистрации  $^8\text{He}$  был высок (около 13 МэВ), аппроксимация энергетического рас-

пределения функцией Гаусса производилась с использованием фиксированного значения средней энергии этого изотопа для  $^{252}\text{Cf}$ , взятого из работы [6].

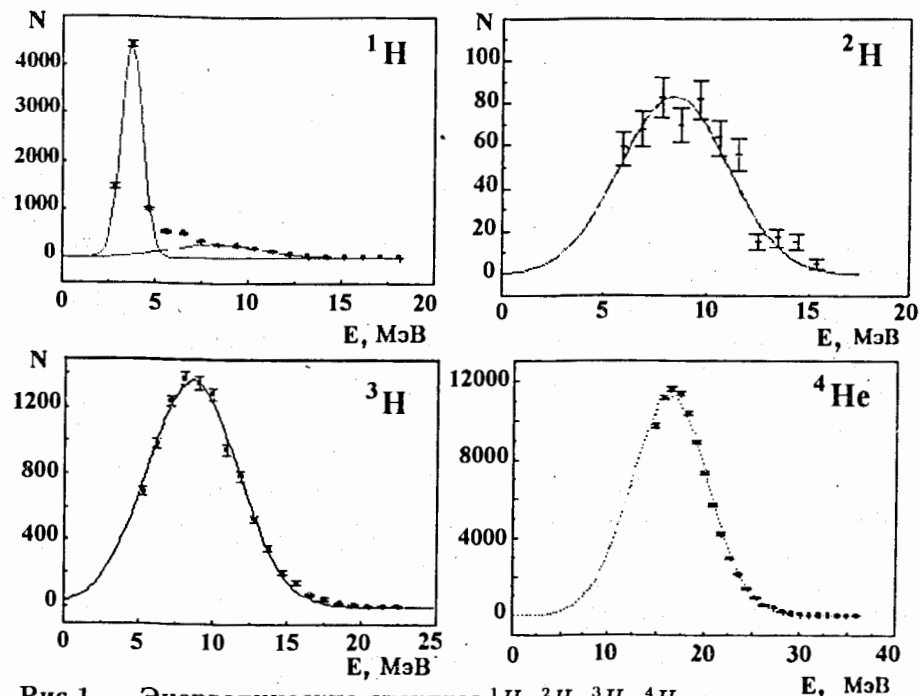


Рис.1. Энергетические спектры  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^4\text{He}$

Видно, что, за исключением протонов, экспериментальные энергетические спектры частиц хорошо описываются распределением Гаусса. Спектр протонов имеет сложную структуру. Подобная форма спектра протонов наблюдалась также в спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$  [7,8]. Низкоэнергетическая компонента спектра протонов в указанных работах была отнесена к фоновым (n,p)- и ( $\alpha$ ,p)-реакциям на примесях материала поглотителей, источника и детекторов. Однако в работе [9] выход низкоэнергетических протонов в спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$  авторы не смогли объяснить за счет фоновых реакций. Для выяснения природы низкоэнергетической части протонного спектра целесообразно провести эксперименты с более низким порогом регистрации протонов в совпадении с осколками деления. Энергетический спектр протонов в области энергий  $E > 5$  МэВ нами, также как и авторами работ [7,8], аппроксимировался гауссианом и был отнесен к протонам, связанным с тройным делением.

В таблице 1 приведены полученные из измеренных спектров относительные экстраполированные выходы ЛЗЧ от  $^1\text{H}$  до  $^8\text{He}$  (на  $10^4$  ядер  $^4\text{He}$ ), их наиболее вероятные энергии и полные ширины на половине высоты энергетических распределений (ПШПВ).

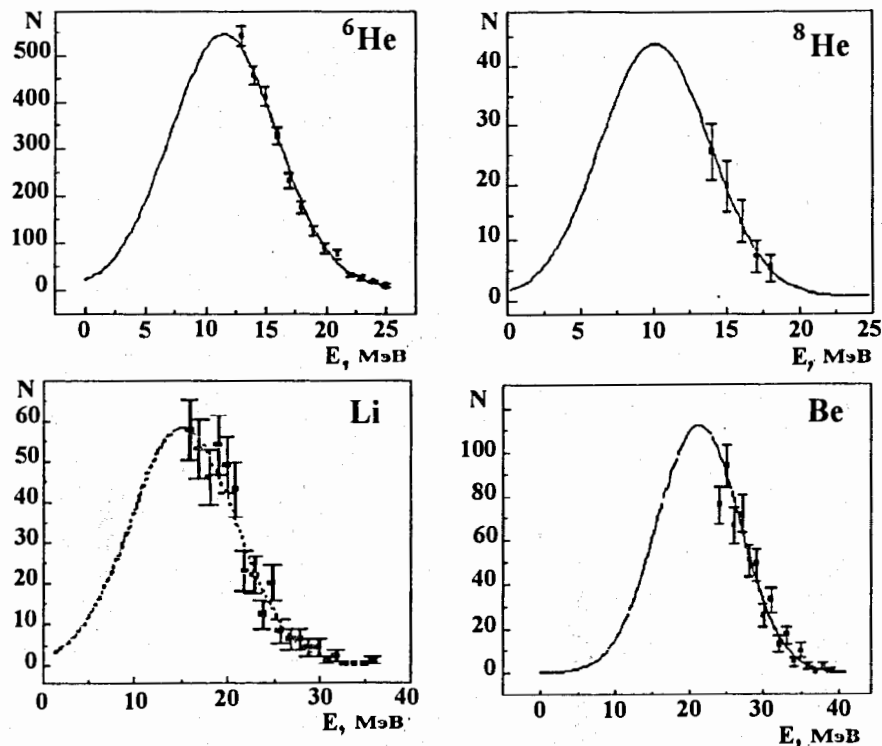


Рис.2. Энергетические спектры  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Be}$

В таблице 2 представлены известные из литературы характеристики частиц, сопровождающих спонтанное деление  ${}^{252}\text{Cf}$ . Из таблиц 1,2 видно, что испускаемые при спонтанном делении  ${}^{252}\text{Cf}$  и  ${}^{248}\text{Cm}$  ЛЗЧ от  ${}^1\text{H}$  до  ${}^8\text{He}$  имеют в пределах экспериментальных ошибок близкие значения параметров энергетических распределений и выходов по отношению к выходам ядер  ${}^4\text{He}$ .

Частица	Экстрапол. выход на $10^4$ ядер ${}^4\text{He}$	$\langle E \rangle$ , МэВ	ПШПВ, МэВ
${}^1\text{H}$	$160 \pm 20$	$8,3 \pm 0,5$	$5,7 \pm 0,5$
${}^2\text{H}$	$50 \pm 5$	$8,4 \pm 0,5$	$6,2 \pm 0,6$
${}^3\text{H}$	$922 \pm 18$	$8,7 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,2$
${}^4\text{He}$	$10^4$	$15,8 \pm 0,3$	$10,1 \pm 0,3$
${}^6\text{He}$	$354 \pm 31$	$11,5 \pm 0,6$	$10,4 \pm 0,7$
${}^8\text{He}$	$24 \pm 4$	$10,1 \pm 0,4$	$8,8 \pm 1,2$

Частица	Экстрапол. выход на $10^4$ ядер ${}^4\text{He}$	$\langle E \rangle$ , МэВ	ПШПВ, МэВ	Ссылка
${}^1\text{H}$	$175 \pm 30$	$7,8 \pm 0,8$	$6,8 \pm 0,8$	[7]
${}^2\text{H}$	$68 \pm 3$	$8,0 \pm 0,5$	$7,2 \pm 0,7$	[9]
${}^3\text{H}$	$836 \pm 12$	$8,3 \pm 0,1$	$7,0 \pm 0,1$	[10]
${}^4\text{He}$	$10^4$	$15,8 \pm 0,1$	$10,2 \pm 0,1$	[10]
${}^6\text{He}$	$386 \pm 12$	$11,4 \pm 0,3$	$10,6 \pm 0,3$	[10]
${}^6\text{He}$	$403 \pm 26$	$11,6 \pm 0,2$	$10,5 \pm 0,2$	[6]
${}^8\text{He}$	$25 \pm 4$	$10,1 \pm 0,4$	$9,6 \pm 0,4$	[6]

Результаты измерений эмиссии ядер  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$ , испускаемых при тройном делении  ${}^{248}\text{Cm}$ , представлены в таблицах 3 и 4. Там же даны известные из литературы параметры эмиссии этих ядер при спонтанном делении  ${}^{252}\text{Cf}$ . Видно, что выходы ядер  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$  при делении  ${}^{248}\text{Cm}$  существенно ниже, чем при делении  ${}^{252}\text{Cf}$ .

Ядро	Экстрапол. выход на $10^4$ ядер ${}^4\text{He}$	$\langle E \rangle$ , МэВ	ПШПВ, МэВ	Ссылка
${}^{252}\text{Cf}$	$55 \pm 4$	-	-	[10]
${}^{252}\text{Cf}$	$53 \pm 6$	$13,5 \pm 1,4$	$13,8 \pm 1,7$	[6]
${}^{248}\text{Cm}$	$26 \pm 9$	$15,2 \pm 2,2$	$13,4 \pm 2,0$	наст. раб.

Ядро	Экстрапол. выход на $10^4$ ядер ${}^4\text{He}$	$\langle E \rangle$ , МэВ	ПШПВ, МэВ	ссылка
${}^{252}\text{Cf}$	$164 \pm 9$	-	-	[10]
${}^{252}\text{Cf}$	$185 \pm 20$	$16,3 \pm 2,0$	16,5	[6]
${}^{248}\text{Cm}$	$49 \pm 24$	$21,1 \pm 2,8$	$13,1 \pm 2,2$	наст. раб.

Измерения вероятностей эмиссии ДАЧ по отношению к бинарному делению были проведены в настоящей работе в одинаковых экспериментальных условиях с источниками  ${}^{248}\text{Cm}$  и  ${}^{252}\text{Cf}$ . Для этого производилось измерение интенсивности счета осколков деления и измерение интенсивности эмиссии ядер  ${}^4\text{He}$ . Вычисленные вероятности эмиссии ядер  ${}^4\text{He}$  по отношению к бинарному делению, полученные с использованием экстраполированных энергетических спектров  ${}^4\text{He}$ , составили для  ${}^{248}\text{Cm}$  и  ${}^{252}\text{Cf}$  соответственно  $(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$  и  $(3,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ . При этом предполагалось, что энергетические спектры  ${}^4\text{He}$  описываются распределением Гаусса.

На рис.3 показаны результаты наших измерений вероятностей эмиссии ДАЧ при спонтанном делении  ${}^{248}\text{Cm}$  и  ${}^{252}\text{Cf}$  (отмеченные заполненными кружками) совместно со систематизированными в работе [2] данными по вероят-

ностям эмиссии ДАЧ при спонтанном делении в зависимости от величины параметра  $Z^2/A$  делящегося ядра.

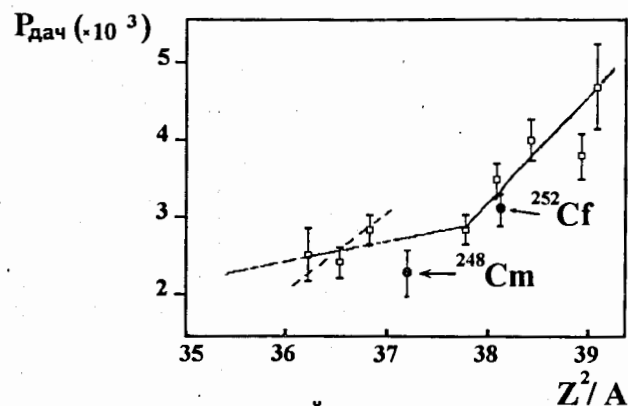


Рис.3. Зависимость вероятностей эмиссии длиннопробежных α-частиц от  $Z^2/A$

Качественное объяснение полученных в настоящей работе данных согласуется с интерпретацией параметров эмиссии ДАЧ для деления ядер от  $^{229}\text{Th}$  до  $^{257}\text{Fm}$ , сделанной в работе [2]. Предполагается, что легкие заряженные частицы эмитируются главным образом за счет легкого осколка [11], что является следствием оболочечной стабилизации масс в группе тяжелых осколков благодаря сферической ( $N = 82$ ) и деформированной ( $N = 88$ ) нейтронным оболочкам. Одинаковые (в пределах экспериментальных ошибок) средние энергии и ширины распределений ДАЧ от теплового деления  $^{235}\text{U}$  до спонтанного деления  $^{257}\text{Fm}$  объясняются образованием очень малоотличающихся кулоновских полей, фокусирующих легкую частицу, благодаря постоянству среднего заряда в группе тяжелых осколков.

Выход ДАЧ для ядер с параметрами делимости  $Z^2/A > 38$  (рис.3) резко возрастает с уменьшением массы спонтанно делящегося изотопа, что можно объяснить увеличением вероятности образования легкой частицы с увеличением деформации легкого осколка, которая предсказывается при расчетах с использованием модели равновесия в точке разрыва [12].

Для  $^{248}\text{Cm}$  с меньшим параметром делимости по сравнению с параметром делимости  $^{252}\text{Cf}$  и более легких изотопов кюрия вероятность эмиссии ДАЧ должна быть меньше. Этот вывод для выходов ДАЧ подтверждается в наших экспериментах. Показано, что крутой спад вероятности эмиссии ДАЧ продолжается вплоть до значения параметра делимости  $Z^2/A = 37.16$ . Приведенные выше рассуждения применимы и к ЛЗЧ с  $Z > 2$ , испускаемым при тройном делении ядер. Выход таких частиц должен падать при уменьшении параметра делимости более резко по сравнению с падением выхода ДАЧ, поскольку потенциальный барьер для частиц с  $Z > 2$  выше, чем для альфа-

частиц. Эта зависимость наблюдается в наших экспериментах. Выходы ядер  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$  уменьшаются соответственно в два и три раза по сравнению с последними наиболее надежными, по нашему мнению, значениями этих выходов для  $^{252}\text{Cf}$  [6,10].

Авторы благодарны Ю.Е.Пенионжевичу за постоянную поддержку при проведении настоящей работы, Б.И.Пустыльнику за полезные обсуждения, Г.В.Букланову, В.С.Саламатину за помощь в работе.

#### Список литературы

1. Theobald J. // Proc.Int.School-Seminar on Heavy Ion Physics, JINR, 7-93-274, Dubna, 1993, v.1, p.262.
2. Wagemans C. // Proc.Int.Workshop on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, JINR, E7-52-95, Dubna, 1992, p.139.
3. Кузнецов И.В. и др. // Краткие сообщения ОИЯИ, N 3(66)-94, Дубна, 1994, с.30.
4. Иванов М.П. и др. // Краткие сообщения ОИЯИ, N 2(65)-94, Дубна, 1994, с.55.
5. Northcliffe L.C. and Schilling R.E. // Nucl.Data Tables, 1970, v.A7, N 3-4.
6. Z. Dlouhy, et.al. // Proc. 6th Int.Conf. on Nuclei Far from Stability and 9th Int. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Kues, Germany, 19-24 July, 1992, p.481.
7. Cosper S.W., Cerny J., Gatti R.S. // Phys.Rev, 1967, v.154, p.1193.
8. Gavron A., Gazit J. // Phys.Rev, 1974, v.10, N 1, p.388.
9. Budzanovski A. et.al. // Raport IFI N1509/Pl, Krakov, 1990.
10. Грачев В.Г. и др. // ЯФ, т.47, вып.3, 1988, с.622.
11. Theobald J. // Proc. 15th Int. Symp. on Nuclear Physics, Dresden(D), Report ZfK-592 (1986) p.43.
12. Wilkins B. et al. // Phys.Rev, 1976, C14, p.1832.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июня 1996 года.

Иванов М.П. и др.

P15-96-206

Инклюзивные энергетические спектры и выходы легких ядер  
в спонтанном делении  $^{248}\text{Cm}$

Впервые измерены инклюзивные энергетические спектры и выходы изотопов  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ , суммы изотопов Li и суммы изотопов Be, испускаемых при тройном спонтанном делении  $^{248}\text{Cm}$ . Выходы изотопов водорода и гелия по отношению к выходу  $^4\text{He}$  для  $^{248}\text{Cm}$  совпадают в пределах экспериментальных ошибок с выходами, измеренными для  $^{252}\text{Cf}$ . Выходы изотопов Li и Be при спонтанном делении  $^{248}\text{Cm}$  значительно меньше по сравнению с  $^{252}\text{Cf}$ . Измеренная вероятность эмиссии ядер  $^4\text{He}$   $(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$  на двойное деление при спонтанном делении  $^{248}\text{Cm}$  согласуется с ранее наблюдаемой зависимостью вероятности тройного спонтанного деления от параметра  $Z^2/A$  для ядер с  $Z \geq 96$ .

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна, 1996

Перевод авторов

Ivanov M.P. et al.

P15-96-206

The Inclusive Energy Spectra and Yields of Light Nuclei  
in the Spontaneous Fission of  $^{248}\text{Cm}$

The inclusive energy spectra and yields of  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$  isotopes, of the sum of Li isotopes and of the sum of Be isotopes emitted in the ternary spontaneous fission of  $^{248}\text{Cm}$  were measured for the first time. The yields of hydrogen and helium isotopes relative to the  $^4\text{He}$  yield for  $^{248}\text{Cm}$  coincide with those for  $^{252}\text{Cf}$  within the experimental error limits. The yields of Li and Be isotopes in the spontaneous fission of  $^{248}\text{Cm}$  are significantly less compared to  $^{252}\text{Cf}$ . The measured emission probability of  $^4\text{He}$  nuclei found to be  $(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$  per binary fission in the spontaneous fission of  $^{248}\text{Cm}$  is consistent with the earlier observed dependence of the ternary spontaneous fission probability on the parameter  $Z^2/A$  for the nuclides of  $Z \geq 96$ .

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 1996