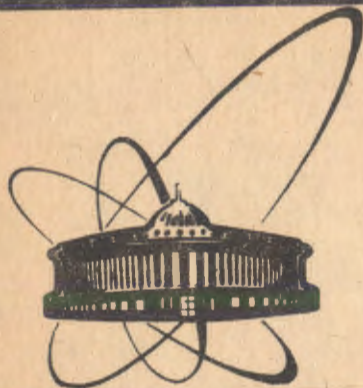


90-513



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

1006/91

P15-90-513

Ш.С.Зейналов, К.В.Михайлов, Г.С.Попеко,  
А.Н.Андреев, А.В.Еремин, А.П.Кабаченко,  
В.И.Чепигин, Г.М.Тер-Акопьян

СЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОТОПОВ ВИСМУТА  
В РЕАКЦИЯХ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ  
 $^{159}\text{Tb} + ^{40}\text{Ar}$  и  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$

1990

При обсуждении данных о сечениях образования нейтронодефицитных изотопов At в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами<sup>11</sup> было отмечено, что степень согласия экспериментальных результатов с расчетом по статистической модели постепенно ухудшается по мере увеличения нейтронного дефицита ядер-продуктов и составляет фактор 10÷15 для наиболее нейтронодефицитных изотопов At, образующихся в реакции  $^{159}\text{Tb} + ^4\text{Ca}$ . Для интерпретации наблюдаемого расхождения было полезно провести аналогичные измерения для изотопов Bi, что и явилось предметом настоящей работы. Кроме того, точные количественные данные о характеристиках  $\alpha$ -распадов основных и изомерных состояний нейтронодефицитных изотопов Bi с  $A \leq 195$  представляют большой самостоятельный интерес как с точки зрения теории  $\alpha$ -распада, так и с точки зрения изучения структуры околomagических ядер в районе  $Z \cong 82$ <sup>12,1</sup>.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Эксперименты выполнялись на циклотроне У-400 ЛЯР ОИЯИ. Блок-схема эксперимента приведена на рис.1. В работе использовались выведенные пучки ионов аргона с энергией 217, 250 и 293 МэВ и ионов кальция с энергией 215 и 270 МэВ. Изменение энергии ионов с шагом 3 ÷ 6 МэВ осуществлялось с помощью титановых и алюминиевых поглотителей. Энергия пучка после прохождения поглотителей контролировалась по энергии ионов, рассеянных на тонкой (200 мкг/см<sup>2</sup>) золотой фольге на угол 30°. Энергия рассеянных ионов измерялась поверхностно-барьерным полупроводниковым детектором (ППД). Разброс энергии ионов пучка, падающих на мишень, составлял от 1 до 3%. Интенсивность пучка на мишени диаметром 10 мм соответствовала  $(2 \div 3) \cdot 10^{11}$  част./с и измерялась цилиндром Фарадея. Мишени были изготовлены из окисла тербия толщиной 600 мкг/см<sup>2</sup> и окисла европия-153 толщиной 500 мкг/см<sup>2</sup>. Слои окислов наносились на титановые подложки (1,35 мг/см<sup>2</sup>). Толщина мишени определялась взвешиванием. Точность в определении толщины рабочей мишени была не хуже 20%. Изотопное обогащение мишени из европия-153 составляло 99,1%.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ

ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОИЯИ ДУБНА

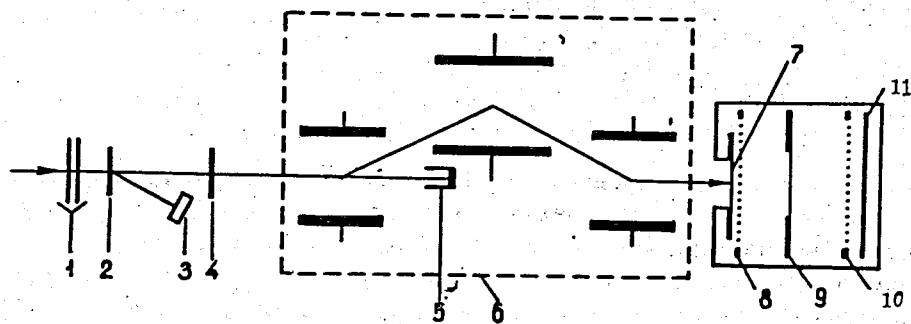


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — поглотители, 2 — рассеиватель, 3 — детектор для измерения энергии пучков ионов, 4 — мишень, 5 — цилиндр Фарадея, 6 — сепаратор, 7 — входное окно ионизационной камеры, 8 — сетка Фриша первой ионизационной камеры, 9 — катод, 10 — сетка Фриша второй камеры, 11 — анод второй ионизационной камеры.

Отделение продуктов реакций полного слияния от пучка и продуктов реакций передач осуществлялось кинематическим сепаратором ВАСИЛИСА<sup>3,4</sup>, в котором происходило разделение продуктов реакций по электрической жесткости, и продукты реакций полного слияния фокусировались в детектирующую систему, расположенную на расстоянии 12 метров от мишени.

В качестве детектора в наших экспериментах использовалась двойная ионизационная камера<sup>15</sup>, представляющая собой систему плоскопараллельных электродов. Две независимые ионизационные камеры имели общий катод. Входное окно камеры диаметром 90 мм было изготовлено из металлизированного лавсана толщиной 420 мкг/см<sup>2</sup>. Входное окно служило анодом первой ионизационной камеры и было электрически изолировано от корпуса. Сетка Фриша первой ионизационной камеры располагалась на расстоянии 5 мм от входного окна и — 95 мм от катода в экспериментах с ионами аргона и на расстоянии 42 мм от катода в экспериментах с ионами кальция. В центре катода имелось окно диаметром 100 мм, закрытое металлизированной лавсановой пленкой толщиной 70 мкг/см<sup>2</sup>. Расстояния от катода до сетки Фриша и до анода во второй ионизационной камере составляли соответственно 185 и 227 мм. Высокое напряжение подавалось на катод камеры. Камера работала на смеси газов 90% аргона и 10% метана. Давление газа составляло в экспериментах 400 Торр. Продукты реакций после прохождения через сепаратор ВАСИЛИСА попадали через входное окно

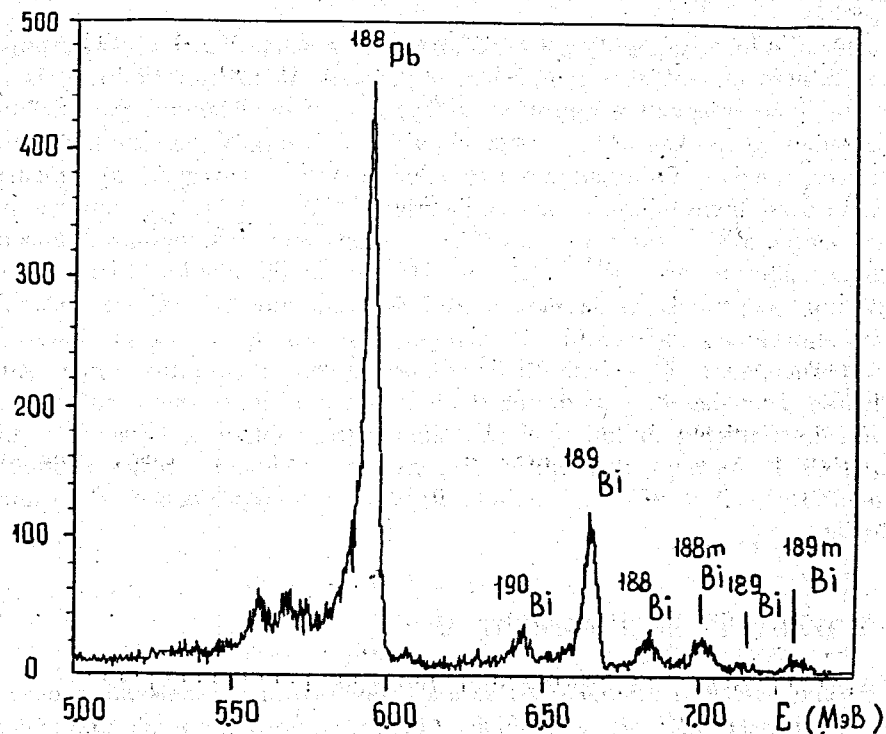


Рис.2. Альфа-спектр продуктов реакции  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$ , измеренный при энергии бомбардирующих ионов 200 МэВ.

в газовый объем первой ионизационной камеры. Исследуемые продукты реакций полного слияния останавливались в камере на расстоянии более 15 мм от входного окна. После термализации в газе исследуемые ядра образовывали преимущественно однозарядные положительные ионы, которые под действием электрического поля дрейфовали к катоду и оседали на поверхности лавсановой пленки. Напряженность электрического поля в пространстве дрейфа была более 150 В/см. Время дрейфа ионов висмута от места их остановки в газе до катода, по нашим оценкам, не превышало 20 мс в опытах с ионами аргона и 8 мс в опытах с ионами кальция<sup>15</sup>. В результате сбора ядер на катоде можно было изучать их  $\alpha$ -распад с помощью второй ионизационной камеры. Энергетическое разрешение камеры составляло  $40 \div 50$  кэВ. На рис.2 представлен  $\alpha$ -спектр продуктов реакции  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$ , измеренный при энергии бомбардирующих ионов 200 МэВ.

Электронная аппаратура в настоящих экспериментах регистрировала данные об энергии и времени  $\alpha$ -распада нуклидов, собранных на катоде, и об энергии и времени прихода их в ионизационную камеру. Измерение эффективности сбора продуктов реакции полного слияния на катод камеры проводилось непосредственно в каждом эксперименте. Для этой цели использовалась реакция  ${}^{e\text{ст}}\text{Dy} + {}^{40}\text{Ar}$ . Толщина мишени составляла 600 мкг/см<sup>2</sup>. За рабочей мишенью устанавливался алюминиевый сборник толщиной 1,8 мг/см<sup>2</sup>, который после 15-минутного облучения переносился за время 30 с без нарушения вакуума к полупроводниковому детектору. В интервале времени 10 минут проводилась регистрация  $\alpha$ -распада имплантированных в сборник ядер. Аналогичное измерение  $\alpha$ -активности проводилось для ядер, собранных на катоде ионизационной камеры. Сравнение данных, полученных для сборника и катода, позволяло определять величину эффективности с точностью  $\pm 25\%$  для нуклидов с периодом полураспада более одной минуты.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Наблюдаемые в экспериментах  $\alpha$ -активности принадлежали, в основном, изотопам висмута и свинца, которые образуются из компаунд-ядра в ( $xn$ )- и ( $p, xn$ )-каналах реакций. Идентификация нуклидов проводилась по энергии  $\alpha$ -переходов, периоду полураспада и по функции возбуждения. В табл.1 представлены наблюдаемые в экспериментах изотопы и некоторые их характеристики: периоды полураспада, наиболее вероятная энергия  $\alpha$ -перехода ( $E_\alpha$ ) и значения  $\alpha$ -вилков ( $\epsilon_\alpha$ ). Данные, приведенные в таблице, взяты из работ<sup>16-101</sup>. Выходы некоторых  $\alpha$ -активностей, полученные в реакциях  ${}^{159}\text{Tb} + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow {}^{199-x}\text{Bi} + xn$  и  ${}^{153}\text{Eu} + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow {}^{193-x}\text{Bi} + xn$ , в зависимости от энергии возбуждения компаунд-ядра представлены на рис.3 и 4. Статистическая ошибка для большинства экспериментальных результатов не превышала 5%. Контроль, проведенный по воспроизводимости выходов  $\alpha$ -активностей в различных опытах, показал, что относительная экспериментальная точность составляла 20% для реакции с ионами аргона и 30% для реакции с ионами кальция. При расчетах энергии возбуждения компаунд-ядра энергия пучка ионов считалась равной энергии в середине мишени. Потери энергии в подложке и слое мишени учитывались по таблицам<sup>111</sup>. Для расчета величины Q-реакции использовались таблицы масс<sup>121</sup>. Представленные на рис.3 данные по выходам  $\alpha$ -активностей в реакции  ${}^{159}\text{Tb}({}^{40}\text{Ar}, xn) {}^{199-x}\text{Bi}$  качественно хорошо согласуются с результатами, полученными в работе<sup>131</sup>. Энергии  $\alpha$ -переходов наблю-

Таблица 1. Изотопы, наблюдавшиеся в экспериментах, и их характеристики для основного (g) и изомерного (m) состояний

Элемент	A	$E_\alpha$	$T_{1/2}(c)$	$\epsilon_\alpha(\%)$	
Bi	188	m	7.010	0.044	
		g	6.820	0.210	
	189	m	7.206	0.005	75 $\pm$ 25
		g	6.675	0.680	75 $\pm$ 25
	190	m	7.116		
		g	6.455	6.2	
		g	6.429	6.3	90
		191	m	6.876	0.15
		g	6.310	13	60 $\pm$ 20
		192	m	6.052	40
		g	6.058	42	20
		193	m	6.475	1.9
		g	5.899	67	3.5 $\pm$ 1.5
		194	m	5.598	116
		g	5.645	94	0.2
195		m	6.106	87	4
	g	5.420	-182	0.03 $\pm$ 0.02	
	Pb	188	5.98	24.5	22
189		5.72	51	0.42	
190		5.58	72	0.9	

давшихся изотопов в пределах экспериментальной ошибки хорошо совпадают с приведенными в литературе энергиями. Исключение составил лишь  $\alpha$ -распад изомерного состояния  ${}^{189}\text{Bi}$ .

Для вычисления абсолютных значений сечений реакций на основе данных об  $\alpha$ -активности наблюдаемых в эксперименте изотопов использовались значения вероятности  $\alpha$ -распада для этих изотопов ( $\alpha$ -вилки), представленные в табл.1. Изотопы висмута с нечетными массами образовывались в ( $xn$ )-каналах реакции как в основном, так и в изомерном состоянии. Среднее значение изомерного отношения для изотопов  ${}^{191}\text{Bi}$ ,  ${}^{193}\text{Bi}$  и  ${}^{195}\text{Bi}$ , которые были получены в реакции с ионами аргона, составило величину  $15 \pm 7$ . Ошибка в значении

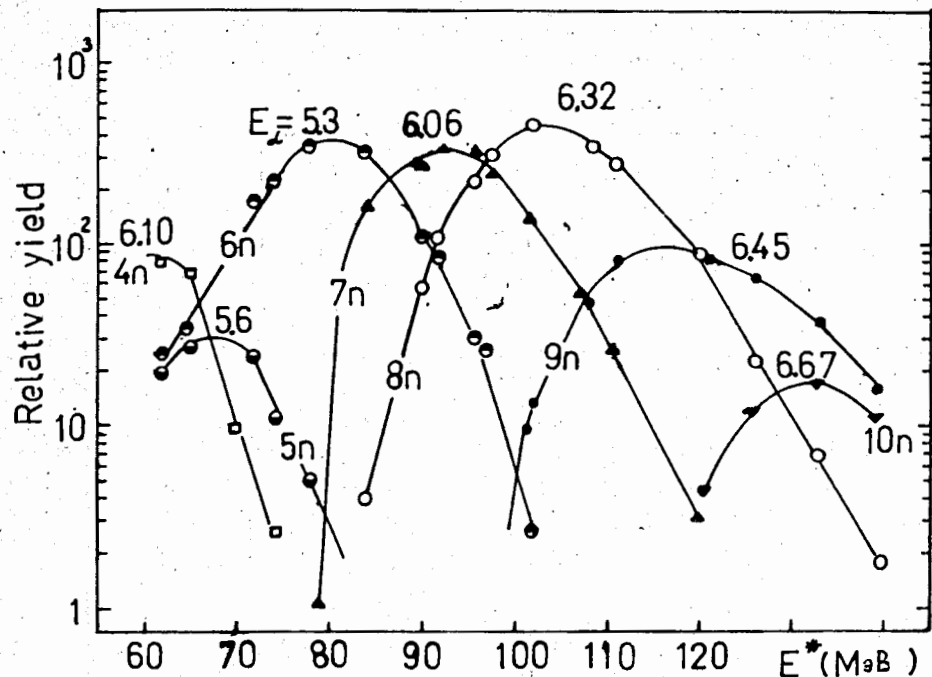


Рис. 3. Выходы  $\alpha$ -активностей, измеренные для реакции  $^{159}\text{Tb} + ^{40}\text{Ag}$ , в зависимости от энергии возбуждения.

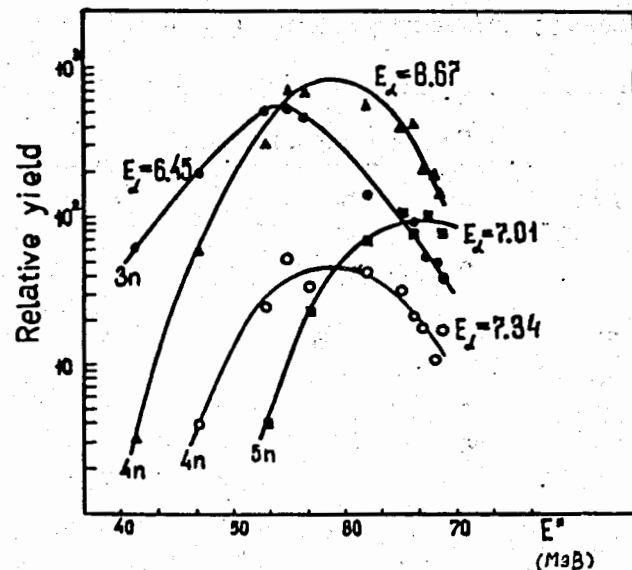


Рис. 4. Выходы  $\alpha$ -активностей, измеренные для реакции  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$ , в зависимости от энергии возбуждения.

Таблица 2. Функции возбуждения в реакции  $^{159}\text{Tb} + ^{40}\text{Ag}$ .

E* МэВ	Сечения реакций (мкбн)										
	4n	5n	6n	7n	8n	9n	10n	p8n	p9n	p10n	
62	16000	>4250	300								
65	13800	>5950	400								
72	2000	>4890	2190								
74	520	>2340	2690								
78		>1060	4250	2							
84			3520	340	2.5						
90			1275	575	42						
92			1030	680	78						
96			360	680	156						
98			330	510	230						
102			14	300	320	6					
108				120	250	26		240	40		
111				57	200	40		700	310	4	
120				7	60	40	3.5	960	860	16	
126					16	33	6.5	970	1680	20	
133					5	18	9.5	550	2480	55	
139						1.3	7.5	6.0	480	2180	90

Таблица 3. Функции возбуждения в реакции  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$

$E^*$ , МэВ	Сечения реакций (мкб)					
	3n	4n	5n	p3n	p4n	p5n
41.5	3	0.15	0.15	65		
47	8	2.5			5.5	
53	22	14	0.5	620	5	
55	23	31				
56.5	21	29	2	990	17	3
62	6	25	7		165	
65	5	17	8	1830	310	
66	4	19	6	2000	280	44
67	2.5	9	9	1040	355	180
68.5	2	6	6	850	320	230

$\alpha$ -активностей для изотопов  $^{194}\text{Bi}$  и  $^{188}\text{Bi}$  из основного состояния к  $\alpha$ -выходу из изомерного состояния составило  $1,4 \pm 0,3$  и  $0,90 \pm 0,09$  соответственно.

Рассчитанные сечения реакций  $^{159}\text{Tb} + ^{40}\text{Ca}$  и  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$  представлены в табл.2 и 3. Абсолютная точность полученных сечений составляла 70% и определялась точностью измерений эффективности сепарации и сбора на катоде, толщины и однородности мишени, тока пучка, а также точностью  $\alpha$ -вилка.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных экспериментальных данных был выполнен на основе статистического рассмотрения процесса девозбуждения образующегося компаунд-ядра. Расчеты проводились с помощью модифицированной программы ALICA. Для описания плотностей уровней использовались соотношения модели ферми-газа. Барьеры деления рассчитывались по модели вращающейся заряженной капли. При выполнении расчетов использовались выводы работы<sup>11</sup>, в которой был проведен подробный анализ реакций  $^{165}\text{Ho} + ^{40}\text{Ar}$ ,  $^{181}\text{Ta} + ^{24}\text{Mg}$  и  $^{159}\text{Tb} + ^{40}\text{Ca}$ .

и

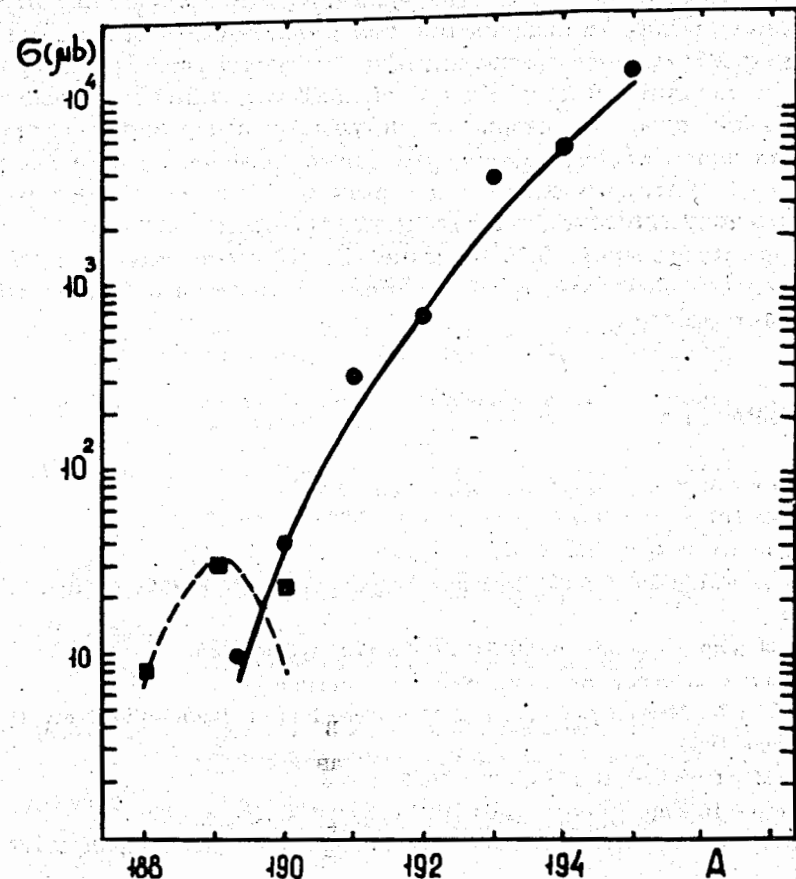


Рис. 5. Сечения образования изотопов висмута в хп-каналах реакций  $^{159}\text{Tb} + ^{40}\text{Ar}$  (●) и  $^{153}\text{Eu} + ^{40}\text{Ca}$  (■).

Как следует из этой работы, хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений сечений реакций получается без учета оболочечных эффектов в параметре плотностей уровней ( $\Delta W = 0$ ) и оболочечной поправки к барьеру деления ( $\Delta V_f = 0$ ), а также при отношении параметров плотностей уровней в делительном и испарительном каналах, равном единице ( $a_f/a_p = 1$ ). В настоящей работе расчеты были выполнены также при  $\Delta W = \Delta V_f = 0$  и  $a_f/a_p = 1$ . Наилучшее согласие с экспериментом было получено, когда величина жидкокапельного барьера деления умножалась на коэффициент 0,75 для компаунд-ядра  $^{199}\text{Bi}$ , что соответствует уменьшению барьера деления на 2,5 МэВ, и на

коэффициент 0,68 для  $^{193}\text{Bi}$ . На рис.5 точками изображены экспериментальные сечения  $\chi\pi$ -каналов реакции с ионами аргона в максимуме функций возбуждения и квадратами — аналогичные величины для реакции с ионами кальция. На оси абсцисс отложены массовые числа изотопов висмута, полученные в результате испарения  $\chi$ -нейтронов. Сплошная линия проведена через расчетные значения сечений для реакции  $^{159}\text{Tb} + ^40\text{Ar}$ , пунктирная — для реакции  $^{153}\text{Eu} + ^40\text{Ca}$ . Из рисунка видно, что получено хорошее согласие эксперимента с расчетом.

Авторы благодарны Ю.А.Музычке, Б.И.Пустыльнику за проведенные расчеты, Д.Д.Богданову за полезные обсуждения и О.Н.Мальшеву за помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.Н. и др. — ЯФ, 1990, т.52, вып.3 (9), с.640.
2. Вахтель В.М. и др. — ЭЧАЯ, 1987, 18, в.4, с.777.
3. Yeremin A.V. et al. — NIM, 1989, A274, p.529.
4. Андреев А.Н. и др. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ №3 (29)-88, Дубна, 1988, с.33.
5. Шаро Ш. и др. — Сообщение ОИЯИ P15-88-479, Дубна, 1988.
6. Coenen E. et al. — Phys.Rev.Lett., 1985, v.54, No.16, p.1783.
7. Westmeier W., Merklin A. Catalog of Alpha-Particles from Radioactive Decay. Nr.29-1, Karlsruhe, 1985.
8. Huysse M. — Phys.Lett. B, 1988, v.201, No.3, p.293.
9. Андреев А.Н. и др. — Сообщение ОИЯИ P15-89-684, Дубна, 1989.
10. Schneider J. Gesellschaft fur Schwerionenforschung, Darmstadt, Report N GSI-84-3, 1984.
11. Northcliff R.L., Shilling R.F. — Nucl. Data Tables, 1970, A7.
12. Zeldes N. et al. — Mat.Fis.Scr.Dan.Vid. Selsk, 1967, 3, N 5.
13. Le Beyec Y. et al. — Phys.Rev.C., 1974, v.9, No.3, p.1091.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 ноября 1990 года.