

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

Д 16

**P1-88-135**

**Ц.Дамдинсүрэн, П.Козма, Б.Тумэндэмбэрэл,  
Р.Хоролжав, Д.Чултэм\***

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДОВ НУКЛИДОВ,  
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР С ЯДРАМИ**

---

\* Монгольский государственный университет, Улан-Батор

**1988**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пучки релятивистских ядер синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ охватывают так называемую область предельной фрагментации<sup>/1/</sup>. На этих пучках проводятся эксперименты по релятивистской ядерной физике с помощью трековых и электронных методов. Однако существующие методы, несмотря на их достоинства, имеют ограничения: они, как правило, не регистрируют нейтральные продукты реакции; имеется трудность идентификации положительных продуктов по массам из-за близости ионизационных потерь при высоких энергиях /протоны, положительные ионы/; есть ограничения по экспозиционным и временным нагрузкам, что не позволяет использовать полную интенсивность пучков ускорителя.

Наряду с этими традиционными методами исследований используется метод идентификации остаточных ядер-продуктов по энергии гамма-лучей, соотношению интенсивностей и периодам полураспада для изучения реакций, вызываемых релятивистскими частицами, и ядер с ядрами. Этот метод может быть использован как дополнение к вышеуказанным методам, он позволит изучить некоторые важные особенности реакции между сложными ядрами при релятивистских энергиях. Подобные работы по применению гамма-спектрометрического метода в изучении ядерных столкновений при релятивистских энергиях проводятся на ускорителе Бэвалак<sup>/2-5/</sup>. Гамма-спектрометрический метод неразделенной смеси продуктов ядерных реакций успешно применяется в сложных ядерных взаимодействиях от деления<sup>/6/</sup> до полного расщепления ядер<sup>/7/</sup>.

При взаимодействии релятивистских ядер именно с тяжелыми ядрами образуется целый ряд остаточных ядер-нуклидов. При измерении их гамма-активности в офф-лайн экспериментах измеряются только кумулятивные выходы нуклидов. Поправка для определения независимого выхода исследуемого нуклида обыкновенно производится<sup>/2-5/</sup> на основе уравнения Батемана-Рубинсона<sup>/8/</sup> с учетом постоянной распада наиболее долгоживущего изотопа в соответствующей цепочке распада. В настоящей работе излагается экспериментально проверенная методика определения независимых выходов нуклидов с учетом всех изотопов из соответствующей цепи распада. Экспериментальная проверка проводилась по определению выходов нуклидов

Объем...  
Ядер...

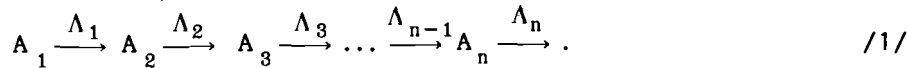
- а/ в реакциях деления ядер  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами;  
 б/ при фрагментации ядер  $^{18}\text{Ta}$  релятивистскими ядрами углерода.

Использовался экспериментальный метод прямого гамма-спектрометрического измерения облученных мишеней без предварительного изотопического разделения.

## 2. УЧЕТ ЦЕПЕЙ РАСПАДА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЫХОДА

Накопление радиоактивных ядер в мишени и их распад после окончания облучения при большом числе генетически связанных ядер описывается математическими выражениями, которые могут быть представлены в нескольких обобщенных формах, когда система дифференциальных уравнений охватывает все возможные случаи взаимных превращений ядер, которые могут встретиться в практике активационного метода.

Рассмотрим ряд генетически связанных активностей ядер:



Процессы накопления-распада описываются системой дифференциальных уравнений<sup>/8/</sup>:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\Lambda_1 N_1,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \phi \Lambda_1 N_1 - \Lambda_2 N_2 \quad /2/$$

... ..

$$\frac{dN_n}{dt} = \phi \Lambda_{n-1} N_{n-1} - \Lambda_n N_n,$$

где  $t$  - текущее время, которое может быть или временем облучения, или временем остывания;  $N_1, N_2, \dots, N_n$  - количество атомов /стабильных или радиоактивных/ изотопов сортов  $1, 2, \dots, n$  соответственно;  $A_1, A_2, \dots, A_n$  - соответствующие активности;  $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n$  - "эффективные" постоянные распада, которые определяются следующим выражением:

$$\Lambda_i = \lambda_i + \phi \sigma_i, \quad /3/$$

где  $\lambda_i$  - истинные постоянные соответствующего распада для радиоактивных ядер;  $\sigma_i$  - сечение соответствующей реакции активации для радиоактивных ядер;  $\phi$  - поток частиц. В такой общей форме система дифференциальных уравнений охватывает все воз-

можные случаи взаимных превращений ядер, которые могут встретиться в практике активационного метода.

В дальнейшем рассмотрим условие  $\phi \sigma_i N_0 = \text{const}$ , обыкновенно выполненное при облучении на ускорителях частиц и ядер релятивистских энергий. При этом индекс "1" присваивается первому образующемуся по первичной реакции радиоизотопу, а исходный /стабильный/ изотоп имеет индекс "0". В этом случае уравнение /2/ имеет следующий вид:

$$\frac{dN_1}{dt} = \phi \sigma_1 N_0 - \Lambda_1 N_1, \quad /4/$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \Lambda_{n-1} N_{n-1} - \Lambda_n N_n.$$

Общее решение этого уравнения для  $n > 1$  имеет вид

$$A_n(t) = \left( \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\Lambda_i} \right) \phi \sigma_1 N_0 \sum_{i=1}^n b_i (1 - e^{-\Lambda_i t}), \quad /5/$$

где

$$b_i = \prod_{j=i}^n \frac{\Lambda_j}{\Lambda_j - \lambda_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n).$$

Выражение /5/ для малых потоков ( $\phi \sigma_i \ll \lambda_i$ ) может быть представлено в более сокращенной форме:

$$A_n(t) = \phi \sigma_1 N_0 \sum_{i=1}^n b_i (1 - e^{-\lambda_i t}), \quad /6/$$

где

$$b_i = \prod_{j \neq i}^n \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i} \quad (j = 1, 2, \dots, n).$$

Учитывая времена выдержки /охлаждения/ и измерения, преобразовав выражение /6/, получаем формулу активности для радиоактивного нуклида, входящего в линейную изобарную цепочку следующим образом:

$$N_n(j) = c \sum_{i=1}^n Y_i F_i \sum_{k=i}^n b_k F_k(j), \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где

$$b_k = \prod_{p \neq k} \frac{\lambda_p}{\lambda_p - \lambda_k}, \quad p = i, i+1, \dots, n, \quad b_k = 1 \quad \text{для } n = 1 \quad /7/$$

и

$$F_k(j) = [1 - \exp(-\lambda_k t_1)] \exp[-\lambda_k t_2(j)] \lambda_k^{-1} \{1 - \exp[-\lambda_k t_3(j)]\}.$$

Здесь  $\lambda_k$  - постоянная распада  $k$ -го нуклида;  $Y_i$  - независимый выход  $i$ -го нуклида;  $t_1, t_2, t_3$  - времена облучения, охлаждения и измерения соответственно;  $N_n$  - число зарегистрированных распадов  $i$ -го нуклида, которое в нашем случае выражается через  $s/\epsilon f k$ ;  $s$  - площадь фотопика гамма-линии;  $f, k, \epsilon$  - соответствующие значения квантового выхода, коэффициента самопоглощения и эффективности регистрации;  $c$  - фактор нормализации;  $n$  - длина изобарной цепочки;  $m$  - число последовательных измерений  $m > n$ ,  $p_i$  - коэффициент ветвления  $i$ -го нуклида в  $i+1$ .

Для примера вычисления выхода рассмотрим самый простой случай двух нуклидов:



Число зарегистрированных распадов для дочернего нуклида  $B$  получается из формулы, вытекающей из /7/:

$$N_B(j) = c \frac{Y_A p_1}{\lambda_B - \lambda_A} [\lambda_B F_A(j) - \lambda_A F_B(j)] + c Y_B F_B(j) \quad (j = 1, 2, \dots, m). /9/$$

Формулу /9/ перепишем в виде

$$N_B(j)/f_A(j) = Y_A + Y_B f_B(j)/f_A(j) \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad /10/$$

в котором  $f_A$  и  $f_B$  представляют собой функции, изменяющиеся от измерения к измерению в зависимости от  $t_2$  и  $t_3$ . Таким образом, определение выходов  $Y_A, Y_B$  сводится к решению систем уравнений /10/ с учетом определения отношения  $f_B(j)/f_A(j)$  на основе экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Для вычисления выходов на основе вышеизложенного подхода создана на ЭВМ ЕС-1061 программа "YIELD". Она предназначена для определения выходов нуклидов, образующихся как при делении, так и при фрагментации атомного ядра тепловыми нейтронами и релятивистскими ядрами соответственно.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ $^{235}\text{U}(n, f)$ С ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Тестовым экспериментом при исследовании выхода остаточных ядер, образующихся при фрагментации атомных ядер, служил эксперимент по определению выходов и получению известного массового распределения осколков деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами. Отметим, что реакция  $^{235}\text{U}(n, f)$  является наиболее тщательно изученной реакцией. В этом эксперименте для исключения сопутствующих реакций использовалась мишень  $^{235}\text{U}$  массой 1 мг и чистотой 99,999%, которая облучалась на выведенном пучке тепловых нейтронов с плотностью потока  $7 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> реактора ИБР-2 ОИЯИ. Время облучения составляло 175 мин.

Спектры гамма-лучей осколков деления  $^{235}\text{U}$  измерялись с помощью спектрометра с полупроводниковым Ge(Li)-детектором и анализатором импульсов в стандарте КАМАК '9', связанного с ЭВМ. Объем детектора 50 см<sup>3</sup> и энергетическое разрешение детектора 2,8 кэВ для гамма-линии 1332,5 кэВ  $^{60}\text{Co}$ .

Время охлаждения и измерения варьировалось в пределах 0,15-137 и 0,25-8 ч соответственно. Во время эксперимента спектры записывались на дискете ЭВМ.

Расчет интенсивности пиков и идентификация нуклидов осуществлялись по программе SAMP080 /10/ на ЭВМ PDP-11/70.

Значения основных характеристик осколков - продуктов деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами: периоды полураспада нуклидов, квантовые выходы гамма-линии, независимые и кумулятивные выходы изотопов, брались из работ /11-13/. В табл.1 приведены идентифицированные радиоактивные нуклиды, наблюдаемые в нашем эксперименте, их энергии гамма-линии  $E_\gamma$ , квантовые выходы  $I_\gamma$  и периоды полураспада  $T_{1/2}$ , а также периоды полураспада  $T_{1/2}$  предшествующего изотопа в изобарной цепочке.

На рис.1 для иллюстрации приведен фрагмент спектра гамма-лучей осколков деления ядра  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами, измеренного через 95 ч после окончания облучения.

В этом эксперименте сделан расчет выхода для 28 нуклидов в диапазоне массовых чисел  $A = 85-151$  относительно изотопа  $^{140}\text{Ba}$  /за единицу принят выход  $^{140}\text{Ba}$ /. Расчет относительных выходов нуклидов, образовавшихся при делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами, производился по программе "YIELD" на ЭВМ-60/45 и ЕС-1061.

В табл.2 приведены не только значения, определенные в нашем эксперименте, но и рекомендованные литературные данные для выходов радиоактивных изотопов, образовавшихся при делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами. Отметим, что значения относительных кумулятивных выходов идентифицированных нуклидов

Таблица 1. Основные характеристики осколков-продуктов деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами для идентификации и расчета

A	Изотоп	$E_{\gamma}/\text{кэВ}$	$I_{\gamma}(\%)$	$T_{1/2}^a$	$T_{1/2}^b$
1	2	3	4	5	6
85	KR - 85M	151.20	75.00	4.48 ч	175.00 с
88	KR - 88	196.31	26.30	2.84 ч	16.30 с
	RB - 88	2391.98	35.00	17.80 М	2.84 ч
		898.00	14.50		
1836.02	22.10				
89	RB - 89	657.70	10.90	15.40 М	3.07 М
		1031.90	63.60		
		1248.10	46.70		
90	Y - 90M	202.50	96.50	3.19 ч	
		479.60	90.60		
91	SR - 91	1024.30	33.40	9.52 ч	58.40 с
	Y - 91M	555.60	94.90	49.71 М	9.52 ч
92	SR - 92	1383.90	90.00	2.71 ч	4.50 с
	Y - 92	934.50	13.90	3.54 ч	2.71 ч
93	Y - 93	266.90	6.98	10.10 ч	7.32 М
		947.10	1.94		
95	ZR - 95	724.20	43.70	64.03 А	10.30 М
	NB - 95	756.70	55.40	34.98 А	64.03 А
		765.80	99.90		
97	ZR - 97	355.40	2.27	17.00 ч	3.70 с
	NB - 97	657.90	98.50	72.10 М	17.00 ч
	NB - 97M	743.40	98.00	53.00 с	17.00 ч
98	NB - 98M	722.70	70.00	51.30 М	
		787.00	93.00=		
		1168.90	17.00		
99	MO - 99	181.10	6.08	66.00 ч	2.60 М
	TC - 99M	739.40	12.10	6.01 ч	66.00 ч
		140.50	87.70		
101	TC - 101	306.80	88.00	14.20 М	14.60 М
103	RU - 103	497.10	89.50	39.25 А	54.20 с
		610.30	5.64		

Таблица 1 /продолжение/

105	RU - 105	469.40	17.30	4.44 ч	7.70 М
	RH - 105	724.10	46.70		
		318.90	19.20	35.36 ч	4.44 ч
127	SB - 127	473.00	24.70	3.85 А	2.10 ч
		685.70	35.30		
130	SB - 130	182.30	65.00	40.00 М	1.70 М
		330.90	78.00		
		732.00	22.00		
		793.40	100.00		
		839.40	100.00		
132	TE - 132	111.80	1.85	3.26 А	2.80 М
	I - 132	116.30	1.94		
		228.16	88.10		
		522.65	16.10		
		630.22	13.80		
954.60	18.10				
1398.60	7.13				
133	I - 133	529.90	87.40	20.80 ч	55.40 М
		875.30	4.51		
134	I - 134	847.00	95.40	52.60 М	41.80 М
		884.10	64.90		
		1072.50	15.00		
135	I - 135	1131.60	22.50	6.61 ч	18.00 с
		1260.40	28.60		
		1457.60	8.63		
		1678.30	9.52		
		249.80	90.40		
138	CS - 138	462.80	30.70	32.20 М	14.10 М
		1009.80	29.80		
		1435.90	76.30		
140	BA - 140	162.60	6.21	12.75 А	63.70 с
		304.80	4.30		
		423.70	3.12		
		537.30	24.40		
		328.80	20.70		
		487.00	45.90		
		815.80	23.60		
		925.20	7.05		
		1596.50	95.40		
		141	CE - 141		

Таблица 1 /продолжение/

142	LA - 142	641.17	47.40	91.20 М	10.70 М
143	CE - 143	293.26 350.59	42.80 3.27	33.00 Ч	14.20 М
144	CE - 144	133.50	11.10	284.90 А	40.90 С
147	ND - 147	91.00	27.20	10.98 А	13.60 М
151	PH - 151	340.10 445.70	22.40 4.01	28.40 Ч	12.40 М

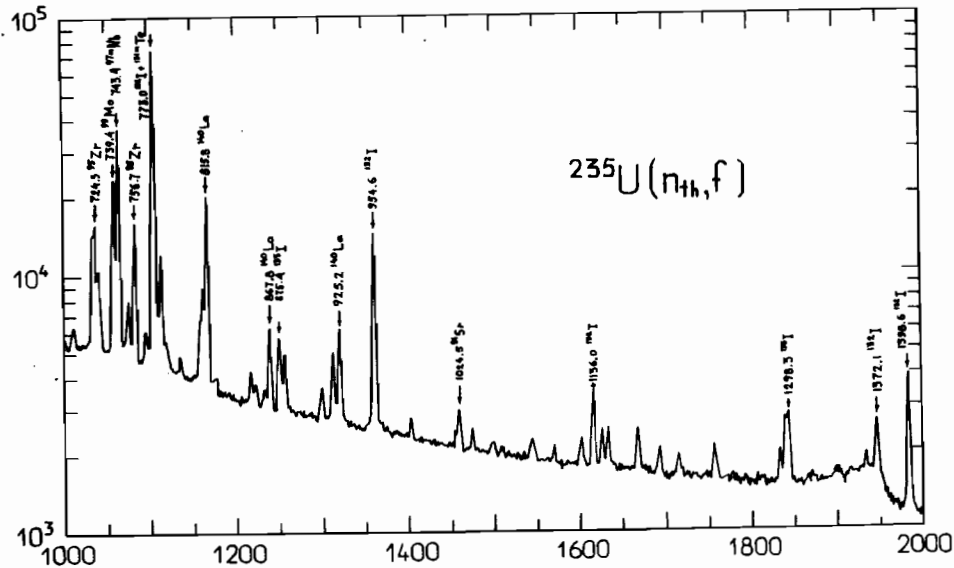


Рис.1. Спектр гамма-лучей изотопов, образующихся при делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами.

приводились к полным выходам цепочки с данной массой, поэтому исходя из соответствующих относительных выходов построены кривые распределений продуктов деления по массам. На рис.2 представлены массовые распределения осколков деления ядра  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами. Как видно из этого рисунка, общий вид массовых распределений осколков деления, полученных в этом эксперименте, является типичным случаем бинарного деления ядра  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами.

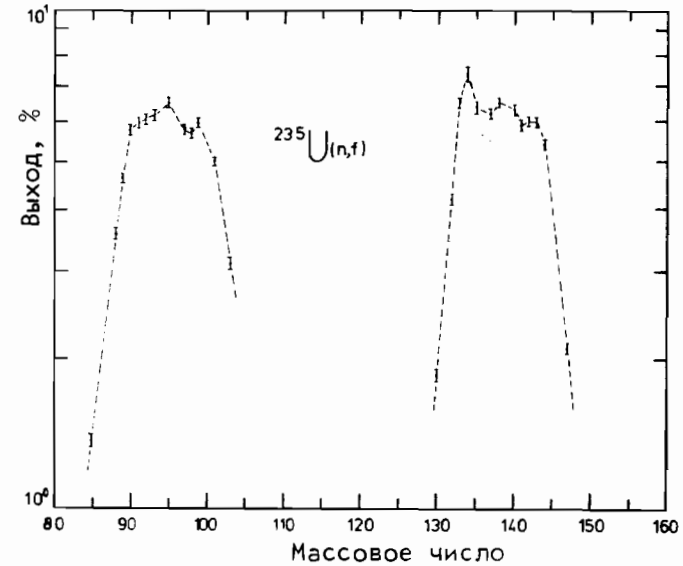


Рис.2. Зависимость выходов продуктов деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами от массового числа.

Таблица 2. Значения относительных выходов изотопов, образующихся при делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами

A	Используемый изотоп	Относительный выход /%/		
		МБЕК '14/	СROUCH '11/	Настоящая работа
85	KR-85M	1.31	1.32+/-0.01	1.36+/-0.04
88	KR-88, RB-88	3.64	3.59+/-0.08	3.54+/-0.23
89	RB-89	4.81	4.75+/-0.09	4.72+/-0.12
90	Y-90M	5.92	5.84+/-0.10	5.76+/-0.16
91	SR-91, Y-91M	5.93	5.89+/-0.12	5.86+/-0.15
92	SR-92, Y-92	5.98	5.95+/-0.18	6.05+/-0.21
93	Y-93	6.38	6.36+/-0.12	6.19+/-0.24
95	ZR-95, NB-95	6.50	6.50+/-0.10	6.53+/-0.12
97	ZR-97, NB-97	5.93	6.00+/-0.16	5.78+/-0.23

Таблица 2 / продолжение /

98	NB-98M	5.80	5.78+/-0.14	5.67+/-0.13
99	ND-99, TC-99M	6.15	6.13+/-0.07	6.01+/-0.06
101	TC-101	5.06	5.05+/-0.23	4.98+/-0.09
103	RU-103	3.03	3.09+/-0.19	3.08+/-0.05
105	RU-105, RH-105	1.02	0.98+/-0.04	0.99+/-0.03
127	SB-127	0.12	0.12+/-0.01	0.12+/-0.01
130	SB-130	1.73	2.06+/-0.06	1.85+/-0.08
132	TE-132, I-132	4.29	4.28+/-0.05	4.21+/-0.07
133	I-133	6.70	6.67+/-0.19	6.63+/-0.12
134	I-134	7.81	7.51+/-0.22	7.65+/-0.16
135	I-135, XE-135	6.56	6.54+/-0.13	6.47+/-0.22
138	CS-138	6.77	6.86+/-0.14	6.69+/-0.16
140	BA-140, LA-140	6.31	6.30+/-0.08	6.18+/-0.11
141	CE-141	5.84	5.78+/-0.11	5.90+/-0.24
142	LA-142	5.90	5.89+/-0.09	5.93+/-0.08
143	CE-143	5.95	5.93+/-0.07	6.01+/-0.11
144	CE-144	5.49	5.37+/-0.05	5.41+/-0.07
147	ND-147	2.24	2.30+/-0.07	2.16+/-0.08
151	PM-151	0.42	0.41+/-0.01	0.37+/-0.03

Из табл.2 видно, что все значения относительных выходов радиоактивных изотопов, образовавшихся в реакции  $^{235}\text{U}(n, f)$ , в пределах ошибок измерений согласуются с ранее опубликованными данными /11,14/ для деления ядра  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами. Результаты тестового эксперимента показывают правильность алгоритма программы "YIELD" для вычисления относительных выходов изотопов и процедуры обработки экспериментальных данных.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ $^{181}\text{Ta}(^{12}\text{C}, X)$ С РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЯДРАМИ УГЛЕРОДА

В эксперименте определялись относительные выходы остаточных ядер-нуклидов, образующихся при взаимодействии релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядрами  $^{181}\text{Ta}$ . Облучение мишеней из  $^{181}\text{Ta}$  /99,9%/ проводилось на выведенном пучке ядер углерода синхрофазотрона ОИЯИ /15/. Мишень диаметром 38 мм, толщиной 62,1 мг/см<sup>2</sup> была окружена фольгами из лавсана толщиной 17,5 мг/см<sup>2</sup>, время облучения 4,74 ч, интенсивность пучка  $3 \cdot 10^7 \cdot \text{с}^{-1}$ . Измерение спектров гамма-лучей нуклидов, образующихся в мишени, проводилось спектрометром с ППД объемом 50 см<sup>3</sup>, Ge(Li) -детектором в экспериментальных условиях, аналогичных тестовому эксперименту  $^{235}\text{U}(n, f)$ . На рис.3 для иллюстрации приведен спектр гамма-лучей радиоактивных нуклидов, образующихся во взаимодействии  $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$  при энергии 3,65 ГэВ/нуклон. Идентификация радионуклидов проводилась по энергиям их гамма-лучей  $E_\gamma$ , периодам полураспада  $T_{1/2}$  и относительным интенсивностям  $I_\gamma$  /13/. В табл.3 приведены основные характеристики некоторых идентифицированных нуклидов в диапазоне массовых чисел 24-176.

Относительные выходы  $Y(A, Z)$  определены на основе общих уравнений /7/ с учетом минимизации функций  $f_k(j)$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ , для всех нуклидов соответствующей цепочки распада. В качестве примера рассмотрим распады

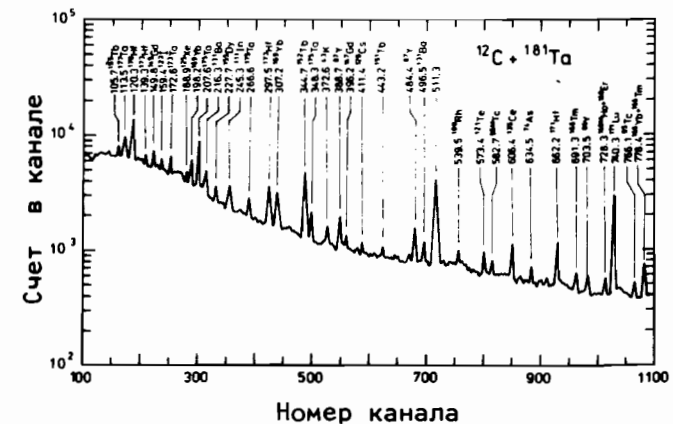
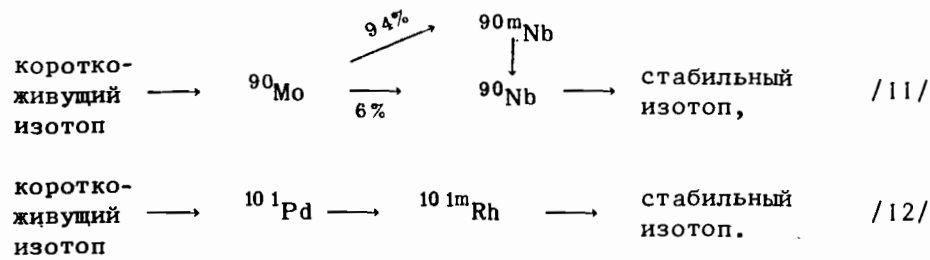


Рис.3. Спектр гамма-лучей остаточных ядер-нуклидов, образующихся при фрагментации  $^{181}\text{Ta}$  ядрами углерода с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.



Здесь число распадов для дочернего нуклида определено из уравнения /9/, параметризация функций  $f_B/f_A$  /10/ проводилась методом наименьших квадратов. Зависимость относительных выходов нуклидов  $^{90}\text{Nb}$  и  $^{101\text{m}}\text{Rh}$  от  $f_B/f_A$  показана на рис. 4 и 5 соответственно.

Таблица 3. Основные характеристики некоторых идентифицированных радионуклидов, образующихся во взаимодействии  $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$  при энергии 3,65 ГэВ/нуклон

A	Нуклид	$E_\gamma$ /кэВ/	$I_\gamma$ (%)	$T_{1/2}$
1	2.	3.	4.	5.
24	NA - 24	1368.5 2754.0	100.0 99.9	15.02 ч
28	MG - 28	1778.8	100.0	20.90 ч
43	K - 43	372.8	87.9	22.30 ч
52	MN - 52	935.5 1434.1	94.5 100.0	5.59 д
65	ZN - 65	1115.5	50.7	244.00 .
74	AS - 74	595.8 634.8	60.3 15.1	17.78 д
86	Y - 86	443.1 703.3 1076.6	16.9 15.4 82.5	14.74 ч
87	Y - 87	388.4 484.9	84.8 92.2	3.35 д
90	NB - 90	1129.1	92.0	14.60 ч

95	TC - 95 TC - 95M	765.8 582.1	93.9 31.5	20.00 ч 61.00 д
100	RH -100	539.6	78.4	20.80 ч
101	RH -101M	306.9	86.3	4.34 д
111	IN -111	245.4	94.0	2.83 д
121	TE -121	573.1	80.3	16.80 д
123	I -123	159.0	83.3	13.02 ч
125	XE -125	188.4	54.9	17.00 ч
129	CS -129	371.9 411.5	31.1 22.7	32.16 ч
131	BA -131	496.3	47.1	11.80 д
135	CE -135.	265.6 606.8	42.4 19.5	17.80 ч
147	GD -147	229.3 396.0 928.9	64.4 34.1 18.8	38.10 ч
149	GD -149	149.6	41.7	9.40 д
151	TB -151	251.7 443.7	26.0 10.0	17.60 ч
152	TB -152	344.3	57.0	17.50 ч
155	TB -155 DY -155	105.3 226.9	23.0 68.8	5.32 д 10.00 ч
160	ER -160	728.1	36.0	28.56 ч
166	TM -166 YB -166	691.2 778.4 2052.4 778.9 2052.4	8.1 21.5 20.5 24.9 23.7	7.70 ч 2.36 д
169	YB -169	198.0	36.0	32.00 д
170	HF -170	120.2 164.7	19.2 33.5	16.00 ч
171	HF -171 LU -171	662.0 739.8	14.8 47.6	12.10 ч 8.22 д



Таблица 3 /продолжение/

173	HF -173	139.7	12.8	24.00 ч
	TA -173	297.0	33.8	
		172.2	17.5	3.65 ч
175	TA -175	207.4	13.3	10.50 ч
176	TA -176	1159.3	23.8	8.08 ч

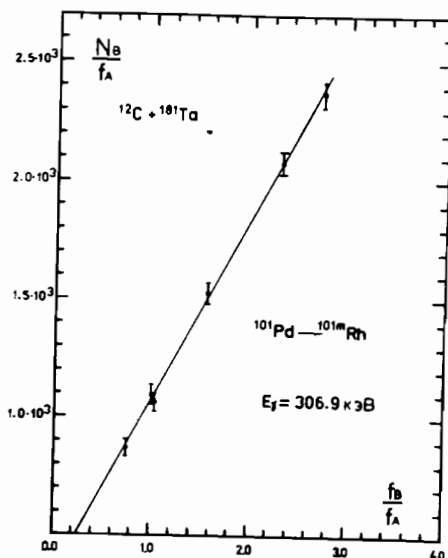
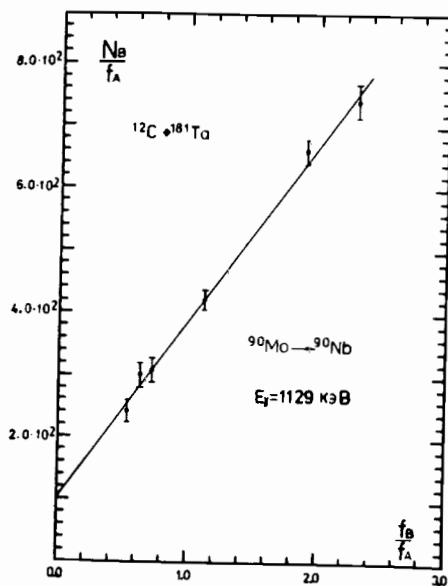


Рис.4. Определение относительного выхода  $^{90}\text{Nb}$ , образующегося во взаимодействии  $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$  при энергии 3,65 ГэВ/нуклон с учетом перехода  $^{90}\text{Mo} \rightarrow ^{90}\text{Nb}$  /1129 кэВ/.

Рис.5. Определение относительного выхода  $^{101m}\text{Rh}$ , образующегося во взаимодействии  $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$  при энергии 3,65 ГэВ/нуклон с учетом перехода  $^{101}\text{Pd} \rightarrow ^{101m}\text{Rh}$  /309,6 кэВ/.

На основе общей параметризации выходов  $Y(A, Z)$  /15/ остаточных ядер-продуктов, образующихся при фрагментации ядер  $^{181}\text{Ta}$  релятивистскими ядрами  $^{12}\text{C}$ :

$$Y(A, Z) = Y_I(A) (2\pi C_z^2)^{-1/2} \exp \left[ \frac{-(Z - Z_p(A))^2}{2C_z^2} \right], \quad /13/$$

нами были определены также изобарические выходы  $Y_I(A)$  фрагментов. Отметим, что в отношении  $^{13}/ Z_p(A)$  наиболее вероятным рядом для данного  $A$  является

$$Z_p(A) = a + bA + cA^2 \quad /14/$$

и  $C_z$  представляет собой ширину зарядового распределения. В табл.4 приведены значения относительных выходов  $Y$  и изобарических выходов  $Y_I$  некоторых радиоактивных нуклидов, образующихся при фрагментации тантала релятивистскими ядрами углерода. Массовое распределение остаточных ядер приведено на рис.6. Распределение изобарических выходов  $Y_I$  реакции  $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$  показывает, что сначала значения  $Y_I$  уменьшаются с увеличением массового числа, достигая минимума в области около  $A \approx 90$ . В области этой массы основной вклад в образование нуклидов происходит от ядерного деления. Затем выходы резко увеличиваются с ростом массового числа  $A$ , в частности вблизи  $A$  мишени. В этой области расщепление является преобладающим механизмом взаимодействия. Отметим, что аналогичная зависимость изобарических выходов от массового числа образующихся ядер-продуктов была обнаружена и в других экспериментах по фрагментации тяжелых ядер релятивистскими ядрами и частицами /2-5/. Наши результаты по фрагментации ядер  $^{181}\text{Ta}$  пучком релятивистских ядер углерода будут более подробно изложены и обсуждены в следующей работе.

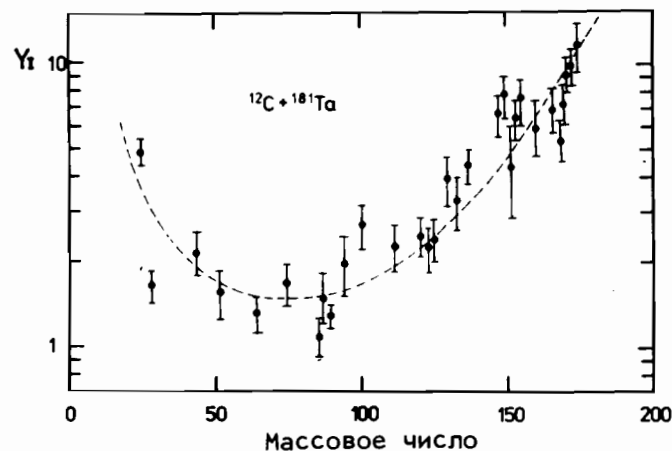


Рис.6. Массовое распределение остаточных ядер, образующихся при фрагментации  $^{181}\text{Ta}$  релятивистскими ядрами углерода с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.

Таблица 4. Значения относительных выходов  $Y$  и изобарических выходов  $Y_I$  нуклидов, образующихся при фрагментации  $^{181}\text{Ta}$  ядрами  $^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон

A	Нуклид	Y	$Y_I$
24	NA - 24	2.94+/-0.35	5.05+/-0.58
28	MG - 28	1.00+/-0.18	1.72+/-0.26
43	K - 43	0.76+/-0.12	2.21+/-0.37
52	MN - 52	0.15+/-0.03	1.61+/-0.35
65	ZN - 65	0.85+/-0.12	1.34+/-0.18
74	AS - 74	0.69+/-0.11	1.69+/-0.46
86	Y - 86	0.68+/-0.11	1.09+/-0.18
87	Y - 87	0.98+/-0.26	1.48+/-0.40
90	NB - 90	0.52+/-0.12	1.32+/-0.18
95	TC - 95	0.21+/-0.05	1.95+/-0.47
100	RH - 100	0.79+/-0.09	2.75+/-0.55
111	IN - 111	1.03+/-0.19	2.30+/-0.44
121	TE - 121	1.15+/-0.18	2.52+/-0.41
123	I - 123	1.68+/-0.26	2.25+/-0.39
125	XE - 125	1.79+/-0.32	2.43+/-0.43
129	CS - 129	1.44+/-0.29	4.01+/-0.88
131	BA - 131	1.12+/-0.20	3.37+/-0.67
135	CE - 135	1.01+/-0.12	4.44+/-0.59
147	GD - 147	2.09+/-0.32	6.88+/-1.10
149	GD - 149	2.41+/-0.44	7.02+/-1.39
151	TB - 151	1.41+/-0.56	4.37+/-1.73
152	TB - 152	2.12+/-0.38	6.63+/-1.19
155	TB - 155	0.97+/-0.30	7.79+/-2.43

Таблица 4 /продолжение/

155	NY - 155	0.65+/-0.11	7.86+/-1.38
160	ER - 160	1.27+/-0.29	6.88+/-1.73
166	TM - 166	1.97+/-0.35	7.13+/-1.36
166	YB - 166	3.79+/-0.88	7.00+/-1.64
169	YB - 169	2.88+/-0.62	5.44+/-0.95
170	HF - 170	3.47+/-0.58	7.55+/-1.29
171	LU - 171	2.55+/-0.59	8.66+/-1.45
171	HF - 171	3.50+/-0.61	9.01+/-1.57
173	HF - 173	3.92+/-0.79	10.19+/-2.23
173	TA - 173	3.32+/-0.36	10.05+/-1.12
175	TA - 175	4.38+/-0.69	12.01+/-2.38

## 5. ВЫВОДЫ

Методика определения выходов радиоактивных ядер, образующихся во взаимодействии релятивистских ядер с тяжелыми ядрами, проверена в тестовом эксперименте  $^{235}\text{U}(n, f)$  с тепловыми нейтронами и в эксперименте  $^{181}\text{Ta}(^{12}\text{C}, X)$  с релятивистскими ядрами углерода. Найденные массовые распределения осколков деления находятся в хорошем согласии с ранее полученными данными. Определены изобарические выходы фрагментов, образующихся во взаимодействии  $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$  при энергии 3,65 ГэВ/нуклон. Массовое распределение фрагментов показывает минимум в области  $A/2$  мишени и затем резкое увеличение выходов с ростом массового числа  $A$ .

Авторы благодарны А.М.Балдину за интерес к работе и поддержку, К.Д.Толстову за полезные обсуждения, В.А.Бруданину, В.М.Дьяченко, В.М.Назарову, В.А.Халкину и Д.Энхболду за помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. - ЭЧАЯ, 1977, 1.8, с.429; Препринты ОИЯИ P1-83-432, 1983, 1-84-185, 1984, P12-85-30, 1985, Дубна.

2. Porile N.T., Cole G.D., Ruby C.R. - Phys. Rev., 1979, C19, p.2288.
3. Morrissey D.J. et al. - Phys.Rev., 1980, C21, p.1783.
4. Morita Y. et al. - Phys.Rev., 1982, C26, p.511.
5. Mcgaughey P.L. et al. - Phys.Rev., 1985, C31, p.896.
6. Thierens H. et al. - Nucl.Instr.Meth., 1976, 134, p.299.
7. Morrissey D.J. et al. - Nucl.Instr.Meth., 1979, 158, p.499.
8. Rubinson W.J. - Chem. Phys., 1949,17, p.542.
9. Васильев Д. и др. ОИЯИ, P10-84-860, Дубна, 1984.
10. Тумэндэмбэрэл Б. ОИЯИ, P10-87-152, Дубна, 1987.
11. Crouch E.A.C. - Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1977, 19, p.417.
12. Blachot J., Fiche C. - Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1977, 20, p.241.
13. Reus U., Westmeier W. - Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1983, 29, p.1-406.
14. Meek M.E., Rider B.F. Compilation of Fission Product Yields, Nedo-12154-1, Vallecitos Nucl.Center, 1977, p.36.
15. Семенюшкин И.Н. - В сб.: Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. ОИЯИ, Д2-82-568, Дубна, 1982, с.14.

#### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1.2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 февраля 1988 года.