

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P1-85-590

В.С.Бутцев, Г.Л.Бутцева, В.Я.Костин,*
В.Я.Мигаленя*

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЕЙТРОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 7,3 ГэВ С ЯДРАМИ ^{93}Nb ,
 ^{159}Tb , $^{207,2}\text{Pb}$ И ^{209}Bi .

Направлено в журнал "Ядерная физика"

* Харьковский физико-технический институт
АН УССР

1985

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования взаимодействия частиц и ядер с ядрами направлены на измерения сечений образования или выходов остаточных ядер-продуктов, образования возбужденных состояний с большими угловыми моментами, зарядовых и массовых распределений, остаточных нуклидов, множественности рождения вторичных частиц и т.д.

При изучении взаимодействия нуклонов и тяжелых ионов с энергией до 100 МэВ на нуклон с атомными ядрами была получена обширная информация о свойствах ядер, которые, как правило, расположены недалеко от полосы бета-стабильности и имеют относительно большие времена жизни.

При переходе в релятивистскую область энергий можно ожидать образования остаточных ядер с более значительным удалением от области бета-стабильности. Наряду с этим следует также ожидать, согласно расчетам ^{1,2/}, увеличения выходов высокоспиновых состояний с ростом импульса налетающих частиц, т.е. роста углового момента остаточных нуклидов после протекания ядерного каскада. К настоящему времени уже получено достаточно много данных о взаимодействии релятивистских тяжелых ионов (РТИ) в диапазоне энергий до 2,1 ГэВ на нуклон ^{3-7/}. Постановка экспериментов на пучках частиц и ядер синхрофазотрона ЛВЭ позволит расширить энергетический диапазон до энергий 4,5 ГэВ на нуклон.

В работе ^{8/} сообщались предварительные результаты исследования взаимодействий алфа-частиц с импульсом 17,9 ГэВ/с с ядрами ¹⁵⁹Ть, ¹⁸¹Та и ^{207,2}Рь.

В настоящей работе представлены результаты исследования взаимодействий дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами ниобия, тербия, свинца и висмута.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Облучение мишеней было выполнено на выведенном пучке (НП-1) дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с (T=7,3 ГэВ) синхрофазотрона ЛВЭ



ОИЯИ /9/. Мониторинг интенсивности пучка дейтронов осуществлялся по реакции $^{27}\text{Al}(\text{d}, \text{Zr } 2\text{n})^{24}\text{Na}$. Сечение мониторинговой реакции $(15,2 \pm 1,5)$ мб взято из работы /10/ при энергии дейтронов 2,33 ГэВ. Различие в энергии дейтронов от 2,33 до 7,3 ГэВ не должно привести к существенному изменению сечения образования ^{24}Na , но такая процедура может внести систематическую ошибку в наши результаты. Отметим, что сечение реакции $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{Zr } 2\text{n})^{24}\text{Na}$ при изменении энергии от 1 до 28,5 ГэВ уменьшается от 10,5 до 8,6 мб, т.е. на 12% /11/.

Средняя интенсивность пучка дейтронов на мишенях составляла $(7,4 \pm 1,1) 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Мишень тербия изготовлена из Tb_2O_3 , запрессованного в капсулу из оргстекла. Толщина мишени по Tb составляла 1 г/см². Мишени Nb , Pb и Bi изготовлены в виде дисков толщиной 26 мг/см², 1,36 г/см² и 2,45 г/см² соответственно.

Спектры γ -лучей от распада образовавшихся нуклидов измерялись спектрометром с Ge(Li) -детектором объемом 60 см³ и эффективностью регистрации $(4,6 \pm 0,4) 10^{-3}$ для γ -линии 1173,2 КэВ. Измерение спектров β -лучей проводилось в стандартной геометрии сериями, согласно табл. I.

Обработка спектров β -лучей выполнялась на ЭВМ ЭЭСМ-6 ЦНК ОИЯИ по программам SYRRES /12/ и SAMPO /13/ и в ХИТИ АН УССР на микропроцессоре 1P - 4900.

Идентификация ядер-продуктов производилась по наиболее интенсивным γ -линиям с учетом их относительных интенсивностей и периодов полураспада /14,15/. Такой подход позволял однозначно идентифицировать нуклиды даже в случае присутствия в спектрах одной наиболее интенсивной γ -линии. В тех случаях, когда не удавалось однозначно идентифицировать E_{β} , I_{β} и $T_{1/2}$ искомого нуклида, он не включался в табл. 2+5.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В табл. 2+5 представлены идентифицированные радиоактивные нуклиды, их периоды полураспада, экспериментальные значения энергии β -лучей и сечения их образования при взаимодействии дейтронов с ядрами мишеней из Nb , Tb , Pb и Bi соответственно. Там же указан тип выхода наблюдавшихся нуклидов - кумулятивный (К) или независимый (Н).

Таблица I
Временные диапазоны: t_1 - облучения, t_2 - охлаждения и t_3 - измерения мишеней Nb , Tb , Pb , Bi

Мишень	t_1	t_2	t_3
Ниобий 93 Nb	4 ч	0,4 ч	0,17 ч
		0,66 ч	0,17 ч
		0,82 ч	0,17 ч
		0,98 ч	0,17 ч
		2,18 ч	0,75 ч
		9,32 ч	1 ч
Тербий 159 Tb	2,02 ч	0,43 ч	1 ч
		2,48 ч	1 ч
		3,48 ч	1 ч
		31,35 ч	1 ч
		87,55 ч	1,5 ч
Свинец 207,2 Pb	7,98 ч	1,32 ч	1 ч
		2,65 ч	1 ч
		3,65 ч	1 ч
		5,72 ч	1,5 ч
		24,27 ч	0,5 ч
		83,65 ч	1 ч
207,2 Pb	0,5 ч	2,18 ч	1 ч
Висмут 209 Bi	3,58 ч	1,98 ч	1 ч
		2,98 ч	1 ч
		7,48 ч	0,5 ч
		65 ч	1 ч

Таблица 2
Сечения образования радиоактивных нуклидов в реакции ($^{93}_{41}\text{Nb} + \text{d}$)

Нуклид	$T_{1/2}$	E_{β} , кэВ	σ , мб	примечания
^{24}Na	15 ч	$1368,9 \pm 0,5$	18 ± 5	К
^{28}Mg	20,9 ч	$1782,0 \pm 1,9$	$2 \pm 0,6$	К
^{41}Ar	1,83 ч	$1294,0 \pm 1,0$	$4,5 \pm 1,0$	К

Таблица 2 (продолжение)

I	2	3	4	5
⁶⁷ Cu	61,9 ч	185,7 \pm 1,0	9 \pm 4	К
⁷¹ As	62 ч	174,6 \pm 0,9	3 \pm 2	К
⁷² Zn	46,5 ч	143,3 \pm 1,5	30 \pm 7	Н
⁷² As	26 ч	834,4 \pm 0,3	22 \pm 6	Н
⁷³ Se	7,18ч	64,1 \pm 2,0 361,8 \pm 1,2	12 \pm 5	К
⁷⁵ Br	1,64ч	140,3 \pm 1,3 287,1 \pm 1,4	22 \pm 6	К
⁷⁶ Br	16,1 ч	559,0 \pm 1,2	46 \pm 10	К
⁷⁷ Br	57 ч	238,9 \pm 0,7 520,7 \pm 0,6	42 \pm 11	К
⁷⁷ Kr	74,7 мин	129,2 \pm 0,9	15 \pm 5	К
⁸¹ Rb	4,58ч	190,4 \pm 0,8	51 \pm 11	К
^{82m} Rb	6,2 ч	554,0 \pm 1,6 619,4 \pm 0,5 777,2 \pm 0,7 828,7 \pm 1,2 1044,0 \pm 1,0	15 \pm 5	Н
⁸⁴ Y	38,5 мин	795,1 \pm 1,8	21 \pm 5	К
⁸⁶ Y	14,7 ч	628,1 \pm 1,4 704,0 \pm 0,8 1078,0 \pm 1,2 1154,0 \pm 1,0 1920,0 \pm 1,0	40 \pm 10	К
^{86m} Y	48 мин	208,2 \pm 0,4	17 \pm 4	Н
⁸⁶ Zr	16,5 ч	242,3 \pm 0,9	9,0 \pm 3,0	К
⁸⁷ Y	80,3 ч	388,0 \pm 0,4 485,5 \pm 0,8	67 \pm 22	К
^{87m} Y	13,2 ч	381,7 \pm 1,2	83 \pm 17	К
⁸⁹ Zr	78,5 ч	910,0 \pm 1,0	78 \pm 16	К
⁹⁰ Nb	14,6 ч	1130,1 \pm 1,5	24 \pm 6	Н
⁹⁰ Mo	5,7 ч	257,3 \pm 1,1	6 \pm 2	К
^{92m} Nb	10,1 СУТ	934,5 \pm 0,8	20 \pm 7	Н

Таблица 3

Сечения образования радиоактивных нуклидов в реакции (¹⁵⁹Гб + d)

Нуклид	T _{1/2}	E _γ , кэВ (наст. работа)	Б, нб	примечания
²⁴ Na	15 ч	1368,0 \pm 1,5	2,4 \pm 0,5	К
²⁸ Mg	20,9 ч	1781,0 \pm 1,9	0,47 \pm 0,19	К
^{34m} Cl	32,1 мин	146,0 \pm 1,0	0,6 \pm 0,1	Н
⁴¹ Ar	1,83 ч	1294,4 \pm 0,7	1,0 \pm 0,3	К
^{85m} Kr	4,5 ч	149,8 \pm 0,9	0,5 \pm 0,2	К
⁹⁰ Nb	14,6 ч	1129,1 \pm 1,5 2320,0 \pm 1,0	0,79 \pm 0,17	К
⁹³ Te	2,75 ч	1363,4 \pm 1,5	0,27 \pm 0,08	К
^{93m} Te	43 мин	391,1 \pm 1,2	0,29 \pm 0,08	К
⁹⁴ Te	293 мин	702,0 \pm 1,0 850,2 \pm 1,1 871,3 \pm 1,3	0,35 \pm 0,07	Н
^{94m} Te	52,5 мин	871,3 \pm 1,3	0,50 \pm 0,10	Н
¹⁰⁴ Ag	69,2 мин	556,0 \pm 1,2 768,0 \pm 1,1	0,8 \pm 0,2	К
^{104m} Ag	33,5 мин	556,0 \pm 1,2	1,2 \pm 0,2	К
^{116m} In	54,1 мин	1097,3 \pm 0,6 1291,7 \pm 1,9	0,67 \pm 0,16	Н
¹¹⁷ Te	61 мин	721,2 \pm 0,6	1,2 \pm 0,2	К
¹¹⁹ I	19,3 мин	257,7 \pm 0,9	1,4 \pm 0,3	К
¹²⁰ I	81 мин	559,0 \pm 1,0 1523,9 \pm 0,7	1,1 \pm 0,2	К
¹²¹ I	2,12ч	213,6 \pm 0,8	1,9 \pm 0,4	К
¹³¹ La	61 мин	108,1 \pm 1,1 417,0 \pm 1,8	1,1 \pm 0,3	К
¹³² La	4,8 ч	465,4 \pm 1,2 567,2 \pm 1,4	0,6 \pm 0,1	К
¹³² Ce	3,51ч	182,0 \pm 0,7	0,80 \pm 0,17	К
¹³³ Ce	5,4 ч	131,0 \pm 1,9 476,2 \pm 1,8	0,6 \pm 0,1	

Таблица 3 (продолжение)

I	2	3	4	5
^{133}Ce	97 мин	$98,0 \pm 2,0$	$0,70 \pm 0,14$	К
^{138m}Pr	2,02 ч	$790,7 \pm 1,3$ $1038,6 \pm 0,4$	$0,4 \pm 0,1$	Н
^{157}Dy	8,1 ч	$326,4 \pm 1,2$	$3,9 \pm 1,1$	К

Таблица 4

Сечения образования радиоактивных нуклидов в реакции ($^{207,208}\text{Pb} + \alpha$)

Нуклид	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}, \text{кэВ}$	$\sigma, \text{мб}$	примечания
^{24}Na	15 ч	$1368,4 \pm 0,7$	20 ± 4	К
^{28}Mg	20,9 ч	$1778,2 \pm 0,8$	$4,0 \pm 1,0$	К
^{41}Ar	1,83 ч	$1294,6 \pm 1,2$	$9,6 \pm 2,0$	К
^{56}Mn	2,56 ч	$848,1 \pm 1,1$ $1910,1 \pm 1,2$	$5,2 \pm 1,1$	К
^{90}Nb	14,6 ч	$1129,6 \pm 1,1$ $2184,2 \pm 1,5$ $2318,8 \pm 1,2$	$3,8 \pm 1,0$	К
^{93m}Mo	6,95 ч	$1477,7 \pm 1,5$	$1,6 \pm 0,3$	Н
^{93}Tc	2,75 ч	$1362,0 \pm 1,9$	$6,7 \pm 1,4$	К
^{93m}Tc	43 мин	$390,1 \pm 1,0$	$11 \pm 2,2$	К
^{95}Tc	20 ч	$766,9 \pm 1,0$	$5,6 \pm 1,6$	К
^{132}La	4,8 ч	$465,1 \pm 1,1$	$4,0 \pm 0,8$	К
^{173}Hf	24 ч	$122,9 \pm 1,8$	$5,4 \pm 1,3$	К
^{186}Ir	15,8 ч	$138,0 \pm 0,7$ $296,6 \pm 0,8$	11 ± 4	К
^{198}Tl	5,3 ч	$411,1 \pm 0,7$ $636,6 \pm 0,9$ $675,0 \pm 1,0$	39 ± 8	К
^{198m}Tl	1,87 ч	$411,1 \pm 0,7$ $586,5 \pm 0,9$ $636,6 \pm 0,9$	15 ± 4	Н
^{198}Pb	2,4 ч	$173,0 \pm 1,2$	20 ± 5	К
^{199}Pb	90 мин	$366,0 \pm 1,5$ $720,0 \pm 0,7$	27 ± 8	К

Таблица 4 (продолжение)

I	2	3	4	5
^{200}Tl	26,1 ч	$368,0 \pm 1,2$ $579,2 \pm 1,6$ $828,1 \pm 1,1$ $1205,9 \pm 0,9$	$38 \pm 1,0$	К
^{201}Pb	9,4 ч	$329,9 \pm 1,2$	40 ± 10	К
^{202m}Pb	3,62 ч	$423,7 \pm 0,8$ $458,0 \pm 1,0$ $657,8 \pm 1,2$ $787,3 \pm 1,1$ $961,1 \pm 1,3$	20 ± 5	К
^{202}Bi	1,79 ч	$423,7 \pm 0,8$ $657,8 \pm 1,2$ $961,1 \pm 1,3$	12 ± 5	К
^{203}Pb	52,1 ч	$279,0 \pm 1,1$	25 ± 5	К
^{203}Bi	11,76 ч	$1034,1 \pm 1,5$	14 ± 6	К
^{204m}Pb	66,9 мин	$375,0 \pm 1,2$ $899,0 \pm 1,2$ $911,3 \pm 1,3$	20 ± 8	К
^{204}Bi	11,2 ч	$375,0 \pm 1,2$ $899,0 \pm 1,2$ $911,3 \pm 1,3$ $984,2 \pm 1,3$	11 ± 4	К
^{206}Bi	6,24 сут	$343,3 \pm 1,5$ $398,2 \pm 1,8$ $538,6 \pm 1,2$ $803,3 \pm 0,7$ $880,3 \pm 0,6$ $1717,2 \pm 1,1$	9 ± 3	К

Таблица 5

Сечения образования радиоактивных нуклидов в реакции ($^{203}\text{Bi} + \alpha$)

Нуклид	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}, \text{кэВ}$ наст. работа	$\sigma, \text{мб}$	примечания
^{24}Na	15 ч	$1367,9 \pm 0,9$	22 ± 5	К
^{28}Mg	20,9 ч	$1778,4 \pm 0,6$	$4,4 \pm 1,5$	К

Таблица 5 (продолжение)

I	2	3	4	5
⁴⁷ Ar	1,83 ч	1294,0 \pm 0,4	8,4 \pm 1,8	К
⁵⁶ Mn	2,56 ч	1810,0 \pm 1,5	3,0 \pm 1,3	К
⁹⁰ Nb	14,6 ч	1130,1 \pm 1,4 2185,3 \pm 1,0 2317,6 \pm 1,5	5,0 \pm 1,6	К
⁹⁰ Mo	5,67 ч	257,1 \pm 1,1	4,0 \pm 1,0	К
^{93m} Mo	6,95 ч	1477,2 \pm 0,8	2,1 \pm 0,4	Н
⁹⁵ Tc	20 ч	766,3 \pm 0,4	6,5 \pm 1,8	К
¹³² Ia	4,8 ч	464,9 \pm 0,7	3,5 \pm 0,9	К
¹⁹⁸ Tl	5,3 ч	411,8 \pm 0,7 637,5 \pm 1,2 676,1 \pm 0,4	45 \pm 7	К
^{198m} Tl	1,87 ч	281,7 \pm 1,7 411,8 \pm 0,7 586,9 \pm 0,9 637,5 \pm 1,2	22 \pm 4	Н
¹⁹⁸ Pb	2,4 ч	173,1 \pm 1,1	15 \pm 4	К
²⁰⁰ Tl	26,1 ч	368,3 \pm 0,8 579,1 \pm 1,2 828,9 \pm 0,6 1205,3 \pm 1,1	60 \pm 25	К
²⁰⁰ Pb	21,5 ч	147,2 \pm 1,0	36 \pm 8	К
²⁰¹ Pb	9,4 ч	330,7 \pm 1,2	60 \pm 15	К
²⁰² Pb	3,62 ч	423,1 \pm 1,7 458,5 \pm 1,5 658,6 \pm 0,7 787,6 \pm 0,6 961,1 \pm 1,0	26 \pm 6	
²⁰² Bi	1,79 ч	423,1 \pm 1,7 658,6 \pm 0,7 961,1 \pm 1,0	15 \pm 5	К
²⁰³ Pb	52,1 ч	278,5 \pm 0,8	86 \pm 21	
²⁰³ Bi	11,76 ч	820,0 \pm 1,0 826,0 \pm 1,0 1033,3 \pm 1,3	52 \pm 12	К

Таблица 5 (продолжение)

I	2	3	4	5
²⁰⁴ Bi	11,2 ч	375,0 \pm 0,8 899,2 \pm 1,2 911,0 \pm 1,0 985,6 \pm 1,3	40 \pm 11	К
²⁰⁶ Bi	6,24 ч	183,8 \pm 0,7 263,1 \pm 0,6 343,6 \pm 1,8 497,6 \pm 0,9 538,6 \pm 0,6 620,1 \pm 1,5 804,1 \pm 0,5 881,6 \pm 1,1 1019,3 \pm 1,5 1098,9 \pm 1,2 1594,2 \pm 1,1 1718,3 \pm 0,9	70 \pm 25	К

Сечения образования радиоактивных ядер-продуктов определялись по интенсивностям соответствующих γ -линий, согласно формуле

$$\sigma = \frac{N_{\gamma} \cdot \lambda \cdot A \cdot K}{\Omega \cdot N_A \cdot \Phi \cdot d \cdot \varepsilon \cdot f (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}, \quad (I)$$

где N_{γ} - число счетов в данной γ -линии;
 λ - постоянная распада;
 N_A - число Авогадро;
 Ω - геометрический фактор;
 Φ - интенсивность пучка;
 d - толщина мишени;
 ε - абсолютная эффективность регистрации гамма-излучения;
 f - квантовый выход гамма-излучения;
 t_1, t_2, t_3 - время облучения, охлаждения и измерения мишеней соответственно;
 K - поправка на самопоглощение гамма-излучения в веществе мишеней.

Таблица 6

Изомерные отношения, полученные в реакциях с дейтронами, α -частицами /8/ и ионами $^{12}\text{C} /20/$

Мишень	Нуклид	I_J	$E_J, \text{КэВ} /14/$	I_d	$E_d, \text{КэВ} /14/$	$E_J, \text{КэВ} /14/$	σ_m / σ_g		
							$T_d = 7,3 \text{ ГэВ}$ настоящая работа	$T_d = 14,3 \text{ ГэВ}$	$T_{^{12}\text{C}} = 25,2 \text{ ГэВ}$
Nb	^{86}Y	g^+	208,0	4^-	627,1	0,55 \pm 0,25	-----	-----	
	^{87}Y	$9/2^+$	381,1	$1/2^-$	1076,6	1,24 \pm 0,4R	-----	-----	
Tb	^{92}Tc	$9/2^+$	1363,0	$1/2^-$	391,7	0,93 \pm 0,3B	0,21 \pm 0,04	-----	
	^{94}Tc	7^+	702,6	2^+	871,0	0,7 \pm 0,2	-----	-----	
	^{104}Ag	5^+	850,2	2^+	555,8	0,67 \pm 0,2	-----	-----	
			767,6						

Таблица 6 (продолжение)

	Нуклид	I_J	$E_J, \text{КэВ} /14/$	I_d	$E_d, \text{КэВ} /14/$	σ_m / σ_g		
						$T_d = 7,3 \text{ ГэВ}$ настоящая работа	$T_d = 14,3 \text{ ГэВ}$	$T_{^{12}\text{C}} = 25,2 \text{ ГэВ}$
Ta	^{133}Ce	$9/2^-$	130,8	$1/2^+$	97,2	0,86 \pm 0,23	3,25 \pm 1,4B	-----
	^{92}Tc	$9/2^+$	477,2	$1/2^-$	391,7	-----	0,33 \pm 0,15	-----
Pb	^{93}Tc	$9/2^+$	1363,0	$1/2^-$	39,1	0,61 \pm 0,15	0,4 \pm 0,2	-----
	^{198}Tl	7^+	587,2	2^-	675,8	0,79 \pm 0,31	0,6 \pm 0,2	1,4 \pm 0,2
Bi	^{198}Tl	7^+	587,2	2^-	675,8	0,73 \pm 0,25	-----	-----
	^{196}Au	12^-	147,7	2^-	355,7	-----	-----	0,5 \pm 0,2
	^{196}Au	12^-	214,9	2^-	411,8	-----	-----	0,3 \pm 0,2
U	^{186}Ir	5^+	296,9	2^+	256,7	-----	-----	0,09 \pm 0,03

Полная ошибка величин сечений образования ядер-продуктов, приведенных в табл. 2 ÷ 5 складывается из статистических ошибок значений всех величин в правой части выражения (1).

Кроме того, вклад в неопределенность полученных значений сечений могут вносить реакции, вызванные фоновым нейтронным потоком, учесть которые не удалось в настоящих измерениях.

Анализ спектров β^- -лучей нуклидов, образовавшихся в указанных реакциях, позволил определить сечения образования остаточных ядер-продуктов в широких диапазонах массовых чисел:

- $A = 24 \pm 92$ для мишени из ^{93}Nb (табл. 2);
- $A = 24 \pm 157$ для мишени из ^{159}Tb (табл. 3);
- $A = 24 \pm 206$ для мишени из $^{207,2}\text{Pb}$ (табл. 4) и
- $A = 24 \pm 206$ для мишени из ^{209}Bi (табл. 5).

Для ряда нуклидов определены изомерные отношения (отношения сечений образования метастабильных состояний).

В табл. 6 приведены изомерные отношения, полученные нами при взаимодействии дейтронов (7,3 ГэВ) с ядрами Nb, Tb, Pb и Bi и в реакции с α -частицами $T = 14,3$ ГэВ на ядрах Tb, Ta и Pb ^{/8/}. Там же приведены изомерные отношения, полученные при взаимодействии ионов ^{12}C (25,2 ГэВ) с ядрами Pb, Bi и ^{U/20/}.

При определении изомерных отношений для изомерных пар $^{93\text{g,m}}\text{Tc}$, $^{94\text{g,m}}\text{Tc}$, $^{104\text{g,m}}\text{Ag}$ и $^{133\text{g,m}}\text{Ce}$ по формуле Рудстама ^{/16/} учитывался вклад от распада родительских ядер. Оценка вклада для ^{93}Tc , ^{94}Tc и ^{104}Ag не превышала 10%, для ^{133}Ce - 20% и для ^{87}Y - 70%.

В случае изомерных пар $^{86\text{g,m}}\text{Y}$ и $^{198\text{g,m}}\text{Tl}$ выходы изомерных состояний независимы, а для основных состояний из кумулятивных сечений вычитались сечения образования родительских состояний.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переходя к обсуждению полученных результатов, прежде всего следует отметить, что сечения образования остаточных ядер-продуктов (табл. 2÷5) уменьшаются при переходе от ^{24}Na к более тяжелым нуклидам, достигая минимума при значениях массовых чисел продуктов, равных примерно половине A-мишени, а затем снова возрастают для нуклидов с A, близким к массовому числу ядра мишени.

На рис. 1 представлены выходы легких продуктов ^{24}Na , ^{28}Mg и ^{41}Ar , образующихся при облучении мишеней из Nb, Tb, Pb и Bi дейтронами с энергией 7,3 ГэВ.

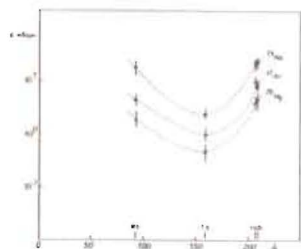


Рис. 1. Выходы изотопов ^{24}Na , ^{28}Mg и ^{41}Ar , образующихся при взаимодействии дейтронов с энергией 7,3 ГэВ с ядрами ^{93}Nb , ^{159}Tb , $^{207,2}\text{Pb}$ и ^{209}Bi .

Зависимость сечений их образования от массового числа мишени имеет сходный характер. Можно отметить некоторую особенность в поведении сечений образования ^{41}Ar для всех четырех мишеней $\sigma(^{41}\text{Ar})$ больше $\sigma(^{28}\text{Mg})$. Возможно это связано с тем, что механизм образования ^{41}Ar иной, чем для ^{24}Na и ^{28}Mg .

На рис. 2 представлены сечения образования ^{24}Na , полученные нами в реакции с дейтронами $T=7,3$ ГэВ и α -частицами $T=320$, 880 МэВ и протонами $T=2$ ГэВ ^{/5,17/}.

Наблюдаемое подобие выходов ^{24}Na в реакциях с α -частицами и протонами в зависимости от A-мишени, по мнению авторов работ ^{/5,17/}, указывает на близкий (сходный) характер каскадов, генерируемых α -частицами и протонами в исходных ядрах. Аналогичный характер зависимости выхода ^{24}Na от массового ядра мишени получен нами на дейтронах (см. рис. 2), что, по-видимому, также указывает на идентичность ядерных каскадов, инициируемых протонами, дейтронами и α -частицами.

Авторы работы ^{/18/} на основании анализа изотопических распределений Rb, In и Cs, образующихся при взаимодействии релятивистских протонов, дейтронов и α -частиц пришли к заключению, что ядерный каскад оканчивается одинаково для указанных частиц.

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие ядерного каскада не зависит от массы и энергии налетающих частиц.

В табл. 7 даны результаты сравнения сечений образования остаточных ядер при облучении мишеней из Nb дейтронами с энергией 7,3 ГэВ (настоящая работа) и протонами 12 ГэВ ^{/19/}. Все сравниваемые значения сечений соответствуют независимым выходам за исключением ^{71}As , вклад в выход которого вносит ^{71}Se с $T_{1/2} = 5$ минут.

Данные, приведенные в табл. 7, свидетельствуют о том, что при релятивистских энергиях сечения образования остаточных ядер-продуктов на дейтронах выше, чем на протонах.

Полезно будет также сравнить полученные значения выходов остаточных нуклидов в реакциях с дейтронами и α -частицами ($T=14,3$ ГэВ) с ядрами мишени Tb, Ta и Pb.

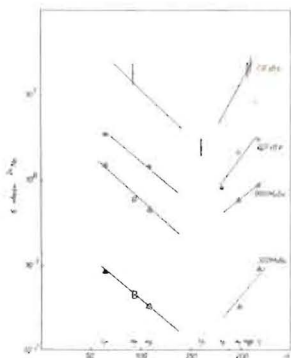


Рис. 2. Экспериментальные значения сечений образования ^{24}Na из реакций с дейтронами ($T=7,3$ ГэВ), α -частицами ($T=320,880$ МэВ) и протонами ($T=2,0$ ГэВ).

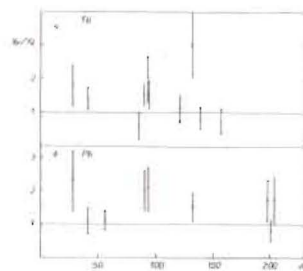


Рис. 3. Отношения выходов ядер-продуктов в реакциях с дейтронами и α -частицами.

На рис. 3 представлены отношения выходов ядер-продуктов в реакциях с дейтронами и α -частицами.

Ранее [8] мы получили относительные выходы остаточных ядер-продуктов при взаимодействии α -частиц с импульсом 17,9 ГэВ/с. Наблюдаемый разброс величин отношений связан с тем, что для большинства продуктов приведены отношения кумулятивных выходов.

Таблица 7

Сравнение сечений образования остаточных ядер в реакциях с протонами 12 ГэВ и дейтронами 7,3 ГэВ на мишени из ниобия.

Нуклид	$\sigma_p, \text{мб}$	$\sigma_d, \text{мб}$	σ_d/σ_p
1 ^{71}Ag	$6,81 \pm 1,94$	8 ± 2	$1,2 \pm 0,4$
2 ^{82m}Rb	$4,7 \pm 0,75$	15 ± 5	$3,2 \pm 1,2$
3 ^{86m}Rb	$6,55 \pm 9,49$	17 ± 4	$2,6 \pm 0,6$
4 ^{90}Nb	$12,8 \pm 4,2$	24 ± 6	$1,9 \pm 0,8$
5 ^{92m}Nb	$15,6 \pm 1,4$	20 ± 7	$1,3 \pm 0,5$

Отношение независимых выходов получено только для нуклидов с $A=94$ и $A=138$ — $\sigma_\alpha / \sigma_d = (1,6 \pm 0,3)$ и $\sigma_\alpha / \sigma_d = (0,8 \pm 0,3)$ соответственно для мишени из Ть. Для мишени из Рь для нуклидов с $A=93$ получено $\sigma_\alpha / \sigma_d = (2,1 \pm 0,7)$ и для $A=138$ $\sigma_d / \sigma_\alpha = (1,7 \pm 0,6)$.

Важно отметить общую тенденцию возрастания выходов для α -частиц по сравнению с дейтронами. И, резюмируя, можно сделать заключение, что в реакциях с протонами, дейтронами и α -частицами наблюдается такая же закономерность возрастания сечений образования остаточных ядер-продуктов, как и для реакций с релятивистскими тяжелыми ионами РТИ ($\text{C}^{12} + {}^{40}\text{Ar}$).

Переходя к обсуждению угловых моментов остаточных ядер, отметим, что одним из экспериментальных подходов к их изучению является измерение изомерных отношений σ_m/σ_g . Изомерное отношение характеризует отношение сечений образования остаточных ядер в основном и изомерном состояниях. Эта величина сильно зависит как от энергии и спина уровня, так и от типа используемой для получения изомера реакции.

В табл. 6 приведены экспериментальные значения изомерных отношений, полученные в реакциях с дейтронами (настоящая работа), алфа-частицами [8] и ионами $^{12}\text{C}/^{20}\text{F}$. Как видно из таблицы, для подавляющего большинства остаточных нуклидов получены изомерные отношения меньше или равные единице, что свидетельствует о равновероятном заселении метастабильных состояний с различными спинами после завершения испарительной стадии процесса взаимодействия дейтронов, алфа-частиц и ионов ^{12}C с исходными ядрами.

Модельные описания предсказывают увеличение вероятностей заселения высокоспиновых состояний в реакциях с релятивистскими частицами и ядрами [1,2].

Однако экспериментальные значения изомерных отношений, приведенные в табл. 6, скорее указывают на отсутствие доминантного заселения высокоспиновых состояний в указанных реакциях. Кроме того, можно отметить еще один факт, свидетельствующий о малой вероятности заселения высокоспиновых состояний: в спектрах гамма-лучей изотопов, образующихся в реакциях с РТИ, не удалось идентифицировать состояния остаточных нуклидов с достаточно высокими спинами ($> 12 \hbar$) в диапазонах наблюдаемых времен жизни.

Поэтому решение этой проблемы требует дальнейших как экспериментальных, так и теоретических исследований.

Авторы благодарны Балдину А.М., Мещерякову М.Г., Кузнецову А.А., Семенову И.Н. и Ильинову А.С. за интерес к работе, поддержку и полезные обсуждения, Тютюникову С.И., Хиллер К., Мирошнику В.С. и Воронко В.А. за помощь в работе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и ядер с атомными ядрами. Атомиздат, М., 1972.
2. Chen K. et al. Phys.Rev., 1968, p.949.
3. Rudy C.R., Povile N.T., Phys.Lett., 1975, 59B, p.240.
4. Kaufman S.B., Steinberg E.P., Wilkins B.O., Henderson O.J., Phys. Rev., 1980, 22C, p.1897.
5. Korteling R.G., Hyde E.K., Phys.Rev., 1964, 136B, p.425.
6. Siskling J.D., Haustein P.E., Ruth T.J., Virtes G.J., Phys.Rev., 1978, 17C, p.1632.
7. Cole G.V. et al. Phys.Rev., 1982, C25, p.244.
8. Бутцев В.С., Бутцева Г.Л., Костин В.Я., Мигаленя В.Я. ОИЯИ Р1-84-455 Дубна, 1984.
9. Семенюшкин И.Н. В сб.: "Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. ОИЯИ. Д2-82-568, Дубна, 1982, с.14
10. Banaigs J., Berger J., Duflo J., Golazaul, Harff O., Nucl. Inst. and Meth., 1971, 95, p.307.
11. Chu Y.Y., Friedlauder G., Musain L., Phys.Rev., 1977, 15C, p.352.
12. Аврамов С.Р., Сосновская Е.В., Цупко-Ситников В.М. ОИЯИ, Р10-9741, Дубна, 1976.
13. Routti J.T. Preprint UCRL- 19452, 1969.
14. Lederer C.L., Shirley V.S. Table of Isotopes, VII ed. John Wiley and Sons Inc., New York, 1978.
15. Дорошенко Г.Г., Шлягин К.Н. Справочник по идентификации гамма-излучающих нуклидов, Атомиздат, М, 1980, с.144.
16. Rudstam G. Z.Naturforsch., 1966, 21a, p.1027.
17. Crespo V.P., Alexander J.L., Hyde E.K. Phys.Rev., 1963, 131, p.1765.
18. Авдеев С.П., Карнаухов В.А., Коровин Г.Ю., Кузнецов В.Д., Надь Т. Петров Л.А. ЯФ., 1982, вып. 2., с.264.
19. Томинака Т., Ван С., Джета Н., Катох К., Кондо К., Такасаки М., Ямамото А., Хиралайши Н. Nucl.Phys., 1984, A414, p.305.
20. Loveland W., Otto R.J., Morrissey D.J., Seaborg G.T. Phys.Lett., 1977, 69B, p.284.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 августа 1985 года.

Бутцев В.С. и др. P1-85-590
Изучение взаимодействий дейтронов с энергией 7,3 ГэВ с ядрами ^{93}Nb , ^{159}Tb , $^{207.2}\text{Pb}$ и ^{209}Bi

Приведены результаты исследования взаимодействий дейтронов с энергией 7,3 ГэВ с ядрами ниобия, тербия, свинца и висмута. По выходу гамма-лучей образовавшихся нуклидов определены сечения образования остаточных ядер-продуктов в широких диапазонах массовых чисел:

$A = 24 + 92$ для мишени из ^{93}Nb ,
 $A = 24 + 157$ для мишени из ^{159}Tb ,
 $A = 24 + 206$ для мишени из $^{207.2}\text{Pb}$,
 $A = 24 + 206$ для мишени из ^{209}Bi .

Для изотопов ^{86}Y , ^{87}Y , ^{93}Tc , ^{94}Tc , ^{104}Ag , ^{133}Ce и ^{198}Tl определены изомерные отношения (σ_m/σ_g), которые сравниваются с изомерными отношениями, полученными в реакциях с протонами, α -частицами и ионами ^{12}C .

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Butsev V.S. et al. P1-85-590
The Study of 7.3 GeV Deuteron Interaction with ^{93}Nb , ^{159}Tb , $^{207.2}\text{Pb}$ and ^{209}Bi Nuclei

The results of investigations of 7.3 GeV deuteron interactions with Nb, Tb, Bi and Pb nuclei are presented. The cross-sections of residual nuclei in a wide mass range of $24 \leq A \leq 92$ for ^{93}Nb target, $24 \leq A \leq 157$ for ^{159}Tb target, $24 \leq A \leq 206$ for $^{207.2}\text{Pb}$ target and $24 \leq A \leq 206$ for ^{209}Bi target respectively have been determined from γ -ray counting of the formed isotopes. For the isotopes ^{86}Y , ^{87}Y , ^{93}Tc , ^{94}Tc , ^{104}Ag , ^{133}Ce and ^{198}Tl the isomeric ratios (σ_m/σ_g) have been determined. They are compared with measured in reactions induced by protons, α -particles and ^{12}C -ions as well.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985