

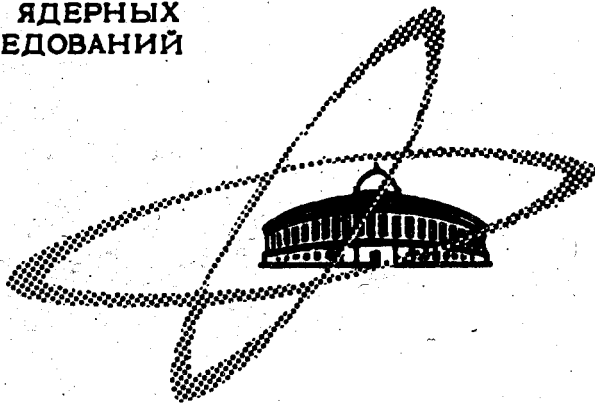
0-361

10/x-69

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

P7 - 4637



Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Со Ки Хван,  
А.О.Шамсутдинов, Н.С.Мальцева, И.И.Чубуркова

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ  
МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В СРЕДНЕЙ ОБЛАСТИ  
МАСС ЯДЕР

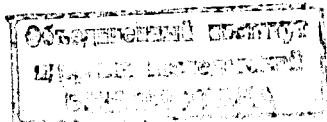
P7 - 4637

8058/2 нр

Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Со Ки Хван,  
А.О.Шамсутдинов, Н.С.Мальцева, И.И.Чубуркова

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ  
МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В СРЕДНЕЙ ОБЛАСТИ  
МАСС ЯДЕР

Направлено в ЯФ



Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Со Ки.Хван,  
Шамсутдинов А.О., Мальцева Н.С., Чубуркова И.И.

P7-4637

Изучение реакций многонуклонных передач под действием тяжелых ионов в средней области масс ядер

Исследовалось образование изотопов сурьмы, иода, цезия, бария, церия, получающихся из ядер мишени  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Pr}$  в результате реакций многонуклонных передач.

Показано, что распределение сечений передачи или отрыва различного числа нейтронов описывается функцией Гаусса типа:  $W(A_p - A_n) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x)^{1/2}} \exp \frac{-(A_p - A_n)^2}{2\sigma_x^2}$

Полученные данные обсуждаются с точки зрения возможности реакций многонуклонных передач для синтеза изотопов, лежащих вдали от области стабильности.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1969**

Oganesyan Yu.Ts., Penionshkevich Yu.E., So Ki Hvan P7-4637.  
Shamsutdinov A.O., Maltseva N.S., Chuburkova I.I.

Investigation of the Reactions with Multinucleon Transfer  
by Heavy Ions in the Center Region of Nucleus Mass

Production of Sb, I, Cs, Ba, Ce isotopes from the  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Pr}$  target nuclei as a result of multinucleon transfer reactions has been investigated. The distribution of the transfer cross sections or separation of various number of neutrons is described by the Gauss function of the following type:

$$W(A_p - A_n) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x)^{1/2}} \exp \frac{-(A_p - A_n)^2}{2\sigma_x^2}$$

The obtained data are discussed from the point of view of possibility of multinucleon transfer reactions for the synthesis of isotopes located far from the stability region.

**Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1969**

Одним из основных процессов, происходящих при взаимодействии ускоренных тяжелых ионов достаточно высокой энергии с ядрами мишени, являются прямые реакции. Полное сечение реакций подобного типа весьма велико и может составлять 20-30% их геометрического сечения <sup>/14/</sup>.

При прямых процессах возможны различные каналы ядерных реакций, каждый из которых зависит от многих условий (энергии заряда и массы частицы и ядра мишени, структурных свойств ядер и т.д.). Наибольшее сечение имеют реакции передачи одного нуклона. Как показано в работе <sup>/15/</sup>, реакции однонуклонных передач могут осуществляться при прицельных параметрах, больших радиуса ядра. В этом случае переход нуклона из ядра в ядро осуществляется путем туннельного эффекта, поэтому реакции подобного типа могут протекать и в случае взаимодействия ядер с энергией ниже кулоновского барьера.

По мере увеличения энергии иона над кулоновским барьером картина реакций передач становится более многообразной. В этом случае возможен переход из ядра в ядро целого комплекса нуклонов. В первых исследованиях реакций подобного типа <sup>/1/</sup> было показано, что их механизм существенно отличается от реакций однонуклонных передач. В связи с этим в работе <sup>/1/</sup> Р. Вольфгангом и Р. Кауфманом был предложен

механизм протекания этих реакций, который предполагает перекрытие поверхностей двух взаимодействующих ядер (параметр столкновения, сравнимый или меньший радиуса ядра).

Изучение основных характеристик реакций многонуклонных передач под действием тяжелых ионов (измерение энергетических спектров продуктов реакций, их угловых распределений, зависимости сечения их образования от числа передаваемых нуклонов) было проведено в работах /4-9/.

Из результатов этих работ следует, что суммарное сечение всех прямых реакций под действием тяжелых ионов достигает значительной части полного сечения взаимодействия и растет с энергией иона и его массой. При энергиях 8-10 Мэв/нуклон величина сечения составляет несколько миллибарн. Показано также, что наряду с однонуклонным обменом с достаточно большой вероятностью идут реакции передачи большого числа нуклонов. Так, если сечение реакции  $^{181}\text{Ta} (^{20}\text{Ne}, -2p, -2n)$  составляет  $10^{-27}$  см<sup>2</sup>, то увеличение числа передаваемых нейтронов до 13 приводит к уменьшению сечения лишь на два порядка.

Этот факт представляет значительный интерес с точки зрения получения изотопов, лежащих вдали от области стабильности. Так, первые излучатели запаздывающих протонов были открыты в Дубне в реакции срыва трех протонов. В реакциях передачи были синтезированы также тяжелые изотопы  $^8\text{He}$  /10/. В настоящее время наблюдается образование изотопов  $^{18}\text{C}$ ,  $^{22}\text{O}$ ,  $^{20}\text{N}$  в результате подхвата ядром частицы значительного числа нуклонов из ядра мишени /11/.

Что касается возможности синтеза сильно нейтронодефицитных или нейтроноизбыточных изотопов в средней и тяжелой областях ядер в подобного типа реакциях, то пока из существующих экспериментальных данных трудно сделать определенные выводы.

В настоящей работе исследовалось образование изотопов сурьмы, иода, цезия, бария, церия, получающихся из ядер мишени ( $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Pr}$ ) в результате срыва, похвата или обмена этими ядрами различным числом нуклонов.

Выбор для исследования изотопов этих элементов объяснялся, во-первых, малой величиной кулоновского барьера реакций, идущих с этими ядрами ( $\approx 2,5$  Мэв/нуклон), что позволяло изучать энергетические зависимости выходов продуктов реакций в широком диапазоне энергии (до  $\frac{E_1 - E_b}{A_1} = 5,5$  Мэв/нуклон), во-вторых, удобством идентификации изотопов, которые имеют хорошо известные свойства радиоактивного распада; в-третьих, возможностью высокой очистки этих элементов.

Опыты проводились на пучке 310-сантиметрового циклотрона тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

#### Экспериментальная методика

На массивную подложку, изготовленную из алюминия с содержанием опасных примесей других элементов ( $\leq 10^{-6}$ ) и охлаждаемую водой, наносилось вещество мишени толщиной  $\approx 2$  мг/см<sup>2</sup>. Для изготовления мишеней использовались химически чистые (очистка  $\approx 10^{-8}$  от соседних элементов) изотопы  $^{127}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{139}\text{La}$  и  $^{141}\text{Pr}$  в виде соединений  $\text{KI}$ ,  $\text{CsBr}$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  и  $\text{PrO}$ . Мишень помещалась внутри камеры циклотрона и подвергалась облучению ионами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{40}\text{Ar}$  интенсивностью 80, 30 и 8 мка соответственно. Ток пучка измерялся с помощью коллектора, расположенного внутри подложки непосредственно за рабочим слоем мишени. Для измерения энергии бомбардирующих ионов мишень помещалась на разные радиусы ускорения.

После облучения мишень и часть алюминиевой подложки (толщиной  $\approx 15$  микрон) растворялись в концентрированной азотной кислоте и радиохимическими методами /13/ выделялись фракции Cs, Ba, I, Ce и Sb.

Гамма-радиоактивность полученных образцов измерялась с помощью двух Ge(Li) $\gamma$ -спектрометров в сочетании с 4096-канальными амплитудными анализаторами /12/. Энергетическое разрешение фотопика для  $\gamma$ -лучей в энергетическом интервале от 60 до 2000 кэВ было примерно одинаковым и составляло 4 кэВ. В качестве примера на рис. 1 показан спектр изотопов иода, образующихся в реакции  $^{133}\text{Cs} (^{22}\text{Ne}, -2p, \pm xn)$ , измеренный с помощью Ge(Li) $\gamma$ -спектрометра.

Идентификация изотопов производилась по энергиям гамма-лучей, их интенсивностям и периодам полураспада.

Выходы почти всех получаемых изотопов были независимыми, т.к. изобары, из которых они могли образовываться, как правило, имели сечение в 150-200 раз меньше сечения образования рассматриваемого изотопа.

Необходимо заметить, что время химического выделения одной фракции составляло  $\approx 30-40$  минут и увеличивалось пропорционально числу элементов, выделяемых из мишени. Из облученного образца выделялись радиохимическим методом 5 элементов. Распределение выходов изотопов каждого элемента определялось непосредственно из опыта. Относительные распределения различных элементов (сумма изотопов данного элемента) находились из радиохимических выходов с точностью  $\approx 10-15\%$ . Абсолютная величина сечений образования различных изотопов в реакциях передачи определялась относительно сечения образования иода в реакции деления  $^{238}\text{U} (^{22}\text{Ne}, f)$  и составляла  $\approx 20\%$ .

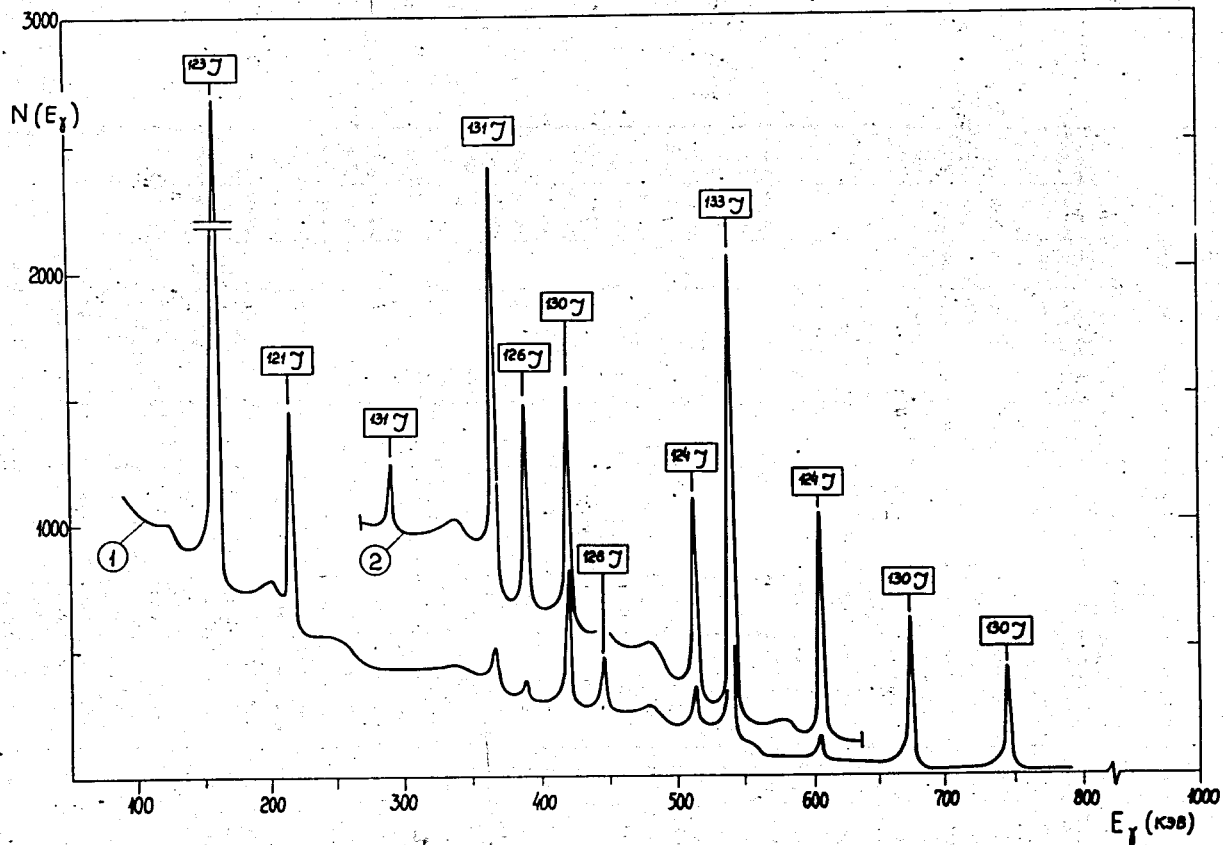


Рис.1. Спектр  $\gamma$ -излучения изотопов йода, образующихся в реакции  $^{163}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, -2p + xn)I$  при энергии бомбардирующих ионов - 170 Мэв. Кривые 1,2 соответствуют данным измерений через 1 и 24 часа после конца облучения.



Таблица 1

Сечения образования изотопов в реакциях многонуклонных передач

ИЗОТОП	ПЕРИОД ПОЛУ-РАСПАДА (год)	ЭНЕРГИЯ УДАЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ (эВ)	$^{133}\text{La}^{140}$			$^{139}\text{La}^{144}$			$^{141}\text{Pr}^{142}$			$^{147}\text{Pr}^{142}$		
			тип реакции	сечение (мб)	сечение (мб)	сечение (мб)	тип реакции	сечение (мб)	сечение (мб)	тип реакции	сечение (мб)	сечение (мб)	тип реакции	сечение (мб)
$^{120}\text{I}$	1,4	560	-2p-11n	0,300	0,0025	-	-4p-15n	0,095	-	-6p-15n	0,0025	0p-7n	-	
$^{121}\text{I}$	2,12	212	-2p-10n	0,530	0,009	-	-4p-14n	0,250	-	-6p-14n	0,010	0p-6n	0,028	
$^{123}\text{I}$	13,0	159	-2p-8n	0,980	0,100	-	-4p-12n	0,620	-	-6p-12n	0,024	0p-4n	0,54	
$^{124}\text{I}$	98,0	605	-2p-7n	1,970	0,125	0,0006	-4p-11n	0,370	-	-6p-11n	0,017	0p-3n	0,98	
$^{126}\text{I}$	312,0	388	-2p-5n	1,920	0,240	0,003	-4p-9n	0,160	-	-6p-9n	0,007	0p-1n	9,12	
$^{128}\text{I}$	0,42	441	-2p-3n	1,680	0,18	-	-4p-7n	0,023	-	-6p-7n	0,0015	0p-1n	2,54	
$^{130}\text{I}$	12,5	743	-2p-1n	0,470	0,115	0,003	-4p-5n	0,0027	-	-6p-5n	-	0p-3n	0,011	
$^{131}\text{I}$	182,0	384	-2p-0n	0,290	0,062	0,005	-4p-4n	0,0017	-	-6p-4n	-	0p-4n	-	
$^{132}\text{I}$	2,3	773	-2p+1n	0,060	0,031	0,0009	-4p-3n	-	-	-6p-3n	-	-	-	
$^{134}\text{I}$	0,9	850	-2p+3n	0,009	0,004	-	-4p-1n	-	-	-6p-1n	-	-	-	
$^{135}\text{I}$	8,7	1140	-2p+4n	-	0,0005	-	-4p-0n	-	-	-6p-0n	-	-	-	
$\text{Ce}^{125}$	0,75	112	0p-8n	-	-	-	-	-	-	-	+2p-4n	0,07		
$\text{Ce}^{127}$	8,2	126	0p-8n	-	-	-	-	-	-	-	+2p-2n	1,3		
$\text{Ce}^{129}$	32,1	375	0p-4n	-	0,42	-	-	-	-	-	+2p-0n	1,7		
$\text{Ce}^{132}$	158,2	660	0p-1n	-	10,5	-	-	-	-	-	+2p+3n	0,03		
$\text{Ce}^{134}$	1750	798	0p+1n	-	2,40	-	-	-	-	-	+2p+5n	0,007		
$\text{Ce}^{135m}$	0,9	781	0p+2n	-	0,10	-	-	-	-	-	+2p+6n	-		
$\text{Ce}^{136}$	329,0	818	0p+3n	-	0,04	-	-	-	-	-	+2p+7n	-		
$\text{Ba}^{127}$	8,2	406	+1p-7n	-	-	-1p-11n	-	-	-	-	+3p+3n	0,002		
$\text{Ba}^{128}$	57,8	441	+1p-8n	-	0,007	-1p-8n	-	0,005	-	-	+3p+2n	0,05		
$\text{Ba}^{129}$	31,0	375	+1p-5n	-	-	-1p-9n	-	-	-	-	+3p+1n	0,14		
$\text{Ba}^{131}$	288,0	496	+1p-3n	-	0,80	-1p-7n	-	0,24	-	-	+3p+1n	0,77		
$\text{Ba}^{133}$	63070	356	+1p-1n	-	1,0	-1p-5n	-	0,43	-	-	+3p+3n	-		
$\text{Ba}^{133m}$	38,9	276	+1p-1n	-	2,60	-1p-5n	-	1,10	-	-	+3p+3n	0,12		
$\text{Ba}^{135m}$	287	268	+1p+1n	-	1,90	-1p-3n	-	1,54	-	-	+3p+5n	0,018		
$\text{Ba}^{139}$	1,38	166	+1p+5n	-	0,001	-1p+1n	-	0,33	-	-	-	-		
$\text{Ba}^{140}$	307,2	487	+1p+6n	-	-	-1p+2n	-	0,088	-	-	-	-		
$\text{Ce}^{132}$	4,2	185	+3p-4n	0,044	0,0007	-	-	-	-	-	+5p-0n	0,0002		
$\text{Ce}^{133}$	6,3	132	+3p-3n	0,120	-	-	-	-	-	-	+5p+1n	0,0006		
$\text{Ce}^{134}$	72	606	+3p-2n	-	0,014	-	-	-	-	-	+5p+2n	0,005		
$\text{Ce}^{135}$	17	268	+3p-1n	1,10	0,23	-	-	-	-	-	+5p+3n	0,021		
$\text{Ce}^{137}$	9,0	448	+3p+1n	0,50	0,15	-	-	-	-	-	+5p+5n	0,014		
$\text{Ce}^{137m}$	34,4	255	+3p+1n	0,290	0,209	-	-	-	-	-	+5p+5n	-		
$\text{Ce}^{139}$	3360	165	+3p+3n	0,072	0,20	-	-	-	-	-	+5p+7n	-		
$\text{Ce}^{141}$	780	145	+3p+5n	<0,0009	0,008	-	-	-	-	-	+5p+9n	<0,0001		
$\text{Ce}^{143}$	33	293	+3p+7n	-	<0,003	-	-	-	-	-	+5p+11n	-		
$\text{Sb}^{115}$	0,54	499	-4p-14n	-	0,0006	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{116m}$	1,0	100	-4p-13n	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{117}$	2,8	159	-4p-12n	-	0,012	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{118m}$	5,1	254	-4p-11n	-	0,023	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{120}$	139	89	-4p-9n	-	0,062	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{124}$	1440	603	-4p-5n	-	0,024	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{127}$	93	685	-4p-2n	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-		
$\text{Sb}^{128}$	8,6	313	-4p-1n	-	0,0003	-	-	-	-	-	-	-		

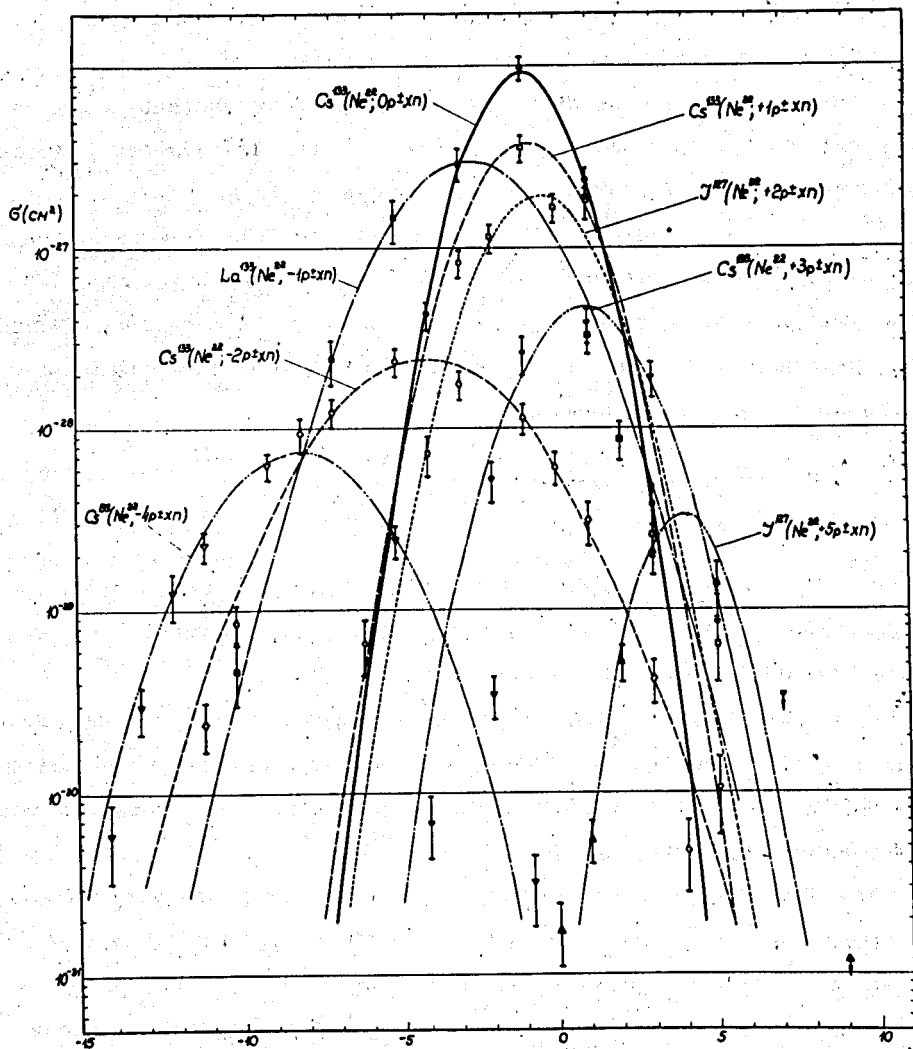


Рис.2. Изотопные распределения, полученные в реакциях многоуклонных передач (типы реакций указаны на кривых) при облучении  $^{127}\text{I}$ ,  $^{138}\text{Cs}$  и  $^{139}\text{La}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 170 Мэв. Кривые, проведенные через экспериментальные точки, представляют распределение Гаусса:

$$W(A_p - A_n) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}} \exp - \frac{(A_p - A_n)^2}{2\sigma_x^2}$$

## Экспериментальные результаты

В таблице 1 даны сечения изотопов, полученные в данной работе для различных реакций многонуклонных передач.

На рис. 2 представлены сечения образования различных продуктов реакций, соответствующих срыву с ядра мишени или захвату последним различного числа протонов и нейтронов при облучении ядер  $^{127}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$  и  $^{139}\text{La}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 170 Мэв. При увеличении числа переданных протонов как в одну, так и в другую сторону сечение уменьшается. Все представленные изотопные распределения продуктов реакций многонуклонных передач достаточно хорошо описываются гауссовским распределением:

$$W(A_p - A_n) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}} \exp \frac{(A_p - A_n)^2}{2\sigma_x^2},$$

где  $A_p$  - наиболее вероятная масса изотопа для данного типа реакций;  $A_n$  - масса изотопа, получаемая в реакции данного типа;  $\sigma_x^2$  - параметр ширины изотопного распределения.

Из рассмотрения данных, представленных на этом рисунке, видно, что максимум сечения изотопных распределений соответствует массе, расположенной вблизи наиболее стабильного ядра и дисперсия по массе невелика. Так, например, для реакции  $^{133}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, -2p \pm xn)\text{I}$ , которой соответствует наибольшая ширина изотопного распределения, максимум сечения ( $2,4 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2$ ) соответствует образованию стабильного  $^{127}\text{I}$  в то время, как выход изотопов  $^{134}\text{I}$  и  $^{120}\text{I}$  (+7 нейтронов) уменьшается по отношению к выходу  $^{127}\text{I}$  в 60 раз. Подобная ситуация имеет место и для других каналов реакции, представленных на рис. 2.

На рис. 3 представлены изотопные распределения кода, образованного в реакции  $^{133}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, -2p \pm xn)$  при разных энергиях бомбарди-

рующих ионов. На рис. 4 показана зависимость параметра ширины изотопного распределения от энергии ионов над кулоновским барьером, отнесенной к массе ионов для трех типов реакций передач.

Из рисунков видно, что с увеличением энергии налетающего иона ширина изотопного распределения увеличивается, и максимум распределения перемещается в сторону более легких изотопов. Однако при значительном изменении энергии ионов (от 115 до 170 МэВ) величина  $2\sigma_x^2$  передачи меняется от 5,3 до 11,1.

В таблице 2 даны значения параметра ширины изотопных распределений ( $\sigma_x^2$ ) и значения наиболее вероятной массы ( $A_p$ ) для данного типа реакции с фиксированной величиной передаваемых протонов.

На рис. 5 представлены изотопные распределения иода, получаемого в реакциях типа  $^{133}\text{Cs}(n1, -2p \pm \alpha)n\text{Cs}$  ионами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{40}\text{Ar}$ .

На рис. 6 дается зависимость параметра ширины изотопных распределений от массы налетающего иона для различных реакций. Все измерения проведены для одинаковой скорости частиц на кулоновском барьере

( $E_i - E_b = 3,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ ). Пунктирной линией дается та же зависимость для изотопов иода, полученная при облучении  $^{238}\text{U}$  ионами с теми же значениями массы  $A_i$  и энергии  $E_i$ , что и в реакциях много-нуклонных передач.

## В ы в о д ы

1. Выбранная методика с использованием  $\text{Ge(Li)}\gamma$  - спектрометра является весьма удобной для изучения изотопных распределений элементов средней области ядер, образующихся в реакциях много-нуклонных передач. Чувствительность метода позволяет с достаточной точностью идентифицировать продукты реакций с сечением образования  $> 10^{-31} \text{см}^2$  и периодами полураспада от 20 мин до 2-х лет.

Таблица 2  
 Экспериментальные значения параметров ширины ( $\sigma_x^2$ )  
 изотопных распределений и наиболее вероятной массы  
 ( $A_p$ ), получаемых в различных реакциях многонуклон-  
 ных передач.

Реакция	$E_i$ (МэВ)	$A_p$	$2\sigma_x^2$
$Cs^{133}(Ne^{22}, -4p \pm Xn)Sb$	170	121,0	$8,3 \pm 0,7$
$Cs^{133}(Ne^{22}, +3p \pm Xn)Ce$	170	137,0	$4,3 \pm 0,7$
$Cs^{133}(Ne^{22}, 0p \pm Xn)Cs$	170	132,0	$3,0 \pm 0,4$
	150	132,5	$2,4 \pm 0,3$
	115	133,0	$1,8 \pm 0,3$
$Cs^{133}(Ne^{22}, +1p \pm Xn)Ba$	170	133,2	$4,1 \pm 0,5$
	150	133,6	$3,4 \pm 0,5$
	115	134,0	$2,6 \pm 0,3$
$Cs^{133}(Ne^{22}, -2p \pm Xn)I$	170	127,0	$11,1 \pm 0,5$
	150	127,2	$8,3 \pm 0,6$
	115	127,4	$5,3 \pm 0,6$
$Cs^{133}(Ar^{40}, -2p \pm Xn)I$	290	125,8	$12,0 \pm 0,9$
$Cs^{133}(C^{12}, -2p \pm Xn)I$	80	128,6	$6,8 \pm 0,8$
$I^{127}(Ne^{22}, +5p \pm Xn)Ce$	170	136,0	$2,25 \pm 0,1$
$I^{127}(Ne^{22}, 0p \pm Xn)I$	170	126,0	$3,0 \pm 0,4$
$I^{127}(Ne^{22}, +2p \pm Xn)Cs$	170	128,6	$4,1 \pm 0,3$
$I^{127}(Ne^{22}, +3p \pm Xn)Ba$	170	131,0	$4,3 \pm 0,5$
$La^{139}(Ne^{22}, -1p \pm Xn)Ba$	170	136,4	$7,0 \pm 0,5$
$La^{139}(Ar^{40}, -4p \pm Xn)I$	290	123,2	$8,2 \pm 0,7$
$Pf^{141}(Ne^{22}, -6p \pm Xn)I$	170	123,2	$6,0 \pm 0,6$
$Cs^{133}(Ar^{40}, +3p \pm Xn)Ce$	290	136,0	$5,0 \pm 0,7$

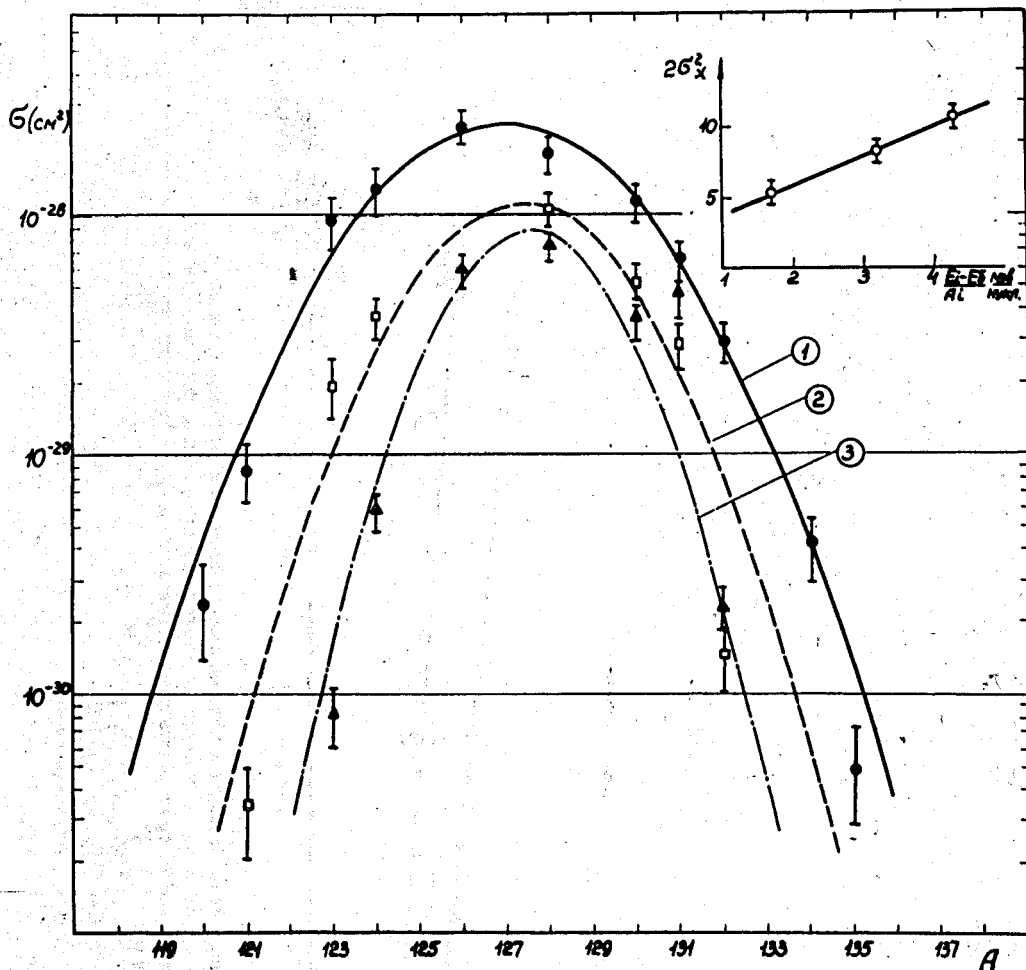


Рис.3. Изотопные распределения иода, получаемого в реакции  $^{133}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, -2p+xn)$  для различных энергий неона: 1.  $E_1 = 170$  МэВ, 2.  $E_1 = 150$  МэВ, 3.  $E_1 = 115$  МэВ. В верхнем правом углу дана зависимость параметра ширины изотопных распределений от энергии налетающего иона над кулоновским барьером, приходящейся на один нуклон.

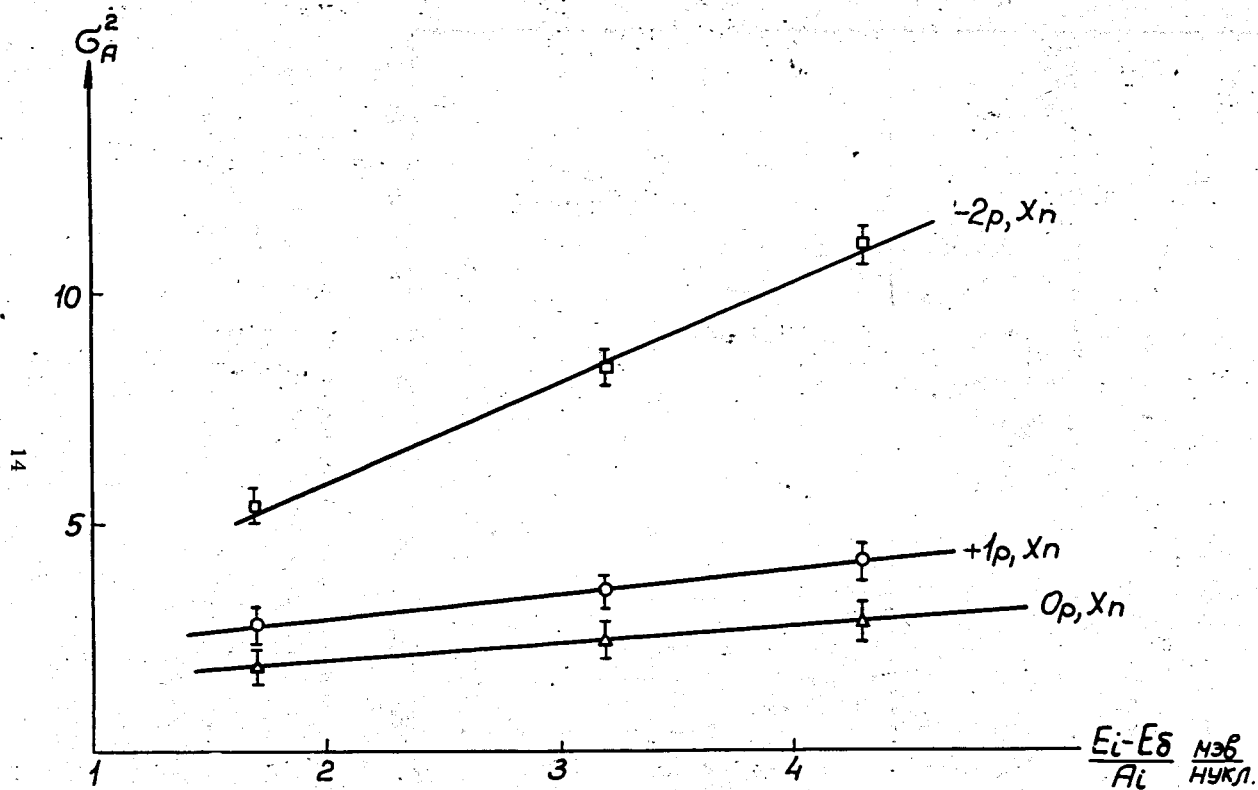


Рис.4. Зависимость ширины изотопных распределений от энергии иона над кулоновским барьером, приходящейся на один нуклон. Линии, проведенные через экспериментальные точки, соответствуют реакциям:

1.  $^{133}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, -2p, xn) \text{I}$ ,
2.  $^{133}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, +p, xn) \text{Ba}$ ,
3.  $^{133}\text{Cs}(^{22}\text{Ne}, 0p, xn) \text{Cs}$ .

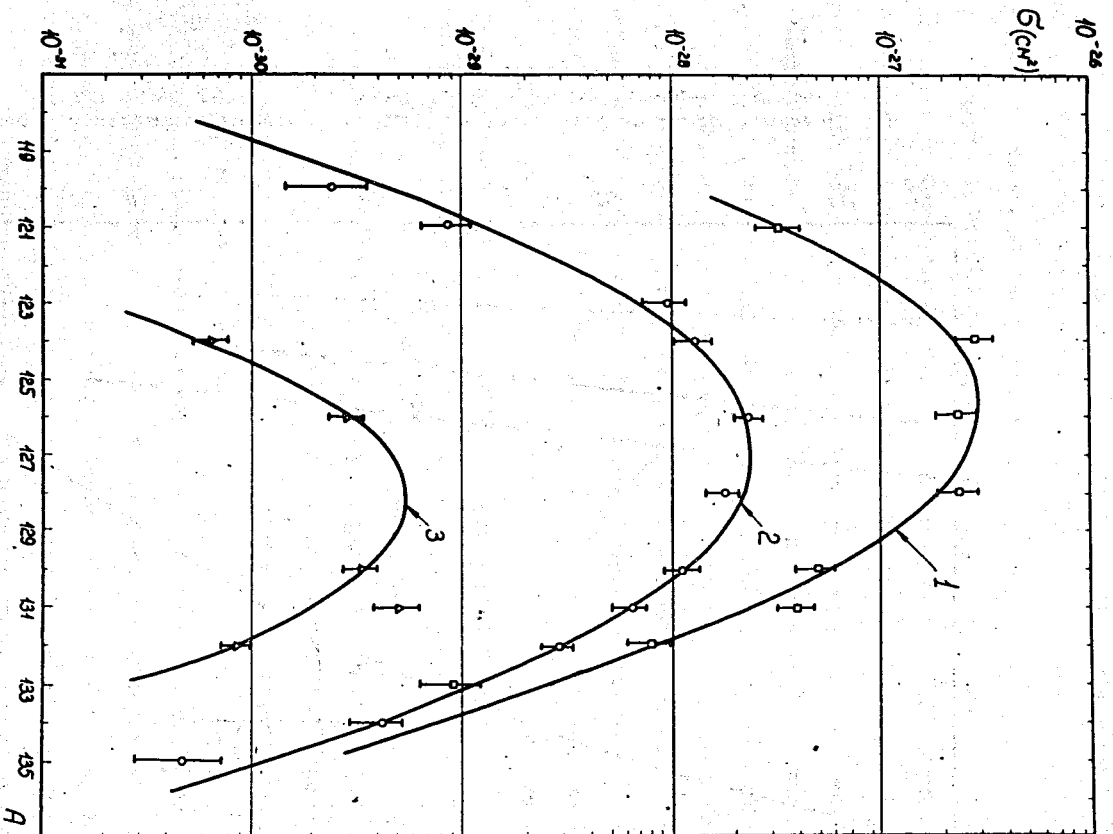


Рис.5. Изотопные распределения кода, получаемого в следующих реакциях многоуклонных передач:

1.  $^{138}\text{Os} ({}^{40}\text{Ar}, -2p \pm xn) \text{I}$ ,
2.  $^{138}\text{Os} ({}^{22}\text{Ne}, -2p \pm xn) \text{I}$ ,
3.  $^{138}\text{Os} ({}^{12}\text{C}, -2p \pm xn) \text{I}$ .



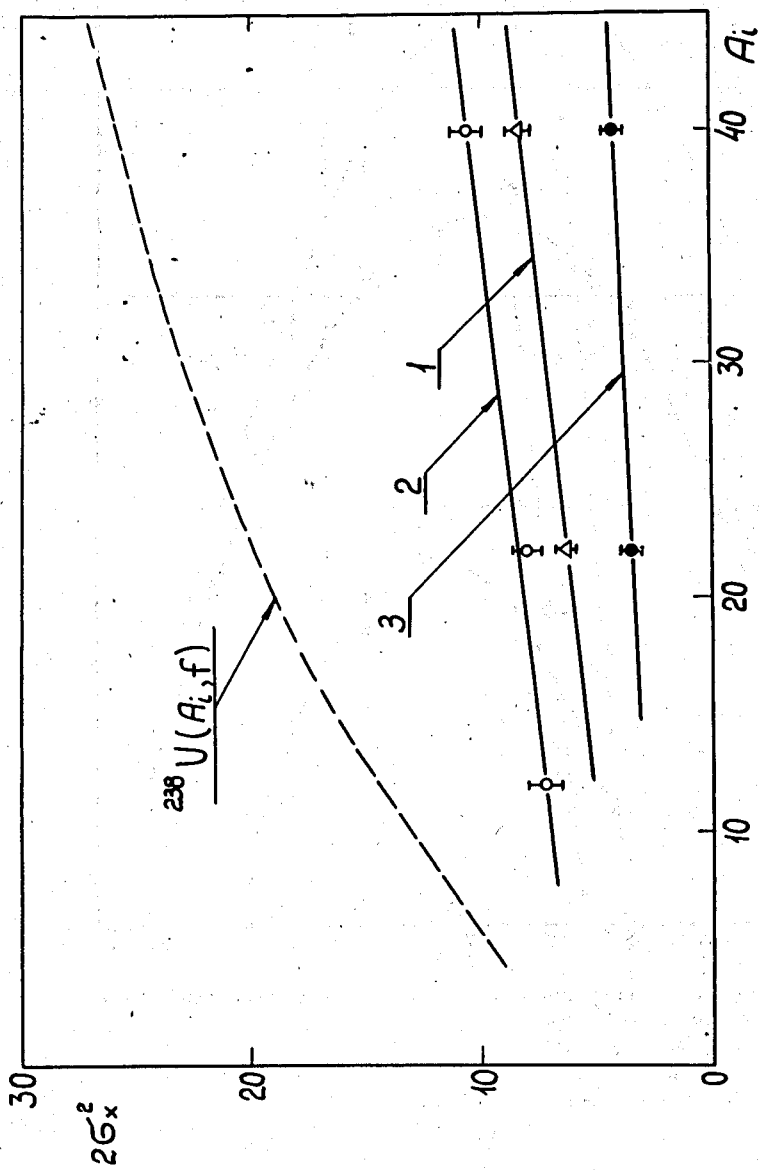


Рис.6. Зависимость ширины изотопных распределений от массы бомбардируемых ядер ( $A_i$ ). Линии 1,2,3, проведенные через экспериментальные точки, соответствуют реакциям:

1.  $^{138}\text{Cs}(\text{HI}, -4p \pm xn)\text{Sb}$ ,
2.  $^{138}\text{Cs}(\text{HI}, -2p + xn)\text{I}$ ,
3.  $^{138}\text{Cs}(\text{HI}, +3p - xn)\text{Ce}$ .

Пунктирная кривая - зависимость  $\sigma_x^2(A_i)$  для реакции  $^{238}\text{U}(\text{HI}, f)\text{I}$ .

2. Распределения сечений реакций многонуклонных передач при фиксированном числе протонов хорошо описываются гауссовским распределением, что свидетельствует, по-видимому, о том, что процесс многонуклонной передачи является статистическим.

3. Следует отметить, что число нейтронов, потерянное или переданное ядру мишени в результате прямой реакции, может быть отличным от наблюдаемого в опыте, т.к. реакция многонуклонной передачи может протекать в два этапа: на первом происходит обмен, отрыв или передача определенного числа нейтронов  $x_1, n$  с заданным числом протонов  $u, p$ . При этом образовавшиеся ядра приобретают определенную энергию возбуждения, которой может оказаться достаточно для испарения  $x_2, n$  нейтронов. Это проявляется в зависимости наиболее вероятной массы для данной реакции от энергии и массы падающих ионов (смещение в область отрицательных значений  $x, n$ ). Однако для определения энергии возбуждения, приобретаемой ядром в результате реакции подобного типа, необходимы определенные предположения о механизме многонуклонного обмена.

4. Полученные значения полных сечений реакций многонуклонных передач находятся в согласии с данными, представленными в работе /4,5,6/. Вместе с тем в этих работах наблюдалось существенное уменьшение сечения ( $\approx 100$  раз) для процессов типа  $(\pm u, p \rightarrow x, n)$ , что не подтверждается в наших опытах.

Полученные нами данные свидетельствуют об отсутствии выделенных каналов реакции, т.е. вероятность передачи нуклонов от ядра мишени к частице и наоборот, а также одновременно в обоих направлениях подчиняется, как было показано выше, некоторой общей зависимости (гауссовскому распределению, характеризуемому лишь наиболее вероятным значением  $\bar{x}$  с определенной дисперсией  $\sigma_x^2$ ).

5. Интересно рассмотреть реакции многонуклонных передач с точки зрения их использования для получения нейтроноизбыточных и нейтронодефицитных изотопов.

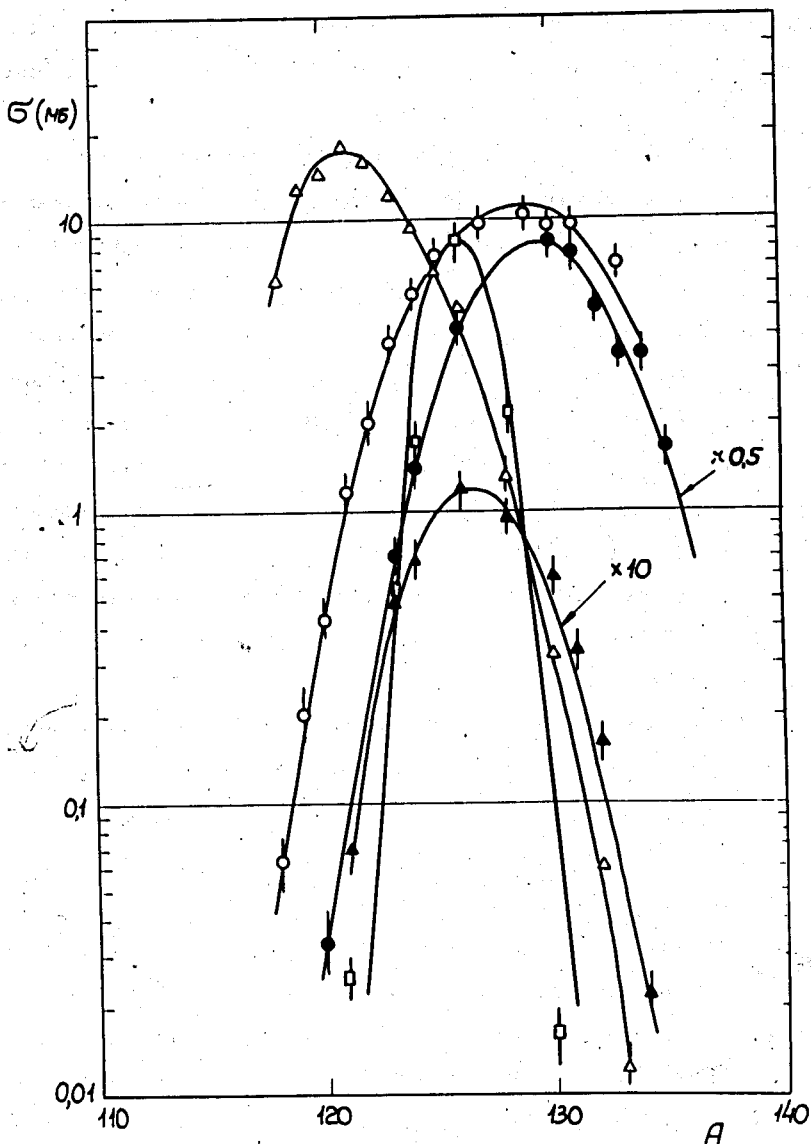


Рис.7. Сечение образования изотопов йода в качестве продуктов ядерных реакций при облучении  $^{139}\text{La}$  протонами с энергией 590 Мэв (открытые треугольники);  $^{127}\text{I}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 170 Мэв (реакция  $0p \pm xp$  открытые квадраты);  $^{133}\text{Cs}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 170 Мэв (реакция  $-2p \pm xp$  черные треугольники);  $^{238}\text{U}$  протонами с энергией 590 Мэв (открытые кружки);  $^{238}\text{U}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 170 Мэв (черные точки).

Из данных, полученных в настоящей работе, видно, что полная массовая дисперсия продуктов реакций передачи относительно массы ядра мишени оказывается достаточно большой. Однако с точки зрения получения далеких от линии стабильности изотопов интерес представляют не полные массовые дисперсии, а соотношение протонов и нейтронов в передаваемом комплексе нуклонов или, точнее, изотопное распределение продуктов. Как уже говорилось выше, максимум сечения изотопных распределений соответствует массе, расположенной вблизи наиболее стабильного ядра и дисперсия по массе невелика. На рис. 7 приводятся изотопные распределения иода, полученного в различных реакциях, из которых видно, что в этой области ядер использование реакций многонуклонных передач значительно уступает другим методам получения как нейтронодефицитных, так и нейтроноизбыточных изотопов.

Однако не исключено, что при использовании более тяжелых ионов ( $A > 100$ ) с высокой энергией ширина изотопного распределения существенно увеличится, что может дать этим реакциям определенные преимущества по сравнению с другими методами синтеза изотопов.

Мы признательны академику Г.Н. Флерову за большое внимание к работе, поддержку и ценные замечания.

Авторы благодарны З.Г. Гритченко, Г.И. Макаровой и А.В. Степанову за приготовление вещества мишени и помощь в химических выделениях продуктов реакции, В.В. Гречишному, З.Д. Покровской и С.А. Плешуковой за приготовление мишеней и помощь при измерениях и обработке результатов.

#### Л и т е р а т у р а

1. R.Kaufmann, R.Wolfgang, Phys. Rev., 121, 192 (1961).

2. D.A.Bromley. A Series of Lectures Prepared for Presentation at the Enrico Fermi Summer School on Nuclear Structure and Nuclear Reactions. Varenna-Italy, June 26-July 15, 1967. Preprint YALE-3223-84.
3. Г.Н. Флеров. Препринт ОИЯИ Р7-3617, Дубна 1967.
4. W.Grokhulski, T.Kwiecienska, Lian Go Chan, E.Lozynski, I.Maly, L.K.Tarasov, V.V.Volkov. Proc. of the III Conf. of Reaction Between Complex Nucl. 1963 p.120.
5. V.V.Volkov. Preprint E7-3155, Dubna 1967.
6. V.V.Volkov, G.F.Gridnev, G.N.Zofin, L.P.Chelnokov . Preprint E7-4071, Dubna 1968.
7. Г. Кумпф, Е.Д. Донец. ЖЭТФ, 44, 789 (1963).
8. В.В. Волков, Л. Поморски, Я. Тыс, Г.Н. Флеров. ЖЭТФ, 43, 865 (1962).
9. Э. Ложинский. Препринт ОИЯИ Р-1486, Дубна 1963.
10. Я.Б. Зельдович. ЖЭТФ, 38, 1123 (1960).
11. А.Г. Артюх, В.В. Волков, Г.Ф. Гриднев, В.Л. Михеев. Препринт ОИЯИ Е7-4563, Дубна 1969.
12. Б.А. Гвоздев, С.А. Карамян, Н.С. Мальцева, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Э. Пенионжкевич, А.М. Сухов, Б.В. Фефилов, З. Шегловски. Препринт ОИЯИ 13-3771, Дубна 1968.
13. Ю.Ц. Оганесян, Ю.Э. Пенионжкевич, А.О. Шамсутдинов, Н.С. Мальцева, И.И. Чубуркова, З. Шегловски. Препринт ОИЯИ Р7-4538, Дубна 1969.
14. T.Sikkaland, E.L.Haines, V.E.Viola. Phys. Rev., 125, 1350 (1962).
15. J.A. McIntyre, T.L.Watts and F.C.Jobes. Phys. Rev., 119, 1331 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел

31 июля 1969 года.