

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-476(19)-81

Е.О.ГРИГОРЯН^{x)}, Н.А.ДЕМЁХИНА

ЗАРЯДОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ
РАСЩЕПЛЕНИЯ СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ФОТОНАМИ

В ОБЛАСТИ $E_{\gamma_{\max}} \leq 4,5$ ГэВ

ԵՐԵՎԱՆ 1981 ԵՐԵՎԱՆ

Е.О.ГРИГОРЯН,^{ж)} Н.А.ДЕМЕХИНАЗАРЯДОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ
СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ФОТОНАМИ В ОБЛАСТИ $E_{\gamma_{\max}} \leq 4,5$ ГэВ

В работе исследовались зарядовые распределения остаточных ядер, образующихся в процессе расщепления среднетяжелых мишеней в массовой области $51 \leq A \leq 93$ фотонами тормозного спектра с $E_{\gamma_{\max}} \leq 4,5$ ГэВ. Изучение характеристик кривых зарядового распределения, сравнение с данными адрон-ядерных реакций позволили выяснить некоторые закономерности образования остаточных ядер, обусловленные влиянием их нуклонного состава и предсказать вероятность выходов трудноизмеримых продуктов. Характер и свойства изобарических и массовых распределений выходов обсуждались в сравнении с расчетами каскадно-испарительной модели.

Ереванский физический институт

Ереван 1981

N.A. DEMIOKHINA, E.O. GRIGORYAN *

CHARGE DISTRIBUTION OF PRODUCTS
FROM THE SPALLATION OF MEDIUM-WEIGHT NUCLEI
BY PHOTONS IN $E_{\gamma_{max}} \leq 4.5$ GEV REGION

Charge distributions of the residual nuclei produced in the process of the medium-weight target spallation in the mass region $51 \leq A \leq 93$ by $E_{\gamma_{max}} \leq 4.5$ GeV photons of bremsstrahlung spectrum are investigated. The study of the characteristics of the charge distribution curves, the comparison with the data of hadron-nucleus reactions allowed to clear up some regularities of the residual nuclei production conditioned by their nucleon composition, to predict the probability of the unmeasured product yields. The character and properties of isobaric and mass distribution of the yields have been discussed as compared with the cascade-evaporation model calculations.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1981

* Yerevan State University

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-476(19)-81

Е.О.ГРИГОРЯН,^{*)} Н.А.ДЕМЕХИНА

ЗАРЯДОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ
СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ФОТОНАМИ В ОБЛАСТИ $E_{\gamma_{\max}} \leq 4,5$ ГэВ

*) Ереванский Государственный университет

Ереван 1981

© Ереванский физический институт, 1981

Введение

Исследование распределений продуктов ядерного расщепления изучение их энергетической, зарядовой и массовой зависимости позволяют выяснить основные закономерности механизма этих реакций, провести сравнения с модельными предсказаниями, получить эмпирические соотношения.

Наиболее полно исследованы свойства распределений ядер-остатков в протон-ядерных реакциях [1-6]. Сведения о фотообразовании остаточных ядер относятся, в основном, к расщеплению фотонами низких и промежуточных энергий мишеней в массовой области $A_t \leq 75$ [7-10]; в области же более тяжелых ядер $A_t \geq 127$ опубликованы лишь отдельные разрозненные данные [11, 12]. Таким образом, при исследовании распределения продуктов фоторасщепления наблюдается существенный пробел, относящийся к области дезинтеграции среднетяжелых ядер фотонами высоких энергий.

В настоящей работе исследовались выходы остаточных ядер фоторасщепления мишеней V, Mn, Cu, Nb [13, 14] при $E_{\gamma_{\max}} \leq 4,5$ ГэВ, проводился анализ зарядового распределения про-

дуктов, сравнение с данными адрон-ядерных реакций, а также расчетами каскадно-испарительной модели. Результаты показали, что основные свойства зарядовых распределений остаточных ядер не зависят от сорта налетающих частиц; изобары, характеризующиеся максимальной вероятностью образования, в области тяжелых продуктов относятся к нейтронодефицитным ядрам и по мере уменьшения массового числа ядер-остатков максимум в изобарическом распределении смещается к долине стабильности. Указанная закономерность объясняется в рамках каскадно-испарительной модели; сравнение с расчетами, проведенное для продуктов расщепления Nb [15], показало, что удовлетворительное согласие достигается для оценок параметров кривых изобарического распределения (ширин и положений максимумов), массовый же выход, существенно превышает экспериментальные данные в области высоких энергий.

Зарядовые распределения продуктов расщепления

В настоящей работе исследовались экспериментальные данные реакций фоторасщепления мишеней V , Mn , Cu и Nb в области высоких энергий [13, 14].

Изучение относительной вероятности образования остаточных ядер проводилось нами на основе анализа зарядового распределения изобар т.е. распределения продуктов с данным массовым числом *) в зависимости от их нуклонного состава, характеризующегося отношением N/Z , где N - число нейтронов, Z - атомный номер остаточного ядра. Такая форма представления выходов

*) Ввиду малочисленности данных по выходам отдельных изобар, нами проводилось усреднение по массовым числам в некоторой области и обсуждалось зарядовое распределение соответствующее среднему A .

Остаточных ядер известна в литературе как зарядовое или изобарическое распределение, а соответствующие кривые, как CD-кривые (Charge Distribution [1-5]). Построение кривых указанного типа проводится последовательно: сначала строятся кривые первого приближения с использованием, в основном, независимых выходов остаточных ядер, по которым оцениваются вероятности образования трудноизмеримых продуктов, а также радиоактивных предшественников в кумулятивных выходах; дополненные таким образом, данные используются для построения более точного распределения. Аналитически эти кривые хорошо аппроксимируются функцией Гаусса. Положения максимумов и ширины такого типа кривых анализировались в ряде работ [1-5, 6-8] с целью выяснения механизма реакций, влияния ядерных свойств мишеней и ядер-остатков на вероятность образования последних. Подробно этот вопрос рассматривался в протон-ядерных реакциях [1-5]. Данные по фоторасщеплению касаются, в основном, области низких и промежуточных энергий и мишеней с $A_1 \leq 75$, [7-10], а при высоких энергиях - тяжелых мишеней, $A_1 \geq 127$ [11-12].

В настоящей работе форма и параметры CD-кривых рассчитывались на ЭВМ с использованием функции Гаусса для аппроксимации. Параметры, характеризующие зарядовые распределения:

- 1) положения максимумов CD-кривых, N/Z_p ,
- 2) ширины кривых на полувысоте, $\Delta(N/Z)$,
- 3) заряды элементов с наибольшим выходом при данном массовом числе \bar{A} , Z_p ,
- 4) ширины кривых в зарядовых единицах (ΔZ_p),
- 5) положения максимумов CD-кривых относительно границы β -стабильности, $Z_p - Z_A$, где Z_A - соответствует заряду

ду наиболее стабильного элемента с данным массовым числом \bar{A} [16]

Из табл. I видно, что максимумы зарядовых распределений смещены в сторону нейтронодефицитных ядер. При этом величина смещения убывает по мере уменьшения массового числа ядра-остатка, что соответствует увеличению вероятности образования изобар в районе долины стабильности. Этот факт заметно проявляется в зарядовых распределениях продуктов расщепления Nb и Cu . Анализ формы CD -кривых показывает, что с уменьшением массовых чисел продуктов фоторасщепления зарядовые распределения слегка расширяются *). Для сравнения в табл. I приводятся данные адрон-ядерных реакций в той же массовой области остаточных ядер, обработанные нами указанным выше способом. В этих данных наблюдаются закономерности, отмеченные выше для продуктов фоторасщепления.

Уширение CD -кривых отмечалось также ранее в работах [1-4, 14] при изучении реакций расщепления V , Ag и Ta ; в области же более легких мишеней продукты расщепления распределяются с приблизительно постоянной шириной, согласно [7]. Таким образом, можно утверждать, что выходы остаточных ядер в значительной степени определяются свойствами самих продуктов, и относительные характеристики реакции расщепления слабо зависят от природы взаимодействующих частиц.

*) Необходимо отметить, что сильное уширение кривой для продуктов фоторасщепления ^{93}Nb с $\bar{A} = 69$ частично можно объяснить неточностью в построении, обусловленной малочисленностью экспериментальных точек в этой области, неравномерностью их распределения относительно пика кривой, а также вкладом кумулятивных выходов

Из данных табл. I видно также, что положения CD-кривых зависят от свойств не только продуктов, но и исходных ядер. В частности, остаточные ядра в массовой области $\bar{A} = 47 - 44$, образованные в мишенях Cu , Mn , Y по-разному распределяются на оси N/Z . Влияние мишени на вероятность выхода продуктов обсуждалось ранее в работах [3,7,11,21], однако выводы авторов противоречивы. Наряду с утверждением о независимости сечений образования изобар от типа мишени [7,19] опубликованы работы, в которых авторы утверждают обратное [5,20, 21].

В табл. 2 приведены данные работы [5], авторы которой считают инвариантность изобарического отношения для мишеней с близким нуклонным составом доказательством роли мишени в реакциях расщепления. С этими данными [5] хорошо согласуется отношение $\sigma_{As}^{72} / \sigma_{Se}^{72}$ (табл.2), полученное нами при фоторасщеплении Nb [14].

2. Сравнение с каскадно-испарительной моделью

При исследовании реакций глубокого расщепления количественные сравнения с теорией проводятся обычно в рамках каскадно-испарительной модели [15], согласно которой первой ступенью реакции является каскад, сопровождающийся выбиванием из ядра нескольких "быстрых" частиц, второй случай - испарение частиц из возбужденного ядра.

Различие в природе падающих частиц учитывается в акте первичного взаимодействия, дальнейшее же развитие процесса и основные характеристики образования продуктов реакции, в основном, подобны. Свойства распределений ядер-остатков в этой модели

определяются рядом факторов: количеством и составом каскадных нуклонов, энергий возбуждения послекаскадных ядер, количеством и составом испарительных частиц и т.д.

Учитывая указанную выше слабую зависимость распределения продуктов реакции от типа падающих частиц, для количественного сравнения теоретических и экспериментальных данных нами использовались расчеты Монте-Карло для реакций $Nb + P$ при энергиях 462; 944; 1844 МэВ [15], а также для реакции $M\alpha + p$ при энергии 1800 МэВ [5]. Эти расчеты дают зависимость от массового числа продукта для параметров, характеризующих изобарическое распределения (в предположении Гауссовой формы CD-кривых), а также для полного изобарического выхода ядер-остатков. Результаты расчетов указывают на отсутствие определенной энергетической зависимости в положении и форме зарядового распределения, что облегчает задачу сравнения с выходами фотолдерных реакций; с другой стороны, модель предсказывает сильный рост сечений образования некоторых изобар в рассмотренном интервале энергий, который может сказаться на выходах реакций фоторасщепления, протекающих при участии всех энергий тормозного спектра. Экспериментальные точки, нанесенные на рис.6, представляют результаты измерений работы [14], отнесенные к среднему массовому числу ядра-остатка (табл.1), а также данные работы [15] для реакции $Nb + p$, $E_p = 720$ МэВ. Из сравнения расчетов с экспериментом видно, что зарядовые положения максимумов кривых зарядового распределения хорошо описываются каскадно-испарительной моделью (рис.4); несколько хуже согласие для ширин (рис.5). В расчетах не наблюдается уширения кривых в области легких ядер-остатков, которое отмечалось выше в экспериментальных дан-

ных. Кривая зарядового распределения, приведенная на рис.1с, рассчитана в работе [5] для реакции $^{96}\text{Mo} + p^*$. Сравнение с нашей экспериментальной кривой показывает, что положение и форма зарядового распределения хорошо согласуются, различие в ширинах частично можно объяснить неточностью построения экспериментальной кривой для $\bar{A} = 69$, о чем уже указывалось выше.

Кривые массовых выходов продуктов расщепления представлены на рис.6. Точками отмечены изобарические выходы, которые были получены в работе [14] с использованием экспериментальных данных и оценок неизмеримых выходов по кривым зарядового распределения. Зачернены данные, в которых вклад измерений составляет менее 50% полного изобарического выхода. На рис.6 приведены также экспериментальные результаты работы [15], обработанные таким же способом. Массовые выходы указаны в относительных единицах; $\sigma(A)/\sigma_{in}$. В качестве σ_{in} в реакциях $Nb + \gamma$ нами использовался полный выход от фоторасщепления ^{93}Nb , $\sigma_{in} \cong 130,2$ мбн., рассчитанный с учетом фотовыхода на нуклон по результатам работы [22]. В реакции $Nb + P$ было взято полное сечение неупругого взаимодействия $\sigma_{in} = 1230$ мбн.

Расчеты показывают, что относительная вероятность образования изобар с массовыми числами, близкими к исходному ядру, велика в области низких энергий, с ростом энергии увеличиваются сечения выходов продуктов глубокого расщепления и наклон массовой кривой постепенно уменьшается. В массовой области, близкой к мишени выходы меняются сравнительно слабо и образуют "площадку".

*) Использовались расчеты [5] на мишени ^{96}Mo из-за сходства в нуклонном составе с ниобием.

размеры которой постепенно увеличиваются с ростом энергии падающих частиц.

Выходы реакций фоторасщепления подтверждают наличие такого участка на массовой кривой. Характер спада экспериментальных точек в районе средних масс остаточных ядер, как и положение "площадки" в области тяжелых продуктов согласуются с предположением о том, что эти реакции протекают, в основном, при энергиях намного ниже максимальной энергии тормозного спектра. К такому же выводу можно прийти, учитывая хорошее согласие с данными протонного расщепления № [15]. Авторы указывали на превышение экспериментальных данных над расчетами в области тяжелых продуктов и относительно лучшее согласие для легких ядер-остатков, поэтому некоторое отклонение от расчетной кривой в районе легких продуктов можно объяснить вкладом более высоких энергий, а также возможным участием других процессов.

Исследования выходов продуктов фоторасщепления на йоде [11] показали, что сечения образования различных продуктов глубокого расщепления достигают максимальных значений, в основном, в области $E_{\gamma} \leq 1000$ МэВ, об этом свидетельствуют и наши измерения выходов фотоядерных реакций в области высоких энергий [13, 14].

Таким образом, предсказываемый каскадно-испарительной моделью рост сечений с увеличением энергии не подтверждается данными по фоторасщеплению ядер. Возможно, модификация модели [23, 24], учитывающая предравновесное состояние и явление уменьшения нуклонной плотности в ядре по мере развития каскада, приведет к уменьшению среднего числа вылетающих частиц, энергии возбуждения последующих ядер и сможет изменить ход функций возбуждения в реакциях глубокого расщепления.

Таблица I

Тип реакции	ΔA	\bar{A}	N/Z_p	Z_p	$\Delta(N/Z)$	ΔZ	Z_A	$Z_A - Z_p$	Примечание
$Nb + \gamma$	90-83	87	1,21	39,4	0,07	1,2	38,2	-1,1	[14]
	82-75	79	1,19	36,1	0,07	1,1	35,0	-1,1	
	74-65	69	1,18	31,6	0,12	1,7	30,9	-0,6	
$Nb + p$	90-86	88	1,21	39,8	0,06	1,1	38,6	-1,2	[15]
	67-57	65	1,17	29,9	0,13	1,7	29,2	-0,7	
$Nb + \alpha$	90-86	88	1,21	39,9	0,05	0,8	38,6	-1,3	[15]
	67-57	65	1,17	29,9	0,10	1,4	29,2	-0,7	
$Cu + \gamma$	60-54	57	1,15	26,5	0,09	1,1	25,9	-0,6	[13]
	52-42	47	1,12	22,1	0,12	1,3	21,6	-0,5	
$Cu + p$	60-54	57	1,15	26,5	0,07	0,8	25,9	-0,6	[17]
	53-42	48	1,14	22,4	0,12	1,2	22,0	-0,4	
$Cu + \alpha$	61-54	58	1,14	27,1	0,08	1,0	26,3	-0,8	[18]
	52-42	47	1,12	22,2	0,12	1,3	21,6	-0,5	
$Mn + \gamma$	52-41	47	1,15	21,9	0,10	1,1	21,6	-0,3	[13]
$V + \gamma$	49-39	44	1,17	20,3	0,10	0,9	20,3	-0,0	[1]
$V + p$	48-39	44	1,17	20,3	0,12	1,1	20,3	-0,0	

* Ошибки на величины N/Z_p , $\Delta(N/Z)$ и ΔZ составляют $\sim 2 + 10\%$

Таблица 2

ТИП МИШЕНИ	(N/Z) МИШ	$\sigma_{72As} / \sigma_{72Se}$
^{96}Zr	1,60	$12,8 \pm 3,1$
^{96}Mo	1,286	$2,70 \pm 0,5$
^{96}Ru	1,182	$1,17 \pm 0,26$
^{93}Nb	1,268	$2,60 \pm 0,36$

+ Данные работ [5]

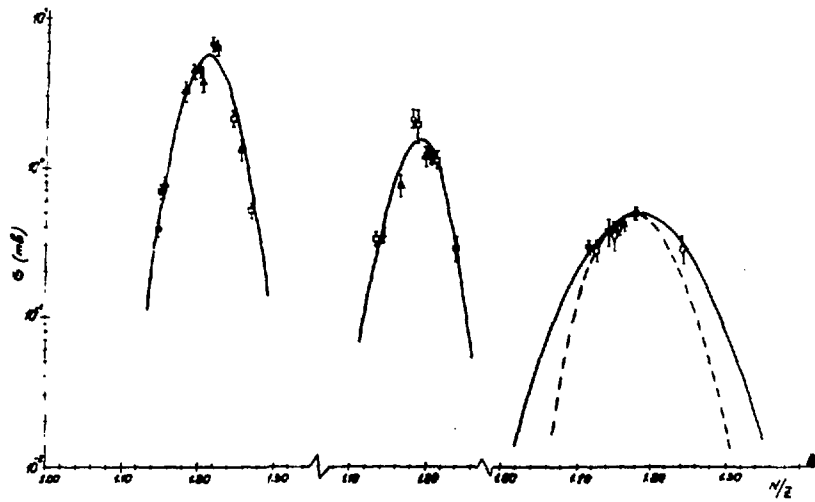


Рис.1

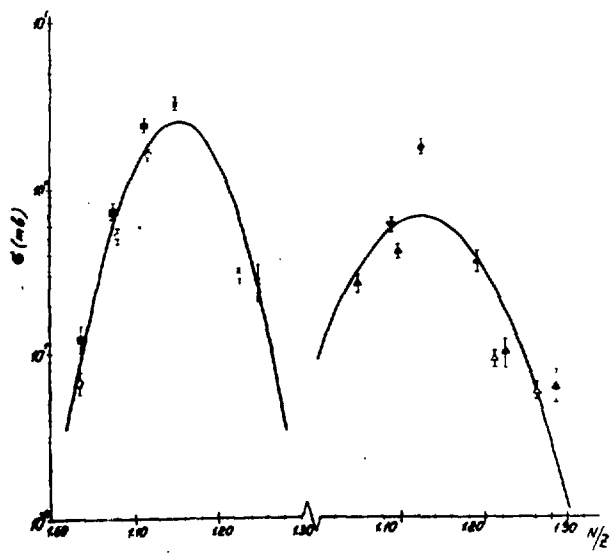


Рис.2

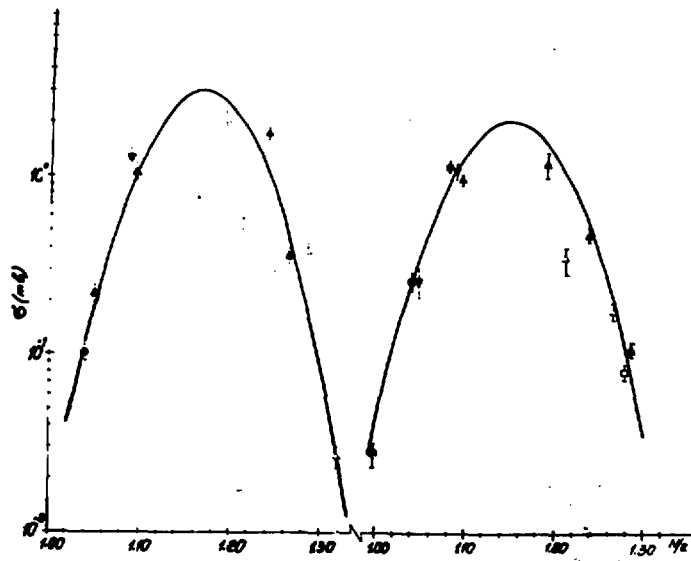


Рис.3

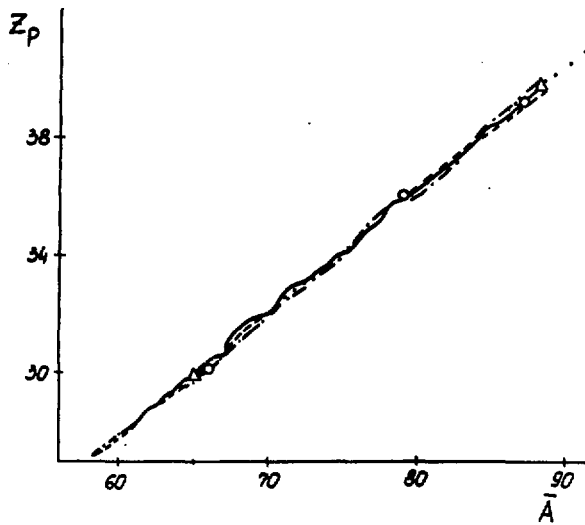


Рис.4

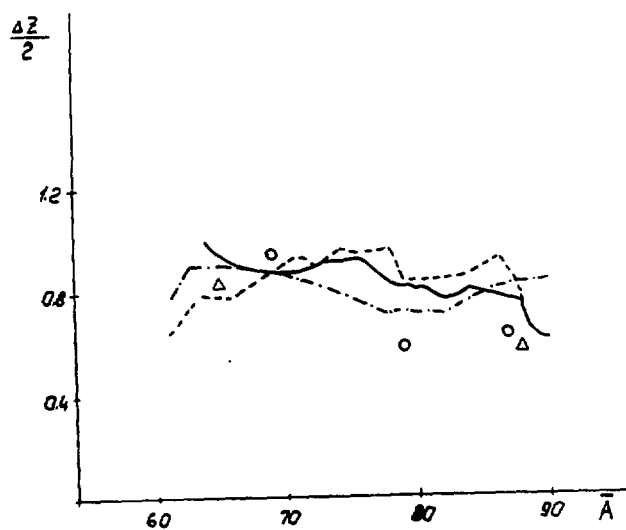


Рис.5

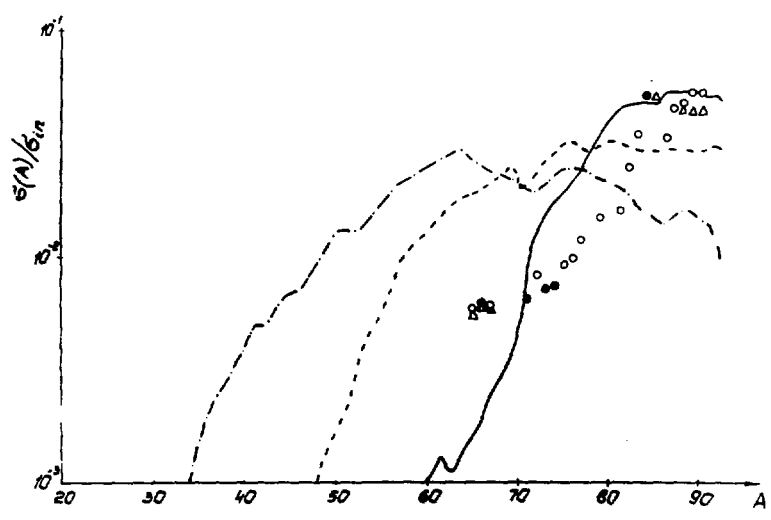


Рис.6

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1 Кривые зарядового распределения продуктов реакции

$Nb + \gamma$ [14] для массовых интервалов:

а) 90 - 84, б) 83 - 75, в) 74-65

Точки: ● - Nb, ▲ - Y, ■ - Zr, ○ - Sr, □ - Rb

△ - Вг, ▼ - Se, ◆ - As, ◇ Gα; x-z, ▽ - Co

Пунктирная кривая - расчет каскадно-испарительной модели для реакции $Mo + p$, $E_p = 1,844$ ГэВ [15], данные приведены в относительных единицах.

Рис.2 Кривые зарядового распределения продуктов реакции

$Cu + \gamma$ [13] для массовых интервалов:

а) 59 - 52, б) 51- 42

Точки: ● - Gz, ▲ - Sc, ○ - Mn, ▼ - V, △ - K

■ - Co, x - Fe, ▽ Cl.

Рис.3 Кривые зарядового распределения продуктов реакции:

а) $Mn + \gamma$, б) $V + \gamma$ [13] для массовых интервалов

а) 52 - 41, б) 49 - 39.

Точки: ● - Gz, ▲ - Sc, ○ - Mn, ▼ - V,

□ - Ar, △ - K.

Рис.4 Зависимость наиболее вероятного заряда зарядового рас-

пределения от массового числа продукта. Расчеты каскад-

но-испарительной модели [15] для реакции $Nb + p$; энер-

гии протонов: 464 МэВ (—); 944 МэВ (---),

1,844 МэВ (-.-.-)

Точки: ○ - данные работы [14]
 △ - данные работы [15]

Рис.5 Зависимость ширины на полувысоте зарядового распределения от массового числа продукта. Расчеты каскадно-испарительной модели [15] для реакции $Nb + p$; обозначения те же, что на рис.4.

Рис.6 Кривые массового выхода. Расчеты каскадно-испарительной модели для реакции $Nb + p$; обозначения те же, что на рис.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.Husain, S.Katcoff Phys.Rev.C., 7, 2452, 1973
2. S.Katcoff, H.R.Fickel and A.Wyittenbach Phys.Rev.166,II47,
1968.
3. Q.English N.T.Porile Phys.Rev.C,10 2268, 1974
4. Y.T.Chu, E.M.Franz, G.Friedlander Phys.Rev.C,10,156,1974.
5. N.T.Porile, L.B.Church Phys.Rev.133,B, 310, 1964.
6. R.G.Korteling, A.A.Caretto Phys.Rev.C,1,193,1970;Phys.Rev.C
1,1960, 1970
7. I.Halpern, R.J.Debs et al Phys.Rev. 97, 1327, 1955
8. V.di Napoli, F.Salvetti et al. J.Ynorg. Nucl.Chem.40,175,1978
9. B.Bulow, B.Johnsson et al. ZPhys. A278,89, 1976.
10. G.J.Kumbartski, V.Kim, Ch.K.Kwan Nucl.Phys. A160,237,1971
11. G.Andersson, T.Blomqwist et al. Nucl.Phys.A197, 44, 1372
12. А.В.Митрофанова, В.И.Ного, А.И.Попов. Ядерная физика,25,926
1977.
13. A.S.Danagulyan, N.A.Demekhina and G.A.Vartapetyan Nucl.
Phys.A 285, 482, 1977.
14. Г.А.Вартапетян, Е.О.Григорян и др. Ядерная физика, вып.6,
1981 (в печати)
15. R.G.Korteling, E.K.Hyde Phys.Rev. 136 B, 425, 1964.
16. C.B.Coryell Ann.Rev.Nucl.Sci. 2, 305, 1953.
17. J.B.Cumming, P.E.Haustein and R.W.Stoenner Phys.Rev.C,10,
739, 1974.
18. Paul J.Karol Phys.Rev.C,10,150,1974
19. Y.Hudis, J.M.Miller Ann.Rev.Nucl.Sci.9,159,1959.
20. Sh.Kaufman Phys.Rev.129, 1866,1963.
21. В.И.Барашенков, А.И.Мурин. Изв. АН СССР, 25, 882, 1961.
22. C.E.Roos, V.Z.Peterson Phys.Rev.124,1610.1961.

23. А.С.Ильинов, Е.А.Черепанов, С.Е.Чигринов. ОИЯИ-П-0124, 1979.
24. В.С.Барашенков, В.Д.Тонеев. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М.Атомиздат, 1972.
25. В.С.Барашенков, А.С.Ильинов и др. УФН, 109, 91, 1973.

Рукопись поступила 16-го марта 1981 г.



индекс 3624