

РАСЩЕПЛЕНИЕ V^{51} ФОТОНАМИ С МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ОТ 2 ДО 5 ГЭВ

Г. А. ВАРТАПЕТЯН, Е. О. ГРИГОРЯН, А. С. ДАНАГУЛЯН,
Н. А. ДЕМЕХИНА, А. Г. ХУДАВЕРДЯН, Д. С. ЧАТРЧЯН

В настоящей работе исследовалось фоторасщепление V^{51} в области энергий от 2 до 5 Гэв. Выходы четырнадцати остаточных ядер регистрировались германиево-литиевым детектором. Экспериментальные данные анализировались с помощью полуэмпирической формулы Рудстама.

В в е д е н и е

В последние годы изучение реакций глубокого расщепления под действием электронов и фотонов высоких энергий привлекает внимание физиков [1—7]. В таких процессах проявляются как общие закономерности ядерных реакций, так и конкретные свойства, связанные со спецификой взаимодействия фотона и электрона с ядром. Фоторасщепление V^{51} проводилось ранее в работе [2] до максимальной энергии 1,5 Гэв. В настоящей работе получены новые данные по взаимодействию фотонов с ядрами в области энергий выше 2 Гэв, которые дают возможность исследовать массовое и зарядовое распределения остаточных ядер в указанной области энергий.

Методика эксперимента

Облучение производилось на Ереванском электронном ускорителе. Коллимированный пучок фотонов, проходя через очищающий магнит, падал в камеру, где находились облучаемые мишени. Размеры пучка на мишени составляли 18×18 мм², интенсивность по квантометру $\sim 10^9$ экв. кв./сек. Перед каждой серией облучений проводилось измерение тормозного спектра парным спектрометром, форма спектра хорошо описывалась формулой Бете-Гайтлера с поправкой на толщину мишени и коллимацию пучка. Мишени представляли порошок VO_2 , прессованный в виде таблеток диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Регистрация продуктов реакций производилась по γ -излучению остаточных ядер с помощью германиево-литиевого полупроводникового детектора. Чувствительный объем используемого детектора составлял 26 см³, энергетическое разрешение по препарату Cs^{137} ($E_\gamma = 661$ Кэв) составляло 0,6%. Детектор был соединен с малошумящим предусилителем и усилителем типа «Лангур». Набор спектров производился на 4000-канальном анализаторе системы «DIDAC». Характерный спектр показан на рис. 1. Предварительная обработка спектров, включая энергетическую калибровку и определение площадей под фотопиками, проводилась на ЭВМ MULTI-8.

Фотоэффективность детектора, т. е. вероятность регистрации γ -излучения в лике полного поглощения, определялась с помощью мониторинговых

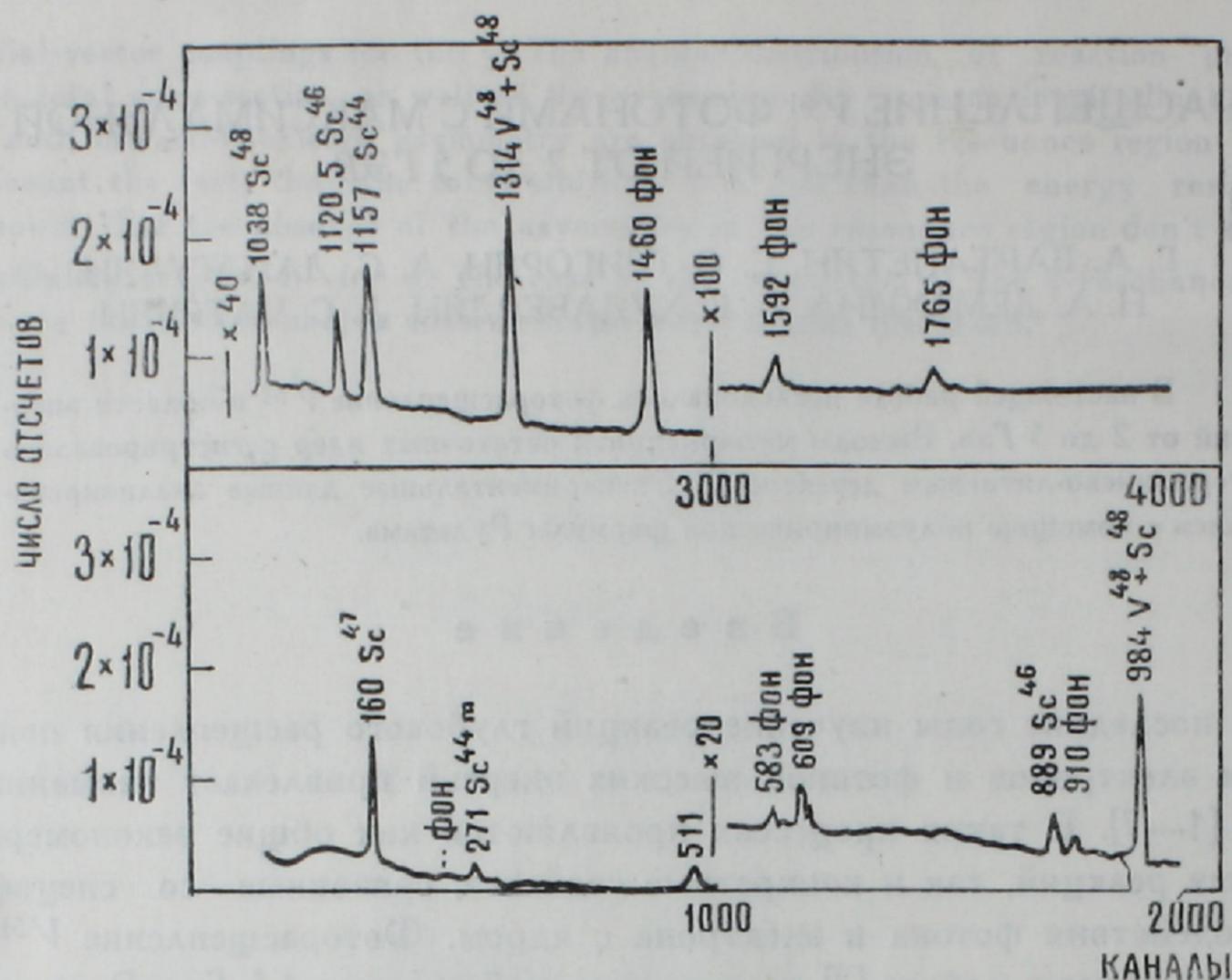


Рис. 1. γ -спектр облученного V^{51} через 4,65 дн. после конца облучения. Время измерения — 6 час.

реакций, выходы которых были измерены ранее [7]. В качестве таких реакций использовались $Mn^{55} \rightarrow Mn^{54}$, $Mn^{55} \rightarrow Mn^{52}$, $Al^{27} \rightarrow Na^{24}$, $C^{12} \rightarrow C^{11}$. При расчете выходов на ЭВМ Наири-2 учитывалось наличие родительских изотопов [8] и вклад фоновых пиков.

Результаты измерений

В табл. 1 указаны типы исследуемых реакций и остаточные ядра, в табл. 2 и частично на рис. 2 приведены полученные значения выходов. Все экспериментальные точки усреднены по нескольким измерениям, приведенные ошибки носят статистический характер. Суммарные ошибки с учетом некоторой неточности в определении постоянной квантометра, периодов полураспада, фотоэффективности и телесного угла не превышали 15%. Из сравнения экспериментальных данных при граничных энергиях тормозного спектра 1,5 Гэв [2], 2; 3; 4,5 и 5 Гэв видно, что в пределах точности измерений рост выходов не наблюдается. Это свидетельствует о том, что сечения исследуемых реакций в указанной энергетической области очень малы и для их определения необходимо провести тщательные измерения. В ряде случаев нами были получены оценки сечений в $1/E$ -приближении для тормозного спектра; некоторые из них приведены на рис. 2, где заштрихованные области представляют разброс расчетных значений, обусловленный статистической точностью [9]. Результаты, приведенные в работе [2] при $E_{\gamma\max} = 1,5$ Гэв, хорошо согласуются с данными настоящей работы (см. табл. 2).

Таблица 1

Тип реакции	Остаточные ядра	Порог реакций (Мэв)	E_{γ} перехода (Кэв)	Период полураспада	Интенсивность перехода (%)
$(\gamma, \pi^- 2n)$	Cr^{49}	—	153 91	41,9 мин	29,5 53,9
$(\gamma, 3n)$	V^{48}	24,8	1314 984	16,1 дн.	97 100
$(\gamma, 2pn)$	Sc^{48}	23,3	1038 984	1,83 дн.	98 100
$(\gamma, 2p 2n)$	Sc^{47}	40,9	160	3,4 дн.	73
$(\gamma, 2p 3n)$	Sc^{46}	49,3	1120 889	83,9 дн.	100 100
$(\gamma, 2p 5n)$	Sc^{44}	65,8	1157	3,9 час	100
$(\gamma, 2p 5n)$	Sc^{44m}	65,8	271 1157	2,44 дн.	86 100
$(\gamma, 2p 6n)$	Sc^{43}	74	373	3,89 час	22
$(\gamma, 4p 3n)$	K^{44}	64,3	1157	22,0 мин	61
$\gamma, 4p 4n)$	K^{43}	72,6	619 373	22,4 час	65 87,2
$(\gamma, 4p 5n)$	K^{42}	90,2	1524	12,4 час	18
$(\gamma, 6p 6n)$	Cl^{39}	113,6	250 1268	55,5 мин	44 50
$\gamma, 6p 7n)$	Cl^{38}	121,9	1643	37,3 мин	35
$(\gamma, 12p 15n)$	Na^{24}	242,8	1369	15,0 час	100

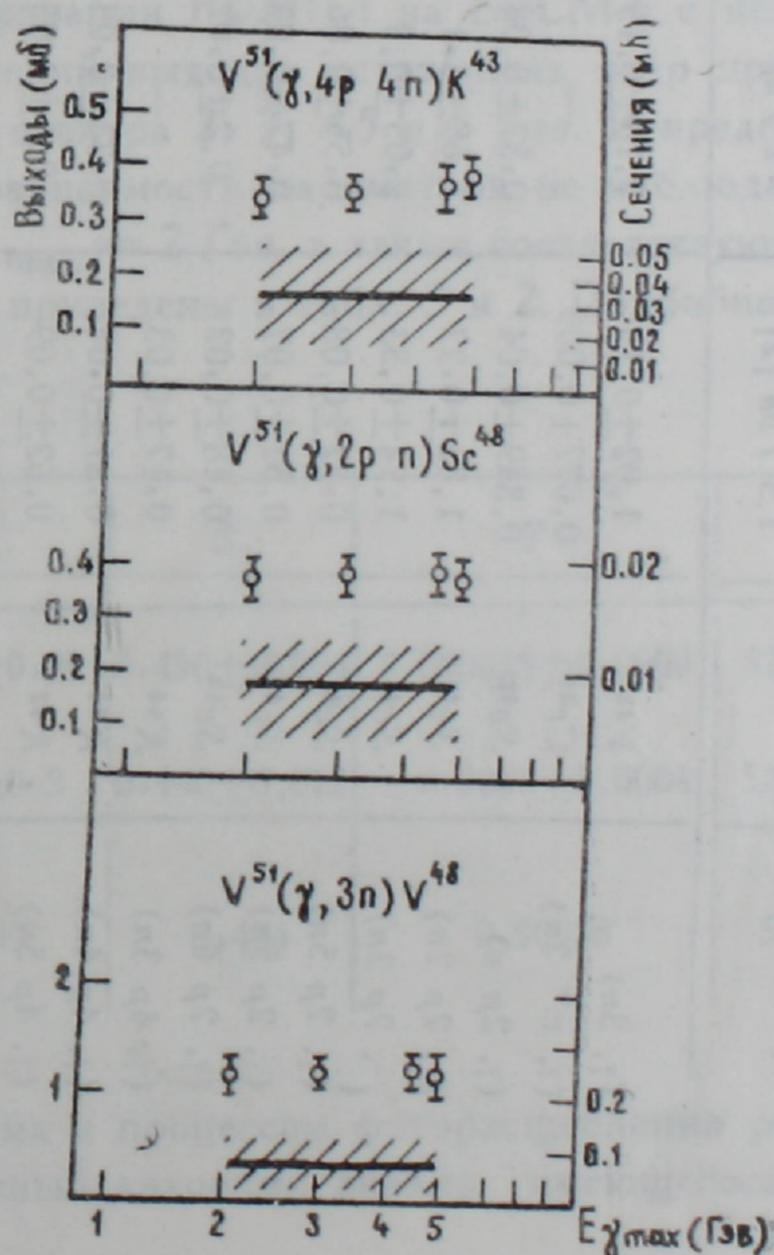


Рис. 2. Выходы и сечения образования V^{48} , Sc^{48} и K^{43} из V^{51} .

Таблица 2

Тип реакции	Остаточные ядра	Выходы реакций (мбн)					Расчеты по формуле (1)
		1,5 Гэв [2]	2 Гэв	3 Гэв	4,5 Гэв	5 Гэв	2 Гэв
(γ , 3n)	V^{48}	$1,02 \pm 0,15$	$1,15 \pm 0,13$	$1,19 \pm 0,13$	$1,25 \pm 0,15$	$1,2 \pm 0,2$	1,13
(γ , π^- 2n)	Cr^{49}	$0,077 \pm 0,009$	—	$0,081 \pm 0,008$	—	$0,1 \pm 0,01$	—
(γ , 2p n)	Sc^{48}	$0,349 \pm 0,04$	$0,37 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,04$	0,464
(γ , 2p 2n)	Sc^{47}	$1,82 \pm 0,27$	$1,68 \pm 0,1$	$1,65 \pm 0,08$	$1,74 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,2$	1,44
(γ , 2p 3n)	Sc^{46}	$1,94 \pm 0,33$	$2,05 \pm 0,3$	$2,14 \pm 0,3$	$2,03 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,3$	2,95
(γ , 2p 5n)	Sc^{44}	$0,52 \pm 0,08$	$0,55 \pm 0,06$	$0,45 \pm 0,06$	$0,57 \pm 0,07$	$0,56 \pm 0,07$	} 1,03
(γ , 2p 5n)	Sc^{41m}	$0,52 \pm 0,07$	$0,47 \pm 0,03$	$0,47 \pm 0,03$	$0,44 \pm 0,04$	$0,46 \pm 0,04$	
(γ , 2p 6n)	Sc^{43}	$0,18 \pm 0,02$	$0,2 \pm 0,025$	$0,191 \pm 0,025$	$0,217 \pm 0,02$	$0,185 \pm 0,02$	0,25
(γ , 4p 3n)	K^{44}	$0,17 \pm 0,03$	—	—	$< 0,027$	—	0,093
(γ , 4p 4n)	K^{43}	$0,31 \pm 0,04$	$0,34 \pm 0,03$	$0,351 \pm 0,03$	$0,36 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,04$	0,335
(γ , 4p 5n)	K^{42}	$0,62 \pm 0,09$	$0,6 \pm 0,06$	$0,54 \pm 0,06$	$0,55 \pm 0,06$	$0,53 \pm 0,08$	0,88
(γ , 6p 6n)	Cl^{39}	$0,071 \pm 0,012$	$0,06 \pm 0,009$	$0,068 \pm 0,009$	$0,061 \pm 0,009$	$0,074 \pm 0,01$	0,077
(γ , 6p 7n)	Gl^{38}	$0,147 \pm 0,02$	—	$0,14 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,02$	0,24
(γ , 12p 15n)	Na^{24}	$0,051 \pm 0,008$	$0,085 \pm 0,02$	$0,094 \pm 0,02$	$0,098 \pm 0,02$	$0,082 \pm 0,015$	0,04

Обсуждение

Сечения реакций, сопровождающихся вылетом большого числа частиц, обычно рассчитываются по каскадно-испарительной модели методом Монте-Карло [10—12]. Результаты расчетов, проведенные, в основном, для протон- и пион-ядерных взаимодействий, показали, что некоторые характеристики таких реакций могут быть получены на основе этой модели, однако теоретически рассчитанные сечения образования конкретных изотопов часто сильно отличаются от измеренных [11, 13]. Поэтому внимание экспериментаторов привлекла возможность использования полуэмпирической формулы Рудстама, как более простого и доступного способа анализа полученных сечений, дающего вполне удовлетворительное согласие с экспериментом [14, 15]. В ряде работ эта формула применялась также для оценок выходов и сечений реакций фоторасщепления [1, 2, 5, 16]. Известно несколько модификаций этой формулы; авторы [11, 14, 16] считают, что лучшее согласие с экспериментом дает следующий вид:

$$\sigma(Z, A) = \frac{\hat{\sigma} P R^{2/3}}{1,79 (e^{PA_t} - 1)} \exp[FA - R|Z - SA + TA^2|^{3/2}], \quad (1)$$

где $\sigma(Z, A)$ — выход продукта реакции с массовым числом A и зарядом Z ; P, R, S, T и $\hat{\sigma}$ — подгоночные параметры, A_t — массовое число мишени.

В настоящей работе вышеуказанные параметры рассчитывались по программе минимизации FUMILI на БЭСМ-6 с использованием экспериментальных значений выходов остаточных ядер при максимальных энергиях тормозного спектра 2; 3; 4,5 и 5 Гэв. В пределах точности расчетов энергетической зависимости параметров не наблюдалось; результаты, полученные для $E_{\gamma_{\max}} = 2$ Гэв, а также соответствующие расчеты выходов остаточных ядер приведены в табл. 3 и 2. Подробно вопрос о приложении

Таблица 3

P	R	S	T	$\hat{\sigma}$	Примечание
$0,183 \pm 0,012$	$2,05 \pm 0,09$	$0,490 \pm 0,004$	$0,000613 \pm 0,0003$	$52 \pm 7,6$	Данные настоящей работы
$0,22 \pm 0,04$	$2,0 \pm 0,3$	$0,460 \pm 0,015$	$-0,0001 \pm 0,0004$	53 ± 14	Данные для V^{51} при $E_{\gamma_{\max}} = 1,5$ Гэв [16]
0,23	2,09	0,486	0,00038	50,2	Расчетные данные [16]

формулы Рудстама к процессам фоторасщепления рассматривался в работе [16]; проведенный авторами анализ имеющегося экспериментального

материала позволил получить ряд параметров*, соответствующих различным экспериментальным условиям, и на основе этого вывести аналитические выражения с учетом энергетической, массовой и зарядовой зависимости продуктов реакции. Используя результаты этой работы, нами были рассчитаны параметры для случая $E_{\gamma_{\max}} = 2 \text{ Гэв}$ и $A_i = 51$ (табл. 3).

Как видно из данных табл. 3, все значения параметров удовлетворительно согласуются в пределах ошибок. Соответствующие кривые, представляющие зарядовые и массовые распределения продуктов расщепления V^{51} фотонами с $E_{\gamma_{\max}} = 2 \text{ Гэв}$, рассчитывались по формуле (1) на ЭВМ Наири-2 (рис. 3).

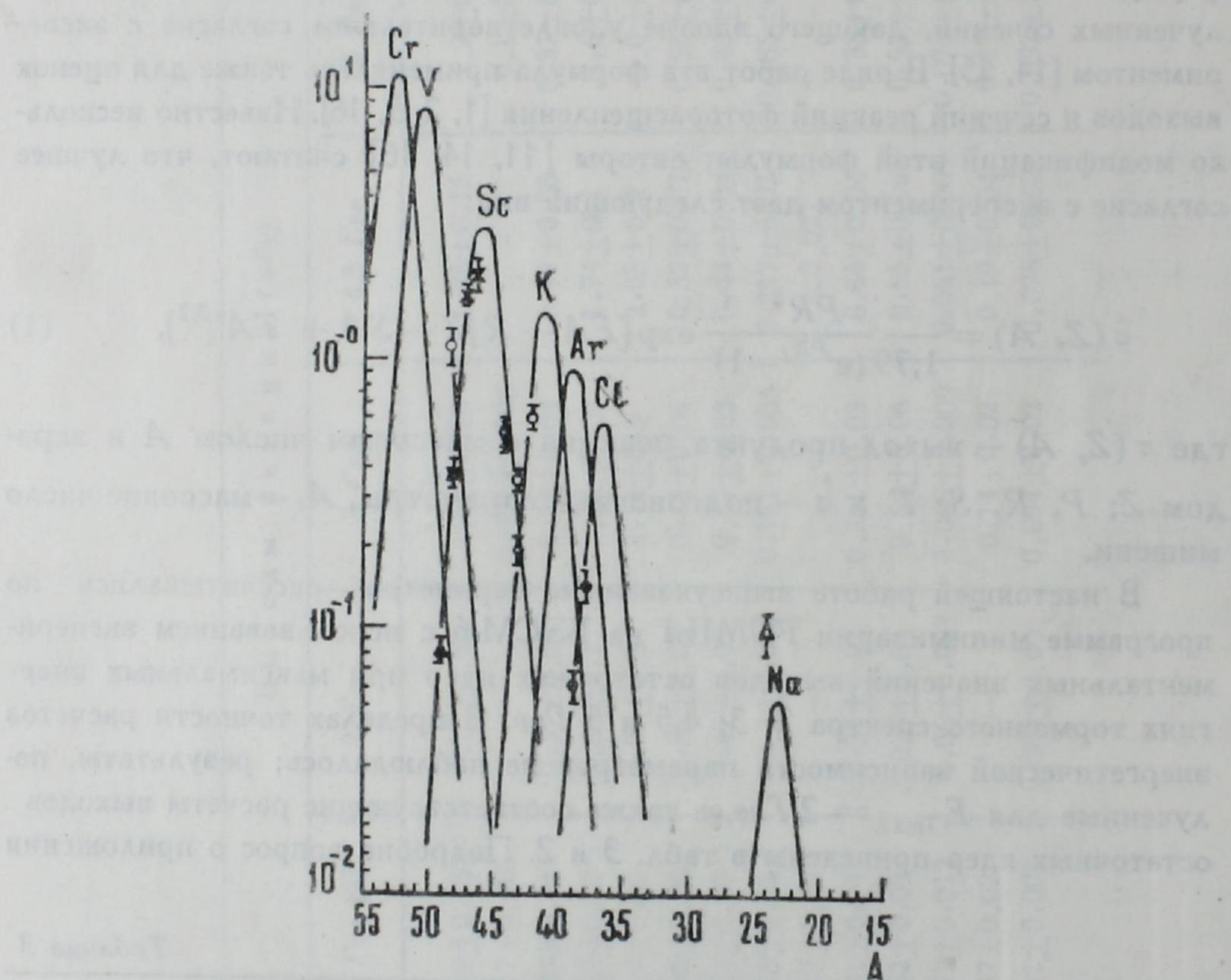


Рис. 3. Кривые распределения выходов остаточных ядер в зависимости от числа вылетевших нуклонов, рассчитанные по формуле Рудстама с параметрами, полученными в настоящей статье. Экспериментальные точки — результаты измерений настоящей работы: \blacktriangle — Cr, \circ — V, \times — Sc, \square — K, \bullet — Cl, \triangle — Na.

Таким образом, проведенный в настоящей работе расчет параметров и выходов остаточных ядер подтверждает возможность применения формулы Рудстама для исследования распределения продуктов взаимодействия фотонов высоких энергий с ядрами.

* В табл. 2 приведены параметры формулы (1), полученные в работе [16] с использованием экспериментальных результатов [2] при $E_{\gamma_{\max}} = 1,5 \text{ Гэв}$ и $A_i = 51$.

В заключение авторы выражают благодарность Е. Схторяну за расчеты, проведенные на ЭВМ БЭСМ-6, а также персоналу ускорителя Ереванского физического института за обеспечение хороших параметров пучка.

Ереванский государственный университет
Ереванский физический институт

Поступила 30.X.1974

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. G. J. Kumbartzki et al. Nucl. Phys., A160, 237 (1971).
2. G. J. Kumbartzki et al. Nucl. Phys., A176, 23 (1971).
3. В. И. Нога и др. ЯФ, 9, 1152 (1969).
4. G. Andersson et al. Nucl. Phys., A107, 44 (1972).
5. K. Lindgren, G. Jonsson. Nucl. Phys., A197, 71 (1972).
6. C. B. Fulmer et al. Phys. Rev., C2, 1371 (1970).
7. Г. А. Вартапетян и др. ЯФ, 17, 685 (1973).
8. Н. А. Перфилов и др. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий, Изд. АН СССР, М.—Л., 1962, стр. 98.
9. K. Tesch. Nucl. Instr. and Meth., 95, 245 (1971).
10. T. A. Gabriel, K. G. Alsmiller. Phys. Rev., 182, 1035 (1969).
11. В. С. Барашенков, В. Д. Тонеев. Взаимодействие высокоэнергетичных частиц и атомных ядер с ядрами, Атомиздат, М., 1972.
12. К. К. Гудима. Препринт Р2—4661, ОИЯИ, 1969.
13. Ф. П. Денисов, В. Н. Мехедов. Ядерные реакции при высоких энергиях, Атомиздат, М., 1972, стр. 178.
14. G. Rudstam. Z. Naturf., 21a, 1027 (1966).
15. K. F. Chackett, G. A. Chakett. Nucl. Phys., A100, 633 (1967).
16. G. G. Jonsson, K. Lindgren. Lunp 7212, 1972.

V^{51} -ՄՈՆՈՒԶՈՏՈՊԻ ՖՈՏՈՃԵՂՔՈՒՄԸ 2-ԻՑ ՄԻՆՉԵՎ
5 ԳԷՎ ՄԱՔՍԻՄԱԿ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Հ. Հ. ՎԱՐՊԵՏՅԱՆ, Ե. Օ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա. Ս. ԴԱՆԱԳՈՒԼՅԱՆ,
Ն. Ա. ԴԵՄՅՈՒՆԻՆԱ, Ա. Հ. ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ, Դ. Ս. ՉԱՏՐՉՅԱՆ

Աշխատանքում քննարկվել է V^{51} -ի ճեղքումը ֆոտոնների 2-ից մինչև 5 Գէվ մաքսիմալ էներգիաների տիրույթում: 14 մնացորդային միջուկների ելքերը գրանցվել են Ge (Li) կիսահաղորդչային դետեկտորի օգնությամբ: Էքսպերիմենտալ տվյալները քննարկվել են Ռուդստամի կիսաէմպիրիկ բանաձևի օգնությամբ:

SPALLATION OF V^{51} BY PHOTONS WITH ENERGIES
BETWEEN 2 AND 5 GeV

H. A. VARTAPETYAN, E. O. GRIGORYAN, A. S. DANAGULYAN,
N. A. DEMEKHINA, A. G. KHUDAVERDYAN, D. S. CHATRCHYAN

The photospallation of V^{51} in the energy range from 2 to 5 GeV has been investigated. The yields of fourteen residual nuclei have been measured using a coaxial Ge (Li) detector. Experimental data were analysed by means of Rudstam's empirical formula.