

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

БФИ-765(80)-84

---

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

А.Р.АВАКЯН, Г.А.ВАРТАПЕТЯН, Е.О.ГРИГОРЯН,  
Н.А.ДЕМЕХИНА

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЙ НЕКОТОРЫХ  
РЕАКЦИЙ РАСЩЕПЛЕНИЯ МЕДИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНЫХ  
И НЕКОГЕРЕНТНЫХ ФОТОННЫХ ПУЧКОВ

ЕРЕВАН-1984

## 1. Введение

Исследование фотоядерных реакций в области высоких энергий сильно затруднено ввиду отсутствия достаточно интенсивных источников монохроматических фотонов. Применение аморфного спектра с непрерывным распределением фотонов по энергиям позволяет измерить только интегральную характеристику процесса, представляющую выход реакций, отнесенный к одному эквивалентному фотону. Сечение и выход реакции связаны между собой уравнением, известным в математике как уравнение Фредгольма I-го рода:

$$\sigma_q(E_{\max}) = \frac{\int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\max}} \sigma_k(E) N(E, E_{\max}) dE}{\frac{1}{E_{\max}} \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\max}} E N(E, E_{\max}) dE}, \quad (1)$$

где выражение, стоящее в знаменателе, определяет число эквивалентных квантов в спектре с  $E_{\max}$ ,  $\sigma_q$  - выход реакций на один эквивалентный квант,  $\sigma_k$  - сечение реакций, отнесенное к реальному фотону с энергией  $E$ ,  $N(E, E_{\max}) dE$  - число фотонов в спектре в энергетическом интервале  $E, E+dE$ . Решения уравнений такого типа относятся к числу некорректно поставленных задач, для которых характерна неустойчивость решений при наличии экспериментальных погрешностей для функций, входящих в уравнение. Различные способы решения этого уравнения обсуждались в ряде работ [1-6].

Нами была использована стандартная программа из общей библиотеки

отеки стандартных подпрограмм (ОБСП) БЭСМ-6 для решения интегрального уравнения Фредгольма I-го рода методом регуляризации А.Н.Тихонова [7-8]. В качестве исходных данных при решении уравнения использовались экспериментальные значения выходов исследуемых реакций, соответствующие квазимонохроматические

спектры, полученные при торможении электронов кристаллической мишенью, а также результаты измерений на разориентированном кристалле и ранее полученные спектры от аморфной мишени. Вводились также соответствующие статистические ошибки измерений выходов реакций и фотонных спектров. Подробное описание применения этого метода решения для расчета сечений фотоядерных реакций приведено в работе [9], в которой проводились вычисления сечений реакций фоторасщепления легких мишеней Al, Si и S.

## 2. Экспериментальные результаты

В настоящей работе исследовались реакции фоторасщепления меди с образованием остаточных ядер  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{44\text{m}}\text{Sc}$ ,  $^{43}\text{K}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{24}\text{Na}$ . Облучение проводилось квазимонохроматическим фотонным пучком Ереванского синхротрона, полученным при торможении электронов, ускоренных до 3,75 ГэВ, в кристаллической мишени при различных ориентациях, а также разориентированной относительно пучка.

Измерения наведенной активности проводились на Ge(Li) полупроводниковом детекторе с чувствительным объемом 60 см<sup>3</sup>, соединенном с 4000-канальным анализатором системы DIDAC. Подробно применяемая методика измерения выходов реакций изложена в работе [10]. В качестве монитора пучка использовался квантометр Вильсона. Выходы реакции, нормированные на число эквивалентных квантов по показаниям квантометра, и значения пиковых

энергий в соответствующих спектрах приведены в табл. I. В качестве исходных данных в расчеты включались также ранее полученные результаты по фоторасщеплению меди непрерывным спектром от аморфной мишени при максимальных энергиях 2, 3, 4 и 5 ГэВ [11].

Результаты расчетов представлены на рис. I-9. Ошибки обусловлены погрешностями измерений выходов (5-10%), спектров (5%), а также точностью метода решения (~3%). Достоверность кривой возбуждения существенно зависит от количества экспериментальных точек и их статистической обеспеченности, а также точности результатов измерения фотонных спектров.

## 3. Обсуждение

Характерным для сечений всех исследуемых реакций является отчетливо выраженный максимум в области энергий фотонов 350-420 МэВ. Такое поведение характерно для реакций, инициируемых фотонами с энергией выше порога фоторождения мезонов, таких как: фотоделение [6,12,13], фоторасщепление [9,14,15], полное фотопоглощение на ядрах [16,17]. По мере увеличения числа вылетевших нуклонов и соответственно роста порога реакций в положении пика наблюдается некоторое смещение в сторону больших энергий. Указанная закономерность была замечена нами ранее в [9] при исследовании фоторасщепления легких ядер Al, Si, S с образованием  $^{24}\text{Na}$  и  $^{18}\text{F}$ . Положение пика хорошо согласуется с моделью фоторождения и последующего резонансного поглощения  $\eta$ -мезонов ядерной материей с образованием  $\Delta$ -изобары [18]. Этот механизм передачи энергии применяется в расче-

тах по каскадно-испарительной модели методом Монте-Карло. Опубликованные результаты расчетов сечений фоторасщепления [14] ядер при энергии до 400 МэВ демонстрируют наличие пика при энергии  $\sim 300$  МэВ. Количественное же согласие с экспериментальными данными [8] хуже, расчетные значения сечений существенно ниже. В работе [18] авторы указывали, что учет перерасеяния  $\Delta$ -изобар на нуклонах ядра в процессе разветвления каскада может объяснить сдвиг поглощения пика на энергетической шкале в реакциях с большим числом вылетевших нуклонов. Наличие пика в области 700–800 МэВ можно объяснить вкладом в выход реакций процессов мезонного рождения. Наиболее четко эта энергетическая область проявляется в реакциях с высокими порогами. В данной работе это касается реакций с образованием  $^{44m}\text{Sn}$ ,  $^{43}\text{K}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{24}\text{Na}$ . Свыше 1 ГэВ сечения всех реакций практически не меняются. Полученные значения сечений в этой области хорошо согласуются с оценками, рассчитанными в I/E приближении в области 2–5 ГэВ [19] с учетом статистических ошибок измеренных выходов. Такая картина согласуется с данными по фотоядерным процессам в ГэВ-й области энергий, в частности, фотоделения [13], фоторасщепления [15] и полного адронного фотопоглощения [20]. Наличие четко выраженной структуры отличает функцию возбуждения реакций фоторасщепления от сечений образования аналогичных продуктов в реакциях под действием высокоэнергетичных протонов [21]. Для последних характерно увеличение выходов в околороговой области и слабое изменение после достижения максимального значения. Сечения расщепления меди протонами в интервале энергий 3–30 ГэВ меняются в пределах  $\sim 25\%$  [22]. Для продуктов фоторасщепления, по данным настоящей работы (рис.1–9), сечения практически не меняются в области 3–5 ГэВ. В табл.3 приведены отношения сече-

ний образования некоторых продуктов под действием протонов и фотонов при энергиях  $E_{\gamma_{\text{max}}} = 3,75$  ГэВ и  $E_p = 3,9$  ГэВ [19].

Как видно, относительные вероятности образования удовлетворительно согласуются. С точки зрения каскадно-испарительной модели этот факт подтверждает роль испарительной стадии в процессе образования остаточных продуктов, на которой несущественна природа налетающих частиц. Тот же вывод следует из результатов измерения импульсных характеристик продуктов фоторасщепления меди [23]. Скорость, приобретенная остаточным ядром в процессе статистического испарения частиц, оказывается независимой от типа взаимодействующих частиц.

При сравнении абсолютных значений сечений [21] можно условно выделить две группы продуктов в исследуемых реакциях. К одной группе относятся ядра, образованные в результате вылета не более двадцати нуклонов из первоначального ядра; отношения сечений составляют величину  $(1 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$ . Ко второй группе можно отнести продукты, образованные вылетом большого числа нуклонов ( $n \geq 20$ ); отношения сечений для них почти вдвое меньше. Можно предположить, что реакции, протекающие при больших передачах энергии, относительно менее вероятны в фотоядерных взаимодействиях.

В заключение авторы считают своим долгом поблагодарить персонал ускорителя за обеспечение стабильных параметров пучка в процессе облучения.

Таблица I

Элемент ост. (МэВ) ядра	$\sigma_q + \Delta\sigma_q$ (мб)									
	440±75	545±90	724±100	900±125	1540±125	2000±50 <sup>x</sup>	3000±50 <sup>x</sup>	3750±50 <sup>x</sup>	4000±50 <sup>x</sup>	5000±50 <sup>x</sup>
57 Ni	0,220± 0,008	0,160± 0,006	0,123± 0,006	0,094± 0,003	0,059± 0,002	0,065± 0,010	0,064± 0,010	0,066± 0,005	0,067± 0,011	0,068± 0,010
56 Co	2,10± 0,06	1,90± 0,06	1,17± 0,05	0,76± 0,03	0,72± 0,04	0,77± 0,08	0,70± 0,07	0,72± 0,04	0,75± 0,07	0,77± 0,08
56 Mn	0,87± 0,02	0,70± 0,02	0,43± 0,01	0,33± 0,01	0,30± 0,01	0,30± 0,03	0,27± 0,03	0,27± 0,02	-	0,30± 0,03
54 Mn	4,55± 0,10	3,96± 0,10	3,15± 0,10	2,31± 0,07	1,61± 0,05	1,60± 0,16	1,66± 0,16	1,66± 0,10	1,65± 0,16	1,64± 0,16
52 Mn	1,30± 0,03	1,13± 0,03	0,90± 0,03	0,66± 0,02	0,46± 0,01	0,53± 0,05	0,47± 0,05	0,47± 0,04	0,525± 0,05	0,473± 0,05
44 <sup>m</sup> Sc	0,580± 0,006	0,540± 0,006	0,500± 0,01	0,420± 0,006	0,270± 0,005	0,253± 0,025	0,270± 0,03	0,253± 0,005	0,260± 0,025	0,240± 0,025
43 K	0,095± 0,003	0,091± 0,003	0,090± 0,003	0,072± 0,002	0,045± 0,002	0,0536± 0,005	0,058± 0,006	0,052± 0,003	-	0,051± 0,005
42 K	0,240± 0,011	0,240± 0,011	0,210± 0,011	0,230± 0,011	0,140± 0,007	0,118± 0,011	0,097± 0,010	0,107± 0,008	0,090± 0,013	0,100± 0,010
24 Na	0,062± 0,006	0,053± 0,005	0,058± 0,006	0,062± 0,006	0,037± 0,004	0,029± 0,006	0,037± 0,007	0,033± 0,0034	0,036± 0,007	0,034± 0,007

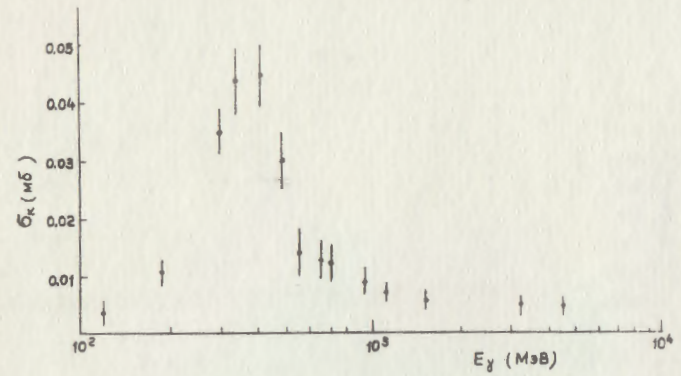
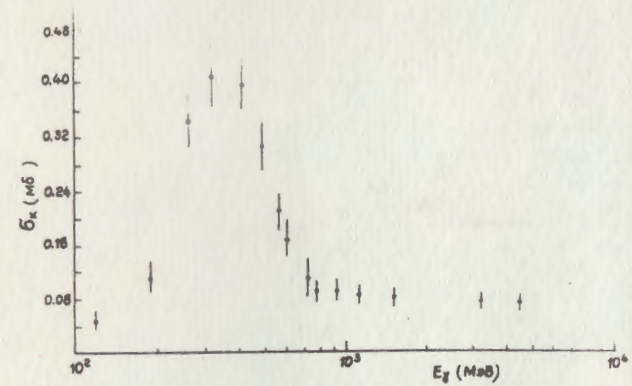
<sup>x</sup> Данные относятся к измерениям на аморфном спектре

Таблица 2

Остаточные ядра	Пороги реакций расщеплений в МэВ	$E_\gamma = 3,75$ ГэВ	$E_p = 3,9$ ГэВ [21]	$\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_p}$
		57 Ni	65	0,005±0,001
56 Co	72	0,074±0,005	5,60±0,30	(0,80±0,16) 10 <sup>-2</sup>
56 Mn	67	0,024±0,005	2,58±0,08	(0,90±0,20) 10 <sup>-2</sup>
54 Mn	85	0,135±0,033	13,80±0,20	(0,98±0,20) 10 <sup>-2</sup>
52 Mn	105	0,060±0,010	6,08±0,07	(0,98±0,26) 10 <sup>-2</sup>
44 <sup>m</sup> Sc	174	0,029±0,011	5,22±0,11	(0,50±0,20) 10 <sup>-2</sup>
43 K	180	0,006±0,002	1,32±0,04	(0,50±0,15) 10 <sup>-2</sup>
42 K	190	0,013±0,006	3,59±0,17	(0,40±0,20) 10 <sup>-2</sup>
24 Na	357	0,005±0,002	3,70±0,09	(0,14±0,07) 10 <sup>-2</sup>

Таблица 3

Отношение сечений	$E_\gamma = 3,75$ ГэВ	$E_p = 3,9$ ГэВ [21]
$\frac{^{56}\text{Co}}{^{56}\text{Mn}}$	$3,1 \pm 0,9$	$2,2 \pm 0,2$
$\frac{^{54}\text{Mn}}{^{56}\text{Mn}}$	$5,6 \pm 1,9$	$5,3 \pm 0,3$
$\frac{^{54}\text{Mn}}{^{52}\text{Mn}}$	$2,2 \pm 0,6$	$2,3 \pm 0,05$
$\frac{^{42}\text{K}}{^{43}\text{K}}$	$2,1 \pm 0,6$	$2,7 \pm 0,16$

Рис.1 Сечение реакции  $\text{Cu} - ^{57}\text{Ni}$ Рис.2 Сечение реакции  $\text{Cu} - ^{56}\text{Co}$

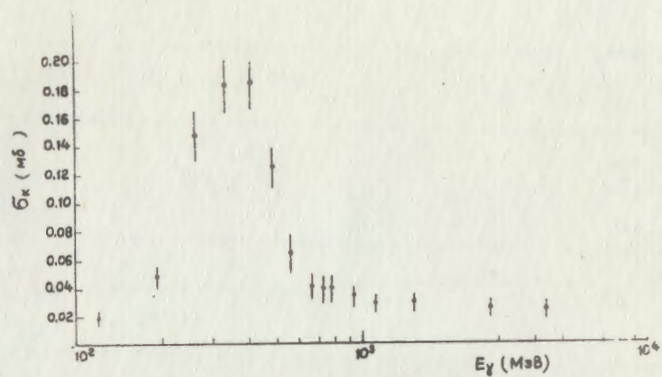


Рис.3 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{56}\text{Mn}$

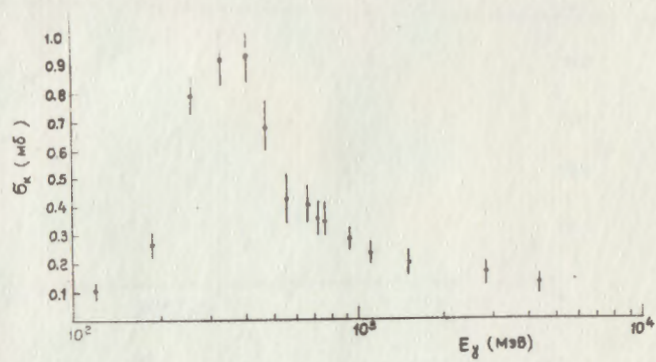


Рис.4 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{54}\text{Mn}$

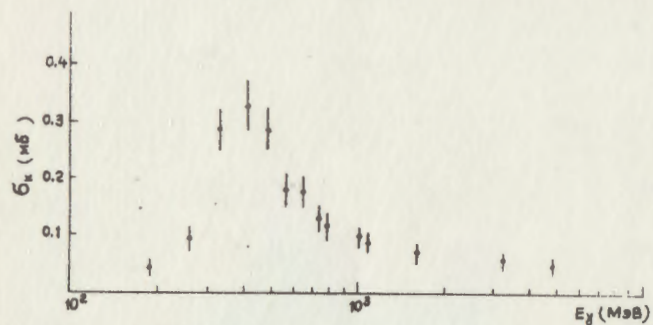


Рис.5 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{52}\text{Mn}$

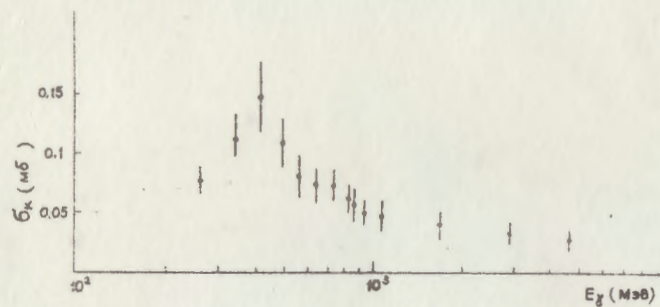


Рис.6 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{44m}\text{Sc}$

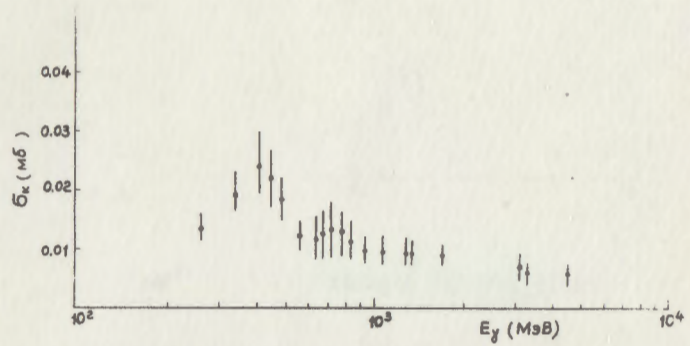


Рис.7 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{43}\text{K}$

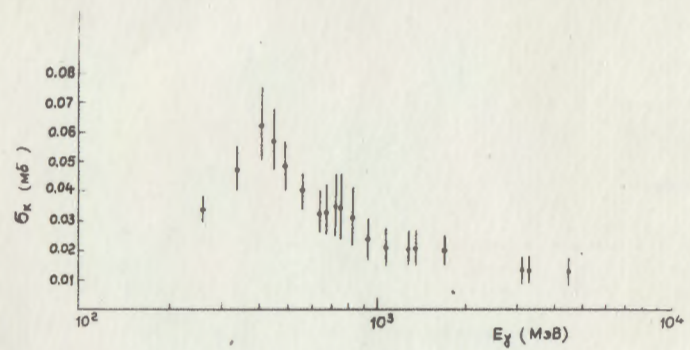


Рис.8 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{42}\text{K}$

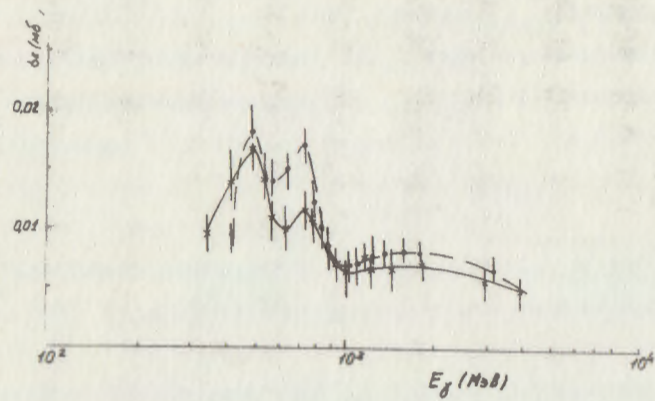


Рис.9 Сечение реакции  $\text{Cu} - {}^{24}\text{Na}$

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Богданкевич О.В., Николаев Ф.А. Работа с пучком тормозного излучения. М.:Атомиздат, 1964.
2. Penfold A.S., Leiss J.E. Analysis of photonuclear cross sections.- *Phys.Rev.*, 1959, vol.114, p.1332-1337.
3. Cook B.C. Least structure solution of photonuclear yield functions.-*Nucl.Instr. and Meth.*, 1963, vol.24, p.256-268.
4. Tesch K. On the accuracy of the photon-difference method used in high-energy photonuclear experiments.- *Nucl.Instr. and Meth.*, 1971, vol.95, p.245-252.
5. Кузьменко В.С., Ранжк Ю.Н. Вычисление сечений фотоядерных реакций. Препринт ХФТИ 7I-26, Харьков, 1978.
6. Bologna G., Bellini V., Emma V. et al. Fission of Bi, Pb, Au and Pt induced by a coherent photon beam from 1000 MeV electrons.- *Nuovo Cim.*, 1976, vol.A35, p.91-114
7. Тихонов А.Н. О решении некорректно поставленных задач. ДАН СССР, 1963, т.161, с.501-504.
8. Тихонов А.Н. Об устойчивости задач оптимизации функционалов. Ж.вычисл.матем. и матем.физ., 1966, 6, № 4, с.631-634.
9. Авакян А.Р., Варталетян Г.А., Григорян Е.О., Демехина Н.А. Фоторасщепление легких ядер когерентным и некогерентным тормозным излучением от электронов высоких энергий. Препринт ЕФИ-765(80)-84, Ереван, 1984.
10. Бахшецян Р.А., Варталетян Г.А., Григорян Е.О. и др. Исследование взаимодействия фотонов высоких энергий с ядрами  $^{51}\text{V}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Cu}$ . Препринт ЕФИ-146(75), Ереван, 1975.
11. Danagulyan A.S., Demekhina N.A. and Vartapetyan G.A. Photonuclear reactions in medium weight nuclei  $^{51}\text{V}$ ,  $^{55}\text{Mn}$  and  $\text{Cu}$ .-*Nucl.Phys.*, 1977, vol.A285, p.482-492.
12. Bellini V., Emma V., Nigro S.L. et al. Fission of Bi, Pb, Au, Pt, Re, W and Ta induced by photons from coherent and incoherent bremsstrahlung of electrons up to 1000 MeV.-*Nuovo Cim.*, 1982, vol.71, p.229-244.
13. Варталетян Г.А., Демехина Н.А., Касилов В.И. и др. Сечение деления ядер фотонами с энергией до 5 ГэВ. Сверхгигантский резонанс в фотоядерных реакциях. ЯФ, 1971, т.14, вып.1, с.65-72.
14. Blomqvist I., Janeck P., Jonsson G.G. et al. Electron and photon induced spallation reactions on  $^{27}\text{Al}$  and  $^{51}\text{V}$  at intermediate energies.-*Z.Phys.*, 1976, vol.A278, p.83-87.
15. Andersson G., Blomqvist I., Forkman B. et al. Photon induced nuclear reactions above 1 GeV.I. Experimental.- *Nucl. Phys.*, 1972, vol.A197, p.44-84.
16. Arends J., Eyink J., Hegerath A. et al. Measurement of total photonuclear cross sections in the  $\Delta$ -resonance region.- *Phys.Lett.*, 1981, vol.B34, p.423-427

17. Власенко В.Г., Гольденштейн В.А., Митрофанова А.В. и др. Полные адронные сечения поглощения фотонов с энергией 150-500 МэВ атомными ядрами. ЯФ, 1976, т.23, вып.3, с.504-511.
18. Oset E. and Weise W. Total photonuclear cross sections in the 3.3 resonance region and the damping of  $\Delta$  (1232) - hole states.- Phys.Lett, 1980, vol.94B, p.19-23.
19. Демехина Н.А. Исследование фотоядерных реакций методом активационного анализа в области энергий тормозного спектра  $2 \leq E_{\gamma_{\max}} \leq 5$  ГэВ: Автореферат дис. на соиск.учен.степени кандидата физ.-мат.наук, Ереван, 1978.
20. Arakelyan E.A., Bajatyan G.L., Grigoryan N.K. et al. Total cross section of hadron photoproduction of Be, C, H<sub>2</sub>O, O and Al nuclei in the energy range 200-900 MeV.- Preprint EPI-(45)-84, Yerevan, 1984.
21. Cumming J.B., Hausteин P.E., Stoенner R.W. et al. Spallation of Cu by 3.9 GeV <sup>14</sup>N ions and 3.9 GeV protons. Phys.Rev., 1974, vol.C10, p.739-755.
22. Hudis J., Dostrovsky I., Friedlander S. et al. Energy dependence of product yields in copper spallation by protons between 3 and 30 GeV.- Phys.Rev., 1963, vol.129, p.434-437.
23. Вартапетян Г.А., Григорян Е.О., Демехина Н.А. Импульсные свойства продуктов фоторасщепления меди. Препринт ЕФФ-689(4)-84, Ереван, 1984.

Рукопись поступила 2 августа 1984 г.

Ереванский физический  
ИНСТИТУТ  
Зах. препринтов

А.Р.АВАКЯН, Г.А.ВАРТАПЕТЯН, Е.О.ГРИГОРЯН,  
Н.А.ДЕМЕХИНА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЙ НЕКОТОРЫХ РЕАКЦИЙ  
РАСЩЕПЛЕНИЯ МЕДИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНЫХ И НЕКОГЕРЕНТНЫХ  
ФОТОННЫХ ПУЧКОВ

Редактор Л.П.Мукаян  
Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 3/ХП-84г. ВФ-12855 Формат 60x84/16  
Офсетная печать. Уч.изд.л. 1,0 Тираж 299 экз. Ц. 15 к.  
Зак.тип. № 866 Индекс 3624

Отпечатано в Ереванском физическом институте  
Ереван 36, Маркаряна 2