

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ЯДРАХ
 ^{58}Ni и ^{64}Ni

А. С. ДАНАГУЛЯН, С. С. ДАНАГУЛЯН, А. Г. ХУДАВЕРДЯН

Приведены новые данные по фоторасщеплению обогащенных изотопов ^{58}Ni и ^{64}Ni под действием фотонов с максимальной энергией 4,5 ГэВ. Выходы остаточных ядер измерены методом наведенной активности с помощью Ge (Li) -детектора. Экспериментальные значения выходов сравниваются с теоретическими, рассчитанными по формуле Рудстама. Полученные результаты показывают систематическое смещение экспериментальных значений выходов реакций расщепления по сравнению с расчетными. Получена экспоненциальная зависимость отношений выходов остаточных ядер из мишени ^{58}Ni к выходам тех же ядер из мишени ^{64}Ni от величины третьей проекции изотопического спина ядра-продукта, а также экспоненциальная зависимость отношений экспериментальных значений выходов к расчетным значениям от разности третьих проекций изотопических спинов ядер-мишеней и ядер-остатков. В эмпирической формуле Рудстама введен новый член, учитывающий экспоненциальную зависимость выходов фоторасщепления от изотопических спинов ядер-мишеней и ядер-продуктов.

В последнее время в литературе появились работы, в которых был исследован изотопический эффект в ядерных реакциях [1—9]. В работах [1—7] этот эффект изучался в протон-ядерных реакциях расщепления и фрагментации. Аналогичные исследования были проведены и в фотоядерных реакциях [8, 9].

Целью настоящей работы является исследование реакций фоторасщепления ядер ^{58}Ni и ^{64}Ni и изучение изотопического эффекта.

Методика и экспериментальные результаты

Эксперимент выполнен на Ереванском электронном ускорителе при максимальной энергии тормозного спектра $E_{\gamma\text{max}} = 4,5$ ГэВ [10]. В качестве мишеней были использованы химически чистые образцы ^{58}Ni (95,9%) и ^{64}Ni (89,8%), изготовленные в виде дисков толщиной соответственно 165 и 64 мг/см². Остаточные ядра-продукты фотоядерных реакций регистрировались полупроводниковым Ge (Li) -детектором (30 см³) с амплитудным разрешением 3 кэВ на линии с энергией $E_{\gamma} = 1$ МэВ. Экспериментальная методика подробно описана в работе [10].

Абсолютные значения выходов, рассчитанные на эквивалентный квант, вместе со статистическими ошибками представлены в табл. 1. Систематические среднеквадратичные ошибки, обусловленные неточностью определения фотоэффективности, интенсивности β -, γ -переходов и постоянной квантометра в сумме не превышают 15%. При определении выходов оста-

Таблица 1

Значения выходов фотоядерных реакций

№	Остаточное ядро	Мишень ^{64}Ni , σ_q экс. мбн	Мишень ^{58}Ni , σ_q экс. мбн	Тип выходов	$t_2 = \frac{N-Z}{2}$
1	^{62}Co	$0,83 \pm 0,04$		I	4
2	^{61}Co	$2,34 \pm 0,15$		C	3,5
3	^{60}Co	$5,5 \pm 1$		I	3
4	^{58}Co	$2,6 \pm 0,3$	$0,146 \pm 0,02$	I	2
5	^{57}Co	$1,0 \pm 0,1$	$46,5 \pm 1$	C	1,5
6	^{56}Co	$0,56 \pm 0,04$	$8,1 \pm 0,4$	C	1
7	^{55}Co	—	$1,7 \pm 0,1$	C	0,5
8	^{57}Ni	$0,29 \pm 0,03$	$17,2 \pm 1$	I	0,5
9	^{56}Ni	$0,15 \pm 0,03$	$0,5 \pm 0,03$	I	0
10	^{59}Fe	$1,8 \pm 0,2$	—	I	3,5
11	^{52}Fe	—	$0,135 \pm 0,01$	I	0
12	^{56}Mn	$1 \pm 0,05$	—	C	3
13	^{54}Mn	$1,6 \pm 0,2$	$3,8 \pm 0,4$	I	2
14	^{53}Mn	$0,47 \pm 0,64$	$1,36 \pm 0,1$		
15	^{52m}Mn	$0,2 \pm 0,03$	$0,85 \pm 0,07$	C	1
16	^{51}Cr	$1,1 \pm 0,1$	$3,45 \pm 0,3$	C	1,5
17	^{49}Cr	$0,063 \pm 0,006$	$0,67 \pm 0,03$	C	0,5
18	^{48}Cr	—	$0,13 \pm 0,01$	C	0
19	^{48}V	$0,45 \pm 0,04$	$1,7 \pm 0,15$	C	1
20	^{48}Sc	—	$0,07 \pm 0,02$	I	3
21	^{47}Sc	$0,14 \pm 0,03$	—	C	2,5
22	^{46}Sc	$0,91 \pm 0,09$	$0,53 \pm 0,05$	I	2
23	^{44m}Sc	$0,13 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,03$	I	1
24	^{43}Sc	$0,053 \pm 0,005$	$0,32 \pm 0,05$	C	0,5
25	^{43}K	$0,09 \pm 0,009$	0,011	I	2,5

точных ядер из мишени ^{64}Ni был учтен вклад образования этих изотопов из ^{58}Ni , примесь которого составляла 4,7% в мишени ^{64}Ni .

Обсуждение результатов

Из приведенных в табл. 1 результатов видно, что измерены выходы простых и сложных реакций расщепления. Сечения или выходы реакций с вылетом большого числа нуклонов обычно описываются при помощи каскадно-испарительной модели. Однако для исследуемой нами области энергий и используемых мишеней не существует расчетов фотоядерных реакций по этой модели.

В последнее время для расчетов выходов фотоядерных реакций расщепления обычно используется формула Рудстама

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

где $\sigma_q^R(Z, A)$ — выход остаточного ядра, A_i — массовое число ядра-мишени, $\hat{\sigma}$, P , R , S и T — параметры, полученные методом подгонки в работе [11] на основе систематизации экспериментального материала по фотоядерным реакциям, $\hat{\sigma} = (-0,81 + 0,184 \ln E_{\text{тmax}})$, $P = 7,66 A_i^{-0,80}$, $R = 11,8 (A_i - 1/P)^{-0,45}$, $S = 0,486$ и $T = 0,00038$, $Z_p = SA - TA^2$ есть вероятный заряд.

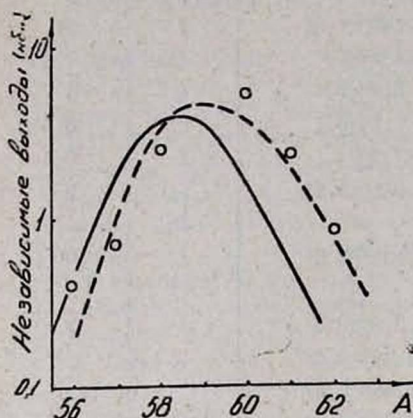
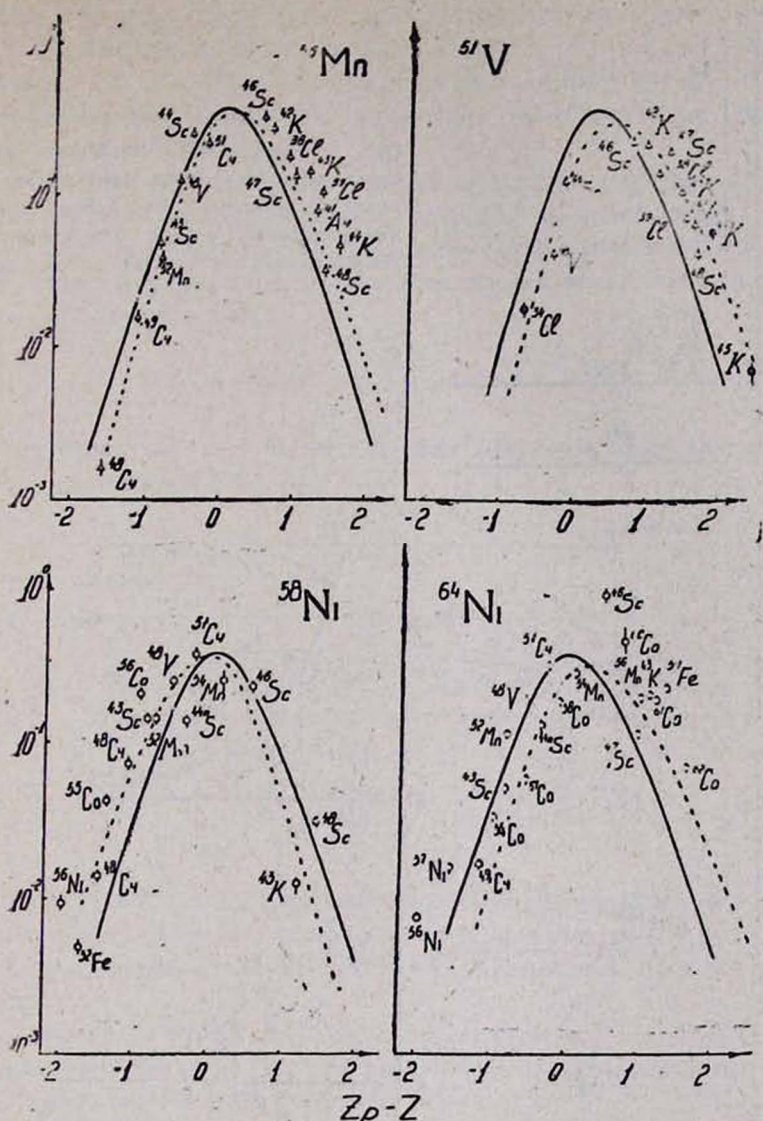


Рис. 1. Распределение независимых выходов остаточных ядер Co по массовому числу; сплошная линия — расчет по формуле (1), пунктирная — по формуле (2).

На рис. 1 приведена зависимость выхода изотопов Co от их массового числа, которая наблюдается при фоторасщеплении мишени ^{64}Ni . При этом учтены и вклады кумулятивных процессов. На рис. 1 приведено также распределение выхода изотопов Co, рассчитанное по формуле Рудстама (сплошная кривая). Из рисунка видно, что экспериментальные точки смещены относительно кривой в сторону нейтроноизбыточных ядер.

На рис. 2 представлены зарядово-дисперсионные кривые, построенные согласно формуле (1), для ядер-мишеней ^{58}Ni , ^{64}Ni , ^{55}Mn и ^{51}V . По оси абсцисс отложена разность вероятного заряда и заряда для продуктов реакций расщепления, по оси ординат — парциальные выходы. Экспериментальные точки соответствуют независимому выходу изотопов, где учтен вклад от β -распада. Из рис. 2 видно, что выходы подавляющего большинства остаточных ядер, третья проекция изотопического спина t_3 , которых близки к значениям $T_3 = (N_i - Z_i)/2$ для соответствующих ядер-мишеней ^{58}Ni , ^{64}Ni , ^{55}Mn и ^{51}V , лежат выше кривой, рассчитанной по формуле (1). Наблюдаемые исключения из этого правила, по-видимому, связаны с оболочечными эффектами (например, $^{56}_{28}\text{Ni}$ является дважды магическим ядром) и различными плотностями уровней ядер-продуктов, которые проявляются на стадии испарения [12].

На рис. 3 приведена зависимость отношения экспериментальных значений выхода одинаковых ядер из ^{58}Ni и ^{64}Ni от t_3 . Там же приведены те же отношения, рассчитанные по формуле (1). Как видно из рисунка, отношения экспериментальных данных (R) уменьшаются с увеличением t_3 , тогда как аналогичные отношения, рассчитанные по формуле (1), не зависят от t_3 и равны примерно 2,5.



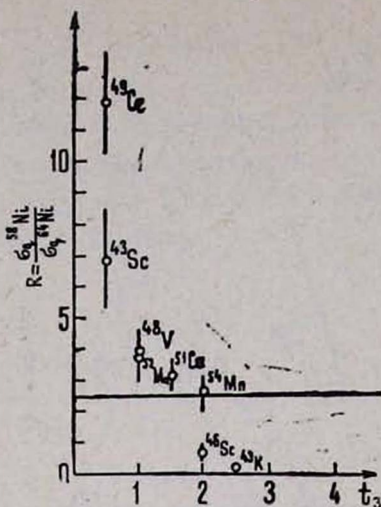


Рис. 3. Зависимость отношения выходов одинаковых остаточных ядер из двух изотопов ядер-мишеней от третьей проекции изотопических спинов остаточных ядер; прямая линия — результат расчета по формуле (1).

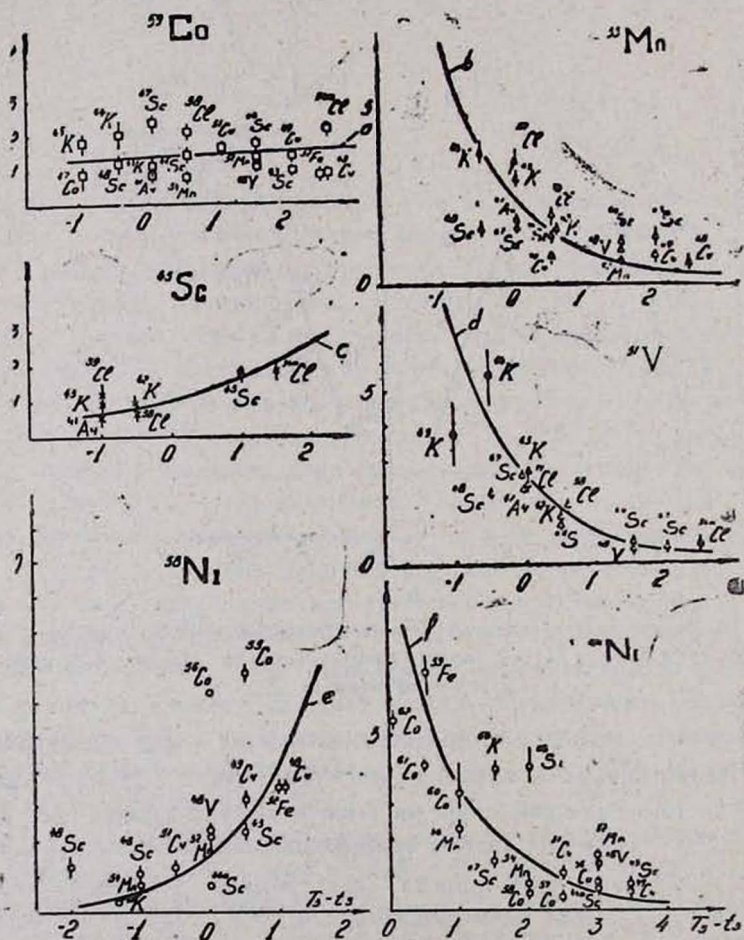


Рис. 4. Зависимость отношения экспериментальных и расчетных выходов остаточных ядер из мишеней ^{58}Ni , ^{64}Ni , ^{51}V , ^{55}Mn , ^{59}Co и ^{45}Sc от разности изотопических спинов ядер-мишеней и ядер-продуктов: кривая a — функция $1,5 \exp(T_3 - t_3)$, кривая b — $10 \exp(t_3 - T_3)$, кривые c и d — $2,5 \exp(T_3 - t_3)$, кривая e — $\exp 0,44(T_3 - t_3)$, кривая f — $1,2 \exp 0,082(T_3 - t_3)$; экспериментальные точки: $\circ$ — настоящая работа, Δ — [13], $\bullet$ — [14], $\times$ — [15], $\square$ — [16].

$(T_3 - t_3)$ растут для ядер ^{58}Ni и ^{45}Sc и уменьшаются для ядер ^{61}Ni , ^{51}V и ^{55}Mn . В случае ^{59}Co наблюдается слабая зависимость указанных значений от $(T_3 - t_3)$. По-видимому ход этих кривых связан со строением ядер-мишеней, а ядро ^{59}Co занимает промежуточное положение по отношению к этим ядрам.

Таким образом, подытоживая вышесказанное, можно заключить, что значения выходов ядер-продуктов в реакциях фоторасщепления зависят от изотопических спинов T_3 и t_3 . В формуле (1) эта зависимость не учтена. С этой целью в формулу Рудстама нами введен новый член, после чего формула (1) принимает вид

$$\sigma_q(A, Z) = \sigma_q^R(A, Z) \frac{A_i}{A} \{u \exp v(T_3 - t_3)\}. \quad (2)$$

Значения параметров u и v , полученные методом подгонки на ЭВМ БЭСМ-6, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мишень	u	v	χ^2/n
^{64}Ni	$5,0 \pm 0,2$	$-0,89 \pm 0,02$	23,2
^{55}Mn	$1,61 \pm 0,081$	$-0,51 \pm 0,043$	2,7
^{51}V	$1,75 \pm 0,07$	$-0,87 \pm 0,041$	3,8
^{59}Co	$0,78 \pm 0,033$	$0,082 \pm 0,03$	10
^{58}Ni	$1,667 \pm 0,046$	$0,688 \pm 0,04$	2
^{45}Sc	$0,75 \pm 0,035$	$0,44 \pm 0,048$	2

На рис. 1 и 2 наряду с кривыми, рассчитанными по формуле (1), приведены также кривые, полученные на основе новой формулы (2). Как следует из этих рисунков, учет нового члена улучшает согласие эксперимента с расчетом.

В заключение авторы выражают благодарность Г. А. Вартапетяну за интерес к работе и персоналу ускорителя Ереванского физического института за обеспечение хороших параметров пучка.

Ереванский государственный
университет
Ереванский физический
институт

Поступила 15. XI. 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. R. R. Korteling, A. A. Caretto. Phys. Rev., C1, 193 (1970).
2. B. Tracy et al. Phys. Rev., C5, 222 (1972).
3. P. David et al. Nucl. Phys., A 221, 145 (1974).
4. Л. Х. Батист и др. ЯФ, 25, 1140 (1977); ЯФ, 20, 850 (1974).
5. Б. Н. Беляев и др. Изв. АН СССР, сер. Физика, 42, 2292 (1978).
6. В. И. Богатин и др. ЯФ, 17, 9 (1973); ЯФ, 19, 32 (1974).
7. В. В. Авдейчиков и др. Сообщение ОИЯИ 1-7894, 1974.

8. Н. В. Гончаров и др. ЯФ, 19, 21 (1974).
9. В. М. Асатурян и др. ЯФ, 25, 1133 (1977).
10. Р. А. Бахшемян и др. Научное сообщение ЕФИ—146, 1975.
11. K. Lindgren, G. G. Jonsson. LUNP 7212, Phys. Scr., 15, 308 (1977).
12. В. С. Барашенков, В. Д. Тонаев. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами, М., 1972.
13. A. S. Danagulian et al. Nucl. Phys., A 285, 482 (1977).
14. G. J. Kumbartzki, U. Kim. Nucl. Phys., A 176, 23 (1971).
15. N. M. Bachschi et al. Nucl. Phys., A 264, 493 (1976).
16. V. D. Napoli et al. J. Inorg. Nucl. Chem., 40, 1.5 (1978).

ՖՈՏՈՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐԻ ՌԻՍՈՒՄԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ^{58}Ni և ^{64}Ni ՀԱՐՍԱՑՎԱԾ ԻՋՈՏՈՊՆԵՐՈՒՄ

Ա. Ս. ԴԱՆԱԳՈՒԼԻՅԱՆ, Ս. Ս. ԴԱՆԱԳՈՒԼԻՅԱՆ, Ա. Հ. ԽՈՒԴԱՎԵՐԴԻԱՆ

Աշխատանքում բերված են նոր տվյալներ ^{58}Ni և ^{64}Ni հարստացված իզոտոպների ֆոտո-
ճեղքման վերաբերյալ: Թիրախները ճառագայթված են Սրևանի էլեկտրոնային արագացուցիչի
վրա 4,5 ԳէՎ մարսիմալ էներգիա ունեցող արգելակման γ -ճառագայթումով: Ներմուծված ակ-
տիվությունը չափված է $\text{Ge}(\text{Li})$ կիսահաղորդչային դետեկտորի օգնությամբ: Փորձնական
արդյունքների համեմատությունը Ռուդստամի կիսաէմպիրիկ բանաձևի հետ ցույց է տալիս
ֆոտոճեղքման ռեակցիաների էներգիայի սխառնմաստիկ շեղում: Ստացված է փորձնական և հաշվված
էներգիայի հարաբերության էքսպոնենցիալ կախվածություն թիրախ-միջուկի և մնացորդային մի-
ջուկների իզոտոպ սպինների երրորդ պրոեկցիաների տարբերությունից: Ռուդստամի բանաձևը
լրացված է նոր անդամով, որը բերում է տեսական և փորձնական արդյունքների լավ համընկ-
ման:

INVESTIGATION OF PHOTONUCLEAR REACTIONS IN ENRICHED ^{58}Ni AND ^{64}Ni NUCLEI

A. S. DANAGULIAN, S. S. DANAGULIAN, A. G. KHUDAVERDIAN

New results on the photospallation of enriched ^{58}Ni and ^{64}Ni nuclei at maximum
bremsstrahlung energy of 4.5 GeV are reported. The yields of residual nuclei were
measured by means of the activation method using a $\text{Ge}(\text{Li})$ detector. The results
were analyzed with the empirical Rudstam formula. Systematic displacement of
experimental data on the spallation reactions yields with respect to the calculations
was observed in the obtained results. The exponential dependence of the ratios of
experimental yields to the calculated ones upon the difference of the third projection
of isotopic spins of nuclei-targets and nuclei-products was obtained. To improve the
fitting of calculated values to experimental data, a new term was introduced into
the empirical Rudstam formula allowing for the exponential dependence of the spalla-
tion product yields.