

11
135



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

И. Левенберг, В. Покровский, И. Ютландов

P-996

ПРОСТЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
НА Ca^{48} ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

неЭТФ, 1962, т43, в.5, с.1619-1624.

Nucl. Phys., 1963, v41, n3, p504-510.

И. Левенберг, В. Покровский, И. Ютландов

P-996

ПРОСТЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
НА Ca^{40} ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

nr. 1491/5

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1962 год

А н н о т а ц и я

Исследованы реакции $/ p, pn /$, $/ p, 2n /$ и $/ p, n /$ на Ca^{48} в интервале энергий протонов 120-660 Мэв. Сечение реакции $/ p, pn /$ слабо зависит от энергии протонов и составляет около 105 мбн. Сечения реакций $/ p, 2n /$ и $/ p, n /$ уменьшаются с энергией протонов от ~ 20 мбн и ~ 8 мбн при 120 Мэв до ~ 6 мбн и ~ 2 мбн при 660 Мэв, соответственно /рис. 1 и табл. II /. Зависимости величин отношений $\sigma_{p,2n} / \sigma_{p,n}$ /рис. 2/ и $\sigma_{p,pn} / \sigma_{p,n}$ /рис. 3/ от энергии протонов и массового числа ядра-мишени могут быть истолкованы следующим образом:

- а/ Механизмы реакций $/ p, n /$ и первой стадии $/ p, 2n /$ одинаковы;
- б/ Вклад механизма прямого выбивания нейтрона в сечение реакции $/ p, pn /$ становится превалирующим уже в области энергий протонов порядка сотен Мэв.

J. Levenberg, V. Pokrovsky, I. Yutlandov

SIMPLE NUCLEAR REACTIONS ON Ca^{48} INDUCED BY HIGH ENERGY PROTONS

Abstract

The reactions (p, pn) , $(p, 2n)$, and (p, n) on Ca^{48} have been investigated in the proton energy range of 120-660 MeV. The cross section for (p, pn) reaction is weakly dependent on the proton energy and amounts to 105 mbs. The cross sections for $(p, 2n)$ and (p, n) reactions are decreasing with the proton energy from ~ 20 mbs and ~ 8 mbs at 120 MeV down to ~ 6 mbs and ~ 2 mbs at 660 MeV, respectively. (Fig. 1 and Table II). The dependencies of the ratios $\sigma_{p,2n} / \sigma_{p,n}$ (Fig. 2) and $\sigma_{p,pn} / \sigma_{p,n}$ (Fig. 3) on the proton energy and on the mass number of the nucleus target may be treated as follows:

- a) The mechanisms of (p, n) reaction and of the first stage of $(p, 2n)$ are the same;
- b) The contribution of the direct neutron knocking to the cross section of (p, pn) reaction is prevailing already in the proton energy range of order of hundreds of MeV.

Среди разнообразных ядерных реакций, происходящих при взаимодействии быстрых частиц со сложными ядрами, наибольший интерес вызывают так называемые "простые" реакции, сопровождающиеся испусканием из ядра 1-2 нуклонов. Причина этого заключается в значительном отличии экспериментальных величин сечений подобных реакций от рассчитанных на основе представлений Сербера^{/1/}. Так, для реакции / p, pp /, изученной подробнее других, экспериментальные величины сечений превышают рассчитанные в 3-4 раза /например, ^{/2/}/. Для объяснения этих расхождений было предположено, что простые реакции типа / p, pp /, / p, 2p /, / p, n / и др. происходят главным образом путем прямых взаимодействий с нуклонами диффузной поверхности ядра и что оболочечная структура ядра-мишени оказывает на них существенное влияние^{/2/}. Однако имеющихся в настоящее время экспериментальных данных недостаточно для надежного обнаружения этой зависимости. Кроме того, результаты опубликованных исследований, выполненных в различных лабораториях и различными методами, зачастую плохо согласуются друг с другом.

В связи с этим мы предприняли серию экспериментов по изучению простых реакций на "магических" и "не-магических" ядрах, близких друг к другу по A и Z. Настоящая работа посвящена изучению реакций / p, pp /, / p, 2p / и / p, n / на ядре ${}_{20}\text{Ca}^{48}$.

Техника эксперимента

а/ Мишень и условия облучения

Для облучения использовалась естественная смесь изотопов кальция. Мишень прессовалась в виде прямоугольной таблетки /15 x 4 x 1,5 мм/ из карбоната кальция. На основании того, что нам не удалось обнаружить в облученной мишени продуктов расщепления возможных тяжелых примесей, было сделано заключение о достаточно высокой степени чистоты вещества мишени.

Мишень облучалась на внутреннем пучке синхроциклотрона ОИЯИ в течение 15-20 минут. Пучок протонов проходил вдоль стороны мишени 1,5 мм. Изменение энергии бомбардирующих протонов достигалось установкой мишени на разные радиусы камеры ускорителя.

Определение интенсивности пучка протонов производилось по выходу реакции $\text{Al}^{27}(p, 3pn)\text{Na}^{24}$. Мишень была обернута тремя слоями алюминиевой фольги толщиной около 20 мк. Для измерения активности Na^{24} использовались средние слои, стоящие перед и за мишенью, вырезанные строго по размерам мишени. Разница в активностях этих двух фольг не превышала 10% и составляла в среднем около 5%.

б/ Химическая обработка мишени.

Облученная мишень растворялась в небольшом количестве разбавленной HCl в присутствии ~ 10 мг носителя Sc . После удаления CO_2 путем кипячения раствора добавлением NH_4OH осаждалась гидроксид скандия. Далее производилась радиохимическая очистка фракций кальция и скандия.

Кальций. Очистка фракции кальция заключалась в многократном осаждении оксалата кальция в присутствии удерживающего носителя на магний и сбросе радиоактивных загрязнений с помощью гидроксидов железа и скандия. Окончательно кальций осаждался в виде оксалата $/CaC_2O_4 \cdot H_2O/$, отфильтровывался на диск фильтровальной бумаги, промывался водой, этиловым спиртом, высушивался при $110^\circ C$ и взвешивался. Во избежание распыления образец заклеивался прозрачной клейкой лентой.

Скандий. Очистка фракции скандия заключалась в комбинации трех операций: осаждения фторида скандия с помощью Na_2SiF_6 , осаждения гидроксид скандия в присутствии удерживающего носителя на кальций и экстракции скандия трибутилфосфатом из концентрированного солянокислого раствора. Окончательно скандий осаждался в виде гидроксид, прокаливался при температуре $\sim 1000^\circ C$ до постоянного веса, взвешивался, наносился на диск фильтровальной бумаги и заклеивался прозрачной клейкой лентой.

в/ Измерения активности.

Измерения активности препаратов производились на сцинтилляционном γ -спектрометре с кристаллом $NaJ(Tl)$ размером 40×40 мм и 128-канальным анализатором АМА-3с^{13/}. Отношение абсолютных активностей продуктов изучаемых реакций и Na^{24} находилось путем сравнения интенсивностей характерных γ -линий с учетом схем распада и эффективности счета. Эффективность спектрометра к γ -лучам разной энергии была определена с помощью источников Ce^{141} , Hg^{203} , Cs^{137} , Na^{22} и Co^{60} , абсолютная активность которых измерялась на 4π -ном газовом проточном счетчике. Радиоактивные характеристики изотопов, использованные в расчетах сечений изучаемых реакций, приведены в таб. 1.

Т а б л и ц а 1

Я д р о	Период полураспада	Энергия характерной γ -линии, Кэв	Число γ -квантов на распад, %	С с ы л к а
Na 24	15,0 час	1368	100	3
Ca 47	4,53 дн.	1300	74	3,4
Sc 47	3,4 дн.	160	67	3
Sc 48	44 час	1315	100	3

В случае Sc^{47} , кроме обычных поправок на изотопный состав мишени, химический выход, время облучения и т.д., учитывалось также накопление Sc^{47} за счет распада Ca^{47} .

г/ Вклад вторичных процессов.

Наличие вторичных нейтронов в камере ускорителя может привести к имитации реакций $/p, pn/$, $/p, 2n/$ и $/p, n/$ реакциями $/n, 2n/$, $/n, 2pn^-/$ и $/n, pn^-/$,

соответственно. Так как реакции с испусканием мезонов имеют очень малые сечения, контрольные опыты были поставлены только для оценки вклада реакции / $p, 2n$ / в сечение реакции / p, pn /. Было установлено, что этот вклад не превышает нескольких процентов, и в дальнейших расчетах он не учитывался.

Результаты экспериментов

Величины сечений реакций / p, pn /, / $p, 2n$ / и / p, n / в миллибарнах в интервале энергий бомбардирующих протонов от 120 до 660 Мэв сведены в таб. II. Там же приведены сечения мониторинжной реакции /5/.

Т а б л и ц а II .

$E_p,$	120	200	300	400	500	600	660
(p, pn)	118 \pm 2	106 \pm 10	106 \pm 4	101 \pm 4	104 \pm 1	110 \pm 8	110 \pm 2
($p, 2n$)	20,3 \pm 1,6	18,6 \pm 0,6	11,0 \pm 0,1	8,7 \pm 0,3	8,7 \pm 0,1	6,2 \pm 1,0	5,7 \pm 0,3
(p, n)	7,8 \pm 0,3	4,7 \pm 1,2	4,1 \pm 0,3	3,6 \pm 0,1	3,9 \pm 0,2	2,2 \pm 0,2	2,6 \pm 0,1
$^{47}_{20}Ca(p, 3pn)$	10,2	9,1	11,0	11,3	11,1	11,0	10,9

Указанные сечения представляют собой средние из двух-трех определений, а погрешности - средние квадратичные ошибки. Общая точность определения сечений составляет, по нашей оценке, 10-15%. Кроме того, приведенные величины сечений включают в себя ошибки, связанные с неопределенностями в схемах распада ядер - продуктов и в сечении мониторинжной реакции.

Соответствующие функции возбуждения изображены на рис. 1. Отметим, что сечение реакции / p, pn /, по-видимому, несколько завышено за счет вклада реакции $Ca^{48}(p, 2p)K^{47}$. Ядро K^{47} не известно. По всей вероятности оно крайне неустойчиво и может распадаться с образованием Ca^{47} .

Обсуждение результатов

Обращает на себя внимание различное поведение функций возбуждения исследованных реакций /рис. 1/. Сечение реакции / p, pn / падает в интервале энергий протонов 120-200 Мэв и далее остается практически постоянным, имея, может быть, некоторую тенденцию к увеличению. Сечения же реакций / $p, 2n$ / и / p, n / монотонно убывают с энергией. Аналогичное поведение функций возбуждения простых реакций наблюдается и на других ядрах /например, /6,8/ /.

Можно предположить, что наиболее существенным механизмом всех исследованных реакций является первичное взаимодействие падающего протона с нейтроном ядра. Характер этого взаимодействия определяет тот или иной канал реакции. С этой точки зрения представляет интерес рассмотреть отношения сечений простых реакций в зависимости от энергии бомбардирующих частиц.

На рис. 2 представлены отношения сечений реакций / $p, 2n$ / и / p, n / для

Ca^{48} , $\text{Ga}^{69}/8-9/$ и $\text{Y}^{89}/10/$. Нетрудно видеть, что во всех случаях $\sigma_{p,2n}/\sigma_{p,n}$ очень слабо зависит от энергии бомбардирующих протонов. Заметим, что для Ga^{68} величина $\sigma_{p,2n}/\sigma_{p,n}$ остается практически постоянной вплоть до $E_p = 2,9$ Бэв.

Это постоянство может служить указанием на то, что механизмы реакции $/p, n/$ и первой стадии реакции $/p, 2n/$ одинаковы. При этом предположении для объяснения постоянства $\sigma_{p,2n}/\sigma_{p,n}$ требуется, чтобы вероятность образования остаточного ядра с возбуждением, необходимым для испарения только одного нейтрона, слабо зависела от энергии падающего протона. Косвенным подтверждением этого является слабая зависимость средней энергии возбуждения остаточных ядер после каскада $/p$, нуклон^{11/} от E_p .

Сделанное нами предположение означает также, что вклад каскада $p, 2n$ в сечение реакции $/p, 2n/$ мал. Действительно, средняя энергия возбуждения остаточного ядра после каскада $p, 2n$ составляет около 85 Мэв при $E_p \geq 200$ Мэв ($A = 64-100$), а вероятность образования остаточного ядра с возбуждением ≤ 10 Мэв близка к нулю^{11/}.

Абсолютные значения отношения $\sigma_{p,2n}/\sigma_{p,n}$ сильно зависят от массового числа ядра - мишени /рис. 2/. Такую же резкую зависимость от A обнаруживают и величины отношений $\sigma_{p,pn}/\sigma_{p,2n}$, которые к тому же различным образом изменяются с энергией бомбардирующих протонов. Ограниченность экспериментального материала затрудняет интерпретацию этих фактов.

Совершенно иное поведение обнаруживает отношение сечений реакций $/p, pn/$ и $/p, n/$. На рис. 3 представлены отношения $\sigma_{p,pn}/\sigma_{p,n}$ для Ca^{48} , $\text{Ga}^{69(8,9)}$, $\text{Y}^{89(10)}$ и $\text{Th}^{232(12,13)}$. Как видно, величина отношения $\sigma_{p,pn}/\sigma_{p,n}$ сильно зависит от энергии бомбардирующих протонов и практически не зависит от числа нуклонов в ядре - мишени.

Отсутствие зависимости от числа нуклонов в ядре можно объяснить следующим образом. Согласно современным представлениям, реакции $/p, pn/$ и $/p, n/$ происходят в периферической области ядра и каждая из них должна быть чувствительна к деталям структуры ядра^{14/}. Естественно предположить, что число нейтронов, "доступных"^{x/} для реакций $/p, pn/$ и $/p, n/$, одинаково, если не учитывать энергии перестройки ядер. Отсюда вытекает, что отношение $\sigma_{p,pn}/\sigma_{p,n}$ не должно зависеть от числа "доступных" нейтронов, т.е. от свойств ядра-мишени.

Для данного ядра мишени с увеличением энергии бомбардирующих протонов возрастает относительная вероятность вылета обеих сталкивающихся частиц /падающего протона и нейтрона ядра/. В то же время уменьшается относительная вероятность рассеяния падающего протона на большой угол и поглощения его ядром / что должно приводить к реакции $/p, n/$. Это и вызывает существенное возрастание величины отношения $\sigma_{p,pn}/\sigma_{p,n}$ с энергией бомбардирующих протонов.

^{x/} Т.е. вырывание которых не приводит к сообщению ядру энергии возбуждения, большей энергии связи нейтрона.

Вклад в сечение реакции $/ p, pn /$ процесса прямого выбивания нейтрона при $E_p > I$ Бэв составляет по оценке Бениоффа^{/14/} не менее 95%. Отмеченные нами особенности поведения отношения $\sigma_{p,pn} / \sigma_{p,n}$ позволяют считать, что этот механизм становится превалирующим уже в области энергий протонов порядка сотен Мэв.

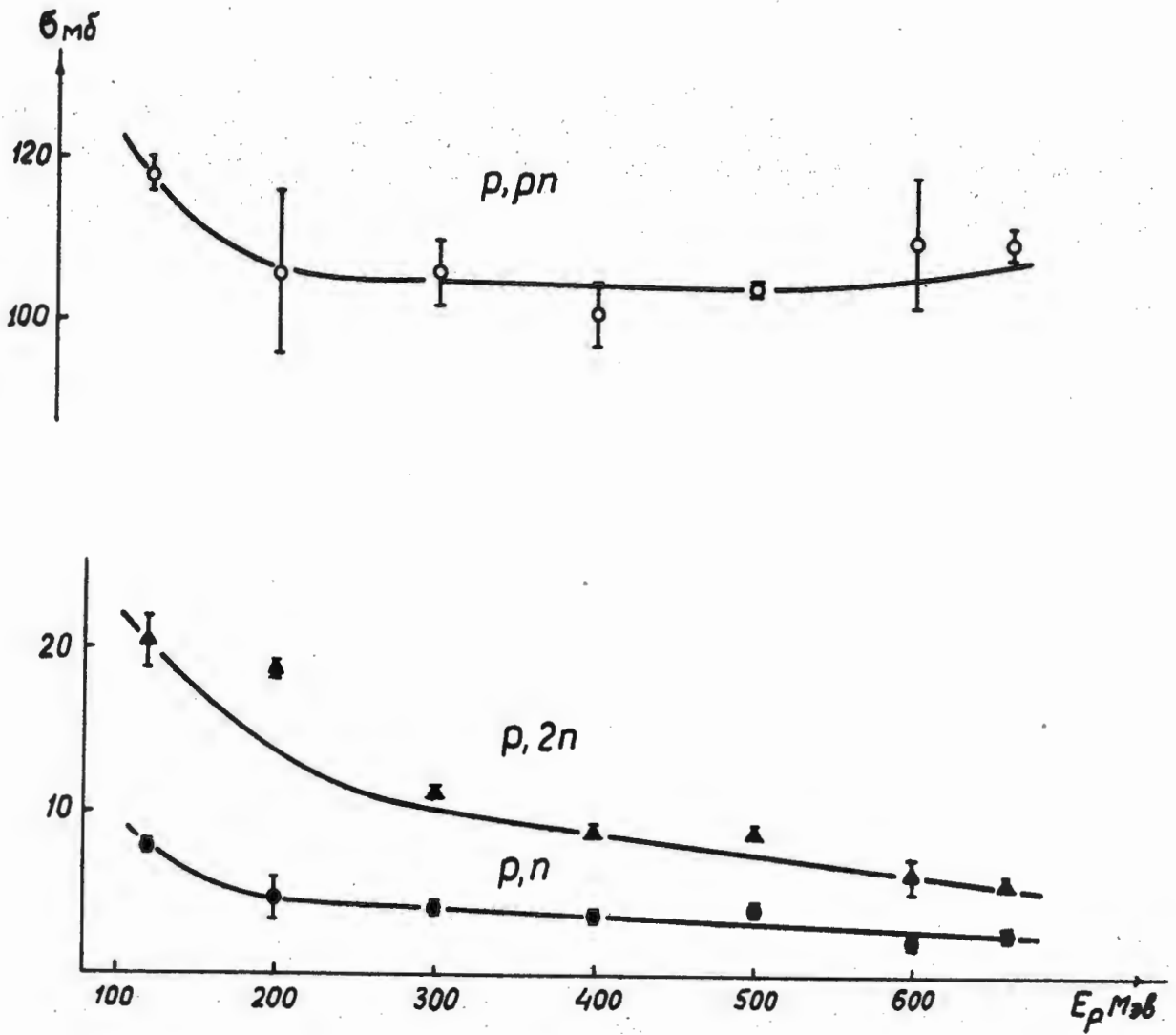
На рис. 3 не приведены соответствующие отношения для Cu^{65} при $E_p = 340 M_{Эв}^{/15/}$, равное 100, и для U^{238} при $E_p = 340 M_{Эв}^{/12/}$, равное 185, и при $E_p = 680 M_{Эв}^{/16/}$, равное 250. Большое значение $\sigma_{p,pn} / \sigma_{p,n}$ для U^{238} следует, по-видимому, объяснить тем, что поглощение рассеянного на большой угол протона приводит в большинстве случаев к делению ядра и, значит, к уменьшению сечения реакции $/ p, n /$. Что же касается Cu^{65} , то причина расхождения не ясна. Возможно, что оно обусловлено сравнительно невысокой точностью определения сечений в первых опытах по взаимодействию быстрых частиц со сложными ядрами.

Наконец, отметим, что как для Ca^{48} , так и для Th^{232} , экспериментальные сечения включают в себя вклад от реакции $/ p, 2p /$. Вполне вероятно, что учет этого вклада приведет к еще более тесной группировке отношений $\sigma_{p,pn} / \sigma_{p,n}$ для различных ядер.

Авторы искренне благодарят Л.И. Лапидуса, М.Г. Мещерякова и А.Н. Мүрина за интерес к работе и полезные дискуссии и Ю.В. Норсеева и Л.М. Тарасову за помощь при химической обработке мишеней.

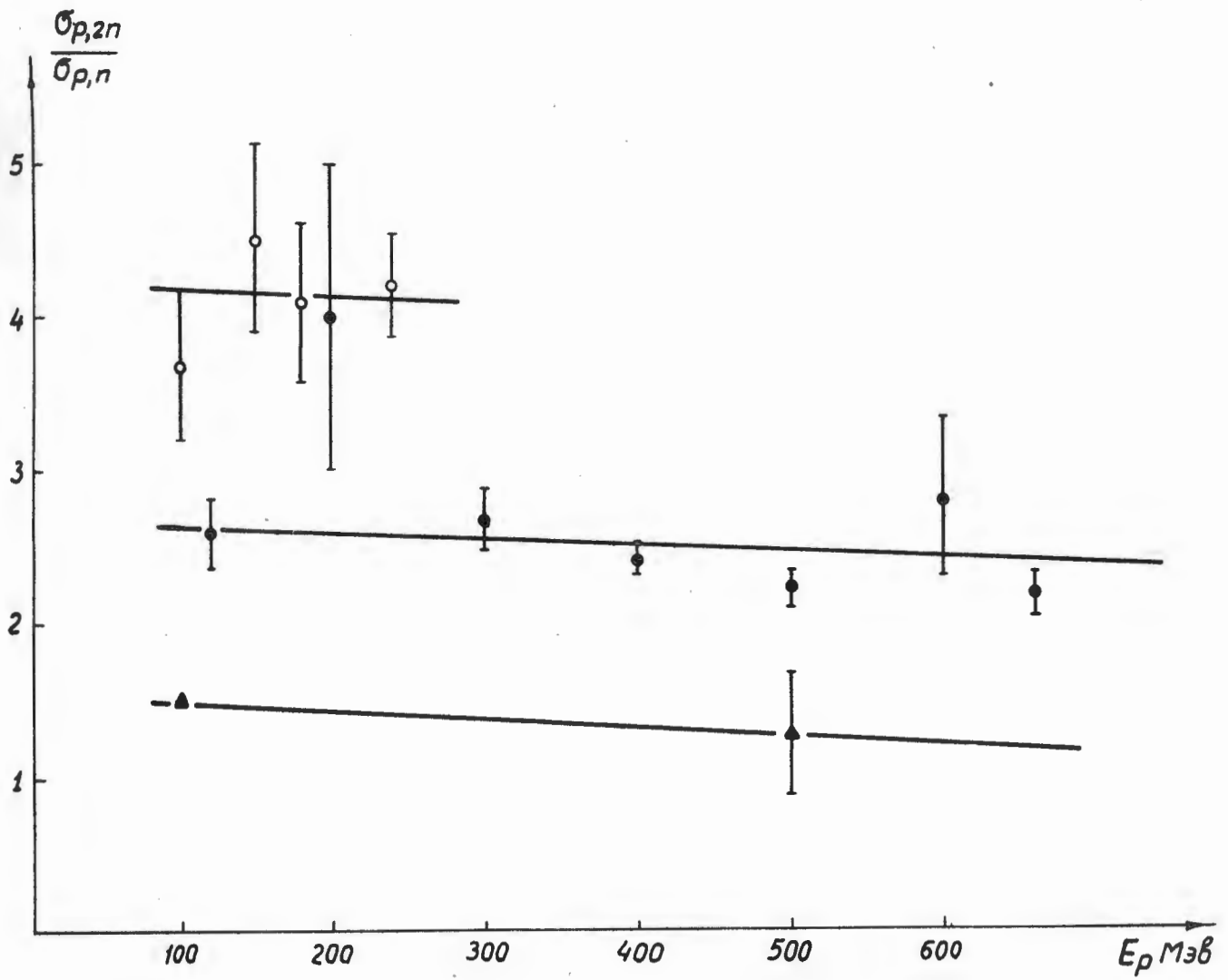
Л и т е р а т у р а

1. R.Serber, Phys. Rev. 72, 114 (1947).
2. Miller J.M., Hudis, J., Ann. Rev. Nucl. Sci. 9, 1959. Harvey B.G., Prog. Nucl. Phys. 7, 1959.
3. Strominger D., Hollander J.M., Seaborg G.T., Rev. Mod. Phys. 30, 585 (1958).
Джелепов Б.С., Пекер Л.К. "Схемы распада радиоактивных ядер", АН СССР, 1958.
4. Wyatt E.J., Reynolds S.A., Handley T.H., Lion W.S. Parker H.A., Nucl. Sci. Eng. 11, 74 (1961).
5. Bruninx E. "High-energy nuclear reaction cross-sections", CERN 61-1.
6. Yule H.R., Turkevich A., Phys. Rev. 118, 1591 (1960).
7. Strohal P.P., Caretto A.A., Phys. Rev. 121, 1815 (1961).
8. Porile N.T., Phys. Rev. 125, 1379 (1962).
9. Meadows J.W., Phys. Rev. 98, 744 (1955).
10. Caretto A.A., Wiig E.O., Phys. Rev. 115, 1238 (1959).
11. Metropolis N., Bivins R., Storm M., Turkevich A., Miller J.M., Friedlander G., Phys. Rev. 110, 185 and 204 (1958).
12. Lindner M., Osborne R.N., Phys. Rev. 103, 378 (1956).
13. Lefort M., Simonoff G.N., Tarrago X., Nucl. Phys. 25, 216 (1961).
14. Benioff P.A., Phys. Rev. 119, 324 (1960).
15. Batzel R.E., Miller D.R., Seaborg G.T., Phys. Rev. 84, 671 (1951).
16. Pate B.D., Poskanzer A.M., Phys. Rev. 123, 647 (1961).



Р и с. 1.

Функции возбуждения реакций
 / p, pn / , / $p, 2n$ / и / p, n / на Ca^{48} .

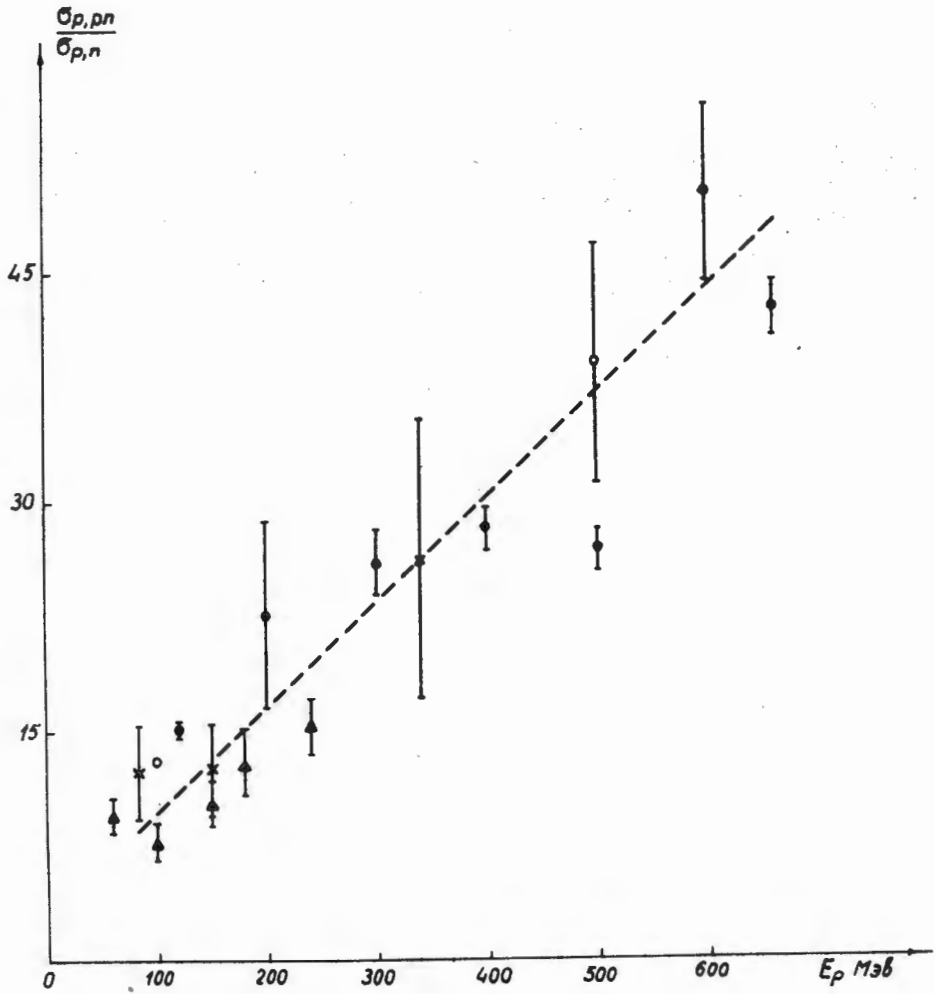


Р и с. 2. Зависимость отношений $\sigma_{p,2n}/\sigma_{p,n}$ от энергии бомбардирующих протонов при $E_p \geq 100$ Мэв

• Ca^{48}

▲ Ga^{69}

○ Y^{89}



Р и с. 3.

Зависимость отношений $\frac{\sigma_{p,pn}}{\sigma_{p,n}}$ от энергии бомбардирующих протонов

- Ca⁴⁸
- Ga⁶⁹
- ▲ Y⁸⁹
- × Th²³²