

11
к89

632



В.В. Кузнецов

632

ОБРАЗОВАНИЕ ТРИТИЯ
В СВИНЦЕ И АЛЮМИНИИ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ,
ДЕЙТРОНОВ И α -ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ЖЭТФ, 1961, т 40, в. 5, стр 1263-1269.

Дубна 1980 год

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.В. Кузнецов

632

928/8 чг.

ОБРАЗОВАНИЕ ТРИТИЯ
В СВИНЦЕ И АЛЮМИНИИ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ,
ДЕЙТРОНОВ И α -ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А н н о т а ц и я

В настоящей работе излагаются экспериментальные данные по образованию трития в свинце и алюминии при бомбардировке дейтронами с энергией 70-390 Мэв и α -частицами с энергией 140-750 Мэв, а также в цинке и кадмии при бомбардировке α -частицами с энергией 750 Мэв. Приведены выходы трития из различных толщин мишеней алюминия и свинца при бомбардировке протонами с энергией 660 Мэв.

Методика эксперимента

Образование трития в веществе под воздействием высокоэнергичных протонов изучалось многими авторами /1-9/. Однако работ по исследованию образования трития в веществе под воздействием дейтронов и α -частиц сделано сравнительно немного /5,10/.

Настоящее исследование было предпринято с целью изучения особенностей явления образования трития в металлах под воздействием дейтронов и α -частиц высоких энергий.

В данной работе, так же как и в работе /7/, в качестве мишеней для облучения были взяты алюминиевые и свинцовые образцы. Образцы металлов размером $1,5 \div 2 \times 6 \times 15 \div 30$ мм бомбардировались дейтронами в диапазоне энергий 70-390 Мэв и α -частицами в диапазоне энергий 140-750 Мэв на внутреннем пучке синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований.

Для облучения образцы закреплялись на массивном алюминиевом держателе по 3 + 6 штук одновременно. Теплоотвод от мишеней осуществлялся за счет держателя и плотного прижатия последнего к пробнику синхроциклотрона. Кроме того, в случае облучения свинцовых образцов интенсивность дейтронов снижалась в 2+3 раза по сравнению с максимальной, равной $2 \cdot 10^{12}$ дейтронов/сек. в пучке. Интенсивность пучка α -частиц составляла $4 \div 5 \cdot 10^{10}$ α -частиц/сек.

Пучок высокоэнергичных дейтронов и α -частиц проходил вдоль стороны длиной 6 мм. Энергия бомбардирующих частиц задавалась в каждом случае путем установки мишеней на различные радиусы орбиты ускоряемых частиц внутри вакуумной камеры синхроциклотрона. Времена облучения мишеней дейтронами составляли 2 + 5 минут и α -частицами - 5 + 20 минут.

Количество трития в облученной мишени определялось путем выделения из мишени тритиевой компоненты с помощью вакуумной системы, схема которой представлена на рис. 1. Вакуумная система состоит из кварцевой трубки для расплавления мишеней, палладиевого фильтра с электронагревателем, служащего для отделения водородотритиевой смеси от остальных газообразных продуктов реакции; ртутного насоса, с помощью которого создавался необходимый перепад давлений при перепуске активной смеси водорода с тритием; гайгеровского счетчика, защищенного сталью толщиной 35 мм и свинцом толщиной 35 мм.

Кроме того, система снабжена стеклянными резервуарами для водорода, чистого гелия, спирта и резервным объемом для разбавления высокоактивной смеси.

Расплавление облученной мишени производилось в кварцевой трубке объемом 200 см^3 в атмосфере водорода при давлении 40 ± 100 мм рт.столба. Расплавленная мишень выдерживалась в атмосфере водорода при температуре $850 \pm 950^\circ \text{C}$ в течение 40 ± 100 минут. При этих условиях выделение трития из мишени составляло $\sim 90\%$, что было установлено повторными расплавлениями тех же мишеней в таких же условиях.

Вакуумная система позволяет отбирать для измерений от 0,04 до 0,63 части водородотритиевой смеси, получаемой при расплавлении мишеней; при этом давление в счетчике, создаваемое этой смесью, составляло от 1 до 25 мм рт. столба. Регистрация β - частиц от распада трития осуществлялась цилиндрическим счетчиком объемом $\sim 200 \text{ см}^3$ с медным катодом. В счетчик кроме водородотритиевой смеси добавлялась рабочая смесь - пары этилового спирта при давлении 15 мм рт. столба и гелий при давлении 95-100 мм рт.столба.

Счетчик работал в гайгеровском режиме и имел в большинстве случаев следующие характеристики: плато в пределах 100 ± 150 в, наклон плато не превышал 10% на 100 в, собственный фон 130 ± 200 имп/мин. В случае большого давления водорода / > 15 мм рт.столба / характеристики ухудшались - плато $\sim 50-80$ в, наклон плато 15 ± 20 % на 100 в.

Измеряемая активность трития составляла 500 ± 10000 имп/мин. Эффективность регистрации счетчиком β -частиц от распада трития оценивается $\sim 90\%$,

Мониторирование пучка дейтронов и α -частиц проводилось с помощью алюминиевых фольг как и в работе /7/. Зависимость выходов $Al^{27}(d, \alpha \rho) Na^{24}$ и $Al^{27}(\alpha, \alpha \rho n) Na^{24}$ от энергии бомбардирующих частиц была взята из работ /11,12/, причем сечения образования Na^{24} из алюминия при энергиях дейтронов свыше 200 Мэв и α -частиц свыше 400 Мэв определялись путем экстраполяции кривых выходов Na^{24} в область больших энергий. Сечение образования Na^{24} из алюминия в случае дейтронов с энергией 270 Мэв и 390 Мэв оценивается равным ~ 22 мб, в случае же α -частиц оценивается равным ~ 20 мб и ~ 18 мб для энергий α -частиц 540 Мэв и 750 Мэв, соответственно.

Регистрация β -частиц от распада Na^{24} производилась на торцевом счетчике со слюдяным окошком толщиной < 5 мг/см². Детектирующее устройство регистрировало $\sim 18\%$ всей активности образца.

Результаты эксперимента

Относительные выходы $\frac{N^T}{N^{Na}}$ и сечения σ_T ^{x/} трития из алюминия

и свинца при бомбардировке дейтронами с энергией 70-390 Мэв и α -частицами с энергией 140 \pm 750 Мэв приведены в таблице №1. В этой же таблице даны относительные выходы трития из цинка и кадмия при бомбардировке α -частицами с энергией 750 Мэв. Указанные в таблице относительные выходы являются средними не менее, чем из пяти независимых измерений, за исключением данных для Zn и Cd, для которых средние величины получены по двум измерениям. В этой таблице указаны среднеквадратичные

^{x/} Сечение образования трития определялось по формуле $\sigma_T = \frac{N^T}{N \cdot Na} \sigma_{Na}$, а

$N = \frac{N_0 e^{-\lambda t_2}}{1 - e^{-\lambda t_1}}$, где t_1 - время облучения мишени, t_2 - время от конца облучения мишени до начала измерения образца мишени, N - активность препарата, отнесенная к одному граммотому вещества мишени в момент времени t_2 , λ - постоянная распада.

ошибки измерений относительных выходов $\frac{N_T}{N_{Na}}$. При определении сечений образования трития σ_T учитывались систематические ошибки опыта и ошибки в определении сечения Na^{24} из алюминия.

Из построенной гистограммы отклонений относительных выходов трития от среднего в %% по всем опытам была оценена вероятная погрешность опыта. Погрешность, равная полуширине полученного распределения, близкого к кривой Гаусса, оказалась $< 15\%$.

На рис. 2 и рис. 3 показаны зависимости относительных выходов трития из алюминия и свинца от энергии бомбардирующих дейтронов и α -частиц, соответственно.

Как видно из этих рисунков, относительные выходы трития из алюминия возрастают сравнительно слабо с ростом энергии бомбардирующих дейтронов и α -частиц; из свинца рост более заметен как в случае дейтронов, так и в случае α -частиц, причем наиболее заметный рост наблюдается в случае бомбардировки α -частицами.

Т а б л и ц а №1

Материал мишени	Бомбардирующая частица	Энергия бомбардирующих частиц, Мэв	Относительный выход трития	Сечение σ_T , мбрн	Число опытов
Алюминий	Дейтрон	70	$0,57 \pm 0,10$	$12,5 \pm 3,1$	6
Свинец	- " -	70	$1,85 \pm 0,44$	$40,8 \pm 12,5$	6
Алюминий	- " -	150	$1,33 \pm 0,05$	$29,2 \pm 4,7$	6
Свинец	- " -	150	$3,60 \pm 0,13$	$79,2 \pm 12,8$	6
Алюминий	- " -	270	$1,35 \pm 0,05$	$29,7 \pm 4,6$ x/	6
Свинец	- " -	270	$3,78 \pm 0,22$	$83,6 \pm 14,6$ x/	5
Алюминий	- " -	390	$1,73 \pm 0,06$	$38,1 \pm 6,0$ x/	9
Свинец	- " -	390	$3,97 \pm 0,81$	$87,3 \pm 15,9$ x/	12
Алюминий	α -частица	140	$1,48 \pm 0,16$	$44,7 \pm 9,1$	8
Свинец	- " -	140	$3,27 \pm 0,41$	$98,1 \pm 21,2$	13
Алюминий	- " -	300	$2,10 \pm 0,12$	$52,5 \pm 9,2$	6
Свинец	- " -	300	$3,76 \pm 0,74$	$94,0 \pm 25,4$	8
Алюминий	- " -	540	$2,62 \pm 0,42$	$52,4 \pm 9,6$ x/	6
Свинец	- " -	540	$4,88 \pm 1,04$	$97,6 \pm 27,0$ x/	10
Алюминий	- " -	750	$2,71 \pm 0,17$	$48,8 \pm 8,6$ x/	6
Цинк	- " -	750	$4,40 \pm 0,45$	$79,2 \pm 16,0$ x/	2
Кадмий	- " -	750	$4,80 \pm 1,30$	$86,4 \pm 27,2$ x/	2
Свинец	- " -	750	$10,82 \pm 0,75$	$194,8 \pm 35,4$ x/	14

x/ Сечения образования трития σ_T автор оценил, используя экстраполированные данные по образованию Na^{24} из алюминия /11,12/ под воздействием высокоэнергичных дейтронов и α -частиц.

На рис. 4 показана зависимость выхода трития от атомного номера элементов при энергии α -частиц 750 Мэв. Наблюдается монотонный рост выхода трития с увеличением атомного номера элемента также как и в случае бомбардировки протонами с энергией 450 Мэв и 660 Мэв^{17/}. При энергии α -частиц 750 Мэв выход трития от алюминия к свинцу меняется в 4 раза при изменении A в ~ 8 раз.

Чтобы обосновать выбор толщины мишеней для облучения был поставлен эксперимент по определению выходов трития из алюминиевых и свинцовых мишеней различной толщины. На внутреннем пучке протонов с энергией 660 Мэв были облучены свинцовые мишени толщиной $60 \div 1500 \mu$ и алюминиевые мишени толщиной $500 \div 2000 \mu$. Мишени, каждая шириной 6мм и длиной 20 мм, укреплялись на алюминиевом держателе по три штуки в ряд. Пучок проходил вдоль шестимиллиметровой стороны мишени. Свинцовые мишени закрывались алюминием толщиной 2мм. При такой постановке опыта достигалось, с одной стороны, снижение числа протонов, проходящих через свинцовые мишени, более чем в 10 раз по сравнению с максимальной интенсивностью, равной $5 \cdot 10^{12}$ протонов/сек., и, с другой стороны, достигалось более равномерное распределение потока протонов по всей толщине мишени.

На рис. 5 нанесены экспериментальные выходы трития из алюминиевых и свинцовых мишеней различной толщины. Из рисунка видно, что при толщинах свинца более 800μ и алюминия более 500μ выход трития практически не меняется с возрастанием толщины мишени, а при толщинах свинца < 800 наблюдается уменьшение выхода трития. В случае свинца при такой постановке опыта можно косвенным образом оценить энергетический спектр тритонов. На рисунке приведены рассчитанные кривые выходов трития из свинцовых мишеней различной толщины. Метод расчета подобен описанному в работе^{13/} для вылета Li -фрагментов из свинца в процессе облучения протонами,

В настоящей работе при расчете предполагалось, что наблюдаемый в опытах тритий при облучении мишеней образуется только по механизму испарения, а угловое распределение образуемых тритонов изотропно. Энергетический спектр

трионов выбирался по формуле $P(E) = \frac{E - V}{E^2} \exp\left(-\frac{E - V}{\tau}\right)$, предложенной в работе /14/. Параметры τ и V , имеющие значение температуры ядра и кулоновского барьера, подбирались таким образом, чтобы удовлетворить экспериментальным данным.

На рис. 5 показаны две рассчитанные кривые для спектров с параметрами $\tau = 3,5$ Мэв и $V = 7$ Мэв — сплошная кривая и при $\tau = 5$ Мэв и $V = 7$ Мэв — пунктирная кривая. Наиболее удовлетворительное согласие эксперимента с расчетом достигается при выборе спектра трионов с параметрами $\tau = 5$ Мэв и $V = 7$ Мэв.

Средняя температура $\tau = 5$ Мэв оказывается выше, чем предсказывается существующей теорией испарения / $\tau = 3$ Мэв/. Это указывает на то, что образование трития под воздействием протонов высокой энергии обязано не только механизму испарения. Действительно, в работе /5/ наблюдалась некоторая анизотропия тритонов, направленная вперед как при облучении протонами, так и дейтронами и α -частицами, а в работе /8/ среди основной части испарительных тритонов наблюдалось наличие быстрых тритонов / $\sim 10\%$ /, что не объясняется существующей теорией испарения. Из экспериментальных выходов трития при различных толщинах мишеней свинца видно, что кинетическая энергия образуемых тритонов, в основном не превышает 30-40 Мэв. При данной постановке опыта при определении выходов трития возможен дополнительный вклад от каскадных нейтронов и нейтронов испарительного происхождения как из экранирующего алюминия, так и самой мишени. Для того, чтобы определить дополнительный вклад тритонов от процессов взаимодействия испарительных и каскадных нейтронов с экранирующей мишенью алюминием, был поставлен специальный эксперимент: стопка из 14 одинаковых фольг толщиной 400 μ каждая облучалась дейтронами с энергией 400 Мэв на внутреннем пучке синхроциклотрона в течение 10 минут. Активность фольг спадала вглубь стопки — от первой до четырнадцатой фольги. Идея опыта заключалась в том, чтобы определить систематическое увеличение отношения $\frac{N_{\text{Li}}^{\infty}}{N_{\text{Na}}^{\infty}}$ по мере перехода от первой фольги до последней вглубь стопки. Такое возрастание не было обнаружено, что указывает на то, что дополнительный вклад трития от процессов взаимодействия каскадных нейтронов и нейтронов испарительного происхождения с алюминием незначителен и не превышает 10%.

Обсуждение результатов

Из рисунков № 2 и № 3 и таблицы № 1 видно, что не наблюдается сильного роста выходов трития из алюминия в зависимости от энергии бомбардирующих частиц; в случае же выходов трития из свинца наблюдается заметный рост выхода трития при бомбардировке дейтронами и особенно заметен рост при бомбардировке α -частицами в диапазоне энергий 540-750 Мэв. По-видимому, в последнем случае резкий рост выхода трития обязан значительному увеличению энергии возбуждения за счет захвата внутри ядра π -мезонов, рожденных в нуклон-нуклонных столкновениях.

Автор оценил средние энергии возбуждения в случае облучения алюминия и свинца дейтронами и α -частицами, исходя из экспериментальных данных настоящей работы и работы /7/ и используя формулы Хагедорна и Макке, указывающие на прямую зависимость вероятности образования трития от энергии возбуждения ядра. Сопоставляя данные этих работ, можно сделать вывод, что дейтроны с энергией 70 Мэв и α -частицы с энергией 140 Мэв, попадая в ядро мишени, почти полностью отдают свою энергию на возбуждение ядра. Отсюда средняя энергия возбуждения ядер алюминия и свинца при энергии бомбардирующих дейтронов 390 Мэв оценивается равной ~ 65 Мэв и ~ 110 Мэв, соответственно; средняя энергия возбуждения ядер алюминия и свинца при энергии α -частиц 750 Мэв оценивается равной ~ 150 Мэв и ~ 180 Мэв, соответственно.

Из анализа сечений образования трития на дейтронах, α -частицах и протонах /7/ при энергиях < 200 Мэв видно, что наибольшая вероятность образования трития наблюдается в случае облучения α -частицами, затем дейтронами и, наконец, протонами. По-видимому, дейтрон или α -частицу, влетевшую в ядро мишени, следует рассматривать, соответственно, как два или четыре независимых нуклона, которые участвуют в развитии каскада в ядре независимо друг от друга, что приводит, по-видимому, к большой передаче энергии ядру мишени, и, следовательно, к большей вероятности образования трития. Однако, не

следует забывать, что при бомбардировке дейтронами и α -частицами возможен вклад в образование тритонов от процессов захвата нейтрона дейтроном и срыва протона от α -частицы /5,15/ в поле ядерных сил.

В заключение автор приносит благодарность Кузнецовой М.Я., Мехедову В.Н. и Халкину В.А. за ряд критических замечаний и интерес к работе.

Л и т е р а т у р а

1. L.A.Currie, W.F.Libby, R.L.Wolfgang. Phys.Rev. 101, 1557, 1956.
2. E.L.Fireman, F.S.Rowland. Phys.Rev. 97, 780, 1955.
3. E.L.Fireman. Phys.Rev. 97, 1303, 1955.
4. E.L.Fireman, I.Zahringer. Phys.Rev. 107, 1695, 1957.
5. W.H.Wade, I.Gonzalez-Vidal, R.A.Glass, G.T.Seaborg. Phys.Rev. 107, 1311, 1957.
6. K.Goebel, European Organization for Nuclear Research Report, CERN 58-2 (Geneva). 1958.
7. В.В.Кузнецов, В.Н.Мехедов. ЖЭТФ, 35, 587, 1958.
8. M.Lefort, G.Simonof, X.Tarrago and R.Bibron. J. Phys.Radium, 20, 959, 1959.
9. L.A.Currie. Phys.Rev. 114, 878, 1959.
10. I.L.Yutema. Phys.Rev.Letter. 4, No.6, 297, 1960.
11. R.E.Batzel, W.W.T.Crane and G.D.O'Kelley. Phys.Rev. 91, 939, 1953.
12. M.Linder and R.N.Osborne. Phys.Rev. 91, 342, 1953.
13. Ван Юн-юй, В.В.Кузнецов, М.Я.Кузнецова, В.Н.Мехедов, В.А.Халкин, ЖЭТФ, 9, 1960г.
14. W.Heisenberg. Vorträge über kosmische Strahlung, Berlin, 1953.
15. I.B.Mead, B.L.Cohen. Phys.Rev.Letter. 5, No.3, 105, 1960.

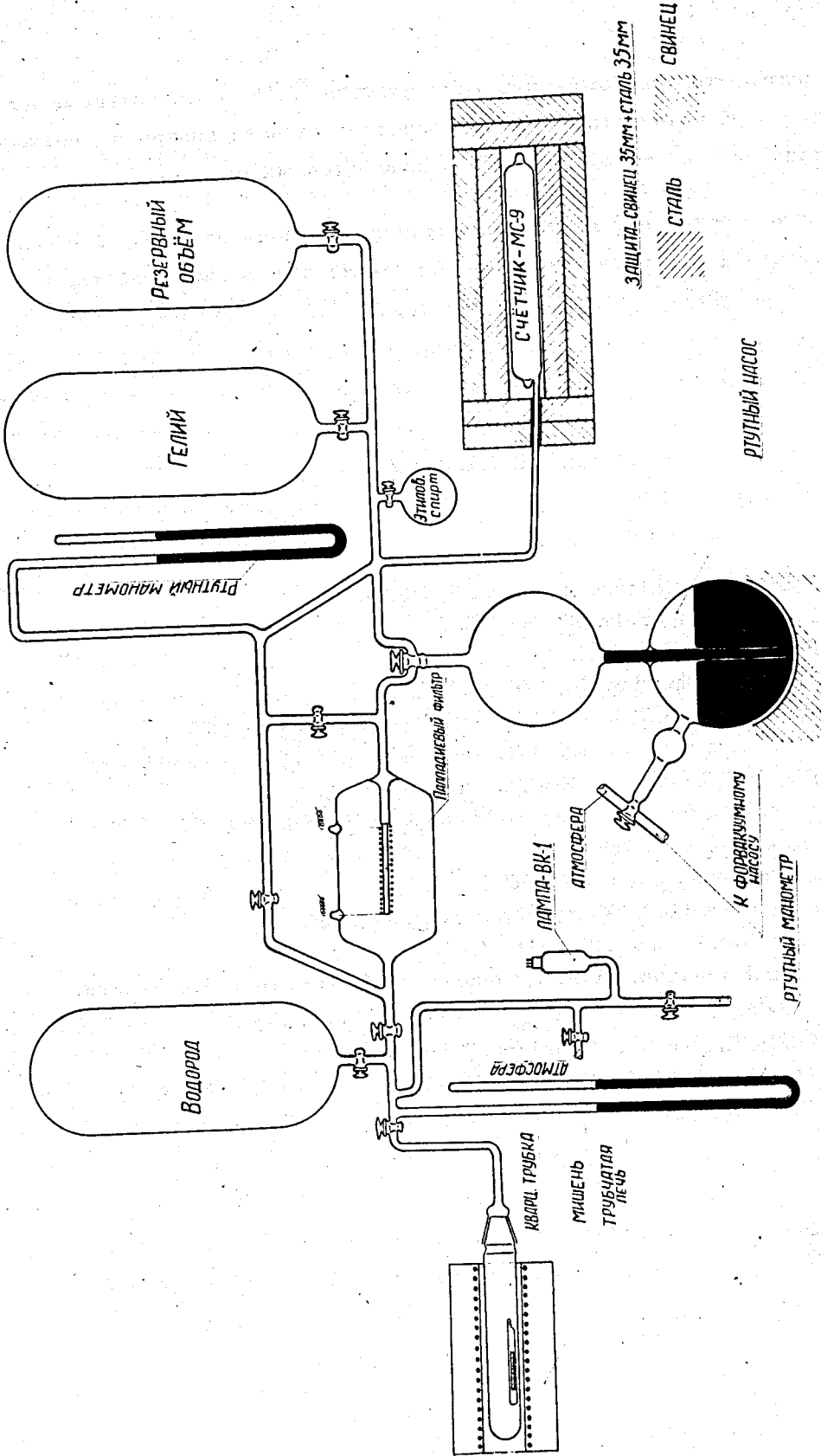


Рис. 1. Схема вакуумной системы для определения количества трития, образующегося в различных элементах под действием протонов, дейтронов и α -частиц высоких энергий.

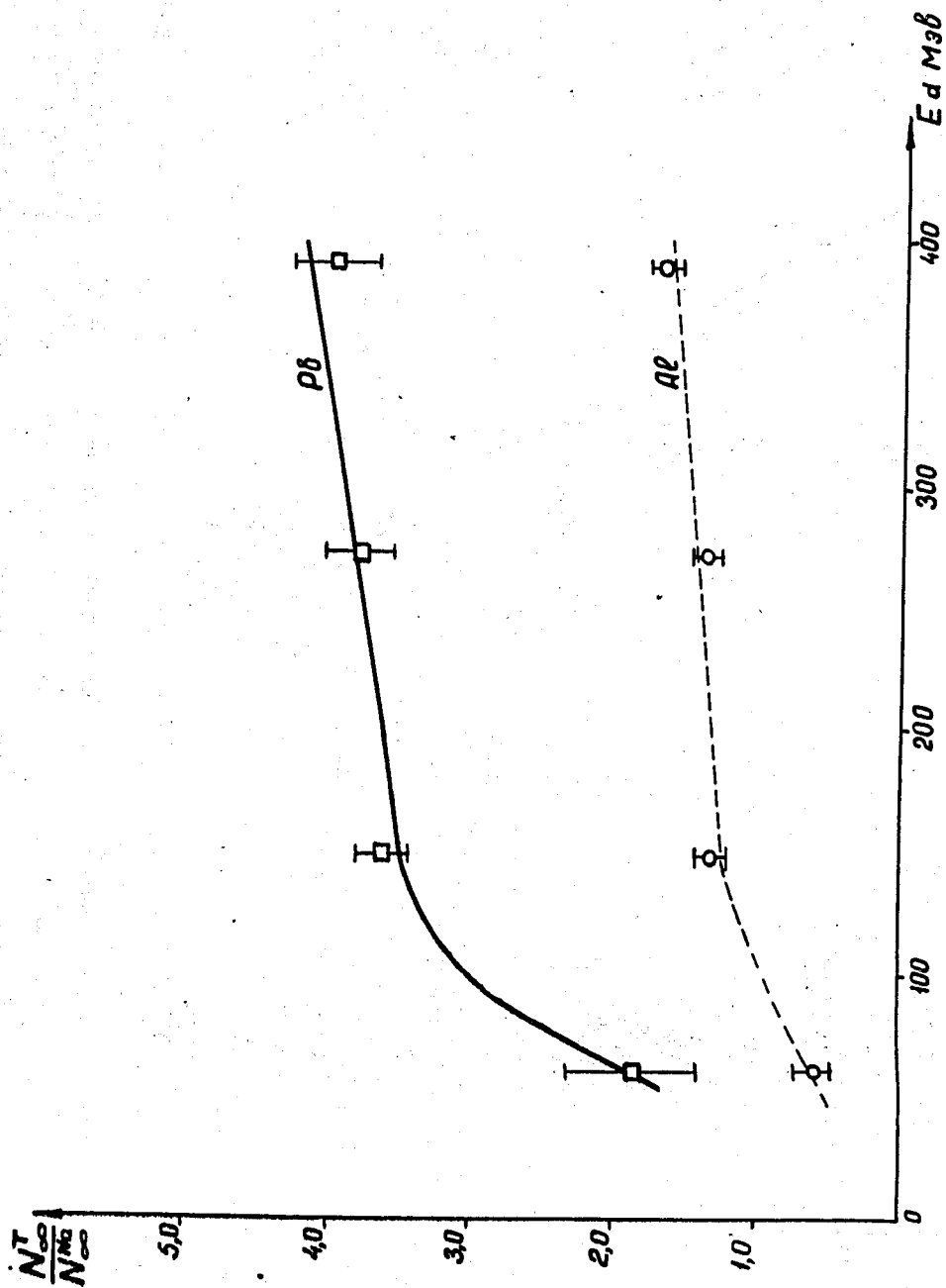


Рис. 2. Зависимость относительных выходов трития $\frac{N_T^\infty}{N_{Na}^\infty}$ из алюминия и свинца от энергии бомбардирующих дейтронов.

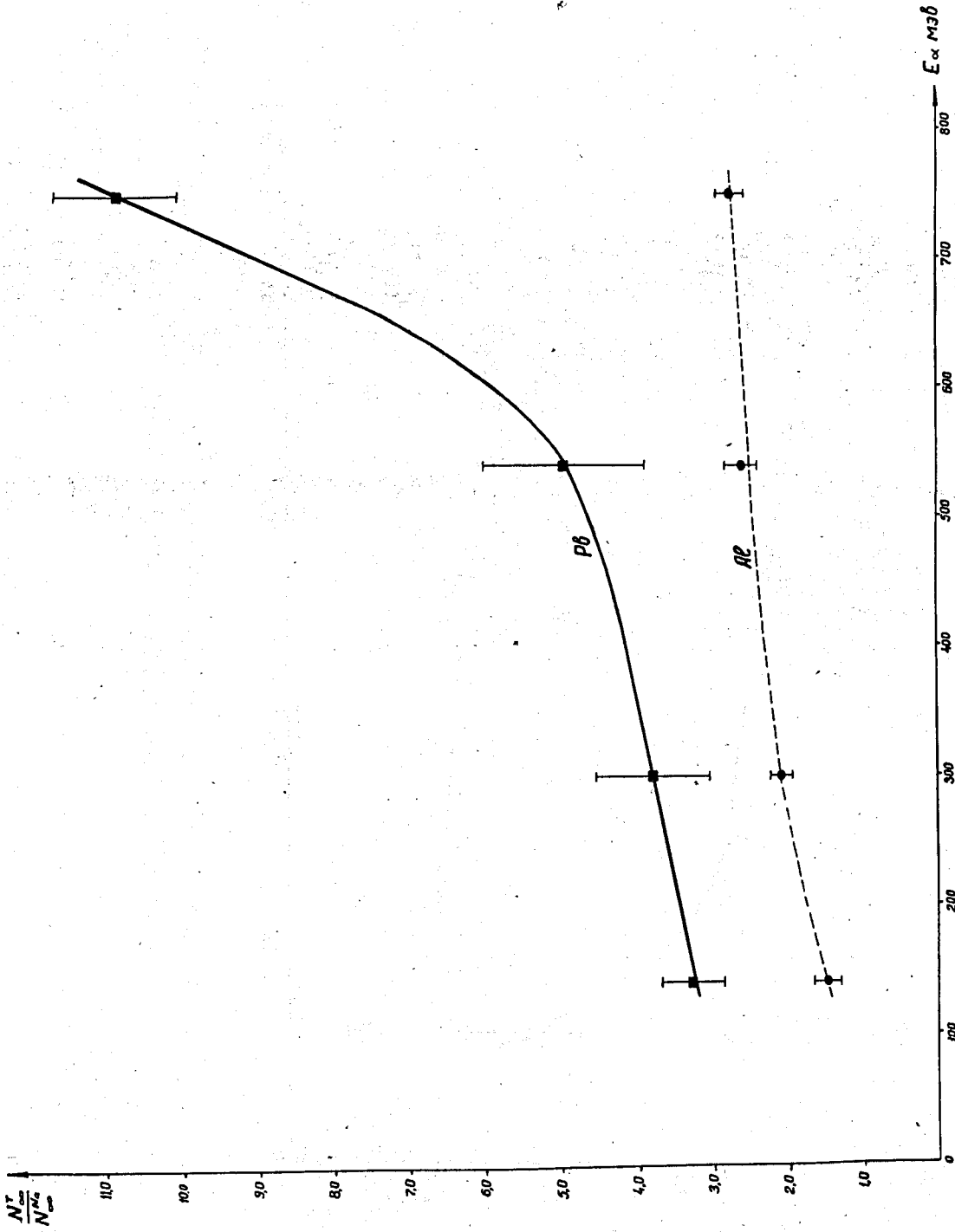


Рис. 3. Зависимость относительных выходов трития из алюминия и свинца от энергии бомбардирующих α -частиц: \blacksquare - относительные выходы трития из алюминия; \bullet - относительные выходы трития из свинца.

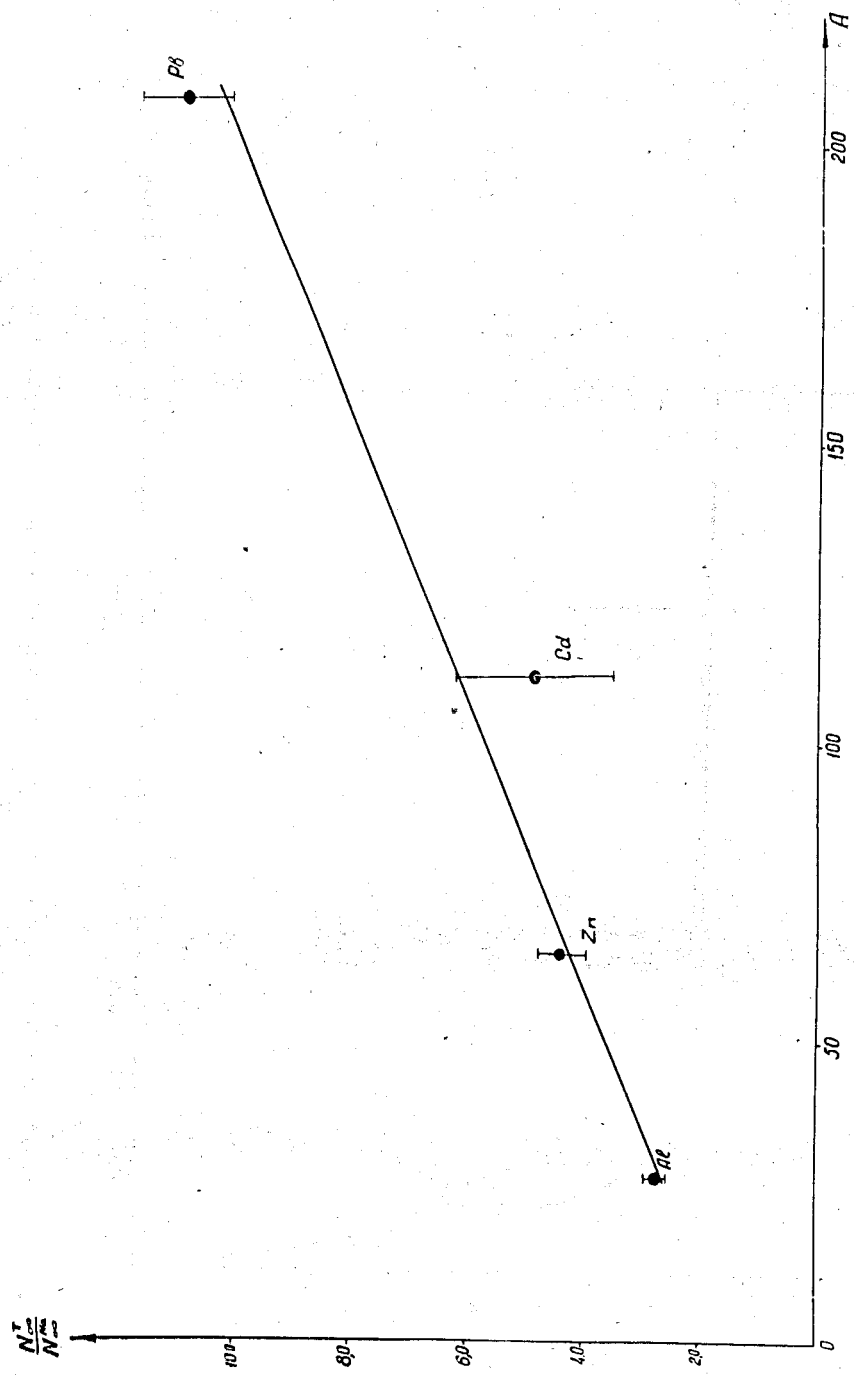


Рис. 4. Зависимость относительных выходов трития $\frac{N^T_{\infty}}{N^{\alpha}_{\infty}}$ при энергии α - частиц 750 Мэв от атомного веса материала мишени.

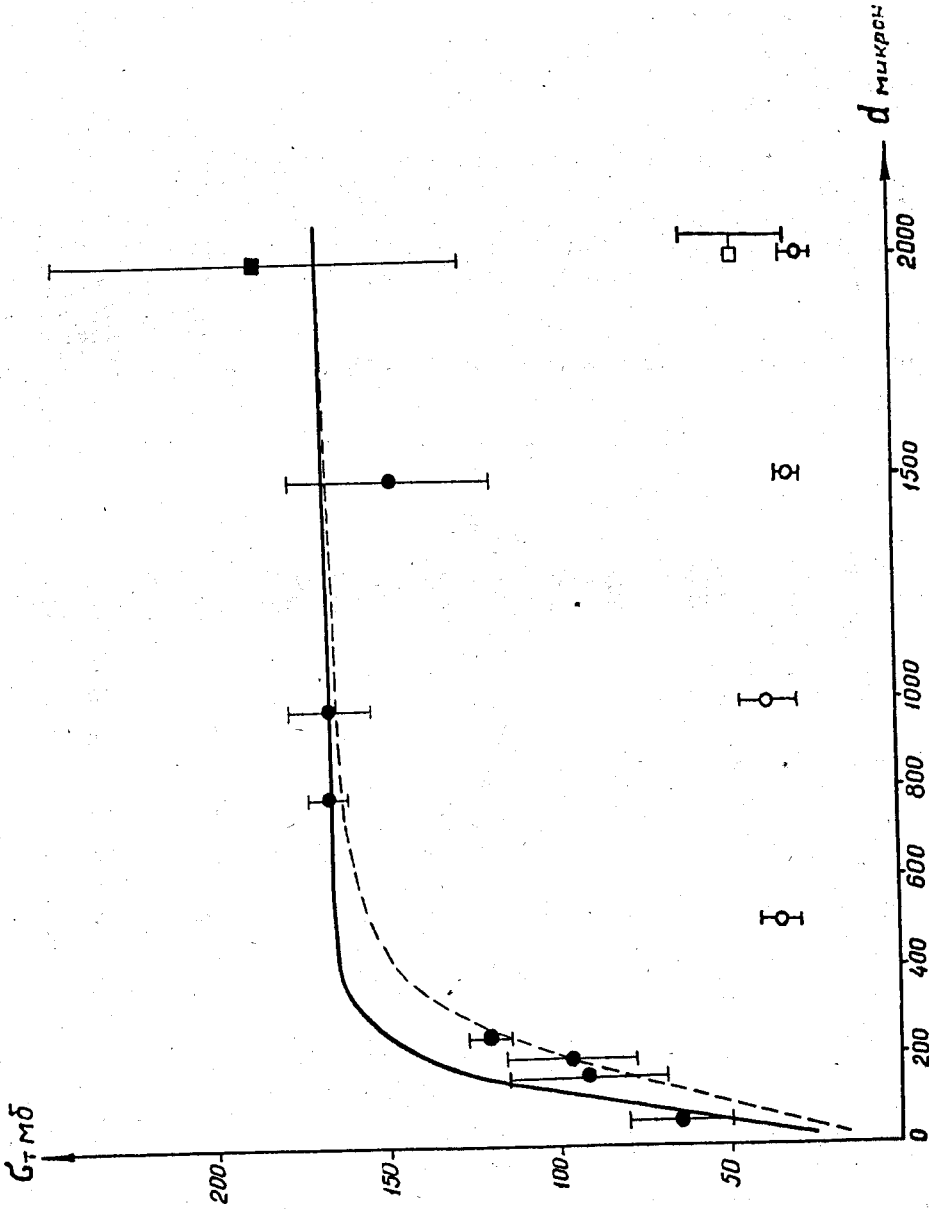


Рис. 5. Зависимость выходов трития из алюминиевых и свинцовых мишеней различной толщины. \circ , \square - выходы трития из Al; \square - выходы трития из Pb; \circ , \square - данные работы /7/; \circ , \square - расчет с использованием спектра тритонов с параметрами $\tau = 3,5$ Мэв и $v = 7$ Мэв. \circ , \square - расчет с использованием спектра трития с параметрами $\tau = 5$, $v = 7$ Мэв.