

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

В. В. Кузнецов, В. Н. Мехедов

P - 174

Образование трития в металлах под действием
протонов с энергией 120—660 Мэв

В настоящей работе излагаются результаты исследования образования трития в различных элементах при энергии протонов 660 Мэв. Приводятся функции возбуждения для реакций образования трития в алюминии и свинце в области энергий 120-660 Мэв. Исследование предпринято с целью дополнить данные, полученные в работах (I-6), а также выявить новые особенности этого явления.

Методика эксперимента

Образцы металлов размером 2 x 6 x 15 мм бомбардировались протонами на внутреннем пучке синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований. Для облучения образцы укреплялись на массивном алюминиевом держателе по 4 + 6 штук одновременно. Пучок протонов проходил вдоль стороны 6 мм. Изменение энергии бомбардирующих частиц достигалось изменением рабочего радиуса постановки мишеней в синхроциклотроне. Времена облучения составляли 2-5 минут при интенсивности внутреннего пучка протонов 10^{11} - 10^{12} протонов/сек.

Количество трития в облучаемой мишени определялось с помощью специальной вакуумной системы, схема которой изображена на рис. I. Установка состоит из трубчатой печи с кварцевой трубкой для плавки мишеней; палладиевого фильтра с электронагревателем, служащего для отделения водорода-тритиевой смеси от остальных газообразных продуктов реакции; ловушки

с активированным углем, охлаждаемой жидким азотом (ловушка использовалась для создания перепада давления при перепуске активного газа); гейгеровского счетчика в свинцовой защите. Кроме того, установка снабжена несколькими резервуарами - для водорода, чистого аргона, спирта и резервным объемом для разбавления высокоактивной смеси.

Плавка облученной мишени производилась в кварцевой трубке объемом 140 см³ в атмосфере водорода^{х)} при давлении 50 мм ртутного столба. Время плавки равно 1,5 - 2 часам при температуре 900 + 1050°С^{хх}. При этих условиях выделение трития из образца составляет около 90%. Последующая вторая плавка в указанных условиях дает 8-9%, а третья плавка - 2% всей активности трития. Специальная проверка отдачи активированным углем активной смеси показала, что уголь отдает газ практически полностью при комнатной температуре.

Вакуумная установка позволяет перегонять в объем счетчика от 0,057 до 0,1 части смеси водорода с тритием при давлении 1-6 мм ртутного столба. В качестве детектора β - частиц использовался стеклянный цилиндрический счетчик объемом 60 см³ с медным катодом. Помимо водородно-тритиевой смеси счетчик наполнялся парами спирта при давлении 15 мм Hg и аргона при давлении 95-100 мм Hg. В указанных условиях гейгеровский счетчик работает со следующими характеристиками: счетчик имеет плато протяженностью 100-150 вольт, наклон

х) Употребляемый в опытах в качестве носителя водород предварительно пропускался через палладиевый фильтр.

хх) Опыты проводились с элементами, температура плавления которых не превышает 1100°С.

плато не превышает 10% на 100 вольт, собственный фон счетчика - 80-100 имп/мин. Измеряемые активности трития составляли 1000 - 10000 имп/мин. Эффективность регистрации счетчиком β -частиц от распада трития оценивается около 90%.

Монитором пучка протонов служила алюминиевая фольга толщиной 20 микрон, в которую заворачивались образцы при облучении. Зависимость выхода реакции $Al^{27}(p, 3pn)Na^{24}$ от энергии падающих протонов, использовалась из работ (7,8). После облучения алюминиевая фольга растворялась в 1 мл HCl и затем измерялся спад активности 0,01 части раствора. Измерение активности монитора производилось на торцевом счетчике со слюдяным окошком толщиной 3 мг/см^2 . Детектирующее устройство регистрировало 18% всей активности мишени монитора.

Экспериментальные результаты.

Сечения образования трития в различных элементах в области энергий 120-660 Мэв приведены в таблице. Приведенные величины являются средними не менее чем трех определений. Лишь только у магния, олова, золота и висмута иногда указаны отдельные единичные измерения. Общая погрешность в определении каждой точки оценивается $\pm 30\%$. Эта величина представляет собой удвоенную полуширину кривой отклонения от средних экспериментальных значений по всем опытам, которая оказалась близкой к гауссовской кривой распределений.

Сечения образования трития (σ_{H^3}) в алюминии и свинце при энергии 120 Мэв почти совпадают. С повышением энергии протонов на

тяжелых элементах наблюдается заметное возрастание σ_{H^3} . В области энергий 300-500 Мэв рост сечения образования трития замедляется, однако, после 550 Мэв-резко увеличивается. При энергии 660 Мэв σ_{H^3} в свинце и висмуте почти в два превышает величину сечения на плато (300-500 Мэв) и достигает 10% геометрического сечения. Описываемая зависимость проявляется четко у Рв и Вi. У алюминия и магния эта зависимость очень мало отличается от линейной. Данные для олова лежат в промежутке между точками для свинца и алюминия.

Зависимость σ_{H^3} от атомного веса элементов при 660 Мэв приведена на рис.2. На этом же рисунке пунктиром указана зависимость изменения энергии возбуждения ядер различных элементов при энергии бомбардирующих протонов 450 Мэв. Там же показаны сечения, полученные нами при этой же энергии экспериментально или путем интерполяции кривых энергетических зависимостей, а также данные работы (I). Имеется хорошее согласие наших данных для алюминия и свинца при энергии 450 Мэв с данными работы (I). Характерным для рис.2 является монотонный рост сечений σ_{H^3} с увеличением А. При энергии протонов 660 Мэв сечение σ_{H^3} от алюминия к висмуту меняется примерно в три раза при изменении А примерно в 8 раз.

Обсуждение результатов

Интересно проследить, как меняются сечения образования трития от энергии протонов при переходе в область еще больших энергий. На рис.3 приведены данные по рождению трития в Al и Рв под действием

Т а б л и ц а

Материал мишени	Энергия протонов(МэВ)	Среднее сечение	Число опытов
Магний	660	43 ± 13	2
Алюминий	660	46 ± 14	17
Медь	660	73 ± 22	6
Цинк	660	67 ± 20	7
Серебро	660	76 ± 23	4
Кадмий	660	95 ± 28	3
Олово	660	122 ± 37	3
Сурьма	660	88 ± 26	2
Золото	660	139 ± 41	1
Свинец	660	186 ± 56	11
Висмут	660	167 ± 50	4
Алюминий	600	44 ± 13	2
Олово	600	86 ± 26	1
Свинец	600	157 ± 47	3
Магний	550	26 ± 8	2
Алюминий	550	33 ± 10	6
Олово	550	69 ± 21	1
Свинец	550	87 ± 26	3
Висмут	550	75 ± 22	1
Алюминий	500	37 ± 11	5
Магний	450	30 ± 9	1
Алюминий	450	24 ± 7	3
Свинец	450	91 ± 27	3
Магний	300	19 ± 6	2
Алюминий	300	25 ± 7	3
Олово	300	38 ± 11	2
Свинец	300	73 ± 22	4
Висмут	300	73 ± 22	1
Алюминий	200	18 ± 6	3
Алюминий	120	16 ± 5	3
Свинец	120	17 ± 5	3

быстрых частиц, полученные в настоящей работе и известные из литературы (1,4,6). Экспериментальные данные, взятые из литературы, обозначены на рис. 3 незачерненными кружками и квадратами. Крестиками приведены сечения образования трития в железе под действием протонов с энергией 0,16; 1,0; 3,0 и 6,2 Бэв (4) и в интервале энергий 50-170 Мэв (6). Из рисунка видно, что наблюдаемое увеличение σ_{H^3} на свинце после 550 Мэв продолжается и дальше. Для 2,05 Бэв σ_{H^3} превышает сечение образования трития в области 300-500 Мэв более чем в 5 раз и достигает 25 % геометрического сечения. В случае алюминия величина σ_{H^3} почти не меняется вплоть до 2,05 Бэв. σ_{H^3} на железе с ростом энергии протонов монотонно растет, но ход кривой для Fe ближе к ходу кривой для Al, чем для Pb. Лишь только в области энергий 0,1-0,17 Бэв σ_{H^3} в железе находятся ниже для Al. Таким образом, на тяжелых элементах с увеличением энергии протонов наблюдается относительно большее возрастание сечений образования трития, чем на легких элементах.

На рис. 3 кривыми показаны зависимости изменения вероятности испускания трития из свинца и алюминия, рассчитанные по теории испарения в интервале энергий протонов 120 - 500 Мэв. Рассчитанные кривые совмещались с экспериментальными данными таким образом, чтобы совпало наибольшее число точек. Расчет проводился по формулам, приведенным Хагедорн и Макке в работе (9) с привлечением величин энергий возбуждений для соответствующих ядер, указанных в работе (10). (В случае свинца использовались величины энергий возбуждений, вычисленные для висмута). В качестве соотношения, определяющего температуру ядра при заданной энергии возбуждения бралась зависимость,

приведенная в (II). Эффективным барьером при испускании трития служили величины для свинца $V_{H^3} = \frac{V_0}{2} = 8,1$ Мэв, для Al $V_{H^3} = \frac{V_0}{2} = 2,3$ Мэв. Видно, что теория испарения дает, примерно, одинаковую с опытом зависимость изменения σ_{H^3} от энергии протонов.

Относительная вероятность испускания трития $\frac{\gamma_{H^3}}{\gamma_{общ.}}$, где $\gamma_{общ.}$ - полная вероятность испарения нейтронов, протонов, α -частиц и т.д. ($\gamma_{общ.} = \gamma_n + \gamma_p + \gamma_d + \gamma_{He^3} + \gamma_{He^4}$) также совпадает с экспериментальным отношением $\frac{\sigma_{H^3}}{\sigma_{geom}}$ при энергии протонов 120 ÷ 500 Мэв. Для алюминия $\frac{\gamma_{H^3}}{\gamma_{общ.}}$ получено равным 10^{-2} и $3 \cdot 10^{-2}$, в то время, как $\frac{\sigma_{H^3}}{\sigma_{geom}}$ составляет $2,5 \cdot 10^{-2}$ без учета прозрачности ядра. В случае свинца $\frac{\gamma_{H^3}}{\gamma_{общ.}}$ равно $3 \cdot 10^{-3}$ и $1,1 \cdot 10^{-2}$ при тех же энергиях протонов. Величина $\frac{\sigma_{H^3}}{\sigma_{geom}}$ (без учета прозрачности) равна $8 \cdot 10^{-3}$ и $4 \cdot 10^{-2}$, соответственно. Таким образом, относительная вероятность испускания трития изменяется в ту же сторону, что и экспериментальное отношение $\frac{\sigma_{H^3}}{\sigma_{geom}}$ и разница между ними не превышает трех. Такое расхождение не является существенным ввиду приближенного характера расчетов.

Совпадение зависимости σ_{H^3} от энергии протонов (рис.3) и $\frac{\sigma_{H^3}}{\sigma_{geom}}$ с предсказаниями теории испарения говорит о том, что в наших экспериментах регистрируются, в основном, ядра трития, получающиеся в результате процесса испарения. В пользу такого заключения говорит также совпадение хода кривых изменения величины энергии возбуждения и сечения образования σ_{H^3} в различных элементах при энергии протонов 450 Мэв (см.рис.2).

При энергии протонов выше 500 Мэв теория испарения дает заметное возрастание вероятности испускания трития над экспериментальным сечением, хотя отношение $\frac{\chi_{H^3}}{\chi_{общ.}}$ остается примерно тем же. Если принять, что теория согласуется с опытом в области энергий 120-500 Мэв, то для 2 Бэв вероятность испускания трития в алюминии превышает экспериментальное значение примерно в 7, а для свинца примерно в 13 раз. Такое увеличение расчетных величин, по-видимому, обусловлено неприменимостью теории испарения при столь высоких энергиях бомбардирующих протонов.

Авторы приносят свою благодарность В.А.Халкину, М.Я.Кузнецовой и В.И.Салацкому за помощь, оказанную при выполнении настоящей работы и Ю.Д.Прокошкину за ценные замечания.

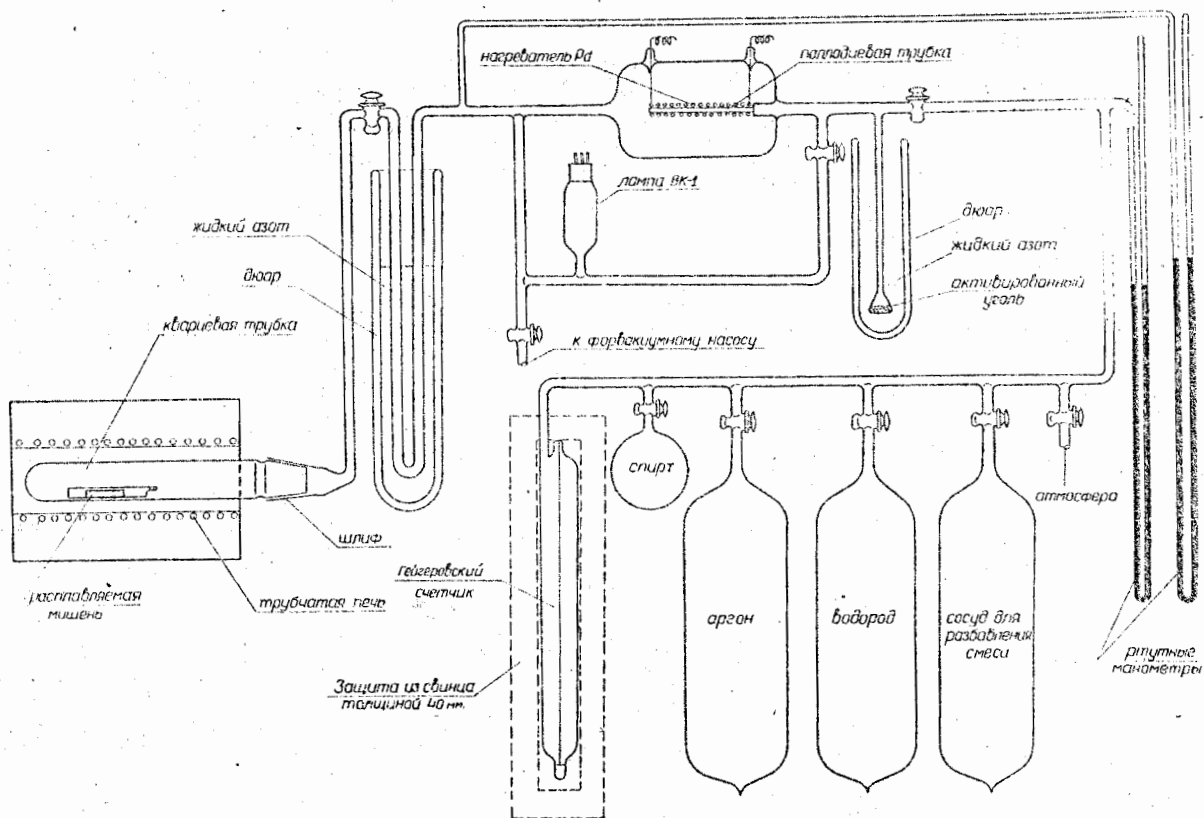


Рис. I. Схема вакуумной установки для определения количества трития, образованного в различных элементах под действием протонов высоких энергий.

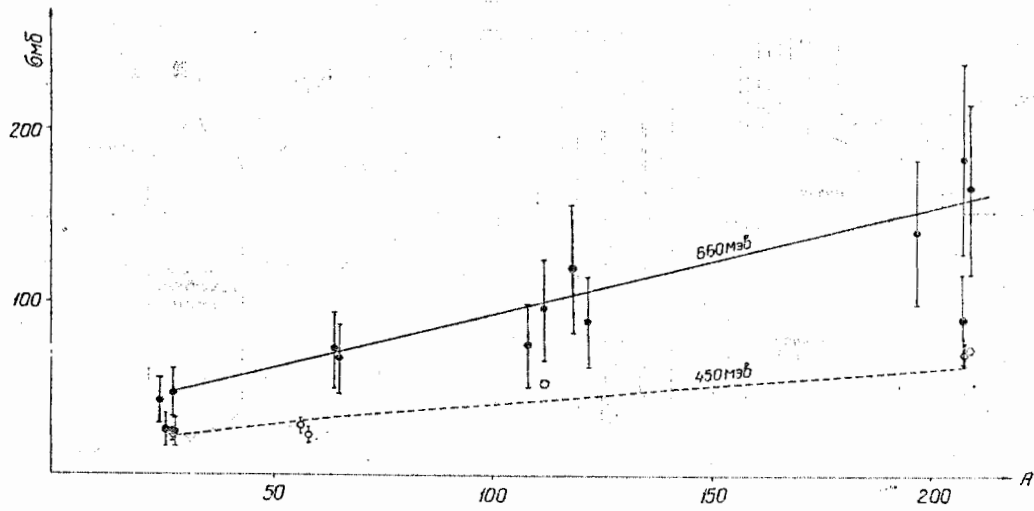


Рис. 2. Зависимость сечения образования трития при энергии 660 и 450 Мэв как функция атомного веса материала мишени.

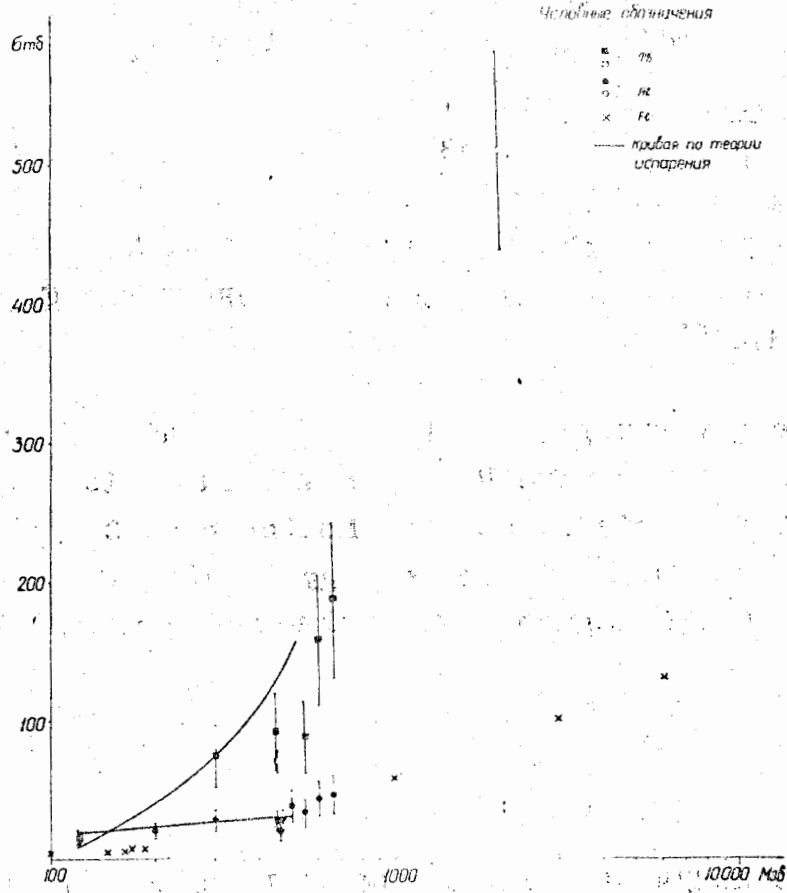


Рис. 3. Зависимость сечения образования трития в алюминии, свинце и железе от энергии протонов.

Л и т е р а т у р а

1. Curie L.A., Libby W.F., Wolfgang R.L., Phys. Rev. 101, 1557, 1956.
2. Fireman E.L., Rowland F.S. Phys. Rev. 97, 780, 1955.
3. Fireman E.L. Phys. Rev. 97, 1303, 1955.
4. Fireman E.L., Zahringer L. Phys. Rev. 107, 1695, 1957.
5. Wade W.H., Gonsalez-Vidal L., Glass R.A., Seaborg G.T. Phys. Rev., 107, 1311, 1957,
6. Goebel K., CERN 58-2 1958.
7. Ю.Д.Прокошкин, А.А.Тяпкин, ЖЭТФ, 32, 177, 1957г.
8. Winsberg L. Radiochemical studies of high energy nuclear reactions at Berkley. Доклад на Гордонской конференции по ядерной химии. 1957 г.
9. Heisenberg Vorträge über kosmische strahlung Berlin 1953.
10. Metropolis N., Rivius R. Storn M., Turkevich A., Miller G.M., Friedlander G., Monte-Carlo Calculations on intranuclear cascade I low energy studies 1957.
11. Fujimoto G., Gamaguchi Prog. theor. Phys. V, 787, 1950.

* * *

Работа получена издательским отделом 29 марта 1958 г.