УДК 539.172.12+539.172.13

Активационные измерения интегральных сечений реакций ⁷Li(p, n₀+n₁)⁷Be_{gs}, ⁶Li(d, n₀+n₁)⁷Be_{gs}, ⁷Li(d, 2n)⁷Be_{gs}, ⁶⁵Cu(p, n)⁶⁵Zn, ⁶⁵Cu(d, 2n)⁶⁵Zn, ⁶³Cu(d, y)⁶⁵Zn

На электростатическом тандемном ускорителе ЭГП-10 (РФЯЦ-ВНИИЭФ) при энергиях протонов (дейтронов) 2–10 МэВ активационным методом измерены сечения реакций ⁷Li(p, n_0+n_1)⁷Begs, ⁶Li(d, n_0+n_1)⁷Begs, ⁷Li(d, 2n)⁷Begs, ⁶⁵Cu(p, n)⁶⁵Zn, ⁶⁵Cu(d, 2n)⁶⁵Zn, ⁶³Cu(d, γ)⁶⁵Zn. Описаны способ изготовления мишеней и взвешивания толщин слоев LiF, облучение мишенных сборок, измерение эффективности регистрации ү-квантов, процедура получения сечений реакций, измеренные сечения.

Л. Н. Генералов, С. Н. Абрамович,С. М. Селянкина

Введение

Настоящая работа вызвана необходимостью пополнения нашей электронной библиотеки ядерно-физических констант для термоядерного синтеза SABA [1] новыми данными и получения в ней новых оценок. По многим реакциям до сих пор имеются существенные неопределенности в экспериментальных данных, в т. ч. в сечениях реакции 7 Li(*d*, 2*n*) 7 Be [2, 3], которые в библиотеке EXFOR представлены только указанными работами.

Основная часть данных для определения сечений указанных реакций была получена давно – в процессе измерения полных сечений образования трития в реакциях ⁷Li(*p*, *xt*), ⁶Li(*d*, *xt*) и ⁷Li(*d*, *xt*) [4, 5], выполненных методом накопления трития в медных и алюминиевых сборниках на электростатическом тандемном ускорителе ЭГП-10 [6]. В этих сборниках – медных (алюминиевых) фольгах, на которые были нанесены мишенные слои LiF (известного изотопного состава), тритий накапливался при их облучении протонами или дейтронами. Затем он выделялся радиохимическими методами [4, 5] (при полном разрушении сборников). Перед выделением трития проводилась регистрация γ-квантов из этих сборников с целью контроля толщин мишенных слоев LiF и монито-

[©] Известия РАН. Сер. Физическая. 2017. Т. 81. С. 717.

рирования облучения мишенных сборок. Регистрировались γ -кванты с энергией 477,6 кэВ из распада ⁷Ве ($T_{1/2} = 53,29$ сут., ε) и 1115 кэВ из распада ⁶⁵Zn ($T_{1/2} = 244,26$ сут., ε). В процессе разработки метода накопления трития и его использования [4, 5] и образовался большой массив γ -спектров. Также были проведены небольшие по объему дополнительные измерения сечений рассматриваемых реакций.

Мишени

В измерениях использовались мишенные слои LiF, обогащенные по изотопам ⁶Li и ⁷Li. Согласно масс-спектрометрическому анализу в мишенных слоях, обогащенных по изотопу ⁶Li, доля этого изотопа составляла $a_1^{(6)} = 0,8974$, а изотопа ⁷Li $a_2^{(6)} = 0,1026$. В мишенных слоях, обогащенных по изотопу ⁷Li, доля этого изотопа составляла $a_1^{(7)} = 0,9642$, а изотопа ⁶Li $a_2^{(7)} = 0,0358$. Значение верхнего индекса в скобках означает принадлежность вещества LiF к обогащению по указанному изотопу лития. Далее такие же обозначения используются и для других физических величин, имеющих отношение к какому-либо изотопу лития.

Мишени изготавливались напылением LiF на медные, алюминиевые и танталовые подложки диаметром 24 мм. Диаметр мишенных слоев составлял 18 мм. Толщина медных подложек равна 200 мкм, алюминиевых – 50 мкм, танталовых – 300 мкм. Напыление проводилось в вакуумной установке ВУП-4 на подложки, которые находились за круглыми диафрагмами на алюминиевом устройстве в виде сферического сегмента радиусом 140 мм, образуя с ним единую поверхность. Сферический сегмент размещался таким образом, чтобы испаритель распыляемого вещества (танталовая лодочка, куда загружается это вещество), нагреваемый пропусканием через него тока 150-200 А, находился в центре сферы. В пределах телесного угла, образуемого этим сегментом, наблюдается приблизительная изотропия вылета распыляемого вещества. Площадь мишенных слоев составляет небольшую долю от площади сферического сегмента, поэтому основная часть распыленного вещества находится на этом сегменте. Взвешивая сегмент на аналитических весах до и после напыления и зная его площадь, доступную для напыления, можно определить среднюю поверхностную толщину мишенных слоев С_с. Эта процедура далее называется определением толщины слоев по контрольной пластине (КП), а взвешиваемый сегмент – контрольной пластиной. Также находилась толщина С₁ каждого мишенного слоя взвешиванием подложки до и после напыления. Номинально погрешность взвешивания по КП может быть меньше 1 %, а индивидуального взвешивания – 5 % (допускает точность шкалы аналитических весов и толщины слоев 500–1000 мкг \cdot см⁻²). Так как напыление происходит в вакууме, а взвешивание – на воздухе, то процессы газовыделения и газопоглощения, протекающие в контрольной пластине и подложках, могут вызывать искажения результатов прямого взвешивания, особенно слоев толщиной менее 100 мкг см⁻². В контрольных опытах, имитирующих напыление, установлено, что за 40 минут после вскрытия вакуумной установки происходит восстановление веса контрольной пластины за счет газопоглощения с точностью не хуже 0,3-0,5 мг. При используемых нами толщинах мишеней этот процесс приводит к погрешностям не более 1 %.

В среднем, индивидуальное и взвешивание по КП дает одинаковые результаты. Однако практика показывает, что взвешивание по КП более надежно, и в большинстве случаев его погрешность составляет не более 5 %.

Для проведения нескольких серий измерений ${}^{7}Li(p, xt)$, ${}^{6}Li(d, xt)$ и ${}^{7}Li(d, xt)$ было изготовлено около 150 мишеней. Каждое напыление проводилось партиями по четыре мишени в каждой. По одной мишени из каждой партии напыления, называемой далее мишенью-свидетелем, облучалось при одинаковой энергии протонов (дейтронов). Для определения образования трития в фоновой реакции $^{19}F(d, t)$ изготавливались мишени со слоями CaF₂.

Следует отметить, что процедура изготовления большого количества мишеней была очень хорошо отработана. Для измерения полного сечения ${}^{19}F(d, t){}^{18}F$ [7] активационным методом было изготовлено 48 мишеней LiF (99 % основного материала) на танталовых подложках толщиной 730–1040 мкг · см⁻² с погрешностью 5 %. С целью уменьшения возможных систематических погрешностей было проведено взвешивание всех мишеней по выходу нейтронов из реакции ${}^{7}Li(p, n){}^{7}Be$ при $E_p = 3,5$ МэВ, измеренному с помощью всеволнового счетчика со случайной погрешностью, меньшей 1 %. Отношение выхода нейтронов к толщине слоя усреднялось, затем это среднее значение было использовано для определения толщины каждой мишени. Процедура перенормировки толщин мишеней показала, что изменение толщины относительно значений, полученных прямым взвешиванием, составляло 2–3 % и только в ряде случаев достигало 6–8 %.

Облучение мишенных сборок

Процедура облучения мишенных сборок была такой же, как при измерении полных сечений реакции ${}^{9}\text{Be}(d, xt)$ [8]. Остановимся на ней более подробно (рис. 1). В измерениях сечений ${}^{7}\text{Li}(p, xt)$, ${}^{6}\text{Li}(d, xt)$, ${}^{7}\text{Li}(d, xt)$ [4, 5] с медными сборниками мишенная сборка состояла из трех сборников. Первый со стороны падения ионного пучка протонов или дейтронов сборник имел толщину 20 или 30 мкм, второй – 200 мкм с мишенным слоем LiF; третий, с толщиной 200 мкм, использовался для контроля тритиевого загрязнения. Сборники изготавливались из медных листов марки M1.



Рис. 1. Схема устройства облучения медных и алюминиевых сборок

В измерениях с алюминиевыми сборниками [5] использовались семь последовательно расположенных сборников толщиной 50 мкм. На втором сборнике находился мишенный слой LiF. Сборники были помещены в завальцованные алюминиевые чашечки.

Вакуумная система ускорителя была загрязнена тритием, поэтому облучение сборок проводилось через вакуумно-уплотненное алюминиевое окно толщиной 15 мкм. В процессе облучения сборка обдувалась потоком гелия, который при рабочих токах 0,2–0,5 мкА обеспечивал ее среднюю температуру не более 50 °С (специальные исследования). Пучок ионов формировался системой квадрупольных линз и танталовой диафрагмой диаметром 3 мм. Перед входом в цилиндр Фарадея антирассеивающая диафрагма очищала пучок от его «ореола», что контролировалось измерением тока с этой диафрагмы интегратором тока ORTEC-439. Размер пучка определялся визуально с помощью кварцевого экрана. Ток пучка ионов на облучаемые сборки измерялся вторым интегратором тока ORTEC-439. Качество проводки ионного пучка на сборку определялось по отношению отсчетов с первого и второго интеграторов – оно находилось в диапазоне (0,2–5) %. До и после проведения измерений постоянная интеграторов тока *C*(int) измерялась с точностью не хуже 1 % с помощью калиброванного источника тока. Эту величину принимали за систематическую ошибку измерения потока *N*_{*n*(*d*)} протонов (дейтронов) на мишенную сборку

$$N_{p(d)} = C(\operatorname{int})Q_{p(d)}, \qquad (1)$$

где $Q_{p(d)}$ – число импульсов интегратора за время облучения t_{trad} , которое составляло от 3 до 11 ч.

Облучения проведены при энергиях ускоренных протонов (дейтронов) 4–11 МэВ. Средние энергии взаимодействия ионов в мишенях рассчитывались с помощью программы SRIM [9]; учитывались потери энергии во входном алюминиевом окне, сборниках и мишенных слоях LiF.

Для определения образования трития в фоновых реакциях ¹⁹F(*d*, *t*) ($E_{nop} = 4,62$ МэВ), ⁶³Cu(*d*, *t*) ($E_{nop} = 4,74$ МэВ), ⁶⁵Cu(*d*, *t*) ($E_{nop} = 3,77$ МэВ) проводилось облучение медных сборников со слоями CaF₂ и сборников, не имевших никаких слоев.

В измерениях с алюминиевыми сборниками для определения вклада фоновых реакций ${}^{19}F(d, t)$ и ${}^{27}Al(d, t)$ ($E_{nop} = 7,3$ МэВ) облучались алюминиевые сборники со слоями CaF₂ и сборники, не имевшие никаких слоев.

Регистрация гамма-квантов

В измерениях с медными сборниками использовался Ge(Li) детектор γ -квантов ДГДК-82Б объемом 80 см³, а в измерениях с Al сборниками – детектор REGE (модель GR1318) объемом 70 см³. Сборники располагались в центре поверхности детектора. Эффективность регистрации γ -квантов ε_{γ} ДГДК-82Б измерялась по паспортизованным активностям (погрешности менее 1 % при доверительной вероятности 99 %) образцовых гамма-источников (ОСГИ из ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург)¹¹³Sn, ²⁰³Hg, ²²Na, ⁵⁴Mn, ¹³⁷Cs, ⁶⁵Zn, соответственно имеющих энергии $E_{\gamma} = 255$, 279, 662, 835 и 1115 кэВ:

$$\varepsilon_{\gamma} = r_{\Omega} \varepsilon_{\gamma}^{0},$$

$$\varepsilon_{\gamma}^{0} = \frac{S_{\gamma}}{A_{0}b_{\gamma}} \exp\left(\ln 2\frac{t_{ot}}{T_{1/2}}\right) \frac{n_{pulser} t}{S_{pulser}},$$
(2)

где ε_{v}^{0} – эффективность регистрации γ -квантов источника ОСГИ, $r_{\Omega} = 1,072\pm1,2$ % – измеренный геометрический фактор, учитывающий различие в расстоянии между источником ОСГИ и источником γ -квантов сборника до поверхности детектора; A_0 – паспортизованная активность источника ОСГИ; b_γ – вероятность образования γ-квантов с определенной энергией при распаде нуклида ОСГИ, имеющего период полураспада T_{1/2}; t_{ot} – длительность от момента времени паспортизации источника ОСГИ до момента измерения ε_{γ}^{0} ; S_{γ} – площадь гамма-пика полного поглощения, зарегистрированного за время измерения t; $n_{pulser} = 60 \text{ c}^{-1}$ – частота генератора импульсов, подаваемых в спектрометрический канал регистрации γ-квантов с целью определения мертвого времени; S_{pulser} – площадь пика при регистрации импульсов генератора. Площадь гамма-линий находилась так же, как в наших работах [10-12]. Этому предшествовала процедура нахождения фона под линией. Из области спектра убирался участок, содержащий линию, и оставшийся спектр описывался сигмоидальной функцией (фоновая функция). Затем из первоначального спектра проводилось вычитание фоновой сигмоидальной функции. Если фон был вычтен правильно, то при описании линии функцией Гаусса (или более сложной) фоновая постоянная была равна нулю. Это достигалось эмпирическим подбором фоновой сигмоидальной функции (Больцмана). В случайной погрешности площади линии, найденной при его описании, не учитывалась статистическая погрешность фоновой составляющей спектра под этой линией. Поэтому погрешность S_v рассчитывалась по-

вторно по формуле

$$\Delta S_{\gamma} = \sqrt{S_{\gamma} + 2S_{fon}} , \qquad (3)$$

где S_{fon} – площадь фоновой составляющей, вычисленная интегрированием фоновой функции в пределах ширины линии.

Эффективности регистрации для детектора REGE определяли сразу для рабочей геометрии при высвечивании облученных алюминиевых сборников по известным соотношениям интенсивностей гамма-линий радиоактивных ядер ⁵⁵Co ($T_{1/2} = 17,53$ ч., основные линии 477,2 (20,3 %); 931,5 (75 %); 1408,7 (16,5 %)); ²⁴Na ($T_{1/2} = 14,959$ ч., линии 1368,5 (100 %), 2753,9 (99,9 %)), ⁶⁷Ca ($T_{1/2} = 3,26$ сут., основные линии 184,6 (20,4 %); 208,9 (2,33 %); 300,2 (16,6 %)), наработанных в сборниках (см. далее) и абсолютным активностям источников ²²Na, ¹³⁷Cs ОСГИ. Эффективность регистрации обоих детекторов хорошо описывалась стандартной зависимостью (см., например, [13, 14])

$$\log \varepsilon_{\gamma} = A + S \log E_{\gamma} (\kappa B), \qquad (4)$$

где для ДГДК-82Б $A = 1,97175 \pm 0,0493$, $S = -1,26344 \pm 0,018948$ и коэффициент корреляции $\rho(A,S) = -0,99512$; для REGE $A = 1,60241 \pm 0,052345$, $S = -1,17156 \pm 0,01847574$, $\rho(A,S) = -0,996261$. Экспериментальные и теоретические значения ε_{γ} показаны на рис. 2.



Рис. 2. Эффективность регистрации у-квантов. ДГДК-82Б: • – экспериментальные значения, непрерывная линия 1 – описание в форме $\varepsilon_{\gamma} = 10^{A} E_{\gamma} (\kappa \Im B)^{-B}$. REGE: \Box – экспериментальные значения, непрерывная линия 2 – описание в форме $\varepsilon_{\gamma} = 10^{A} E_{\gamma} (\kappa \Im B)^{-B}$

Наши измерения проводились с перерывами в течение нескольких лет, поэтому замеченный в эффективностях регистрации дрейф (около 2 %) учитывался в конечных результатах.

Получение сечений реакций

Сечения реакций ⁷Li(*p*, n_0+n_1)⁷Be_{gs}, ⁶Li(*d*, n_0+n_1)⁷Be_{gs}, ⁶Li(*d*, 2n)⁷Be_{gs} определялись по регистрации γ-квантов с $E_{\gamma} = 477,6$ кэВ, образующихся при распаде ⁷Be с вероятностью $b_{\gamma}(477,6) = 0,1052(6)$ [15] (далее все такого рода данные взяты из этого справочника). Уровни ⁷Be, находящиеся по энергии выше первого возбужденного, ядерно-нестабильные [16], поэтому их вкладом в накопление ядер ⁷Be можно пренебречь. Первый возбужденный уровень распадается испусканием γ-квантов с энергией 429 кэВ с переходом на основное состояние. По этим причинам полные сечения образования ядер ⁷Be равны сумме сечений образования этих ядер в основном и первом возбужденном состояниях. Для непороговых реакций ⁶Li(*d*, n_0+n_1)⁷Be_{gs} – только при энергии протонов $E_p > 2,63$ МэВ – выше порога ⁷Li(*p*, n_1). Ниже этой энергии измеряется сечение ⁷Li(*p*, n_0)⁷Be_{gs}.

Сечение σ_{pn} реакции ⁷Li(p, $n_0 + n_1$)⁷Be_{gs} определялось с использованием соотношения

$$\sigma_{pn} = \frac{N_{7\text{Be}}^{(7)}}{N_p C_{\Sigma}^{(7)} a_2^{(7)}},$$
(5)

$$N_{\gamma Be}^{(7)} = \frac{S_{\gamma}(477)T_{1/2}(^{7}\text{Be})}{tb_{\gamma}(477)\varepsilon_{\gamma}(477,6)\ln 2}K_{1}K_{2}K_{3} \text{ (количество образовавшихся ядер }^{7}\text{Be}\text{)}, \tag{6}$$

где K_1 – фактор учета мертвого времени, измеренный так же, как и при измерении эффективности регистрации; $K_2 = \exp\left[\frac{t_{ot}\ln 2}{T_{1/2}(477)}\right]$ – фактор учета распада ядер ⁷Ве за время «отстойки» t_{ot} от окончания облучения до момента измерения активности; $K_3 = \frac{t_{irad}\ln 2}{T_{1/2}(477)(1 - \exp\left[-t_{irad}\ln 2/T_{1/2}(477)\right])}$ – фактор учета распада ядер ⁷Ве в течение времени облучения, $\varepsilon_{\gamma}(477,6) = 0,03862 \pm 1,2$ % для ДГДК-82Б и 0,02910 ± 1,2 % для REGE. В (5) $C_{\Sigma}^{(7)}$ – количество ядер (⁶Li + ⁷Li)/см²

$$C_{\Sigma}^{(7)} = \frac{C_C^{(7)} N_A}{6a_1^{(7)} + 7a_2^{(7)} + 19},$$
(7)

где N_A – постоянная Авогадро.

Для определения сечений реакций ${}^{6}\text{Li}(d, n_{0}+n_{1})^{7}\text{Be}, {}^{7}\text{Li}(d, 2n)^{7}\text{Be}$ имеем систему уравнений

$$\begin{cases} N_{7Be}^{(6)} = N_d^{(6)} C_{\Sigma}^{(6)} \left(a_1^{(6)} \sigma_{dn} + a_2^{(6)} \sigma_{d2n} \right), \\ N_{7Be}^{(7)} = N_d^{(7)} C_{\Sigma}^{(7)} \left(a_1^{(7)} \sigma_{dn} + a_2^{(7)} \sigma_{d2n} \right), \end{cases}$$
(8)

из которой, с учетом изотопных составов, получаем расчетные формулы сечений реакций $\sigma_{d2n}^{(7)}$ и $\sigma_{d2n}^{(6)}$, их относительных погрешностей $\Delta \sigma_{d2n}^{(7)} / \sigma_{d2n}^{(7)}$ и $\Delta \sigma_{d2}^{(6)} / \sigma_{dn}^{(6)}$

$$\begin{cases} \sigma_{d2n}^{(7)} = \left(1,04155\sigma_{\Sigma}^{(7)} - 0,041551\sigma_{\Sigma}^{(6)}\right), \\ \sigma_{dn}^{(6)} = \left(1,1093\sigma_{\Sigma}^{(6)} - 0,12488\sigma_{\Sigma}^{(7)}\right), \\ \Delta\sigma_{d2n}^{(7)} / \sigma_{d2n}^{(7)} = \left[\left(1,04155\Delta\sigma_{\Sigma}^{(7)}\right)^{2} / \left(\sigma_{d2n}^{(7)}\right)^{2} + \left(0,041551\Delta\sigma_{\Sigma}^{(6)}\right)^{2} / \left(\sigma_{d2n}^{(7)}\right)^{2}\right], \\ \Delta\sigma_{d2n}^{(6)} / \sigma_{dn}^{(6)} = \left[\left(1,1093\Delta\sigma_{\Sigma}^{(6)}\right)^{2} / \left(\sigma_{dn}^{(6)}\right)^{2} + \left(0,12488\Delta\sigma_{\Sigma}^{(7)}\right)^{2} / \left(\sigma_{dn}^{(6)}\right)^{2}\right], \end{cases}$$

$$\end{cases}$$

$$\end{cases}$$

где

$$\begin{cases} \sigma_{\Sigma}^{(6)} = N_{7_{\text{Be}}}^{(6)} / N_d^{(6)} C_{\Sigma}^{(6)}, \\ \sigma_{\Sigma}^{(7)} = N_{7_{\text{Be}}}^{(7)} / N_d^{(7)} C_{\Sigma}^{(7)}, \end{cases}$$
(10)

$$C_{\Sigma}^{(6)} = \frac{C_C^{(6)} N_A}{6a_1^{(6)} + 7a_2^{(6)} + 19}.$$
(11)

Сечения реакций ⁶⁵Cu(*d*, 2*n*)⁶⁵Zn, ⁶⁵Cu(*p*, *n*)⁶⁵Zn определялись двумя способами. Один вариант – по измерениям активности γ -квантов с энергией 1115 кэВ из тонких сборников $\Delta x = 30$ или 20 мкм, простреливаемых протонами (дейтронами) пучка. Сечения определялись как

$$\sigma_{pn(d,2n)} = \frac{N_{65} \operatorname{Zn}, p(d)}{N_{p(d)} C_{65} \operatorname{Cu}, p(d)}.$$
(12)

Количество ядер $N_{65}{Zn, p(d)}^{65}$ Zn определялось по формуле (5) с соответствующими в ней заменами: ε_{γ} (1115) = 0,01323 ± 2 %, использовалась площадь пика с энергией 1115 кэВ, период полураспада 65 Zn, равный $T_{1/2}$ = 244,26 сут., и $b_{\gamma}(1115) = 0,49\pm 2$ % [15]. Поверхностная толщина находилась как

$$C_{65_{\operatorname{Cu},p(d)}} = \frac{0,3083\Delta x \,\rho_{\operatorname{Cu}}N_A}{0,3083\cdot65 + 0,6917\cdot63} = 0,0048462\Delta x \,\rho_{\operatorname{Cu}}N_A,\tag{13}$$

где использовался естественный изотопный состав меди: 63 Cu–69,17 %, 65 Cu–30,83 %, $\rho_{Cu} = 8,96$ г/см². Во втором варианте выполнялось дифференцирование энергетической зависимости выхода 65 Zn толстого не простреливаемого сборника толщиной 200 мкм

$$\sigma_{pn(d,2n)} = \frac{\Delta Y_{65}}{\Delta C_{65}} \frac{1}{\operatorname{Cu},p(d)}, \qquad (14)$$

$$\Delta Y_{65}_{Zn,p(d)} = Y_{65}_{Zn} \left(E_{p(d)} \right) - Y_{65}_{Zn} \left(E'_{p(d)} \right),$$

$$E_{pd} > E'_{p(d)},$$

$$\Delta C_{65}_{Cu,p(d)} = 0,0048462 \Delta R \rho_{Cu} N_{A},$$
(15)

где $Y_{65_{Zn}}(E_{p(d)})$, $Y_{65_{Zn}}(E'_{p(d)})$ – выходы ядер ⁶⁵Zn, вызванные одним протоном (дейтроном) при энергиях протонов (дейтронов) $E_{p(d)}$ и $E'_{p(d)}$, соответственно; ΔR – разность пробегов протонов (дейтронов) с меди (данные SRIM [9]), имеющих энергии $E_{p(d)}$ и $E'_{p(d)}$ при падении на сборник 200 мкм.

Проводилось обнаружение фоновых гамма-линий, совпадающих с обрабатываемыми. В измерениях с медными сборниками, где время отстойки составляло 15–25 сут., не выявлено таких линий. Высвечивание сборников 30 мкм не выявили линии 477,6 кэВ, что указывает на полное торможение ядер ⁷Ве в мишенных слоях LiF. В исследованиях с алюминиевыми сборниками (рис. 3, 4) был обнаружен изотоп ⁵⁵Со ($T_{1/2} = 17,53$ ч., основные линии 477,2 (20,2 %), 931,5 (75 %), 1408,7 (16,5 %)), который высвечивает ряд линий, в т. ч. линию 477 кэВ. Он образуется в реакции ⁵⁴Fe(*d*, *n*)⁵⁵Со, протекающей на примеси алюминия. Обнаружено (рис. 3, 5) образование ²⁴Na ($T_{1/2} = 14,959$ ч., линии 1368,5 (100 %), 2753,9 (99,9 %), 3857,3 (0,052 %)). Возможные реакции образования этих ядер: ²³Na(*d*, *p*)²⁴Na (*Q* = 4,724 МэВ) или ²⁶Mg(*d*, *a*)²⁴Na (*Q* = 2,916 МэВ) на примесях ²³Na и ²⁶Mg. Образование (рис. 3, 6) ^{69m}Zn ($T_{1/2}$ = 13,76 ч., основная линия 438,6 (94,8 %)) в реакциях ⁶⁸Zn(*d*, *p*)^{69m}Zn (*Q* = 3,779 МэВ) или ⁷⁰Zn(*d*, *t*)^{69m}Zn (*Q* = -3,398 МэВ) на примесях (⁶⁸Zn - 18,8 %, ⁷⁰Zn - 0,6 %). Образование (рис. 3): ⁵⁶Mn ($T_{1/2}$ = 2,58 ч., основные линии 846,8 (98,9 %), 1810,7(27,2 %), 2133,0(14,3)), ⁶⁷Cu ($T_{1/2}$ = 2,58 сут., основная линия 184,6 (48.9 %)), ⁶⁷Ga ($T_{1/2}$ = 3,26 сут., основные линии 184,6 (20,4 %), 208,9 (2,33 %), 300,2 (16,6 %); ⁷²Ga ($T_{1/2}$ = 14,1 ч, основные линии 600,9 (5,54 %), 630 (24,8 %), 834,0 (95 %), 894,2 (9,88 %), 1050,7 (6,81 %), 1464 (3,55 %), 1596,7 (4,24 %), 1861,1 (5,25 %), 2201,7 (25,9 %), 2491,0 (7,68 %), 2507,8 (12,8 %)); ⁷²Zn ($T_{1/2}$ = 46,1 ч., некоторые линии 600,9 (7,95 %), 630 (35,5 %), 786,4 (4,6 %), 834,0 (137,2 %)). При малых временах отстойки (20–30 мин) в спектрах видна линия с энергией 1780 кэВ, обусловленная распадом ядер ²⁸A1 ($T_{1/2}$ = 2,24 мин), образующихся в реакции ²⁷Al(*d*, *p*)²⁸A1.



Рис. 3. Спектр импульсов от регистрации γ-квантов из алюминиевой сборки без мишенных слоев, облученной дейтронами с энергией 8,8 МэВ (время отстойки 25 мин, не выяснена природа линий 1294 и 2170 кэВ). SEP – Single Escape Peak, FEP – Full Energy Peak, DEP – Double Escape Peak (окончание рисунка на с. 263)



б



Рис. 3. Окончание

в



Рис. 4. Регистрация распада ⁵⁵Со ($T_{1/2} = 17,53$ ч). Линия 477,2 кэВ: \circ – эксперимент, непрерывная линия – описание с $T_{1/2} = 17,49(48)$ ч; линия 931,5 кэВ: \bullet – эксперимент, штрихпунктирная линия – описание с $T_{1/2} = 17,25(59)$ ч



Рис. 5. Регистрация распада ²⁴Na ($T_{1/2} = 14,959$ ч) Линия 1368,5 кэВ: **—** – эксперимент, пунктирная линия – описание с $T_{1/2} = 15,18(19)$ ч; линия 2753,9 кэВ: о – эксперимент, непрерывная линия – описание с $T_{1/2} = 15,18(19)$ ч



Рис. 6. Регистрация распада ^{69m}Zn (*T*_{1/2} = 13,76 (2) ч. Линия 438,6 кэВ: ■ – эксперимент, непрерывная линия – описание с *T*_{1/2} = 13,76(39) ч

Соотношения b_{γ} ряда линий (1368,5 и 2753,3 кэВ, 477 и 931 кэВ, 184 и 300 кэВ) полученных спектров и спектров источников ОСГИ позволили получить зависимость эффективности регистрации γ -квантов сразу в реальной геометрии высвечивания облученных алюминиевых сборников.

Если имелся вклад фоновой линии (еще не распался ⁵⁵Co) в линию распада ⁷Be, то он определялся по площади линии 931 кэВ с учетом b_{γ} и их значений эффективности регистрации.

Результаты измерений

Сечения реакций ⁷Li(p, n_0+n_1)⁷Be_{gs}, полученные в трех сериях при измерении сечений реакции ⁷Li(p, xt) и в отдельных измерениях (подложки из Ta, см. измерения [8], когда было изготовлено 48 мишеней), приведены в табл. 1. В первой колонке указаны средние энергии взаимодействия протонов в слое LiF (выполнено усреднение энергий, соответствующих индивидуальным измерениям), во второй – толщины слоев, измеренные взвешиванием по КП, в третьей – энергетическая толщина этих слоев, в четвертой – материал подложек слоев, в пятой и шестой – сечения, вычисленные с использованием C_C и C_I , соответственно. При энергии 5,78 МэВ представлены 10 результатов измерений, полученных на мишенях-свидетелях (представители десяти партий напыления) двух серий измерений. При энергии 7,76 МэВ приведены данные на мишеняхсвидетелях из третьей серии измерений. Случайные погрешности сечений индивидуальных измерений (равны погрешностям площадей гамма-линии 477,6 кэВ, другими составляющими можно пренебречь) в большинстве случаев, оказывается, меньше разброса этих сечений. По результатам десяти измерений на мишенях-свидетелях для значений C_C получаем среднее сечение (296,5±1,3%) мб и относительное эмпирическое среднеквадратичное отклонение 4%, а для C_I среднее значение составляет (299,8±3,1%) мб и относительное эмпирическое среднеквадратичное отклонение 9,8%. Видим, что средние сечения, полученные как с толщинами слоев индивидуального, так и взвешивания по КП, близки. Такая же ситуация наблюдается в результатах обработки четырех измерений при энергии 7,76 МэВ, где имеем эмпирические относительные среднеквадратичные отклонения 5,4% (для C_C) и 6,7% (для C_I). Взвешивание по КП более надежно, поэтому окончательные данные приводим для этого типа взвешивания. Исключение из этого правила отмечается.

При усреднении сечений использовалась процедура статистической обработки малого количества данных из работы [17], где используются веса усреднения, случайные внутренняя и внешние погрешности данных. Окончательная погрешность выбирается как наибольшая из этих погрешностей (указаны в табл. 1). Итак, случайные погрешности измеренных сечений ⁷Li(*p*, n_0+n_1)⁷Be_{gs} находятся в интервале 1,3–4,2 %, а систематическая – 1,6 % (ее составляющие – погрешность 1 % в N_p , погрешность 1,2 % в ε_{γ} (477,6)).

Таблица 1

| Г МэВ | $C = urr/ar^2$ | $\Delta \overline{F}$ кэB | Поллонию | При <i>C</i> _{<i>C</i>} | При С _І | |
|------------------|-------------------|----------------------------------|----------|--|---|--|
| L_p , wisd | C_C , MRI/CM | ΔL_p , RSD | подложка | σ _{рп} , мб | σ _{рп} , мб | |
| 1,947 | 588 601 | 91 93 Среднее: | Cu | 265,2±1,3 % 282,3±1,3 % Среднее: | 281,5±1,3 % 303,6±1,3 % Среднее: | |
| 2.666 | 613 | 66 65 | Cu | 276,6±1,1 % 283,9±1,1 % | 293,6±3,8 % 277,2±1,1 % 311,2±1,1 % | |
| 2,000 | 601 | Среднее: 66 | Cu | $\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $ | Среднее: 292,6±6,4 % | |
| 3,30 | 588 760 760 | 48 62 62 Среднее: | Cu | 296,0±1,3 % 285,2±1,3 % 304,4±1,3 % Cpeqhee: | 275,3±1,3 % 299,4±1,3 % 310,3±1,3 % Cpeq.Hee: | |
| 3,960 | 613 601 | 57 51 50 Среднее: 51 | Cu | 295,2±1,9 % 302,1±1,1 % 290,0±1,1 % Среднее: 298,7±2,9 % | <u>295±3,5 %</u> 315,3±1,1 % 301,9±1,1 % Среднее: 308,6±2,2 % | |
| 4,56 | 588 699 | 40 48 Среднее: 57 | Cu | 378,4±1,0 % 369,2±1,3 % Среднее 373,8±1,2 % | 377,7±1,0 % 383,2±1,3 % Среднее: 380,5±1,3 % | |
| 5,14 | 613 699 | 42 48 Среднее: 45 | Cu | 405,7±1,0 % 418,6±1,2 % Среднее: 412,7±1,4 % | 447,2±1,0 % 412,7±1,2 % Среднее: 430,0±4,0 % | |

Сечения реакции ${}^{7}\text{Li}(p, n_0 + n_1){}^{7}\text{Be}_{gs}$

Продолжение табл. 1

| \overline{F} MaB | $C = u m / \alpha c^2$ | $\Lambda \overline{E}$ roB | Π | При С _С | При С ₁ |
|--------------------|------------------------|----------------------------|----------|--|-------------------------------------|
| L_p , Mod | C_C , MKI/CM | ΔL_p , KH | подложка | σ _{pn} , мб | σ _{рп} , мб |
| | 699 | 38 33 | | 280,1±1,2 % 284,4±1,3 % | 349,8±1,2 % 315,3±1,3 % |
| | 601 | 32 | | 300,7±1,3 % | 309,1±1,3 % |
| | 288 780 | 43 | | $297,2\pm1,1\%$ 283.0±1.3.% | $203,2\pm1,1\%$ 282,5 $\pm1,3\%$ |
| | 678 | 43 | | $283,9\pm1,3.76$ 304 6±1 2 % | $282,3\pm1,3.76$ 279 4+1 2 % |
| 5,78 | 800 | 47 | Cu | $313.6\pm1.2\%$ | $256.3\pm1.2\%$ |
| | 872 | 37 | | $309.8 \pm 1.3 \%$ | $333.8\pm1.3\%$ |
| | 678 | 41 | | 303,3±1,3 % | 300,6±1,3 % |
| | 760 | 33 | | 287,8±1,2 % | 306,0±1,2 % |
| | 613 | Среднее: | | Среднее: | Среднее: |
| | | 34 | | 296,5±1,3 % | 299,8±3,1 % |
| | | 23 | | 216,1±1,0 % | 255,4±1,0 % |
| 6.25 | 699 | 19 | Cu | 232,4±1,0 % | 221,2±1,0 % |
| 0,55 | 588 | Среднее: | Cu | Среднее: | Среднее: |
| | | 21 | | 224,3±3,6 % | 238,3±7,2 % |
| | | 29 | | 189,5±0,8 % | 185,5±0,8 % |
| 6,91 | 872 | 26 | Cu | 193,0±0,9 % | 174,5±0,9 % |
| | /89 | Среднее: | | Среднее: | Среднее: |
| | | 28 | | 191,3±1,5 % | 180,0±3,1 % |
| | 872 789 | 29 | Cu | 143,7±1,0 % | 136,4±1,0 % |
| 7,46 | | 26 | | 151,0±1,2 % | 165,4±1,2 % |
| · | | Среднее: | | Среднее: | Среднее: |
| | | 28 | | 147,4±2,3 % | 150,9±9,6 % |
| | 872 760 | 30 | | $114,2\pm1,0\%$ | $104,6\pm1,0\%$ |
| 8,0 | | 26 Crawsor | Cu | $115,6\pm1,0\%$ | $95,5\pm1,0\%$ |
| 0,0 | | Среднее: | | Среднее: | Среднее: |
| | | 28 | | $97.6\pm1.0\%$ | 86 3+1 0 % |
| | 800 | 28 | | 106 2+1 2 % | 1063+11% |
| 8,64 | 789 | Среднее: | Cu | Среднее: | Среднее: |
| | | 28 | | $101,9\pm4,2\%$ | 96,3±7,2 % |
| | | 28 | | 74,7±1,2 % | 70,4±1,2 % |
| 0.00 | 800 | 27 | Cu | 78,5±1,2 % | 79,9±1,2 % |
| 9,09 | 760 | Среднее: | Cu | Среднее: | Среднее: |
| | | 28 | | 76,6±2,5 % | 75,2±6,3 % |
| | | 27 | | 79,7±1,2 % | 76,7±1,2 % |
| 9,62 | 800 | 26 | Cu | 83,2±1,2 % | 81,1±1,2 % |
| -,•= | 760 | Среднее: | _ ** | Среднее: | Среднее: |
| | | 27 | | 81,5±2 % | /8,9±2,8 % |
| | (70 | 24 | | $66,3\pm1,2\%$ | 59,8±1,2 % |
| 10,16 | 678 678 | | Cu | $\begin{array}{c} 0 /, 2 \pm 1, 2 \% \\ C particle \\ \end{array}$ | $(0,5\pm1,2\%)$ |
| | | Среднее: | | Среднее: | Среднее: |
| | | ∠4 | | 00,0±1,3 70 | 03,2=0,1 70 |

Окончание таблицы

| \overline{F} MaB | $C \rightarrow u \pi / \omega x^2$ | $\Delta \overline{F}$ кэB | Поллонию | При <i>C_C</i> | При С _І |
|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------|---|---|
| L_p , MoD | C_C , MKI/CM | ΔL_p , Rob | подложка | σ _{рп} , мб | σ _{pn} , мб |
| 7,76 | 491 454 458 258 | 16 15 15 9 Среднее 14 | Cu | 115,2±1,1 % 127,4±1,3 % 128,7±1,2 % 130,0±1,3 % Среднее: 125,3±2,7 % | 128,0±1,1 % 139,8±1,3 % 122,3±1,2 % 120,5±1,3 % Среднее: 127,7±3,4 % |
| 3,50 | 745 (3 мишени) | 63 | Та | 287,3±2,0 % | 286,4±4,0 % |
| 4,41 | 750 (3 мишени) | 52 | Та | 325,4±1,5 % | 330,4±3,5 % |
| 4,86 | 763 (3 мишени) | 50 | Та | 412,0±2 % | 422,4±5,5 % |
| 5,53 | 704 (3 мишени) | 41 | Ta | 328,8±2,3 % | 325,4±3,5 % |
| 11,2 | 947 (2 мишени) | 15 | Та | 60,3±2,3 % | 66±3,5 % |

Место, которое занимают наши результаты, можно понять, рассматривая другие экспериментальные интегральные сечения образования нейтронов в реакции ⁷Li + *p*. Существует три наиболее точных набора [18–20] экспериментальных данных по полным сечениям образования нейтронов, начиная от порога 1,881 до 5 МэВ. Эти данные получены с помощью 4 π -детекторов нейтронов. При более высоких энергиях протонов в относительных единицах измерена [21] энергетическая зависимость полного выхода нейтронов. Раздельно парциальные сечения ⁷Li(*p*, *n*_{0,1}) измерены в работах [22–24] методом времени пролета (TOF). В интервале от 2,380 до 6 МэВ по регистрации γ -квантов измерены парциальные сечения реакции ⁷Li(*p*, *n*₁)⁷Be^{*}(429) [25]. Нам известно только одно экспериментальное исследование [26] интегральных сечений многочастичной реакции ⁷Li(*p*, ³He+*n*)⁴He ($E_{nop} = 3,69$ МэВ).

На рис. 7 показаны наши результаты и некоторые из перечисленных литературных данных. Наши данные по суммарному сечению реакций ⁷Li(p, n_0+n_1) являются единственными в том смысле, что получены в активационных измерениях. Также показаны данные по полному сечению образования нейтронов [26], которые представляют собой сечения ⁷Li(p, n_0+n_1) и многочастичные каналы.

Сечения реакции ⁶⁵Cu(*p*, *n*)⁶⁵Zn, полученные в трех сериях при измерении ⁷Li(*p*, *xt*) и в отдельных измерениях на 30 мкм медных фольгах, приведены в табл. 2. Имеем два типа данных. Одни получены на простреливаемых протонами мишенях в виде 30 мкм медных фольг (левая часть таблицы), а другие – при дифференцировании выхода ⁶⁵Zn (рис. 8) из толстых мишеней – 200 мкм медных фольг (правая часть таблицы). На рис. 8 приведен выход из толстой мишени (30+200 мкм), полученный простым сложением выходов из тонкой (30 мкм) и толстой (200 мкм) мишеней. В табл. 2, в отличие от табл. 1, опущены промежуточные процедурные результаты и приведены окончательные данные. В ней \overline{E}_p – средняя энергия взаимодействия протонов в интервале усреднения ΔE_p , т. е. точка в середине этого интервала. Для простреливаемых мишеней ΔE_p является их энергетической толщиной, а для толстых мишеней – энергетическим интервалом между энергиями протонов, при которых измерены выходы (при определении этих энергий учтены потери энергии в слоях LiF, см. табл. 1). Указанные погрешности сечений – случайные, которые отражают разброс индивидуальных результатов измерений. Следует отметить, разброс



Рис. 7. Сечения образования нейтронов в реакции ⁷Li+p (• – наши данные; • и + – полные сечения образования нейтронов соответственно из [20] и [21] (нормированы на данные [19]); \triangle , \Box и \Rightarrow – сечения ⁷Li(p, n_0+n_1) соответственно из [21–23])

результатов измерений на десяти различных 30 мкм мишенях (те же 10 облучений, что и в табл. 1) характеризуется эмпирическим относительным среднеквадратичным отклонением, равным 1,6 %. Примерно такой разброс толщин был получен при взвешивании на аналитических весах. При этом разброс в выходе из 200 мкм мишеней (те же 10 облучений) имеет эмпирическое относительное среднеквадратичное отклонение 3,3 %. Природа этого разброса, по-видимому, обусловлена особенностями торможения протонов. Эти среднеквадратичные отклонения учтены в случайных погрешностях сечений, которые составляют 1,8–15 %. Систематическая погрешность равна 2,2 % (ее составляющие – погрешность 1 % в N_p , погрешность 2 % в ε_{γ} (1115)).

| | 30 мкм | | | 200 мкм | |
|------------------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------|-------------|
| \overline{E}_p , МэВ | ΔE_p , МэВ | сечение, мб | \overline{E}_p , МэВ | ΔE_p , МэВ | сечение, мб |
| 2,839 | 1,754 | 30,2±2,9 % | 2,395 | 0,446 | 5,8±15 % |
| 3,467 | 1,618 | 65,4±2,1 % | 2,979 | 0,707 | 26,4±5,3 % |
| 4,08 | 1,38 | 114,4±1,9 % | 3,650 | 0,521 | 80,4±4,6 % |
| 4,642 | 1,314 | 189,5±2,1 % | 4,250 | 0,579 | 155,6±4,7 % |
| 5,09 | 1,22 | 258,9±1,8 % | 4,827 | 0,576 | 239,8±4,1 % |
| 5,73 | 1,15 | 346,8±1,9 % | 5,441 | 0,651 | 288,3±4,7 % |
| 6,31 | 1,02 | 433,4±1,8 % | 6,054 | 0,576 | 389,9±4,7 % |
| 6,85 | 0,96 | 489,0±1,8 % | 6,619 | 0,553 | 494,8±4,7 % |

Сечения реакции 65 Cu(p, n) 65 Zn

Таблица 2

Окончание таблицы

| | 30 мкм | | 200 мкм | | | |
|------------------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------|-------------|--|
| \overline{E}_p , МэВ | ΔE_p , МэВ | сечение, мб | \overline{E}_p , МэВ | ΔE_p , МэВ | сечение, мб | |
| 7,38 | 0,91 | 533,0±1,8 % | 7,172 | 0,553 | 491,9±4,7 % | |
| 7,91 | 0,86 | 618,8±1,8 % | 7,720 | 0,545 | 670,9±4,7 % | |
| 8,44 | 0,83 | 660,6±1,8 % | 8,265 | 0,543 | 701,1±4,7 % | |
| 8,96 | 0,79 | 690,6±1,8 % | 8,805 | 0,538 | 697,0±4,7 % | |
| 9,48 | 0,76 | 709,2±1,8 % | 9,343 | 0,535 | 690,0±4,7 % | |
| 10,00 | 0,73 | 727,8±1,8 % | 9,867 | 0,520 | 703,1±4,7 % | |
| 10,52 | 0,71 | 756,0±1,8 % | — | - | - | |
| $11,2^{*)}$ | 0,67 | 736±1,9 % | | _ | _ | |
| $11,7^{*)}$ | 0,67 | 700±1,8 % | _ | _ | _ | |





Рис. 8. Выход образования ⁶⁵Zn в реакции ⁶⁵Cu(p, n)⁶⁵Zn из толстой мишени (\Box – толстые 200 мкм мишени, • – толстые мишени (30+200 мкм))

Наши данные по сечению 65 Cu(*p*, *n*) 65 Zn хорошо согласуются с большинством имеющихся литературных данных (рис. 9). Они хорошо воспроизводятся расчетами с использованием программного кода EMPIRE-3.2.2 [32] с параметрами по умолчанию.



Рис. 9. Сечения реакции ⁶⁵Cu(*p*, *n*)⁶⁵Zn (наши данные: • – 30 мкм мишень, \circ – 200 мкм мишень; + – [27]; \Rightarrow – [28], умноженные на 3,3; \triangle – [29], \blacktriangle – [30]; \Box – [31], сплошная кривая – расчет (по умолчанию) по программе EMPIRE [32]

Сечения реакции ⁶Li(*d*, n_0+n_1)⁷Be_{gs}, ⁷Li(*d*, 2n)⁷Be_{gs}, полученные при измерении сечений реакций ⁶Li(*d*, *xt*) и ⁷Li(*d*, *xt*) с медными и алюминиевыми сборниками, а также в отдельных измерениях на мишенях с Та подложками, приведены в табл. 3. В первой колонке указаны средние энергии взаимодействия дейтронов в слое LiF (выполнено усреднение энергий, соответствующих индивидуальным измерениям), во вгорой – средняя энергетическая толщина этих слоев, в третьей – энергетическая толщина мишени, в четвертой – материал подложки слоев. Далее приведены результаты индивидуальных измерений сечений $\sigma_{\Sigma}^{(7)}$ и $\sigma_{dn}^{(6)}$ со случайными погрешностями, обусловленными только погрешностями площадей гамма-линий с энергией 477,6 кэВ. По этим результатам находились средние значения, по которым затем определялись сечения $\sigma_{dn}^{(6)}$ и $\sigma_{d2n}^{(7)}$ (см. раздел «Получение сечений реакций»), которые и приведены на рис. 10 и 11. Наши данные по первой реакции находятся в согласии со всеми имеющимися, исключая значения сечения из работы [2]. Сечения реакции ⁷Li(*d*, 2*n*)⁷Be до настоящих исследований были измерены в двух работах [2, 3]. Наши данные в целом подтверждают результаты работы [3], при этом они имеют особенность в энергетической зависимости в области энергии дейтронов 6,7 МэВ.

Таблица З

| \overline{E}_d , МэВ | Интервал ΔE_d , кэВ | $\Delta \overline{E}_d$, кэВ | подложка | $\sigma_{\Sigma}^{(7)}$, мб | $\sigma_{\Sigma}^{(6)}$, мб | $\sigma_{dn}^{(6)}$, мб | $\sigma_{d2n}^{(7)}$, мб |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------|--|--|--|---------------------------|
| 2,15 | 100-180 | 150 | Cu | 3,38±5,2 % 3,52±6,0 % 3,74±5,0 % Среднее: 3,55±4,4 % | 87,7±1,7 % 86,3±1,9 % 85,7±1,5 % Среднее: 86,6±0,7 % | 96,5±0,7 % 99,0±4,4 % ^{**} | 0 |
| 2,93 | 85-160 | 120 | Cu | 3,75±4,5 % 3,73±5,0 % 3,25±4,9 % Среднее: 3,58±4,5 % | 86,2±1,4 % 87,2±1,5 % 89,1±1,9 % Среднее: 87,5±0,9 % | $97,6\pm0,9\%$ $100\pm4,5\%^{**}$ | 0 |
| 3,65 | 80-130 | 100 | Cu | 2,86±4,5 % 2,75±5,4 % 2,91±4,2 % Среднее: 2,84±1,7 % | 74,3±2,1 % 75,6±1,3 % 75,2±1,6 % 70,1±1,9 % 70,8±1,8 % 74,7±2,2 % 76,4±1,8 % Среднее: 73,9±1,2 % | 82,4±1,2 % 79,3±1,7 % ^{**} | 0 |
| 4,32 | 70–90 | 80 | Cu | 2,61±6 % 2,45±7 % 2,48±6,6 % Среднее: 2,51±2,0 % | 64,7±2,3 % 66,9±2,3 % 67,2±2,0 % Среднее: 66,3±1,2 % | 73,9±1,2 % 70,1±2,0 % ^{**} | 0 |
| 4,96 | 60–90 | 80 | Cu | 2,56±5 % 2,76±5 % 2,50±5,6 % Среднее: 2,61±3 % | 55,6±2,2 % 61,0±2,2 % 57,9±2,3 % Среднее: 58,2±2,7 % | 63,3±2,9 % | 0,30±56 % |
| 5,58 | 60–70 | 65 | Cu | 13,9±5,5 % 13,0±4,2 % 14,5±5,0 % Среднее: 13,8±3,1 % | 55,5±2,3 % 57,4±2,4 58,5±2,4 % Среднее: 57,1±1,3 % | 61,6±1,1 | 12,0±3,7 % |
| 6,16 | 60–70 | 65 | Cu | 22,4±3,7 % 21,7±3,9 % 23,2±3,1 % Среднее: 22,4±1,9 % | 53,3±3 % 54,7±2,8 % 53,9±3,1 % Среднее: 54,0±0,8 % | 57,1±0,8 % | 21,1±2 % |
| 6,77 | 50-70 | 60 | Cu | 25,5±4,2 % 26,7±4,3 % 27,2±4,4 % Среднее: 26,5±1 % | 55,6±2,6 % 55,9±2,3 % 54,7±2,3 % Среднее: 55,5±0,7 % | 58,3±0,7 % | 24,5±1,1 % |

Сечения реакций ${}^{6}\text{Li}(d, n_0+n_1){}^{7}\text{Be}_{gs}, {}^{7}\text{Li}(d, 2n){}^{7}\text{Be}_{gs}$

АКТИВАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ...

Окончание таблицы

| \overline{E}_d , МэВ | Интервал ΔE_d , кэВ | $\Delta \overline{E}_d$, кэВ | подложка | $\sigma_{\Sigma}^{(7)}$, мб | $\sigma_{\Sigma}^{(6)}$, мб | σ _{dn} ⁽⁶⁾ , мб | σ _{d2n} ⁽⁷⁾ , мб |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 7,36 | 50-70 | 60 | Cu | 35,1±4,8 % 36,8±4,4 % Среднее: 36,0±2,4 % | 51,8±4,0 % ^{*)} 52,8±3,1 % 50,3±3,5 Среднее: 51,6±1,4 % | 52,7±1,5 % | 35,4 % |
| 3,93 | 70–120 | 90 | Al | 2,84±10 % 2,63±8 % 2,95±7 % Среднее: 2,81±3,3 % | 70,0±3 % 67,1±3,2 % 70,0±3,4 % 64,4±4,0 % 69,1±3,8 % Среднее: 68,1±1,6 % | 75,9±1,6 % 78,5±3,3 % | 0 |
| 5,44 | 55-70 | 65 | Al | 4,70±8 % 5,44±8 % Среднее: 5,07±7 % | 63,5±4,1 % 60,6±5,4 % 57,4±4,5 % Среднее: 60,5±2,5 % | 66,4±2,5 % | 2,8±13 % |
| 5,73 | 40-70 | 55 | Al | 17,5±4,1 % 19,0±4,8 % 20,0±4,8 % Среднее: 18,8±2,8 % | 62,5±3 % ^{*)} 62,4±3,2 % 59,2±3,1 Среднее: 61,4±1,9 % | 68,0±1,5 % | 17,0±3,2 % |
| 6,78 | 50-80 | 60 | Al | 26,2±3 % 24,1±3,2 % Среднее: 25,1±4,8 % | 58,5±3,2 % 56,6±3,0 % Среднее: 57,6±1,6 % | 60,8±1,7 % | 23,7±5,2 % |
| 7,70 | 40–70 | 50 | Al | 40,6±2,1 % 40,3±3,2 % 38,0±2,4 % Среднее: 39,6±1,5 % | 51,2±3,1 % 52,7±2,5 % 51,8±2,3 % Среднее: 51,9±0,8 % | 52,5±1,0 % | 39,1±1,6 % |
| 8,45 | 40-80 | 55 | Та | 47,4±1,5 % 46,2±1,4 % Среднее: 46,8±1,3 % | 45,2±1,4 % 49,7±1,2 % Среднее: 47,5±4,6 % | 46,8±5,2 % | 46,8±1,4 % |
| 9,13 | 40–60 | 50 | Та | 55,3±1,6 % 52,0±1,7 % Среднее: 53,7±3,2 % | 46,1±1,3 % 43,5±2,2 % Среднее: 44,8±2,9 % | 43,0±1,4 % | 54,1±3,3 % |
| 9,78 | 40–60 | 55 | Та | 55,5±1,2 % 60,3±1,1 % Среднее: 57,9±4,1 % | 47,4±1,2 % 45,3±1,1 % Среднее: 46,4±2,5 % | 44,2±2,9 % | 58,4±4,2 % |

Примечание: * – индивидуальное взвешивание; ** – сечение $\sigma_{dn}^{(7)}$



Рис. 10. Сечения реакции ${}^{6}\text{Li}(d, n_{0}+n_{1}){}^{7}\text{Be}_{gs}$ (наши данные: • – слои на медной подложке толщиной 200 мкм, \star – слои в Al сборниках, \blacktriangle – слои на Ta подложках; \square – [3]; \blacksquare – [2]; \blacksquare – [34]; + – [35]; \blacklozenge – [33])



Рис. 11. Сечения реакции ⁷Li(*d*, 2*n*)⁷Be_{gs} (наши данные: • – слои на Си подложке толщиной 200 мкм, • – слои в Аl сборниках, • – слои на Та подложках; $\Box - [3]$; * – [2])

Сечения реакции 65 Cu(*d*, 2*n*) 65 Zn, полученные при измерении 6 Li(*d*, *xt*) и 7 Li(*d*, *xt*) с медными сборниками и в отдельных измерениях на 30 мкм медных фольгах, приведены в табл. 4.

Таблица 4

| Тонкая мишень 30 мкм | | | Толстая мишень 200 мкм | | | |
|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|--|
| \overline{E}_d , МэВ | ΔE_d , кэВ | сечение, мб | \overline{E}_d , МэВ | ΔE_d , кэВ | сечение, мб | |
| 4,808 | 0,637 | 2,11±10 % | _ | _ | _ | |
| 5,072 | 1,16 | 28,3±7 % | 4,70 | 0,400 | 6,0±5 % | |
| 5,46* | 1,746 | 65,2±4 % | 5,230 | 0,650 | 34,0±8,6 % | |
| 5,845 | 1,69 | 111,5±3,1 % | 5,840 | 0,580 | 116,8±2,6 % | |
| 6,413 | 1,597 | 190,5±1,3 % | 6,440 | 0,610 | 193±3 % | |
| 6,957 | 1,512 | 278±1,3 % 278±1,6 % | 7,030 | 0,580 | 322±2,3 % | |
| 7,520 | 1,436 | 359±2,2 % | _ | _ | _ | |
| 8,065 | 1,346 | 437,5±1,0 % | - | - | _ | |
| 8,61* | 1,264 | 503±1,3 % | - | - | - | |
| 9,22* | 1,170 | 595±1,3 % | _ | _ | - | |
| 9,50* | 1,128 | 630±1,4 % | _ | _ | - | |
| 10,15* | 1,028 | 648±1,2 % | _ | _ | _ | |
| 10,52* | 0,971 | 651±1,4 % | _ | _ | _ | |

Сечения реакции 65 Cu(d, 2n) 65 Zn

Примечание: * – отдельные измерения.

Все, что было сказано по обработке сечений ⁶⁵Cu(*p*, *n*)⁶⁵Zn, относится и к получению данных по сечениям ⁶⁵Cu(*d*, 2n)⁶⁵Zn. На рис. 12 показана энергетическая зависимость выхода образования ⁶⁵Zn в реакции ⁶⁵Cu(*d*, 2n)⁶⁵Zn из толстой мишени толщиной 200 мкм. Выход имеется и ниже порога этой реакции. Он обусловлен реакцией радиационного захвата ⁶³Cu(*d*, γ)⁶⁵Zn. Из этих данных получаем при средних энергиях дейтронов 2,875 и 3,95 МэВ сечения ⁶³Cu(*d*, γ)⁶⁵Zn 64 и 200 нб, соответственно. В литературе отсутствуют сечения по этой реакции.



Рис. 12. Выход образования 65 Zn в реакции 65 Cu(d, 2n) 65 Zn из толстой мишени (200 мкм сборников)

Наши результаты по реакции 65 Cu(d, 2n) 65 Zn (рис. 13) совпадают с данными [36], являясь при этом более подробными в энергетической зависимости. С параметрами по умолчанию они не воспроизводятся в расчетах с помощью программного кода EMPIRE-3.2.2 [32]; требуется регулировка параметров расчета.



Рис. 13. Сечения реакции ⁶⁵Cu(*d*, 2*n*)⁶⁵Zn (наши данные: • – толщина мишени 30 мкм, ▲ – толщина мишени 200 мкм; ☆ – [36], △ – [37], сплошная кривая – расчет по программе EMPIRE [32])

Заключение

Получены новые экспериментальные данные по сечениям реакций ${}^{7}\text{Li}(p, n_0+n_1){}^{7}\text{Be}_{gs}$, ${}^{6}\text{Li}(d, n_0+n_1){}^{7}\text{Be}_{gs}$, ${}^{7}\text{Li}(d, 2n){}^{7}\text{Be}_{gs}$, ${}^{65}\text{Cu}(p, n){}^{65}\text{Zn}$, ${}^{65}\text{Cu}(d, 2n){}^{65}\text{Zn}$, которые могут быть использованы для уточнения их оценки. Наши данные по суммарному сечению реакций ${}^{7}\text{Li}(p, n_0+n_1)$ являются единственными в том смысле, что они получены активационным методом. Важной особенностью представленных данных является то, что измерение сечений на литии и меди проводилось совместно, тем самым осуществлялось их взаимное мониторирование.

Список литературы

1. Zvenigorodskij A. G., Zherebtsov V. A., Lazarev L. M. et al. The library of evaluated and experimental data on charged particles for fusion application. IAEA-NDS-191, 1999.

2. Высоцкий О. Н., Горпинич О. К., Зарицкий В. С. и др. Функция возбуждения реакции ${}^{6}\text{Li}(d, n)^{7}\text{Be}$ и ${}^{7}\text{Li}(d, 2n)^{7}\text{Be}$ // Сб. тез. докл. на совещании по ядерной спектр. и структуре атом. ядра. Ленинград, 1990. С. 338.

3. Гужовский Б. Я., Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г. и др. Полные сечения реакций ⁶Li(*d*, *n*)⁷Be, ⁷Li(*d*, 2*n*) ⁷Be и ⁶Li (*t*, 2*n*)⁷Be // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1980. Т. 44. Вып. 9. С. 1983.

4. Абрамович С. Н., Генералов Л. Н., Гужовский Б. Я. и др. // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. 1992. Вып. 9. С. 82.

5. Abramovich S. N., Generalov L. N., Zvenigorodski A. G. Measurement of Cross-Section for 6,7 Li(*d*, *t*) Reactions with Radiochemical Methods // Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology. Trieste. 1997. Vol. 59. P. 632.

6. Абрамович С. Н. Технические возможности ВНИИЭФ для исследований в области ядерной спектроскопии // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997. ТИЯС-ХІ. Специальный выпуск. С. 4.

7. Абрамович С. Н., Гужовский Б. Я., Генералов Л. Н. и др. Полное сечение реакции ¹⁹F(*d*, *t*) // Изв. РАН. Сер. Физ. 1993. Т. 57, № 10. С. 187.

8. Абрамович С. Н., Генералов Л. Н., Гужовский Б. Я. и др. Измерение сечения реакции ⁹Ве(*d*, *t*) // Там же. 1994. Т. 58, № 1. С. 87.

9. Ziegler J. F., Biersack J. P., Ziegler M. D. et al. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. Ver., 2008; http://www.srim.com.

10. Генералов Л. Н. Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г. и др. Измерение дифференциального сечения образования γ-квантов с *E*γ = 3,563 МэВ из реакции ⁹Be(*p*, α)⁶Li* (3,563 МэВ) под углом 0° // Изв. РАН. Сер. Физ. 2003. Т. 67, № 10. С. 1462.

11. Генералов Л. Н. Лебедев Б. Л., Ливке А. В. и др. Экспериментально-расчетные исследования абсолютной эффективности регистрации γ-квантов коаксиальным HPGe-детектором GC 5019 при *E*γ = 0,24–18,565 МэВ // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69, № 1. С. 85. 12. Генералов Л. Н. Лебедев Б. Л., Михайлюков К. Л. и др. Экспериментально-расчетные исследования функции отклика BGO-детектора (127×60 мм) к гамма-квантам с $E\gamma = 16,00$ и 20,43 МэВ: Препринт. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009.

13. Vano E., Conzalez L., Gaeta R. et al. An empirical function which relates the slope of the Ge(Li) efficiency curves and the active volume // Nucl. Instr. and Meth. 1975. Vol. 123. P. 573.

14. Grand P. M. Dependence of the Ge(Li) efficiency slope on the source-to-detector distance // Ibid. Vol. 127. P. 371.

15. Reus U., Westmeier W. Catalog of gamma rays from radioactive decay $\prime\prime$ Atom. Nucl. Data Table. 1983. Vol. 29. P. 1.

16. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei A = 5-10 // Nucl. Phys. A. 1979. Vol. 320. P. 1.

17. Вуколов В. А., Чукреев Ф. Е. Нейтронные выходы актинидных химических компаундов // Атом. энергия. 1987. Т. 62. С. 232.

18. Macklin R. L., Gibbons J. H. Study of the $T(p, n)^3$ He and $^7Li(p, n)^7$ Be Reactions // Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 105.

19. Gibbons J. H., Macklin R. L. Total Neutron Yields from Light Elements Under Proton And Alpha Bombardment // Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 571.

20. Sekharan K. K., Laumer H., Kern B. D. et al. A neutron detector for measurement of total neutron production cross sections. ⁷Li(p, n) cross section // Nucl. Insrt. and Meth. 1976. Vol. 133. P. 253.

21. Bair J. K., Jones C. M., Willard H. B. Neutrons from the proton bombardment of ⁶Li, ⁷Li, ⁹Be, ¹¹B, and ¹⁸O // Nucl. Phys. 1964. Vol. 53. P. 209.

22. Borchers R.R., Poppe C.H. Neutrons from proton bombardment of lithium // Phys. Rev. 1963. Vol. 129. P. 2679.

23. Poppe C. H., Anderson J. D., Davic J. C. et al. Cross section for the ${}^{7}\text{Li}(p, n){}^{7}\text{Be}$ reaction between 4,2 and 26 MeV // Ibid. C. 1976. Vol. 14. P. 438.

24. Elbakr S. A., Van Heerden I. J., McDonald W. J. et al. Measurements of neutron angular distributions from the ⁷Li(p, n)7Be reaction // Nucl. Instr. and Meth. 1972. Vol. 105. P. 519.

25. Presser G., Bass R. Reactions ⁷Li+n, ⁷Li+p and excited states of the A = 8 System // Nucl. Phys. A. 1972. Vol. 182. P. 321.

26. Scott M. C. The rate of energy loss and neutron yield for protons on thick lithium targets at energies from 3-10 MeV // Jour. Nucl. Energy. 1971. Vol. 25. P. 405.

27. Sevior M. E., Mitchell L. W., Anderson M. R. et al. Absolute cross sections of proton induced reactions on ⁶⁵Cu, ⁶⁴Ni, ⁶³Cu // Austr. Jour. 1983. Vol. 36. P. 463.

28. Kopecky P. Proton beam monitoring via the 65 Cu(p, x) 58 Co, 63 Cu(p, 2n) 62 Zn, 65 Cu(p, n) 65 Zn reactions in copper // Appl. Rad. and Isot. 1985. Vol. 36. P. 657.

29. Дмитриев П. П., Константинов И. С., Краснов Н. Н. Функции возбуждения реакции 65 Cu(p, n) 65 Zn // Атом. энергия. 1968. Т. 24. С. 279.

30. Левковский В. Н. Сечения активации нуклидов средней массы (А = 40–100) протонами и альфа-частицами средних энергий (*E* = 10–50 МэВ). М.: Интер-Весы. 1991.

31. Kormali S. M., Swindle D. L., Schweikert E. A. Charged particle activation of medium Z elements. II. Proton excitation functions // Jour. RC. 1976. Vol. 31. P. 437.

32. Herman M., Capote R., Sin M. et al. EMPIRE-3.2 Malta modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation. INDC(NDS)-0603, BNL-101378-2013.

33. Hirst F., Johnstone I., Poole M. G. The D-6Li reactions // Philos. Mag. 1954. Vol. 45. N 366. P. 762.

34. Ruby L., Pyle R. V., Wong Y. C. Cross Section for the Production of ⁷Be from ⁶Li Interactions // Nucl. Sci. Eng. 1977. Vol. 63. P. 197.

35. Szabo J., Varnagy M., Body Z. T. et al. Charged particle reaction cross sections relevant for nuclear astrophysics // Proc. Conf. Nucl. Data for Science and Tech. Antwer., 1982. P. 956.

36. Okamura H., Tamagawa S. Excitation Functions For the Deuteron-Induced Reactions on ⁶³Cu and ⁶⁵Cu // Nucl. Phys. A. 1971. Vol. 169. P. 401.

37. Pement F.W., Wolke R.L. Compound-statistical features of deuteron-induced reactions. II. The compound nucleus and stripping-evaporation mechanisms in (d, 2n) reactions // Ibid. 1966. Vol. 86. P. 429.

Activation Measurements of the Integral Cross Sections of Reactions 7 Li(p, n₀+n₁) 7 Be_{g.s.}, 6 Li(d, n₀+n₁) 7 Be_{g.s.}, 7 Li(d, 2n) 7 Be_{g.s.}, 65 Cu(p, n) 65 Zn, 65 Cu(d, 2n) 65 Zn, 63 Cu(d, γ) 65 Zn

L. N. Generalov, S. N. Abramovich, S. M. Selyankina

Cross sections of the 7Li(p, n_0+n_1)7Begs, 6Li(d, n_0+n_1)7Begs, 7Li(d, 2n)7Begs, 65Cu(p, n)65Zn, 65Cu(d, 2n)65Zn, 63Cu(d, γ)65Zn reactions are measured by the activation method on EGP-10 electrostatic tandem accelerator (RFNC-VNIIEF) at proton (deuteron) energy 2–10 MeV. The technique of sample production and weighting of LiF layer thicknesses is described. We also present target irradiation, measurement of gamma-quanta registering efficiency, reaction cross-sections, acquisition and their values.