

FEi--2281.

ФЭИ-2281



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А. А. ЛЫЧАГИН, Б. В. ДЕВКИН, Б. В. ЖУРАВЛЕВ,
М. Г. КОБОЗЕВ, С. П. СИМАКОВ, В. А. ТАЛАЛАЕВ
(Физико-энергетический институт)
С. ГЛАВАЧ, П. ОБЛОЖИНСКИЙ
(Физический институт ЦЭФИ САН, Братислава)

**Сечения образования гамма-квантов
в реакциях $^{28}\text{Si}(n, \gamma)$
при энергии нейтронов 14,1 МэВ**

ФЭИ - 2287

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А.А.Лычагин, Б.В.Девкин, Б.В.Журавлев, В.Г.Кобозев,
С.П.Симаков, В.А.Телалва
(Физико-энергетический институт)
С.Главац, П.Обложинский
(Физический институт ЦЭИИ САН, Братислава)

СЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГАММА-КВАНТОВ В РЕАКЦИЯХ $^{26}\text{Mg}(n, \alpha \gamma)$
ПРИ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ 14,1 МЭВ

А.А. Лычагин, Б.В. Журавлев, Б.В. Девкин,
 М.Г. Кобозев, С.П. Симаков, В.А. Талалаев.
 (Физико-энергетический институт)
 С.Главач, П.Обложинский
 (Физический институт ЦЭИ САН, Братислава)
 ФЭИ - 328/ . Обнинск, 1992. - 13с.

Сечения образования гамма-квантов в реакциях
 $^{28}\text{Si}(n, \gamma)$ при энергии нейтронов 14,1 МэВ.

Приводится краткое описание спектрометра для измерения энергий гамма-квантов, испускаемых в реакциях неупругого рассеяния и радиационного захвата. Для уменьшения фона использовалась временная селекция мгновенных гамма-квантов.

Измерены дифференциальные сечения выхода гамма-квантов из образца кремния, облучаемого нейтронами с энергией 14,1 МэВ. Данные получены с помощью германий-литиевого детектора, установленного под углами 70 и 90 градусов по отношению к падающей пучку нейтронов. Поправка на ослабление и многократное рассеяние нейтронов и ослабление гамма-квантов в образце сделаны аналитическим методом. В результате измерений получены сечения выхода для десяти дискретных уровней, возбуждаемых в реакциях $^{28}\text{Si}(n, \gamma)$.

The spectrometer for the measurement energy of the prompt gamma rays from the reactions of inelastic scattering and radiation capture of neutrons are described. The timing selection prompt gamma-rays escaped from sample was used to decrease background.

The measurement have been made of the differential cross sections of gamma ray production due to neutron interaction with the sample of silicon for incident neutron energy 14,1 MeV. Data were obtained using germanium-lithium detector positioned at 70° and 90° with respect to the incident neutron beam. The correction factor of incident neutron attenuation and multiple scattering and of gamma rays attenuation in sample were calculated by analytic method. The gamma ray production cross section for ten discrete levels excited by $^{28}\text{Si}(n, \gamma)$ reactions have been evaluated.

© - Физико-энергетический институт (ФЭИ), 1992

Введение

Основной целью настоящей работы являлось измерение сечений выхода γ -квантов с дискретных уровней остаточного ядра, образующегося в реакции $^{28}\text{Si}(n, \alpha, \gamma)$. Такие данные представляют интерес для расчета общего радиационного фона, образуемого в защите Д-Т термоядерных реакторов, имеющих в своем композиционном составе кремний-содержащие материалы, в частности, бетон. Немаловажное значение эти данные имеют и в других прикладных областях ядерной физики, например, в ядерной геофизике при разведке и эксплуатации нефтесодержащих пород.

Опубликованные ранее данные [1, 6] относятся в основном к переходу $2^+ \rightarrow 0^+$ с энергией испускаемых γ -квантов 1,78 МэВ. Сведения о других переходах практически отсутствуют. Экспериментальные трудности измерения сечений таких переходов являются следствием малой статистики отсчетов, перекрытия уровней от изотопных примесей, наложение пиков от активационных γ -квантов из образца. Применение временной селекции γ -квантов не может полностью подавить этот вклад, т.к. вследствие случайного временного распределения событий регистрации таких γ -квантов часть их, соответствующая отношению величины временного окна к переходу нейтронных всплесков на иждени, будет регистрироваться. Так как сечения некоторых реакций активации довольно велики, то вероятность регистрации активационных γ -квантов будет сравнима с вероятностью регистрации γ -квантов из искомого перехода. Кроме того, наличие интенсивных переходов с уровнями, возбуждаемых в окружающей среде и конструкционных материалах детектора приводит к большому статистическому разбросу результатов вычитания эффекта фона и фон, что дает большую погрешность в определении реального значения величины подложки под пиком полного поглощения и вносит субъективную ошибку в определение величины суммарных отсчетов под пиком. Учитывая эти трудности, большое внимание в настоящей работе было уделено методике проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Эксперимент

Измерения выполнены на импульсном 14 МэВ источнике нейтронов базирующемся на каскадном генераторе КГ-0,3 63И. Геометрия эксперимента представлена на рис. 1. Размеры образца: диаметр 28 мм,

высота 96 мм. Угол вылета γ -квантов из образца в направлении детектора 70° и 90° относительно потока падающих нейтронов. В дополнение к изображенной на рисунке защите γ -детектора, последняя усиливалась со стороны поля и мишени полиэтиленовыми плитами с суммарной эффективной толщиной около 50 см. В качестве детектора γ -квантов применялся германиево-литиевый детектор ДГЛЛ-90В-3 с чувствительным объемом 63 см^3 . Собственное энергетическое разрешение детектора для γ -линии с энергией 1,33 МэВ - 3 кэВ, вследствие большого уровня наводок во время проведения эксперимента, реальное разрешение ухудшается до 5 кэВ. Ширина пика на полувысоте временного распределения мгновенных γ -квантов - 12 нс. Калибровка энергетической шкалы анализатора и определение эффективности γ -детектора проводились с помощью стандартных источников γ -квантов ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{98}Y , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{228}Th . Эффективность детектора ϵ (с учетом относительного телесного угла детектора $\Omega/4\pi$) получена описанием экспериментальных точек методом наименьших квадратов (Рис.2). При измерении эффективности источники помещались на место образца, измерения проводились в той же геометрии и с тем же набором электронных модулей и установленных в них параметров, что и при измерении исследуемых γ -спектров. Так было сделано необходимо потому, что на эффективность регистрации γ -квантов в мягкой части спектра в значительной степени влияла амплитудная нелинейность временного канала.

Для уменьшения фона от мгновенных и активационных γ -квантов, образующихся при рассеянии нейтронов в окружающей среде, и активационных γ -квантов из образца, использовалась время-протектная методика выделения событий регистрации мгновенных γ -квантов испускаемых образцом из полного радиационного потока, регистрируемого детектором. Блок-схема эксперимента изображена на рис.3. Сигнал с $\text{Ge}(\text{Li})$ детектора на выходе из предусилителя разделяется. Один из них через линейный усилитель ЛУС (NL 2208) поступает на аналогоцифровой преобразователь АЦП-12. Второй передается на усилитель-формирователь временного сигнала ТФ (ТФА1501) далее через линию задержки на быстрый дискриминатор БДК (ГД1503А) для формирования сигнала временной отметки. Поскольку различные параллельные сигналы вынуждают наводок электромагнитного поля на корпус

детектора и предусилителя, сетевых помех по блокам питания, собственных шумов предусилителя и ТЭ имели интенсивность на порядки и более интенсивности полезных сигналов и в тоже время по своей величине после блока ТЭ (в силу специфики формирования временного сигнала) становились сравнимыми с полезными сигналами от γ -квантов с энергией до 350-500 кэВ, была применена схема управления быстрым дискриминатором сигналом с линейного усилителя, на выходе которого уровень помех значительно ниже уровня сигнала и первые легко дискриминировались. Сигнал временной отметки поступает на блок быстрой логики БЛ, в котором происходит формирование временного окна. После прихода сигнала "стоп" с пикал-электрода через определенный интервал времени в этом модуле открывается схема совпадений на время, соответствующее ширине временного окна, которая пропускает сигналы с γ -детектора. Кроме того, выработается логический сигнал - признак совпадения сигнала "стоп" и события регистрации γ -кванта в заданном временном интервале. Сигнал с быстрого выхода БЛ поступает на время-амплитудный цифровой преобразователь ВАЦП для регистрации временного спектра γ -квантов. Логический сигнал совпадения "стоп" и " γ " - на вход управления АЦП. Таким образом, регистрируется амплитудный спектр только тех γ -квантов, которым соответствует появление сигнала с БЛ.

Блок-схема позволяет контролировать работу ускорителя путем регистрации время-пролетного спектра нейтронов с мшени. Импульсы с нейтронного детектора НД поступают на быстрый дискриминатор БД с высоким порогом, где формируется отметка "старт", и далее на ВАЦП. Для использования одного и того же ВАЦП при регистрации γ -квантов и контрольного спектра "прямых" нейтронов применяется мультишкаляр ВУМЛ. В этом случае сигналы "старт" как с гамма так и нейтронного детектора поступают на вход ВУМЛ, который выработывает код номера детектора для переключения групп первой половины быстрой памяти (каналы с 0 по 2048) для захвата того или другого спектра. Блок медленной логики МЛ используется для адресации амплитудного спектра во вторую половину памяти (с 2048 по 4096 каналы) и суммирования "мёртвого" времени. При этом на выходе схемы выдается уровень, калиброванный входные и регистрирующие системы на полное "мёртвое время". Измерение потока

нейтронов осуществляется всеволновым детектором ЦД, сигнал с которого через дискриминатор-формирователь Д-Ф поступает на мониторный счетчик ИОСЧ. Количество нейтронов, зарегистрированное всеволновым детектором, приводилось к полному числу нейтронов из источника методом активации алюминиевых фольг.

При установлении размера временного окна учитывалось, что его увеличение приводит к сильному возрастанию вклада фона в измеренных эффект + фон и отношение эффект/фон значительно ухудшается. Однако при уменьшении размера окна некоторая доля исследуемых γ -квантов может быть потеряна. Измерение эффективности методом стандартных источников не учитывает эту долю. Ее можно определить измерением хорошо известных сечений выхода γ -квантов из нестандартных источников, таких как, например, реакция ${}^{12}\text{C}(n, n'\gamma)$. Необходимо отметить, что вследствие большой длительности переднего фронта импульсов от γ -квантов, временная отметка заметно смещается в зависимости от амплитуды входного сигнала и, следовательно, от энергии гамма-кванта. Использование универсальных быстрых дискриминаторов со следящим порогом, предназначенных для регистрации импульсов от детекторов различного типа, не может устранить это смещение в достаточной полной мере. Необходима индивидуальная настройка быстрого дискриминатора к данному детектору. Энергетическая зависимость доли потерь может быть измерена сравнением спектров, полученных с временными окнами различных величин, одно из которых таково, что можно ожидать попадания всех импульсов от мгновенных γ -квантов в установленный временной интервал. Экспериментально эту величину окна можно достаточно быстро определить измерениями временных спектров γ -квантов с образцом и без образца и сравнением их для обнаружения материала распада.

Результаты измерений

Аппаратурные спектры гамма-квантов, соответствующие измерениям с образцом (эффект+фон) и без образца (фон) вычитались. Результат вычитания (эффект, рис.4) использовался для дальнейшей обработки. Прежде всего проводилась идентификация пиков с отдель-

иции γ -переходами, а затем вычисление суммы отсчетов под пиком полного поглощения. Суммы отсчетов определялись и для аналогичных пиков на эффект+фоне и соответствующих интервалов на фоне. Если для какого-либо перехода эффект незначительно выделяется на фоне, то точность определения суммы под пиком может определяться точностью вычитания подложки и в этом случае точность определения сечения перехода путем обработки пика на эффект+фоне может оказаться выше. В тех случаях, когда величина подложки сильно зависела от выбора границ интервалов для ее вычисления, разброс вероятных значений включался в погрешность обработки.

Сечения образования γ -квантов определялись следующим образом:

$$\sigma(\epsilon_{\gamma}, \theta) = \frac{S_{\gamma}}{\epsilon(\epsilon_{\gamma}) \Omega} \frac{1}{N_A} \frac{1}{F} \text{COZ}(\epsilon_0, \epsilon_T)$$

где $S_{\gamma} = N(\epsilon_{\gamma})$ - площадь под пиком полного поглощения γ -квантов с энергией E_{γ} ,

$\epsilon(\epsilon_{\gamma}), \Omega$ - эффективность и телесный угол детектора,

N_A - число ядер в образце,

F - поток нейтронов в центре образца,

$\text{COZ}(\epsilon_0, \epsilon_T)$ - поправка на ослабление нейтронного и гамма-потоклов в образце.

Поправка на ослабление нейтронного и гамма-потоклов в образце определялась аналитически, исходя из полных сечений взаимодействия. Кроме того, проводилась коррекция на величину потока нейтронов, учитывающая размер образца, и вводилась поправка на долю потерь γ -квантов во временном окне. Конечные результаты эксперимента приведены в таблице I. Данные о возможных переходах из возбужденных состояний остаточных ядер и спинах и четностях начальных и конечных состояний взяты из работы / 7 /. Знаком вопроса отмечен переход, не указанный как возможный в работе / 7 /. Вклад переходов с уровней, возбуждаемых в реакциях на изотопных примесях, значительно меньше погрешности определения сечений тех переходов для ядра ^{28}Si , где они перекрываются. Для изолированных γ -линий из изотопных примесей, хотя они хорошо идентифицировались по энергиям, сечения не определялись вследствие большой статистической

погрешности при определении площади соответствующих им пиков.

Если рассматривать переходы с уровня, возбуждаемых в реакции $^{28}\text{Si}(n, n'\gamma)$, то как видно из сравнения данных различных авторов и настоящей работы, для основного перехода $2^+ \rightarrow 0^+$ в ядре ^{28}Si с энергией испускаемых гамма-квантов 1,78 МэВ совпадение результатов хорошее, в том числе и с результатами работ /1/ и /6/, однако примерно на 50% ниже сечения, приведенного в ENDL и GROND. Сечение выхода γ -квантов, соответствующих переходу $4^+ \rightarrow 2^+$ с $E_\gamma = 2,84$ МэВ, хорошо согласуется с данными работы /6/, но примерно на те же 50% меньше, чем в работе /1/, а также взятого из библиотек ENDL и GROND. Сведения о сечении выхода гамма-квантов с энергией 1,53 МэВ, идентифицированных нами с переходом $4^+ \rightarrow 3^-$ (8,41 - 6,88 МэВ) в ядре ^{28}Si , в литературе отсутствуют. Три уровня с энергиями 0,97, 0,98, 0,99 МэВ, возбуждаемых в реакциях $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$, $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}^+$, $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$, образуют на спектре триплет, трудноразрешимый по той причине, что в этой области энергий на фоне присутствуют несколько гамма-линий с достаточно высокими интенсивностями (о влиянии таких гамма-линий на конечные результаты говорилось выше). Поэтому как в нашей работе, так и в работе /1/ дано суммарное значение сечений выхода γ -квантов с этими энергиями, которое согласуется в пределах погрешности его определения друг с другом. Сечение перехода $1/2^+ \rightarrow 5/2^+$ в ядре ^{28}Mg с $E_\gamma = 0,58$ МэВ, образующегося в реакции $^{28}\text{Si}(n, \alpha)$ в 2,5 раза ниже, чем в работах /1/ и /6/, данные по остальным 10 переходам, для которых определены сечения в настоящей работе, отсутствуют и публикуются впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F.C. Engesser and W.S. Thompson. *J.Nucl.Energy*, 21, 487. (1957).
2. F.S. Buchanan, D.O. Hells and W.S. Tucker. "ORO-2791-32, Nuclear-Chicago Corporation (1951).
3. U. Abbondanno et. al. *J.Nucl.Energy* 21, 227 (1953).
4. J.K. Dickens et. al. *Nucl.Sci.Eng.* 02 (1957) 515.
5. D.M. Drake, S.D. Arthur and M.G. Silbert. *Nucl.Sci.Eng.* 03, 43-54 (1958).
6. I. Murata, J. Yamamoto and A. Takanashi. *Nucl.Data for Science and Technology*. 1968, Mito. 275-278.
7. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. v.23, #1 (1979).

Сечения выхода γ -квантов для отдельных переходов

Таблица I.

E_{γ} МэВ	Реакция	$E_i \rightarrow E_f$	$J_i \rightarrow J_f$	σ (70°) мб/ср	σ (90°) мб/ср	Другие работы (90°) / 6 / -1/4π
0,58	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	0,58 - 0,00	1/2 ⁺ - 5,2 ⁺	1,36 ± 0,34	1,12 ± 0,31	4,7 ± 1; 6/1; 2,86/6/
0,94	$^{24}\text{Si}(n,p)^{24}\text{Al}^*$	0,97 - 0,03	0 ⁺ - 2 ⁺	0,40 ± 0,09	0,69 ± 0,14	
0,97	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	0,97 - 0,00	3/2 ⁺ - 5/2 ⁺			
0,99	---	1,96 - 0,97	5/2 ⁺ - 3/2 ⁺	2,65 ± 0,41	3,40 ± 0,52	4,4 ± 1,5 /1/
0,98	$^{24}\text{Si}(n,p)^{24}\text{Al}^*$	1,01 - 0,03	3 ⁺ - 2 ⁺			
1,01	$^{24}\text{Si}(n,p)^{24}\text{Al}^*$	1,01 - 0,00	3 ⁺ - 3 ⁺	0,69 ± 0,12	0,74 ± 0,13	
	$^{24}\text{Si}(n,\gamma)^{24}\text{Si}$		3/2 ⁺ - 5/2 ⁺			
1,27	$^{24}\text{Si}(n,p)^{24}\text{Al}^*$	1,27 - 0,00	3/2 ⁺ - 1/2 ⁺	1,25 ± 0,20	1,34 ± 0,21	
1,37	$^{24}\text{Si}(n,p)^{24}\text{Al}^*$	1,37 - 0,00	1 ⁺ - 3 ⁺	0,56 ± 0,12	0,60 ± 0,10	
1,53	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	8,41 - 6,88	4 ⁻ - 3 ⁻	1,07 ± 0,38	1,29 ± 0,52	
1,61	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	1,61 - 0,00	7,2 ⁺ - 5/2 ⁺	0,66 ± 0,34	0,60 ± 0,40	
1,78	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	1,78 - 0,00	2 ⁺ - 0 ⁺	27,40 ± 4,10	25,60 ± 4,20	29 ± 1/1; 24,7/6/; 27,5/5/; 26,4 ± 4/3; 28,6 ± 5,7/2/; 40,6 (ENDL); 3/2 (SAUND)
	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$			1,29		
2,27	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	2,27 - 0,00	? 4 ⁺ - 3 ⁺	0,6 ± 0,24	0,94 ± 0,31	
	$^{24}\text{Si}(n,\alpha)^{24}\text{Mg}$	9,08 - 6,81	1/2 ⁺ - 1/2 ⁺ , 3/2 ⁺			
2,64	$^{26}\text{Si}(n,\alpha)^{26}\text{Mg}$	4,62 - 1,78	4 ⁺ - 2 ⁺	2,4 ± 0,36	3,24 ± 0,49	5,3 ± 0,6/1/ - 3,24 /6/; 5,0 (ENDL); 5,0 (SAUND)
	$^{26}\text{Si}(n,\alpha)^{26}\text{Mg}$			0,11	0,15	

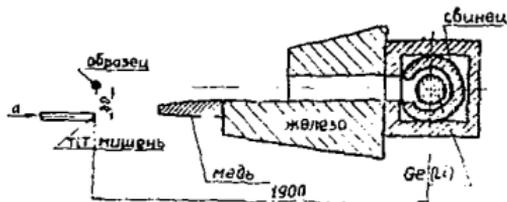


Рис. 1 Геометрия эксперимента

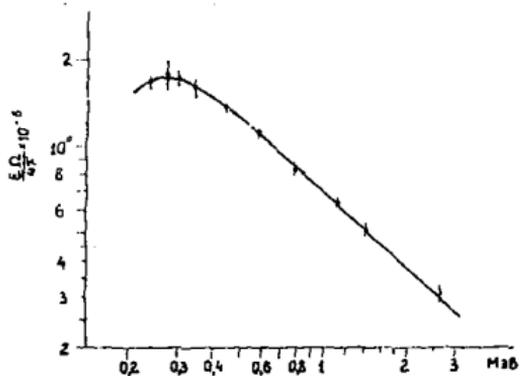


Рис. 2 Эффективность детектора

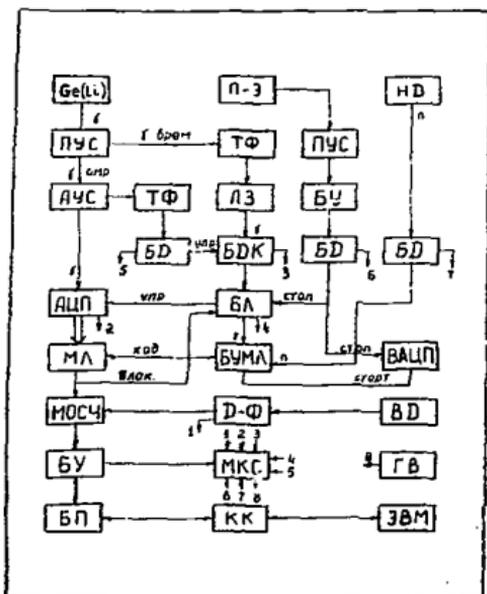


Рис. 3. Блок-схема эксперимента

active Flt SIK.ASC/

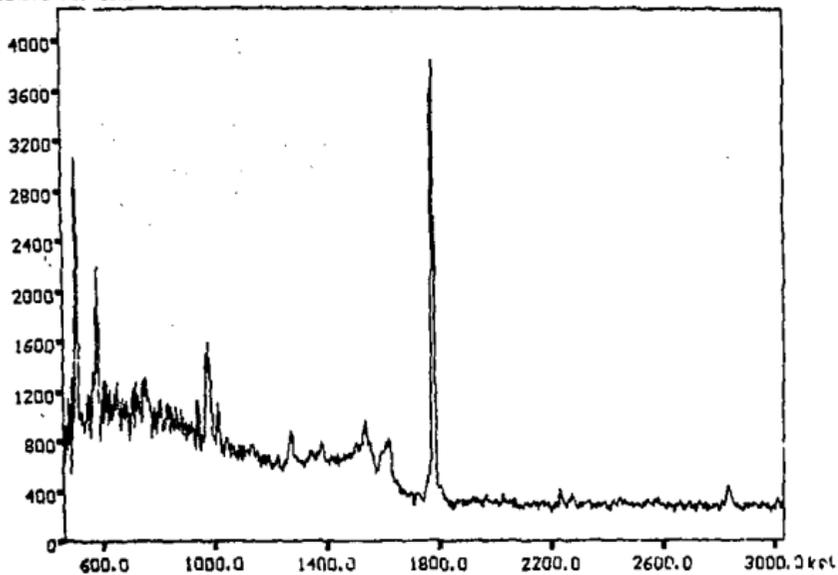


Рис. 4 Спектр мгновенных гамма-квантов из ядра ²⁶Al

Технический редактор **Н. П. Герасимова**

Подписано к печати 22.10.1992 г. Бумага писчая № 1
Формат 60×90^{1/16} Мел. п. л. 0,8 Уч.-изд. л. 0,5 Тираж 85 экз.
Цена 65 коп. Индекс 3649 ФЭИ-2281

Отпечатано на роталприте.

249020, г. Обнинск Калужской обл., ФЭИ

65 коп.

Индекс 3649

Сечения образования гамма-квантов в реакциях $^{28}\text{Si}(n, \gamma)$
при энергии нейтронов 14,1 МэВ.
ФЭИ-2281. 1992. 1-13.