

УДК 539.14

ОБРАЗОВАНИЕ ПРОТОНОВ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ π^- -МЕЗОНОВ В “ЖИВОЙ” КРЕМНИЕВОЙ МИШЕНИ

© 2023 г. Ю. Б. Гуров^{1, 2, *}, С. А. Евсеев¹, Т. И. Леонова², С. В. Розов¹,
В. Г. Сандуковский¹, Б. А. Чернышев²

¹Международная межправительственная организация

“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: gurov54@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Измерены спектры протонов при поглощении остановившихся π^- -мезонов на “живой” мишени — аналог мишени ^{28}Si . На основе полученных данных удалось выделить процесс без вторичных взаимодействий и получить спектр первичных протонов из акта поглощения пиона на внутриядерной pp -паре.

DOI: 10.31857/S0367676523702009, EDN: ZBQZID

ВВЕДЕНИЕ

Исследование спектров заряженных частиц, образующихся в реакции поглощения остановившихся π^- -мезонов ядрами, дает возможность расширить представления о механизмах образования частиц в ядерных реакциях промежуточных энергий (до 1 ГэВ) [1]. Результатами таких измерений являются инклюзивные спектры частиц, а также спектры частиц, зарегистрированных на совпадение. Одной из важных задач, возникающих при анализе спектров, является решение вопроса о том, как полученная информация связана с механизмами поглощения.

Поглощение отрицательных пионов ядрами является многонуклонным процессом [2]. Доминирующим механизмом является захват пиона внутриядерной pn -парой, в результате которого образуются два быстрых первичных нейтрона. Менее вероятным является поглощение пиона на внутриядерной pp -паре, приводящее к образованию первичного нейтрона и протона. Необходимо указать, что на много меньше вероятность поглощения пионов на более тяжелых кластерах [2].

Отношение вероятностей поглощения остановившихся пионов на pn - и pp -парах можно представить в виде произведения двух множителей: $R = R_{\text{ст}} R'$, где $R_{\text{ст}}$ — статистический множитель, равный $2N/Z - 1$; R' — динамический множитель, характеризующий отношение элементарных ши-

рин поглощения на pn - и pp -парах; N, Z — число нейтронов и протонов в ядре соответственно. Величина R' определяется по спектру первичных протонов. Однако вследствие развития внутриядерного каскада экспериментальные спектры протонов существенно обогащаются вторичными частицами. В рамках теоретических расчетов первоначальный акт поглощения оказывается “забытым” для большей части спектра за исключением высокоимпульсной. В такой ситуации целесообразны измерения с привлечением дополнительной информации для выделения прямых, без перерассеяния, каналов реакций. Для этой цели в работе используется активная (“живая”) мишень — кремниевый детектор.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения спектров заряженных частиц (p, d, t) были проведены на пионном канале синхротрона НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ с помощью полупроводникового спектрометра заряженных частиц [3]. Пучок π^- -мезонов с импульсом 100 МэВ/с проходил через замедлитель, два мониторинговых кремниевых детектора и останавливался в мишени. Мишень представляла собой пластинку из исследуемого материала толщиной ~ 0.1 г/см². В качестве “живой” мишени устанавливался Si детектор (аналог мишени ^{28}Si).

Заряженные частицы, образованные в реакции поглощения пионов, регистрировались двумя многослойными телескопами. Каждый телескоп состоял из двух тонких и одиннадцати толстых кремниевых детекторов. Энергетическое разрешение (FWHM) при регистрации p , d , t составляло $\Delta E = 0.6$ МэВ. Для корректного выделения и определения числа остановок пионов в эксперименте использована система, состоящая из мониторинговых детекторов и “живой” мишени [4, 5]. Нижняя граница измерения спектров для p — 5 МэВ. Верхняя граница определяется кинематическими границами реакции (~ 100 МэВ).

Для выделения прямых протонов в работе используется “живая” мишень. В рамках такого подхода одновременно с регистрацией частицы измеряется энерговыделение в “живой” мишени, которое складывается из потерь энергии налетающего пиона и образующихся заряженных частиц, в том числе и ядра отдачи. Показания мониторинговых детекторов позволяют определить глубину остановки пиона и вычест из энерговыделения вклад пиона и зарегистрированной частицы. Ценность информации, получаемой с помощью “живой” мишени определяется возможностью выделения процессов с образованием ядра в возбужденном состоянии.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Определение вклада первичных частиц в измеренные выходы p проводилось в рамках разработанной нами феноменологической модели [6–8]. В этой модели образование заряженных частиц рассматривается на трех стадиях реакции: первичное поглощение пионов на внутриядерных кластерах, предравновесная стадия и испарительная стадия, когда частицы вылетают с поверхности ядра после установления термодинамического равновесия.

На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные спектры протонов. Видно, что при энергиях протонов выше 30 МэВ экспериментальные точки лежат между теоретическими кривыми, рассчитанными для поглощения пионов на pn - и pp -парах, а в области ниже 30 МэВ модель дает завышенный выход протонов независимо от R' . Это расхождение, по-видимому, связано с переоценкой в модели испарительной стадии реакции.

Из рис. 1 видно, что за исключением испарительной части (< 30 МэВ) теоретический спектр протонов с выбранным значением $R = 7.5$ ($R' = 3.5$) достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Поэтому можно сделать вы-

Y , протон/(МэВ $\cdot$ ост. π^-)

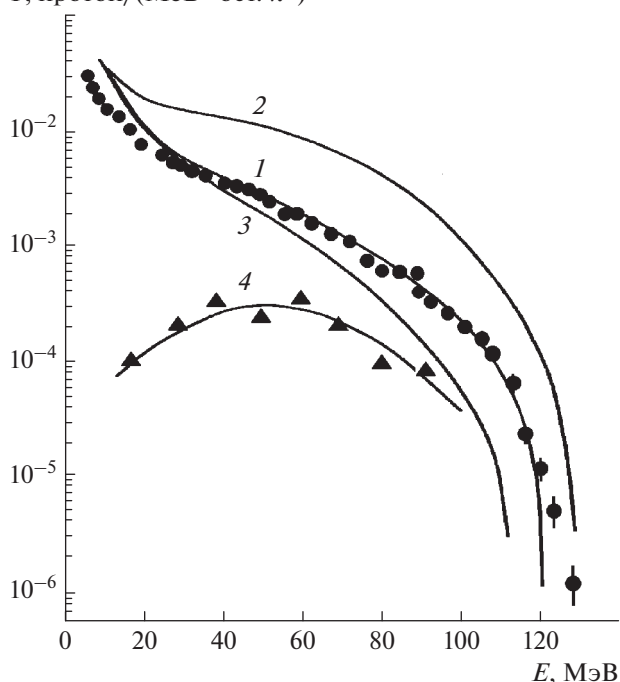


Рис. 1. Энергетические спектры протонов при поглощении π^- -мезонов ядрами ^{28}Si . ● — экспериментальные точки. 1 — расчет с $R = 7.5$ ($R' = 3.5$), 2 — $R = 0$ (поглощение на pp -паре), 3 — $R = \infty$ (поглощение на pn -паре). Экспериментальный (Δ) и расчетный спектры (4) протонов, принадлежащих пику в “живой” мишени (см. рис. 3).

вод, что результаты измерений инклюзивного спектра протонов не противоречат гипотезе о формировании этого спектра в результате двух-нуклонного механизма поглощения и последующих вторичных взаимодействий.

На рис. 2 представлены спектры энерговыделений в “живой” мишени для различных интервалов энергий зарегистрированных протонов. Наиболее характерной особенностью распределений является пик в области малых энерговыделений. Следует отметить, что для событий с протонами, энергия которых больше 85 МэВ (рис. 2d и 2e), наблюдается сдвиг пика к правой границе. Это, по-видимому, указывает на возрастающий вклад двухчастичного канала реакции для протонов высокой энергии.

С целью детального сравнения эксперимента и расчета на рис. 3 представлены спектры энерговыделений в мишени при регистрации протонов в интервале 45–85 МэВ. Отдельно показано расчетное распределение, соответствующее событиям, в которых первичные частицы (протон и нейтрон), образующиеся при поглощении на pp -паре, вылетают из ядра без взаимодействия. Это

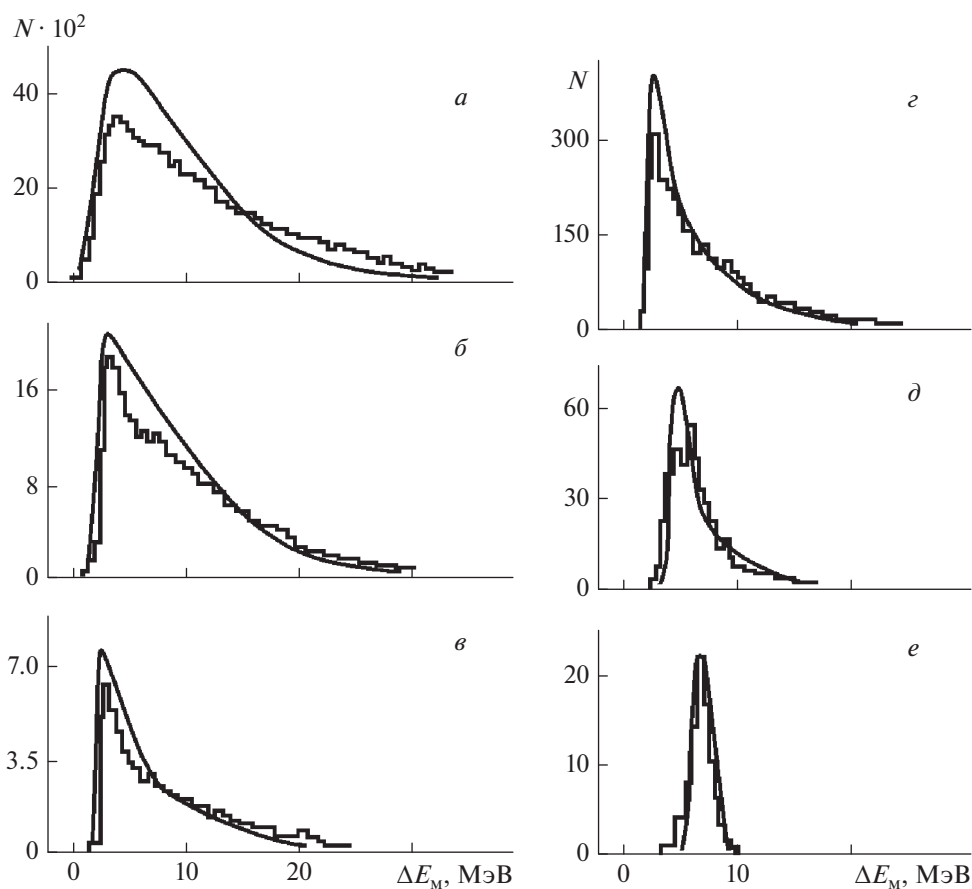


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные спектры энерговыделений в “живой” мишени при регистрации протонов в энергетических интервалах: 5–25 (а); 25–45 (б); 45–65 (в); 65–85 (г); 85–105 (д); >105 МэВ (е). Гистограмма – результаты эксперимента, сплошные кривые – расчет.

распределение нормировано на относительную вероятность (~20%) таких событий. Доля пика в этом распределении составляет 65%. Как показали расчеты, события, в которых хотя бы одна из первичных частиц испытала внутриядерное взаимодействие, такой структурой не обладает. Следовательно, можно предположить, что и в экспериментальных распределениях область пика соответствует, в основном, событиям с вылетом двух первичных частиц без перерасеяния.

С целью выделения спектров первичных протонов определялась зависимость вклада пика от энергии протонов. Распределения с “живой” мишени аппроксимировались суммой двух функций: нормальной, со средним значением в области малых энерговыделений и полиномом, описывающим остальную часть спектра. Такая процедура выполнялась для достаточно узких интервалов энергий протонов, где такая аппроксимация дает устойчивые результаты (практически не зависящие от функции, описывающей фон) и теорети-

ческое значение χ^2 (рис. 2). Рассматривая вклад, соответствующий нормальному распределению как долю событий с вылетом двух первичных частиц, восстанавливался спектр первичных нуклонов из акта поглощения пиона.

На рис. 1 при нормировке экспериментального спектра первичных протонов учитывалось, что доля пика в теоретическом распределении на рис. 3 при вылете двух первичных частиц составляет 65%. Из рис. 1 видно, что в области до 90 МэВ расчетные и экспериментальные распределения хорошо согласуются между собой. При более высоких энергиях отличия в форме спектров с “живой” мишени для различных механизмов испускания частиц практически исчезают, что естественно ограничивает интервал энергий для применения данного метода. Следует специально отметить, что изложенная методика выделения спектра первичных частиц может служить независимым способом определения величины R . Как видно из рис. 1 определяемое значение вели-

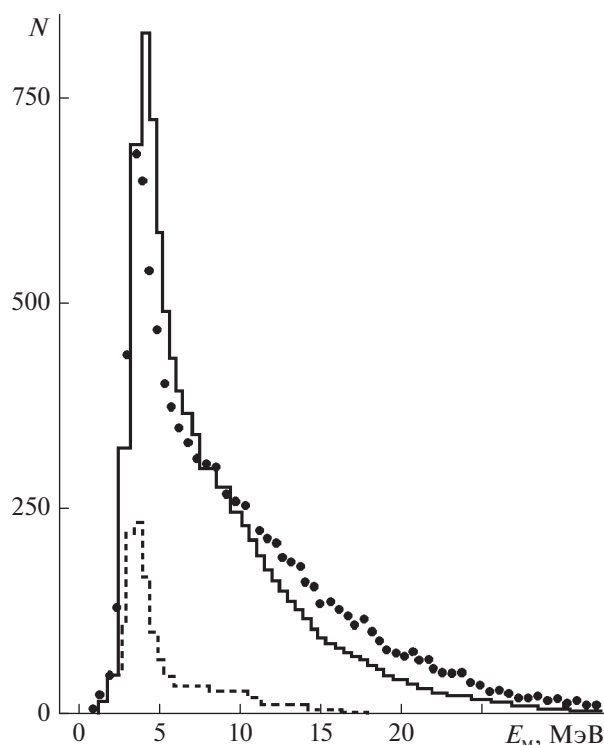


Рис. 3. Спектры энерговыделений в “живой” мишени при регистрации протонов в диапазоне энергий 45–85 МэВ. Точки — экспериментальные данные. Сплошная гистограмма — расчетный спектр по феноменологической модели. Штриховая гистограмма — расчетный спектр для событий без вторичных внутриядерных взаимодействий $R = 7.5$ ($R' = 3.5$).

чины R оказывается постоянным в широком интервале энергий (30–85 МэВ), соответствующем области максимума спектра первичных частиц.

Предложенная методика определения R по доле пика первичных частиц, оказывается слабо зависящей от величины инклюзивного выхода протонов. Это особенно важно при больших значениях R , когда этот выход слабо меняется с изменением величины R , в то время как выход прямых протонов обратно пропорционален R .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход для выделения первичных процессов в реакции поглощения остановившихся пионов атомными ядрами. Методика основана на анализе корреляционных данных “энергия заряженной частицы—энерговыделение в “живой” кремниевой мишени”. Для поглощения пионов на ядре ^{28}Si впервые получен спектр первичных протонов из акта поглощения на pp -паре. При этом отношение элементарных ширин поглощения на pn - и pp -парах составило величину 3.5.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSWU-2023-0073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee T.-S., Redwine R.P. // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. V. 22. P. 23.
2. Weyer H.G. // Phys. Reports. 1990. V. 195. P. 295.
3. Короткова Л.Ю., Гуров Ю.Б., Калинин В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 4. С. 460; Korotkova L.Yu., Gurov Yu.B., Kalinin V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2012. V. 76. No. 4. P. 404.
4. Chernyshev B., Gurov Yu., Lapushkin S., Sandukovsky V. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1690. Art. No. 012031.
5. Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Розов С.В. и др. // ПТЭ. 2021. Т. 64. № 4. С. 18; Gurov Yu.B., Lapushkin S.V., Rozov S.V. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64. No. 4. P. 516.
6. Гуров Ю.Б., Короткова Л.Ю., Лапушкин С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 4. С. 415; Gurov Yu.B., Korotkova L.Yu., Lapushkin S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 4. P. 370.
7. Гуров Ю.Б., Карпукhin В.С., Короткова Л.Ю. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 4. С. 520; Gurov Yu.B., Karpukhin V.S., Korotkova L.Yu. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 4. P. 478.
8. Гуров Ю.Б., Карпукhin В.С., Лапушкин С.В. и др. // ЯФ. 2019. Т. 82. С. 305; Gurov Yu.B., Karpukhin V.S., Lapushkin V.S. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 351.

Proton formation at absorption of π^- -meson in a “live” silicon target

Yu. B. Gurov^{a, b, *}, S. A. Evseev^a, T. I. Leonova^b, S. V. Rozov^a, V. G. Sandukovsky^a, B. A. Chernyshev^b

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

^b National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: gurov54@mail.ru

The spectra of protons were measured at the absorption of stopped π^- -mesons in “live” target—analogue of the ^{28}Si target. Based on the data obtained, it was possible to isolate the process without secondary interactions and obtain the spectrum of primary protons from the act of pion absorption on an intranuclear pp pair.