

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.07

ОТБОР СОБЫТИЙ В РЕАКЦИЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ
 π^- -МЕЗОНОВ ЯДРАМИ

© 2021 г. Ю. Б. Гуров^{a,b,*}, С. В. Лапушкин^a, С. В. Розов^b,
В. Г. Сандуковский^b, Б. А. Чернышев^a

^a Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^b Объединенный институт ядерных исследований,
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: gurov54@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 17.03.2021 г.

Представлено описание методики отбора событий при поглощении остановившихся пионов в тонких мишенях. Данный подход основан на использовании в качестве последних слоев замедлителя двух мониторных Si-детекторов и “живой” мишени, которая также представляет собой Si-детектор. Установка порогов на мониторных детекторах и анализ сигналов с “живой” мишени позволяют отбирать пионы с остаточным пробегом, соответствующим толщине мишени, и достаточно надежно исключать фон от остановок в мониторной системе. Показано, что представленный метод обеспечивает эффективность выделения остановок π^- -мезонов на уровне 90%.

DOI: 10.31857/S0032816221040169

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследование процесса поглощения остановившихся отрицательных пионов ядрами находится на стадии детальной теоретической и экспериментальной проверки [1, 2]. К данному моменту выполнено большое количество экспериментальных и теоретических исследований, позволивших понять ряд закономерностей ядерного поглощения пионов. В силу методических причин наиболее полные, согласующиеся между собой данные по эмиссии частиц получены в экспериментах с регистрацией нейтронов.

Ситуация с выходами заряженных частиц менее определена. Практически отсутствуют данные по высокоэнергичным частям спектров протонов. Выходы p , d , t , полученные в разных экспериментах, различаются в ряде случаев в несколько раз, что отражает трудности абсолютной нормировки данных. Такая ситуация объясняется тем, что, в отличие от регистрации нейтронов, при измерении энергии заряженных частиц жесткие ограничения накладываются на толщину “ядерной” мишени. При этом в связи с необходимостью регистрации частиц с различными массами и зарядами усложнены задачи их идентификации.

Существующая ситуация обуславливает необходимость выполнения новых экспериментов для получения информации, пригодной для анализа

A-зависимости (A — массовое число ядра мишени) энергетических спектров и выходов вторичных заряженных частиц. Для реализации этого нами была выбрана методика регистрации заряженных частиц с помощью многослойного спектрометра [3] на основе полупроводниковых Si-детекторов (Si-п.п.д.). Такой подход сочетает в себе возможность надежной идентификации частиц различной ионизирующей способности (p , d , t , ${}^3,4\text{He}$) и высокое энергетическое разрешение в широком диапазоне энергий (5–100 МэВ). Использование в установке кремниевых детекторов также для мониторинга пучка позволило с высокой эффективностью отбирать события, отвечающие остановкам пионов в мишени.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема спектрометра [3], который использовался для экспериментов на канале пионов низких энергий синхроциклотрона ПИЯФ, представлена на рис. 1. Установка состоит из двух вакуумных камер, в которых установлены полупроводниковые телескопы, и центральной пучковой камеры, предназначенной для ввода пучка и установки мишени. Ввод пучка осуществлялся через передний фланец центральной камеры, на котором была

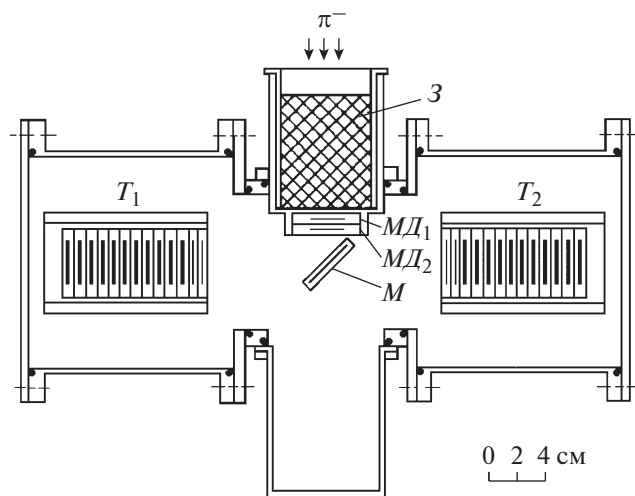


Рис. 1. Схема спектрометра. T_1 , T_2 – п.п.д.-телескопы; 3 – замедлитель; M – мишень; $МД_1$, $МД_2$ – мониторные детекторы.

смонтирована система замедления и мониторинга.

Пучок отрицательных пионов (импульс 100 МэВ/с) после торможения в замедлителе 3 и прохождения через мониторную систему, состоящую из двух кремниевых поверхностно-барьерных детекторов $МД_1$ и $МД_2$ (Si(Au)-п.п.д.) толщиной 340 и 250 мкм соответственно, останавливался в мишени M . Мишень, выполненная из исследуемого материала в виде пластины диаметром 32 мм и толщиной ~ 0.1 г/см², располагалась под углом 45° к пучку. В измерениях использовалось 18 мишеней с массовым числом A от 6 (Li) до 209 (Bi). В качестве так называемой “живой” мишени устанавливался Si(Au)-детектор (аналог мишени ²⁸Si).

Вторичные заряженные частицы от поглощения пионов в мишени регистрировались двумя многослойными телескопами T_1 , T_2 . Каждый п.п.д.-телескоп состоял из двух Si(Au)-идентификаторов толщиной 180 и 600 мкм и одиннадцати литий-дрейфовых (Si(Li)) детекторов толщиной 3 мм [4]. Диаметр чувствительных областей детекторов составлял 32 мм, за исключением мониторных, у которых диаметр равен 24 мм. Энергетическое разрешение всех п.п.д. по α -частицам ($E_\alpha \cong 5.5$ МэВ) ~ 60 кэВ. В такой конфигурации п.п.д.-телескопы позволяли измерять полное поглощение однозарядных частиц: протоны – до 96 МэВ, а дейтроны, тритоны и изотопы гелия – до кинематического предела.

Принципы построения спектрометра для исследований в ПИЯФ определялись необходимостью получения максимальной плотности остановок в мишени при сохранении возможности надежного исключения фона, а также обеспече-

ния достаточной светосилы установки. Увеличение плотности остановок достигалось за счет выбора оптимальной энергии пучка пионов и максимального приближения замедлителя к мишени.

В описываемой конструкции замедлитель, соответствующий оптимальной энергии пучка, был установлен на минимальном расстоянии от мишени. В этом случае с увеличением плотности остановок в мишени возрастает фон вторичных частиц из последних слоев замедлителя и необходимо принимать специальные меры для его подавления. Для этой цели в качестве последних слоев замедлителя использовались два мониторных Si(Au)-п.п.д. $МД_1$, $МД_2$. Анализ сигналов с мониторных детекторов позволял отбирать пионы с остаточным пробегом, соответствующим толщине мишени, и достаточно надежно исключать фоновые события.

Наиболее эффективно задача подавления фона в установке была решена с помощью использования “живой” мишени – Si(Au)-детектора, сигнал с которого включался в логику отбора событий. При этом спектрометрическая информация с “живой” мишени позволяла не только решать такие методические вопросы, как анализ эффективности отбора полезных событий и выполнение абсолютной нормировки выходов частиц, но и получать дополнительные физические данные об исследуемых реакциях, например об энергии остаточных ядер.

ВЫБОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОРОГОВ МОНИТОРНОЙ СИСТЕМЫ

Реализованный нами принцип отбора остановок пионов иллюстрирует рис. 2. Кривыми показаны средние энергетические потери в мониторных детекторах в зависимости от пробега пионов, начиная с точки входа в первый детектор. Сплошные вертикальные линии соответствуют толщинам первого и второго мониторных детекторов, а также мишени.

Для отбраковки остановок π^- -мезонов во втором мониторном детекторе использовано ограничение на максимально возможные энерговыделения в $МД_1$ – установка верхнего порога $E_{\max}^{(1)}$, а для отбраковки пионов, пролетающих мишень насквозь, – ограничение на минимально возможные энерговыделения в детекторе $МД_2$ – установка нижнего порога $E_{\min}^{(2)}$. При этом оба детектора включены на совпадения. Видно, что одновременная установка порогов $E_{\max}^{(1)}$ и $E_{\min}^{(2)}$ позволяет выделить пионы в интервале пробегов R_2 – R_3 , т.е. их остановки в мишени. Вследствие флуктуаций потерь энергии, многократного рассеяния, а также энергетического разрешения детекторов рассматриваемая

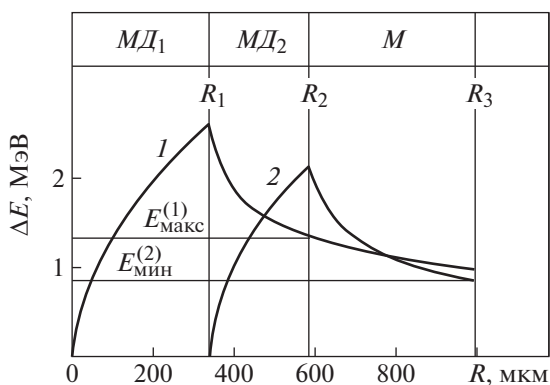


Рис. 2. Зависимость энергетических потерь в первом (1) и втором (2) мониторных детекторах от остаточного пробега пионов. $E_{\text{макс}}^{(1)}$ — значение верхнего порога для детектора $МД_1$; $E_{\text{мин}}^{(2)}$ — значение нижнего порога для детектора $МД_2$; R_1 — толщина детектора $МД_1$, $(R_2 - R_1)$ — толщина детектора $МД_2$, $(R_3 - R_2)$ — толщина мишени $М$.

методика обладает эффективностью, отличной от 100%.

Экспериментально эффективность работы мониторной системы исследовалась с помощью “живой” мишени. Установка порогов осуществлялась по быстрым каналам электроники аналоговым способом.

На рис. 3 представлены спектры энергоснабжения во втором мониторном детекторе и “живой” мишени для трех значений нижнего порога $E_{\text{мин}}^{(2)}$. Необходимо указать, что цена канала составляет ≈ 12 кэВ в каждом из спектров, показан-

ных на рис. 3, 4. Согласно рис. 3, с увеличением нижнего порога на $МД_2$ подавляется пик в спектре энергоснабжения из мишени, соответствующий пионам, пролетающим мишень насквозь. Форма правой части спектра энергоснабжения из мишени при этом не изменяется. Также видно, что увеличение нижнего порога практически не влияет на форму всего спектра. Это соответствует отсутствию вклада от пролетных пионов. В этом интервале количество зарегистрированных телескопами вторичных частиц пропорционально счёту “мониторная система — мишень”, что также указывает на отсутствие пролета.

Выполнив нормировку спектров энергоснабжения из мишени по правой части, которая сохраняет форму в широком интервале изменения порогов, можно определить эффективность отбора остановок и вклад от пролета пионов для различных нижних порогов на детекторе $МД_2$ (табл. 1).

Для значения $E_{\text{мин}}^{(2)} = 0.6$ МэВ эффективность отбора остановок принята за 100%.

Таким образом, представленная методика позволяет исключить пролет пионов через достаточно тонкую мишень, сохраняя приемлемой эффективность отбора полезных событий, либо, допуская определенную (известную) долю пролета, повысить эффективность отбора и при определении выходов вторичных заряженных частиц ввести соответствующую поправку.

Возможность отбраковки остановок в детекторе $МД_2$ с помощью ограничения на максимальные энергоснабжения в $МД_1$ демонстрирует рис. 4, где представлены спектры энергоснабжения в мониторных детекторах для трех значений верхнего порога на детекторе $МД_1$. Количество остановок в

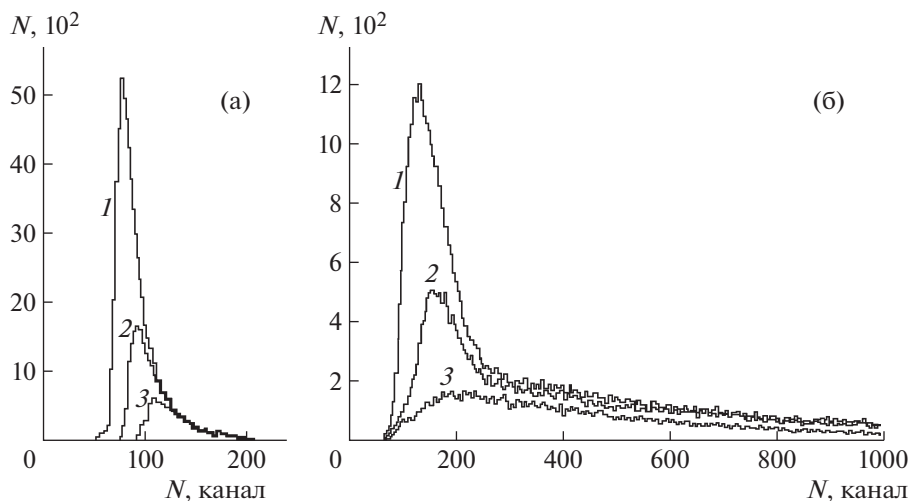


Рис. 3. Спектры энергоснабжения в детекторе $МД_2$ (а) и “живой” мишени (б) для трех значений $E_{\text{мин}}^{(2)}$, МэВ: 0.6 (1), 0.8 (2), 1.1 (3).

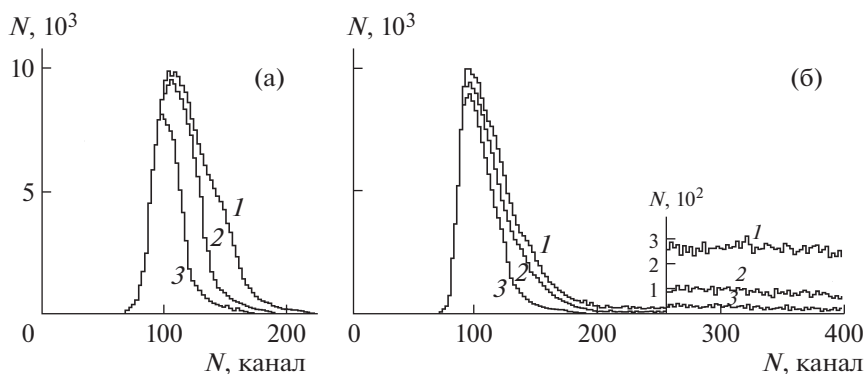


Рис. 4. Спектры энерговыделений в детекторах MD_1 (а) и MD_2 (б) для трех значений $E_{\text{макс}}^{(1)}$, МэВ: 2.5 (1), 1.6 (2), 1.3 (3).

детекторе MD_2 пропорционально событиям в правой части спектра на рис. 4б, которая соответствует энергиям, превышающим максимальную для пиона с пробегом, равным толщине этого детектора ($N_k \approx 175$). Как и для мишени, эта часть спектра определяется как суммарным энерговыделением заряженных частиц при поглощении π^- -мезона, а именно энергией входного пиона, так и энерговыделением вторичных частиц и ядра отдачи.

Согласно приведенным на рис. 4 данным, количество остановок в MD_2 уменьшается при снижении верхнего порога на детекторе MD_1 . Выполненный анализ показал, что при подавлении числа остановок в детекторе MD_2 в четыре раза ($E_{\text{макс}}^{(1)} = 1.6$ МэВ, кривая 2 на рис. 4б) количество отбираемых остановок в мишени снижается лишь на 8%, а при подавлении числа остановок в детекторе MD_2 в 13 раз ($E_{\text{макс}}^{(1)} = 1.3$ МэВ, кривая 3 на рис. 4б) — на 23%. Таким образом, как и в случае подавления пролета через мишень при работе с нижним порогом на детекторе MD_2 , существует возможность сохранить приемлемую эффективность отбора полезных событий при существенном подавлении фона от остановок в MD_2 .

Как видно из представленных распределений, спектры энерговыделений в мониторинжных детекторах для остановившихся π^- -мезонов значительно шире пролетных. Такая специфика спектров энерговыделений в тонких Si-п.п.д. при захвате пионов дает дополнительную возможность по-

давления фона с помощью установки верхних порогов на мониторинжных детекторах. При этом реализация такой возможности не снижает эффективности отбора полезных событий. Например, установив верхний порог на втором мониторинжном детекторе по максимальному энерговыделению для пиона, можно получить дополнительное подавление фона от остановок в этом детекторе в ~ 7 раз.

Следует указать, что дополнительной причиной ошибок в нормировке результатов (выходах частиц) могут служить мюоны и электроны первичного пучка. Таким фактором также могут быть вторичные частицы, возникающие при поглощении пионов в замедлителе и проходящие через мониторинжные детекторы. Это имеет существенное значение для представленной конструкции установки (см. рис. 1), в которой замедлитель сильно приближен к мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что анализ сигналов с мониторинжных детекторов с одновременным использованием “живой” мишени (Si-п.п.д.) позволяет отбирать пионы с остаточным пробегом, соответствующим толщине мишени, и достаточно надежно исключать фон от остановок в мониторинжной системе, а также пролет через мишень. Определены значения энергетических порогов на мониторинжных детекторах для достижения эффективности выделения остановок π^- -мезонов в мишенях на уровне 90%.

Таблица 1.

Характеристики	$E_{\text{мин}}^{(2)}$, МэВ					
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Эффективность отбора остановок пионов, %	100	98	96	90	84	76
Доля пролета пионов через мишень, %	35	25	16	8	3	0

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект № 0723-2020-0041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lee T.-S., Redwine R.P.* // *Ann. Rev. Nucl. and Part. Sci.* 2002. V. 52. P. 23.
2. *Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В., Сандуковский В.Г., Чернышев Б.А.* // *ЭЧАЯ*. 2009. Т. 40. С. 1063.
<https://doi.org/10.1146/annurev.nu-cl.52.050102.090713>
3. *Гуров Ю.Б., Короткова Л.Ю., Лапушкин С.В., Припула Р.В., Сандуковский В.Г., Чернышев Б.А.* // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2013. Т. 77. 370.
<https://doi.org/10.7868/S0367676513040108>
4. *Гуров Ю.Б., Катулина С.Л., Сандуковский В.Г., Yurkowski J.* // *ПТЭ*. 2005. № 6. С. 5.