

## МОНИТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ОСТАНОВОК $\pi^-$ -МЕЗОНОВ

Ю. Б. Гуров<sup>а,б</sup>, С. А. Евсеев<sup>а</sup>, С. В. Розов<sup>а,1</sup>, И. Е. Розова<sup>а</sup>,  
В. Г. Сандуковский<sup>а</sup>, Б. А. Чернышев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Представлены характеристики мониторинговой системы, состоящей из полупроводниковых детекторов и предназначенной для выделения остановок  $\pi^-$ -мезонов в различных мишенях. Показано, что установка энергетических порогов на мониторах и использование в качестве «активной» мишени кремниевого детектора позволяют достигнуть точности в определении числа остановок пионов 5 и 6,5% для «активной» и обычных мишеней соответственно.

A description of a monitor system consisting of semiconductor detectors designed to detect  $\pi^-$ -meson stop in various targets is presented. It is shown that setting thresholds for energy release in monitors and using a silicon detector as an “active” target allows achieving an accuracy of 5 and 6.5% in determining the number of pion stops, respectively, for “active” and conventional targets.

PACS: 29.30.-h; 29.40.Wk

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальному исследованию процесса поглощения отрицательных пионов атомными ядрами уделяется значительное внимание. Предметом исследования является как сам механизм поглощения [1, 2], так и характеристики образующихся в реакциях ядер [3]. Одним из эффективных способов исследования указанного процесса является изучение  $A$ -зависимости энергетических спектров и выходов вторичных частиц. Однако из имеющихся экспериментальных работ, посвященных измерению спектров заряженных частиц, не удается получить согласованный набор данных. Сопоставление результатов затруднено тем, что в экспериментах использованы различные способы нормировки.

Экспериментальная ситуация демонстрирует необходимость новых измерений для получения данных, пригодных для анализа  $A$ -зависимости. Для выполнения измерений нами была выбрана методика регистрации заряженных частиц с помощью многослойных полупроводниковых телескопов, которая сочетает в себе возможности идентификации частиц различной ионизирующей способности ( $p, d, t, {}^3,4\text{He}$ ) и высокие спектрометрические свойства в широком диапазоне энергий. Использование в установке полупроводниковых детекторов (ППД) также для мониторинга пучка позволило с достаточно высокой точностью определить число остановок пионов в мишени.

---

<sup>1</sup>E-mail: rozovs@jinr.ru

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент выполнен на пионном канале синхроциклотрона Петербургского института ядерных исследований (Гатчина) с помощью ППД-спектрометра заряженных частиц [4]. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

Пучок  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 100 МэВ/с тормозился замедлителем (З), затем проходил через мониторинговую систему, состоящую из двух кремниевых поверхностно-барьерных детекторов МД1 и МД2 (Si(Au)-ППД толщиной 350 и 250 мкм, диаметр рабочей области 24 мм), после чего останавливался в тонкой мишени (М). Мишень представляла собой пластинку из исследуемого материала диаметром 32 мм и толщиной  $\sim 0,1$  г/см<sup>2</sup>. В измерениях использовались следующие мишени: легкие ядра <sup>6,7</sup>Li, <sup>9</sup>Be, <sup>10,11</sup>B, <sup>12</sup>C; средние ядра <sup>28</sup>Si, <sup>40</sup>Ca, <sup>59</sup>Co, <sup>93</sup>Nb; изотопы олова <sup>114,117,120,124</sup>Sn; тяжелые ядра <sup>169</sup>Tm, <sup>181</sup>Ta, <sup>209</sup>Pb. В качестве «активной» мишени устанавливался Si(Au)-детектор (аналог мишени <sup>28</sup>Si).

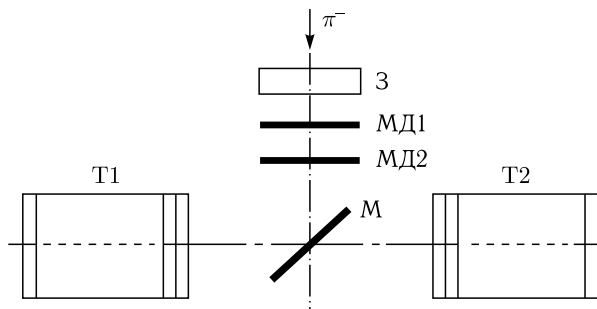


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. З — замедлитель; МД1 и МД2 — мониторинговые детекторы; М — мишень; Т1 и Т2 — ППД-телескопы

Заряженные частицы от поглощения пионов в мишени регистрировались двумя многослойными телескопами Т1 и Т2. Каждый телескоп состоял из двух Si(Au)-ППД толщиной 200 и 600 мкм и 11 литий-дрейфовых детекторов (Si(Li)-ППД) толщиной 3,0 мм. Диаметр чувствительных областей всех детекторов 32 мм. Энергетическое разрешение ППД по электронам внутренней конверсии ( $E_\beta \approx 1$  МэВ) составляло 40 кэВ. Установка позволяла регистрировать с высоким разрешением ( $\Delta E/E \approx 0,5\%$ ) однозарядные частицы с энергией  $\sim 100$  МэВ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ОСТАНОВОК ПИОНОВ В МИШЕНЯХ

В качестве мишеней в эксперименте использовались пластины из разных материалов с толщинами, эквивалентными пробегу  $\pi^-$ -мезона в эталонной кремниевой мишени (толщина кремниевой мишени <sup>28</sup>Si  $\approx 440$  мкм). Погрешность в определении числа остановок в каждой экспозиции является основным источником неопределенности относительной нормировки выходов частиц на разных мишенях.

В нашем подходе значительная доля пионов, регистрируемых мониторинговыми детекторами ( $\sim 50\%$ ), останавливается в мишени. Счет мониторов позволяет определить

количество остановок в мишени с достаточно высокой точностью. Выделение из пучка  $\pi^-$ -мезонов, пробег которых не превышает толщины мишени, достигается установкой ограничений на энерговыделения в мониторах и включением их в совпадение.

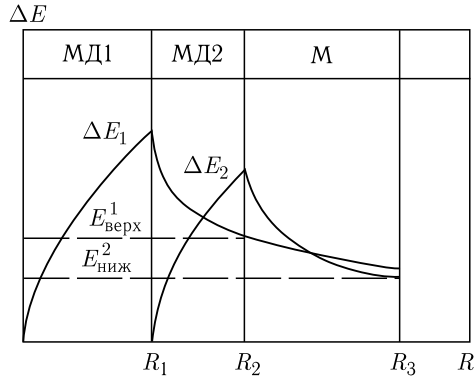


Рис. 2. Зависимость энергетических потерь в первом ( $\Delta E_1$ ) и втором ( $\Delta E_2$ ) мониторинговых детекторах от остаточного пробега пионов.  $E_{\text{верх}}^1$  — значение верхнего порога для МД1,  $E_{\text{ниж}}^2$  — значение нижнего порога для МД2

Для отбраковки остановок пионов во втором мониторинговом детекторе используется ограничение на максимально возможные энерговыделения в МД1 — установка верхнего порога  $E_{\text{верх}}^1$ . Для отбраковки пионов, пролетающих мишень насквозь, используется ограничение на минимально возможные энерговыделения в детекторе МД2 — установка нижнего порога  $E_{\text{ниж}}^2$ . Таким образом, установив одновременно верхний и нижний пороги, можно выделить пионы в интервале остаточных пробегов  $R_2 - R_3$ , что соответствует их остановкам в мишени. Вследствие флуктуаций потерь энергии, многократного рассеяния, конечного энергетического разрешения детекторов представленный способ обладает эффективностью, близкой к 90%.

Число совпадений сигналов мониторов  $N_{\text{мон}}$  и количество остановок в мишени с  $N_{\pi}$  связаны соотношением

$$N_{\pi} = N_{\text{мон}} K_1 K_2,$$

где  $K_1$  — доля пионов, попадающих в площадь мишени, от счета мониторов  $N_{\text{мон}}$ ;  $K_2$  — доля пионов, остановившихся в мишени, от попавших в площадь мишени  $N_{\text{мон}} K_1$ .

Для определения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  и исследования влияния различных факторов на их стабильность были выполнены измерения с «активной» кремниевой мишенью — Si(Au)-детектором, который по чувствительной площади и по толщине эквивалентен обычной кремниевой мишени. При этом исследована возможность контроля набора статистики по форме спектра энерговыделений в мониторинговом детекторе МД2.

На рис. 3, а приведены спектры энерговыделений в «активной» мишени при различных условиях отбора событий.

Спектр 1 (гистограмма) получен при включении в логику отбора сигналов только мониторинговых детекторов. Спектр 2 (крестики) измерен при включении «активной» мишени ( $\Delta E_{\text{миш}} \geq 0,5$  МэВ) в логику отбора на совпадение с мониторинговыми детекторами. В спектрах 1 и 2 отчетливо видны пики от пионов, пролетающих мишень насквозь. В спектре 1 в области нулевых энерговыделений наблюдается пик от пионов, не

Рис. 2 иллюстрирует принцип отбора остановок пионов. Кривыми показаны средние энергетические потери пионов в мониторинговых детекторах (МД1, МД2) в зависимости от их пробега. Сплошные вертикальные линии соответствуют толщине первого, второго детекторов и мишени (М).

Для отбраковки остановок пионов во втором мониторинговом детекторе используется ограничение на максимально возможные энерговыделения в МД1 — установка верхнего порога  $E_{\text{верх}}^1$ . Для отбраковки пионов, пролетающих мишень насквозь, используется ограничение на минимально возможные энерговыделения в детекторе МД2 — установка нижнего порога  $E_{\text{ниж}}^2$ . Таким образом, установив одновременно верхний и нижний пороги, можно выделить пионы в интервале остаточных пробегов  $R_2 - R_3$ , что соответ-

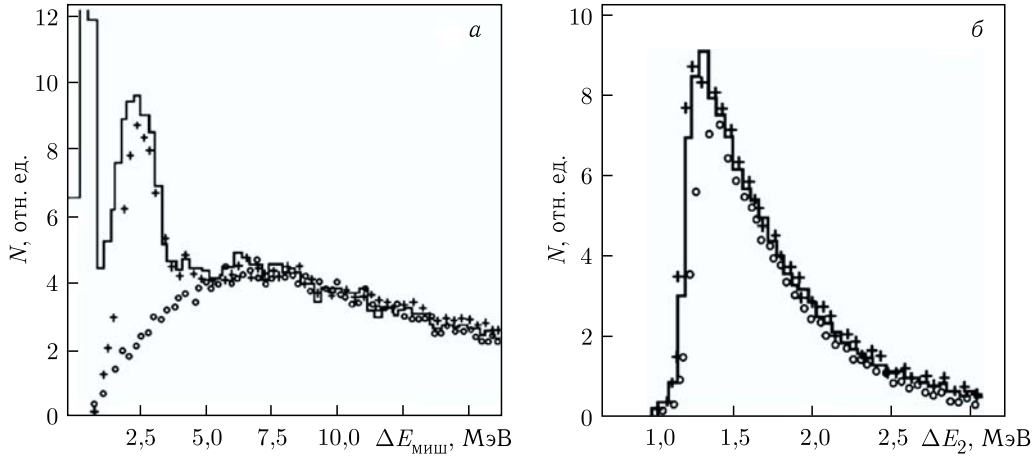


Рис. 3. Спектры энерговывделений в «активной» мишени (а) и мониторинном детекторе МД2 (б) при различных условиях отбора событий: спектр 1 (гистограмма) — отбор событий при включении в логику отбора только детекторов МД1 и МД2; спектр 2 (крестики) — «активная» мишень ( $\Delta E_{\text{миш}} \geq 0,5$  МэВ) включена на совпадение с МД1 и МД2; спектр 3 (кружки) — мониторинная система включена на совпадение с телескопами Т1 и Т2

попавших в чувствительную область мишени. Спектр 3 (кружки) соответствует остановкам пионов в мишени. Это распределение получено при регистрации телескопами вторичных частиц с пробегами, превышающими толщину мишени (мониторная система включена на совпадение с телескопами Т1 и Т2). Вследствие этого спектр 3 не искажен эффектом поглощения образующихся вторичных частиц с низкими энергиями в мишени.

Отношение площадей  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  под спектрами 1, 2, 3 при нормировке по правой части спектров ( $\Delta E_{\text{миш}} > 7,5$  МэВ) позволяет определить  $K_1$  и  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{S_2}{S_1} \cong 0,5, \quad K_2 = \frac{S_3}{S_2} \cong 0,9.$$

Измерения с «активной» мишенью возможны только для кремния, на других мишенях необходим иной способ определения  $K_1$  и  $K_2$ . Для контроля стабильности оказалось достаточным измерение  $K_2$ , которое можно определить, анализируя форму спектров энерговывделений в мониторинном детекторе МД2.

На рис. 3, б приведены спектры энергетических потерь  $\pi^-$ -мезонов в МД2, при этом данные соответствуют условиям измерений на рис. 3, а. Область больших энерговывделений  $\Delta E_2 > 1,8$  МэВ отвечает малым пробегам пионов (ближней к МД2 стороне мишени). Область  $1,5 < \Delta E_2 < 1,8$  МэВ соответствует остановкам в центральной части мишени, она выбрана для взаимной нормировки спектров 1, 2, 3. Область наименьших сбросов в МД2 отвечает большим пробегам пионов (дальней от детектора МД2 стороне мишени и пролетным пионам). Отношение площадей  $S_3/S_2$  под спектрами 3 и 2, как и на рис. 2, а, равно  $K_2$ . Спектр 1 (гистограмма) не позволяет определить величину  $K_1$ , но он совпадает со спектром 2 в области пролетных

пионов и может быть использован для определения  $K_2$  при измерениях с обычной мишенью, которую нельзя включить в логику отбора событий. Поэтому в эксперименте с использованием обычной мишени по спектрам 1 и 3 в детекторе МД2 были определены значения  $K_2$ .

Необходимо указать ошибки в определении следующих параметров и факторов, которые могут приводить к неточности в определении коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ : стабильность пучка (импульс, интенсивность) — 2,5%, состав пучка (пролетные пионы и мюоны, вторичные частицы) — 4%, стабильность порогов на мониторных детекторах — 2%, запуск с «активной» мишенью и без нее — 4%. С учетом указанных факторов погрешность определения числа остановок  $\delta N_\pi$  составила 5% при использовании «активной» мишени и 6,5% для обычных мишеней.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено описание мониторной системы, состоящей из кремниевых детекторов, для определения остановок  $\pi^-$ -мезонов в мишени. Показано, что с помощью выбора верхних и нижних порогов на мониторных детекторах можно исключить фон как от остановок пионов в этих детекторах, так и от пролета пионов через мишень. На основе анализа различных факторов установлено, что погрешность определения числа остановок составила 5 и 6,5% для «активной» и обычных мишеней соответственно.

Работа поддержана грантом № 0723-2020-0041 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weyer H. G.* Pion Absorption in Light Nuclei // *Phys. Rep.* 1990. V. 195. P. 295–367.
2. *Lee T.-S., Redwine R. P.* Pion–Nucleus Interactions // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2002. V. 22. P. 23–63.
3. *Gurov Yu. B., Lapushkin S. V., Chernyshev B. A., Sandukovsky V. G.* Search for Superheavy Hydrogen Isotopes in Pion Absorption Reaction // *Phys. Part. Nucl.* 2009. V. 40. P. 558–581.
4. *Gurov Yu. B., Korotkova L. Yu., Lapushkin S. V., Pritula R. V., Sandukovsky V. G., Chernyshev B. A.* A-Dependence of the Yield of Deuterons Emitted during the Absorption of Stopped Pions // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2013. V. 77. P. 370–374.

Получено 4 марта 2021 г.