

МОНИТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ОСТАНОВОК π^- -МЕЗОНОВ

Ю. Б. Гуров^{а,б}, С. А. Евсеев^а, С. В. Розов^{а,1}, И. Е. Розова^а,
В. Г. Сандуковский^а, Б. А. Чернышев^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Представлены характеристики мониторинговой системы, состоящей из полупроводниковых детекторов и предназначенной для выделения остановок π^- -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 π^- -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 ($p, d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}$) и высокие спектрометрические свойства в широком диапазоне энергий. Использование в установке полупроводниковых детекторов (ППД) также для мониторингования пучка позволило с достаточно высокой точностью определить число остановок пионов в мишени.

¹E-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 π^- -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/см². В измерениях использовались следующие мишени: легкие ядра ^{6,7}Li, ⁹Be, ^{10,11}B, ¹²C; средние ядра ²⁸Si, ⁴⁰Ca, ⁵⁹Co, ⁹³Nb; изотопы олова ^{114,117,120,124}Sn; тяжелые ядра ¹⁶⁹Tm, ¹⁸¹Ta, ²⁰⁹Pb. В качестве «активной» мишени устанавливался Si(Au)-детектор (аналог мишени ²⁸Si).

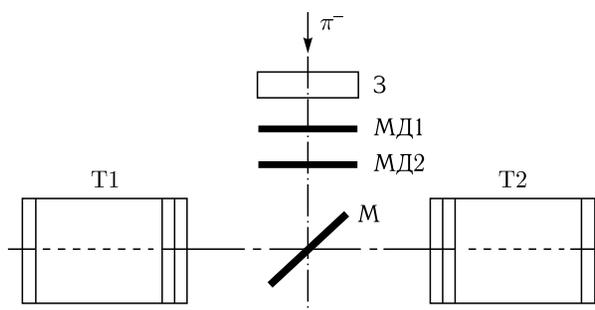


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. З — замедлитель; МД1 и МД2 — мониторинговые детекторы; М — мишень; Т1 и Т2 — ППД-телескопы

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 ~ 100 МэВ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ОСТАНОВОК ПИОНОВ В МИШЕНЯХ

В качестве мишеней в эксперименте использовались пластины из разных материалов с толщинами, эквивалентными пробегу π^- -мезона в эталонной кремниевой мишени (толщина кремневой мишени ²⁸Si ≈ 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 π^- -мезонов, пробег которых не превышает толщины мишени, достигается установкой ограничений на энерговыделения в мониторах и включением их в совпадение.

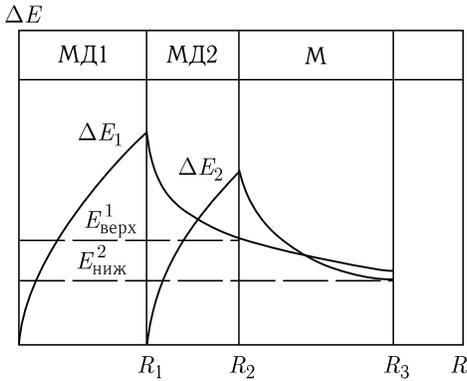


Рис. 2. Зависимость энергетических потерь в первом (ΔE_1) и втором (ΔE_2) мониторинговых детекторах от остаточного пробега пионов. $E_{\text{верх}}^1$ — значение верхнего порога для МД1, $E_{\text{ниж}}^2$ — значение нижнего порога для МД2

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_{π} 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 соответствует их остановкам в мишени.

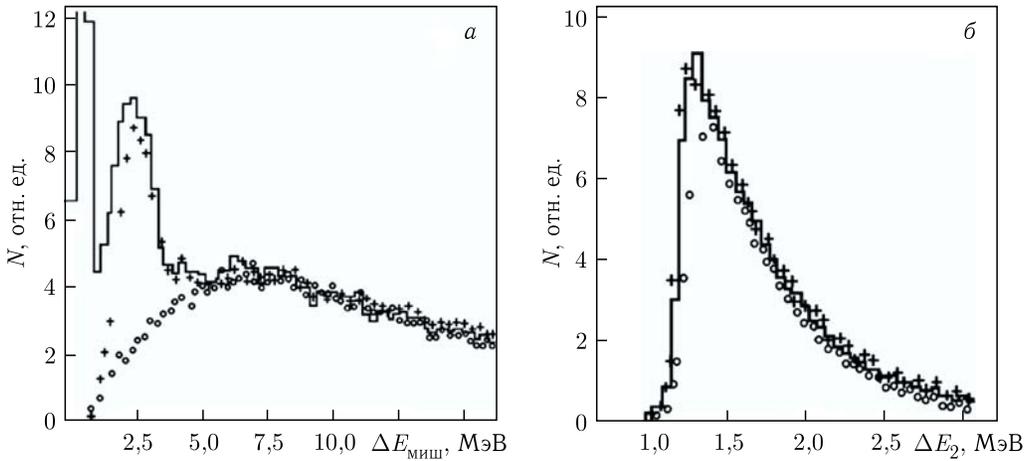


Рис. 3. Спектры энерговыделений в «активной» мишени (а) и мониторинг детекторе МД2 (б) при различных условиях отбора событий: спектр 1 (гистограмма) — отбор событий при включении в логику отбора только детекторов МД1 и МД2; спектр 2 (крестики) — «активная» мишень ($\Delta E_{\text{миш}} \geq 0,5$ МэВ)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

На рис. 3,б приведены спектры энергетических потерь π^- -мезонов в МД2, при этом данные соответствуют условиям измерений на рис. 3,а. Область больших энерговыделений $\Delta E_2 > 1,8$ 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 δN_π составила 5% при использовании «активной» мишени и 6,5% для обычных мишеней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено описание мониторинговой системы, состоящей из кремниевых детекторов, для определения остановок π^- -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.