

P13-2013-58

Р. А. Астабатьян^{1,2}, С. М. Лукьянов², Э. Р. Маркарян^{1,2},
В. А. Маслов², Ю. Э. Пенионжкевич², В. И. Смирнов²

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗАЦИОННЫХ
ПОТЕРЬ ЭНЕРГИЙ ИОНОВ В ОБЛАСТИ
 $\beta\gamma \approx 0,01-0,06$ В ТОНКИХ ПОГЛОТИТЕЛЯХ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹ Ереванский физический институт, Ереван

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Астабатьян Р. А. и др.

P13-2013-58

Результаты измерений ионизационных потерь энергий ионов в области $\beta\gamma \approx 0,01-0,06$ в тонких поглотителях

Приведены результаты измерений ионизационных потерь энергий ионов в малоизученной области $\beta\gamma = 0,01-0,06$ в тонких ($x \approx 2$ мкг/см²) поглотителях. С этой целью были проведены одновременные измерения ионизационных потерь и времени пролета ионов лавинными газонаполненными детекторами низкого давления $P \approx 1$ торр, дополненные измерениями остаточной энергии ионов полупроводниковым детектором. Энергия низкоэнергетических ионов с $\beta\gamma \approx 0,01-0,03$ восстанавливалась измерениями времени пролета. Приводится зависимость $\Delta E(E)$ для ионов ⁴He, Be, C, O.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Astabatyan R. A. et al.

P13-2013-58

The Results of Measurements of Ion Energy Losses in the Range of $\beta\gamma \approx 0.01-0.06$ in Thin Absorbers

The results of measurements of ion energy losses in the insufficiently known range of $\beta\gamma = 0.01-0.06$ in thin ($x \approx 2$ mg/cm²) absorbers are presented. The energy losses and time of flight of the ions were measured simultaneously using low-pressure avalanche gas-filled detectors at $P \approx 1$ torr. Also, measurements of the ions residual energy were made by a semiconductor detector. The energy of the ions with $\beta\gamma \approx 0.01-0.03$ was reconstructed using the time-of-flight measurements. The $\Delta E(E)$ dependence for ⁴He, Be, C, O ions is presented.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

В предыдущей нашей работе [1] представлена широкоапертурная установка на основе газонаполненных детекторов: МПК (многопроволочной пропорциональной камеры) и лавинных ΔE -камер, дополненных стриповыми ППД (полупроводниковыми детекторами). Установка предназначена для измерений низкоэнергетических продуктов реакций в области задних углов вылета, близких к $\theta \approx 180^\circ$, в частности исследований высоковозбужденных состояний экзотического ядра ${}^6\text{He} \rightarrow 2T$. Регистрация и идентификация ионов осуществляются посредством одновременных измерений ионизационных потерь энергий и времени пролета лавинными ΔE -камерами, угловыми измерениями (МПК), измерениями остаточной энергии (ППД).

Приведем выборочно имеющие непосредственное отношение к настоящей работе характеристики установки:

- энергетическое разрешение E -детектора $\sigma_E \approx 40$ кэВ;
- энергетическое разрешение лавинных камер (FWHM) не хуже 30 %;
- временное разрешение измерений времени пролета $\sigma_T \approx 1$ нс;
- энергетический порог регистрации ионов $\beta\gamma = 0,01$.

Такой относительно низкий энергетический порог регистрации обусловлен высокой прозрачностью газонаполненных лавинных камер и МПК и предельно низким давлением $P = 1$ торр рабочего газа. Количество вещества в подавляющей степени определялось толщиной катодов — алюминизированного майлара 1,5–2 мкм. Отметим близкую к 100 % эффективность регистрации ионов всеми газонаполненными камерами, особенно для однозарядных ионов, для которых средние потери энергий в камере составляют менее кэВ. Это обстоятельство, наряду с приведенным значением разрешения по измерениям потерь энергий в лавинных камерах, является следствием предельно высокой чувствительности порога регистрации, позволяющей регистрировать сигналы от единичной электронной пары [1]. Вышеприведенные характеристики создают уникальную возможность измерения ионизационных потерь энергий в тонких поглотителях ($x \approx 2$ мкг/см²) в малоизученной как экспериментально, так и теоретически [2] области энергий $\beta\gamma \approx 0,01–0,06$.

Хорошо известно, что для ионов в этой области энергий скорость частицы становится сравнимой со скоростью атомных электронов, потери энергий перестают описываться формулой Бете–Блоха и разными поправками этой формулы. Данные по удельным потерям энергии ионов, экспериментальные и расчетные, приводятся в многочисленных учебниках и справочниках. Причем подавляющая часть этих данных относится к области высоких и средних энергий в диапазоне релятивистского фактора $\beta\gamma > 0,1$. В настоящей работе

представлены результаты $(\Delta E, \text{TOF}, E)$ -измерений на изотопе ^{226}Ra в диапазоне энергий 0,2–1,5 МэВ/нуклон, или $\beta\gamma = 0,01–0,06$, дополненные ранее проведенными измерениями на пучке ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ [3].

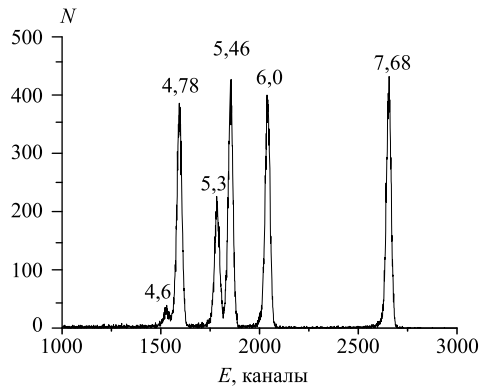


Рис. 1. Энергетический спектр ^{226}Ra на E -детекторе. Цифры возле пиков — энергия α -частиц (в МэВ)

Для получения абсолютной энергетической калибровки изотоп ^{226}Ra устанавливался непосредственно на E -детекторе в вакууме; спектр α -линий изотопа показан на рис. 1. Далее измерения проводились согласно геометрии [1]: две лавинные камеры (TOF, ΔE), расположенные на расстоянии 25 см друг от друга; между ними располагалась МПК для выделения коллимированной области по углу θ ; конечным E -детектором служил стриповый ППД.

На рис. 2 представлены измеренные двухмерные $(\Delta E, E)$ - и (T, E) -спектры α -частиц от ^{226}Ra , а на рис. 3, 4 — одномерные распределения двухмерных спектров: остаточный энергетический спектр на стриповом E -детекторе и времяпролетный спектр от лавинных камер. На рис. 3 цифры возле пиков — остаточная энергия α -частиц от соответствующих им линий: 7,68; 6,0; 5,46; 5,3 МэВ (рис. 1), а на рис. 4 — время пролета α -частиц (в наносекундах).

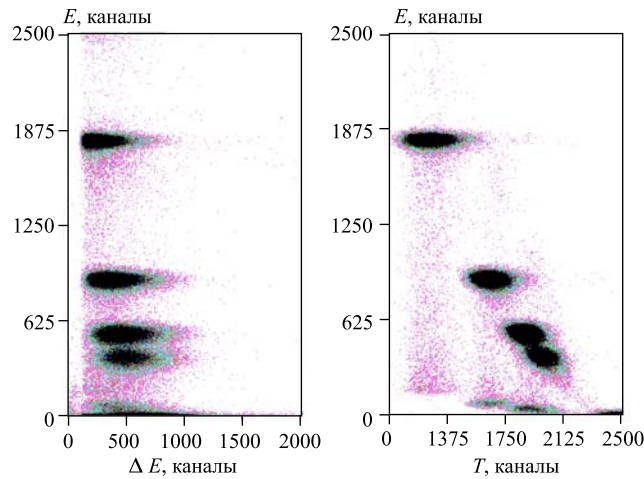


Рис. 2. Двухмерные спектры $(\Delta E, E)$ и (T, E) α -частиц от ^{226}Ra

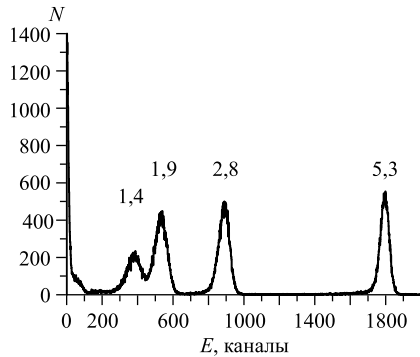


Рис. 3. Остаточный энергетический спектр ^{226}Ra на E -детекторе после прохождения лавинных счетчиков и МПК

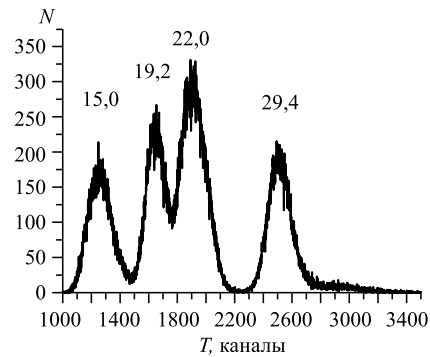


Рис. 4. Времяпролетный спектр для разных линий α -частиц от ^{226}Ra

Последняя линия α -спектра (4,78 МэВ) (см. рис.1) не долетает до E -детектора, но регистрируется лавинными камерами и соответствует крайнему правому распределению времяпролетного спектра рис.4. Последняя, отсутствующая на двухмерных спектрах рис.2 линия, отчетливо проявляется на верхнем локусе двухмерного спектра рис.5, полученного из тех же данных. Восстановленный по времени пролета энергетический диапазон α -частиц лежит в низкоэнергетическом интервале и представляет особый интерес.

Аномальный «хвост» на верхнем локусе рис.5 характеризует переход в область уменьшающихся удельных потерь частиц при $\beta\gamma \leq 0,03$. Отметим, что эта область энергий достигалась подбором соответствующего поглотителя.

Из данных, представленных на рис.2–5, вычислялись средние значения ионизационных потерь в зависимости от энергии α -частицы: в энергетическом интервале 0,5–1,5 МэВ/нуклон ($\beta\gamma \approx 0,03$ –0,06) по $(\Delta E, E)$ -измерениям (рис.2); в низкоэнергетической области 0,1–0,5 МэВ/нуклон ($\beta\gamma \approx 0,01$ –0,03) по (T, E) -измерениям (верхний локус рис.5).

Аналогичные данные для ионов Ве, С, О были получены при анализе работы [1] по идентификации низкоэнергетических ионов на пучке Хе с энергией 1,26 МэВ/нуклон ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ [3]. Установка

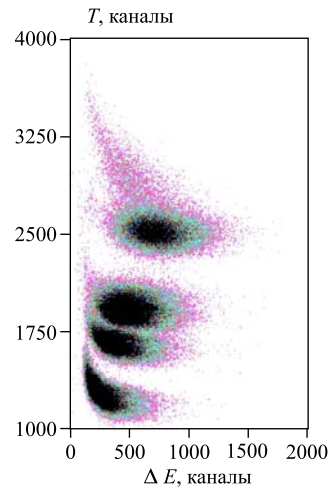


Рис. 5. Двухмерный спектр $(\Delta E, T)$ линий α -частиц от ^{226}Ra

находилась под углом $(45 \pm 3)^\circ$ к расположенным на оси пучка мишеням Ве, С и майлара. Средняя энергия упругорассеянных ядер непосредственно из мишеней составляла 14, 18,5, 23,2 МэВ для ядер Ве, С, О соответственно. Ядра с такими низкими энергиями не достигают E -детектора при прохождении входного окна и лавинных камер установки, поэтому их идентификация осуществлялась исключительно по времени пролета и ионизационным потерям.

На рис. 6 представлен пример из работы [1] двухмерного спектра $(\Delta E, T)$ с ярко выраженным протяженным «хвостом», как на верхнем локусе рис. 5 для α -частиц. Из таких данных была получена зависимость ионизационных потерь от энергии ионов Ве, С, О.

На рис. 7 приведена вся совокупность данных по ионизационным потерям ионов ^4He , Ве, С, О. Правая часть кривой рис. 7 получена из данных

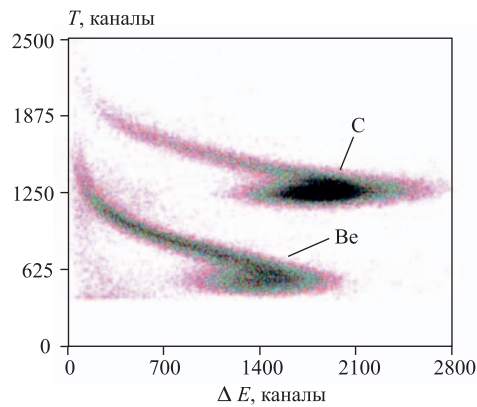


Рис. 6. Двухмерные спектры $(\Delta E, T)$ ядер отдачи из углеродной и бериллиевой мишеней

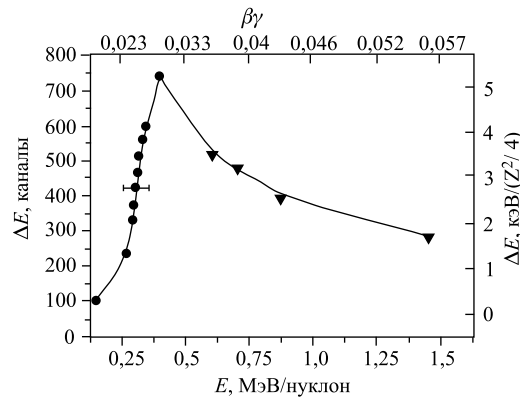


Рис. 7. Зависимость ионизационных потерь в изобутане ($x = 2 \text{ мкг/см}^2$) от энергии ионов: ● — ^4He , Ве, С, О; ▼ — ^4He

(ΔE , E) для α -частиц, скорректированных на поглощение в выходном майларовом электроде второй лавинной камеры на входе в E -детектор. Левая же часть кривой получена из данных (ΔE , T) для α -частиц и ионов Be, C, O, не долетающих до E -детектора, при этом энергии частиц восстанавливались по времени пролета с коррекцией на поглощение на входном майларовом электроде второй лавинной камеры. Эта коррекция энергий, а также расчеты абсолютных значений средних ионизационных потерь производились по программе LISE [4] и могут содержать систематические ошибки в левой части рис. 7 в области энергий 0,1–0,5 МэВ/нуклон ($\beta\gamma \approx 0,01–0,03$). Все измеренные величины рис. 7 содержат средние значения, поэтому статистическая ошибка минимальна, а отмеченная ошибка на одной из точек показывает оценочную величину разброса точек для разных ионов в левой части рисунка.

Авторы выражают благодарность персоналу ускорителя ИЦ-100 за содействие и сотрудничество.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астабатян Р. А. и др. // ПТЭ. 2012. №3. С. 40–48.
2. Bichsel H., Groom D. E., Klein S. R. Passage of Particles through Matter. 2012. § 30. P. 9. <http://pdg.lbl.gov>.
3. Гикал Б. Н. и др. Препринт ОИЯИ Р9-2007-20. Дубна, 2007.
4. <http://lise.nslc.msu.edu/lise.html>

Получено 4 июня 2013 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 18.09.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,59. Тираж 245 экз. Заказ № 58065.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/