

УДК 539.1.074.8

## ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ КОРОТКОЖИВУЩИХ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

© 2011 г. А. И. Свирихин, А. В. Исаев, А. В. Ерёмин, А. Н. Кузнецов,  
О. Н. Малышев, А. Г. Попеко, Е. А. Сокол, М. Л. Челноков, В. И. Чепигин

Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

E-mail: isaev@jinr.ru

Поступила в редакцию 19.01.2011 г.

Для изучения множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления детектирующая система сепаратора ВАСИЛИСА была дополнена сборкой из 54  $^3\text{He}$ -счетчиков нейтронов. Эффективность регистрации новым детектором нейтронов составила 39%. В работе приведено техническое описание детектирующей системы и представлены данные о характеристиках спонтанного деления  $^{252}\text{No}$ , полученные в ходе тестового эксперимента в июле 2010 года.

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть четно-четных изотопов тяжелых элементов ( $Z > 96$ ) распадается посредством спонтанного деления. До настоящего времени для большей части спонтанно-делящихся изотопов этих элементов были экспериментально измерены периоды полураспада, достаточно точно измерены полные кинетические энергии ТКЕ (Total Kinetic Energy) осколков и, для нескольких изотопов, построены массовые и энергетические распределения осколков [1]. Однако такая важная характеристика, как множественность нейтронов спонтанного деления, с высокой точностью была измерена только для долгоживущих изотопов из области кюрия и калифорния, а также для нескольких нейтроно-избыточных изотопов фермия [2].

Изучение множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления имеет большое значение как с теоретической, так и с методической точек зрения. Для теории деления ядер важно, что испускаемое в процессе деления количество нейтронов непосредственно зависит от степени возбуждения осколков деления и, таким образом, играет важную роль в восстановлении энергетического баланса реакции. С другой стороны, среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления является уникальной характеристикой ядра. Изучение зависимости этого числа от массы ядра может в значительной степени облегчить идентификацию сверхтяжелых ядер, получаемых как в экспериментах off-line, где выделенные химическим путем образцы помещаются внутрь детектора [3], так и в экспериментах on-line на пучках тяжелых ионов.

Ограниченное количество информации о множественности нейтронов объясняется сложностью

получения достаточных количеств исследуемых изотопов, а также невозможностью использования off-line-методик для измерения характеристик спонтанного деления короткоживущих ядер.

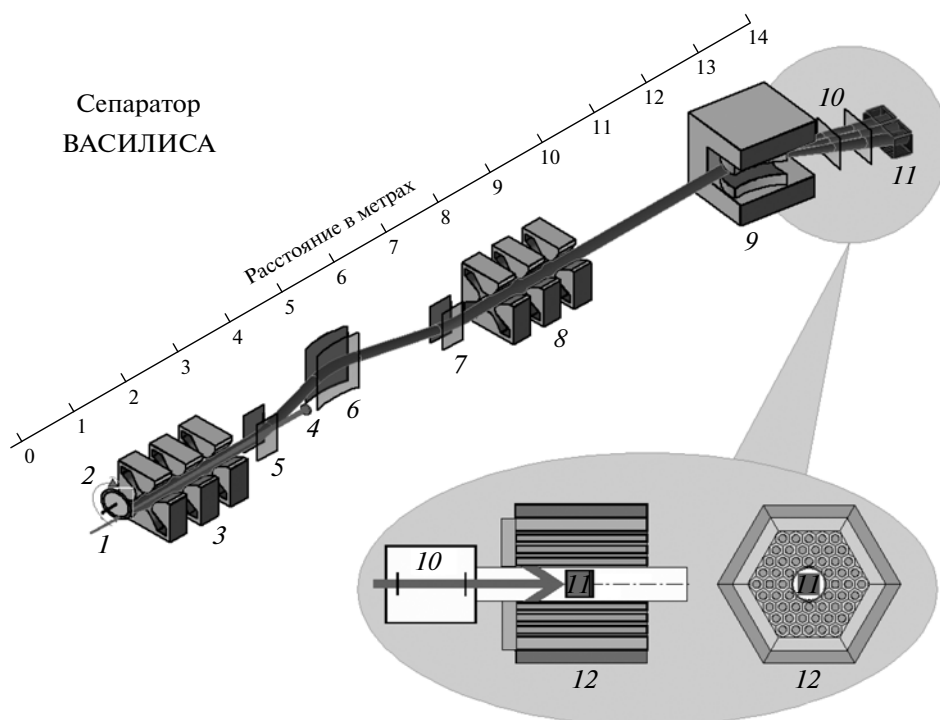
В данной работе описывается установка, предназначенная для измерения множественности нейтронов, испускаемых при спонтанном делении тяжелых ядер.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Детектирующая система размещена в фокальной плоскости электростатического сепаратора ВАСИЛИСА [4], который расположен на выведенном пучке тяжелых ионов циклотрона У-400 (ЛЯР ОИЯИ) и используется для экспериментов по синтезу и изучению тяжелых ядер, получаемых в ядерных реакциях полного слияния. Исследуемые в экспериментах продукты реакций полного слияния (ядра отдачи) сепаратором ВАСИЛИСА отделяются от ионов первичного пучка и продуктов побочных ядерных реакций, проходят через времяпролетный детектор и имплантируются в фокальный Si-детектор для регистрации ядер отдачи,  $\alpha$ -частиц и осколков деления. Испускаемые в процессе спонтанного деления ядер нейтроны регистрируются детектором на основе  $^3\text{He}$ -счетчиков.

Схема сепаратора ВАСИЛИСА и его детектирующей системы приведена на рис. 1, а на рис. 2 показан внешний вид последней.

Времяпролетный детектор (10 на рис. 1) состоит из двух одинаковых (“Старт” и “Стоп”) широкоапертурных детектирующих модулей. Для усиления электронного сигнала используется сборка из двух прямоугольных микроканальных пластин



**Рис. 1.** Электростатический сепаратор ВАСИЛИСА и схема новой детектирующей установки. 1 – пучок ионов; 2 – вращающаяся мишень; 3 – первый триплет магнитных квадрупольных линз; 4 – цилиндр Фарадея; 5–7 – первый, второй и третий электростатические deflectоры; 8 – второй триплет магнитных квадрупольных линз; 9 – дипольный магнит; 10 – времяпролетная система; 11 – сборка из полупроводниковых Si-детекторов (п.п.д.); 12 – детектор нейтронов.

размером  $70 \times 90$  мм. Пролетная база составляет 40 см [5].

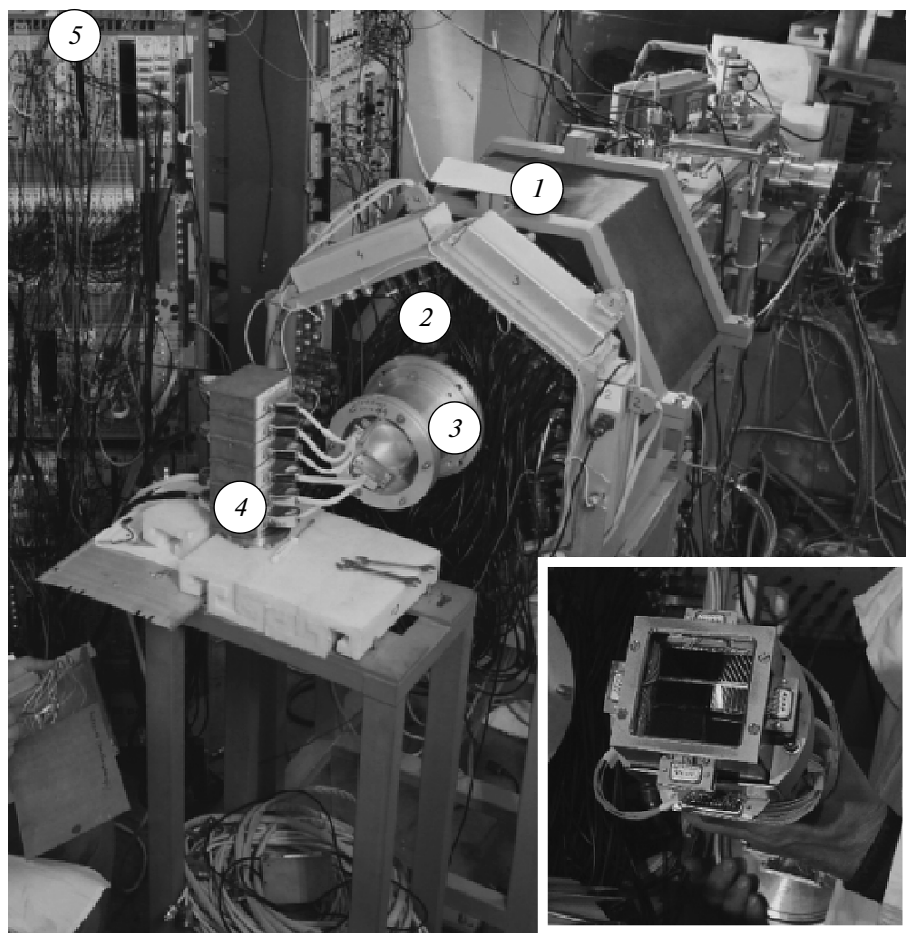
После прохождения времяпролетных детекторов ядра отдачи вбиваются в детекторную сборку (11 на рис. 1 и на вставке рис. 2). Детекторная сборка состоит из пяти 16-стриповых полупроводниковых детекторов. Каждый стриповый детектор имеет размер чувствительной поверхности  $58 \times 58$  мм. У фокального детектора, в который вбиваются ядра отдачи, каждый стрип имеет резистивный слой, обеспечивающий позиционную чувствительность вдоль стрипа. Энергетическое разрешение для  $\alpha$ -частиц в диапазоне 6–10 МэВ, измеренное в тестовых экспериментах, составляет  $\sim 20$  кэВ. Четыре детектора смонтированы по бокам фокального детектора, образуя сборку в виде колодца [6]. Они предназначены для регистрации  $\alpha$ -частиц и осколков спонтанного деления, вылетающих из фокального детектора. Полная геометрическая эффективность детекторной сборки при регистрации  $\alpha$ -частиц составляет 85%. В боковых детекторах стрипы не имеют позиционной чувствительности. Для уменьшения числа электронных каналов каждые четыре соседних стрипа соединены между собой. Таким образом, в боковых детекторах имеется 16 сегментов, эффективно измеряющих энергию  $\alpha$ -частиц и осколков спонтанного деления, вылетевших из

фокального детектора. Энергетическое разрешение, измеренное в тестовых экспериментах, составляет  $\sim 150$  кэВ. Худшее по сравнению с фокальным детектором разрешение объясняется большой емкостью сегментов боковых детекторов и большим диапазоном углов, под которыми  $\alpha$ -частицы, вылетевшие из фокального детектора, попадают в боковые детекторы.

Пространственное разрешение отдельно взятого стрипа фокального детектора определялось с помощью тестовых реакций  $^{40}\text{Ag} + ^{176}\text{Yb}$  и  $^{40}\text{Ag} + ^{164}\text{Dy}$ . Полученное пространственное разрешение отдельного стрипа фокального детектора составляет  $\sim 0.5$ ,  $\sim 0.8$ ,  $\sim 1.0$  мм для корреляций типа соответственно  $\alpha$ – $\alpha$ , ядро отдачи– $\alpha$  и ядро отдачи–осколок деления.

Полупроводниковый детектор располагается в цилиндрической вакуумной камере с внутренним диаметром 120 мм. При исследовании характеристик выхода нейтронов вакуумную камеру окружают три коаксиальных слоя счетчиков нейтронов, расположенных так, чтобы обеспечить как можно больший захват телесного угла вылета нейтронов (12 на рис. 1).

Энергии и координаты событий записываются при двух диапазонах усиления: до 200 МэВ для осколков спонтанного деления и до 20 МэВ для  $\alpha$ -частиц и ядер отдачи. Спектрометрические



**Рис. 2.** Внешний вид детектирующей системы сепаратора ВАСИЛИСА. 1 – защита детектора нейтронов; 2 – счетчики нейтронов; 3 – вакуумная камера с п.п.д.; 4 – предусилители сигналов с п.п.д.; 5 – спектрометрические электронные модули; на вставке – сборка из п.п.д.

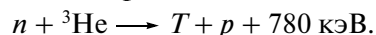
предусилители и усилители разработаны и изготовлены в ООО «Техинвест» (Дубна) и имеют высокую стабильность параметров.

Сигналы с быстрых выходов спектрометрических усилителей фокального п.п.д. запускают схему опроса нейтронных счетчиков («окно» на 128 мкс), расположенных вокруг вакуумной камеры сборки полупроводниковых детекторов, что позволяет достоверно измерять количество нейтронов, сопровождающих каждый акт деления. Сигналы от предусилителей-формирователей, расположенных на торцах  ${}^3\text{He}$ -счетчиков, подаются на дискриминатор, с выхода которого на логические схемы поступают импульсы длительностью 150 нс. Разрешение временного счетчика для опроса детекторов нейтронов составляет 1 мкс.

Детекторы нейтронов представляют собой цилиндрические пропорциональные счетчики, выполненные в виде трубок из нержавеющей стали ( $\varnothing 30$  мм, длина 500 мм, толщина стенок 0.5 мм) и наполненные газом  ${}^3\text{He}$  (с добавкой 10% Ar) под

давлением 4 атм. Каждый счетчик нейтронов помещен в замедлитель из капролона.

Нейтрон, попадающий в детектор, замедляется в капролоне до тепловой энергии и при попадании в пропорциональный счетчик захватывается ядром  ${}^3\text{He}$  с сечением захвата  $\sim 5330$  б с образованием протона и трития:



Снаружи сборка из счетчиков нейтронов закрыта замедлителем из плексигласа толщиной 5 см и защитой от внешних нейтронов из листов борированного полиэтилена толщиной 5 см. Счет фоновых нейтронов при работе циклотрона У-400 составляет  $\sim 100$  нейтронов/с.

Для проверки совместной работы полупроводниковых детекторов и нейтронной сборки и для измерения эффективности регистрации нейтронов в условиях, максимально приближенных к эксперименту на пучке тяжелых ионов, перед чувствительной областью фокального полупроводникового детектора помещалась рамка с алюминиевой фольгой, на которую было нанесено неболь-

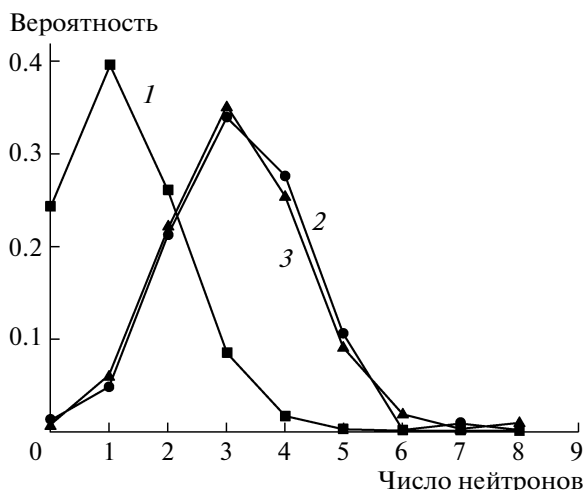


Рис. 3. Распределение по множественностям нейтронов спонтанного деления  $^{248}\text{Cm}$ : 1 — измеренное, 2 — восстановленное при помощи метода СТРЕГ [7], 3 — опубликованное ранее [8].

шое количество спонтанно-делящегося изотопа  $^{248}\text{Cm}$ . Интенсивность этого источника составляла 2–3 акта спонтанного деления в секунду. Для контроля стабильности электронной системы и детекторов проверочные измерения проводятся непосредственно до и после экспериментов на пучке. Эффективность нейтронного детектора, измеренная при помощи источника  $^{248}\text{Cm}$ , составила 39% для единичных нейтронов. Измеренное и восстановленное распределения по множественностям нейтронов спонтанного деления  $^{248}\text{Cm}$  представлены на рис. 3. Распределение, восстановленное с применением метода статистической регуляризации (СТРЕГ) [7], хорошо согласуется с ранее опубликованными расчетами множественности нейтронов спонтанного деления изотопа  $^{248}\text{Cm}$  [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В июле 2010 года был проведен тестовый эксперимент, в котором измерялась множественность нейтронов спонтанного деления изотопа  $^{252}\text{No}$ . Ускоренные ионы  $^{48}\text{Ca}$  бомбардировали мишень из  $^{206}\text{Pb}$  ( $350 \text{ мкг/см}^2$ , на подложке из Al толщиной 3 мкм). Ток ускоренных ионов составлял приблизительно  $3.125 \cdot 10^{12}$  частиц/с. Несмотря на высокую интенсивность пучка, в опыте были весьма благоприятные фоновые условия, которые сохранялись на протяжении всего эксперимента: счет фоновых нейтронов в комнате с детекторами не превышал 80 случайных отсчетов в секунду.

Ранее уже проводились эксперименты [9, 10], нацеленные на изучение множественности нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{No}$ , но статистика

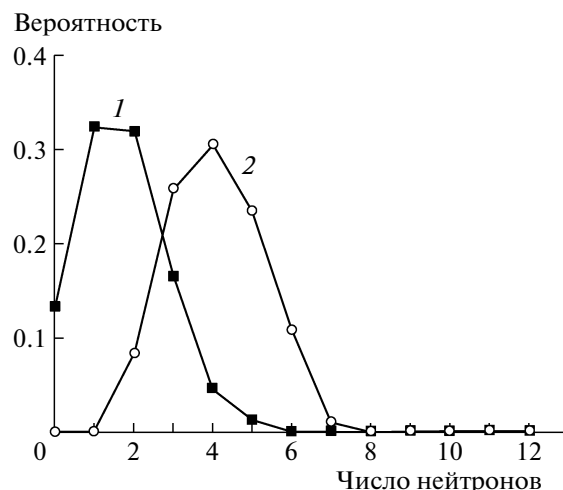


Рис. 4. Экспериментальная (1) и вычисленная из нее реальная множественность нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{No}$  (2).

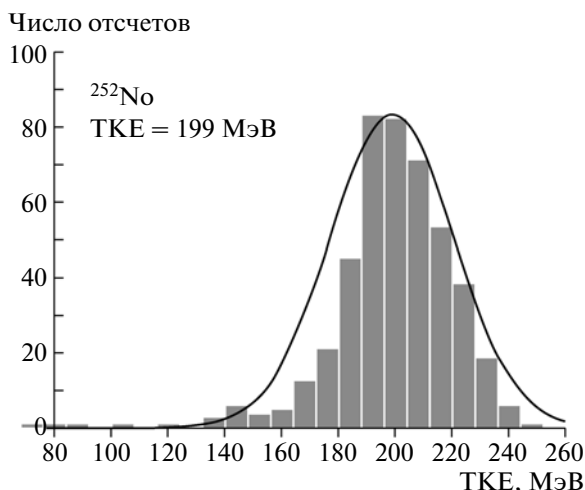
была недостаточна для точного восстановления распределений по множественностям. В июльском эксперименте ядра  $^{252}\text{No}$  получали в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb} = 2n + ^{252}\text{No}$ . Сечение этой реакции составляет около 200 нб в максимуме функции возбуждения. С мишенью провзаимодействовало  $1.7 \times 10^{17}$  ионов  $^{48}\text{Ca}$ . В результате, за сутки облучения было зарегистрировано около 2000 актов спонтанного деления  $^{252}\text{No}$ , что позволило с высокой точностью измерить распределения нейтронов по множественностям и протестировать работу всей детектирующей системы (рис. 4).

Величина среднего числа нейтронов на один акт спонтанного деления  $^{252}\text{No}$  составил  $\bar{\nu} = 4.06 \pm 0.1$ . Это значение хорошо согласуется с полученными ранее результатами  $\bar{\nu} = 4.43 \pm 0.45$  [9] и  $\bar{\nu} = 4.15 \pm 0.3$  [10].

Учитывая достаточно высокую статистику событий спонтанного деления  $^{252}\text{No}$  и опубликованные ранее данные [1, 11], полученное в тестовом эксперименте значение ТКЕ  $^{252}\text{No}$  было использовано для калибровки тракта осколков фокального полупроводникового детектора (рис. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе тестовых измерений было показано, что созданная детектирующая система позволяет с хорошей точностью измерять такие характеристики спонтанного деления ядер, как полная кинетическая энергия осколков, период полураспада относительно спонтанного деления, среднее число нейтронов на акт спонтанного деления и распределение нейтронов по множественности. Новый детектор нейтронов отличается простота и надежность конструкции, высокая эффективность



**Рис. 5.** Спектр TKE  $^{252}\text{No}$ , полученный сложением амплитуд сигналов фокального и боковых полупроводниковых детекторов.

регистрации нейтронов для широкого диапазона их энергий и очень низкая чувствительность к  $\gamma$ -квантам. Проведенный в июле 2010 года эксперимент по изучению свойств  $^{252}\text{No}$  продемонстрировал высокий потенциал детектирующей системы при работе на пучке тяжелых ионов. Высокая эффективность установки и благоприятные фоновые условия, в которых находится фокальный детектор, позволяют изучать тяжелые

ядра, находящиеся в экзотической области нейтроно-дефицитных, короткоживущих изотопов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 08-02-00116-а и № 11-02-00490-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hulet E.K.* // Ядерная физика. 1994. Т. 57. № 7. С. 1165.
2. *Hoffman D.C.* // Proceedings of International Symposium on Superheavy Elements. Lubbock, Texas, 1978. Pergamon press Inc., P. 89.
3. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Dmitriev S.N. et al.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 034611.
4. *Yeremin A.V., Belozero A.V., Chelnokov M.L. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2003. V. 66. № 6. P. 1042.
5. *Andreev A.N., Bashevoy V.V., Bogdanov D.D. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 1995. V. 364. P. 342.
6. *Malyshev O.N., Chelnokov M.L., Chepigina V.I. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2000. V. 440. P. 86.
7. *Dakowski M., Lazarev Yu.A., Turchin V.F. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1973. V. 113. P. 195.
8. *Holden N.E., Zucker M.S.* // Proceedings of the International Conference Nuclear Data for Basic and Applied Science. Santa Fe, New Mexico, 13–17 May 1985. V. 2. P. 1631.
9. *Lazarev Yu.A., Nefediev O.K., Oganessian Yu.Ts. et al.* // Phys. Lett. B. 1974. V. 52. P. 321.
10. *Yeremin A.V., Belozero A.V., Chelnokov M.L. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2005. V. 539. P. 441.
11. *Bemis C.E., Ferguson R.L., Placil F. et al.* // Phys. Rev. C. 1977. V. 15. Issue 2. P. 705.