

P13-2009-79

Ю. С. Цыганов

О ДЕТЕКТИРОВАНИИ РЕДКИХ СОБЫТИЙ
ТИПА $ER-\alpha-SF$

Цыганов Ю. С.

P13-2009-79

О детектировании редких событий типа ER- α -SF

При детектировании редких событий распада сверхтяжелых ядер кремниевым PIPS-детектором, к сожалению, не всегда приходится иметь дело с многозвенными событиями. Именно многозвенность позволяет исследователям получать удовлетворительные оценки статистической значимости регистрируемых событий распада. В случае ограниченного количества звеньев такие оценки усложнены. В данной работе приведен метод статистического анализа событий типа ER- α -SF. Предложен критерий статистической значимости, отличный от классических подходов. Также приведены примеры из реальных экспериментов.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Tsyganov Yu. S.

P13-2009-79

On the Detecting of Rare ER- α -SF Decay Events

When detecting rare decay events of super heavy nuclei with silicon PIPS detector one unfortunately deals with not only multi-chain events. It is registering events involving multiple decay chains that allows researchers to obtain data of good statistical significance. In the case of limited number of decay chains these estimates are more complicated. In the present paper a method of statistical analysis of ER- α -SF events is presented. A criterion of evaluating statistical significance different from the classical one is considered. Examples from the practical experiments are presented too.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Начало нового тысячелетия отмечено, вне всяких сомнений, значительными успехами в области синтеза и изучения физических и химических свойств сверхтяжелых ядер (СТЯ)/элементов (СТЭ) [1–3]. Одной из необходимых составляющих этих успехов являются детектирующие системы, позволяющие надежно выделять редкие распады СТЯ на фоне потоков событий, связанных с мишенеподобными частицами, рассеянными ионами, нейтронно-индуцированными частицами и некоторыми другими. Причем иногда применяются специальные методы подавления фона, связанного с работой ускорителя тяжелых ионов [4, 5]. Но даже при столь мощных средствах подавления статистический анализ регистрируемых последовательностей сигналов-кандидатов на событие распада играет важную роль [6–9]. При этом следует учитывать не только реальные загрузки сигналов-имитаторов, но также реальные свойства детекторов физических установок, например, эффективность детектирования сигнала альфа-распада, причем с нормальной записью координатного сигнала.

Следующий ниже метод анализа наглядно показывает некоторый спектр проблем и решений применительно к коротким звеньям распада типа ER– α –SF (ядро отдачи – альфа-распад – спонтанное деление). Основным элементом детектирования в данном случае является кремниевый PIPS-детектор и то или иное времяпролетное устройство, позволяющее дискриминировать сигналы прилета ядер, имплантируемых в кремниевый детектор, по отношению к сигналам их распада.

1. О ДЕТЕКТИРОВАНИИ ПРОДУКТОВ РАСПАДА

Продукты реакции полного слияния, прошедшие электромагнитный (вакуумный или газонаполненный) сепаратор, попадают в детектирующий модуль, где вбиваются в сборку полупроводниковых детекторов, устанавливаемую в фокальной плоскости сепаратора. Фокальный детектор обычно состоит из некоторого количества координатно-чувствительных стрипов. Перед фокальным детектором помещают детектор времени пролета. Им измеряется скорость ядер отдачи, а также он позволяет отличить заряженные частицы,

прошедшие сквозь сепаратор, от сигналов распада в детекторе. Для тяжелых ядер и событий распада определяется положение на чувствительной поверхности детектора как номер стрипа и вертикальная позиция на нем. Такое координатное соответствие устанавливает генетическую связь между имплантированным ядром отдачи и его последующим распадом. Для регистрации α -частиц, вылетающих в заднюю полусферу, фокальный детектор окружат боковыми детекторами (без позиционной чувствительности) таким образом, что вся детекторная сборка выглядит как коробка с открытой передней стенкой. Это повышает эффективность регистрации α -частиц. За фокальным детектором толщиной около 300 мкм помещают «вето»-детектор для исключения сигналов от слабоионизирующих частиц (протонов, дейтронов, α -частиц), которые могут проходить от мишени через сепаратор и фокальный детектор и не регистрироваться времяпролетным детектором. Калибровка энергии α -частиц осуществляется периодически по α -пикам продуктов из тестовых реакций со сравнительно большим сечением образования нуклидов, испытывающих α -распад.

2. ПОЛНАЯ И НЕПОЛНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ МНОГОЗВЕННОГО СОБЫТИЯ

Рассмотрим корреляцию с одной (для простоты) α -частицей в событии типа ER- α -SF (сигнал имплантированного ядра отдачи – альфа-частица – спонтанное деление). Поскольку эффективности регистрации как ядра отдачи (ЯО = ER), так и спонтанного деления (хотя бы один сигнал в фокальном детекторе) близки к единице, представляется актуальным сосредоточиться именно на α -частице. Пусть детектирующая система зарегистрировала n событий, соответствующих данному типу распада. Пусть среди этих n событий x событий являются полными, т. е. содержат все три типа сигналов. Распределение вероятностей детектирования x полных звеньев для n зарегистрированных событий описывается биномиальным распределением [10]

$$P(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1-p)^{n-x}. \quad (1)$$

Параметром, описывающим свойства реального детектора по отношению к регистрации α -распада, является вероятность p зарегистрировать альфа-частицу при данной глубине имплантации и пороге регистрации координатного тракта*, а также с учетом вероятной вилки на спонтанное деление первого,

*Рассматриваются сигналы в фокальном и боковом детекторах, но только без потери координаты.

материнского нуклида. Обозначим эти переменные как $\varepsilon < 1$ и $\eta < 1$ соответственно. Тогда

$$p = (1 - \eta) \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Для нашего конкретного случая положим $\varepsilon \approx 0,65$.

При этом, если рассматривать только геометрическую эффективность регистрации, то она может достигать фактора $\sim 0,9$.

Пример 1. Рассмотрим случай, когда в опыте зарегистрированы четыре события распадов приведенного выше типа и $\eta \approx 0,5^*$ [2]. Пусть $p = 0,655 \times (1 - 0,5) = 0,3275$.

Тогда соотношение (1) будет иметь вид

$$P(x) = \frac{4!}{x!(4-x)!} \cdot (0,3275)^x \cdot (1 - 0,3275)^{4-x},$$

где x может принимать значения $\{0, 1, 2, 3, 4\}$.

Следовательно,

$$P(x) = \frac{24}{x!(4-x)!} \cdot (0,3275)^x \cdot (0,6725)^{4-x}. \quad (3)$$

Ниже в табл. 1 приведены искомые значения вероятности.

Таблица 1

x	Вероятность, % ($\varepsilon = 0,655$)	Вероятность, % ($\varepsilon = 0,9$)
0	20,5	4,1
1	39,8	29,9
2	29	36,8
3	9,4	20
4	1,2	4,1

Пример 2. Наоборот, попробуем грубо определить оптимальную оценку η по реально наблюдаемым цепочкам распада изотопа $^{283}_{112}$ [11] с учетом пропусков сигналов α -распада. Тогда, рассматривая ситуацию, соответствующую максимуму выхода изотопа, а именно цепочки распада, полученные при энергии возбуждения 35,0 МэВ (рис. 1), можно вычислить значение $P(3)$ при $n = 5$, что и приведено для различных входных значений η в табл. 2.

*Некоторое среднее для оценки.

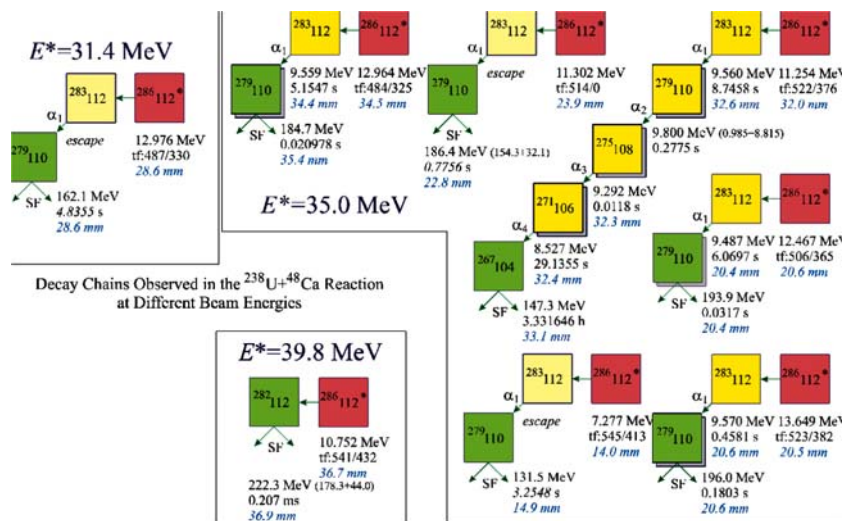


Рис. 1. Цепочка распада $^{283}_{112}$ из работы [11]

Таблица 2

$\eta, \%$	$P(5, 3), \%$
0	33,6
1	34,1
5	34,4
6,5	34,7
8	34,5
10	34,5
15	33,8
20	32,4
30	28
40	22
50	15,6
70	4,8
80	1,7
90	0,24
95	0,0032

Отсюда видно, что эффективное значение вилок на спонтанное деление может практически равновероятно находиться в интервале единиц-десятков процентов.

Так, если взять среднее со статистическим весом рассчитанного вероятностного фактора, то получим

$$\bar{\eta} \approx \frac{\sum_{i=1}^{N(15)} P(5, 3)_i \cdot \eta_i}{\sum_{i=1}^N P(5, 3)_i}. \quad (4)$$

Произведя вычисления, получим $\bar{\eta} \approx 27\%$.

Разумеется, в данном случае ограниченной статистики следует иметь в виду и доверительный интервал, соответствующий полученному среднему [6]. Выше для грубой оценки среднего значения приведен правый интервал соответствующей падению в два раза расчетной амплитуды плотности вероятности (см. рис. 2). Для малых долей наблюдается практически равномерное распределение вплоть до нуля.

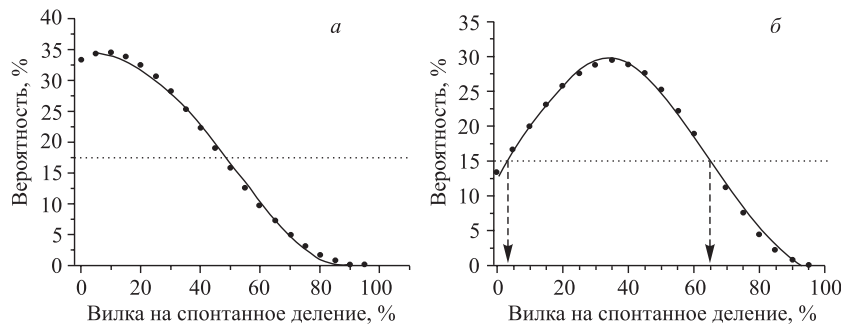


Рис. 2. Зависимость амплитуды плотности вероятности $P(5, 3)$ (а) и $P(7, 3)$ (б) от значения доли на спонтанное деление материнского ядра (показан уровень падения вероятностной функции $1/2$)

Аналогично поступаем (опять-таки игнорируя anomalously длинную цепочку (см. рис. 1)) для полного набора данных — 7 событий, причем из них только 3 «полные».

Соответствующая расчетная информация отражена на рис. 2, б. Соответственно, для этой, более полной статистики* $\bar{\eta} \approx 36_{-20}^{+25}\%$.

Пример 3. В работе [2] были зарегистрированы четыре распада, приписанные тому же изотопу $^{283}_{112}$. При этом два звена зарегистрированы полностью, а два имели сигналы ядер отдачи и спонтанного деления.

* $\approx 68\%$ -й доверительный интервал.

Соответственно, вышеприведенное соотношение для величины вероятности будет иметь вид

$$P(4, 2) = \binom{4}{2} p^2(1-p)^2 = 6p^2(1-p)^2. \quad (5)$$

Продельвая вычисления, аналогичные приведенным выше, и полагая, что эффективность регистрации альфа-частиц близка к геометрической, получим вероятностную кривую, представленную на рис. 3, т. е. $p \approx 0,9325 \cdot (1 - \eta)$ и соответственно $\bar{\eta} \approx 46_{-14}^{+22} \%$. Отметим удовлетворительное перекрытие обеих оценок.

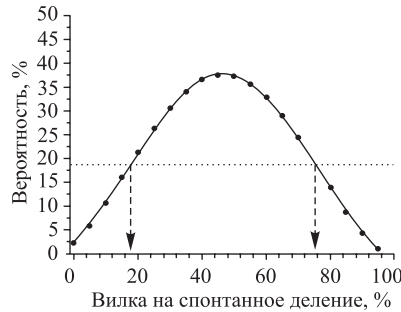


Рис. 3. Вероятностная зависимость для $P(4, 2)$

3. ПАРАМЕТР ЭФФЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ С УЧЕТОМ КОНКРЕТНОЙ КОМБИНАЦИИ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ РАСПАДА

Введем параметр $\tilde{P}_{\text{егг}} = \frac{P_{\text{егг}}}{a_{n,m}}$, где $P_{\text{егг}}$ характеризует вероятность того, что регистрируемая последовательность сигналов может быть объяснена нагрузками сигналов-имитаторов распада [6–8], а параметр $a_{n,m}$ характеризует отношение амплитуды плотности вероятности зарегистрированной комбинации к максимальной расчетной амплитуде. В этом случае, особенно если величина $P_{\text{егг}}$ не очень мала, данный параметр можно рассматривать как более характерный. В то же время, и это соответствует здравому смыслу, в области $P_{\text{егг}} \ll 1$ данная поправка в реальном случае ограниченности количества звеньев мало что добавляет. Аналогичные рассуждения можно провести и для величины эффективного количества случайных событий N_R . Так, например, для события из работы [12] факт принадлежности к фоновому сценарию события с временем корреляции ER-SF $t = 192$ с становится более прозрачным,

так как приведенный выше параметр принимает значение, уверенно большее единицы ($\tilde{N}_R \approx \frac{0,3}{0,205/0,398} = 0,58$; см. [9], а также табл. 2).

В качестве гипотезы-соглашения автор предлагает в аналогичных ситуациях не рассматривать последовательность регистрируемых сигналов как кандидата на распад тяжелых ядер для конкретных конфигураций зарегистрированных цепочек распада в случае, если $\tilde{N}_R \geq 0,5$. Или, вообще говоря, ограничиться уровнем рассмотрения $\tilde{N}_R < \varepsilon$, где $\varepsilon \ll 1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен подход, модифицирующий представление о статистической значимости ультраредких событий распада тяжелых ядер, имплантированных в кремниевый позиционно-чувствительный детектор, в случае, если вероятностная оценка в смысле [6–9] является недостаточно глубокой. В качестве соглашения предложено ограничиться рассмотрением кандидатов на истинную корреляцию уровнем параметра $\tilde{N}_R < 0,5$.

Дополнительно представлен метод оценки вилки на спонтанное деление при ограниченной статистике событий распада. Сделаны приблизительные оценки для изотопа $^{283}112$, синтезированного впервые на установке ГНС (ЛЯР ОИЯИ) и подтвержденного по свойствам на установке SHIP (GSI, Дармштадт).

Автор благодарен коллегам А. Н. Полякову, К. Суботичу* за помощь в работе, а также В. Б. Злоказову и Р. Дресслеру** за плодотворные дискуссии на предмет регистрации редких событий распада.

Дополнение 1. О регистрации спонтанного деления обоими (основной + боковой) детекторами

В принципе, рассмотренная выше ситуация полной/неполной цепочки легко переносится на случай регистрации спонтанного деления имплантированных ядер, когда интересна вероятность регистрации из n событий x осколков с «полной» регистрацией, а именно, когда присутствуют оба сигнала как в фокальном PIPS-детекторе, так и в боковом. При этом мы не интересуемся другими распадами, а анализируем только вышеуказанное соотношение (n, x) . Пусть ε — измеренная по тестовой реакции эффективность регистрации полных событий спонтанного деления для данного детектирующего устройства.

*Институт «Винча», Белград, Республика Сербия.

**Институт П. Шеррера, Виллиген, Швейцария.

Тогда с точки зрения вышеприведенного рассмотрения $p \equiv \varepsilon$, т. е.

$$P(n, x) = \binom{n}{x} \varepsilon^x (1 - \varepsilon)^{1-x}.$$

Ниже, на рис. 4, а, б показаны вероятностные распределения для комбинаций $(4, x)$ и $(7, x)$ при $\varepsilon \approx 0,4$.

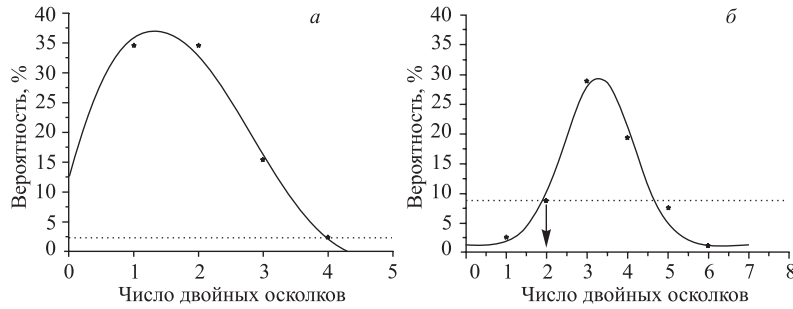


Рис. 4. а) Комбинация $P(4, x)$. Пунктирная линия — величина в эксперименте [12] ($P(4, 4)$ — 4 двойных осколка). б) Комбинация $P(7, x)$. Стрелка — эксперимент [11]

ЛИТЕРАТУРА

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 044602.
2. *Hoffmann S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 32. P. 251;
Hoffmann S. Private Communication.
3. *Eichler R. et al.* // Nature. 2007. V. 447/3. P. 72.
4. *Tsyganov Yu. S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 392. P. 197–201.
5. *Tsyganov Yu. S.* // J. Phys. G. 1999. V. 25, No. 4. P. 937–940.
6. *Schmidt K.-H. et al.* // Z. Phys. A. 1994. V. 316. P. 19–26.
7. *Zlokazov V. B.* // Eur. Phys. J. A. 2000. V. 8. P. 147.
8. *Tsyganov Yu. S.* // Part. Nucl., Lett. 2009. V. 6, No. 1. P. 97–103.
9. *Цыганов Ю. С.* Сообщ. ОИЯИ Р7-2008-189; Е7-2008-144. Дубна, 2008.
10. *Dvorak J.* Doctoral Thesis. Technical University of Muenchen, 2007. P. 59.
11. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 064609.
12. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Eur. Phys. J. A. 1999. V. 5. P. 63–68.

Получено 28 мая 2009 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 14.08.2009.

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

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,85. Тираж 305 экз. Заказ № 56685.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/