

P13-2007-154

Д. Тестов, Ш. Бриансон¹, С. Дмитриев, А. Еремин,
Ф. Ибрагим², Ю. Пенионжкевич, Ю. Пятков³, Е. Сокол

ПРИМЕНЕНИЕ ^3He НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА

Направлено в журнал «Ядерная физика»

¹Центр ядерной спектроскопии и спектрометрии масс, Орсе,
Франция

²Институт ядерной физики Орсе, Франция

³Московский инженерно-физический институт

Тестов Д. и др.

P13-2007-154

Применение ^3He нейтронного детектора

Описываются нейтронные детекторы, в которых используются пропорциональные счетчики, заполненные ^3He . Рассматривается применение таких детекторов для измерения вероятностей эмиссии нейтронов, особенно множественной, после β -распада нейтроноизбыточных ядер и для исследований редких событий спонтанного деления сверхтяжелых ядер.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Перевод авторов

Testov D. et al.

P13-2007-154

Applications of ^3He Neutron Detector

Neutron detectors utilizing ^3He -filled proportional counters are described. Applications of these detectors in measuring the probabilities of neutron emission, especially multiple emission, after the β -decay of neutron-rich nuclei as well as in investigations of rare events of spontaneous fission of super heavy nuclei are considered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования эмиссии запаздывающих нейтронов из нейтроноизбыточных ядер и мгновенных нейтронов спонтанного деления требуют применения нейтронных детекторов с высокой эффективностью, постоянной в широком энергетическом диапазоне. Кроме того, эти детекторы должны быть свободны от cross-talk эффекта и иметь стабильные параметры, сохраняемые в течение длительных измерений; геометрия детектора должна легко изменяться в зависимости от требований конкретного эксперимента.

1. ОПИСАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ГЕЛИЕВЫМИ СЧЕТЧИКАМИ

Нейтроны в гелиевых счетчиках регистрируются с помощью реакции ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p + 780 \text{ кэВ}$, сечение которой для тепловых нейтронов составляет $\sigma_{\text{th}} = 5320 \text{ б}$. Так как регистрируются тепловые нейтроны, энергетический порог реакции практически отсутствует. Каждый нейтрон может зарегистрироваться только один раз, что исключает эффект cross-talk в принципе. Также рассматриваемые счетчики малочувствительны к гамма-квантам.

В наших экспериментах использовалось два типа нейтронных счетчиков. Счетчики первого типа были заполнены ${}^3\text{He}$ до давления 7 бар. Они представляли собой трубки из нержавеющей стали длиной 50 см и диаметром 3,2 или 3,0 см. Счетчики второго типа имели давление 4 бар, и их геометрические размеры составляли: длина 30 см и диаметр 3,2 см. Все счетчики работали в пропорциональном режиме.

В качестве замедлителя использовался полиэтилен. Толщина слоя замедлителя между счетчиками составляла $\sim 2 \text{ см}$. Использовался замедлитель либо из отдельных шестигранных призм (расстояние между параллельными плоскостями — 5 см), либо в виде цельного блока с каналами для счетчиков и источника.

Детекторы обычно содержали несколько десятков счетчиков, размещенных в несколько слоев в замедлителе вокруг нейтронного источника (см. рис. 1). Эффективности сборок менялись от 10 до 60 % в зависимости

от геометрии и числа использовавшихся счетчиков. Для многих экспериментов очень важно иметь чувствительность детектора, постоянную в широком диапазоне энергий нейтронов. Экспериментальное изучение функции отклика двух сборок, состоявших из 39 пропорциональных счетчиков каждая, велось для моноэнергетических нейтронов в диапазоне энергий 0,39–1,54 МэВ [1]. Были получены экспериментальные данные о чувствительности счета нейтронов к изменениям энергии нейтронов и толщины замедлителя. Из этих измерений был сделан вывод, что для обеспечения постоянства эффективности детектора в диапазоне энергий нейтронов до 1,5 МэВ детектор должен иметь, по крайней мере, 4–5 слоев модулей, состоящих из счетчика и замедлителя (при этом толщина слоя замедлителя, окружающего счетчик, должна быть примерно 1 см). Системы с ^3He -счетчиками в замедлителе могут быть использованы для получения средней энергии нейтронов из источника [2], для этого необходимо использовать функции отклика детекторов, полученные для моноэнергетических источников.

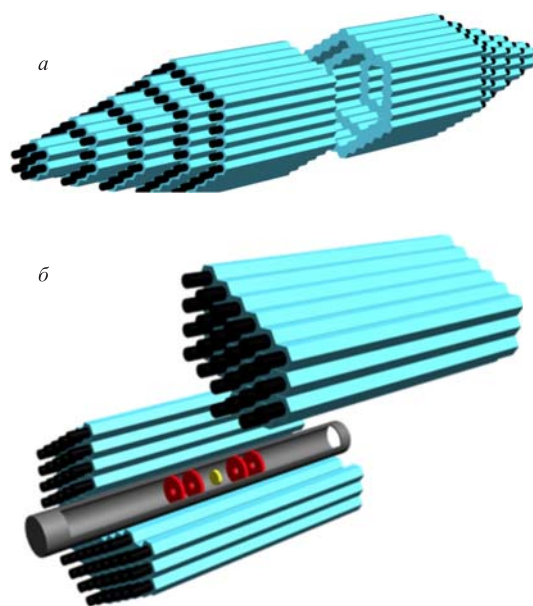


Рис. 1. Схематический вид нейтронных детекторов с пропорциональными счетчиками, наполненными ^3He , в блоках замедлителя в конфигурациях *а* и *б*

Детектор работает следующим образом: нейтроны, испущенные из источника, замедляются до тепловых энергий и затем диффундируют в детекторе до поглощения счетчиками или замедлителем либо вылетают из детектора.

Время жизни нейтронов в детекторе $\tau = 15\text{--}25$ мкс для различных геометрических конфигураций. Время жизни складывается из времен замедления и диффузии, при этом время замедления зависит как от энергии нейтронов, так и от конфигурации детектора, а время диффузии определяется только геометрией детектора. Но так как вклад времени замедления мал, время жизни нейтронов в детекторе практически не зависит от энергии нейтронов.

Нейтронные детекторы с гелиевыми счетчиками в замедлителе позволяют измерять угловые корреляции между нейтронами, несмотря на то, что регистрируются в основном тепловые нейтроны. Угловое разрешение сборки, подобной приведенной на рис.1, *a* было измерено экспериментально для мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{248}Cm [3] и составило 20° .

2. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ГЕЛИЕВЫМИ СЧЕТЧИКАМИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭМИССИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ

Вероятности испускания запаздывающих нейтронов (P_n) наряду со временами жизни ядер ($T_{1/2}$) являются важными измеряемыми характеристиками β -распада нейтроноизбыточных ядер. Измерения этих величин важны как для изучения свойств ядерной структуры и астрофизических процессов, так и для прикладных исследований.

В области легких ядер нами были проведены два эксперимента, в которых использовались различные сборки нейтронных счетчиков. В эксперименте [4] впервые были измерены вероятности нейтронной эмиссии для ядер $^{26,27}\text{F}$ и ^{29}Ne . Нейтроноизбыточные ядра производились путем квазифрагментации пучка редкого изотопа $^{36}\text{S}^{16+}$ ($0,5$ е мА; $2,8$ ГэВ) на танталовой мишени. Избранные ядра имплантировались в стопку кремниевых детекторов, расположенных в фокальной плоскости LISE3. Эти детекторы с трех сторон были окружены 42 цилиндрическими ^3He пропорциональными счетчиками, которые использовались для измерения вероятности задержанной нейтронной эмиссии. Общая эффективность данной группы нейтронных счетчиков была измерена для известных источников задержанных нейтронов $^{30,31}\text{Na}$ и составила 14 %.

В результате второго эксперимента [5], проведенного на RIPS, были измерены $T_{1/2}$ и P_n для нейтроноизбыточных изотопов Mg, Al, Si и P. Нейтроноизбыточные ядра производились в реакции фрагментации пучка ^{48}Ca (70 А · МэВ) с ^9Be - и ^{181}Ta -мишенями. При измерении задержанных нейтронов ^{15}B была получена эффективность $(11,4 \pm 2,3)\%$ нейтронного детектора, состоящего из 42 ^3He пропорциональных счетчиков, размещенных в цельном блоке замедлителя. Из измерений задержанных нейтронов ^{14}B , которые имеют энергию, меньшую (290 кэВ) по сравнению с ^{15}B ($1,76; 2,81$;

3,23; 4,32 и 4,75 МэВ), эффективность составила $(21,5 \pm 4,2)\%$. Нами была использована эффективность, измеренная с использованием $^{15}\text{В}$. Однако следует заметить, что это может привести к систематическим ошибкам в значениях P_n . Для того чтобы избежать таких ошибок, необходимо, чтобы детектор содержал как минимум четыре слоя счетчиков и замедлителя.

Исследования 2,3-нейтронной эмиссии запаздывающих нейтронов, а также корреляций между испущенными нейтронами могут дать информацию о существовании так называемых мультинейтронных кластеров. В настоящее время имеется множество экспериментальных данных о нейтронной эмиссии (иногда до 4-нейтронной) в области легких ядер [6], и только двойная нейтронная эмиссия для $^{98,100}\text{Rb}$ измерена экспериментально в области средних и тяжелых ядер. В эксперименте [8], который проводился на микротроне МТ-25 (ЛЯР ОИЯИ), измерялась задержанная множественная эмиссия нейтронов из осколков фотоделения. Осколки из тонкой мишени ^{238}U транспортировались с помощью газовой аэрозольной струи по капиллярам внутрь детектора. В эксперименте использовался нейтронный детектор, состоящий из 60 нейтронных счетчиков. Сепарации и идентификации не производилось. Время транспорта и время измерения составляло соответственно 1 и 2 с. Несмотря на присутствие двух источников фона — случайных совпадений одиночных задержанных нейтронов из осколков деления и множественных нейтронов, вызванных воздействием космического излучения, — была измерена вероятность эмиссии двойных нейтронов. После исключения названных фоновых событий было получено отношение $P_{2n}/P_{1n} = 4 \cdot 10^{-4}$, где P_{2n} и P_{1n} — вероятности испускания двойных и одиночных запаздывающих нейтронов соответственно. Идентификация источников множественной эмиссии нейтронов может быть проведена на установках, где осуществляется сепарация осколков фотоделения: Dubna Radioactive Ion Beams (DRIBs) [9] и Accélérateur Linéaire a uprés du Tandem d'Orsay (ALTO) [10].

3. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ГЕЛИЕВЫМИ СЧЕТЧИКАМИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ

Из оболочечной модели ядра вытекает предсказание существования «острова стабильности» в области сверхтяжелых элементов. В данной области на стабильность элементов оказывает существенное влияние спонтанное деление, поэтому изучение свойств этого распада является необходимым. Нейтронные детекторы использовались при изучении мгновенных нейтронов спонтанного деления изотопа ^{268}Db , поиска сверхтяжелого элемента Hs в природных образцах, а также для исследования редких мод тройного деления ^{252}Cf . Для подобных экспериментов важными являются высокая эффективность детектора, отсутствие cross-talk'a, низкий фон.

Измерения среднего числа мгновенных нейтронов на одно деление были проведены в on-line экспериментах детектором, располагавшимся в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА для ^{252}No , образовывавшегося в результате реакции $^{48}\text{Ca} (^{206}\text{Pb}, 2n)$ [11] (для тестирования) и далее, в off-line эксперименте для ^{268}Db [12].

^{268}Db получался как продукт распада сверхтяжелого элемента 115. Для синтеза 115-го элемента была выбрана реакция слияния с последующим испарением нейтронов $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$. Мишень бомбардировалась ионами ^{48}Ca с энергией 247 МэВ в центре мишени, в результате энергия возбуждения составного ядра $^{291}115$ была $E^* = 35,0\text{--}43,8$ МэВ. Интеграл пучка ^{48}Ca за весь эксперимент составил $3,4 \cdot 10^{18}$ частиц. В $3n$ -испарительном канале наблюдался изотоп 115-го элемента: $^{288}115$. После пяти последовательных α -распадов образовывался ^{268}Db , который испытывал спонтанное деление. Материал мишени был напылен на подложку из Ti-фольги толщиной 1,5 мм, таким образом толщина мишени ^{243}Am составила 1,2 мг/см². Как только ядра отдачи покидали мишень, они тут же вбивались в медный блок. Эффективность сбора продуктов реакции составляла практически 100%. Далее производился ряд химических процедур для выделения изотопов Db. Для регистрации α -частиц и осколков деления использовались детектирующие модули с четырьмя идентичными камерами, содержащими по два полупроводниковых детектора каждая. Эти камеры размещались внутри нейтронного детектора. Нейтронный детектор состоял из 72 ^3He -счетчиков, расположенных в полиэтиленовом замедлителе в виде трех концентрических колец на разном расстоянии от камер с измеряемыми образцами. Детектор был прокалиброван с использованием источников ^{248}Cm и ^{252}Cf . Эффективность регистрации осколков деления составляла 90%, эффективность регистрации нейтронов — 40%. Средняя скорость счета одиночных фоновых нейтронов была 30 с⁻¹. Проведено 8 облучений ^{243}Am -мишени пучком ^{48}Ca и зарегистрировано 15 событий спонтанного деления. Общее время измерений составило 957 ч, все события были зарегистрированы в течение первых 174 ч измерений. Далее, в течение 783 ч, ни одного события зафиксировано не было. ^{268}Db — самый тяжелый элемент, для которого экспериментально была измерена множественная эмиссия нейтронов спонтанного деления $\bar{\nu}_n = 4,2$ (рис. 2).

Регистрация нейтронных вспышек использовалась в экспериментах по изучению редких мод тройного деления ^{252}Cf [15]. «Нейтронный пояс», состоящий из 140 отдельных шестиугольных модулей, основанных на пропорциональных ^3He -счетчиках, размещался в плоскости, перпендикулярной оси симметрии спектрометра ФОБОС, совпадающей с осью деления. Центр пояса совпадал с положением источников спонтанного деления. Наблюдена группа событий с пониженными кинетической энергией и полным зарядом и с большим числом зарегистрированных нейтронов. Этот факт может быть

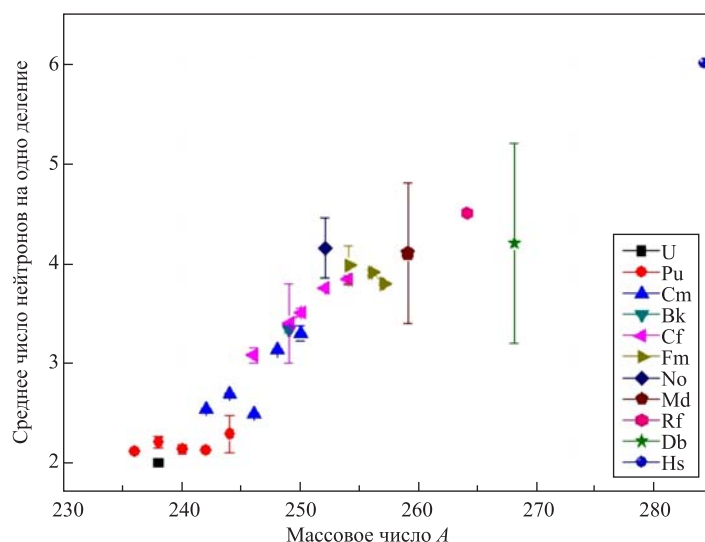


Рис. 2. Среднее число мгновенных нейтронов на спонтанное деление как функция масс ядер. Значения для Rf и Hs – расчетные

рассмотрен как экспериментальное проявление редких мод тройного деления (деления на три примерно равных по массе осколка) ^{252}Cf .

4. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ГЕЛИЕВЫМИ СЧЕТЧИКАМИ ДЛЯ НИЗКОФОНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Детектирование нейтронных вспышек является очень чувствительным способом регистрации спонтанного деления. Исходя из экспериментальных данных по синтезу сверхтяжелых элементов и структурных вычислений ядерных масс, представленных в рамках теоретических моделей, вопрос о поиске сверхтяжелых элементов в природе был проанализирован заново [13]. Возможно, нейтроноизбыточные изотопы 108-го элемента (Hs) являются долгоживущими, и они могут присутствовать в природных образцах. Элемент Hs является химическим гомологом Os. Технология производства осмия основана на летучести его тетраоксида OsO_4 , который имеет температуру конденсации $-82\text{ }^\circ\text{C}$. Тетраоксид Hs имеет меньшую летучесть, и поэтому Hs также должен накапливаться в осмиевом концентрате. Hs должен испытывать радиоактивный распад: либо α -распад, либо спонтанное деление. Если Hs будет испускать α -частицы, то его дочерние или внучатые продукты распада

будут испытывать спонтанное деление и, в любом случае, будет наблюдаться вспышка нейтронов. Иными словами, в сценарии распада ядер с $Z = 108$ всегда будет присутствовать спонтанное деление: либо начального ядра, либо дочерних продуктов его распада. Тогда на первом этапе малые количества долгоживущего нуклида можно обнаружить по спонтанному делению. В качестве первого шага в образце металлического Os проводится поиск его химического гомолога ЕкаOs путем измерения множественной эмиссии нейтронов, сопровождающей спонтанное деление сверхтяжелого ядра или дочерних продуктов его распада.

Единственным природным излучателем спонтанного деления является ^{238}U . Его концентрация в данном образце Os составляет по паспортным данным $\leq 10^{-12}$ г/г. Содержание ^{238}U в конструкционных материалах определялось отдельно для каждой партии металла, используемого для изготовления счетчиков и деталей детектора. Отдельно определялось содержание ^{238}U в полиэтилене, используемом в качестве замедлителя. Принимая во внимание, что примесь урана распределена по всему объему детектора, можно оценить фон от спонтанного деления ^{238}U (см. таблицу). Ожидаемое среднее число нейтронов, приходящихся на одно деление, $(\bar{\nu}_n) \sim 4,5$ и $6,0$ для Rf и Hs соответственно, намного больше, чем число нейтронов, испускаемых за одно деление из примесей урана ($\bar{\nu}_n = 2$).

Фон нейтронов от спонтанного деления ^{238}U

Материал	Содержание ^{238}U , г/г	Число спонтанных делений в год	Число зарегистрированных событий в год: с разными кратностями нейтронов n_i		
			n_2	n_3	n_4
Образец Os	$\leq 10^{-12}$	0,08	0	0	0
^3He -счетчики, части конструкции	$\leq 10^{-8}$	40	≤ 4	0	0
Замедлитель	$\leq 10^{-9}$	12	≤ 1	0	0

Фон, создаваемый взаимодействием космического излучения с детектором и осмиевым образцом, был значительно снижен помещением установки в глубокую (около 4000 м водного эквивалента) подземную лабораторию LSM, Модан [14]. Для образца осмия массой 500 г детектирование одного события спонтанного деления в год будет соответствовать концентрации сверхтяжелого нуклида в данном образце осмия на уровне $\sim 10^{-14}$ г/г в предположении, что его период полураспада составляет $T_{1/2} \sim 10^9$ лет. Ненаблюдение

спонтанного деления даст верхнюю границу концентрации сверхтяжелого нуклида в земной коре на уровне $\sim 10^{-22}$ г/г в предположении, что его период полураспада составляет $T_{1/2} \sim 10^9$ лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейтронные детекторы, состоящие из счетчиков, заполненных гелием и помещенных в замедлитель, по своим параметрам хорошо подходят для экспериментов по изучению как запаздывающих нейтронов из нейтроноизбыточных ядер, так и мгновенных нейтронов спонтанного деления и низкофоновых измерений. Высокая эффективность, постоянная в широком диапазоне энергий нейтронов, практически нулевой энергетический порог, отсутствие cross-talk'a, легко изменяемая геометрия, простота обращения делают возможным применение подобных детекторов в самых различных физических экспериментах. Детекторы сохраняют свои параметры в течение длительного промежутка времени и характеризуются низким внутренним фоном. В зависимости от физической задачи особые требования возникают к разным параметрам детектора нейтронов. Требованиям широкого круга задач мог бы удовлетворять детектор, состоящий примерно из 300 счетчиков (длина 25 см, диаметр 3 см при давлении гелия 7 бар), помещенных в модули замедлителя (шестигранные полиэтиленовые призмы, расстояние между параллельными гранями 5 см).

ЛИТЕРАТУРА

1. Černý J. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 540. P. 430.
2. Reeder P. L. et al. // Phys. Rev. C. 1977. V. 15. P. 2098.
3. Sokol E. A. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 400. P. 96.
4. Reed A. T. et al. // Phys. Rev. C. 1997. V. 60. P. 024311.
5. Yoneda K. et al. // RIKEN Accl. Prog. Rep. 1999. V. 32. P. 78.
6. Audi G. et al. // Nucl. Phys. A. 2003. V. 729. P. 1.
7. Jonson B. et al. // Proc. 4th Int. Conf. «Nuclei far from Stability», 1981, CERN 81-09, P. 265.
8. Гангрский Ю. П. и др. // Бюллетень РАН. Физика. 2005. Т. 69. С. 629.
9. Oganessian Yu. Ts. et al. // Fourth Int. Conf. on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, Casta-Papiernicka, Slovak Republic, 19–23 October 1998.

10. *Essabaa S. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2003. V. 204. P. 780.*
11. *Yeremin A. V. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 539. P. 441.*
12. *Oganessian Yu. Ts. et al. // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 034611.*
13. *Dmitriev S. N., Oganessian Yu. Ts., Itkis M. G. // J. of Nucl. & Radiochem. Sci. 2002. V. 3. P. 125.*
14. *Chazal V. et al. // Astroparticle Phys. 1998. V. 9. P. 163.*
15. *Pyatkov Yu. V. et al. // Phys. of Atom. Nucl. 2003. V. 66. P. 1631.*

Получено 18 октября 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 13.11.2007.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,90. Тираж 315 экз. Заказ № 55957.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/