
МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ПРОЕКТ НИЗКОФОНОВОГО ДЕТЕКТОРА BiPo

Р. В. Васильев

(от имени коллаборации SuperNEMO)

Представлен проект низкофонového детектора, предназначенного для исследования слабых радиоактивных загрязнений ^{208}Tl и ^{214}Bi в тонких образцах большой площади. Образцами являются фольги-источники, изготовленные из обогащенных изотопов ^{82}Se или ^{150}Nd , предназначенных для поиска безнейтринного двойного β -распада в эксперименте SuperNEMO. Принцип работы детектора основан на регистрации задержанных β - α -совпадений от цепочки радиоактивных распадов ядер уранового и ториевого рядов. Планируемая чувствительность детектора находится на уровне $^{208}\text{Tl} < 2$ мкБк/кг и $^{214}\text{Bi} < 10$ мкБк/кг. Рассматриваются альтернативные варианты детектора. Представлены первые результаты, полученные с помощью прототипа детектора, установленного в подземной лаборатории Фрежюс, Франция.

The low-background detector assigned to search the weak radioactive pollution by the ^{208}Tl and ^{214}Bi in thin samples with the big area is described. Samples are the 12 m^2 foil-sources, made of enriched isotopes, ^{82}Se or ^{150}Nd . Such samples are planned to use in the investigation of the neutrinoless double beta-decay in the SuperNEMO experiment. The principle of the detector operation is based on the registration of the delayed beta-alpha coincidence from the uranium and thorium radioactive chains. Sensitivity of the detector is planned to be at the level of: $^{208}\text{Tl} < 2\ \mu\text{Bq/kg}$ and $^{214}\text{Bi} < 10\ \mu\text{Bq/kg}$. Alternative variants of the detector are described. The first results obtained by means of the prototype detector, operated in the underground laboratory Frejus, France, are presented.

PACS: 29.40.Gx; 29.40.Me

ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты, а также проекты экспериментов нового поколения, направленные на поиск безнейтринного двойного β -распада ($0\nu 2\beta$), столкнулись с серьезной проблемой контроля радиоактивной чистоты конструкционных материалов. Уровень требуемой чувствительности данных экспериментов настолько высок, что традиционные низкофоновые полупроводниковые детекторы становятся недостаточно чувствительными для определения радиоактивных загрязнений конструкционных материалов от уранового и ториевого рядов естественной радиоактивности. Например, в работе [1] чувствительность, достигнутая с низкофоновым полупроводниковым детектором, при определении загрязнения образцов ураном и торием составляет 12,3 мкБк/кг для ^{238}U и 4,06 мкБк/кг для ^{232}Th . Эта проблема проявляется особенно остро, если речь идет об источниках, изготавливаемых в виде тонких фольг большой площади — проект эксперимента SuperNEMO [2]. Проект SuperNEMO является проектом эксперимента нового поколения по поиску $0\nu 2\beta$ -распада, основан на треко-калориметрической методике, успешно используемой в настоящее время в эксперименте NEMO-3 [3] (подземная лаборатория Фрежюс, Франция). Наиболее предпочтительные изотопы для эксперимента SuperNEMO — ^{82}Se

и ^{150}Nd . Планируемая чувствительность на период полураспада $T_{1/2} \geq 10^{26}$ лет, что соответствует ограничению на эффективную массу нейтрино $\langle m_\nu \rangle \sim 50$ мэВ. Это требует разработки и создания новых сверхчувствительных приборов для измерения сверхнизких уровней \sim мкБк примесей ^{208}Tl и ^{214}Bi , являющихся основными источниками фона, в конструкционных материалах и особенно фольгах-источниках.

ИДЕЯ ДЕТЕКТОРА BiPo

Коллаборация SuperNEMO задалась целью изготовить универсальный, высокочувствительный детектор для определения степени загрязнения тонких (30–50 мкм) фольг-источников радиоактивными изотопами ториевого и уранового рядов. Основной целью создаваемого детектора является определение содержания в исследуемых образцах ^{208}Tl и ^{214}Bi , являющихся основными источниками фона при поиске $0\nu 2\beta$ -распада в эксперименте SuperNEMO. Требования, предъявляемые к создаваемому детектору, следующие: площадь исследуемого источника — 12 м², вес — 5 кг, время измерения — не больше одного месяца с чувствительностью по $^{208}\text{Tl} < 2$ мкБк/кг и $^{214}\text{Bi} < 10$ мкБк/кг.

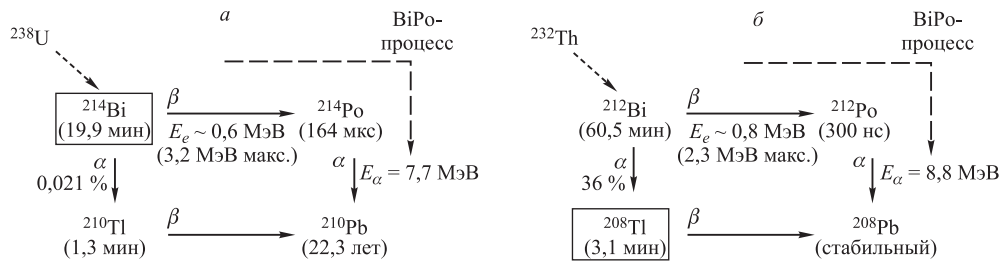


Рис. 1. Схема радиоактивных распадов процесса BiPo

Идея, позволяющая достичь такого уровня чувствительности, заключается в наблюдении так называемого процесса BiPo — последовательности распадов радиоактивных изотопов висмута и полония, которые сопровождаются испусканием заряженных частиц. Этот процесс является частью цепи радиоактивных распадов урана и тория естественной радиоактивности (рис. 1). Энергии электронов и α -частиц, рождающихся в этих распадах, достаточны для того, чтобы хорошо регистрировать их в детекторах на основе пластмассовых сцинтилляторов, а средние времена жизни промежуточных изотопов не превышают нескольких сотен микросекунд, что позволяет организовать последовательную регистрацию распадов. Разрабатываемый коллаборацией детектор (далее — детектор BiPo) будет регистрировать совпадения во времени и пространстве сигналов от электронов β -распада изотопов висмута (Bi) и сигналов от α -частиц α -распада изотопов полония (Po).

ДЕТЕКТОР BiPo-1

Один из предлагаемых вариантов детектора BiPo-1 изображен на рис. 2. Детектор представляет собой набор пластмассовых сцинтилляционных детекторов, пластин с площадью 20×20 см, расположенных по обеим сторонам исследуемой фольги-источника.

Расположенные друг против друга сцинтиляционные детекторы объединяются в пары, в которых ожидаются задержанные совпадения, вызываемые последовательностью распадов, и измеряется энергия регистрируемых частиц. Координата события на исследуемой фольге-источнике определяется геометрическим местоположением пары детекторов.

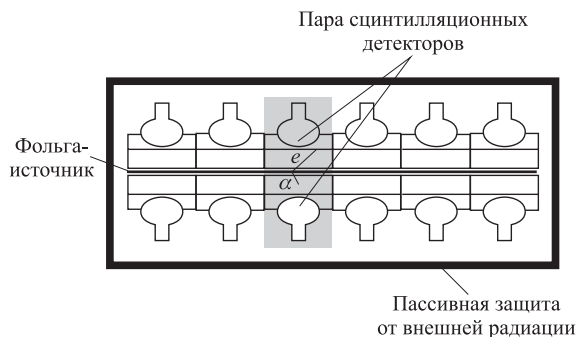


Рис. 2. Схема детектора ViPo-1

Искомая последовательность событий β - и α -распадов (^{212}Bi - ^{212}Po) для поиска ^{208}Tl в детекторе ViPo-1 будет выглядеть как срабатывание одного, а затем задержанное по времени на величину до 1 мкс (примерно три периода полураспада ^{212}Po) срабатывание второго сцинтиляционного детектора пары. Временное окно между последовательными срабатываниями сцинтилляторов для поиска событий от ^{214}Bi составляет 500 мкс (примерно три периода полураспада ^{214}Po).

Предлагаемый метод регистрации последовательных радиоактивных распадов позволит в значительной мере исключить влияние фоновых отсчетов, присущих одноканальным системам. Геометрическая эффективность регистрации таких событий составляет 50 %, поскольку электрон и α -частица после цепи распадов должны разлетаться в противоположных направлениях.

ДЕТЕКТОР ViPo-2

Параллельно с проектом ViPo-1 разрабатывается проект детектора ViPo-2 (рис. 3), в котором предлагается использовать более сложные сцинтиляционные детекторы. В проекте ViPo-2 пластмассовые сцинтилляторы обладают большей площадью (75×75 см) и к ним присоединяется несколько ФЭУ. Исследуемая фольга-источник, как и в варианте ViPo-1, помещается между двумя пластинами сцинтилляторов. Поверхности пластин, соприкасающиеся с источником, ничем не покрыты и тщательно отполированы. Полировка пластин позволит свету внутри сцинтиллятора распространяться, как в световоде, под углом полного внутреннего отражения, от места поглощения частицы до фотокатода ФЭУ. Частица определенной энергии, поглощаясь в разных местах такой пластины, будет вызывать неодинаковый отклик в сцинтиляционном детекторе. Это происходит вследствие того, что существует некоторое поглощение света в сцинтиляторе по пути до фотокатода ФЭУ. Таким образом, по соотношениям амплитуд с фотодетекторов можно будет определить координату α -частицы или электрона, выходящих из фольги-источника.

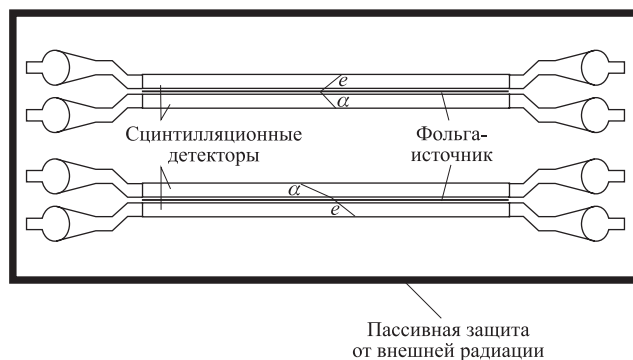


Рис. 3. Схема детектора ViPo-2

Преимущество ViPo-2 по сравнению с ViPo-1 заключается в уменьшении общего количества фотодетекторов, необходимых для создания всей установки. Однако процедура обработки полученных данных в детекторе ViPo-2 несоизмеримо сложнее. Одним из основных критериев, по которому следует выбирать вариант для дальнейшего развития установки, является точность восстановления координаты события. В настоящее время создается макетный образец детектора ViPo-2.

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ИСТОЧНИКЕ И КВЕНЧИНГ-ФАКТОР

Помимо влияния геометрического фактора эффективность регистрации в первую очередь уменьшается из-за потерь энергии, имеющих место при прохождении частиц в веществе исследуемого источника. Для электронов потери энергии будут незначительны, однако α -частицы будут терять в источнике ощутимую часть своей энергии. Предварительные расчеты [4] показывают, что только 25 % от общего количества α -частиц, образовавшихся в источнике, выйдут из него с энергией 1 МэВ и выше.

Следующим фактором, снижающим эффективность регистрации, является эффект уменьшения конверсионной эффективности сцинтиллятора при увеличении ионизирующей способности частиц. Альфа-частица, обладая большей плотностью ионизации при одинаковых с электроном потерях энергии, дает менее интенсивную вспышку света, чем электрон. Это снижение интенсивности количественно отражается так называемым квенчинг-фактором (quenching factor). Для пластмассовых сцинтилляторов и α -частиц в диапазоне от 1 до 10 МэВ квенчинг-фактор составляет величину от 20 до 10 соответственно [4].

Таким образом, α -частица, выходящая из источника с энергией 1 МэВ, будет давать такую же вспышку света, как электрон с энергией 50 кэВ. Это означает, что при пороге регистрирующей аппаратуры 50 кэВ (установленном с использованием источника электронов) эффективность регистрации событий ViPo будет составлять около 12 %. А это, в свою очередь, означает, что при радиоактивном загрязнении исследуемой фольга-источника изотопом ^{208}Tl , равном 2 мкБк/кг (70 распадов в месяц), установка будет регистрировать девять распадов в месяц. Соответственно фон должен составлять не более двух-трех событий ViPo в месяц.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ФОНА

Наиболее значимым источником фона будет $BiPo$ -процесс, идущий в самих сцинтилляционных детекторах (рис. 4). События от последовательности распадов радиоактивных изотопов Bi и Po , обусловленных ураном и торием естественной радиоактивности, находящейся в детекторе, можно разделить на три составляющих:

1. Последовательность распадов, проходящих в исследуемом источнике, — искомый процесс.

2. Последовательность распадов, происходящих в глубине сцинтилляторов. Поскольку электрон, идущий из глубины сцинтиллятора, будет регистрироваться этим же детектором, это позволит исключить подобные события из рассмотрения, а следовательно, объемное загрязнение сцинтиллятора можно впоследствии исключить из рассмотрения. Однако распады, происходящие в приповерхностном слое, могут имитировать искомый процесс, если энергия, оставляемая электроном в сцинтилляторе, ниже порога регистрации. Этот факт накладывает определенные ограничения на величину объемной активности сцинтиллятора.

3. Последовательность распадов, происходящих на поверхности сцинтилляторов. Поверхностные загрязнения сцинтиллятора могут значительно осложнить исследования в связи с тем, что такое загрязнение сцинтиллятора будет полностью имитировать загрязнение исследуемого образца и регистрироваться вместе с полезными событиями. Следовательно, поверхностное загрязнение детекторов должно быть сведено к минимально возможному.

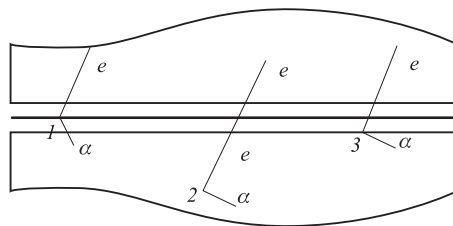


Рис. 4. Источники фона от радиоактивного загрязнения детектора. 1 — распад происходит в исследуемом источнике, искомый сигнал детектора; 2 — распад происходит в одном из сцинтилляторов, устранимый источник фона; 3 — распад происходит на поверхности сцинтиллятора, неустраняемый источник фона

Следующим по значимости источником фона для детектора $BiPo$ будут случайные срабатывания сцинтилляционных детекторов. Наиболее сильное влияние этот источник фона будет оказывать на поиск радиоактивного загрязнения ^{214}Bi , поскольку период полураспада ^{214}Po значительно больше периода полураспада ^{212}Po . Процесс, вследствие которого происходят случайные совпадения, обусловлен в основном комптоновским рассеянием γ -квантов естественной радиоактивности внутри детектора, поэтому для снижения этого источника фона сцинтилляционные детекторы должны быть как можно меньшего объема.

Фон от космических мюонов, проходящих через установку, исключается посредством отбора моментальных (в воротах 5–10 нс) совпадений срабатываний сцинтилляционных

детекторов. При этом придется пожертвовать какой-то частью полезных событий, однако эта величина составит всего 6–7 % от общего числа событий. Количество мюонов на уровне моря, а именно адронная и электромагнитная составляющие космического излучения, обусловленные этими мюонами, будут повышать общую загрузку в детекторах, что может привести к повышенному счету случайных совпадений. Для того чтобы понизить скорость счета случайных совпадений, обусловленную космическим излучением, установка размещается в подземной лаборатории, в которой количество мюонов космического излучения на несколько порядков меньше, чем в какой-либо лаборатории, расположенной на уровне моря.

Исследование радиоактивного фона, обусловленного нейтронами, в данной работе не проводилось.

ПРОТОТИП ViPo-1 И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для отработки методики измерений, а также проверки радиационной чистоты конструкционных материалов и определения фона от случайных срабатываний создается прототип детектора ViPo-1. Этот прототип состоит из сцинтилляционных детекторов с площадью сцинтиллятора 20×20 см и толщиной 1 см и 0,3 см. Фотоумножитель

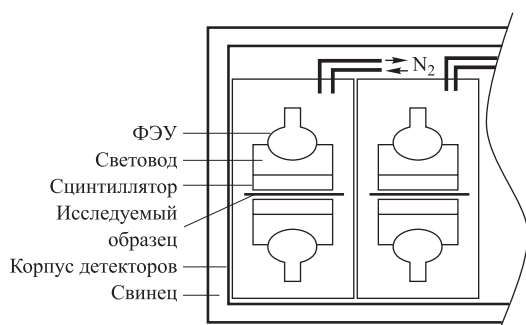


Рис. 5. Схема детектора ViPo-1 — прототипа детектора ViPo

присоединяется к одной из квадратных поверхностей сцинтиллятора через простой прямоугольный световод. На противоположную поверхность наносится тонкий слой алюминия для обеспечения отражения света в сторону фотокатода ФЭУ. Толщина алюминиевого покрытия составляет 200 нм. Такие сцинтилляционные детекторы объединены парами, соприкасающимися друг с другом алюминиевыми поверхностями сцинтилляторов, между которыми можно расположить исследуемые источники. Каждая пара детекторов запаковывается в капсулу из радиоактивно чистого пластика, вентилируемую азотом, с целью вытеснения радона (рис. 5). В качестве пассивной защиты окружающей капсулы используется 50 см низкорadioактивного археологического свинца.

Оцифровка импульсов ФЭУ производится при помощи четырехканальных Flash ADC с динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации 1 ГГц. При срабатывании одного из сцинтилляционных детекторов происходит запись содержимого кольцевого буфера всех четырех АЦП в память персонального компьютера. Причем записывается предыстория триггера длительностью 0,2 мкс и история триггера длительностью 2,3 мкс. Максимальная скорость оцифровки в такой системе не превышает 100 Гц, скорость счета импульсов сцинтилляционных детекторов в среднем составляет 0,1–0,5 Гц. События сохраняются в обслуживающем электронике ПК.

Энергетическая и временная калибровка детекторов в подземной лаборатории проводилась с использованием источников γ -излучения ^{54}Mn и ^{207}Bi . Временная кали-

бровка производится при помощи четырехканальных Flash ADC с динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации 1 ГГц. При срабатывании одного из сцинтилляционных детекторов происходит запись содержимого кольцевого буфера всех четырех АЦП в память персонального компьютера. Причем записывается предыстория триггера длительностью 0,2 мкс и история триггера длительностью 2,3 мкс. Максимальная скорость оцифровки в такой системе не превышает 100 Гц, скорость счета импульсов сцинтилляционных детекторов в среднем составляет 0,1–0,5 Гц. События сохраняются в обслуживающем электронике ПК.

бровка проводится по электронам, появившимся в результате комптоновского рассеяния γ -квантов в разных сцинтилляторах, энергетическая калибровка детекторов проводится по краю комптоновского распределения от γ -квантов.

Больше 20 капсул прототипа детектора ViPo-1 экспонировались в подземной лаборатории Фрежюс на протяжении трех месяцев. Целью экспозиции было провести исследования работоспособности методики измерений, а также фона от радиоактивных загрязнений сцинтилляторов и фона от случайных совпадений, измерить радиационную чистоту алюминизированного майлара.

Для проверки метода измерений в одну из капсул был помещен источник с известным содержанием ^{212}Bi , определенным при помощи традиционного метода измерения активности HPGe-детектором: $A(^{212}\text{Bi}) = (0,19 \pm 0,03)$ Бк/кг. Толщина этого источника — 40 мг/см^2 . Активность ^{212}Bi , измеренная при помощи капсулы детектора ViPo-1 , составляет $(0,201 \pm 0,005)$ Бк/кг, период полураспада $T_{1/2}(^{212}\text{Po}) = (296 \pm 14)$ нс. Как видно из полученных данных, чувствительность предлагаемого метода в данном случае значительно превосходит чувствительность измерений, проводимых с традиционными германиевыми детекторами.

В другую капсулу между сцинтилляторами поместили несколько слоев алюминизированного майлара общей толщиной 30 мкм . При помощи этой капсулы было определено, что величина радиоактивного загрязнения майлара ^{208}Tl составляет $A(^{208}\text{Tl}) = (1,6 \pm 0,4)$ мБк/кг. Если использовать вместо тонкого слоя алюминия, наносимого на поверхности сцинтилляторов, обычный алюминизированный майлар, что значительно упрощает процедуру изготовления сцинтилляционных детекторов, то чувствительность такого детектора с общей площадью 12 м^2 составит 25 мБк/кг , именно по этой причине вместо алюминизированного майлара в сцинтилляционных детекторах установки используется тонкий слой алюминия.

Одна из капсул, содержащая сцинтилляторы толщиной 10 см , предназначалась для исследования величины объемного радиоактивного загрязнения сцинтилляторов. В результате измерений было определено, что его величина $A(^{208}\text{Tl})$ $(0,4 \pm 0,1)$ мБк/кг. Минимальная доступная величина объемного радиоактивного загрязнения, необходимая для успешной работы детектора: $A(^{208}\text{Tl})$ 2 мБк/кг .

Пять капсул, содержащие сцинтилляторы толщиной 1 см , и 13 капсул, содержащие сцинтилляторы толщиной $0,3 \text{ см}$, экспонировались с целью определения радиоактивного загрязнения на поверхности сцинтилляторов. Общая площадь поверхности в этом случае составила $0,72 \text{ м}^2$. Величина радиоактивного загрязнения поверхности сцинтилляторов, определенная в этих 18 капсулах: $A(^{208}\text{Tl}) = (2,1 \pm 0,6)$ мБк/м². Если пересчитать эту величину на детектор с общей площадью 12 м^2 , то чувствительность такого детектора к ^{208}Tl при плотности фольги-источника 40 мг/см^2 составит 5 мБк/кг на 90-м % уровне достоверности.

Тринадцать капсул, содержащие сцинтилляторы толщиной $0,3 \text{ см}$, также экспонировались на предмет проверки чувствительности системы к поиску загрязнения ^{214}Bi . Если провести простую оценку с учетом только случайных совпадений, то для достижения уровня чувствительности 10 мБк/кг для всей установки скорость счета отдельного сцинтилляционного детектора должна быть $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Проведенные измерения показали, что средняя скорость счета сцинтилляционных детекторов с пластинами сцинтилляторов толщиной $0,3 \text{ см}$ составляет $3 \cdot 10^{-3}$ Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена BiPo-методика измерений сверхнизких примесей ^{208}Tl и ^{214}Bi на уровне < 2 мкБк/кг и < 10 мкБк/кг соответственно в тонких фольгах большой площади, которые будут использоваться в эксперименте по поиску $0\nu 2\beta$ -распада SuperNEMO. Было рассмотрено два варианта конструкции BiPo-детектора. Создан первый прототип BiPo-1, который установлен в подземной лаборатории Фрежюс, Франция. Проведены энергетическая и временная калибровки с радиоактивными источниками ^{54}Mn и ^{207}Bi . Измерения, проведенные с BiPo-1, показали эффективность методики, предложенной для создания высокочувствительного детектора радиоактивных загрязнений в тонких фольгах (40 мг/см²).

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 06-02-16672.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heusser G., Laubenstein M., Neder H. Low-Level Germanium Gamma-Ray Spectroscopy at the $\mu\text{Bq/kg}$ Level and Future Developments Towards Higher Sensitivity // Radioactivity in the Environment. 2006. V. 8. P. 495–510.
2. Piquemal F. (on behalf of the NEMO Collab.). The SuperNEMO Project // Phys. At. Nucl. 2006. V. 69, No. 12. P. 2141–2145.
3. Arnold R. et al. Technical Design and Performance of the NEMO 3 Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 536. P. 79–122.
4. Bongrand M. (on behalf of the SuperNEMO Collab.). The BiPo Detector for Ultralow Radioactivity Measurements. Preprint LAL Université Paris-Sud 11. CNRS/IN2P3. Orsay, France. 28.41.Rc.

Получено 18 июня 2008 г.