

Метод быстрой оценки эффективности регистрации радиоактивных распадов в эксперименте ЕХО-200

В. А. Белов*

*Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
(ИТЭФ) Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, д. 25
(Статья поступила 29.06.2018; Подписана в печать 25.07.2018)*

В процессе исследования космогенных источников фона в эксперименте ЕХО-200 был получен список из 1689 изотопов, производимых при прохождении космических мюонов. В настоящей работе представлен метод, позволивший установить какие из изотопов не могут реально оказывать влияния на низкофоновые данные, набираемые в детекторе. Использование данного метода позволило исключить из рассмотрения более 98 % изотопов при небольших вычислительных затратах. Этот метод может оказаться полезен и в других случаях при изучении процессов активации материалов.

PACS: 23.20.-g, 29.40.-n УДК: 539.122.04, 539.16.04
Ключевые слова: радиоактивность, гамма-кванты, ЕХО-200.

ВВЕДЕНИЕ

Часто стоит задача определить, какие изотопы в материалах установки представляют опасность с точки зрения генерации фоновых событий. Для изотопов естественной радиоактивности список можно составить с помощью полупроводниковых детекторов. К сожалению, такой способ не подходит для выявления изотопов создающихся в процессе эксплуатации установки. Использование методов нейтронно-активационного анализа может оказать лишь частичную помощь, т. к. параметры нейтронного потока, используемого для облучения, отличаются от реального. А применение прямого моделирования распадов методом Монте-Карло упирается в большие требования по объёму вычислений. Таким образом, существуют предпосылки для разработки упрощённого метода расчёта, который позволит, с одной стороны, использовать полную информацию о радиоактивном распаде для каждого изотопа, а с другой стороны — избежать необходимости проведения полного моделирования. Автоматизация такого метода стала возможна благодаря созданию баз данных о ядерной структуре изотопов (например ENSDF [1]) и позволяет повысить точность при одновременном снижении вероятности ошибки за счёт исключения ручной обработки.

Детектор ЕХО-200 [2] был создан для поиска безнейтринного двойного β -распада ^{136}Xe ($2\beta 0\nu$). Это очень редкий процесс с $T_{1/2} > 10^{26}$ лет, поэтому особую важность приобретает тщательное изучение всех источников фона. Хотя основным источником фона является естественная радиоактивность, космическое излучение также представляют значительную опасность. Описанный в статье метод был создан при исследова-

нии космогенных источников фона.

1. НАЧАЛЬНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Для детектора ЕХО-200 основные параметры модели можно сформулировать следующим образом:

- исходя из окна области поиска $2\beta 0\nu \sim 2383\text{--}2533\text{ кэВ}$ [3], нас не интересуют события с энергией значительно меньше этого, поэтому введём нижний порог для нашего исследования $E_{\text{th}} = 2300\text{ кэВ}$;
- ввиду наличия цельной медной оболочки и слоя неактивного ксенона вокруг активной части детектора, зарегистрированы могут быть только γ -кванты (за исключением производных ксенона);
- поскольку $2\beta 0\nu$ -события одновершинные, наложением γ -линий можно пренебречь и рассматривать отдельные переходы независимо;
- многие изотопы претерпевают β -распад со значительной энергией перехода (достигающей нескольких МэВ), в этом случае β -частицы в веществе могут испускать γ -кванты тормозного излучения с энергией, достигающей нашего порога;

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ

С наиболее общей точки зрения, вероятность вызвать отклик в детекторе для конкретного изотопа, распадающегося в объёме V , представима в виде:

$$P = \sum_k I_k \iint p_k(E, \mathbf{r}) e(E, \mathbf{r}) dE dV, \quad (1)$$

*E-mail: belov@itep.ru

где суммирование производится по всем переходам между состояниями ядра в процессе радиоактивного распада (включая цепочки распадов), I_k есть интенсивность перехода, $p_k(E, \mathbf{r})$ — плотность вероятности распределения возникающих γ -квантов по энергии и в пространстве, а $e(E, \mathbf{r})$ — вероятность регистрации γ -кванта.

Для γ -переходов испускание γ -квантов совершенно не зависит от пространственного положения, поэтому $p_k(E, \mathbf{r}) = p_k(E) p_V(\mathbf{r})$, где $p_V(\mathbf{r})$ — плотность вероятности распределения изотопа в пространстве. Внутренней конверсией можно пренебречь, т. к. в большинстве случаев её вероятность невелика и ведет лишь к уменьшению вероятности регистрации. В случае β -перехода p_k есть функция $\mathbf{r}$, потому что вероятность испускания тормозного излучения зависит от среды. Однако, принимая во внимание малость длины пробега β -частиц в веществе (миллиметры), можно положить, что вероятность конверсии зависит только от материала (т. е. объёма), в котором находится изотоп. Тогда $p_k(E, \mathbf{r}) \approx p_{k,V}(E) p_V(\mathbf{r})$. Для переходов с испусканием α , p и n полагаем вероятность испускания тормозного излучения равной 0.

Вероятность регистрации e равна произведению вероятности попасть в детектор и вероятности создать в нём событие с энергией в интересующей нас области. Сечение взаимодействия γ -квантов медленно меняется с энергией в наиболее интересующем нас районе 2–3 МэВ, поэтому первая компонента может быть приближена значением, рассчитанным для некоторой эффективной энергии. Что касается второй компоненты, то она несёт довольно сложную зависимость от энергии, плюс, вообще говоря, зависит от направления и точки входа γ -кванта в детектор. Тем не менее, очевидно, что она не превышает 1, поэтому, полагая, что мы строим верхнюю оценку, её можно приблизить ступенчатой функцией Хевисайда, что приводит к выражению $e(E, \mathbf{r}) \approx e(E_{av}, \mathbf{r}) \theta(E - E_{th})$.

Подставляя эти приближения в (1) видим, что в подынтегральном выражении зависимости от энергии и положения расцепляются, что позволяет свести интеграл к произведению независимых интегралов, которые могут быть посчитаны отдельно. В результате получаем:

$$P \approx \sum_k I_k \epsilon_1(Q_k, V) \epsilon_2(V), \quad (2)$$

где ($\epsilon_1 = \int_0^{Q_k} p_{k,V}(E) \theta(E - E_{th}) dE$) представляет собой вероятность создать γ -квант с достаточной энергией и зависит, главным образом, от полной энергии Q_k и типа перехода; а ($\epsilon_2 = \int_V e(E_{av}, \mathbf{r}) p_V(\mathbf{r}) dV$) представляет собой вероятность зарегистрировать γ -квант, которая вычисляется как средняя эффективность регистрации γ -кванта некоторой фиксированной энергии для каждого объема. Полученное значение для P является оценкой сверху, что вполне соответствует нашей задаче.

Переформулируя изложенные выше рассуждения о типах переходов, можно записать:

$$\epsilon_1 = \begin{cases} \theta(Q_k - E_{th}), & \gamma\text{-переход} \\ \iint_{E_{th}}^{Q_k} N_e(E_e) p_{Brem}(E_e, E_\gamma) dE_e dE_\gamma, & \beta\text{-переход} \\ 0, & \text{другие.} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь N_e представляет известную форму β -спектра, а p_{Brem} — плотность вероятности конверсии в γ -квант. Функция $\int_{E_{th}}^{E_e} p_{Brem}(E_e, E_\gamma) dE_\gamma$ не зависит от параметров перехода и может быть получена заранее.

Наиболее простым способом вычисления ϵ_2 является моделирование методом Монте-Карло с помощью специальных программ. При этом следует отметить, что, хотя ϵ_2 зависит от изотопа за счёт отличий в пространственном распределении, это распределение определяется в первую очередь плотностью вторичной адронной компоненты и материалом, а потому этой зависимостью можно пренебречь. Следовательно, наиболее вычислительно сложная часть задачи — расчёт эффективности регистрации γ -квантов — получается не зависящей от изотопа и может быть проведена единожды для каждого материала, что значительно уменьшает объём вычислений и позволяет быстро получить оценку для большого числа изотопов.

3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕРСИИ В ГАММА

Таким образом, ϵ_2 может быть вынесена из суммирования в (2). Оставшаяся часть имеет смысл вероятности создать γ -квант с энергией больше пороговой в процессе полного радиоактивного распада с учётом всех переходов. Она может использоваться отдельно и обозначена здесь как F_γ :

$$F_\gamma = \sum_k I_k \epsilon_1(Q_k, V). \quad (4)$$

Суммирование в формуле (4) требуется проводить по всем возможным переходам в процессе радиоактивного распада начального ядра. Состояния ядра и переходы между ними представляют собой конечный связанный ориентированный ациклический граф. Расчёт суммы требует построения такого графа, вычисления интенсивности и вклада в F_γ для каждого перехода. Если воспользоваться направленностью переходов и отсутствием циклов, то вычисления можно провести за один проход. Разумно реализовать обход в виде двух циклов: по состояниям ядра и по переходам с каждого состояния. Для перехода его конечное состояние добавляется в список состояний, если его там ещё нет. Состояния рассматриваются в порядке уменьшения энергии возбуждения ядра, что позволяет обойти все состояния и переходы, одновременно получая относительную интенсивность каждого.

Величина F_γ , вычисленная для каждого изотопа, помноженная на эффективность регистрации γ -квантов ϵ_2 и на скорость генерации данного изотопа, даёт верхнюю оценку на ожидаемое количество событий в детекторе от этого изотопа в установившемся режиме. Так же как и в случае векового равновесия, можно полагать, что установившийся режим наступает за время, равное десятикратному периоду полураспада. Для изотопов с большим периодом полураспада количество распадов значительно меньше установившегося, т. к. изотоп находится в режиме накопления. Исходя из времени измерений можно ввести ограничение t_{max} и считать изотопы с большим периодом полураспада стабильными.

Собственно метод проверки списка изотопов заключается в отбрасывании изотопов, ожидаемое количество событий от которых меньше установленного предела. Выбор значения предела осуществлялся исходя из имеющегося уровня счёта в интересующей области и необходимой чувствительности.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЛЯ EXO-200

Для EXO-200 данный метод был реализован в виде программы на языке Perl. Схема состояний ядра и параметры переходов между ними брались из файлов данных `RadioactiveDecay` и `PhotonEvaporation`, использующихся пакетом `Geant4`. Для нижнего порога по энергии использовалось значение 2300 кэВ, а в качестве ограничения на период полураспада — 1 год. Для моделирования использовалась полная модель детектора [4] на основе `Geant4`. Функция конверсии электронов в γ -кванты была получена аппроксимацией результатов моделирования процесса в основных материалах установки (ксенон, медь, хладагент, свинец). Эффективность регистрации ϵ_2 оценивалась с помощью γ -квантов с энергией 5 МэВ, зарегистрированными считались события оставившие более 1 МэВ в ксеноне. Скорости активации изотопов были получены моделированием космических мюонов [5]. В качестве порога для отбора изотопов было выбрано значение 1 соб./год.

Использование этого метода позволило сократить

список проверяемых изотопов активации с 1689 до 24, при небольших затратах вычислительных ресурсов [5]. Заметим, что изложенный метод неявно включает и более простые методы анализа. В частности, из исключённых изотопов 50 % не имеют достаточно энергии, чтобы превысить наш порог по энергии, и потому могут быть исключены заранее. Отметим, что столь сильное подавление стало возможным, главным образом, благодаря тому, что, в случае поиска $2\beta 0\nu$ -распада, порог E_{th} устанавливается достаточно высоким. Такая ситуация может не иметь места в других экспериментах, например, при поиске тёмной материи. Ещё 45 % изотопов обладают достаточной энергией, но генерируются в столь малых количествах, что они не проходят отбор, даже если использовать для F_γ , вместо расчёта по формуле (4), фиксированное значение 3, взятое как оценка сверху. Оставшиеся 70 изотопов уже не могут быть исключены простыми методами. Применение полной схемы изложенного метода позволяет отбросить ещё 46 изотопов, что соответствует улучшению на 66 % или в 3 раза. Подчеркнем, что использование данного метода позволяет применить сразу все упомянутые методы, не проводя отдельного рассмотрения для каждого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование этого метода позволило сократить список проверяемых изотопов активации с 1689 до 24, при небольших затратах вычислительных ресурсов [5]. Показано, что метод не сводится к более простым и представляет самостоятельную ценность. Данный метод может оказаться полезен и в других случаях при изучении процессов активации материалов, или при расчёте эффективности экранировки от радиоактивного излучения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-02-12145-офи_м и 14-02-00675-А).

[1] [Evaluated Nuclear Structure Data File](#)

[2] Auger M. et al. (*EXO-200 coll.*) JINST. 2012. **7**. P05010.

[3] Albert J.B. et al. (*EXO-200 coll.*) Nature. 2014. **510**. P. 229.

[4] Albert J.B. et al. (*EXO-200 coll.*) Phys. Rev. C. 2014. **89**. 015502.

[5] Albert J.B. et al. (*EXO-200 coll.*) JCAP. 2016. **1604**. N 04. 029.

Quick estimation of registration efficiency of radioactive decays used in the EXO-200 experiment

V. A. Belov

*Institute for Theoretical and Experimental Physics named by A. I. Alikhanov of National research center «Kurchatov institute»,
Moscow 117218, Russia
E-mail: belov@itep.ru*

During the study of cosmogenic background sources in the EXO-200 experiment we obtained a list of 1689 isotopes, produced by passing of cosmic muons. Here we describe a method that allowed to estimate which isotopes from the list didn't have a significant impact on a low-background data from the detector. Using this method we excluded more than 98 % from the list with reasonable consumption of computing resources. This method might be useful in other cases of the study of the material activation processes.

PACS: 23.20.-g, 29.40.-n.

Keywords: radioactivity, gamma.

Received 29 June 2018.

Сведения об авторе

Белов Владимир Александрович — ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 789-64-23, e-mail: belov@itep.ru.
