

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО REACTOR ANTINEUTRINO DETECTOR SIMULATION

**В. А. Грибовская<sup>1</sup>, О. М. Бояркин<sup>2</sup>**  
**V. Gribovskaya<sup>1</sup>, O. Boyarkin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт подготовки научных кадров Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, <sup>2</sup>Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь  
v.gorskaya1997@gmail.com

<sup>1</sup>Graduate School of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
<sup>2</sup>Belarusian State University, ISEU BSU, Minsk, Republic of Belarus

В данной статье представлена программа, моделирующая работу детектора реакторных антинейтрино. Программа была апробирована на нескольких радиоактивных элементах путем восстановления энергетического спектра антинейтрино.

In this article a program for reactor antineutrinos detector simulation is presented. The program was tested on several radioactive elements by reconstruction of the antineutrino energy spectra.

**Ключевые слова:** реакция обратного бета-распада, детектирование антинейтрино, мониторинг атомных реакторов.

**Keywords:** inverse beta decay, antineutrino detection, nuclear reactor monitoring.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-335-337>

В настоящее время во всем мире активно развивается антинейтринная диагностика ядерных реакторов. При этом строятся как небольшие детекторы, так и очень большие установки. Антинейтрино возникают в реакторе в результате распада осколков деления ядерного топлива. Каждый акт деления порождает в среднем определенное число антинейтрино и дает вклад в общую энерговыработку реактора. Число зарегистрированных антинейтрино в детекторе содержит информацию о числе ядер, испытавших деление в активной зоне реактора, тепловой мощности и энерговыработки реактора, а деформация энергетического спектра антинейтрино свидетельствует об изменении изотопного состава ядерного топлива. Антинейтринный детектор позволяет непрерывно получать информацию по совершенно новым параметрам, альтернативным стандартным тепловому и нейтронному каналам. Основными источниками антинейтрино выступают четыре изотопа: <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>238</sup>U, которые дают антинейтрино с разными энергетическими спектрами. Измерение потока и энергетического спектра этих частиц даст возможность получать информацию о процессах в реакторе независимо от систем реактора и в режиме on-line. Размещение такого детектора, например, в ловушке расплава, не мешает работе реактора, а в случае аварии будет выполнять функцию дополнительного жертвенного материала [1].

В реакциях деления тяжёлых ядер рождаются электронные антинейтрино с энергией от 1 до 8 МэВ. Антинейтрино можно детектировать при помощи регистрации продуктов реакции обратного β-распада, порог которой порядка 1,8 МэВ.



Ядерные реакторы обеспечивают достаточно мощный поток антинейтрино с эффективным  $\bar{\nu}_e$ -спектром, характерным для каждого типа реактора. В общем случае реакторный  $\bar{\nu}_e$ -спектр формируется продуктами деления всех составляющих ядерного топлива. Для изучения энергетического спектра антинейтрино, необходимо производить оценку сечения реакции (1). При этом формула для сечения взаимодействия реакторных антинейтрино учитывает следующие факторы:

- 1) поведение сечения вблизи порога реакции ( $\sigma_{thr}$ ),
- 2) отдачу ( $\sigma_{rec}$ ),
- 3) эффекты слабого взаимодействия ( $\sigma_{WM}$ ),
- 4) радиационные поправки ( $\sigma_{rad}$ ), т.е. иметь следующий вид [2]:

$$\sigma_{\vartheta\rho}(E_\vartheta) = \sigma_0(E_\vartheta)(1 + \sigma_{thr})(1 + \sigma_{WM} + \sigma_{rec})(1 + \sigma_{rad}), \text{ см}^2. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет по экспериментально измеренному в реакции (1) энергетическому спектру вычислить дифференциальное и полное сечение реакции. Интенсивность нейтринных событий  $n_\vartheta$ , регистрируемых детектором в реакции (1), связана с сечением следующим образом [2]:

$$n_\vartheta = \varepsilon_0 \cdot \frac{N_p}{V} \cdot \langle \sigma_{\vartheta\rho} \rangle \cdot d \cdot I, \text{ с}^{-1} \quad (3)$$

при естественном условии  $d \ll R$ , где  $d$  - радиальная толщина детектора,  $R$  - эффективное расстояние между нейтринным источником и детектором,  $N_p$  - общее число протонов в полезном чувствительном объеме детектора,  $\epsilon_0$  - эффективность регистрации позитронов,  $I$  - интенсивность потока антинейтрино, проходящего через полезный объем детектора за время одного измерения.

Программа для симуляции антинейтринного детектора основана на фреймворке GEANT4 [3]. Детектор представляет собой сборку сцинтилляционных кристаллов, окруженных свинцовым щитом и тонкими сцинтилляционными вето счетчиками, предназначенными для остановки и отсеивания фоновых событий, таких как космические мюоны и фотоны из реактора. Схематическое изображение антинейтринного детектора представлено на рисунке 1. Для упрощения модели, внутренняя структура сцинтиллятора не воспроизведена, так как это не повлияет на изучаемые эффекты. Также, принимая во внимание, что обстрел в симуляции будет происходить из одной точки, боковые вето-детекторы были убраны.



Рисунок 1 – Представление детектора в GEANT4

Так как нейтрино слабо взаимодействуют со средой, GEANT4 не симулирует такие взаимодействия, поэтому события обратного бета распада генерируются в программе NuMC [4]. Программа генерирует антинейтрино из распада заданного элемента и затем разваливает его на позитрон и нейтрон. Эти две частицы затем передаются в GEANT4, где пропускаются через вещество детектора. Позитрон в детекторе быстро аннигилирует и испускает два фотона, которые затем регистрируются детектором. Нейтрон же некоторое время термализуется и затем захватывается, испуская фотон с характерной энергией 2,2 МэВ. Полученные после симуляции спектры энергий позитрона и нейтрона приведены на рисунке 2.

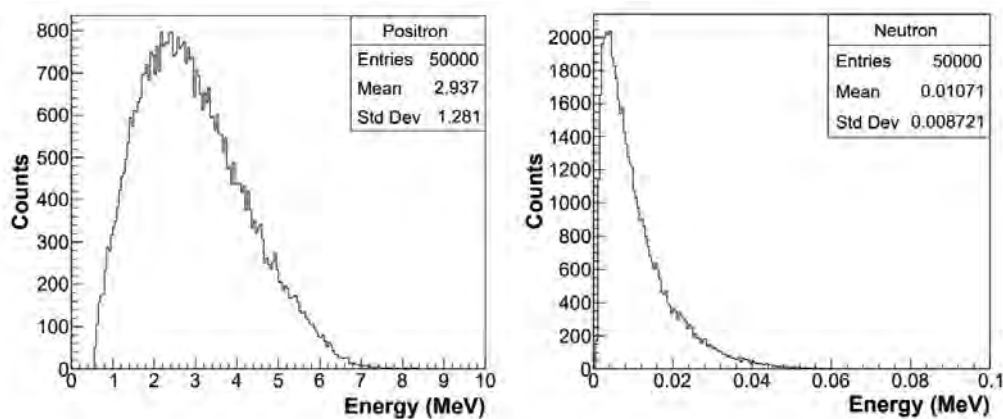


Рисунок 2 – Энергетические спектры позитрона (слева) и нейтрона (справа)

Из-за малой массы позитрона (относительно нейтрона), большая часть энергии антинейтрино передается позитрону. Поэтому энергию антинейтрино можно получить, используя соотношение [5]:

$$E_{positron} = E_{\bar{\nu}_e} - 0,782 \text{ МэВ.} \quad (4)$$

Энергетические спектры антинейтрино представлены на рисунке 3. Линией отмечен спектр, взятый из программы NuMC [4]. По изображению видно, что данная модель довольно точно восстанавливает спектры антинейтрино.

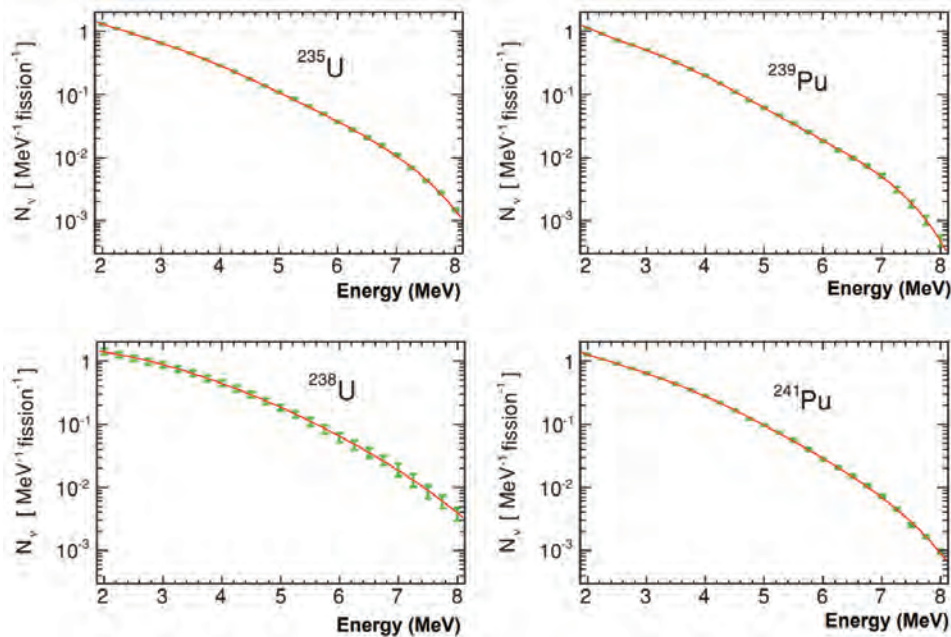


Рисунок 3 – Энергетические спектры антинейтрино из различных источников

К настоящему времени существующие антинейтринный детекторы используются на АЭС с научно-исследовательскими целями, в то время как промышленные антинейтринные детекторы еще находятся в стадии разработки. Так, например, для Турецкой АЭС «Аккую» конструируется детектор на основе гексагональных сцинтилляторов. На АЭС «Дайя Бэй», около 52 километров к северу от Гонконга, работает установка, которая состоит из восьми антинейтринных жидкосцинтилляционных детекторов, расположенных в трёх экспериментальных залах. Источником антинейтрино являются шесть атомных реакторов с тепловой мощностью каждого около 3 ГВт, располагающихся на расстояниях от ~500 до ~1800 метров от детекторов, что позволило рассчитать элементы PMNS-матрицы, связанных с осцилляцией антинейтрино. Национальная лаборатория Сандия совместно с Ливерморской национальной лабораторией разработали детектор SONGS1, созданный как доказательство состоятельности использования антинейтринных детекторов для контроля за работой АЭС ( SONGS1 эксплуатировался в 2003-2006 годах на АЭС Сан-Онофре). В России Объединенный институт ядерных исследований совместно с Московским инженерно-физическим институтом, а также Московским физико-техническим институтом создают детектор реакторных антинейтрино на основе твердого сцинтиллятора DANSS для использования на АЭС, в котором благодаря пересекающимся слоям сцинтилляционных пластин, планируется добиться увеличения пространственного разрешения на целый порядок. Данный детектор будет установлен в 10 метрах от реактора ВВЭР-100 на Калининской АЭС, при этом он сможет регистрировать порядка 5000 антинейтрино в сутки.

В данной работе с помощью программ GEANT4 и NuMC были построены энергетические спектры антинейтрино для  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ . При этом спектр антинейтрино восстанавливался по спектру позитрона, возникающего в процессе обратного бета-распада в рабочем объеме детектора. Было показано, что полученные результаты совпадают с существующими в литературе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. VII Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века»: доклады, Минск, 23–26 октября 2018 г. / Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси. – Минск, 2018. – 233 с.
2. Vogel, P. The angular distribution of the reaction  $\bar{\nu} e + p \rightarrow e + n$  / Vogel P., Beacom J. F. // 1999. – Phys. Rev. D. – V. 60. – P. 053003.
3. Инструмент для моделирования GEANT4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geant4.web.cern.ch/>. – Дата доступа: 28.02.2020.
4. Программа для моделирования обратного бета распада NuMC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/anitaNeutrino/numc/>. – Дата доступа: 28.02.2020.
5. Bellini, G. Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino / Bellini, G., Benziger, J., Bonetti, S. // Physics Letters B. 722 (4–5): 295–300.