

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.123

ОТЧЕТ
О НАУЧНО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ:
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ^{232}Th В СЦИНТИЛЛЯТОРЕ
ДЕТЕКТОРА IDREAM

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

_____ Е. А. Литвинович

Выполнил

_____ И. Н. Жутиков

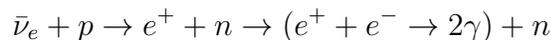
Москва 2021

Оглавление

1	Введение	2
2	Детектор IDREAM	3
3	Анализ данных IDREAM	3
4	Определение концентрации ^{232}Th	6
5	Заключение	9
	Список использованных источников	9

1 Введение

Нейтрино благодаря своим уникальным свойствам, а именно очень слабому взаимодействию с веществом и малой массе, которые позволяют им практически беспрепятственно проходить сквозь материю и при этом двигаться практически со скоростью света, всё это позволяет удаленно наблюдать с их помощью процессы не всегда доступные для прямого наблюдения другими способами. К таким процессам можно отнести и непосредственное наблюдение за состоянием реактора, его выделяемой мощностью и составом топлива. Применение нейтринных детекторов для удаленного контроля за работой атомного реактора активно обсуждалось уже на протяжении нескольких десятилетий [1], однако только в последние годы технологии развились достаточно для того, что бы пытаться проводить подобные наблюдения. За последние десятилетия было проведено множество экспериментов с реакторными нейтрино использовавшими различные реакции такие как: рассеяние на электронах MUNU [2], взаимодействие с дейтроном [3] и обратный бета-распад (IBD) Daya Bay [4], RENO [5], KamLAND [6], Double Chooz [7]. Наибольшим сечением, и как следствие наиболее изученным, является обратный бета-распад, взаимодействие электронного антинейтрино с протоном в ядре водорода.



Данная реакция помимо того, что она обладает на порядок большим сечением чем остальные, обладает той особенностью, что позволяет измерить энергию налетающего антинейтрино, а так же отсеять большое количество случайных событий так как она даёт пару событий связанных по времени. Тот же факт, что спектр нейтрино зависит от состава топлива в реакторе, в свою очередь даёт возможность отслеживать количество оставшегося в нём топлива.

Всё перечисленное выше делает весьма заманчивым и перспективным создание небольшого детектора использующим IBD для контроля работы реактора. Прототипом такого детектора и является IDREAM (Industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring). Данный детектор расположен в 19 метрах от активной зоны реактора на Калининской атомной станции. В ходе сбора данных при вводе его в эксплуатацию были получены первые результаты работы детектора которые, помимо непосредственного наблюдения антинейтрино на нём, так же показали большой фон детектора порядка кГц. Для сравнения в аналогичных детекторах РОИС и NEOS счёт составлял 70 Гц и 160 Гц соответственно. Что поставило необходимость в определении того, что является источником фона. Данная работа посвящена проверке гипотезы, что данный фон вызван загрязнением сцинтиллятора торием.

2 Детектор IDREAM

Детектор IDREAM состоит из двух цилиндрических оболочек из 2 мм нержавеющей стали находящихся одна в другой. Внутренняя оболочка имеет диаметр 1254 мм и высоту 1320 мм, в то время как внешняя имеет диаметр 1858 мм и высоту 1620 мм. Внутренняя жестко закреплена относительно внешней. Сверху на высоте 835 мм внутренняя часть разделена прозрачной выпуклой акриловой мембраной на две части. Эта часть детектора, ограниченная внутренней оболочкой и мембраной, заполнена жидким сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола (LAB) с добавлением гадолиния. Она служит в качестве мишени (TG) для антинейтрино. Над этой областью расположены 16 фотоумножителей погруженных в чистый LAB, который служит в качестве буфера, защищающего мишень от радиоактивных загрязнений в фотоумножителях. Между внутренней и внешней оболочками так же находится сцинтиллятор, так же без добавления гадолиния, эта часть (GC) служит как в качестве активной защиты против гамма-излучения, так и для увеличения эффективности регистрации продуктов IBD которые покидают мишень. На верху этой зоны расположено ещё 12 фотоумножителей. Всего в качестве мишени в IDREAM служит примерно 1 тонна сцинтиллятора, за которыми наблюдают 28 фотоумножителей. Схематическое устройство IDREAM показано на рисунке 1. Для дополнительной защиты от гамма-излучения и нейтронов, которые могут имитировать сигнал от IBD, сам детектор снизу и по сторонам обложен несколькими слоями простого и борированного полиэтилена. Сверху расположены две раздвижные двери, предоставляющие доступ к детектору, проложенные свинцовыми пластинами и несколькими слоями полиэтилена. На каждой из этих дверей расположен сцинтиллятор в виде пластины из полиметилметакрилата, к которой прикреплено еще 6 фотоумножителей. Данные пластины служат для защиты детектора от вертикально падающих на детектор мюонов, защита от горизонтальных мюонов обеспечена GC. Весь детектор в сборе показан на рисунке 2.

3 Анализ данных IDREAM

При анализе данных использовалось шесть рангов длительностью по 4 часа каждый. Сам анализ данных IDREAM на предмет загрязненности торием производился следующим образом, искалась пара событий попавшая в одно временное окно длительностью 1.5 мкс. Эта пара событий должна соответствовать бета-распаду ^{212}Bi , дочернего ядра ^{232}Th . ^{212}Bi в 64% случаев распадается на ^{212}Po , который в свою очередь распадается на ^{208}Pb с испусканием альфа частицы, или в 36% распадается на ^{208}Tl , который после бета-распада так же переходит в ^{208}Pb . Моды распада ^{212}Bi показаны на рисунке 3. В соответствии с этим были поставлены следующие ограничения на энергию первого события $E_1 \in [0.75; 2.5]$ МэВ и на энергию второго события $E_2 \in [0.75; 1.5]$ МэВ. По спектру электронов от ^{212}Bi , спектр

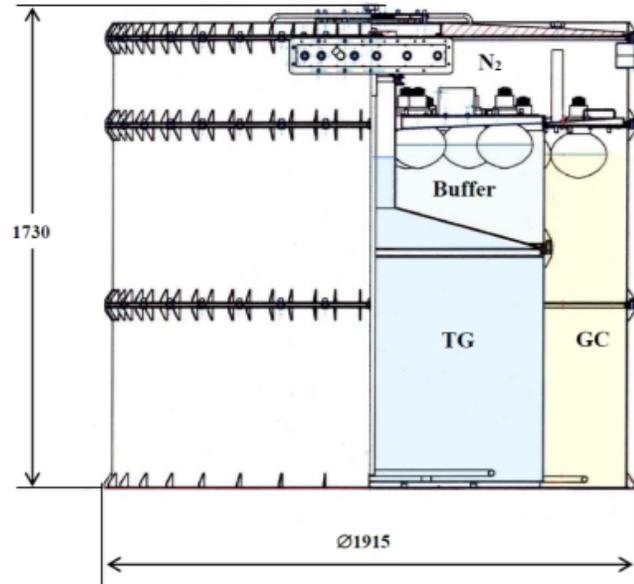


Рисунок 1 – Схематическое устройство IDREAM

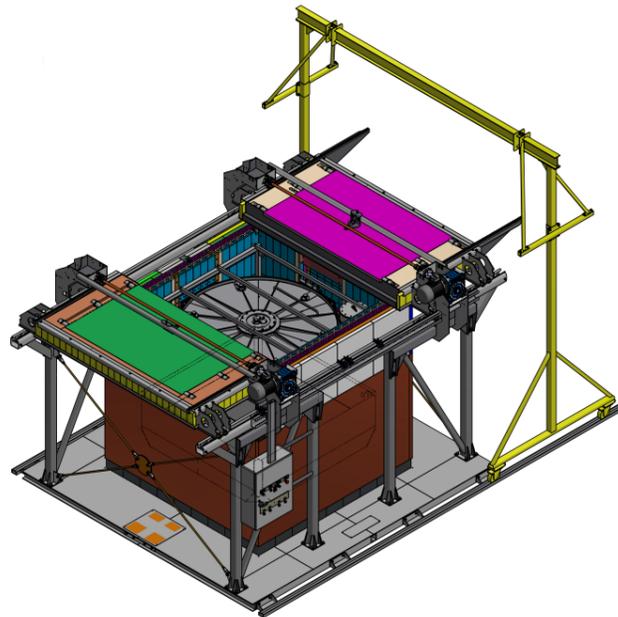


Рисунок 2 – Весь детектор IDREAM в сборе

представлен на рисунке 7, можно определить, что число таких событий должно будет соответствовать примерно 53.7% от всего числа событий [8]. Пример одного из отбираемых событий приведен на рисунке 4. Для улучшения полученной оценки был так же дополнительно произведен отбор сигналов по ширине и высоте пика. Необходимость данного отбора возникает из-за шумов электроники детектора. На рисунке 4 в районе 500 - 600 бивов видно несколько таких шумовых всплесков. Они все как правило достаточно короткие и не слишком высокие пики, которые однако всё-таки могут давать вклад в сигнал при малых энергиях, имитируя низкоэнергетичный сигнал от альфа частицы.

Так же для оценки фона были отобраны случайные одиночные события которые соответствуют событиям с такими же ограничениями по энергиям, но разделенными интервалом времени от 100 до 101.5 мкс. В итоге получены следующие рисунки 5-6 показывающие распределения событий по энергиям и распределение событий по времени между ними. На рисунке 5 показано распределение только от 160 до 1200 нс из-за того что положение первого события, приходящегося примерно на 200 нс, немного "плавает" от события к событию тем самым, по сути, уменьшая окно в течении которого наблюдается второе событие. Период полураспада для ^{212}Po составляет 300 нс, из чего следует, что такому временному интервалу будет соответствовать интервал от $16/30T_{1/2}$ до $4T_{1/2}$, куда попадает только 63% событий.

На этих рисунках уже можно различить пик от альфа частиц на рисунке 6 (справа), как и что-то похожее на часть спектра от электронов на рисунке 6 (слева). Однако экспо-

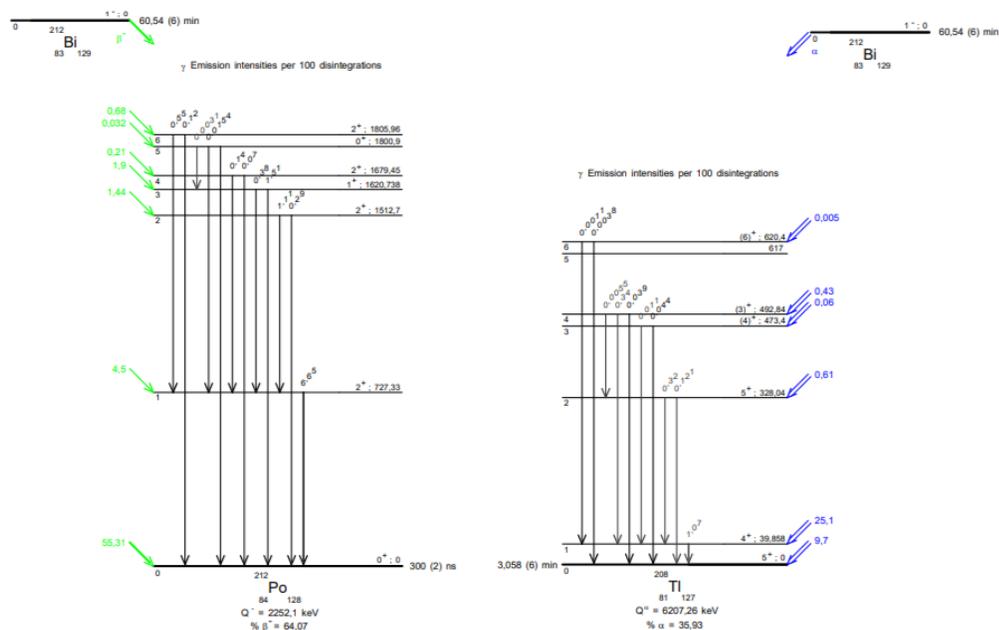


Рисунок 3 – Моды распада ^{212}Bi

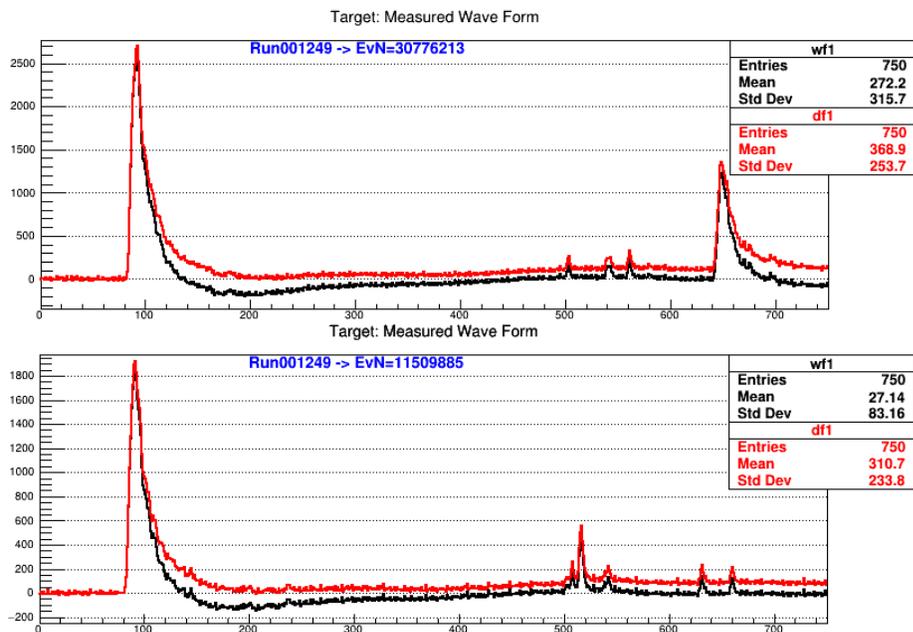


Рисунок 4 – Пример отбираемых событий (сверху) и пример шума электроники имитирующего низкоэнергетический альфа сигнал (снизу)

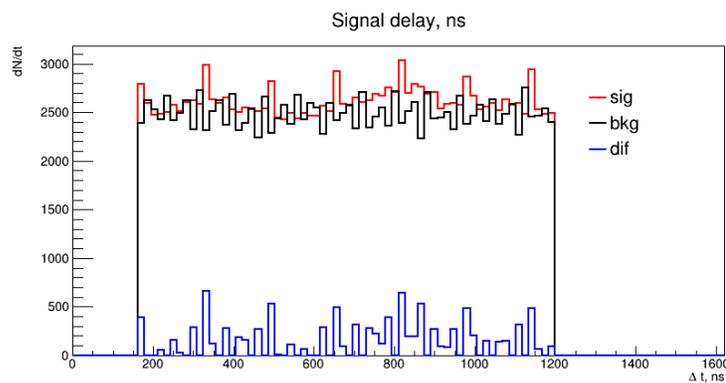


Рисунок 5 – Распределение времени между двумя событиями для отбираемых и фоновых событий с дополнительным отбором по длительности и высоте второго сигнала.

ненциального убывания на рисунке 5 уже не видно, вероятно это из-за того, что для более корректного различения пиков и определения их энергии пришлось отбросить начальные 160 нс временного окна.

4 Определение концентрации ^{232}Th

Так как уверенно пронаблюдать явные признаки наличия тория в сцинтилляторе не удалось, то вообще говоря будет корректнее говорить об пределе на концентрацию тория. Для определения предела на концентрацию тория в сцинтилляторе был рассчитан предел

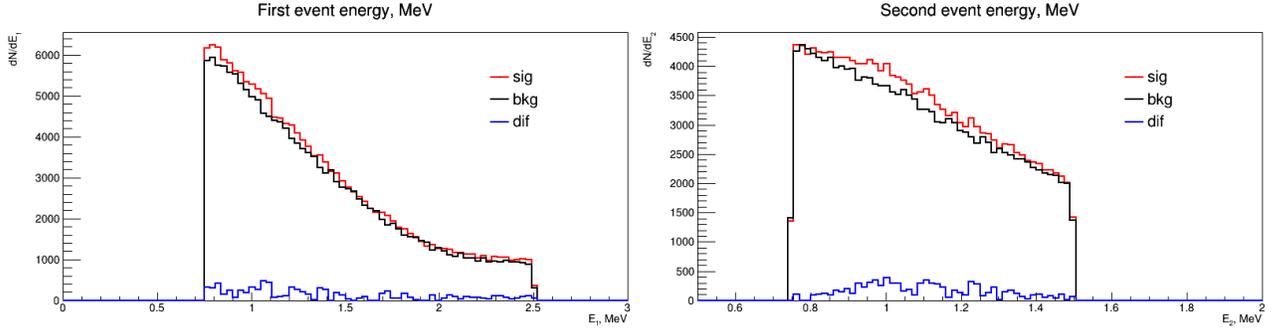


Рисунок 6 – Распределение по энергии первого события (слева) и второго (справа) для отбираемых и фоновых событий с дополнительным отбором по длительности и высоте второго сигнала.

на количество ядер тория содержащихся в нём. Исходя из закона радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

легко выразить зависимость количества распавшихся частиц от количества начальных частиц.

$$\Delta N = N_0 (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (2)$$

Полагая $t_1 = 0$ и переобозначив t_2 как T , время проведения наблюдения, получим

$$\Delta N = N_0 (1 - e^{-\lambda T}). \quad (3)$$

Для получения оценки количества сигнала соответствующего BiPo рассмотрим функцию правдоподобия в данном случае это будет произведение двух функций Пуассона

$$L(N_S, N_B | \nu_s, \nu_b) = \text{Pois}(N_S | \nu_s + \nu_b) \cdot \text{Pois}(N_B | \tau \nu_b), \quad (4)$$

где N_S - количество событий отобранных как сигнал с возможным фоном, а N_B - количество событий отобранных как чистый фон, ν_s и ν_b - количество сигнальных и фоновых

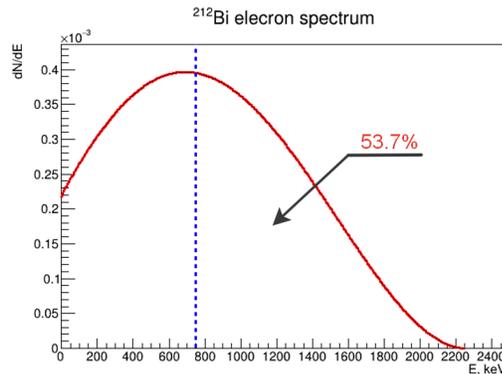


Рисунок 7 – Спектр электронов от ^{212}Bi полученный в [8]

Таблица 1 – Концентрация тория в различных детекторах Daya Bay [9], RENO [5], Double Chooz [10] и для сравнения значение для обыкновенной, питьевой, воды [11]

Детектор	n_{Th} , г/г	Способ определения
Daya Bay	$\approx 2.46 \cdot 10^{-13}$	BiPo
RENO	$\approx 1.77 \cdot 10^{-11}$	ICP-MS
Double Chooz	$\approx 1.2 \cdot 10^{-15}$	BiPo
Обыкновенная вода	$\sim 10^{-10}$	α спектрометрия

событий, τ - множитель отвечающий за отличие количества чистых фоновых событий от фоновых событий в отобранном сигнале, в данном случае он равен 1 так как измерения для чистого фона и сигнала с фоном проводились одинаковое время. Тогда получаем что второй множитель будет максимален когда $\nu_b = N_B$ а первый соответственно когда $\nu_s + \nu_b = N_S$, что по итогу даёт нам оценку на параметр ν_s , количество сигнальных событий в общем количестве сигнала с фоном, равную $\nu_s = N_S - N_B$. σ определена из соотношения

$$\Lambda(\nu_s) = -\ln\left(\frac{L(\nu_s + \sigma, \nu_b)}{L(\nu_s, \nu_b)}\right) = 0.5. \quad (5)$$

Для количества сигнала с фоном равного $N_S = 167069$ и чистого фона $N_B = 159238$ по итогу получим для $\nu_s = 7831 \pm 409$. Что с учётом недобранных сигналов даст следующий предел на количество распавшихся ядер ΔN^{95}

$$\Delta N^{95} < (\nu_s + \alpha\sigma) \cdot \frac{1}{0.537} \cdot \frac{1}{0.64} \cdot \frac{1}{0.63} = 39266, \quad (6)$$

где $\alpha = 1.64$ квантиль соответствующая 95%.

Что для тория $\lambda_{Th} = 1.57 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$ и времени наблюдения $T = 8.64 \cdot 10^4 \text{ с}$ даст следующий предел на количество ядер тория

$$N_{Th} < \frac{\Delta N^{95}}{1 - e^{-\lambda T}} = \frac{39266}{1 - e^{-1.57 \cdot 10^{-18} \cdot 8.64 \cdot 10^4}} = 2.89 \cdot 10^{17}.$$

Что при учете того, что в IDREAM содержится примерно $m \approx 1$ тонна сцинтиллятора, дает предел на концентрацию тория

$$n_{Th} < \frac{N_{Th}}{N_A} \cdot \frac{M_{Th}}{m} = \frac{2.89 \cdot 10^{17}}{6.022 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{232}{10^6} = 1.1 \cdot 10^{-10} \text{ г/г} \quad (7)$$

Концентрации тория в других детекторах и в обычной, питьевой, воде для сравнения приведены в таблице 1.

5 Заключение

В данной работе был проведен анализ данных детектора IDREAM для определения содержания тория в сцинтиляторе детектора. Полученный предел на концентрацию составляет $n_{Th} < 1.1 \cdot 10^{-10}$ г/г. Такой концентрации недостаточно для объяснения такого фона, что говорит о том, что он вызван загрязнением находящимся где-то в металлической конструкции детектора или вообще чем-то внешним по отношению к детектору.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Colloquium: Neutrino detectors as tools for nuclear security* / A. Bernstein [et al.] // *Rev. Mod. Phys.* — 2020. — Vol. 92. — P. 011003.
2. *Daraktchieva Z. MUNU final results* // *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* — 2011. — Vol. 221. — P. 62–66.
3. OBSERVATION OF A WEAK CHARGED CURRENT IN THE INTERACTION OF REACTOR ANTI-NEUTRINOS WITH A DEUTERON / G. S. Vidyakin [et al.] // *JETP Lett.* — 1989. — Vol. 49. — P. 151–154.
4. *Worcester E. Observation of electron antineutrino disappearance by the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment* // Meeting of the APS Division of Particles and Fields. — 09/2013.
5. RENO: An Experiment for Neutrino Oscillation Parameter θ_{13} Using Reactor Neutrinos at Yonggwang / J. K. Ahn [et al.]. — 2010. — Mar.
6. Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion / T. Araki [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 94. — P. 081801.
7. *Crespo-Anadón J. I. Double Chooz: Latest results* // *Nucl. Part. Phys. Proc.* — 2015. — Vol. 265/266. — P. 99–104.
8. *Mougeot X. Reliability of usual assumptions in the calculation of β and ν spectra* // *Phys. Rev. C.* — 2015. — Vol. 91, — P. 055504 ; — [Erratum: *Phys.Rev.C* 92, 059902 (2015)].
9. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment / F. P. An [et al.] // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 95, — P. 072006.
10. Double Chooz: A Search for the neutrino mixing angle $\theta(13)$ / F. Ardellier [et al.]. — 2006. — June.
11. Measurement of Activity concentration of Thorium in Environmental samples by Alpha Spectrometry system / M. S. Islam [et al.] // *SCIREA Journal of Chemistry.* — 2016. — Vol. 1. — P. 31–48.