

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

**ОТЧЁТ ПО УЧЕБНОЙ ПРАКТИКЕ (ОЗНАКОМИТЕЛЬНОЙ)  
СПЕКТРАЛЬНАЯ АНТИНЕЙТРИННАЯ АНОМАЛИЯ И ИЗУЧЕНИЕ  
СТРУКТУРЫ КОРРЕЛИРОВАННОГО ФОНА ДЕТЕКТОРА iDREAM**

Студент \_\_\_\_\_ А. А. Нуркенов

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н \_\_\_\_\_ Е. А. Литвинович

Москва 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Спектральная антинейтринная аномалия .....	4
1.1 Природа конкретных изотопов и зависимость от продуктов деления .....	7
1.2 Несовершенство баз данных .....	9
1.3 Реакция $^{13}\text{C}(\tilde{\nu}_e, n\tilde{\nu}_e)^{12}\text{C}^*$ в органических сцинтилляторах .....	11
2 Устройство детектора iDREAM .....	14
3 Источники коррелированного фона для детектора iDREAM .....	19
3.1 Остановки мюонов .....	19
3.2 Космогенные радионуклиды $^9\text{Li}$ и $^8\text{He}$ .....	21
3.3 Быстрые космогенные нейтроны .....	22
4 Анализ измеренного фона детектора при выключенном реакторе .....	24
Заключение	26
Список источников информации	27

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной учебной практики является ознакомление с современными проблемами и проектами в области физики элементарных частиц. В частности, было произведено ознакомление с открытыми вопросами в области физики нейтрино, на примере спектральной антинейтринной аномалии, а также ознакомление с назначением и конструкцией детектора iDREAM и изучение структуры коррелированного фона этого детектора.

Спектральная антинейтринная аномалия представляет собой превышение ожидаемого спектра в области 4-6 МэВ примерно на 10%, выходящий за рамки погрешностей. На данный момент не существует достоверного объяснения этой аномалии.

Детектор iDREAM (Industrial Detector of Reactor Antineutrinos for Monitoring) задумывался, как прототип промышленного детектора для реакторного мониторинга с высокой степенью ремонтпригодности и облегчённым монтажом при установке. Ожидается, что развитие технологии прикладного нейтринного мониторинга АЭС будет способствовать повышению эксплуатационной безопасности атомных электростанций. В перспективе нейтринные детекторы могут стать дополнительным инструментом МАГАТЭ для поддержки гарантий нераспространения делящихся материалов.

Детектор iDREAM предназначен для опосредованного мониторинга активной зоны ядерных реакторов и контроля за нераспространением делящихся материалов. В случае возникновения неисправностей в активной зоне ожидается изменение потока нейтрино, что отобразится так же и в данных с детектора.

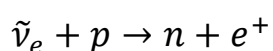
Важно понимать природу регистрируемых шумов для более точного отсеивания кандидатов ОБР от истинных.

## 1 СПЕКТРАЛЬНАЯ АНТИНЕЙТРИННАЯ АНОМАЛИЯ

На данный момент физика реакторных нейтрино борется с двумя аномалиями. Первая заключается в несоответствии соотношения между теоретическим предсказанием и наблюдением в реакторных экспериментах с короткой базой (близким расположением детектора к реактору), порядка 10%, которые возможно объяснить осцилляциями нейтрино. Вторая же, более поздняя, показывает переизбыток нейтринных событий на энергиях близким к 5 МэВ. Это вызвало большой ажиотаж, однако до сих пор не существует какого-либо количественного объяснения в рамках ядерной физики.

Впервые аномалия была обнаружена на корейском эксперименте RENO. Имелось два детектора, которые ловили электронные антинейтрино, исходящие от шести реакторов АЭС Ханбит. Ближний детектор находился, в среднем, на расстоянии 292 метров от активной зоны. Дальний детектор был расположен на расстоянии порядка 1380 метров в туннеле под небольшим холмом высотой около 200 метров.<sup>[1]</sup>

Процесс регистрации антинейтрино во всех реакторных экспериментах происходит за счёт процесса обратного бета-распада (ОБР), происходящих в объёме жидкого органического сцинтиллятора в результате захвата реакторного электронного антинейтрино:



Порог данной реакции равен 1,806 МэВ. Энергия антинейтрино не регистрируется напрямую из-за его слабого взаимодействия с веществом, но её можно определить по легко измеряемой энергии позитрона:

$$E = E_\nu - 1,8 + 1,02 \text{ МэВ}$$

Отбор происходит по задержанным совпадениям аннигилирующего позитрона и нейтрона, который после замедления и диффузии захватывается

растворённым в сцинтиляторе гадолинии, испускающим каскадные гамма-кванты с суммарной энергией, приблизительно, равным 8 МэВ.

При проведении эксперимента RENO для моделирования теоретического предсказания потока антинейтрино использовалась модель Хубера-Мюллера, учитывая наличие скачка в области 5 МэВ, были получены результаты:

Ближний детектор:  $2.303\% \pm 0.401\%$  (экспериментальная погрешность)  $\pm 0.492\%$  (ожидаемая погрешность)

Дальний детектор:  $1.775\% \pm 0.708\%$  (экспериментальная погрешность)  $\pm 0.486\%$  (ожидаемая погрешность).

Избытки и на ближнем, и на дальнем детекторах согласуются с их погрешностями. Избытки в измеренных ОБР в пределах энергий 5 МэВ показаны на рисунке 1:

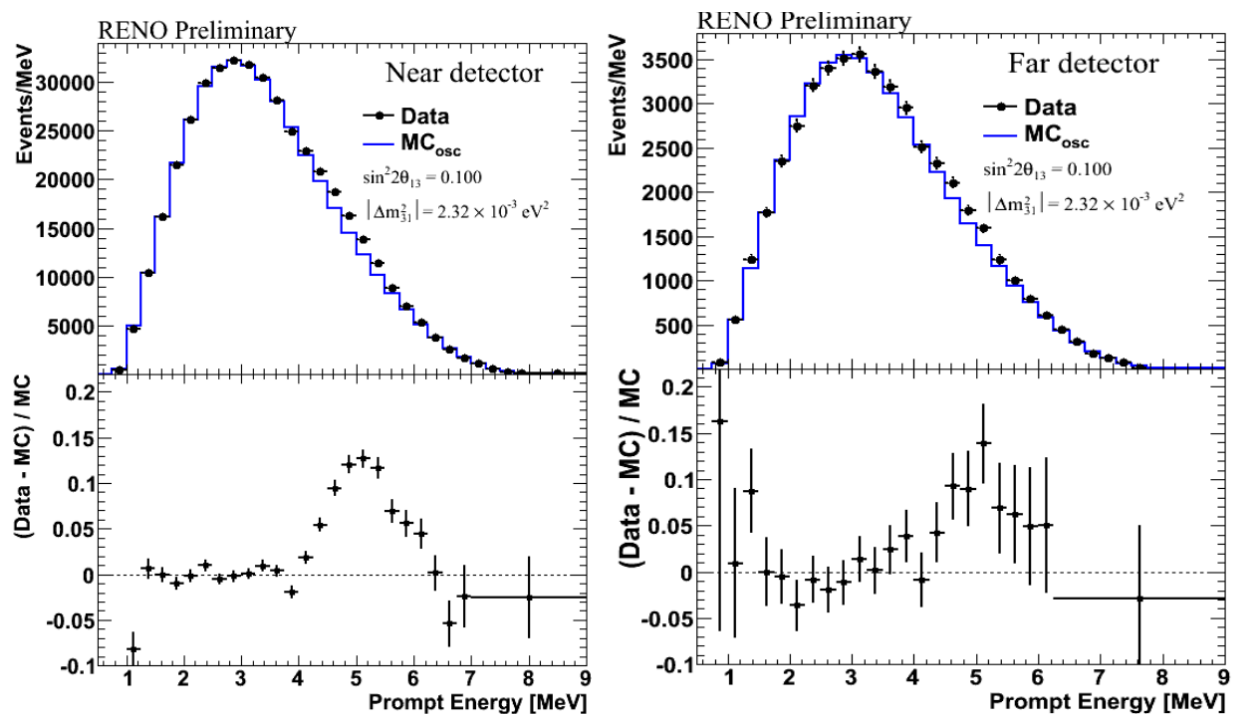


Рисунок 1 – График спектра мгновенных сигналов ОБР (точки) и ожидаемые события с осцилляциями (гистограммы) для ближнего и дальнего детекторов

Нижняя часть графика показывает разницу нормализованных к ожидаемым событиям. Избыток событий одинаково наблюдается на обоих детекторах <sup>[1]</sup>.

Первым предположением на объяснение скачка на энергиях 5 MeV стало указание на то, что искать природу скачка следует внутри активной зоны реактора.

Эти результаты также были подтверждены экспериментами Daya Bay в Китае и Double Chooz во Франции, экспериментальные установки устроены подобно эксперименту RENO.

Основные возможные объяснения, которые удалось найти в ходе этой работы:

1. Природа конкретных изотопов
2. Зависимость от продуктов деления
3. Несовершенство баз данных
4. Реакция  $^{13}\text{C}(\tilde{\nu}_e, n\tilde{\nu}_e)^{12}\text{C}$  в органических сцинтилляторах

## 1.1 Природа конкретных изотопов и зависимость от продуктов деления

Как уже было сказано, при на энергиях 5-7 МэВ возникает переизбыток антинейтринных событий в сравнении предсказанием модели Хубера-Мюллера конверсионным методом. Анализ альтернативным методом суммирования предполагает, что аномалия может быть связана со вкладом определённых бета-нестабильных продуктов деления.

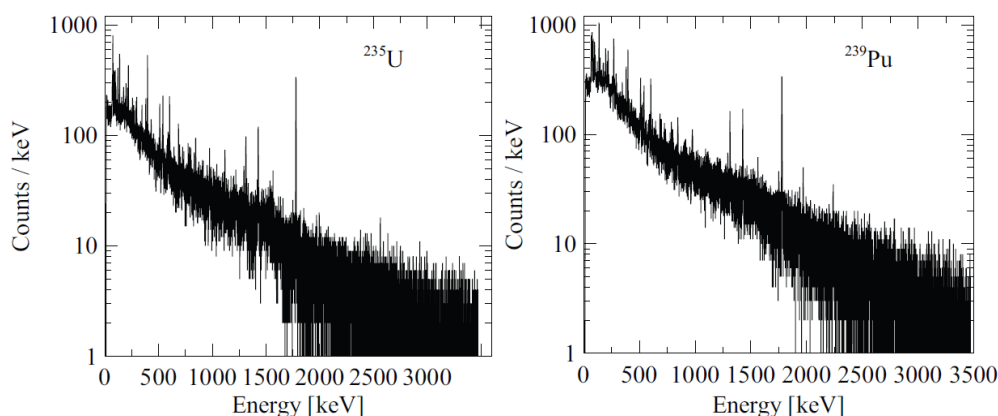


Рисунок 2 – Измеренный в эксперименте спектр гамма-лучей

Были взяты два радиоактивных изотопа  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Каждый объект облучали в течении 30 секунд и помещали в отделение детектора с помощью пневмотрубы.<sup>[2]</sup>

Совокупный выход, который использовался в статье:

$$CY_i = [N_{fd}]_i + \sum_{ij} \text{Decay}([N_{fd}]_j),$$

где 
$$N_{fd} = IFY\sigma_f\Phi \frac{mN_A}{M} (1 - e^{-\lambda t}),$$

IFY – независимый выход реакции специфичного нуклида;

$\sigma_f$  – сечение теплового нейтрона;

$\Phi$  – поток тепловых нейтронов.

Данные IFY были взяты из библиотеки JEFF3.3, а сечение из ENDF/B-VIII.0. Примечательно, что обе эти библиотеки имеют отличающиеся друг от друга значения IFY, что отображено в таблице 1:

Таблица 1 – Примеры цепочек  $^{140}\text{Cs}$ , основанные на данных двух библиотек. [RAS bump]

IFY ( $^{235}\text{U}$ )	$^{140}\text{Sb}$	$^{140}\text{Te}$	$^{140}\text{I}$	$^{140}\text{Xe}$	$^{140}\text{Cs}$
JEFF3.3	No data	6.57E-08 (2.26E-08)	3.03E-04 (1.03E-04)	1.25E-02 (3.10E-03)	1.84E-02 (3.85E-03)
ENDF/B-VIII.0	2.82E-09 (1.81E-09)	9.04E-06 (5.78E-06)	1.11E-03 (7.13E-04)	2.59E-02 (1.04E-03)	3.05E-02 (1.83E-03)
IFY ( $^{239}\text{Pu}$ )	$^{140}\text{Sb}$	$^{140}\text{Te}$	$^{140}\text{I}$	$^{140}\text{Xe}$	$^{140}\text{Cs}$
JEFF3.3	No data	2.33E-07 (8.06E-08)	4.77E-04 (1.63E-04)	1.83E-02 (4.06E-03)	2.18E-02 (4.52E-03)
ENDF/B-VIII.0	5.61E-11 (3.59E-11)	1.41E-06 (9.02E-07)	5.94E-04 (3.80E-04)	1.54E-02 (4.31E-04)	2.28E-02 (3.64E-03)

Для каждого гамма-излучения статистическая значимость определена методом, описанным выше, который включает два статистических предела: критический предел ( $L_c$ ) и предел обнаружения ( $L_d$ ). Конечный результат показан на рисунке 3

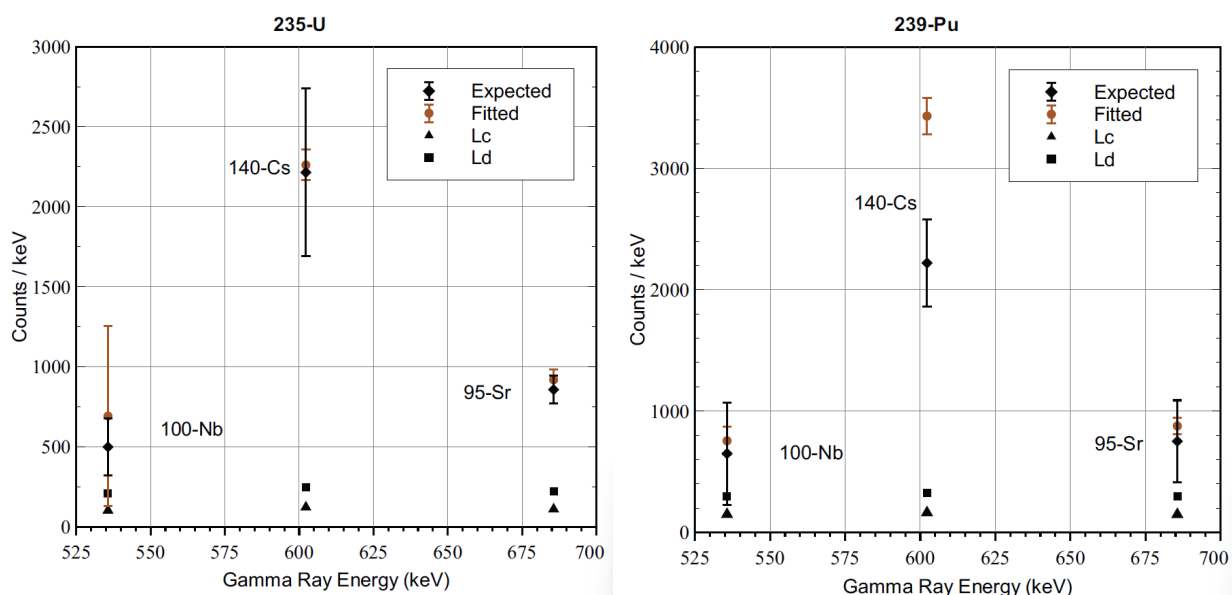


Рисунок 3 – Установленные и ожидаемые значения и статистические пределы изотопов

Как видно, установленное значение для  $^{140}\text{Cs}$  от  $^{239}\text{Pu}$  на 35% больше, чем ожидаемое значение, предполагается, что проблема, возможно, лежит в выходах реакций библиотеки JEFF3.3.  $^{93}\text{Rb}$ ,  $^{92}\text{Rb}$  и  $^{96}\text{Y}$  ниже статистического предела обнаружения и исключены из графика для ясности. [2]



## 1.2 Несовершенство баз данных

В другой статье, посвящённой исследованию антинейтринных аномалий, была рассмотрена их зависимость от ядерных баз данных. [3]

Были произведены расчёты для четырёх радиоактивных изотопов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ , на основе трёх различных баз данных: ENDF/B-VII.1, JEFF-3.1.1 и JENDL4.0. Предполагается, что бамп может быть хорошо объяснен с использованием обновленной библиотеки и определением более важного вклада изотопов в выход реакции.

Результаты расчётов отображены на рисунке 4. В каждом случае спектр рассчитывался от 0 до 10 MeV и спектры с энергиями в регионе от 2 до 8 MeV сравнивались со спектром Хубера-Мюллера. [3].

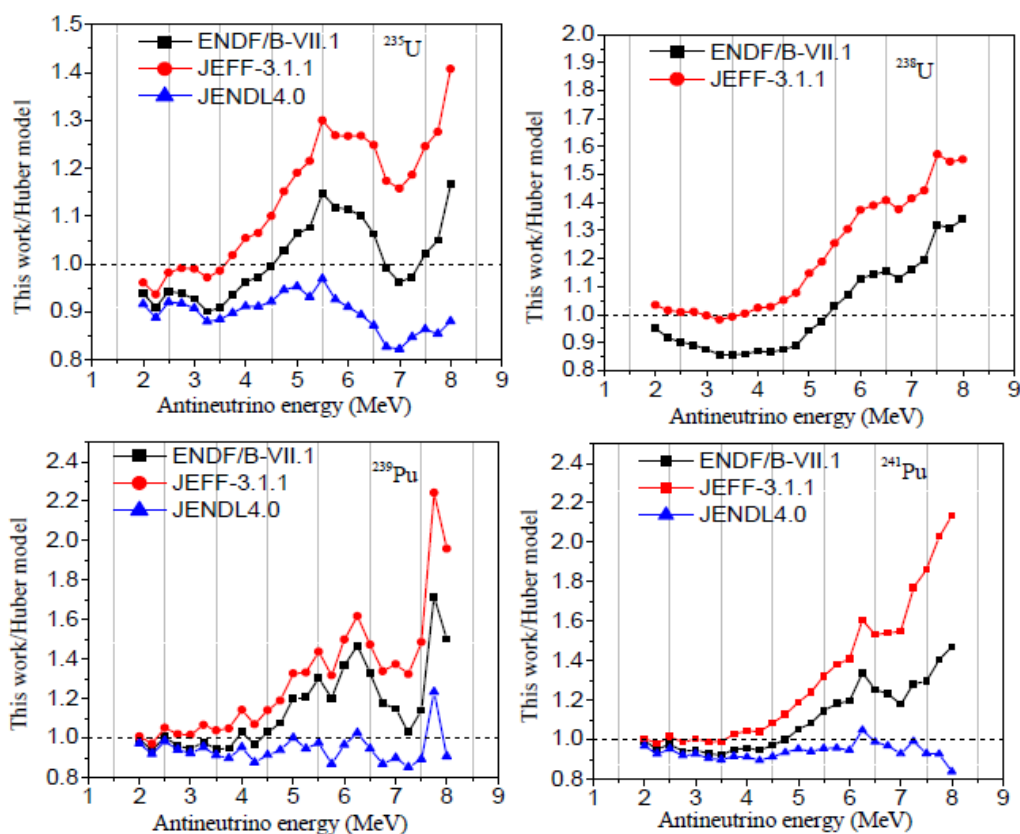


Рисунок 4 – Соотношение спектров с данными разных библиотек.

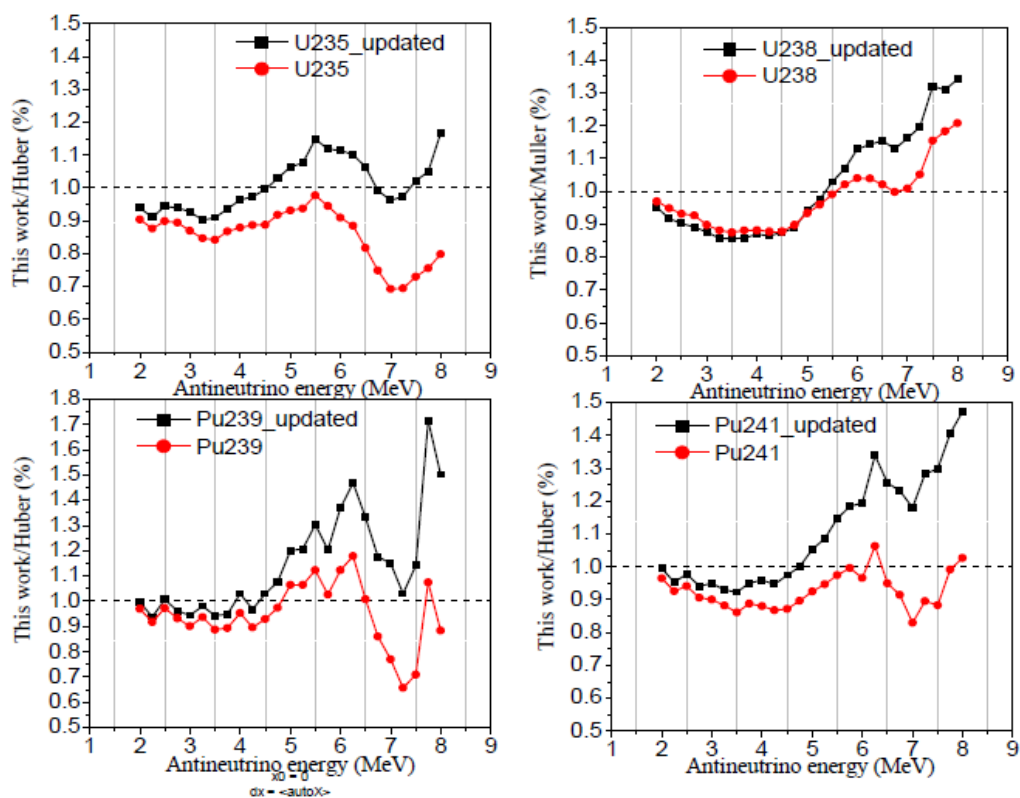


Рисунок 5 – Соотношение спектров с обновленной базой и оригинальной JENDL3.1.1

Заключается, что база данных ENDF/B-VII.1 предсказывает антинейтринную аномалию и что она возникает от аналогичных скачков в совокупных бета-спектрах. В отличие от которого, JEFF-3.1.1 не предсказывает скачок.

Хоть и было получено некоторое представление об аномалиях и была обнаружена аномалия при обновлении базы данных всё ещё остаётся слишком много неопределённостей для прогнозирования, чтобы сделать какой-либо весомый вывод

### 1.3 Реакция $^{13}\text{C}(\tilde{\nu}_e, n\tilde{\nu}_e)^{12}\text{C}^*$ в органических сцинтилляторах

Существует так же довольно экзотическая составляющая, дающая вклад в аномалию. Во многих реакторных экспериментах используются органические сцинтилляторы с определённым содержанием  $^{13}\text{C}$ . В статье «A Particle Physics Origin...» приводится реакция электронного антинейтрино с  $^{13}\text{C}$  в результате которой образуется возбуждённое ядро  $^{12}\text{C}^*$  с последующим снятием возбуждения фотоном с энергией 4.4 MeV.

Для получения каких-либо количественных оценок данной реакции было решено оценить её вклад для детектора iDREAM.

Общий вид реакции:



Количество реакций оценивалось по формуле:

$$N = \Phi \cdot \sigma \cdot N_{^{13}\text{C}} \cdot \varepsilon,$$

где  $\Phi$  – поток антинейтрино, регистрируемый детектором;

$\sigma$  – сечение реакции  $^{13}\text{C}(\tilde{\nu}_e, n\tilde{\nu}_e)^{12}\text{C}^*$ ;

$N_{^{13}\text{C}}$  – количество ядер  $^{13}\text{C}$  в мишени;

$\varepsilon$  – эффективность детектора, для расчёта, принимаем равным 1.

Во время работы реактора происходит непрерывный выход антинейтрино, равномерно распределённый по углу равному  $360^\circ$ . Реактор ВВЭР-1000, установленный на Калининской АЭС, имеет тепловую мощность равную 3 ГВт. На 1 ГВт тепловой энергии рождается порядка  $10^{20}$  антинейтрино в секунду.

Для нашего случая:

$$\Phi = 3 \cdot 10^{20} \tilde{\nu}_e/\text{секунду}.$$

Т.к. наш детектор располагается ровно под активной зоной (АЗ) реактора на расстоянии 20 метров до него долетает лишь часть антинейтрино от общего потока, найдём это значение:

Размеры ВВЭР-100:

$$D_{AZ} = 3.16 \text{ м}$$

$$H_{AZ} = 3.7 \text{ м.}$$

Размеры мишени iDREAM:

$$D_{IT} = 1.254 \text{ м}$$

$$H_{IT} = 1.32 \text{ м.}$$

Телесный угол:

$$S_a = 2\pi r_a^2 = 2\pi \cdot 1.56^2 = 2.434 \text{ м}^2;$$

$$S_b = 2\pi r_b^2 = 2\pi \cdot 0.627^2 = 0.4 \text{ м}^2;$$

$$\Omega_a = \frac{S_a}{R^2} = \frac{2.434}{400} = 0.006085 \text{ ср};$$

$$\Omega_b = \frac{S_b}{R^2} = \frac{0.4}{400} = 0.001 \text{ ср};$$

$$\frac{\Omega_a}{\Omega} = \frac{0.006085}{4\pi} = 0.0004842$$

$$\Phi_{\tilde{\nu}_a} = 3 \cdot 10^{20} \cdot 0.0004842 = 0.0014527 \cdot 10^{20}$$

$$\Phi_{\tilde{\nu}_b} = \frac{\Phi_{\tilde{\nu}_a} \cdot \Omega_b}{\Omega_a \cdot S_b} = \frac{1.453 \cdot 10^{17} \cdot 0.001}{0.006085 \cdot 4000} = 6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Сечение реакции  $^{13}\text{C}(\tilde{\nu}_e, n\tilde{\nu}_e)^{12}\text{C}^*$  принято равным  $1.038 \cdot 10^{-53} \text{ см}^2$ .<sup>[Neut 13C]</sup>

Определим количество ядер  $^{13}\text{C}$  в мишени:

В растворе линейного алкилбензола (ЛАВ) находится 35% содержание  $^{12}\text{C}$ , в природе содержится  $^{13}\text{C}$  в соотношении, примерно,  $0.01 \cdot ^{12}\text{C}$ , следовательно, в мишени содержится 0,35%  $^{13}\text{C}$  от 1 тонны всей мишени:

$$N_{13C} = N_A \cdot \frac{0.0035 \cdot m_{LAB}}{M_{13C}} = 6.022 \cdot 10^{23} \cdot \frac{0.0035 \cdot 10^6}{13} = 1.6 \cdot 10^{26} \text{ ядер}$$

Имея все нужные данные вычислим количество событий:

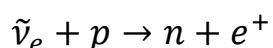
$$N = 6 \cdot 10^{12} \cdot 1.038 \cdot 10^{-53} \cdot 1.6 \cdot 10^{26} \cdot 1 = 9.965 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-1};$$

$$N = 9.965 \cdot 10^{-15} \cdot 86400 = 8,6 \cdot 10^{-10} \text{ день}^{-1}.$$

Полученное значение не является существенным и можно сделать вывод, что данная реакция будет иметь хотя бы минимальное значение лишь для очень больших по своим размерам детекторов из-за очень низкого значения сечения на энергиях реакторных антинейтрино.

## 2 УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТОРА iDREAM

Детектор iDREAM установлен на Калининской атомной электростанции. Процесс регистрации антинейтрино происходит за счёт процесса обратного бета-распада (ОБР), происходящих в объёме жидкого органического сцинтиллятора в результате захвата реакторного электронного антинейтрино:



Порог данной реакции равен 1,806 МэВ. Энергия антинейтрино не регистрируется напрямую из-за его слабого взаимодействия с веществом, но её можно определить по легко измеряемой энергии позитрона:

$$E = E_{\nu} - 1,8 + 1,02 \text{ МэВ}$$

Отбор происходит по задержанным совпадениям аннигилирующего позитрона и нейтрона, который после замедления и диффузии захватывается растворённым в сцинтилляторе гадолинии, испускающим каскадные гамма-кванты с суммарной энергией, приблизительно, равным 8 МэВ. Среднее время жизни нейтронов в жидком сцинтилляторе с гадолинием составляет порядка 30 микросекунд.

Детектор состоит из двух основных отсеков цилиндрической формы, сваренных из нержавеющей стали толщиной 2 мм, его структура показана на рисунке 6.

Внешний бак (ОТ) состоит из трёх герметично соединённых секций и имеет диаметр 1858 мм и высоту 1620 мм. (рис.1)

Внутренний бак (ИТ), представляющий наибольший интерес, жёстко закреплён на дне наружного бака и имеет диаметр 1254 мм и высоту 1320 мм. Разделён на две части выпуклой прозрачной мембраной из акрила с вертикальной трубкой, чтобы отделить мишень детектора от буферной зоны.

Для повышения эффективности светосбора дно и стенки покрыты светоотражающей плёнкой.<sup>[4]</sup>

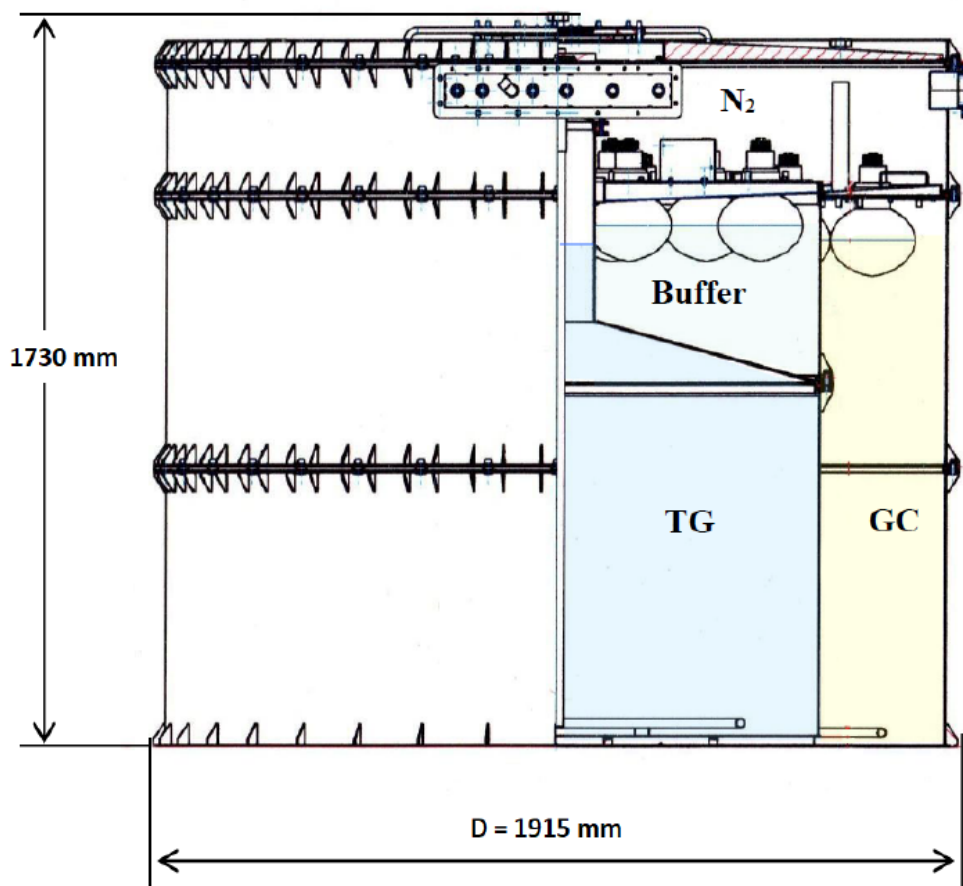


Рисунок 6 – Схематичное отображение детектора iDREAM

Детектор имеет три независимых друг от друга объёма:

- Мишень = 1,1 м<sup>3</sup>;
- Буферная зона = 0,4 м<sup>3</sup>;
- Гамма-кетчер = 1,7 м<sup>3</sup>.

Мишенью для антинейтрино (TG) является жидкий органический сцинтиллятор (ЖОС) с большим содержанием ядер водорода – линейный алкилбензол (ЛАБ) с растворённым в нём гадолинием концентрацией 1 г/л.

Буферная зона (Buffer) служит для защиты мишени от естественной радиоактивности фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и полностью заполнена ЛАБ без примесей.

Гамма-кетчер (GC) – поглотитель гамма-квантов, использующийся для повышения эффективности регистрации гамма-квантов, образовавшихся в мишени за счёт захвата нейтрона на гадолинии, а также для защиты мишени от высокоэнергетичных космических мюонов.

Система считывания сигнала также состоит из трёх отдельных наборов:

1. Сигнал считывается непосредственно в мишени
2. Сигнал считывается с фотоэлектронных умножителей, распределённых по всей площади цилиндрической стенки
3. Сигнал считывается с ФЭУ, расположенных на горизонтальной крышке детектора

В детекторе используются ФЭУ модели Hamamatsu R5912. В общей сложности установлено 28 ФЭУ: 16 во внутреннем баке и 12 во внешнем. Схема расположения ФЭУ на верхней части детектора показана на рисунке 7

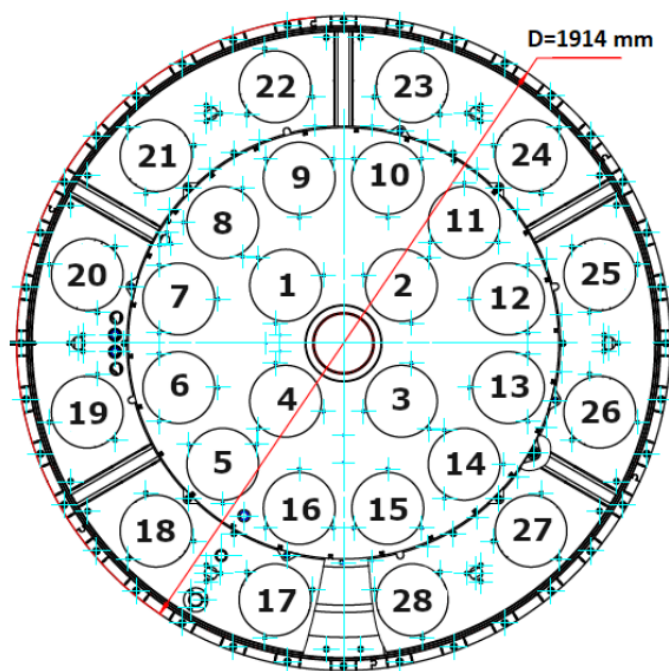


Рисунок 7 – Схема расположения ФЭУ в детекторе iDREAM



Детектор имеет цилиндрическую форму с характерными размерами 1915x1730 мм из свинца и делится на внутреннюю и внешнюю части.

Внешняя состоит из трёх секций скреплённых межфланцевыми уплотнительными кольцами Viton. Внутренняя же часть содержит в себе самую мишень, представляющую собой жидкий органический сцинтилятор массой 1 тонна на основе смеси LAB, содержащую в себе гадолиний в концентрации 10 грамм/литр.

Детектор обладает пассивной защитой нацеленной, в основном, на подавление окружающего нейтронного и гамма-радиоактивного фонов и состоит модульных пластин (экранов), которые состоят из четырёх слоёв: двух внутренних из борированного полиэтилена и кирпичей и двух внешних, которые собираются из пластин чистого полиэтилена. Конструкция детектора схематически представлена на рисунках 8 и 9. Всё это собирается на каркасе из нержавеющей стали, а внизу опора из чугунных блоков

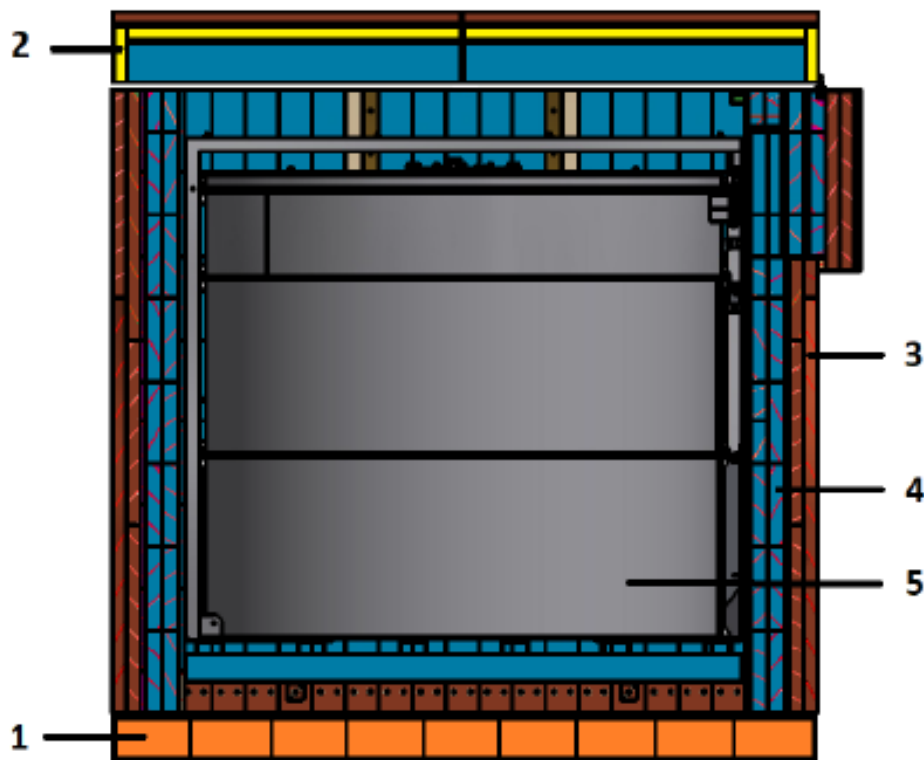


Рисунок 8 – Схематическое отображение устройства защиты детектора: 1 – чугунные блоки, 2 – свинец, 3 – чистый полиэтилен, 4 – борированный полиэтилен, 5 – детектор

Верхние двери защищены по периферии свинцовыми защитными кирпичами высотой 200 мм. Схема защиты детектора показана на рисунке 8

Так же для защиты от космических мюонов, падающих вертикально под прямым углом, на каждой полудвери установлены полиметилметакриловые плиты.

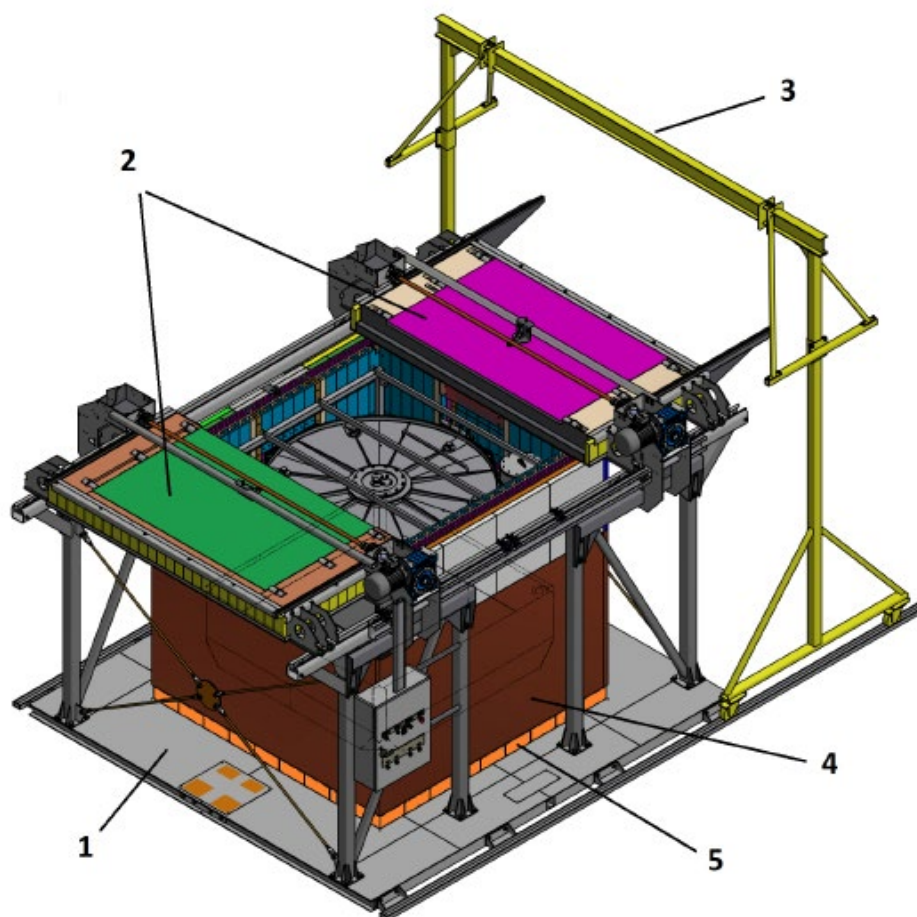


Рисунок 9 - Схематическое отображение устройства защиты детектора (вид сверху): 1 – скользящая платформа, 2 – мюонные плиты, 3 – кран, 4 – чистый полиэтилен, 5 – экранирующий слой из чугуна.

Так же из-за своего расположения под АЗ обладает естественной защитой в виде бетонных стен энергоблока и оборудования станции.<sup>[4]</sup>

### 3 ИСТОЧНИКИ КОРРЕЛИРОВАННОГО ФОНА ДЛЯ ДЕТЕКТОРА iDREAM

Основные источники фона носят, в основном, космический характер. Например, быстрые нейтроны, появляющиеся при столкновении космогенных мюонов с ядрами вещества, например, бетонными стенами АЭС или атомами воздуха.

В данной работе был проведён обзор следующих источников коррелированного фона:

- Остановки мюонов
- Космогенные радионуклиды  ${}^9\text{Li}$  и  ${}^8\text{He}$
- Быстрые космогенные нейтроны

Вышеперечисленные реакции в силу своей природы могут имитировать взаимодействия нейтрино по реакции ОБР (мгновенный и задержанный сигналы)

#### 3.1 Остановки мюонов

Останавливающиеся в детекторе  $\mu^-$ , как правило, захватываются на орбиту ядра, образуя мезоатом, после чего распадаются со временем, соответствующим времени жизни мюона в вакууме 2,2 мкс. Распад мюона происходит по схеме  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + 2\nu$ , так что образующийся при распаде электрон (позитрон) регистрируется детектором.

Захват мюона может имитировать мгновенный сигнал при энергиях  $E_1 = (3 \div 8)$  МэВ, а электрон (позитрон), образовавшийся при распаде отрицательного (положительного) мюона при энергиях  $E_2 = (5 \div 10)$  МэВ может имитировать задержанный сигнал.

Регистрация сигнала от пролетевшего мюона представлена на рисунке 10.

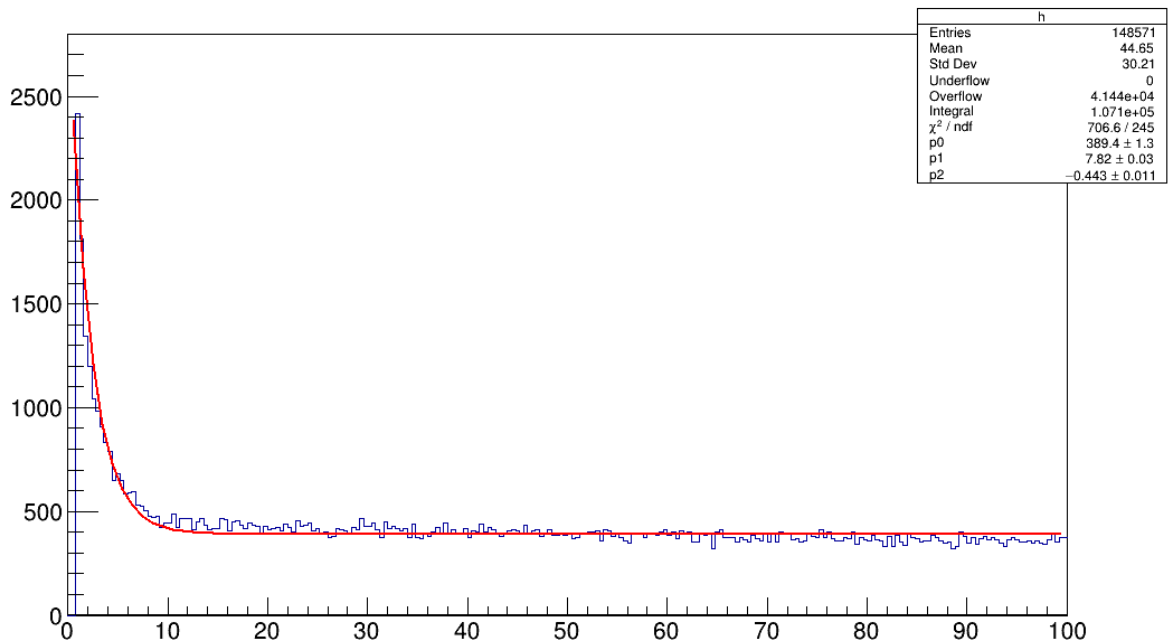


Рисунок 10 - Временной спектр событий в окне 100 мкс после зарегистрированного мюона

Для проверки предположения, что наблюдаемый в iDREAM уровень коррелированного фона объясняется остановками космических мюонов, было проведено отдельное исследование, в ходе которого был произведен отбор останавливающихся в детекторе мюонов и определена их скорость счета.

В ходе анализа было отобрано 142764 мюонов с энерговыделением в области  $E_1 = (3 \div 8)$  МэВ ( $5 \text{ с}^{-1}$ ). Из них только в 372-х случаях в течение 100 мкс было найдено событие с энерговыделением в области  $E_2 = (5 \div 10)$  МэВ.

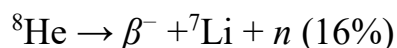
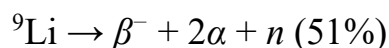
Учитывая уровень фоновых событий, представляющих собой случайные попадания во временное окно, получаем для скорости счёта останавливающихся мюонов при отборе по энергии  $E_1 = (3 \div 8)$  МэВ,  $E_2 = (5 \div 10)$  МэВ:  $R_\mu = (490 \pm 60)$  соб./сутки.

Однако, даже при столь значительном количестве регистрируемых событий этот вид фоновых событий может быть подавлен путем введения вето длительностью  $20 \div 30$  мкс после каждого зарегистрированного мюона.<sup>[5]</sup>

### 3.2 Космогенные радионуклиды ${}^9\text{Li}$ и ${}^8\text{He}$

Хоть можно достаточно легко исключить влияние космогенных мюонов на количество антинейтринных событий, введя задержку на сбор данных после регистрирования мюона, они всё ещё представляют опасность, т.к. при взаимодействии с углеродом могут образовывать радиоактивные изотопы, бета-распад которых может наложиться на захват нейтрона в реакции ОБР, наибольшее влияние оказывают  ${}^9\text{Li}$  и  ${}^8\text{He}$

Радионуклиды, распадающиеся через  $\beta$ -распад, представляют опасность из-за возможности случайного наложения на событие захвата нейтрона, так что пара таких событий будет имитировать реакцию обратного бета-распада. Еще большую опасность представляют изотопы  ${}^9\text{Li}$  и  ${}^8\text{He}$ ,  $\beta$ -распады которых могут сопровождаться испусканием нейтрона, что непосредственно имитирует реакцию ОБР. Схемы и вероятности распада  ${}^9\text{Li}$  и  ${}^8\text{He}$  представлены ниже:



Из-за их большого времени жизни, которое для  ${}^9\text{Li}$  составляет 257,2 мс, а для  ${}^8\text{He}$  - 171,8 мс, использовать мертвое время активной защиты для подавления этого источника фона невозможно.<sup>[6]</sup>

Nucifer collaboration в своей работе «Online monitoring of the Osiris reactor with the Nucifer neutrino detector» провели оценку влияния фона от космогенных  ${}^9\text{Li}$  и  ${}^8\text{He}$  на основе данных эксперимента Double Chooz. В ходе работы не было точно зарегистрировано количество событий со вкладом  ${}^9\text{Li}$ , поэтому были отмасштабированы значения для детектора Double Chooz и получена верхний предел событий для событий  ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$  12 событий/день.<sup>[7]</sup>

Nucifer collaboration имеет детектор с аналогичными детектору iDREAM

характеристиками мишени. Следовательно, данная оценка может быть также применена и для детектора iDREAM.

### 3.3 Быстрые космогенные нейтроны

Быстрые нейтроны от взаимодействий мюонов космических лучей образуются в результате следующих процессов:

а) Взаимодействие мюонов с ядрами через виртуальный фотон, что приводит к распаду ядер. Этот процесс обычно называют «расщеплением» (от англ. spallation) и он является основным источником теоретической неопределенности при моделировании.

б) Упругое рассеяние мюонов с нейтронами, связанными в ядрах.

в) Фотоядерные реакции, связанные с электромагнитными ливнями, образованными мюонами.

г) Образование вторичных нейтронов после любого из упомянутых процессов.

Процессы б) и в) достаточно хорошо изучены, в то время как а) и г) имеют неопределенности.

Нейтроны также могут рождаться от мюонов, которые останавливаются и захватываются в веществе, что приводит к образованию высоковозбужденных изотопов, испускающих один или несколько нейтронов. Такие процессы достаточно хорошо изучены.

Образовавшиеся в мишени детектора iDREAM нейтроны замедляются и захватываются растворенным в ней гадолинием, среди изотопов которого наибольшим сечением захвата обладают изотопы  $^{155}\text{Gd}$  ( $\sigma_{\text{захв}} = 5,6 \cdot 10^4$  барн,  $E_{\gamma} = 8,5$  МэВ) и  $^{157}\text{Gd}$  ( $\sigma_{\text{захв}} = 2,5 \cdot 10^5$  барн,  $E_{\gamma} = 7,9$  МэВ). С меньшей вероятностью будут происходить захваты на водороде с испусканием  $\gamma$ -кванта

с энергией 2,23 МэВ ( $\sigma = 0,332$  барн) или углероде с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 4,95 МэВ ( $\sigma = 0,0034$  барн).<sup>[6]</sup>

Стоит отметить, что замедление нейтронов происходит в результате соударений с протонами в жидком сцинтилляторе, так что отдача протона дает импульс, который по энергии может имитировать мгновенный сигнал. Вместе с тем, захват нейтрона будет давать задержанный сигнал, что в итоге даст имитацию сигнатуры реакции ОБР.

В работе «Cosmic-Ray-Produced Neutrons at Ground Level: Neutron Production Rate and Flux Distribution» определён поток быстрых нейтронов на уровне моря для энергий в диапазоне 1-10 МэВ.<sup>[8]</sup>

$$N = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ нейтронов}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Стоит учитывать, что детектор iDREAM располагается внутри энергоблока Калининской АЭС и снабжён собственной защитой, что оказывает влияние, на количество регистрируемых детектором нейтронных событий

#### 4 АНАЛИЗ ИЗМЕРЕННОГО ФОНА ДЕТЕКТОРА ПРИ ВЫКЛЮЧЕННОМ РЕАКТОРЕ

Для измерения «чистого» фона были обработаны все серии измерений в режиме R-OFF со следующими условиями отбора событий:

- Время между событиями  $< 100$  мкс;
- Энергия первого события  $E_{pos} = (3 \div 8)$  МэВ;
- Энергия второго события  $E_n = (5 \div 10)$  МэВ;
- В течение 100 мкс до первого события и 100 мкс после второго не зарегистрировано ни одного события.

Для оценки уровня фона и анализа его структуры было использовано распределение времен между первыми и вторыми событиями в парах кандидатов и случайных наложений, которое представлено на рисунке 25. Как следует из рисунка, фон детектора обусловлен двумя составляющими: коррелированный фон и случайный фон. При этом, вклад случайного фона составляет 88%, а коррелированного – 12%. Большую часть коррелированного фона можно объяснить распадами остановившихся в детекторе космических мюонов, время жизни которых составляет 2,2 мкс. Совокупность всех событий показана на рисунке 11

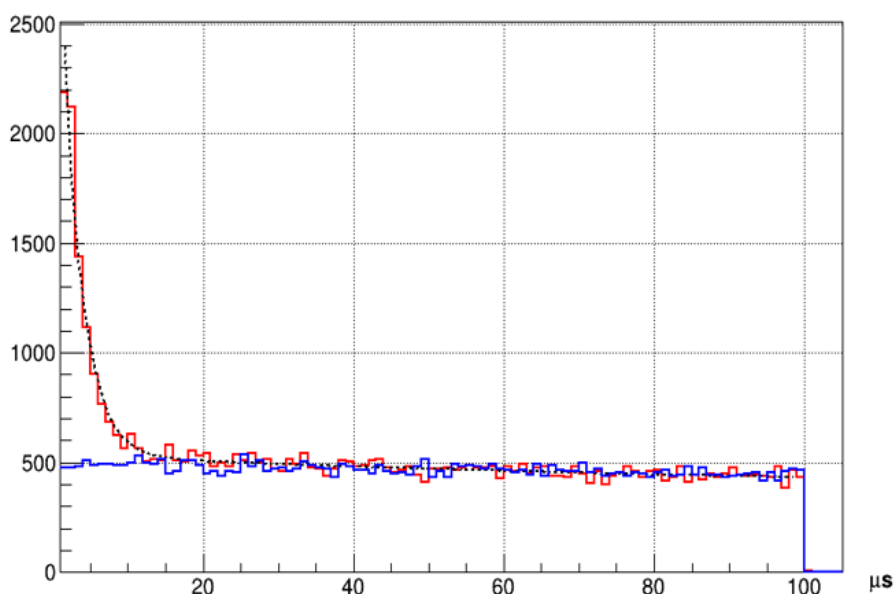


Рисунок 11 - Время между событиями в парах кандидатов (красный) и случайных парах



На основании рисунка 11, интенсивность фоновых событий при выключенном реакторе можно представить, как сумму случайных наложений и коррелированных событий:

$$\text{Фон} = 3050 \text{ соб./сутки (случ.)} + 410 \text{ соб./сутки (корр.)}$$

Таким образом, за 15,352 дней набора статистики при выключенном реакторе всего было отобрано 53093 событий-кандидатов. Скорость счета событий-кандидатов при выключенном реакторе составила:

$$R_{\text{ОБР}} (\text{OFF}) = (3458 \pm 15) \text{ соб./сутки}$$

Из них случайных:

$$R_{\text{случ}} (\text{OFF}) = (3053 \pm 14) \text{ соб./сутки}$$

После вычитания из числа событий-кандидатов числа случайных получаем для скорости счета при выключенном реакторе (чистый фон) при условиях отбора событий по энергии  $E_{\text{pos}} = (3 \div 8) \text{ МэВ}$ ,  $E_n = (5 \div 10) \text{ МэВ}$  и временном интервале между событиями 100 мкс:

$$R(\text{OFF}) = (405 \pm 21) \text{ соб./сутки}$$

Как уже было сказано выше в пункте 3.1 количество событий от останавливающихся мюонов с учётом уровня фоновых событий, представляющих собой случайные попадания во временное окно

$$R_{\mu} = (490 \pm 60) \text{ соб./сутки}$$

Измеренный поток нейтронов в помещении, где установлен детектор iDREAM составляет  $\Phi_n = 42 \text{ нейтронов}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что оказывается больше, чем вне помещения (порядка 17 нейтронов/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ )

Скорость счета нейтронов внутри защиты составила:  $R_n (\text{iDREAM}) = 0,03 \text{ нейтронов/с}$ . Таким образом, пассивная защита iDREAM обеспечила подавление потока нейтронов более чем в 100 раз.<sup>[5]</sup>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения учебной практики (ознакомительной) были выполнены следующие поставленные задачи:

1. Анализ возможных объяснений спектральной антинейтринной аномалии, заключающейся в экспериментальном превышении ожидаемого числа событий в области энергий 4-6 МэВ
2. Изучение основных компонентов регистрируемого коррелированного фона детектора iDREAM

Объяснение природы спектральной антинейтринной аномалии может позволить лучше понять процессы, происходящие внутри реактора, и расширить имеющиеся данные о физических процессах, связанных с нейтрино.

Понимание природы коррелированного фона и всех событий, формирующих его, позволяет более точно отсеивать кандидатов от событий, что повышает точность и надёжность детектора, как устройство для удалённого мониторинга состояния реактора.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seon-Hee Seo «New Results from RENO and the 5 MeV Excess». Seoul National University Department of Physics & Astronomy, 2014
2. «Reactor Antineutrino Spectral “Bump”: Cumulative Fission Yields of Irradiated  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  Measured by HPGe Gamma-Ray Spectroscopy»/ [Samuel Kim and others]
3. «Investigation of antineutrino spectral anomaly with updated nuclear database»/ [Ma Xubo and others]
4. «iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant»/ [A. Abramov and others]
5. Отчет о НИОКР «Разработка метода нейтринного контроля ядерного реактора: натурный эксперимент на Калининской АЭС» за 6 этап (2021).
6. Отчет о НИОКР «Разработка метода нейтринного контроля ядерного реактора: натурный эксперимент на Калининской АЭС» за 5 этап (2021).
7. « Online monitoring of the Osiris reactor with the Nucifer neutrino detector»/ [G. Boireau and others]
8. Mikio Yamashita, Lloyd D. Stephens, H. Wade Patterson «Cosmic-Ray-Produced Neutrons at Ground Level: Neutron Production Rate and Flux Distribution»