Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

> Институт ядерной физики и технологий Кафедра №40 "Физика элементарных частиц"

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС

Студент

_____ А. А. Нуркенов

Научный руководитель к.ф.-м.н

_____ Е. А. Литвинович

Москва2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение			3
1	Детектор iDream		4
	1.1	Устройство детектора	4
	1.2	Калибровка детектора	7
2	Сигнал антинейтрино в детекторе iDream		9
	2.1	Сигнал антинейтрино детектором iDream с учётом фоновых	
		событий	10
		2.1.1 Случайный фон	11
		2.1.2 Коррелированный фон	13
		2.1.3 Сигнал антинейтрино	14
	2.2	Рассчётная скорость счёта антинейтрино	15
3	Ско	рость счёта антинейтрино в детекторе iDREAM	17
4	Оце	енка методов вычисления случайного фона	18
	4.1	Временной скачок вперёд на промежуток превышающий вре-	
		мя жизни нейтрона в среде детектора	18
	4.2	Временной скачок назад на промежуток превышающий вре-	
		мя жизни нейтрона в среде детектора	19
	4.3	Отбор случайных наложений в кластере кандидатов	20
	4.4	Сравнение методов вычисления случайного фона	21
За	аклю	очение	23
Список литературы		24	

введение

Целью данной научно-исследовательской работы является определение неоднородности светособирания детектора iDREAM и построения кривой, отображающей долю собираемого света относительно центра мишени с целью оценки разрешающей способности детектора после слива воды в буферной зоне или верхнего слоя сцинтиллятора.

Детектор iDREAM (Industrial Detector of Reactor Antineutrinos for Monitoring) задумывался, как прототип промышленного детектора для реакторного мониторинга с высокой степенью ремонтопригодности 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.

В ходе исследовательских работ были отдельно слиты объём буферной зоны и верхний слой сцинтиллятора с проведением калибровочных ранов на бета-радиоактивном изотопе кобальта, чтобы определить коэффициент потерь собираемого света внутри всей мишени относительно центра.

1 ДЕТЕКТОР IDREAM

Детектор iDREAM установлен на третьем энергоблоке 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:

$$\tilde{\nu_e} + p \to n + e^+$$

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:

$$E = E_{\nu} - 1.8 + 1.02 \text{ M} \Rightarrow B$$

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.

1.1 УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТОРА

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

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

Внутренний бак (IT), 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.



Рисунок 1.1 — Схематичное изображение детектора iDream

Детектор имеет три независимых друг от друга объёма:

- Мишень = 1.1 м^3 ;
- Буферная зона = 0.4 м^3 ;
- Гамма-кетчер = 1.7 м^3 ;

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
- 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 1.2 — Схема расположения ФЭУ в детекторе iDream

Детектор имеет цилиндрическую форму с характерными размерами 1915х1730 мм из свинца и делится на внутреннюю и внешнюю части.

Внешняя состоит из трёх секций скреплённых межфланцевыми уплот-

нительными кольцами Viton. Внутренняя же часть содержит в себе саму мишень, представляющую собой жидкий органический сцинтилятор массой 1 тонна на основе смеси LAB, содержащую в себе гадолиний в концентрации 1 грамм/литр.

1.2 КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

В качестве радиоактивных источников используются ¹³⁷Cs ($E_{\gamma} = 0.662 \text{ МэВ}$), ⁵⁴Mn ($E_{\gamma} = 0.835 \text{ МэВ}$), ⁶⁵Zn ($E_{\gamma} = 1.115 \text{ МэВ}$), ⁶⁰Co ($E_{\gamma} = 1.173, 1.332 \text{ МэВ}$), а также ²⁵²C f в качестве источника быстрых нейтронов^[2].

В данной работе нас интересует источник ^{252}Cf . Он используется для калибровки, установки энергетической шкалы детектора и определения времени жизни нейтронов в веществе мишени.

Калифорний является альфа-распадчиком, в 3.1% случаев претерпевающим спонтанное деление. На один акт деления испускается, в среднем, 3.75 нейтронов и 7.98 гамма-квантов, при этом средняя энергия испускаемых нейтронов составляет 2.12 МэВ, а средняя энергия гамма-квантов – 0,87 МэВ.

Ввиду того что источник помещен в капсулу из нержавеющей стали с толщиной стенок 0.5 мм, все вылетающие α -частицы и осколки деления поглощаются в защитном контейнере и не попадают в сцинтиллятор. Таким образом, при калибровках источником ^{252}Cf детектор регистрирует сначала мгновенные γ -кванты спонтанных делений, а затем коррелированные с ними нейтроны, распределенные во временном интервале $\sim 5\tau$, где τ – время захвата нейтрона в сцинтилляторе.

После замедления в сцинтилляторе, нейтроны захватываются ядрами гадолиния, сопровождаемые несколькими аннигиляционными γ -квантами с суммарной энергией в районе 8 МэВ. Следует отметить, что быстрые нейтроны от источника также могут вылететь за пределы мишени без поглощения.

В ходе анализа отбирались кластеры событий с одним мгновенным сигналом в диапазоне энергий 5 - 12 МэВ, после его регистрации открывалось окно длительностью 100 мкс, в течение которого отбирались задержанные сигналы в диапазоне энергий 1.8 - 10 МэВ.

7



Рисунок 1.3 — Спектры
 $^{252}Cf:$ (а) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

Полученно соотношение задержанных сигналов к мгновенным:

$$\frac{n_{delayed}}{n_{prompt}} = \frac{134173}{43302} = 3.09854$$

Измеренный временной спектр захвата нейтронов в сцинтилляторе приведён на рис. 1.3в. Аппроксимация спектра функцией $f(t) = exp(-t/\tau) + const$, где τ – время захвата нейтронов, даёт $\tau = 36.55$ мкс.

Энергетическая шкала выставляется по положению пика захвата нейтронов на водороде, который принимается равным 2.2 МэВ (рис. 1.36).

2 СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

В ходе анализа были обработаны данные, набранные в течении 10 суток.

Основными критериями отбора кандидатов являются:

- $E_{prompt} = [3 \div 8]$ M₃B;
- $E_{delayed} = [5 \div 10] \text{ M} \Rightarrow \text{B};$
- Время между мгновенным и задержанным сигналами $\Delta T_{12} = [2 \div 100]$ мкс;
- Перед мгновенным и после задержанного сигналов не было зарегестрированно ни одного другого сигнала во временном промежутке равным 100 мкс.

Используя приведённые выше критерии были полученны спектры приведённые на рис. 2.1. Полученное количество зарегистрированных событий равняется 31029



Рисунок 2.1 — Спектры кандидатов фона: (а) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

2.1 СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО ДЕТЕКТОРОМ IDREAM С УЧЁТОМ ФОНОВЫХ СОБЫТИЙ

Порог энергии для мгновенного сигнала определяется тем, что при энергиях ниже 3 МэВ резко возрастает фон для регистрируемых событий.

По тем же причинам для регистрации задержанного сигнала выбирается диапазон энергий, соответствующий захвату нейтронов на гадолинии, пик которого наблюдается вблизи 8 МэВ.

Из-за высокого уровня случайного фона, как было указано выше, бы-

ло решено ограничить временное окно для регистрации задержанного сигнала до 100 мкс. Это решение отсекает, приблизительно, 5% антинейтринных событий, но позволяет снизить влияние случайного фона в несколько раз. Ограничение временного окна от 2 мкс обусловлено наличием коррелированного фона от останавливающихся мюонов, влияние которых можно полностью исключить введением вето равным 2 мкс.

2.1.1 СЛУЧАЙНЫЙ ФОН

Средняя скорость счёта детектора составляет ~ 1 кГц, что приводит к высокому уровню случайного фона.

Случайный фон представляет собой случайное наложение друг на друга двух сигналов, похожих на реакцию ОБР, но некоррелированных между собой

Для определения числа наложений случайных событий от зарегестрированного мгновенного сигнала производится скачок вперед на время большее, чем временное окно для регистрации задержанного сигнала, в данной работе скачок принимается равным 500 мкс, и в этом моменте отбирается случайный кандидат с теми же критериями^[4]. Схема отбора случайного фона приведена на рис. 2.2



Рисунок 2.2 — Схема расположения ФЭУ в детекторе iDream

Согласно критериям отбора случайных наложений были получены спектры приведённые на рис. 2.3



Рисунок 2.3 — Спектры кандидатов фона: (а) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

Разница этих спектров показана на рис. 2.4. Красная линия - кандидаты, синяя - случайные наложения, зелёный - разница



Рисунок 2.4 — Спектры кандидатов фона: (a) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

2.1.2 КОРРЕЛИРОВАННЫЙ ФОН

Коррелированный фон представляет собой уже реальную скоррелированную пару событий, моделирующих сигнатуру обратного бета-распада. Для учёта вклада этого фона были использованы те же критерии отбора на данных собранных в период при выключенном реакторе (R_OFF).

Общие спектры с учётом случайных наложений приведены на рис. 2.5



Рисунок 2.5 — Спектры кандидатов фона: (а) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

2.1.3 СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО

С помощью изложенных выше спектров получаем спектр сигнала антинейтрино, рис. 2.6. Красная линия соответствует периоду R_ON, зелёная - периоду R_OFF, синяя - разница.

С учётом мертвого времени детектора была получена средняя скорость счёта детектора:

$$R_{\nu} = 1629 \pm 81 \text{ сутки}^{-1}$$



Рисунок 2.6 — Спектры кандидатов фона: (a) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

2.2 РАССЧЁТНАЯ СКОРОСТЬ СЧЁТА АНТИНЕЙТРИНО

Получить ожидаемую скорость счёта антинейтрино/день детектором в зависимости от тепловой мощности реактора можно по формуле^[5]:

$$R_{\nu} = \frac{N_p \epsilon \sigma_{235}}{4\pi L^2 E_{235}} (1+k) P_{th} * 24$$

где N_p - количество протонов в мишени, ϵ - эффективность регистрации детектором, σ_{235} - сечение ОБР, усреднённое по спектру антинейтрино от ^{235}U , L - расстояние от АЗ до детектора, E_{235} - средняя энергия деления ^{235}U , (1+k) - множитель, учитывающий вклад изотопов ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , P_{th} - тепловая мощность реактора Для детектора iDream соответствуют значения:

$$N_p = 7 * 10^{28}$$

 $\epsilon = 0.22 \pm 0.01$
 $\sigma_{235} = (6.27 \pm 0.13) * 10^{-43} \text{ cm}^2$
 $L = 19.5 \pm 0.1 \text{ m}$
 $E_{235} = 201.9 \pm 0.5 \text{ M}$ əB
 $(1 + k) = 0.94 \pm 0.02$
 $P_{th} = 3 \Gamma \text{BT}$

Погрешность расчёта:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_W^2 + \sigma_E^2 + \sigma_S^2 + \sigma_\alpha^2} \approx 2.4\%$$

где $\sigma_W \approx 1.8\%$, погрешность в определении мощности реактора; $\sigma_E \approx 0.1\%$, погрешность, вносимая энергией, выделяющейся на одно деление; $\sigma_E \approx 1.16\%(KI)$, погрешность, вносимая спектром антинейтрино, приходящимся на одно деление; $\sigma_E \approx 1\%$, погрешность, вносимая долями деления;

В соответствии с указанными данными был получен ожидаемый счёт антинейтрино для промежутка времени учавствовашего в анализе данных:

$$R_{\nu} = 1522 \pm 36 \text{ сутки}^{-1}$$

3 СКОРОСТЬ СЧЁТА АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

Методика описанная выше была применена для определения скорости счёта антинейтринных событий на протяжении всей компании. В связи с выгоранием U²³⁵ и наработкой Pu²³⁹ ожидается снижение потока антинейтрино из A3 реактора, таким образом на начало и конец кампании ожидаются равными $R_{\nu} = 1554 \pm 37$ и 1490 ± 36 сутки⁻¹ соответственно



Рисунок 3.1 — Скорость счёта реакторных антинейтрино детектором iDREAM

На рис. 3.1 указана скорость счёта реакторных антинейтрино детектором iDREAM за весь период времени работы. Промежуток 08.10.2022 – 27.12.2022 соответствует режиму работы при выключенном реакторе для планового ремонта, в данный период набиралась статистика для определения уровня коррелированного фона детектора, количество событий в этот промежуток равно нулю, т.к. на графике указано количество событий с вычетом случайного и коррелированного фонов. С 01.10.2023 видно резкое падение скорости счёта, что вызвано снижением высокого напряжения на ФЭУ мишени на 10%.

4 ОЦЕНКА МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ФОНА

Методика вычисления случайного фона, приведённая в разд. 2.1.1 является не единственной. Полезно опробовать и сравнить разные методики для эксперимента iDREAM для определения наиболее оптимального способа оценки случайных наложений. Для оценки всех способов был выбран больший временной период, чем в гл. 2. Данные в анализе набирались с 23.03.2023 до 23.06.2023, живое время составило 70.15 суток. Важными критериями для выбора метода вычисления случайного фона являются

- Выход временного спектра случайных наложений сходится с временным спектром кандидатов на временах близких к 100 мкс;
- Равномерность распределения

4.1 ВРЕМЕННОЙ СКАЧОК ВПЕРЁД НА ПРОМЕЖУТОК ПРЕВЫШАЮЩИЙ ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА В СРЕДЕ ДЕТЕКТОРА

Различные вариации данной используются в эксперименте iDREAM в настоящее время, в т.ч. согласно ей былы произведены расчёты, приведённые выше в гл. 2.

Для данной работы был выбран временной отступ вперёд равный 1000 мкс. Фиттирование распределения, показанного на рис. 4.1, полиномом первой степени даёт:

$$y = -2.687x + 2206$$



Рисунок 4.1 — Скорость счёта реакторных антинейтрино детектором iDREAM

4.2 ВРЕМЕННОЙ СКАЧОК НАЗАД НА ПРОМЕЖУТОК ПРЕВЫШАЮЩИЙ ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА В СРЕДЕ ДЕТЕКТОРА

Данный метод по принципу похож на предыдущий, за исключением того, что скачок происходит назад во времени. Здесь временной отступ от кандидата на позитрон также принимается равным 1000 мкс, после чего также ищется случайный кандидат на нейтрон с критериями аналогичными для основного отбора.

Фиттирование распределения, показанного на рис. 4.2, полиномом первой степени даёт:

y = -2.325x + 2182



Рисунок 4.2 — Скорость счёта реакторных антинейтрино детектором iDREAM

4.3 ОТБОР СЛУЧАЙНЫХ НАЛОЖЕНИЙ В КЛАСТЕРЕ КАНДИДАТОВ

Третий метод, в основном, использовался при невозможности сохранения большого объёма данных всех взаимодействий внутри мишени.

От первого события в кластере открывалось временное окно равное 300 мкс, в течение которого ждали следующее изолированное событие. Если задержанный сигнал попадал в промежуток 0-100 мкс, то такая пара принималась как кандидат, если он попадал в промежуток 200-300 мкс, то такая пара считалась случайным фоном. Сигнал попавший в окно 100-200 мкс отбрасывался из-за сложностей идентификации природы сигнала.

Полученный данным методом спектр представлен на рис. 4.3



Рисунок 4.3 — Скорость счёта реакторных антинейтрино детектором iDREAM

4.4 СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ФОНА

Для наглядности все полученные временные спектры отображены на одном графике вместе со спектром кандидатов. Синим цветом обозначены отобранные кандидаты без учёта коррелированного и случайного фонов, чёрныму цвету соответствует временное распределение первого метода, второму – фиолетовый, зелёному – третий.



Рисунок 4.4 — Скорость счёта реакторных антинейтрино детектором iDREAM

Третий метод показывает наихудшие результаты в силу наименьшей равномерности распределения и схождения со спектром кандидатов на временах близких к 100 мкс. Первые два метода дают очень похожий результат, если фиттировать каждый спектр полиномом первой степени получим:

1) y = -2.687x + 2206

2) y = -2.325x + 2182

Отсюда можно сделать вывод, что наиболее оптимальным методом вычисления случайного фона из рассмотренных является второй метод

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были:

- Проведён анализ данных на основе калибровочного источника ²⁵²Cf и получено ожидаемое время жизни нейтрона в веществе детектора
- Получены сигналы антинейтрино от реакции ОБР с учётом случайного и коррелированного фонов
- Измерена скорость счёта антинейтрино детектором iDream в период до и после перегрузки топлива. Показано, что при одинаковой мощности реактора скорость счета антинейтрино отличается в конце и начале топливной кампании.
- Рассчитана ожидаемая, средняя скорость счёта антинейтрино детектором iDREAM.
- Проведен сравнительный анализ алгоритмов измерения случайного фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] "iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant»/ [A. Abramov and others]
- [2] Отчет о НИОКР «Разработка метода нейтринного контроля ядерного реактора: натурный эксперимент на Калининской АЭС» за 6 этап (2021).
- [3] Отчет о НИОКР «Разработка метода нейтринного контроля ядерного реактора: натурный эксперимент на Калининской АЭС» за 5 этап (2021).
- [4] «Online monitoring of the Osiris reactor with the Nucifer neutrino detector»/ [G. Boireau and others]
- [5] Neutrino method remote measurement of reactor power and power output
 / Y. V. Klimov [и др.]. 1994.
- [6] Kopeikin V., Skorokhvatov M., Titov O. Reevaluating reactor antineutrino spectra with new measurements of the ratio between 235U and 239Pu β spectra // Physical Review D. - 2021. - Οκτ. - Τ. 104, № 7.