

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

Москва 2024

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 Скорость счёта антинейтрино детектором iDream	10
2.2 Рассчётная скорость счёта антинейтрино	15
Список литературы	18

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.

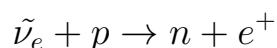
Детектор iDREAM (Industrial Detector of Reactor Antineutrinos for Monitoring) задумывался, как прототип промышленного детектора для реакторного мониторинга с высокой степенью ремонтпригодности и облегчённым монтажом при установке. Ожидается, что развитие технологии прикладного нейтринного мониторинга 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.

В ходе исследовательских работ были отдельно слиты объём буферной зоны и верхний слой сцинтиллятора с проведением калибровочных раундов 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:



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.

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 (ОТ) 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.

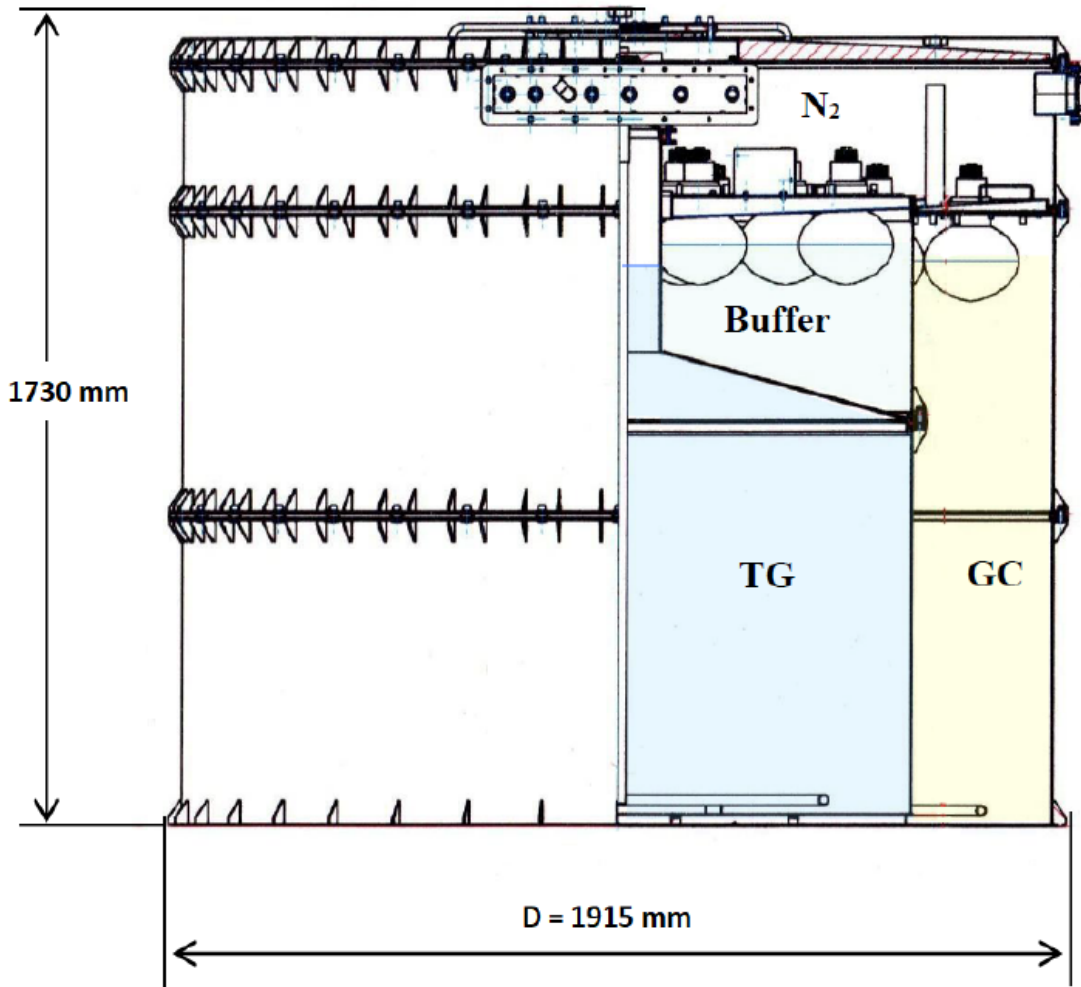


Рисунок 1.1 — Схематичное изображение детектора iDream

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 (ГС) – 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

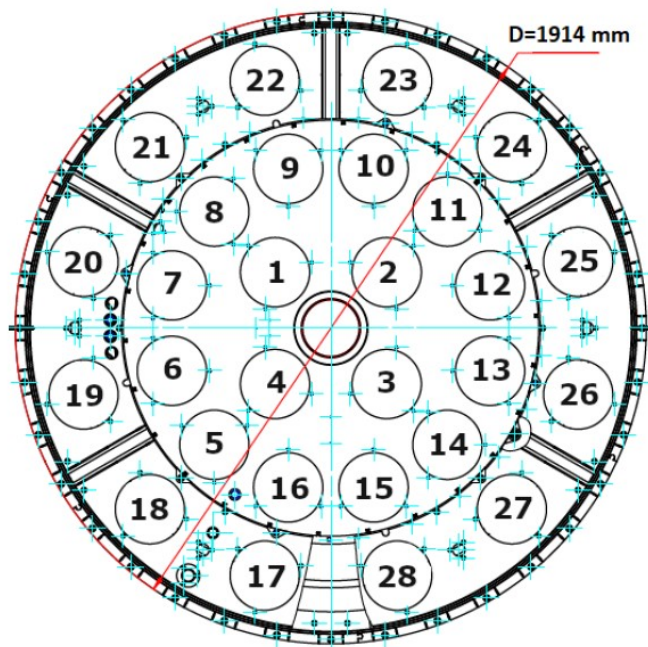


Рисунок 1.2 — Схема расположения ФЭУ в детекторе iDream

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 уплот-

нительными 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 1 грамм/литр.

1.2 КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

В качестве радиоактивных источников используются ^{137}Cs ($E_\gamma = 0.662$ МэВ), ^{54}Mn ($E_\gamma = 0.835$ МэВ), ^{65}Zn ($E_\gamma = 1.115$ МэВ), ^{60}Co ($E_\gamma = 1.173, 1.332$ МэВ), а также ^{252}Cf 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.

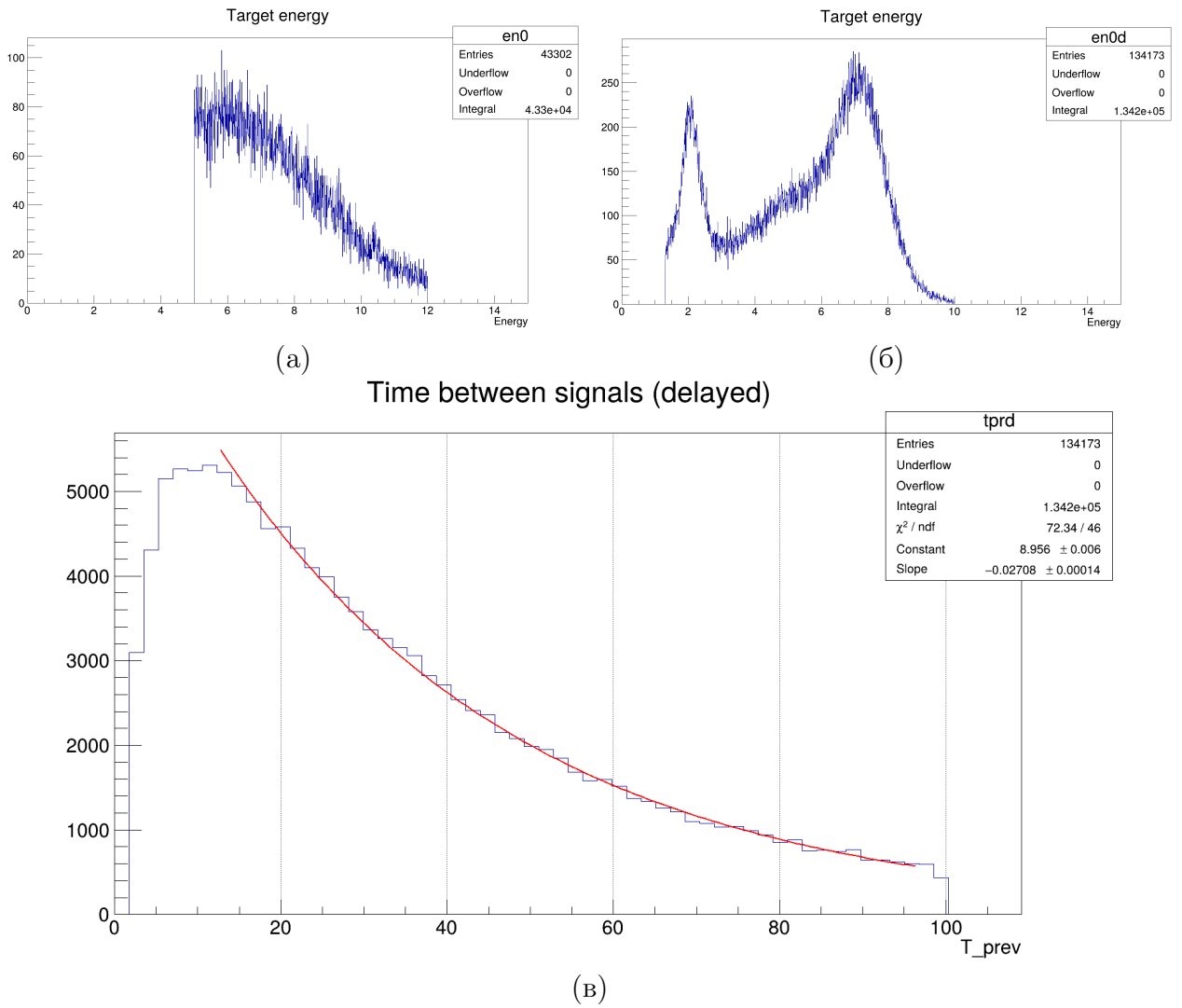


Рисунок 1.3 — Спектры ^{252}Cf : (а) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

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 рисунке 1.3в. Аппроксимация спектра функцией $f(t) = \exp(-t/\tau) + const$, где τ – время захвата нейтронов, даёт $\tau = 36.55$ мкс.

Также важно отметить, что энергетическая шкала выставляется по положению пика захвата нейтронов на водороде, который принимается равным 2.2 МэВ (Рисунок 1.3б).

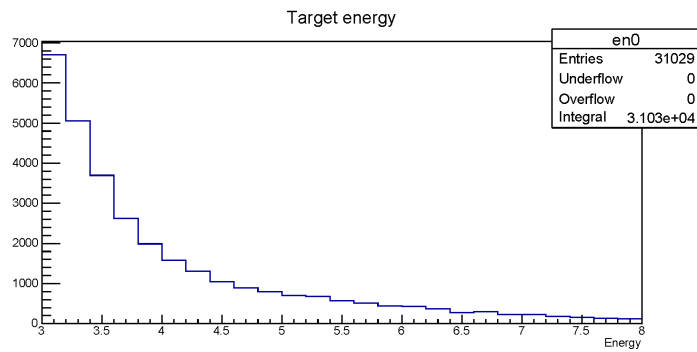
2 СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

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

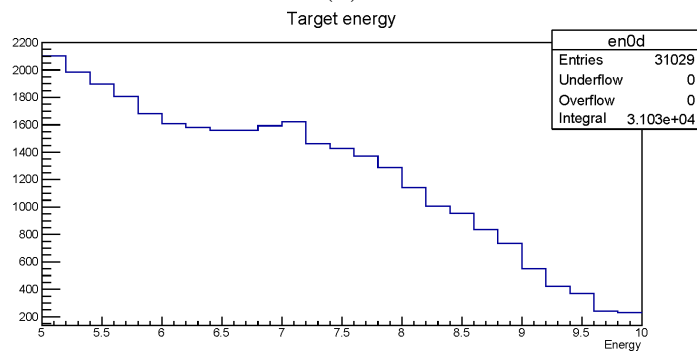
Основными критериями отбора кандидатов являются:

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

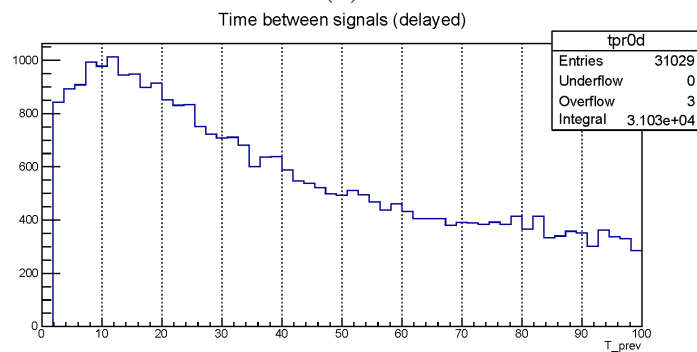
Используя приведённые выше критерии были получены спектры приведённые на рисунках 2.1. Полученное количество зарегистрированных событий равняется 31029



(a)



(б)



(в)

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

2.1 СКОРОСТЬ СЧЁТА АНТИНЕЙТРИНО ДЕТЕКТОРОМ IDREAM

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.

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 зарегистрированного 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 рисунке 2.2

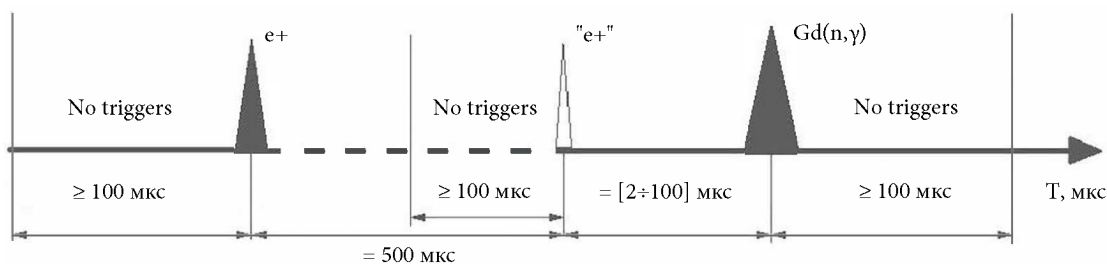
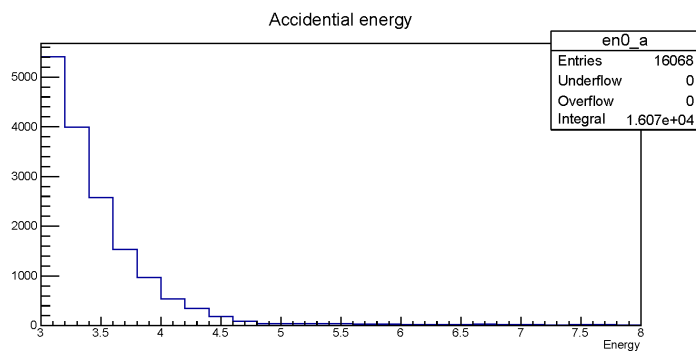
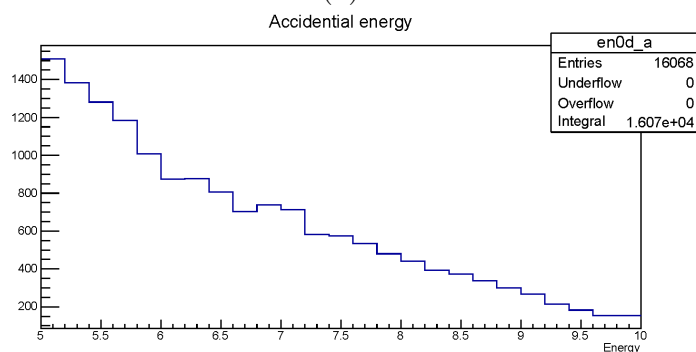


Рисунок 2.2 — Схема расположения ФЭУ в детекторе iDream

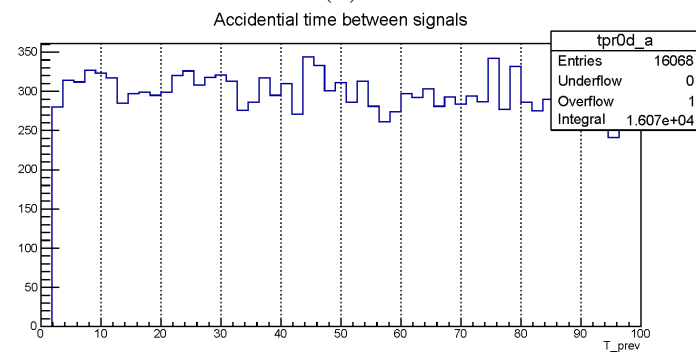
Согласно критериям отбора случайных наложений были получены спектры приведённые на рисунке 2.3



(a)



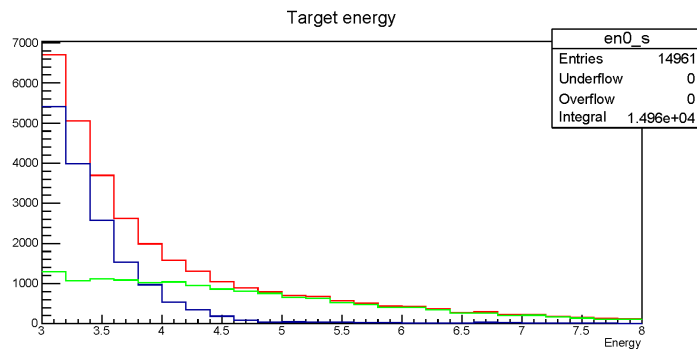
(б)



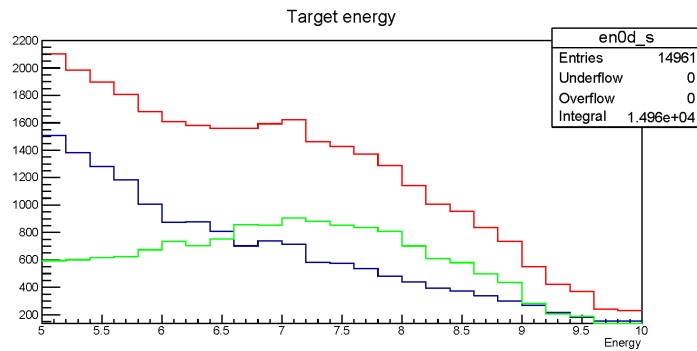
(в)

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

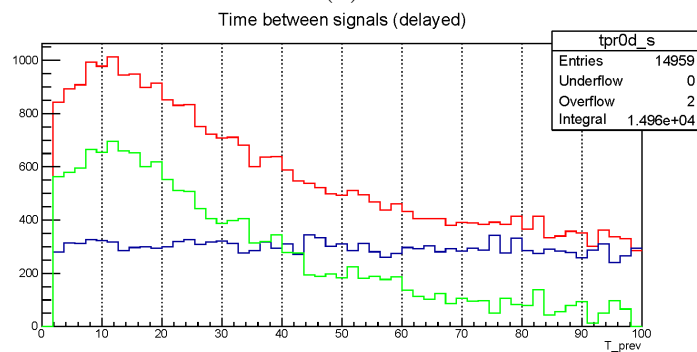
Разница этих спектров показана на рисунке 2.4. Красная линия - кандидаты, синяя - случайные наложения, зелёный - разница



(a)



(б)



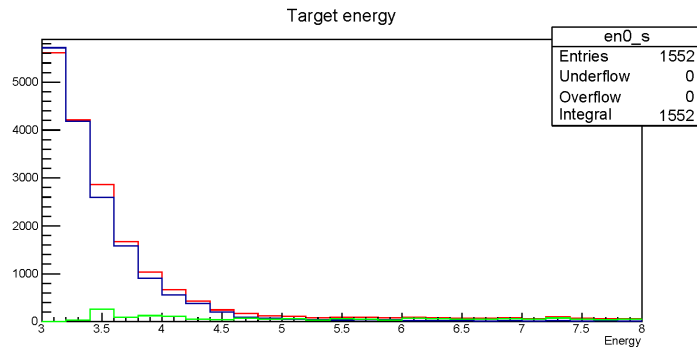
(в)

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

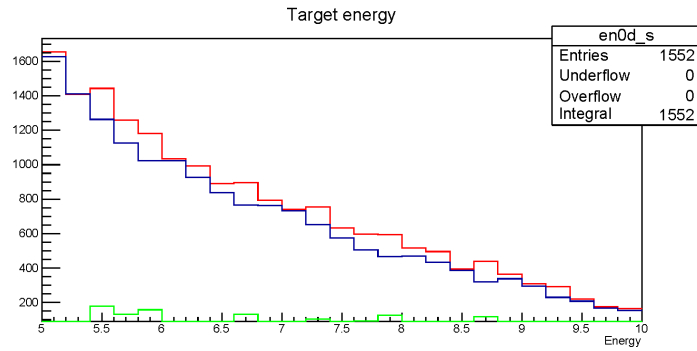
КОРРЕЛИРОВАННЫЙ ФОН

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).

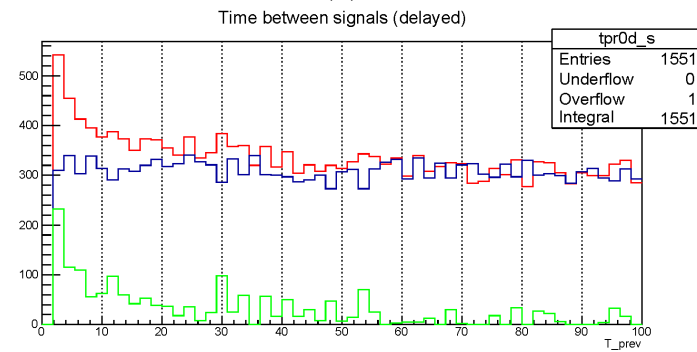
Общие спектры с учётом случайных наложений приведены на рисунке 2.5



(a)



(б)



(в)

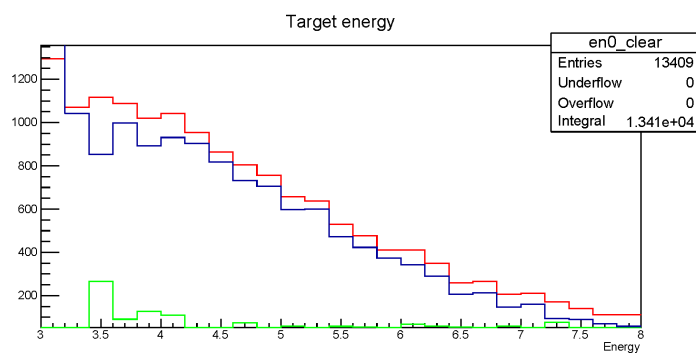
Рисунок 2.5 — Спектры кандидатов фона: (а) - спектр мгновенных сигналов, (б) - спектр задержанных сигналов, (в) - временной спектр

СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО

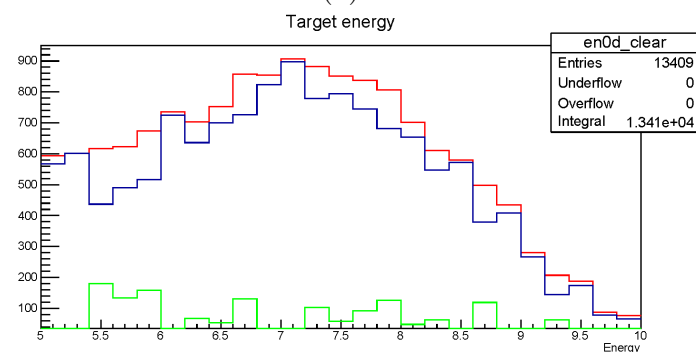
С помощью изложенных выше спектров получаем спектр сигнала антинейтрино, рисунок 2.6. Красная линия соответствует периоду R_ON , зелёная - периоду R_OFF , синяя - разница.

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

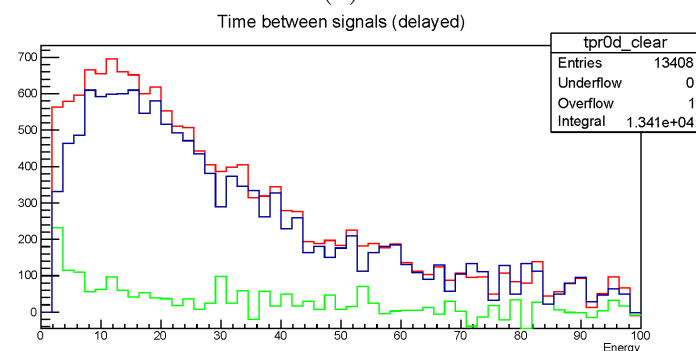
$$R_\nu = 1365 \pm 88 \text{ сутки}^{-1}$$



(a)



(б)



(в)

Рисунок 2.6 — Спектры кандидатов фона: (а) - 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:

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

$$\epsilon = 0.22 \pm 0.01$$

$$\sigma_{235} = (6.27 \pm 0.13) * 10^{-43} \text{ см}^2$$

$$L = 19.5 \pm 0.1 \text{ м}$$

$$E_{235} = 201.9 \pm 0.5 \text{ МэВ}$$

$$(1 + k) = 0.94 \pm 0.02$$

$$P_{th} = 3 \text{ ГВт}$$

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; $\sigma_S \approx 1.16\%(KI)$, погрешность, вносимая спектром антинейтрино, приходящимся на одно деление; $\sigma_\alpha \approx 1\%$, погрешность, вносимая долями деления;

В соответствии с указанными данными был получен ожидаемый счёт антинейтрино:

$$R_\nu = 1522 \pm 37 \text{ сутки}^{-1}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были:

- Проведён анализ данных на основе калибровочного источника ^{252}Cf и получено ожидаемое время жизни нейтрона в веществе детектора
- Получены сигналы антинейтрино от реакции ОБР с учётом случайного и коррелированного фонов
- Получена суточная скорость счёта антинейтрино от реактора детектором iDream = 1365 ± 88 сутки $^{-1}$ и ожидаемая скорость счёта $R_\nu = 1522 \pm 37$ сутки $^{-1}$

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 ^{235}U and ^{239}Pu β spectra // Physical Review D. — 2021. — Окт. — Т. 104, № 7.