

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА iDREAM В УСЛОВИЯХ
ЭКСПЕРИМЕНТА НА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ»

Выполнил студент
413 группы
Решетняк Александр Олегович

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с.
Чепурнов Александр Сергеевич

Допущен к защите

Зав. кафедрой _____ проф. Боос Э.Э.

МОСКВА

2022

Оглавление

Введение	2
1. Моделирование эксперимента	3
2. Промышленный ядерный реактор как источник нейтрино	4
3. Физические основы регистрации реакторных антинейтрино	5
4. Источники фонов на атомной станции, сопровождающие регистрацию антинейтрино	8
4.1. Отбор событий	10
5. Детектор реакторных антинейтрино iDREAM и его модель	11
5.1. Характеристики детектора и его расположение на АЭС	11
5.2. Модель детектора iDREAM	14
5.3. Результаты моделирования	17
5.4. Анализ результатов моделирования	20
Заключение	23
Список использованных источников	24

ВВЕДЕНИЕ

Современные ядерные реакторы на АЭС являются источниками электронного антинейтрино большой интенсивности. Так как нейтрино слабо взаимодействуют с веществом, то они вылетают без изменений (энергии, направления). Нейтринный метод, в отличие от остальных, опирается на прямые измерения и является более достоверным, и, поэтому, он может быть особо интересен как для уже работающих реакторов как дополнительное оборудование, так и для будущих, например, как метод исследования горения топлива. [1]

Существует так называемый нейтринный метод контроля ядерных энергетических реакторов. Он был предложен и подтвержден экспериментально в Курчатовском институте в 80-х годах прошлого века при испытаниях на Ровенской АЭС. [2]

Детектор-спектрометр iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) – компактный детектор реакторных антинейтрино - является одним из решений проблемы контроля реакторов. Цель создания образца – это переход от исследовательского детектора к промышленному.

Для успешного создания детектора, его запуска и последующей интерпретации результатов необходимо провести комплекс работ по моделированию самого детектора, реактора, как источника антинейтрино, и окружающей детектор обстановки для оценки возможных фонов. Для оценки величины фона можно использовать моделирование с помощью GEANT4 - пакета программ для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с выводом данных в ROOT – пакета программ для обработки данных, который используется для построения и аппроксимации гистограмм.

1. Моделирование эксперимента

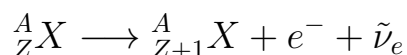
Моделирование – это необходимая часть любого физического эксперимента в современной науке. Обладая знаниями о нужных физических процессах, мы добиваемся близости экспериментальных данных с данными моделирования и из этого получаем интересующие нас параметры, не поддающиеся прямому измерению.

Грамотно спроектированная модель очень хорошо воспроизводит получаемые в детекторе экспериментальные данные, выдавая те же измеряемые величины, что и оригинальный детектор. При наблюдаемых расхождениях происходит подгонка модели к эксперименту, и, когда данные моделирования становятся идентичными (с учетом погрешности) данным эксперимента, тогда полученные параметры конкретной модели также становятся физически значимыми результатами. Детектор устанавливается на АЭС, на которой присутствуют различные фоны. И чтобы их оценить и позже учесть, необходимо использовать моделирование.

2. Промышленный ядерный реактор как источник нейтрино

Нейтрино - легкая, слабо взаимодействующая частица, рождающаяся в β -распаде. Нейтрино окружает нас со всех сторон. Их масса очень мала - порядка 10^{-4} эВ. [4] Чтобы зарегистрировать реакторные антинейтрино, используется жидкий органический сцинтиллятор (ЖОС) - вещество, обладающее способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения. Реакторные антинейтрино взаимодействуют с протонами ЖОС, происходит реакция обратного β -распада, вследствие чего сцинтиллятор начинает излучать фотоны.

В ядерном реакторе происходит цепная реакция деления ядер урана ^{235}U под действием нейтронов. В результате каждого акта деления рождаются новые нейтроны, которые и продолжают реакцию. Осколки деления урана являются нейтроноизбыточными, поэтому являются β -радиоактивными. Они распадаются и образуют электроны и электронные антинейтрино [5]:

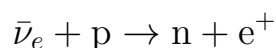


Продукты данной реакции также β -радиоактивны. Таким образом, в реакторе происходят целые каскады β -распадов. В среднем в результате одного акта деления ядра образуется 6 нейтрино энергией до 8 МэВ. Поэтому в таком каскаде образуются потоки электронных антинейтрино. Так как нейтрино слабо взаимодействует с веществом, то поток практически не ослабляется, а энергия и направление движения нейтрино не изменяется, что можно использовать для исследования процессов внутри ядерного реактора.

3. Физические основы регистрации реакторных антинейтрино

Реакция обратного β -распада (ОБР) лежит в основе нейтринного метода наблюдения и контроля. Саму реакцию предложили и экспериментально подтвердили её существование Фридрих Райнес и Клайд Коуэн в 50-х годах прошлого века. [3]

В результате деления ядер внутри реактора образуются электронные антинейтрино. При их взаимодействии с протонами должны появляться нейтроны и позитроны:



В настоящее время реакция обратного β -распада - это наиболее эффективный метод регистрации антинейтрино. Сечение реакции - очень маленькая величина: $\sigma \sim 10^{-43} \text{ см}^2$. Значит, вещество мишени детектора должно иметь большое количество протонов. Поэтому часто в таких детекторах используют жидкие органические сцинтилляторы (ЖОС), которые как раз обладают таким свойством.

Также реакция ОБР имеет пороговую энергию:

$$\begin{aligned} E_{min} &= m_n - m_p + m_e = \\ &= 939.565 \text{ MeV} - 938.272 \text{ MeV} + 0.511 \text{ MeV} = 1.804 \text{ MeV} \end{aligned}$$

То есть, мы можем зарегистрировать нейтрино лишь с энергией выше 1,8 МэВ, а это примерно 25% от всего спектра. Важнейшим свойством ОБР является последовательность двух событий: аннигиляция позитрона, дающая первое (мгновенное) событие, и радиационный захват ядрами среды нейтрона - второе (задержанное) событие. Время задержки зависит от времени термализации и захвата нейтрона. Наличие быстрого и задержанного сигналов является характерной чертой реакции обратного β -

распада. Малое значение времени задержки позволяет уменьшить значение коррелированного фона.

Энергия антинейтрино в нулевом приближении будет связана с кинетической энергией позитрона следующим соотношением:

$$E_e^{(0)} = E_{\bar{\nu}} - \Delta,$$

где $\Delta = m_n - m_p$. [6]

Тогда в первом порядке приближения энергия позитрона:

$$E_e^{(1)} = E_e^{(0)} \left[1 - \frac{E_{\nu}}{M} \left(1 - v_e^{(0)} \cos \theta \right) \right] - \frac{y^2}{M},$$

где $y = (\Delta^2 - m_e^2) / 2$, $v_e^{(0)} = \frac{p_e}{E_e^{(0)}}$ - скорость позитрона, а θ - угол между направлением движения антинейтрино и вылетевшего позитрона.

Именно благодаря этой "подписи" возможна работа детектора-спектрометра реакторных антинейтрино iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring). В качестве мишени в детекторе используется специальный ЖОС.

Образовавшийся в результате ОБР позитрон уносит большую часть кинетической энергии антинейтрино (около 99%) и аннигилирует с электронами сцинтиллятора с образованием двух γ -квантов с суммарной энергией

$$E_{\gamma} = E_e^{(0)} + 1.022 \text{ МэВ}.$$

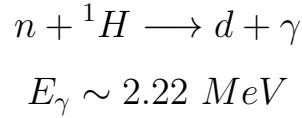
Тогда связь видимой энергии и энергии антинейтрино:

$$E = 1.022 \text{ MeV} + E_{\bar{\nu}} - (m_n + m_e - m_p) = E_{\bar{\nu}} - 0.784 \text{ MeV}$$

Так мы получаем первый сигнал в детекторе, называемый "быстрым". А по формуле энергии позитрона, описанной выше, возможно из спектра полученных позитронов вычислить спектр антинейтрино.

Нейтрон, также образовавшийся в результате ОБР и в среднем имеющий энергию 15 кэВ, термализуется, замедляется за счёт столкновения с другими ядрами и испытывает нейтронный захват

ядром мишени. Возбужденное ядро испускает гамма-квант, образуя тем самым второй (задержанный) сигнал в детекторе:



Но можно заметить, что энергия γ -кванта из "задержанного" сигнала (2.22 МэВ) лежит в области естественной радиоактивности (до 3 МэВ), поэтому для повышения эффективности регистрации нейтрино в мишень вводят специальные добавки из лития, кадмия, бора и т.д. Чаще всего это добавки из гадолиния с большим сечением захвата нейтронов ($\sigma \sim 2.5 \cdot 10^5$ бн), так как ядро гадолиния снимает возбуждение испусканием γ -квантов с суммарной энергией 8 МэВ:

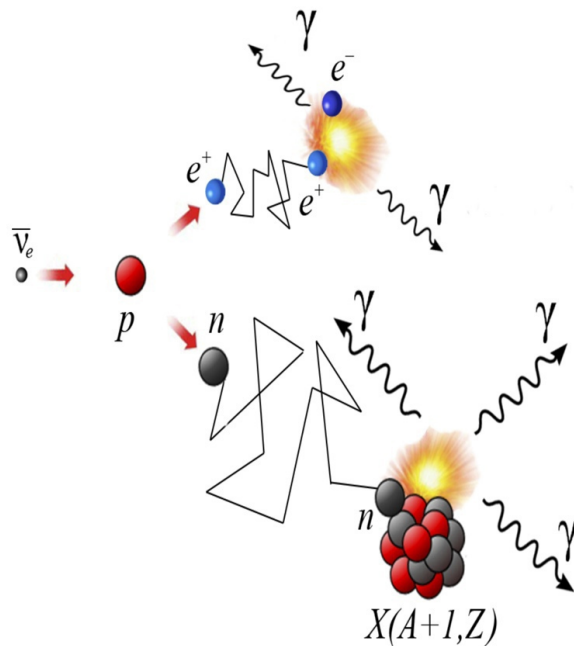
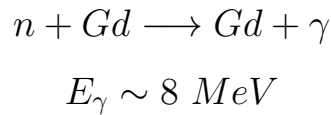


Рис. 3.1: Схема реакции обратного β -распада

Это является одной из причин, почему в сцинтиллятор, использующийся в качестве мишени в детекторе iDREAM, добавляют гадолиний.

4. Источники фонов на атомной станции, сопровождающие регистрацию антинейтрино

Помимо реакции обратного бета-распада внутри и возле реактора происходят и другие процессы, которые дают фоновые события. Например, космическое излучение, нейтроны, возникающие в результате реакции деления ядер в реакторе, излучение отработанного топлива. Эти события делятся на коррелированный и случайный фон.

Величина коррелированного фона в детекторе зависит от конкретного расположения детектора и суммарной толщины вещества конструкционных материалов над местом расположения детектора.

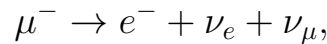
На глубине, превышающей 15-20 метров водного эквивалента (м.в.э.), фон сцинтилляционного детектора, связанный с космическим излучением, практически полностью определяется мюонами и продуктами реакции мюонов. Можно выделить следующие компоненты фона, связанные с космическими мюонами:

1. Ионизационные потери энергии при прохождении мюона через чувствительный объем детектора.
2. Остановка мюонов и регистрация продуктов их распада (или захвата).
3. Расщепление ядер мишени и последующий распад под действием мюонов.
4. Генерация быстрых нейтронов и их последующая регистрация в детекторе.

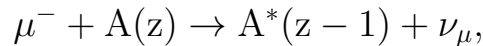
Энергетический спектр и угловое распределение мюонов для конкретной глубины расположения детектора могут быть рассчитаны исходя из экспериментальных данных по потоку мюонов на поверхности Земли.

Ионизационные потери энергии мюона в легком веществе составляют $1,8 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$. Мюоны, проходящие по краю детектора, могут имитировать событие в энергетическом диапазоне регистрации антинейтрино. Данная компонента фона может быть существенно подавлена активной защитой детектора и напрямую зависит от эффективности регистрации мюонов.

Процессы превращения остановившихся мюонов в веществе заключаются в следующем: отрицательный мюон захватывается атомами вещества с образованием возбужденных мезоатомов. В дальнейшем возможны 2 процесса – либо распад мюона:



либо поглощение его ядром:



Захват мюона приводит к сильному возбуждению ядра, которое снимается путем излучения нейтронов и гамма-квантов. Вылет заряженных частиц гораздо менее вероятен из-за кулоновского барьера. Мюонное veto с эффективностью ε выше 99.9% существенно подавляет данную компоненту коррелированного фона детектора до величины меньше 10 событий в сутки.

Быстрые нейтроны, образованные космическими мюонами вне детектора, рассеиваясь на протоне, в сцинтилляторе могут генерировать сигнал в диапазоне 1 – 10 МэВ, сопровождаемый регистрацией замедлившегося нейтрона.

При взаимодействии космических мюонов и ядер углерода в составе сцинтиллятора могут появиться ядра бета-радиоактивных изотопов, например:

- 1) ${}^8\text{He} \Rightarrow n + e^- + {}^7\text{Li}$, граничная энергия бета-распада $E=8.6 \text{ МэВ}$.
- 2) ${}^9\text{Li} \Rightarrow n + e^- + {}^8\text{Be}$ с последующим распадом ${}^8\text{Be} \Rightarrow 2\alpha$, граничная энергия бета-распада $E=11.9 \text{ МэВ}$.

В обоих случаях электроны или альфа-частицы распада имитируют

регистрацию позитрона в реакции обратного бета-распада антинейтрино, с последующей регистрацией нейтрона ($E_n \sim 1 \text{ MeV}$).

Для подавления коррелированного фона используется отбор сигналов по форме сцинтилляционного импульса, а также активная и пассивная защита вокруг детектора (вето). Геонейтрино также являются источниками фоновых событий, однако величина этого фона достаточно незначительна.

Гамма-фон детектора выше порога регистрации реакции обратного бета-распада связан в основном с естественной радиоактивностью от ряда изотопов, содержащихся как в стенах помещения в месте расположения детектора, так и в материалах внешней защиты и конструкционных материалах детектора. Фон является случайным. Данная компонента фона может быть подавлена в периферийном слое детектора – буферном объеме. Также вклад в гамма-фон детектора с порога регистрации реакции обратного бета-распада ожидается от фотоумножителей (ФЭУ). Данная компонента фона может быть точно измерена методом задержанных совпадений. Идея метода состоит в том, что опережающие импульсы задерживаются на определённое время и производится регистрация числа совпадений их с отстающими импульсами.

4.1. Отбор событий

Чтобы получить искомое значение потока нейтрино, нужно произвести отбор продуктов реакции ОБР от фона. Критерии отбора должны максимизировать величину полезного сигнала по отношению к фоновым событиям.

Отбор начинаем с рассмотрения пары событий: «быстрого», энергией выше 1,8 МэВ, и следующего за ним «задержанного» события от процесса захвата нейтрона ядром гадолиния с энергией между 4 и 10 МэВ и с временем задержки от 1 до 30 мкс. Пары, один из сигналов которых был зарегистрирован через 150 мкс после отклика мюонного счетчика, считаются коррелированным фоном и отбрасываются. И, наконец, пары, появившиеся из-за рассеяния и последующего захвата быстрых нейтронов, отвергаются с помощью дискриминации по форме импульса. [7], [8], [9]

5. Детектор реакторных антинейтрино iDREAM и его модель

Цель создания опытного образца детектора-спектрометра реакторных антинейтрино iDREAM - переход от исследовательского детектора к промышленному путем использования нейтринного метода в условиях промышленной АЭС. Детектор разрабатывается в соответствии с промышленными требованиями, позволяющими включить его в состав оборудования АЭС в качестве дополнительного штатного прибора, обеспечивающего операторов станции дополнительными объективными данными о состоянии активной зоны реактора. Детектор также можно применять и в исследовательских целях. Небольшие размеры и ожидаемая высокая эффективность детектирования реакторных антинейтрино делает этот детектор уникальным исследовательским инструментом для изучения перспективных атомных реакторов, например реакторов на быстрых нейтронах, для которых исследования таких процессов, как динамика выгорания топлива, являются на сегодня открытыми научно-техническими вопросами. Расчетная эффективность регистрации антинейтрино детектора iDREAM позволяет его размещать на удалении 20-30 метров от активной зоны реактора [10].

5.1. Характеристики детектора и его расположение на АЭС

Детектор iDREAM изготовлен в виде двух концентрических баков из нержавеющей стали, накрытых общей герметичной крышкой. Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной мембраной из полиметилметакрилата (ПММ) и просматривается 16 ФЭУ. Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1.1 м^3 заполняется гадолинизированным ЖОС. ЖОС в нашем случае выполняет функции мишени, спектрометра позитронов (положительно заряженных электронов), замедлителя и

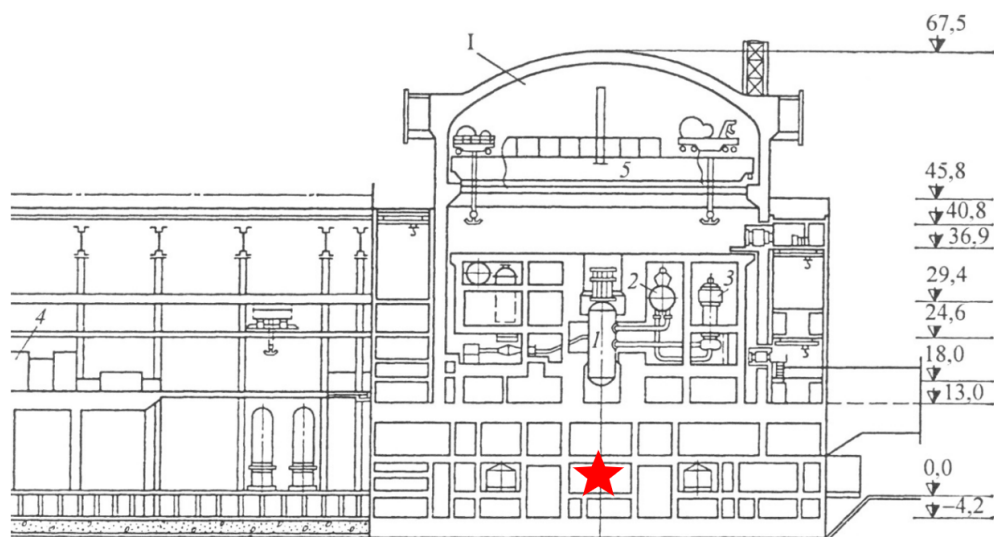


Рис. 5.1: Звездой обозначено ориентировочное расположение детектора на схеме Калининской АЭС

детектора нейтронов. Нейтроны регистрируются по γ -квантам захвата в Gd (суммарная энергия $E = 8$ МэВ). Пространство внутреннего бака (буфер) над мембраной заполняется линейным алкилбензолом (ЛАБ), оно служит для выравнивания светосбора и защищает мишень от гамма-фона от ФЭУ. Наружный бак из соображений удобства транспортировки и перемещений внутри зданий также разделен по вертикали на три части. Кольцевой объем заполняется ЖОС и служит активной защитой мишени детектора (гамма-кэтчер), а также повышает общую эффективность за счет регистрации гамма-квантов, вышедших за пределы мишени. Кольцевой объем просматривают 12 ФЭУ. Для повышения светосбора внутренние стенки буферного и основного чувствительного объемов покрыты светоотражающим материалом «Lumirror» с коэффициентом отражения до 90 для спектра сцинтилляции ЖОС. Таким образом, в детекторе используется два типа жидкого сцинтиллятора (с гадолинием и без него) и буферная жидкость, сделанные на основе ЛАБ российского производства.

В качестве растворителя для изготовления ЖОС могут быть использованы различные вещества. Для детектора iDREAM был выбран линейный алкилбензол - ЛАБ, так как он соответствует необходимым

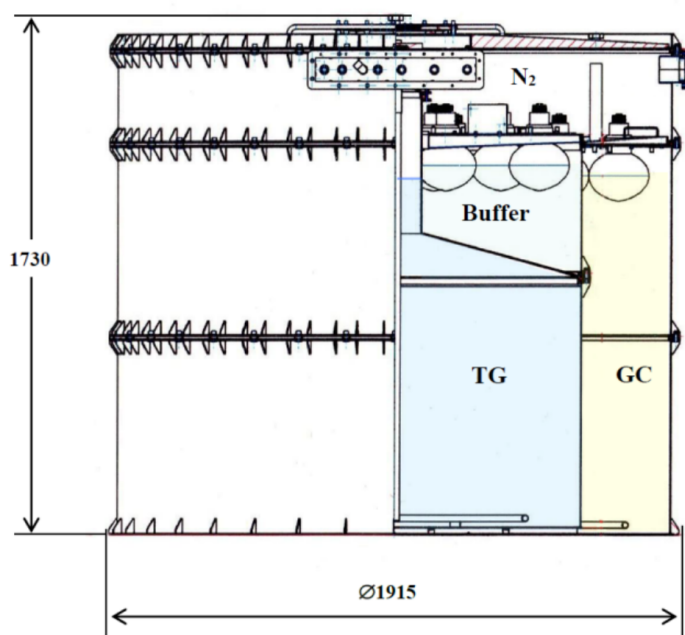
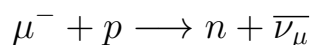


Рис. 5.2: Конструкция детектора iDREAM: GC - гамма-кэтчер; TG - мишень; Buffer - буфер.

требованиям безопасности: низкая токсичность, высокая температура вспышки, хорошая прозрачность.

Внешнее veto состоит из активной и пассивной защиты, окружающей основной детектор. Активная защита, или мюонное veto, состоит из 4 пластин полиметилметакрилата с добавлением нафталина. Каждую пластину просматривают 6 ФЭУ. Мюонное veto служит для подавления фона космических и атмосферных мюонов. Пассивная защита представляет собой пластины из борированного полиэтилена толщиной 50 мм. Она необходима для подавления нейтронного фона, который создается окружающими установку материалами в результате взаимодействия их с мюонами посредством реакции:



Также в конструкции предусмотрен канал для ввода радиоактивных источников в геометрический центр мишени, которые используются для калибровки детектора. Калибровка необходима для проверки отклика детектора на частицу известной энергии, а также определения связи сигнала с ФЭУ и энергии зарегистрированной частицы. Также в ходе

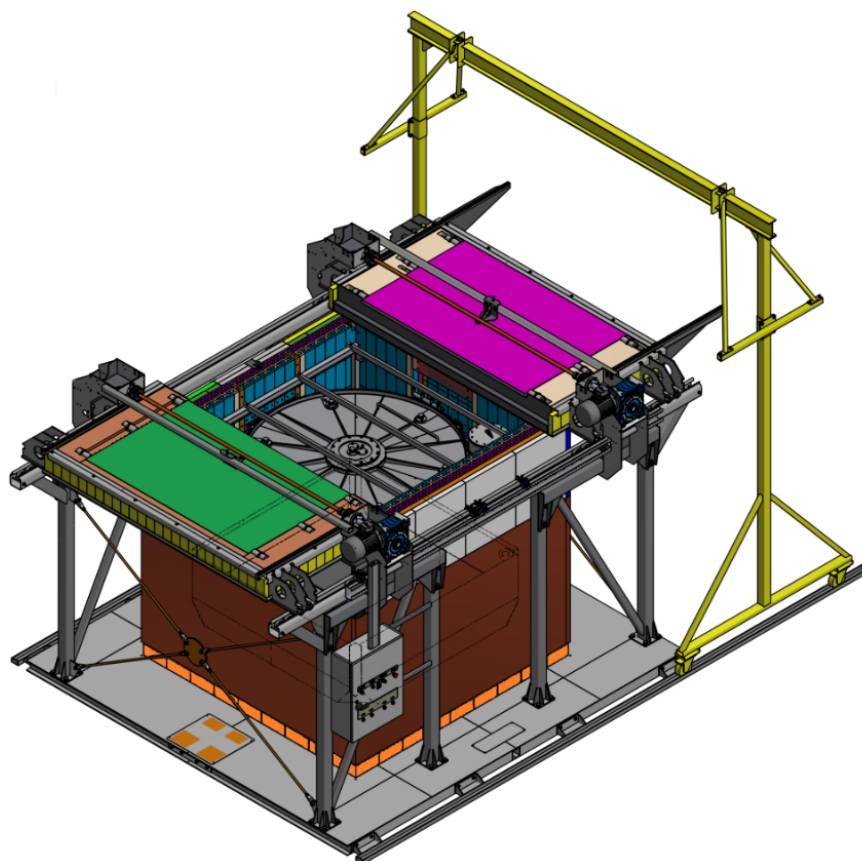


Рис. 5.3: Общий вид детектора iDREAM внутри защиты.

калибровки тестируется система сбора данных. В калибровке используются радиоактивные источники, например изотопы, ^{137}Cs и ^{60}Co и LED система, состоящая из двух ультрафиолетовых светодиодов (УФ). [11] [12].

5.2. Модель детектора iDREAM

Для того, чтобы интерпретировать результаты эксперимента на АЭС, была создана полноценная модель детектора iDREAM. Основной задачей нашего моделирования является получение фона реакторных антинейтрино. Для выполнения задачи мы используем GEANT4 – это инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество методом Монте-Карло с выводом данных в ROOT – пакета программ для обработки данных, который нами используется для построения и аппроксимации гистограмм. Модель была построена на основе чертежей, предоставленных Курчатовским Институтом, имеет точные размеры, положение всех составляющих оригинального детектора и симулирует его материалы. Модель состоит из (рис 5.3):

1. ФЭУ - отмечено жёлтым цветом;
2. Буферного объема - отмечен фиолетовым цветом;
3. Периферийного объема - отмечен голубым цветом;
4. Мишени - отмечена красным цветом.

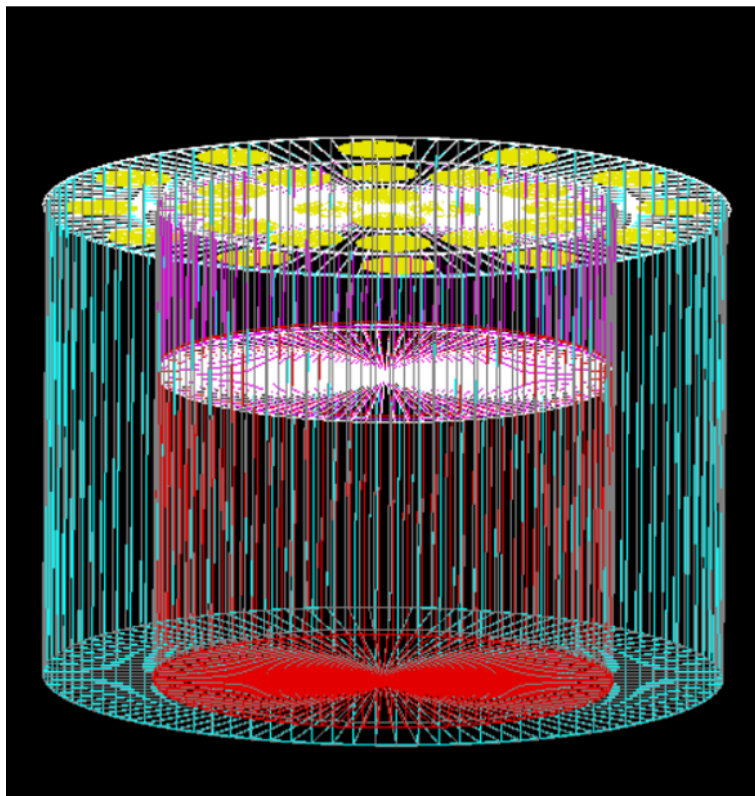


Рис. 5.4: Представление детектора iDREAM в среде GEANT4

Так как GEANT4 не имеет встроенной симуляции обратного β -распада, то процесс нужно было реализовать самостоятельно. Происходит моделирование не самого взаимодействия нейтрино с веществом мишени, а сразу рождения продуктов реакции. Это позволяет ускорить процесс набора статистики, потому что вероятность ОБР из-за сечения взаимодействия нейтрино с веществом мишени остается достаточно малой.

Также для моделирования оптических процессов в GEANT4 нужно задать дополнительные свойства материалов. Чтобы зарегистрировать нейтрино из реактора, используется ЖОС - вещество, обладающее способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения.

Реакторные антинейтрино взаимодействуют с протонами ЖОС, происходит реакция обратного β -распада, в следствие чего сцинтиллятор начинает излучать фотоны.

Жидкие органические сцинтилляторы имеют параметр, называемый световыходом. Световыход — количество фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении определённого количества энергии (обычно 1 МэВ). Но именно благодаря световыходу регистрируются антинейтрино, а его стабильность уменьшает вероятность ошибок регистрации. Большим световыходом считается величина 50—70 тыс. фотонов на МэВ. Однако для детектирования высокоэнергичных частиц могут использоваться и сцинтилляторы со значительно меньшим световыходом. В детекторе iDREAM используется сцинтиллятор со световыходом около 11 тыс. фотонов на МэВ.

В органических сцинтилляторах отдельные молекулы слабо взаимодействуют друг с другом, т.е. энергетические уровни отдельных молекул практически не возмущены присутствием соседних молекул. Поэтому можно считать, что характер взаимодействия заряженных частиц с веществом органического сцинтиллятора не зависит от его агрегатного состояния и сводится к ионизации и возбуждению отдельных молекул непосредственно заряженной частицей. Параметр деградации световыхода является одним из важнейших при выборе материала для ЖОС. С помощью детектора на ЖОС детектируется только 25% всего спектра нейтрино. То есть при сильной деградации сцинтиллятора "видимый" спектр уменьшается еще сильнее. Поэтому чем меньше световыход деградирует в единицу времени, тем шире спектр антинейтрино, который можно задетектировать в течение работы детектора. А значит, главной задачей при разработке детектора на ЖОС является создание и использование стабильных сцинтилляторов с малой деградацией световыхода. [13] [14] Для описания сцинтилляционных процессов внутри детектора необходимо было задать его материалам (сцинтилляторам) следующие параметры:

- зависимость интенсивности сцинтилляции от длины волны;

- зависимость коэффициента преломления вещества от длины волны;
- зависимость длины поглощения от длины волны;
- величина световыхода (количество фотонов на МэВ);

Для каждой стенки из нержавеющей стали необходимо задать коэффициент отражения - 0,9. Для каждого ФЭУ задан параметр квантовой эффективности, а точнее её зависимость от длины волны попадающего в умножитель фотона. Этот параметр отражает вероятность вылета электрона из катода. Физические процессы в модели подключены для электронов, позитронов, нейтронов, гамма-квантов, мюонов и оптических фотонов. Для электронов и позитронов подключены следующие процессы: ионизация, тормозное излучение, многократное рассеяние, внутренняя конверсия, рождение пар. Для гамма-квантов — комптоновское рассеяние и фотоэффект. Для оптических фотонов учитывалось взаимодействие со средой посредством следующих процессов: упругого рассеяния с сохранением длины волны (Рэлеевского), поглощения с возможной реэмиссией фотонов (шифтинг) и граничных процессов (преломление и отражение).

Результаты для удобства дальнейшей обработки записываются в текстовые файлы, для построения гистограмм используется ROOT.

5.3. Результаты моделирования

В результате работы было проведено изучение существующей модели iDREAM и проделана работа по её усовершенствованию, а именно:

- дописан класс, описывающий реакцию обратного β -распада;
- настроен корректный сбор и вывод данных в текстовый и root-файл;
- исправлены неверно работающие методы внутри программы;
- проверены и исправлены размеры составных частей модели в соответствии с чертежом реального детектора;

- совместно с сотрудниками НИИЯФ МГУ была использована совместная модель системы калибровки и детектора. Добавлена система калибровки, а именно механизм переизлучения фотонов ультрафиолетового диапазона в область видимого диапазона (шифтинга) и описана геометрия калибровочной системы с радиоактивным изотопом ^{137}Cs и ультрафиолетовым светодиодом (УФ) имитирующим радиоактивный изотоп в центре детектора;
- оптимизирована работа программы, вследствие чего значительно уменьшилось время проведения симуляции эксперимента.

Были произведены имитирование работы модели калибровочной системы и использование калибровочной системы реального детектора. [15]. В результате моделирования были получены отклик детектора на вспышки света имитирующие изотоп ^{137}Cs и отклик детектора на сам ^{137}Cs (рис. 5.4) и сравнение с экспериментальным спектром (рис. 5.5). Напряжение на светодиоде указано в процентах, где 100% = 15 В.:

Представление детектора

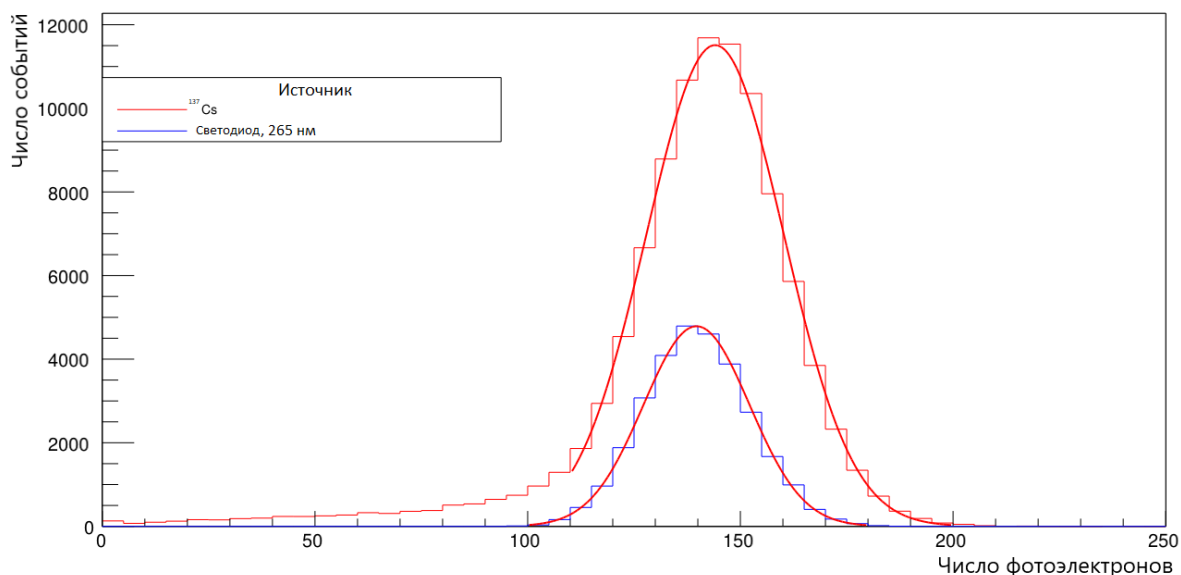


Рис. 5.5: Сравнение спектров распада изотопа ^{137}Cs и ультрафиолетового сигнала калибровочной системы модели.

Из аппроксимации были получены следующие значения для величин уширений:

- ^{137}Cs : $\sigma_{Cs} = (16, 15 \pm 0, 05)$ ф.э.;

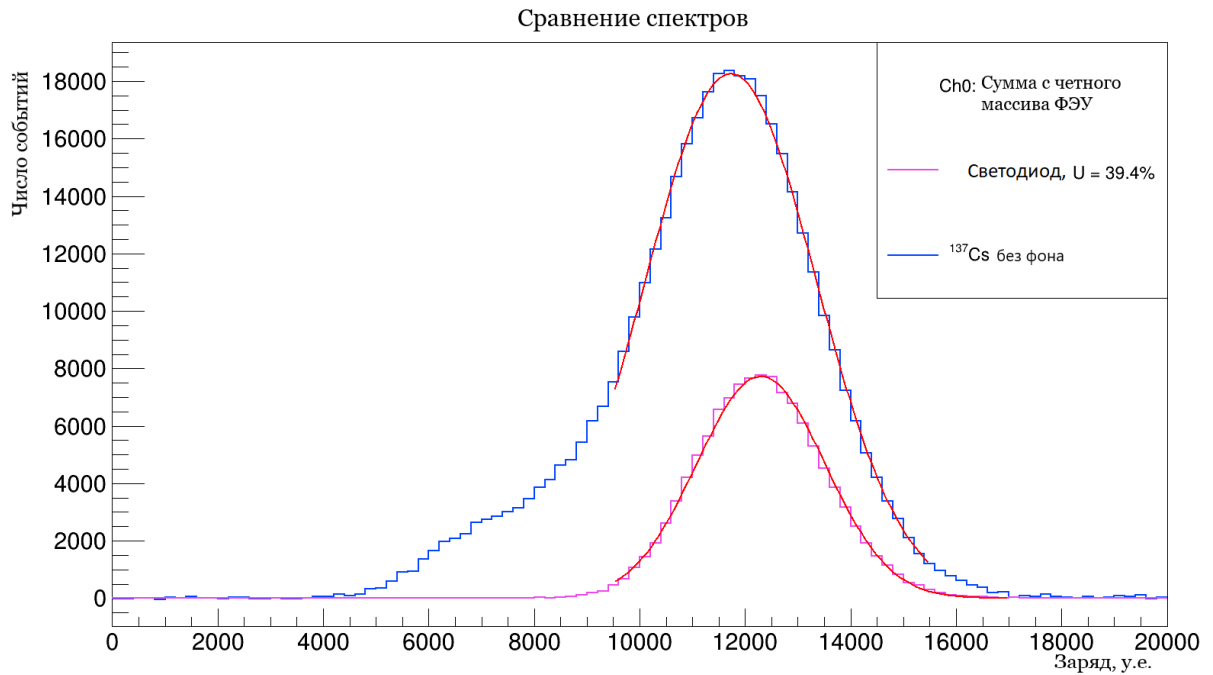


Рис. 5.6: Сравнение спектров распада изотопа ^{137}Cs и ультрафиолетового сигнала калибровочной системы реального детектора.

- светодиод: $\sigma_{UV} = 12.5 \pm 0,05$ ф.э.

Тогда как экспериментальные величины уширений:

- ^{137}Cs : $\sigma_{Cs} = 1620 \pm 3$;
- светодиод: $\sigma_{UV} = 1217,8 \pm 2,9$.

Получим отношения экспериментальных и модельных уширений:

- моделирование: $\frac{\sigma_{Cs}}{\sigma_{UV}} = \frac{16.15}{12.5} = 1.294 \pm 0,009$;
- эксперимент: $\frac{\sigma_{Cs}}{\sigma_{UV}} = \frac{1620}{1217,8} = 1.330 \pm 0,006$.

Отношения уширений для светодиода и ^{137}Cs в экспериментальных и модельных данных при аппроксимации функцией Гаусса с точностью в 4%, что подтверждает хороший уровень сходства виртуальной модели детектора с оригиналом.

Также был промоделирован пролет через детектор космических мюонов с энергией 2 - 5 ГэВ в случайном направлении (1300 событий). По итогам моделирования были получены распределение количества фотоэлектронов (то есть сигнала, полученного ФЭУ за одно событие)

(рис. 5.6) и время задержки от начала события до непосредственного детектирования сигнала (рис. 5.7):

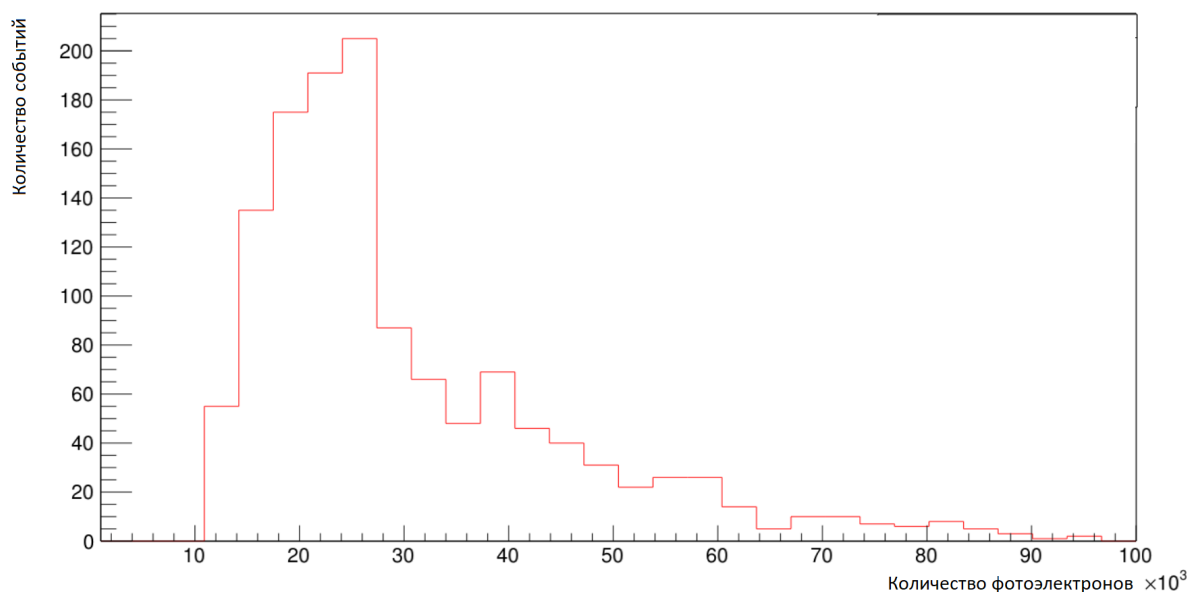


Рис. 5.7: Результат работы модели, реализующей реакцию детектора на взаимодействие с мюоном. Гистограмма количества фотоэлектронов, пришедших на все ФЭУ.

Для сравнения с сигналом от мюонов, был смоделирован сигнал от захвата нейтрона ядром гадолиния (1000 событий), а именно три γ -кванта с суммарной энергией 8 МэВ, родившиеся в центре детектора (рис 5.9).

При сравнении двух различных сигналов заметно, что в результате пролета мюона происходит "засветка" ФЭУ - детектируется на порядок большее, чем от гадолиния количество фотоэлектронов. Формы сигналов тоже значительно отличаются. Эта информация поможет лучше замечать и отбирать такие события.

Время задержки сигнала от начала события достигает 100 нс, тогда как время высвечивания быстрой компоненты сцинтиллятора составляет всего 3 - 5 нс. Значит, по такой длине импульса засветки можно однозначно определить, что пролетающая частица - это мюон.

5.4. Анализ результатов моделирования

В результате проведенного моделирования калибровки детектора были получены значения уширений спектра распада ^{137}Cs и сигнала

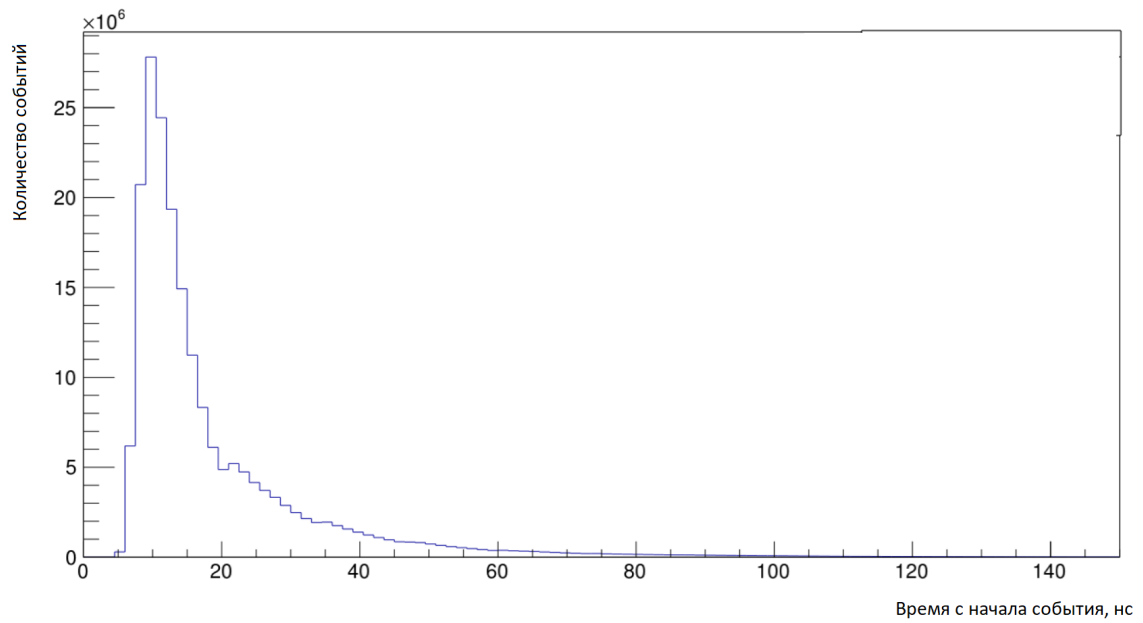


Рис. 5.8: Результат работы модели, реализующей реакцию детектора на взаимодействие с мюоном. Гистограмма времени задержки от начала события до момента детектирования каждого фотоэлектрона.

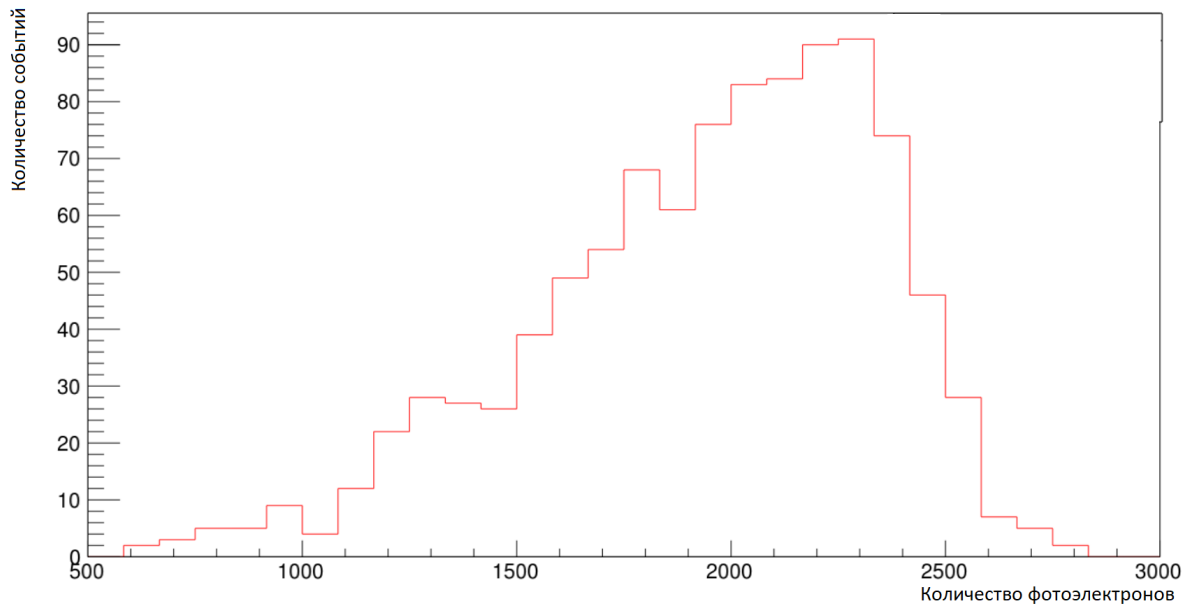


Рис. 5.9: Результат работы модели, реализующей реакцию детектора на испускание γ -квантов ядром гадолиния. Гистограмма количества фотоэлектронов, пришедших на все ФЭУ.

светодиода. После сравнения отношений этих значений с отношением экспериментальных величин был подтверждён хороший уровень сходства (с точностью в 4%) модели с оригинальным детектором.

При запуске потока космических мюонов произошла "засветка" ФЭУ, система дала корректный отклик на пролетающие мимо заряженные частицы с большой энергией. По форме сигнала и распределению количества фотоэлектронов за событие можно чётко отделить пролёт мюона сквозь детектор от испускания γ -квантов ядром гадолиния. Время задержки также позволяет нам регистрировать мюон по времени высвечивания (около 100 нс против 3 - 5 нс у высвечивания сцинтиллятора).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы было проведено изучение модели iDREAM и её улучшение в плане оптимизации работы программы, доработка класса, отвечающего за ОБР, исправление неверно работающих методов и настройка вывода данных в удобные для обработки форматы. Была произведена имитация калибровки модели, а также сравнение результатов с экспериментальными данными, которое подтвердило хороший уровень сходства виртуальной модели с оригиналом. Также было произведено моделирование реакций детектора на взаимодействие с пролетающим мюоном и испускание γ -квантов ядром гадолиния, из которых получены гистограммы количества фотоэлектронов пришедших на все ФЭУ и время задержки сигнала относительно начала события для мюонов. В результате сравнения количества фотоэлектронов от гадолиния и от пролетающего мюона был сделан вывод, что большое количество фотоэлектронов приводит к перегрузке ФЭУ, то есть "засветке". Информация об особенностях сигнала от мюона позволяет отделять его от других сигналов и тем самым повысить эффективность работы детектора. В дальнейшем планируется продолжение разработки и улучшения модели и получение новых результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Громов М. Б. и др. Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом //Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2015. – №. 3. – С. 26-31
2. Русов В. Д., Тарасов В. А., Литвинов Д. А. Физика реакторных антинейтрино. – 2008.
3. Reines F., Cowan Jr C. L. Detection of the free neutrino //Physical Review. – 1953. – Т. 92. – №. 3. – С. 830.
4. Наумов Д.В, Введение в физику нейтрино. - 2010.
5. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика: учебное пособие. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972.
6. P. Vogel and J.F. Beacom, The angular distribution of the reaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, 1999
7. Ko Y. J. et al. Sterile neutrino search at the NEOS experiment //Physical review letters. – 2017. – Т. 118. – №. 12. – С. 121802.
8. Chen Z. et al. Radiogenic neutron background in reactor neutrino experiments //Physical Review D. – 2021. – Т. 104. – №. 9. – С. 092006.
9. Abe Y. et al. Reactor ν_e disappearance in the Double Chooz experiment //Physical Review D. – 2012. – Т. 86. – №. 5. – С. 052008.
10. А.С. Чепурнов, Нейтринный метод мониторинга ядерных реакторов - история и текущее состояние вопроса.

11. Чепурнов А. С. Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM для прикладных и фундаментальных исследований //Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2019. – №. 3. – С. 1930408-1930408.
12. Abramov A. et al. iDREAM: Industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant //arXiv preprint arXiv:2112.09372. – 2021.
13. Birks J. B., Brooks F. D. Scintillation response of anthracene to 6-30 keV photoelectrons //Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1956. – Т. 69. – №. 7. – С. 721.
14. Фано У., Фано Л. Физика атомов и молекул //Пер. с англ./Под ред. Пономарева ЛИ-М.: Наука. – 1980.
15. Замогильный К.Р. Волоконно-оптическая система калибровки и диагностики жидкосцинтилляционного детектора //Магистерская работа - 2022