

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

УДК 539.1.05

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование мюонного вето детектора iDREAM в пакете GEANT4

Руководитель НИР,
к.ф.-м.н.

_____ Е.А. Литвинович

Студент

_____ Д.Н. Чернышов

Москва 2019

Содержание

1	Введение	2
2	Детектор iDREAM	3
2.1	Конструкция	3
2.2	Принцип работы детектора	4
3	Мюонное вето детектора	6
3.1	Назначение	6
3.2	Конструкция	6
3.3	Принцип работы	7
3.4	Моделирование в GEANT4	8
4	Заключение	11
5	Список использованных источников	12

1 Введение

В топливе атомных реакторов происходит реакция деления изотопов урана и плутония, которая приводит к образованию нейтроно-избыточных ядер. Эти ядра испытывают бета-распад, дающий антинейтринное излучение. С помощью детектора антинейтрино можно дистанционно контролировать режимы работы реактора и проводить независимую оценку накопления плутония.

До настоящего времени создание детекторов реакторных антинейтрино было направлено, в основном, на исследовательские задачи. Внедрение нейтринного метода контроля атомных реакторов требует подходов, связанных с разработкой промышленных методов построения детектора как автономного прибора, соответствующего всем требованиям его эксплуатации на АЭС [1], [2]. Первые шаги в этом направлении были сделаны с целью создания опытного образца первого промышленного детектора iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring). Основные усилия на первом этапе были направлены на создание конструкции детектора, который бы эффективно регистрировал антинейтрино, но при этом был бы промышленным изделием, позволяющим его легко изготавливать, тиражировать, устанавливать и обслуживать. Дальнейшая задача работы — проведение демонстрационного эксперимента в реальных условиях на АЭС, показывающего возможности автономного контроля режимов работы реактора нейтринным методом.

2 Детектор iDREAM

2.1 Конструкция

Детектор iDREAM представляет собой компактный детектор, оптимизированный для регистрации реакторных антинейтрино по реакции обратного бета-распада.

Конструкция детектора (Рисунок 1) выполнена в виде двух концентрических баков из нержавеющей стали, накрытых общей герметичной крышкой. Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной мембраной из оргстекла и просматривается 16 ФЭУ. Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1 м^3 заполняется гадолинизированным ЖОС и является мишенью детектора. Доступ к мишени обеспечивается через вертикальную трубку, вклеенную в центр мембраны, верхний конец которой выходит за пределы бака. Пространство внутреннего бака над мембраной заполняется линейным алкилбензолом (ЛАБ), оно служит для увеличения светосбора и защищает мишень от гамма-фона материала ФЭУ. Кольцевой объем заполняется ЖОС и служит активной защитой мишени детектора, а также повышает общую эффективность за счет регистрации гамма-квантов, вышедших за пределы мишени. Кольцевой объем просматривают 12 ФЭУ. С нижней стороны крышки имеется светозащитный барьер между буферными кольцевыми объемами. Заполнение/откачка ЖОС и барботирование ЖОС азотом в мишени и в кольцевом объеме осуществляется через коллектор с помощью системы трубок и кольцевых сепараторов на дне внутреннего и кольцевого объема. Для повышения светосбора внутренние стенки буферного и основного чувствительного объемов покрыты светоотражающим материалом «Lumirror E6SRc» с коэффициентом отражения до 90% для спектра сцинтилляции используемого ЖОС. Более подробная информация содержится в работе [3].

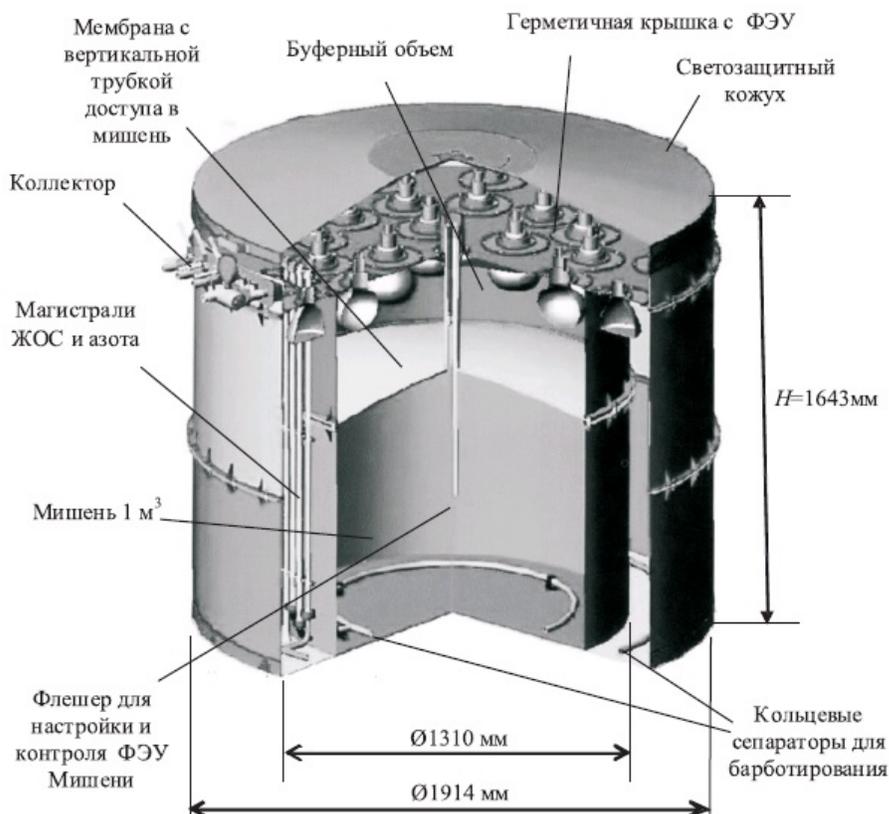


Рисунок 1 – Конструкция детектора iDREAM

2.2 Принцип работы детектора

Для регистрации антинейтрино используется реакция обратаного бета-распада с образованием позитрона и нейтрона. Пороговая энергия данной реакции составляет 1.8 МэВ, поэтому регистрируется только 25% отобщего количества излучаемых реактором антинейтрино, обладающих энергией выше порога.



Отслеживание данной реакции осуществляется благодаря технике задержанных совпадений. Антинейтрино захватывается протоном и образуется позитрон и нейтрон. Позитрон ионизрует среду и аннигилирует с образованием двух γ -квантов с энергией $E_\gamma = 511$ КэВ каждый, это первый детектируемый импульс. Наиболее подходящими средами для создания мишени служат водо-

родо-насыщенные прозрачные пластиковые или жидкие органические сцинтилляторы (ЖОС). Затем в течение $\Delta t = 100$ мкс происходит захват нейтрона мишенью с излучением гамма-квантов. Это ничто иное, как второй импульс. В данном случае мишенью является гадолиний, элемент с большим сечением захвата нейтронов ($\sim 250\,000$ барн), которым допируют ЖОС. Регистрация нейтронов в этом случае осуществляется по нескольким гамма-квантам с суммарной энергией около 8 МэВ, испускаемым возбужденными в результате захвата нейтрона ядрами гадолиния. Вероятность захвата и соответственно время жизни нейтронов в мишени определяется концентрацией гадолиния в сцинтилляторе, которое составляет 1 г/л.

3 Мюонное вето детектора

3.1 Назначение

Фундаментальная задача активного вето — защита детектора iDREAM в реальном времени, которая будет работать в единой системе с детектором. Мюонное вето служит для подавления фона космических и атмосферных мюонов.

Одна из пагубных реакций, в которых участвует мюоны, - это взаимодействие с веществом, в следствие которого происходят рассеяния на ядрах, продуктом которых будут являться нейтроны, создающие фон, что крайне нежелательно для детектора.

3.2 Конструкция

Активная защита детектора представляет собой сцинтилляционную пластину 2000 мм × 1200 мм × 33 мм (Рисунок 2), изготовленную из полиметилметакрилата (ПММА) с добавлением нафталина, РОРОР и РРО. В качестве основы выступает ПММА благодаря хорошей прозрачности, лёгкой формируемости и малой хрупкости. В качестве первичных сцинтилляторов (активаторов) используется нафталин и 2,5-дифенилоксазол (РРО). Первичные сцинтилляторы предназначены для обеспечения световыхода. В качестве вторичного сцинтиллятора (шифтера) для смещения спектра используется 1,4-бис (4-метил 5-фенил 2-оксозолил) бензол (РОРОР). Такая смесь позволяет сместить спектр флюорисценции в область длин волн 415-420нм, в которой чувствительность фотоприёмника максимальна при сохранении прозрачности пластины.

Для улучшения светосбора пластины используется явление полного внутреннего отражения, для этого пластина покрыта алюминизированным майларом ($C_{10}H_8O_4$)_n по боковой поверхности. С двух сторон площадью 2000мм × 1200мм пластина покрыта слоем белой бумаги, выступающей в качестве диффузного отражателя. Далее идёт слой чёрного полиэтилена, который пре-

пятствует проникновению света снаружи, и, наконец, вся пластина обёрнута кожзаменителем для защиты от внешних механических воздействий. С двух противоположных торцов пластины установлены по три фотоэлектронных умножителя ФЭУ-85.

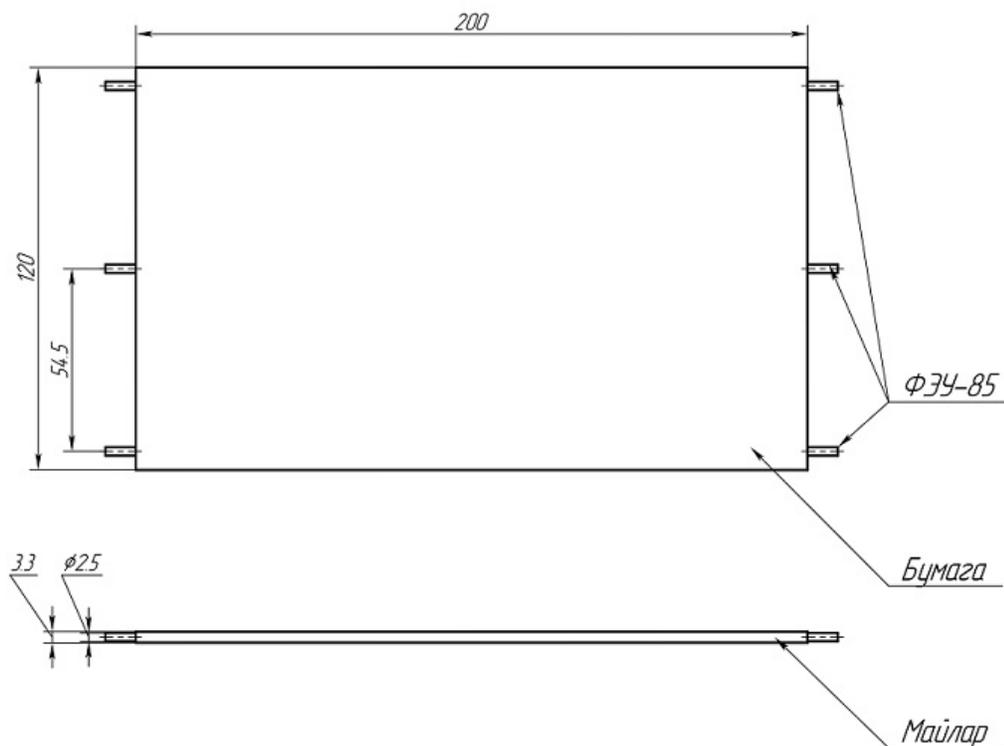


Рисунок 2 – Конструкция мюонного вето детектора iDREAM

3.3 Принцип работы

Сквозь сцинтилляционную пластину под различными углами пролетают мюоны. Через площадь покрытия пластины ($2,4\text{ м}^2$) пролетает порядка 300 мюонов в секунду. При прохождении мюонов через рабочий объём в нём образуется короткая вспышка света, состоящая из $10^3 - 10^5$ фотонов, которые регистрируются шестью ФЭУ-85.

3.4 Моделирование в GEANT4

При моделировании были выбраны следующие параметры конструкции.

Таблица 1 – Параметры конструкции.

Коэффициент отражения бумаги	0,4
Коэффициент отражения майлара	0,8
Квантовая эффективность ФЭУ-85	20%
Световыход	8000 фотонов/МэВ

В ходе работы было смоделировано прохождение одного мюона с энергией 1ГэВ перпендикулярно конструкции через её центр. Были получены распределение фотоэлектронов по времени (Рисунок 3) и число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации одного мюона с энергией 1 ГэВ (Рисунок 4). Следующим этапом работы стало равномерное распределение координаты прохождения моноэнергетического мюона через пластину. Были получены распределение фотоэлектронов по времени (Рисунок 5) и число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации потока перпендикулярных мюонов с энергией 1 ГэВ (Рисунок 6).

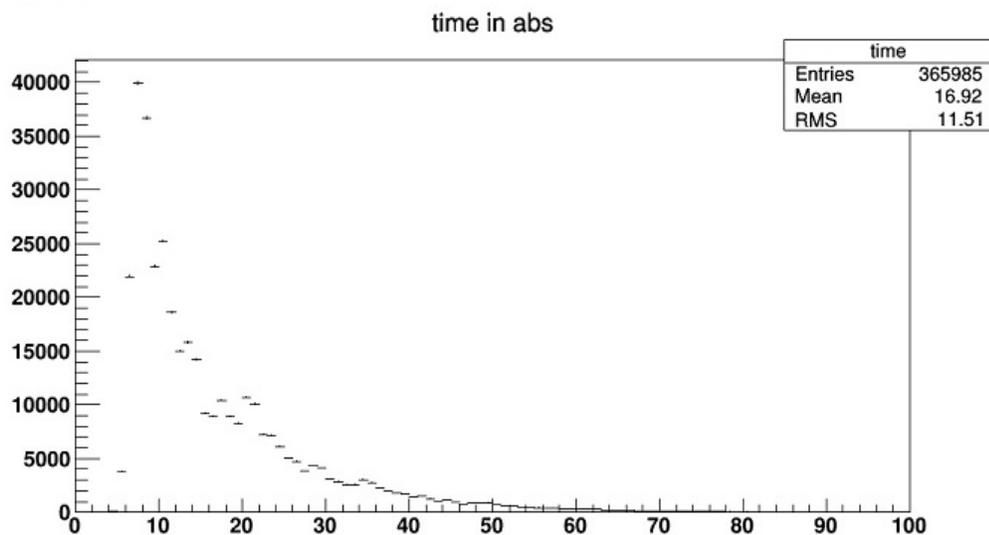


Рисунок 3 – Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t=0$ соответствует времени влета мюона в рабочую область.

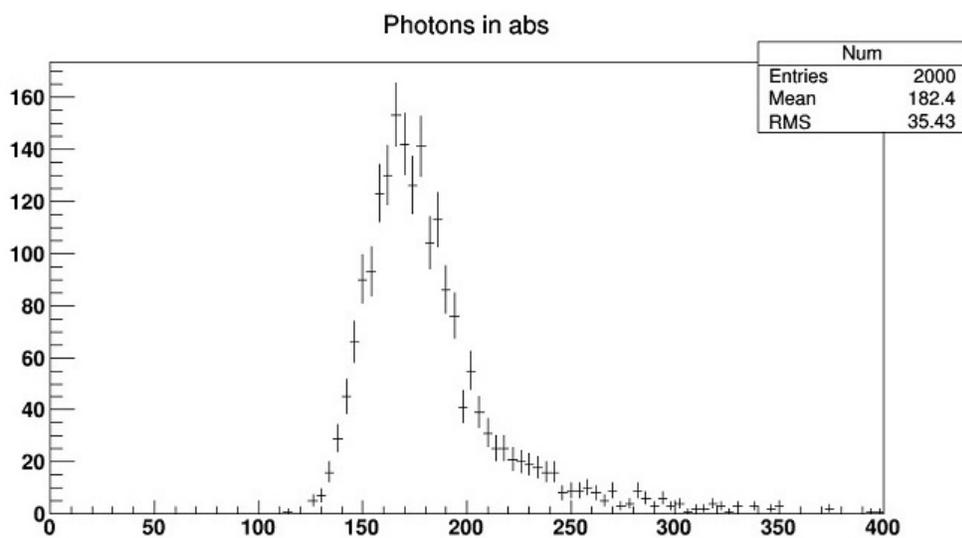


Рисунок 4 – Число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации мюона с энергией 1ГэВ.

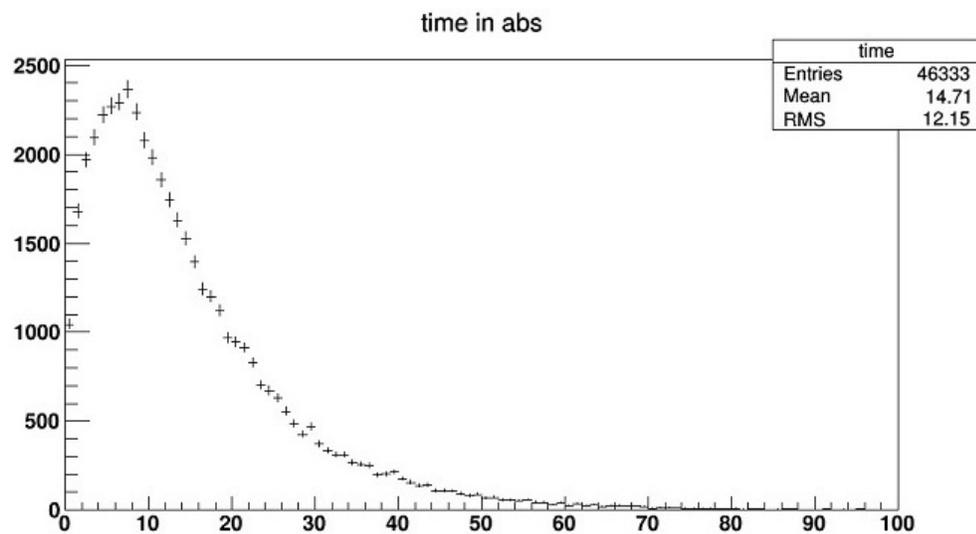


Рисунок 5 – Распределение фотоэлектронов по времени при равномерном распределении координаты пролёта мюона, момент времени $t=0$ соответствует времени влета мюона в рабочую область.

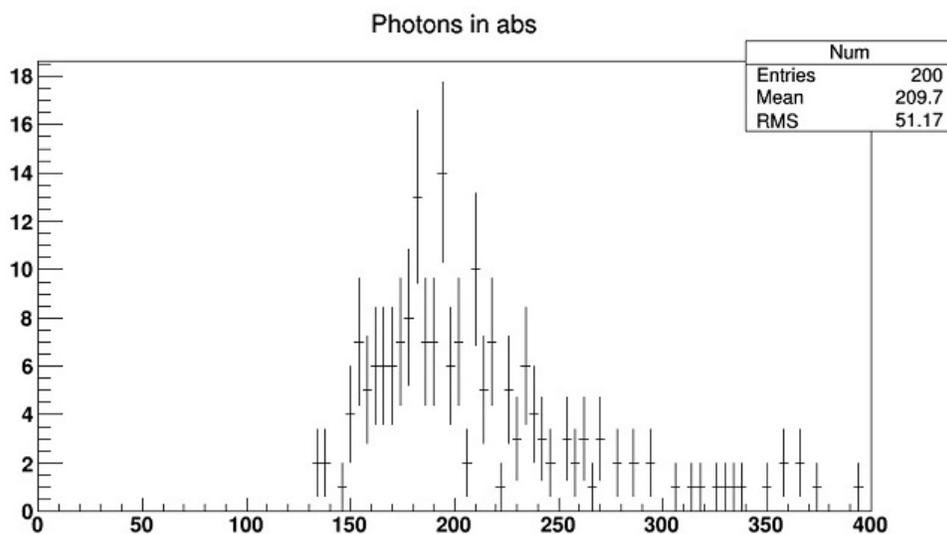


Рисунок 6 – Число зарегистрированных фотоэлектронов при регистрации мюона с энергией 1ГэВ при равномерном распределении координаты пролёта мюона.

4 Заключение

В ходе работы в GEANT4 была создана модель сцинтилляционной пластины и смоделирован её отклик на космический мюон фиксированной энергии, прлетающий в разных точках. Получены распределение фотоэлектронов по времени и распределение числа зарегистрированных фотоэлектронов.

В дальнейшем требуется провести сравнение с результатами работы реальной пластины. Кроме того, модель требует усложнения для изучения отклика пластины в потоке космических мюонов с реальным энергетическим спектром и угловым распределением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Mikaelyan L. Neutrino laboratory in the atomic plant (Fundamental and Applied Researches) // Proc. Int. Conf. "Neutrino-77". — 1978. — Vol. 2. — P. 383.
2. A. Borovoi L. Mikaelyan. The possibility of practical usage of neutrino // Atomic Energy. — 1978. — Vol. 44. — P. 508.
3. The industrial iDREAM detector for neutrino monitoring of the operating modes of nuclear reactors / M Gromov, G A. Lukjanchenko, D S. Markov et al. // Moscow University Physics Bulletin. — 2015. — 05. — Vol. 70. — P. 190–194.