

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

ОТЧЁТ О НАУЧНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СТУДЕНТА НА ТЕМУ:
**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВКЛАДОВ В ЧИСЛО ДЕЛЕНИЙ ОСНОВНЫХ
ДЕЛЯЩИХСЯ ИЗОТОПОВ В ЯДЕРНОМ
РЕАКТОРЕ**

Научный руководитель

к.ф.-м.н., нач. лаб. НИЦ КИ _____ Е. А. Литвинович

Студент

_____ Р. Р. Нугманов

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1 Метод регистрации электронных антинейтрино	4
2 Детектор iDream для мониторинга работы промышленных ядерных реакторов	7
3 Описание программы	9
3.1 Входные данные	9
3.2 Обработка позитронных спектров	10
3.3 Вывод результата	12
Список использованных источников	16

ВВЕДЕНИЕ

Идея прямого детектирования нейтрино была предложена Бете и Пайерлсом [1] через т.н. реакцию обратного бета-распада. Первым экспериментальным подтверждением существования нейтрино является эксперимента Ф. Райнеса и К. Коуэна [2; 3] на ядерном реакторе в период 1953-1956 годов. В результате деления ядерного топлива и последующего бета-распада нейтроноизбыточных осколков деления должны были образовываться электронные антинейтрино. При их взаимодействии с протонами рождались нейтроны и позитроны.

В 80х годах прошлого столетия Л.А. Микаэляном и А.А. Боровым была предложена методика дистанционной диагностики ядерных реакторов, используя антинейтрино, образующиеся в результате деления ядерного топлива [4]. Нейтринный метод мониторинга ядерных реакторов позволяет выполнять две важные задачи:

- контроль за наработкой оружейного плутония, образующегося в процессе работы реактора, и регистрация несанкционированных пусков и остановок реактора с целью его извлечения;
- учет времени наработки и выгорания ядерного топлива для оптимизации процесса работы реактора.

Нейтринный метод позволяет осуществлять дистанционный контроль за параметрами активной зоны ядерного реактора. На сегодняшний день нейтрино являются как объектом, так и инструментом для исследований в ядерной физике, физике элементарных частиц и астрофизике. Рождаясь непосредственно внутри активной зоны реактора, нейтрино несут неискаженную информацию о процессах деления и выгорания ядерного топлива. Как было отмечено выше, идея удаленного (дистанционного) мониторинга и диагностики активности ядерного реактора и внутриреакторных процессов с помощью нейтринного метода была предложена сотрудниками Курчатовского института Л.А. Микаэляном и А.А. Боровым в 1975 году и была

успешно подтверждена в ряде крупных экспериментов [5]. Помимо контроля за процессами внутри реактора данная методика может выполнять еще одну задачу – контроль несанкционированной наработки оружейного плутония.

Разработка компактных детекторов реакторных антинейтрино, их размещение в технических помещениях на АЭС и работа в режиме “черного ящика” представляет большой интерес для МАГАТЭ с целью контроля за нераспространением ядерных материалов в мире.

Данная работа посвящена созданию программы для оценки топливного состава активной зоны реактора АЭС по потоку нейтрино. Отладка программы проводилась на данных детектора iDream, полученные методом Монте-Карло симуляции.

1. МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ АНТИНЕЙТРИНО

Нейтрино относятся к лептонам, однако в отличие от своих заряженных партнеров (электронов, мюонов и тау-лептонов) они не несут электрический заряд, тем самым не участвуют в электромагнитном взаимодействии. Будучи фермионом, нейтрино имеет полуцелый спин, участвует в слабом и гравитационном взаимодействиях. Нейтрино трех типов и их античастицы обладают невероятной проникающей способностью, так, например, длина свободного пробега нейтрино с энергией $E = 3 \div 10$ МэВ в воде составляет порядка 10^{18} метра. Нейтрино были предположены Вольфгангом Паули в 1930м году для спасения законов сохранения в реакции бета-распада и модельно введены в теорию бета-распада Энрико Ферми в 1934 году [6]. С момента открытия этой частицы и по сей день ведется поиск возможностей использования их свойств в целях практического применения.

Выделяют следующие основные реакции взаимодействия антинейтрино с электронами и нуклонами атомных ядер:

- рассеяние антинейтрино на электроне: $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}'_e + e^{-'}$;
- рассеяние антинейтрино на ядре: $\bar{\nu}_e + A(Z, N) \rightarrow \bar{\nu}'_e + A(Z, N)'$;
- процессы с заряженными токами: $\bar{\nu}_e + A(Z, N) \rightarrow A(Z - 1, N + 1) + e^+$

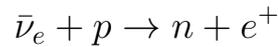
В таблице 1.1 указаны реакции, которые успешно наблюдались в экспериментах с реакторными антинейтрино[7]:

Регистрация потока $\bar{\nu}_e$, позволяющая измерить число ядер, испытавших деление и бета-распад в реакторе, в реакторных детекторах осуществляется путем захвата антинейтрино протонами мишени. Такой процесс называется реакцией обратного бета-распада (ОБР), в ходе которой образуются продукты, которые хорошо регистрируются сцинтиляционными де-

Таблица 1.1 — Каналы взаимодействия реакторных антинейтрино

Реакция	Сечение ($10^{-44}\text{см}^2/\text{деление}$)	Порог (МэВ)
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$	~ 63	1.8
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow e^+ + 2n$	~ 1.1	4.0
$\bar{\nu}_e + d \rightarrow \bar{\nu}_e + p + n$	~ 3.1	2.2
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}'_e + e^{-'}$	~ 0.4	0-6
$\bar{\nu}_e + A \rightarrow \bar{\nu}_e + A'$	$\sim 9.2 \cdot N^2$	0

текторами. Так выглядит реакция:



Свободные протоны в ядрах водорода, которые в большом количестве присутствуют в молекулах углеводородов органических жидких сцинтилляторов, выступают в роли мишеней. Реакция ОБР происходит в заряженном токе заряда. Поскольку образовавшийся нейтрон тяжелее протона-мишени, реакция ОБР имеет кинематический порог 1,806 МэВ. В этом процессе позитрон и нейтрон испускаются как продукты реакции. Позитрон быстро останавливается и аннигилирует, испуская два γ -кванта с энергией 511 кэВ, давая мгновенный сигнал с видимой энергией E_p , которая напрямую коррелирует с энергией падающего антинейтрино:

$$E_p \sim E_{\bar{\nu}_e} - 0,784 \text{ МэВ}$$

Смещение происходит в основном из-за разницы между энергией поглощенной электронным антинейтрино (1,806 МэВ), и энергией, аннигиляции позитронов (1,022 МэВ). Таким образом, реакция становится кинематически возможной. Излучаемый нейтрон изначально сохраняет информацию о направлении электронного антинейтрино. Однако нейтрон регистрируется только косвенно, после того, как он термализуется и захватывается, в основном на протоне. Такой захват приводит к испусканию γ -квантов с энергией 2,22 МэВ, которые обычно испытывают несколько комптоновских рассеяний. Эти комптоновские электроны затем производят сцинтилляци-

онный свет, который детектируется ФЭУ. Пары временных и пространственных совпадений между мгновенными и задержанными сигналами дают четкую сигнатуру событий ОБР, которая сильно подавляет фон. Эти сигналы называются мгновенными и задержанным.

2. ДЕТЕКТОР iDREAM ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Детектор iDREAM представляет собой компактный промышленный детектор для регистрации реакторных антинейтрино. Конструкция включает в себя основной детектор и внешнее вето. Корпус состоит из трех соосных цилиндров и верхней крышки, закрывающей внутренний объем. Толщина стенок из нержавеющей стали составляет 2 мм. Внутренние стенки чувствительного объема покрыты светоотражающим материалом Lumirror E6ST, обладающим коэффициентом отражения 0,9 для обеспечения улучшения светосбора. 16 ФЭУ модели HAMAMATSU R5912 просматривают внутренний объем, т.н. мишень детектора. Внешнее кольцо, являющееся гамма-кетчером, просматривается 12-ю ФЭУ модели ETE 9823B. Крепление всех 28 ФЭУ расположено на верхней крышке цилиндрического корпуса детектора. Подробная схема компоновки детектора приведена на рисунке 2.1. Важно отметить, что детектор iDREAM разрабатывался как промышленный прибор, а не как научный инструмент, что проявляется в его конструктивных особенностях.

Детектор состоит из:

- Чувствительный объём
- Поглотитель гамма-квантов
- Буферный объём

Чувствительный объем (мишень) представляет собой цилиндр диаметром 1250 мм и высотой 850 мм, заполненный жидким органическим сцинтиллятором с добавкой гадолиния в размере 1 г/л. Сцинтиллятор состоит из сложной смеси химических элементов. В составе находятся: ЛАБ (линейный алкилбензол), РОРОР (1,4-ди[2-[5-фенилоксазол]]-бензол)

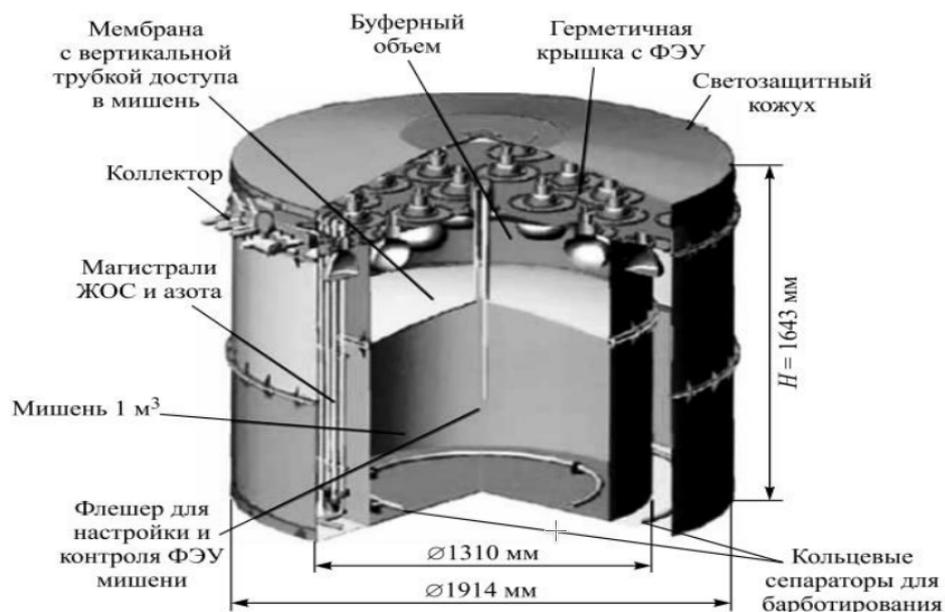


Рисунок 2.1 — Устройство детектора iDREAM

в концентрации 0,03 г/л и РРО (2,5-дифенилоксазол) в концентрации 3 г/л. Разные компоненты добавляются, чтобы обеспечить смещение эмиссионного спектра ЖОСа в сторону тех длин волн, для которых квантовая эффективность ФЭУ является максимальной. Световыход сцинтиллятора составляет порядка 8000 фотоэлектронов/МэВ.

Поскольку iDREAM является малогабаритным детектором, то для него ключевым параметром является стабильность световыхода и эффективности регистрации нейтронов, т.е. сохранение концентрации гадолиния в течение всего времени съема данных.

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

3.1. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Основной вклад в ν_e -излучение реактора вносят β -распад продуктов деления изотопов топлива ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}Pu и β -распад ядер ^{239}U и ^{239}Np , возникающих при радиационном захвате нейтронов изотопами ^{238}U , которые составляют основную массу топлива.

Соответственно, программа считывает формы спектров от каждого изотопа. Здесь в программу были заложены формы спектров от 4-х основных изотопов: ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}Pu . Они представлены на рисунке 3.1. Эти спектры получены с помощью Монте-Карло симуляции детектора iDream. Данные в программу заносятся в виде файлов в формате root.

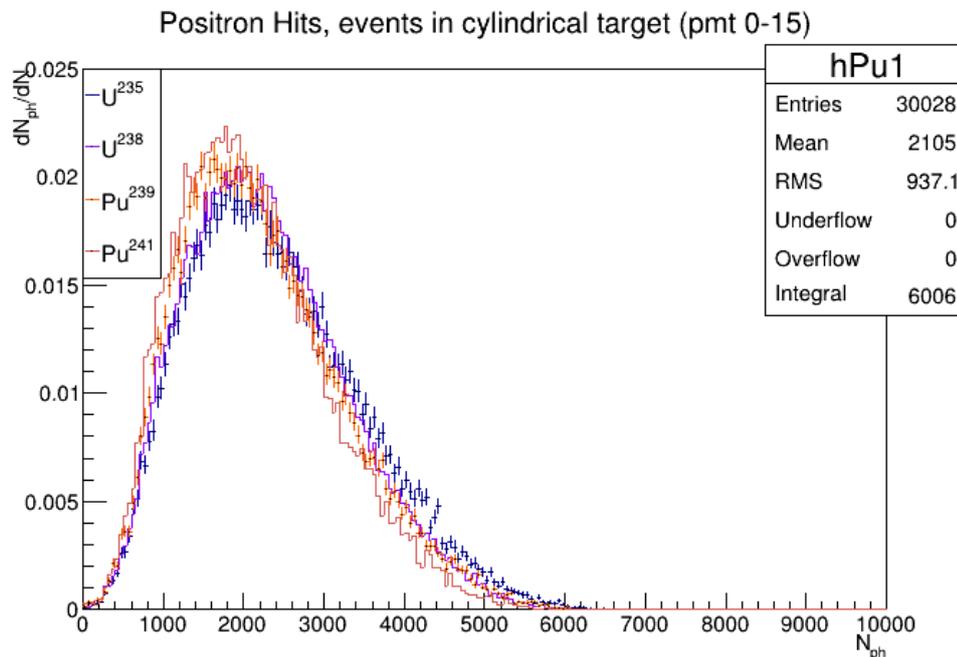


Рисунок 3.1 — Спектры позитронных событий

Теперь с помощью них, программа сможет провести экстракцию долей делений из спектра реакторных $\bar{\nu}_e$, которые будут подаваться на вход программы. В работе был подан набор из 3х нейтринных спектров, по-

лученные также с помощью Монте-Карло симуляции детектора iDREAM. Каждый из них соответствует 10, 100 и 320 дням с начала загрузки топлива в ядерный реактор. Экспозиция каждого спектра равна 2 дням. Для иллюстрации спектры представлены на рисунках:

3.2. ОБРАБОТКА ПОЗИТРОННЫХ СПЕКТРОВ

Для обработки поданных спектров, строится фитирующая функция:

$$f_i = a_5 f_5 + a_8 f_8 + a_9 f_9 + a_1 f_1, \quad (3.1)$$

где f_5 — это вклад от изотопа ^{235}U , f_8 — это вклад от изотопа ^{238}U , f_9 — вклад от изотопа ^{239}Pu , f_1 — вклад от изотопа ^{241}Pu . Эти вклады есть отнормированные на 1 спектры от соответствующих изотопов, a_5, a_8, a_9, a_1 — это весовые коэффициенты. Теперь задача состоит в подборе этих весовых коэффициентов. Эти весовые коэффициенты должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} 0 < a_5 < 1, \\ 0 < a_8 < 1, \\ 0 < a_9 < 1, \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$0 < a_1 < 1,$$

$$a_5 + a_8 + a_9 + a_1 = 1. \quad (3.3)$$

Далее для различных значений весовых коэффициентов высчитывается значение χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{(n_i - N f_i(a_5, a_8, a_9, a_1))^2}{\sigma_i^2}, \quad (3.4)$$

n_i — количество событий в i -ом бине, N — интеграл анализируемого спектра, f_i — значение фитирующей функции в i -ом бине, σ_i — ошибка i -го бина.

Т.е. программа, пробегая всевозможные значения параметров a_k , удовлетворяющих условиям (3.2), (3.3) с шагом 0,01, высчитывает значение χ^2 (3.4). Далее из полученных значений χ^2 выбирается наименьшее значение. Соответствующие этой величине весовые коэффициенты и есть искомые

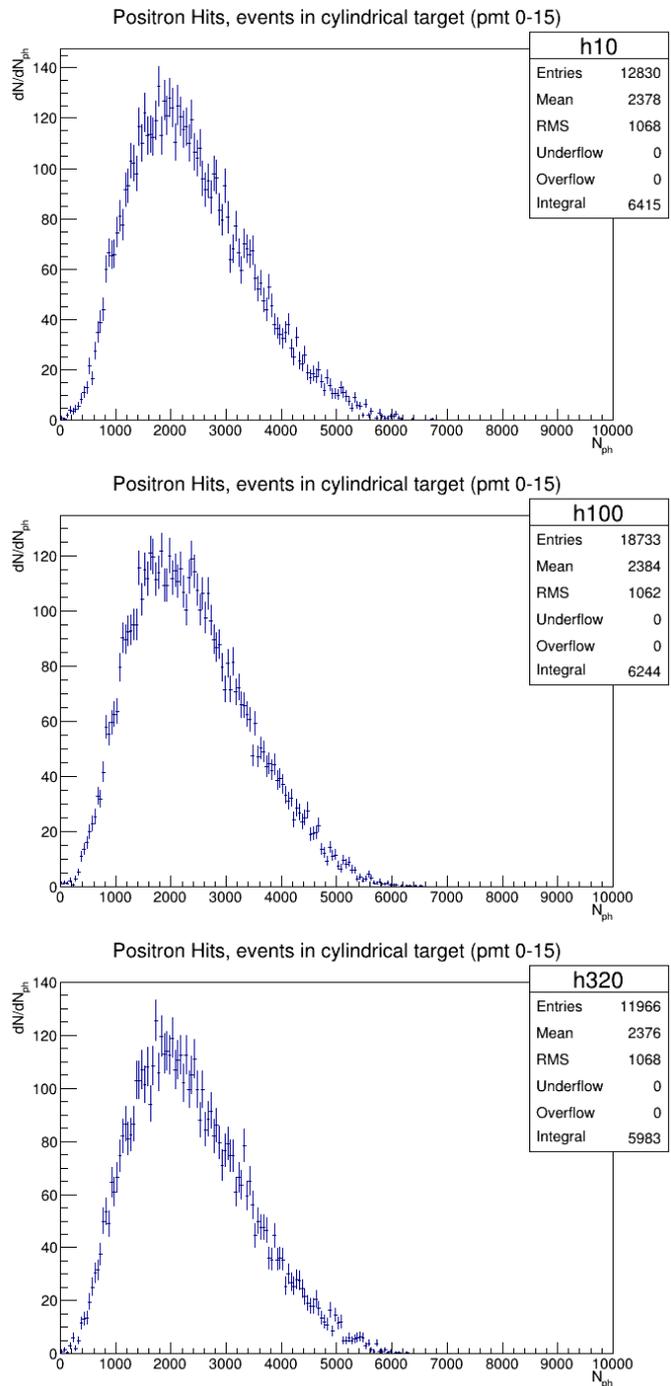


Рисунок 3.2 — Позитронные спектры в детекторе iDream. Каждый из них сверху вниз соответствует 10, 100 и 320 дням с момента начала реакторного топливного цикла

доли делений основных изотопов в ядерном реакторе

3.3. ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТА

Полученные результаты программа выводит в виде графиков ROOT, а также в текстовом виде в терминале. На рисунках продемонстрированы получаемые графики: 3.3, 3.4. Также в таблице 3.1 представлены полученные численные значения.

По полученным результатам видно, что доля делений урана-238 остается постоянной. Так и должно быть, поскольку количество урана-238 в реакторе очень мало изменяется со временем. Вообще доли делений урана-235 и плутония-239 не являются независимыми. Между ними существует почти точная антикорреляция. Доля делений урана-235 убывает в процессе топливного цикла ядерного реактора и изменяется в диапазонах $[52 \div 64]$ %. Соответственно Доля делений плутония-239 со временем увеличивается в связи с его естественной наработкой в ядерном реакторе. Она меняется в пределах $[26 \div 40]$ %. Полученные результаты укладываются в эти диапазоны, что говорит о правильности работы программы.

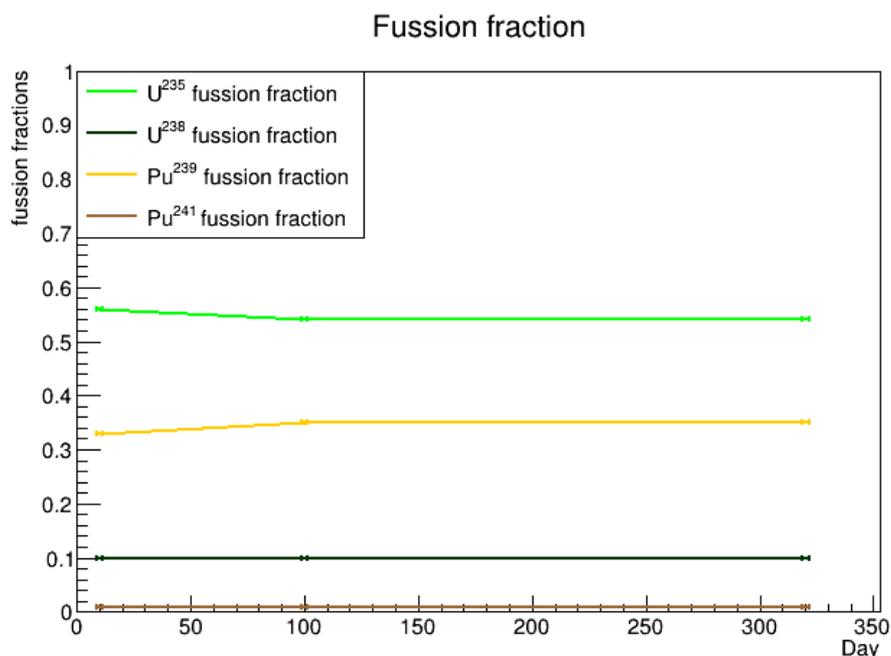


Рисунок 3.3 — Зависимость долей делений от времени с начала ядерного топливного цикла

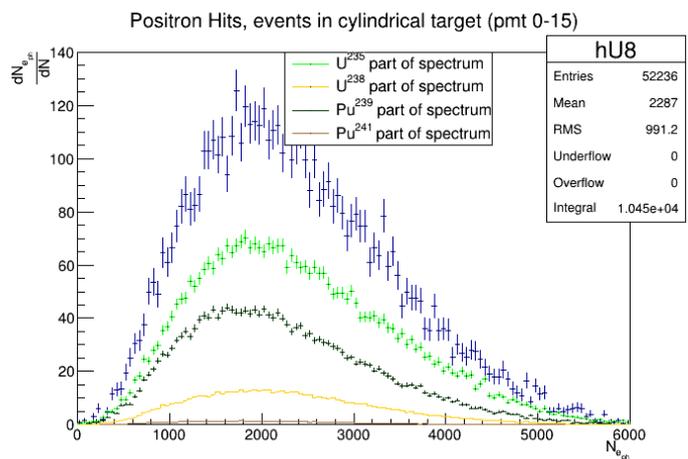
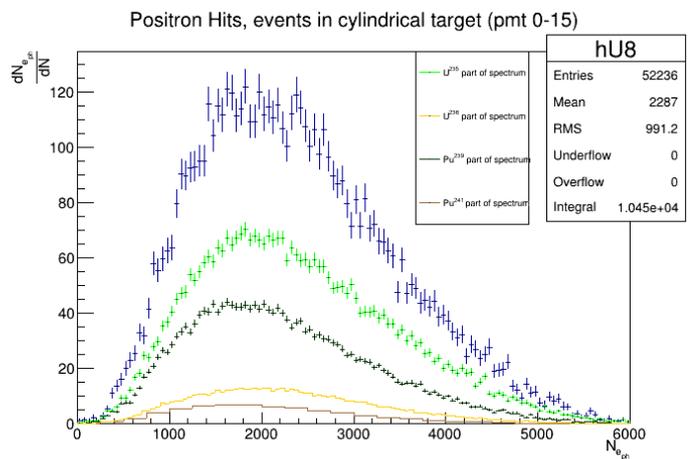
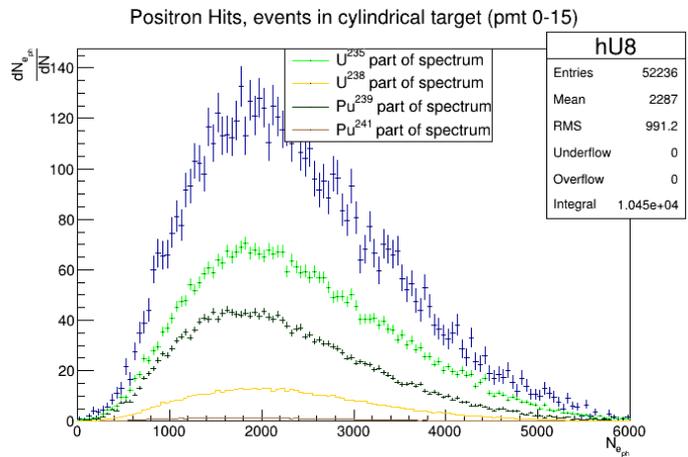


Рисунок 3.4 — Нейтринные спектры с изображением непосредственных вкладов основных изотопов

Таблица 3.1 — Полученные значения долей делений и статистические параметры

	10-ти дневный спектр	100-дневный спектр	320-дневный спектр
^{235}U	0.56	0.54	0.53
^{238}U	0.1	0.1	0.1
^{239}Pu	0.33	0.35	0.36
^{241}Pu	0.01	0.01	0.01
χ^2	672	650	600
ndf	526	531	525
p-value	$8.2 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$8.3 \cdot 10^{-3}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработан метод оценки топливного состава ядерного реактора.
- Была написана программа по определению долей делений основных реакторных изотопов.
- Программа опробована на данных Монте-Карло симуляции детектора iDream.
- Полученный результат программы говорит о потенциальной возможности детектора iDream к мониторингу топливного состава активной зоны реактора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Bethe H., Peierls R.* The neutrino // *Nature*. — 1934. — т. 133. — с. 532.
2. *Reines F., Cowan C.* Detection of the neutrino: // *Science*. — 1953. — т. 92. — с. 830—831.
3. *Reines F.* [и др.]. Detection of the neutrino: a confirmation // *Science*. — 1956. — т. 124. — с. 103—104.
4. *Копейкин В. И., Микаэлян Л. А.* Анализ зависимости числа событий реакции $\bar{\nu}_e + p = e^+ + n$ в детекторе антинейтрино от мощности реактора и изотопного состава ядерного топлива. — 6419/2 : ИАЭ, 2006. — 9 с. — ISBN 9781417642595.
5. *Русов В. Д., Тарасов В. А., Литвинов Д. А.* Физика реакторных антинейтрино. — ЛКИ, 2008. — 408 с. — ISBN 9781417642595.
6. *Fermi E.* Versuch einer theorie der β -strahlen // *Zeitschrift fur Physik*. — 1934. — т. 88. — с. 161—177.
7. *Qian X.* Physics with reactor neutrinos // *Reports on Progress in Physics*. — 2019. — т. 82.