



Детектор iDREAM на Калининской  
АЭС: сигнал от антинейтрино и выход  
реакции обратного бета-распада

---

Выполнил

И. Н. Жутиков

Науч. руководитель

Е. А. Литвинович

29 июня 2023

# Мотивация:

- Прикладные задачи:
  - Мониторинг состояния, мощности реактора
  - Измерение накопления плутония комплементарными методами (по изменению потока антинейтрино)
- Фундаментальные задачи:
  - Изучение спектральной аномалии реакторных антинейтрино
  - Исследование осцилляций антинейтрино в стерильное состояние
  - Проверка моделей спектров реакторных антинейтрино

## Цели работы:

- Изучение потока антинейтрино от реактора на основе анализа картограмм выгорания топлива в ходе 13-й топливной кампании 3-го энергоблока КАЭС, предоставленных службами станции.
- Анализ эволюции топливного цикла 3-го энергоблока на основе набранных нейтринным детектором iDREAM экспериментальных данных.

# Изучение потока антинейтрино

# Теоретический расчёт потока антинейтрино

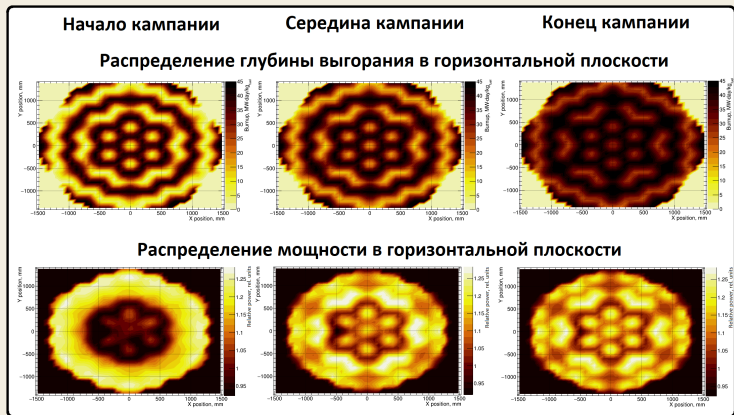
Поток антинейтрино можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Phi(t, E_{\bar{\nu}_e}) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int \frac{P_{th}(t, \vec{r})}{(\vec{L}_0 - \vec{r})^2 E_f(t, \vec{r})} \cdot S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) dV$$

- $\vec{L}_0$  - расстояние от точки, в которой рассчитывается поток антинейтрино, до центра АЗ
- $\vec{r}$  - радиус вектор от центра АЗ до элемента АЗ от которого вычисляется поток
- $P_{th}(t, \vec{r})$  - тепловая мощность реактора
- $E_f(t, \vec{r}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) E_i$  - средняя тепловая энергия деления
- $S_f(t, \vec{r}, E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_i \alpha_i(t, \vec{r}) S_i(E_{\bar{\nu}_e})$  - кумулятивный спектр антинейтрино, в дальнейших расчётах использовалась модель КИ
- $\alpha_i(t, \vec{r})$  - доля деления соответствующего изотопа ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ )

# Распределение выгорания и энерговыделения по объёму АЗ

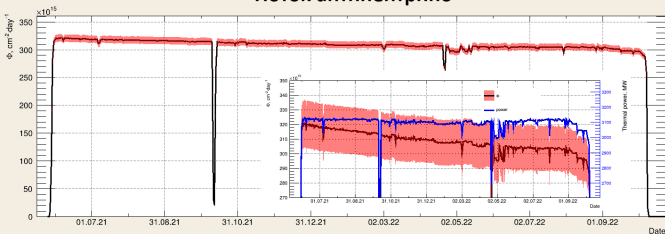
Для расчёта потока антинейтрино использовались следующие распределения глубин выгорания и мощности по объёму АЗ:



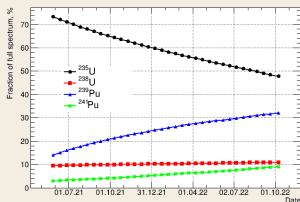
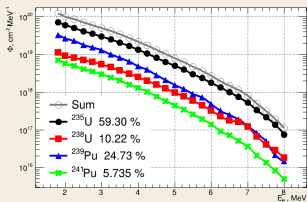
# Результаты расчёта потока антинейтрино

Для расстояния  $L_0 = 19.6$  м получаются следующие результаты:

## Поток антинейтрино

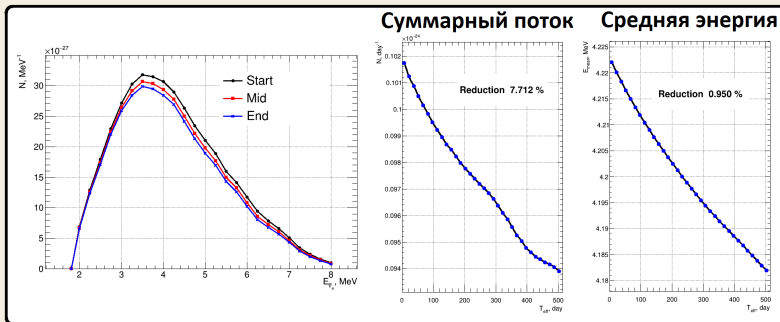


## Суммарный спектр антинейтрино и его изотопный состав



# Изменение потока антинейтрино потока антинейтрино

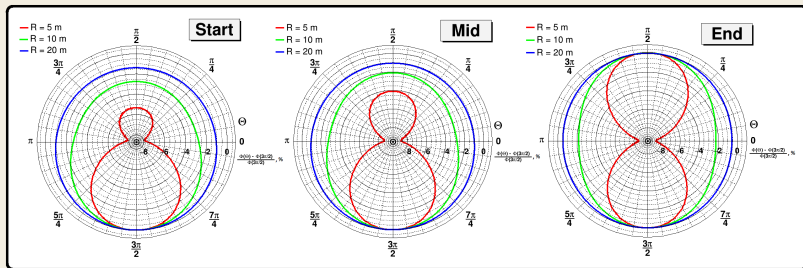
Для изучения того, как будет изменяться поток антинейтрино в ходе работы реактора, был произведён расчёт спектра в различные стадии кампании. Падение потока антинейтрино за кампанию составляет  $\approx 7.7\%$ , а уменьшении средней энергии  $\approx 1\%$ .





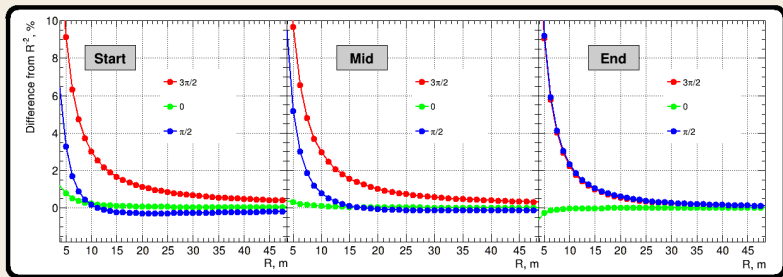
# Анизотропия потока антинейтрино

В ходе расчёта потока антинейтрино была обнаружена асимметрия потока в вертикальной плоскости. Наибольшее количество антинейтрино испускается вниз, наименьшее вправо и влево, что может имитировать эффект осцилляций при перемещении детектора относительно реактора.



# Отклонение потока от точечной модели АЗ

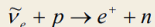
Также было рассчитано отклонение детального расчёта от упрощённого, что тоже может имитировать осцилляции анти-нейтрино в стерильное состояние при перемещении детектора.



# Анализ данных детектора

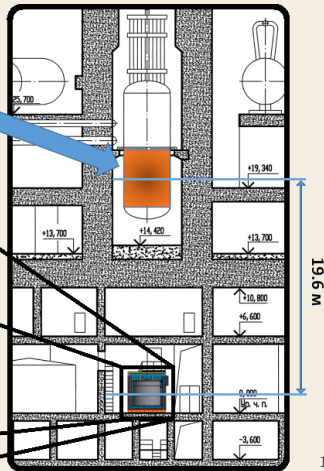
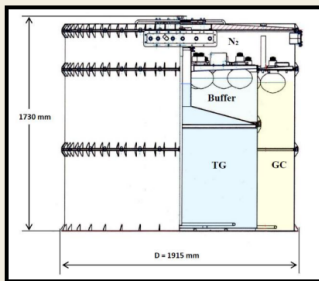
# Детектор iDREAM

- Мишень (TG) - Gd-ЖОС (1 г/л) в резервуаре из нержавеющей стали, 1 м<sup>3</sup>
- Гамма-кетчер (GC) - ЖОС без Gd во внешнем резервуаре из нержавеющей стали, 1.8 м<sup>3</sup>
- Буфер (Buffer) - чистый LAB, 0.5 м<sup>3</sup>



$$E_{th} = 1,8 \text{ MeV} \quad E_{prompt} = E_{\nu} - 0,78 \text{ MeV}$$

Третий энергоблок  
Калининской АЭС



# Отбор мюонов и космогенных нейтронов

Критерии для отбора мюонов:

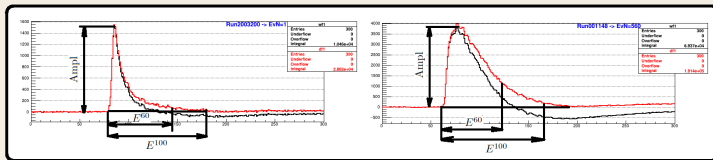
$$E_{tg} + E_{gc} > 10 \text{ МэВ} \text{ и } E_{tg}^{60}/E_{tg}^{100} > 0.8$$

Критерии для космогенных нейтронов:

$$\text{Время после мюона менее } 100 \text{ мкс} \text{ и } E_{tg} \in [5; 10] \text{ МэВ} \text{ и } E_{tg}^{60}/E_{tg}^{100} > 0.93$$

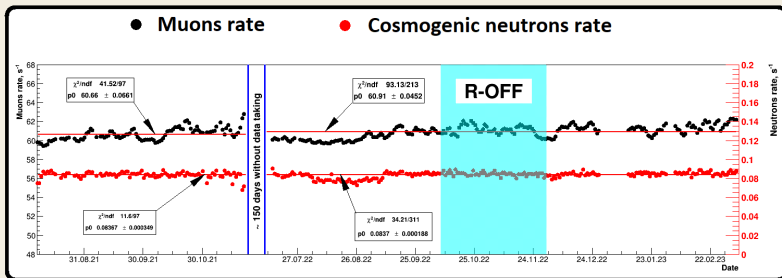
Случайный фон для космогенных нейтронов:

- 1)  $E_{tg} \in [5; 10] \text{ МэВ}$  и  $E_{tg}^{60}/E_{tg}^{100} > 0.93$
- 2) Попадание в одно из 100 окон длительностью 100 мкс через каждые 500 мкс.



# Скорость счёта мюонов и космогенных нейтронов в детекторе

Полученные скорости счёта мюонов и космогенных нейтронов являются стабильными и не зависят от состояния реактора, что говорит о стабильности вызванного ими коррелированного фона.



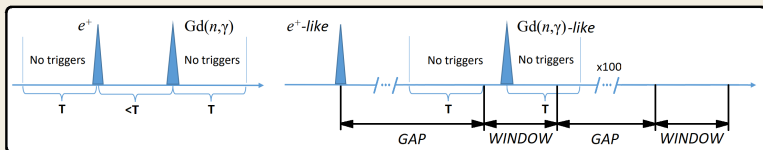
# Отбор IBD кандидатов

Критерии для сигнала:

- 1)  $E_1 \in [1.5; 8]$  МэВ,  $E_2 \in [5; 10]$  МэВ и отбор по форме импульса
- 2) Время между событиями менее 100 мкс и до/после первого/второго события нет других в течении 100 мкс.

Критерии для случайного фона:

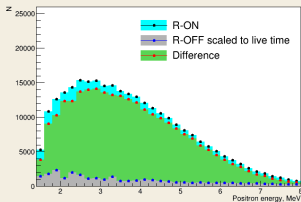
- 1)  $E_1 \in [1.5; 8]$  МэВ,  $E_2 \in [5; 10]$  МэВ и отбор по форме импульса
- 2) Попадание в одно из 100 окон длительностью 100 мкс через каждые 500 мкс и до/после окна/второго события нет других в течении 100 мкс.



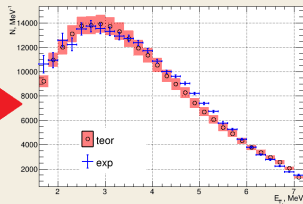
# Результат отбора антинейтрино

В результате отбора получены следующие графики явно свидетельствующие о наличии сигнала от антинейтрино

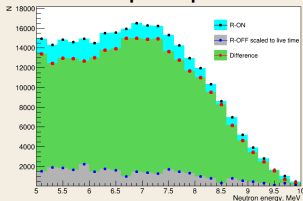
### Спектр позитронов



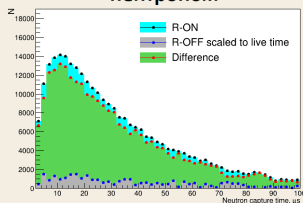
### Спектр антинейтрино



### Спектр нейтронов



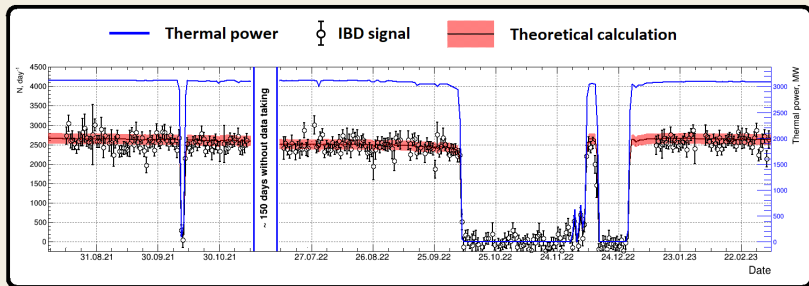
### Время между позитроном и нейтроном





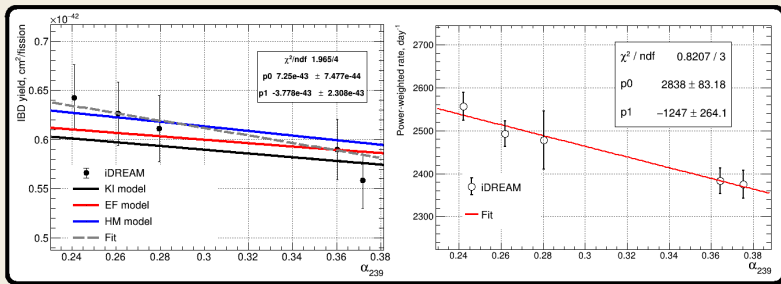
# Скорость счёта антинейтрино в детекторе

В результате анализа данных получена следующая скорость счёта антинейтрино в детекторе, которая достаточно хорошо согласуется с теоретическим расчётом.



# Выход реакции обратного бета-распада и изменение скорости счёта в ходе кампании

Было так же изучено изменение скорости счёта антинейтрино в ходе кампании. Полученное падение скорости счёта детектора составляет  $\approx 7\%$ , что совпадает с теоретическим расчётом.



# Заключение

В ходе работы были получены следующие результаты:

- На основе данных о выгорании топлива рассчитан поток антинейтрино и его спектр, детально изучено изменение потока антинейтрино в ходе кампании связанное с изменением изотопного состава топлива.
- Рассчитана анизотропия и отклонение потока антинейтрино от точечной модели АЗ, вызванная его геометрическими размерами и распределением энерговыделения и выгорания по объёму АЗ, которые могут симулировать осцилляции антинейтрино в стерильное состояние.
- Проведен анализ эволюции топливного цикла на основе измерений скорости счета антинейтринных событий детектором iDREAM. Падение скорости счёта, вызванное изменением изотопного состава топлива, составляет  $\approx 7\%$ , что сходиться с теоретическим расчётом.
- Проведены измерения выхода реакции ОБР в зависимости от  $\alpha_{239}$ . Результаты измерений находятся в согласии с предсказаниями моделей спектров реакторных антинейтрино.