

СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС

Подготовил: ст. гр. М23-114 Нуркенов А.А.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Литвинович Е.А.

Москва 2025

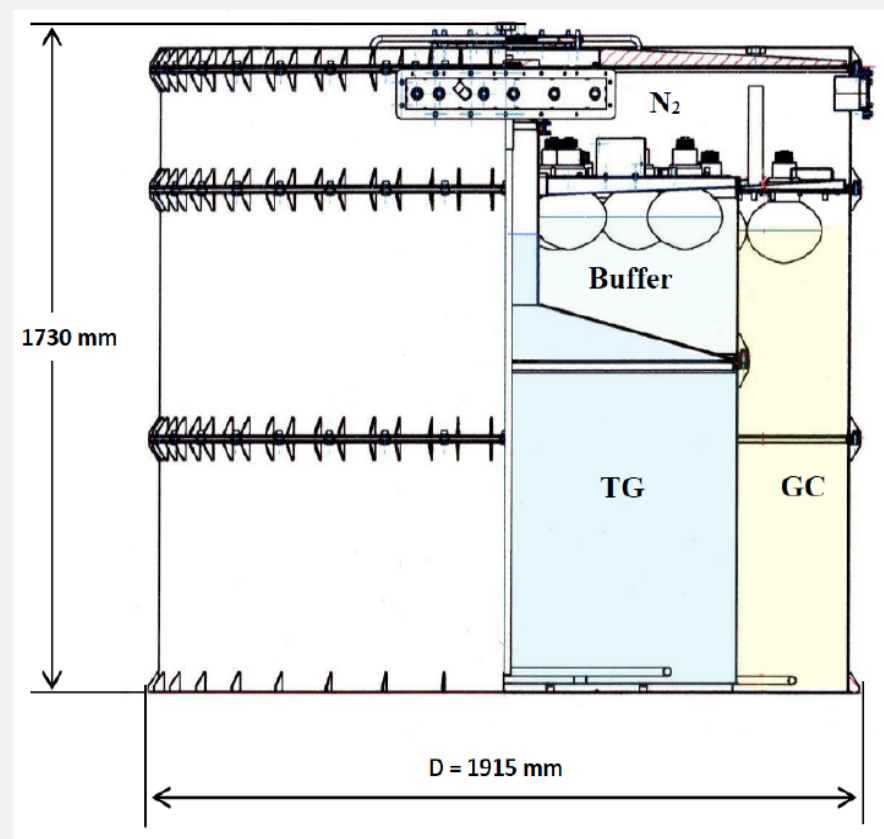
ДЕТЕКТОР IDREAM

Детектор iDREAM предназначен для опосредованного мониторинга активной зоны ядерных реакторов и контроля за нераспространением делящихся материалов по потоку антинейтрино из активной зоны. Детектирование антинейтрино осуществляется по реакции обратного бета-распада (ОБР) на протоне.

- TG – мишень
- GC – гамма-кетчер
- Buffer – буферная зона

Детектор смонтирован в подреакторном помещении на расстоянии 19.5 м от центра активной зоны реактора ВВЭР-1000 3-го энергоблока Калининской АЭС.

Мишень представляет собой 1 тонну жидкого сцинтиллятора на основе LAB (линейный алкилбензол) с добавлением гадолиния с концентрацией 1 грамм/литр



ЦЕЛИ

1. Выделение сигнала антинейтрино в данных детектора iDREAM, с учётом вкладов случайного и коррелированного фонов
2. Измерение скорости взаимодействий антинейтрино и сравнение с расчётным количеством регистрируемых детектором событий

ИСТОЧНИК БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ 252Cf

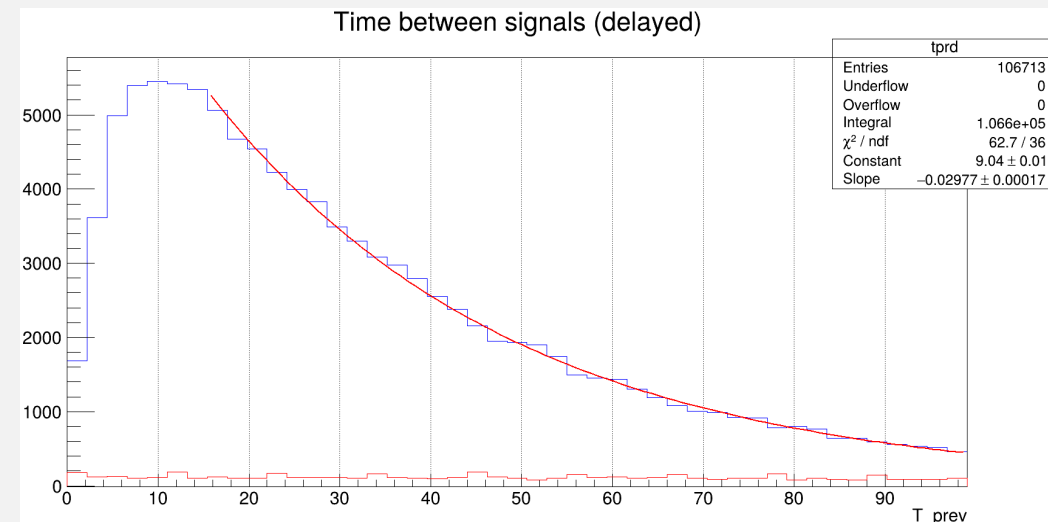
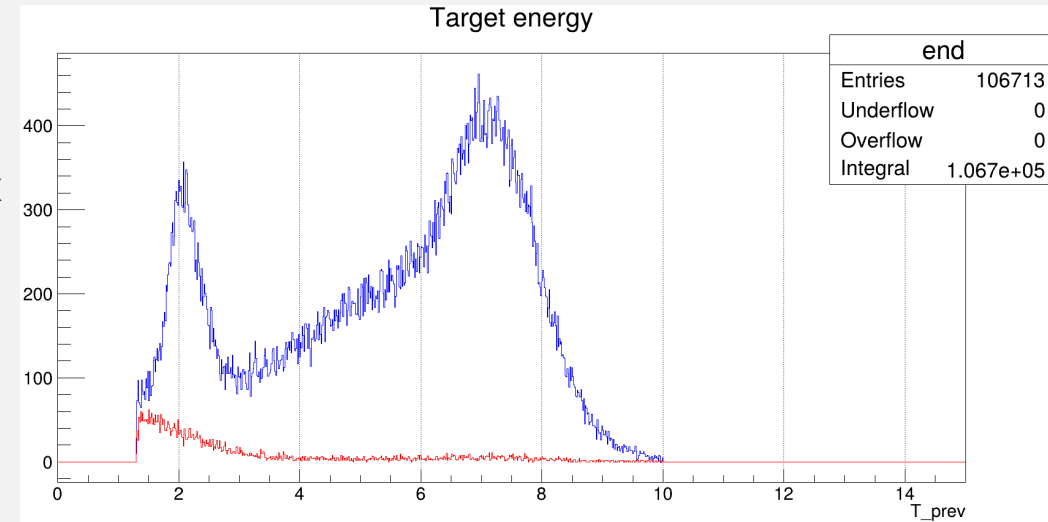
Для определения энергетической шкалы детектора используются калибровочные данные на основе источника быстрых нейтронов ^{252}Cf .

В качестве ориентира принимает пик от захвата нейтрона на водороде, значение которого принимается равным 2.2 МэВ

Первый пик – захват нейтрона на водороде,

Второй пик – захват нейтрона на гадолинии.

Аппроксимация временного спектра захвата нейтронов функцией $f(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \text{const}$, где τ – время захвата нейтронов, даёт $\tau \approx 33.6$ мкс.



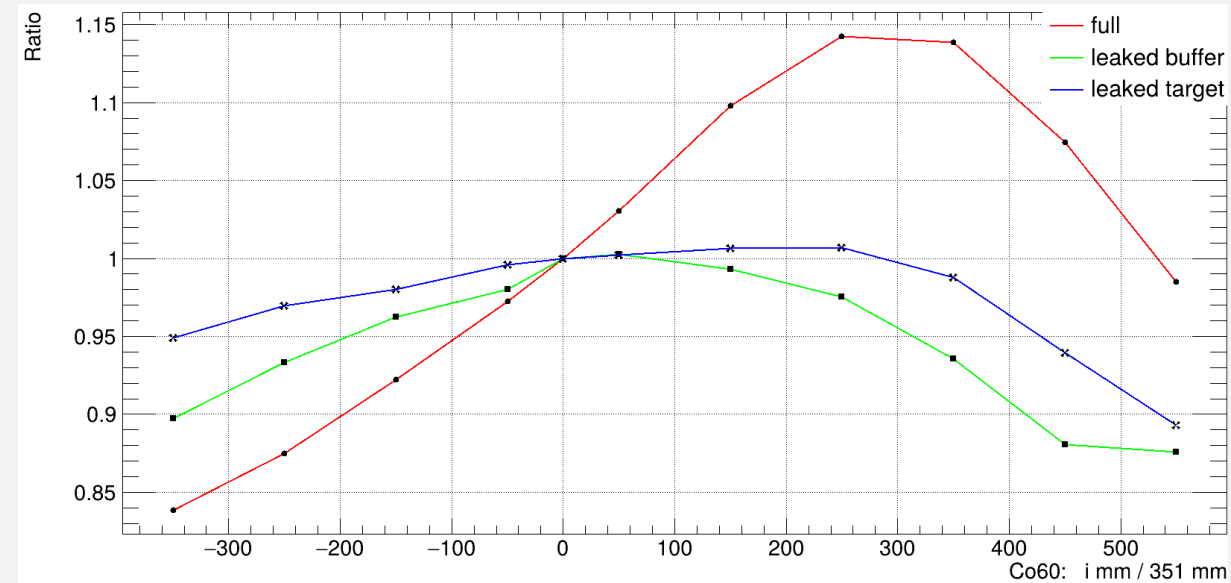
ГАММА-ИСТОЧНИК ^{60}Co . НЕОДНОРОДНОСТЬ СВЕТОСОБИРАНИЯ

В качестве источника гамма-излучения был взят ^{60}Co , продуцирующий два γ -кванта с энергиями $E_\gamma = 1.173, 1.332$ МэВ.

Были построены энергетические спектры на каждой высоте для трёх случаев:

1. Все объёмы детектора залиты рабочими жидкостями;
2. Из буфера слито 150 л LAB
3. Буферная зона снова заполнена, слито 100 л Gd-ЖОС из мишени до края мембраны для установления симметричного объёма мишени (цилиндр)

Определялось отношение значения пика на каждой высоте к значению пика по центру $\frac{E_i}{E_0}$, где i – высота положения источника в мм.

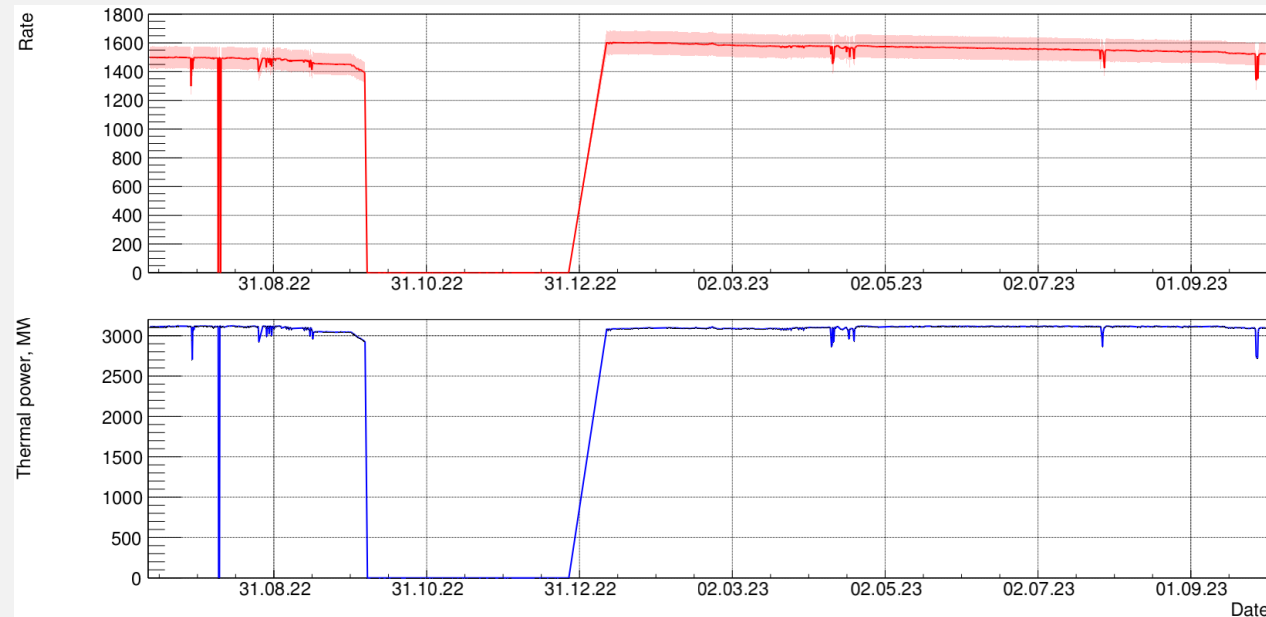


ОЖИДАЕМАЯ СКОРОСТЬ СЧЁТА ДЕТЕКТОРОМ IDREAM

$$R_v = \frac{N_p P_{th} \langle \sigma_f \rangle}{4\pi L^2 \langle E_f \rangle} \cdot \varepsilon$$

- $N_p = 7 \cdot 10^{28}$ – количество протонов в мишени детектора
- P_{th} - тепловая мощность АЭС, МВт
- $\langle \sigma_f \rangle$ - сечение реакции ОБР, усреднённое по спектру антинейтрино
- $L = 19.5 \pm 0.1$ – расстояние от АЗ реактора до центра детектора
- $\langle E_f \rangle$ - усреднённая энергия деления изотопов топлива на одно деление
- $\varepsilon = 0.22 \pm 0.01$ – эффективность регистрации

Ожидаемая среднесуточная скорость счёта с порога на энергию позитрона 3 МэВ равна $R_v = 1530 \pm 80$ сутки⁻¹

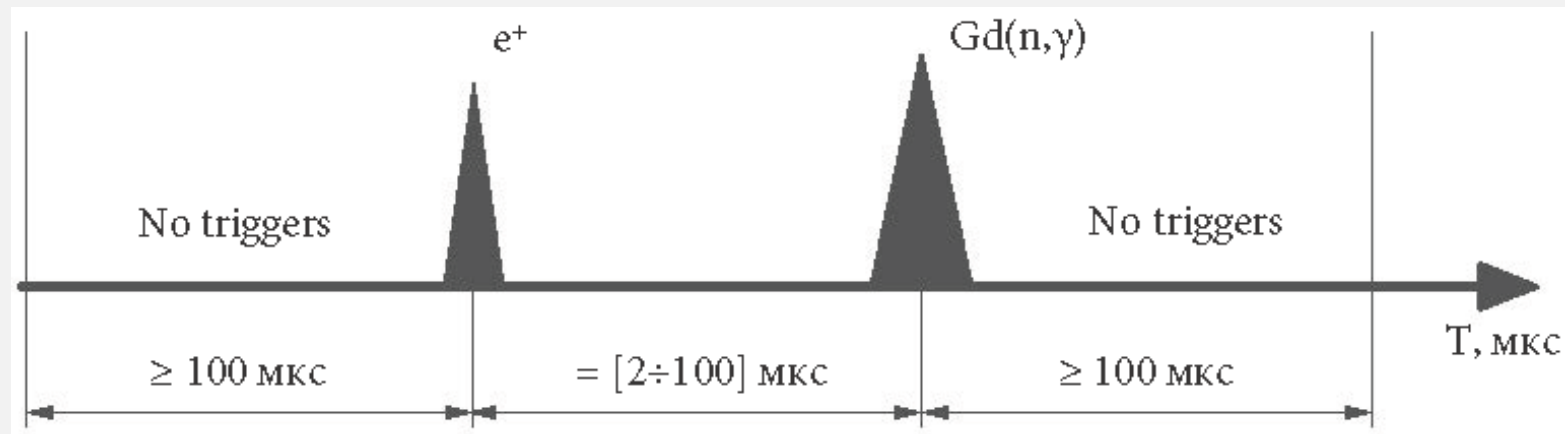
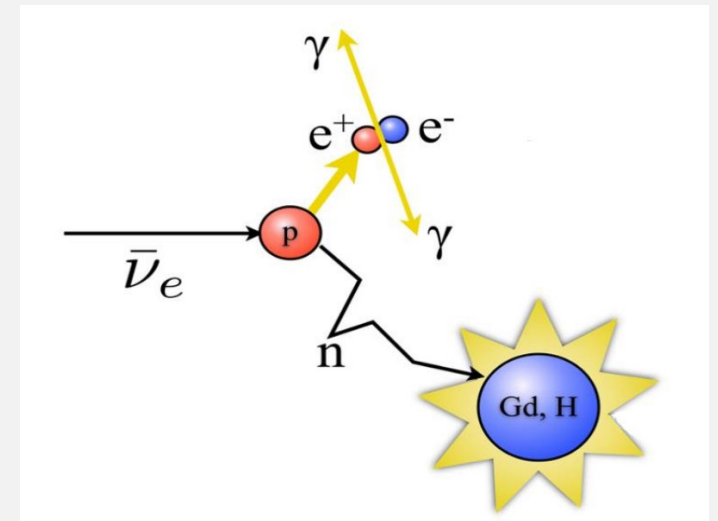


Date

ПРИНЦИП ОТБОРА АНТИНЕЙТРИНО

Для регистрации реакторных антинейтрино:

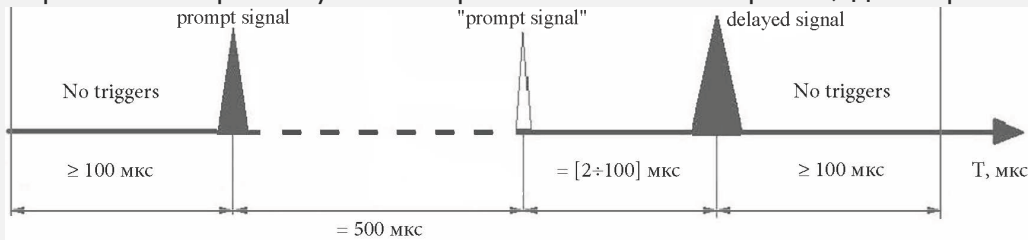
- $E(e^+) = [3 \div 8] \text{ МэВ};$
- $E(n) = [5 \div 10] \text{ МэВ};$
- $\Delta T_{12} = [2 \div 100] \text{ мкс};$
- Отсутствие сигнала перед первым событием в течении $T_1 \geq 100 \text{ мкс};$
- Отсутствие сигнала после второго события в течении $T_2 \geq 100 \text{ мкс}.$



СЛУЧАЙНЫЙ ФОН

Скорость счёта детектора составляет ~ 1 kHz, что приводит к высокой частоте случайных наложений событий похожих на ОБР, но не скоррелированных между собой

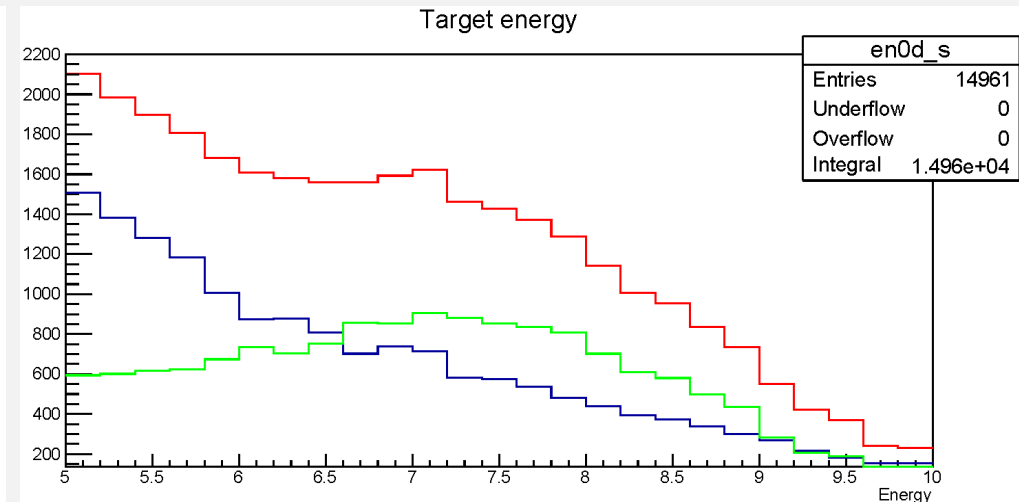
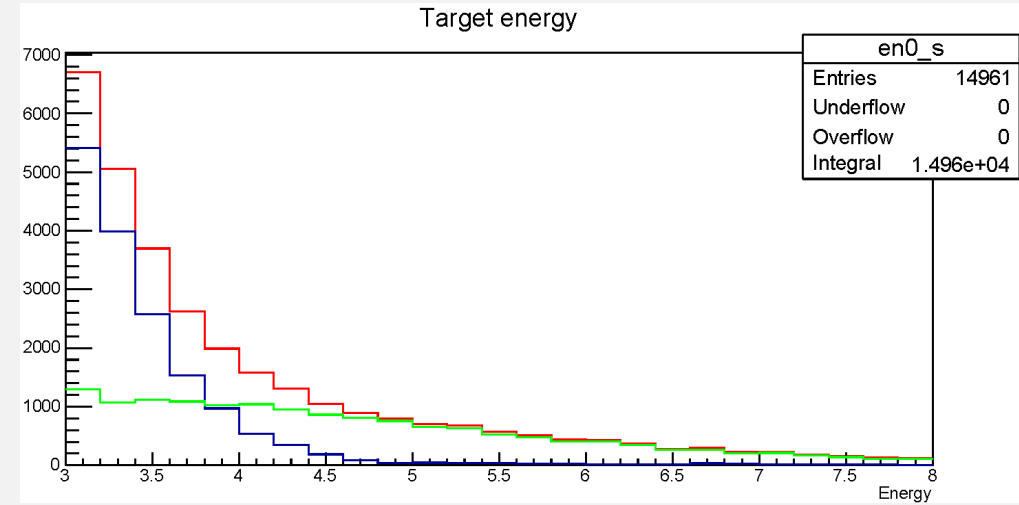
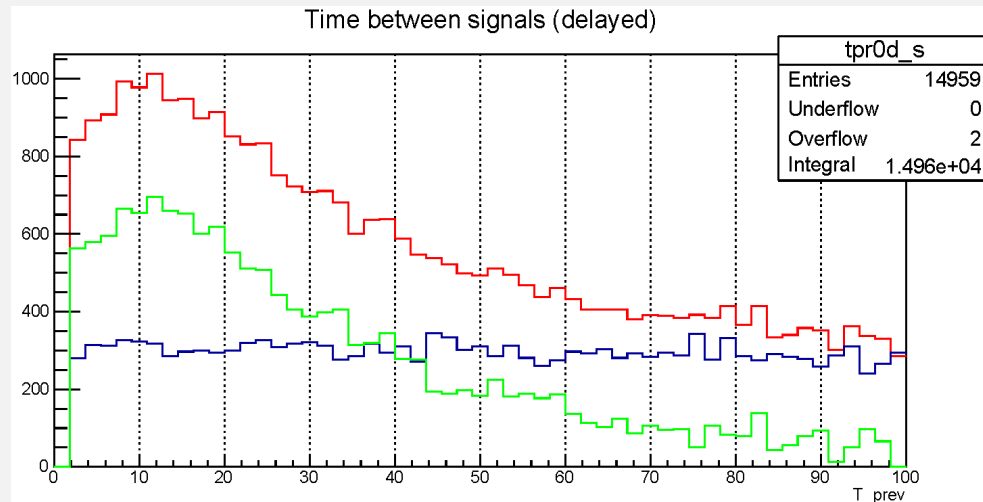
Для измерения числа случайных наложений от каждого первого события отступается временной промежуток $\gg$ времени жизни нейтрона (здесь принимается равным 500 мкс)



Основные источники фона от радиоактивности окружающей среды:

- Изотопы урана и тория в бетонных конструкциях энергоблока
- Радиоактивность сцинтиллятора и конструкционных материалов самого детектора

Красный – кандидаты;
Синий – случайный фон;
Зелёный – разница.



КОРРЕЛИРОВАННЫЙ ФОН

В качестве коррелированного фона выступают пары скоррелированных между собой событий, похожих на событие ОБР

Основные источники фона:

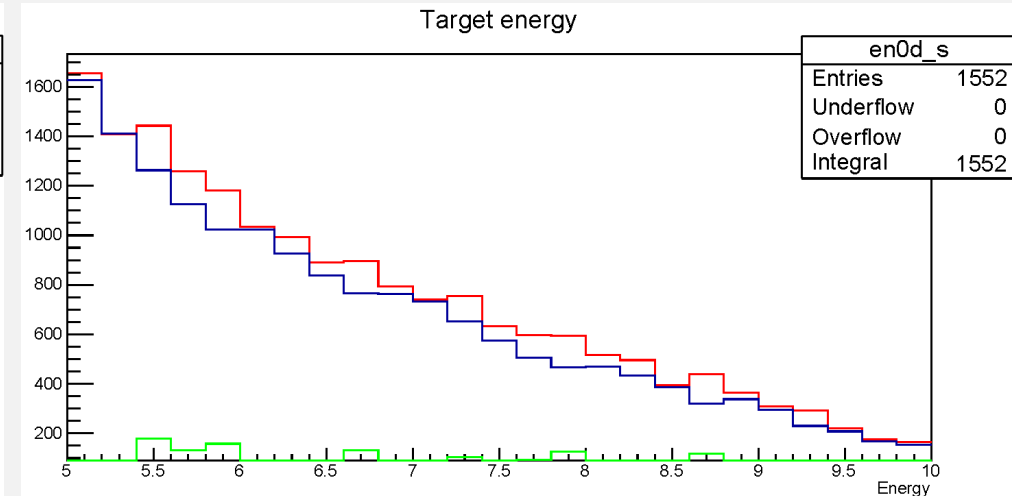
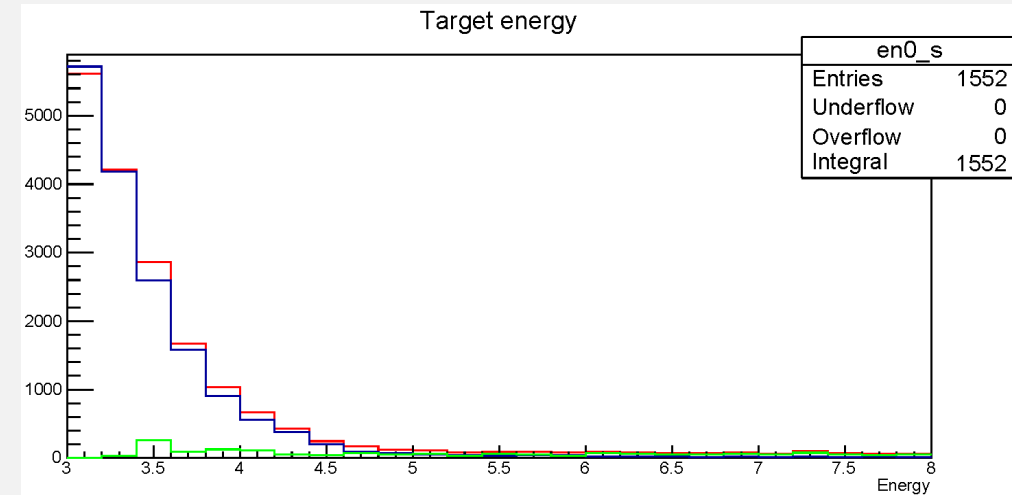
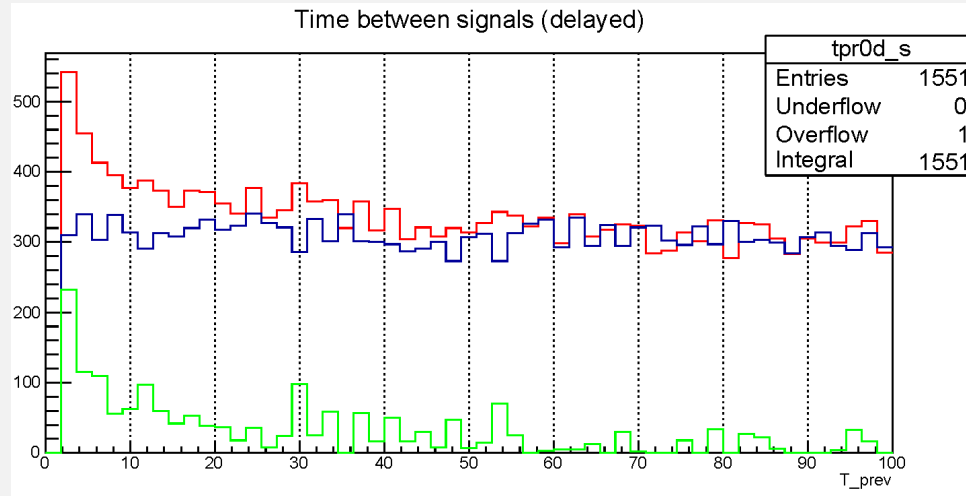
- Остановки мюонов
- Космогенные радионуклиды ${}^9\text{Li}$, ${}^8\text{He}$
- Быстрые космогенные нейтроны и космические мюоны

Для отбора коррелированного фона использовались данные собираемые в период R_OFF с аналогичными критериями и также вычитался случайный фон

Красный – сигнал;

Синий – случайный фон;

Зелёный – разница.



СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО

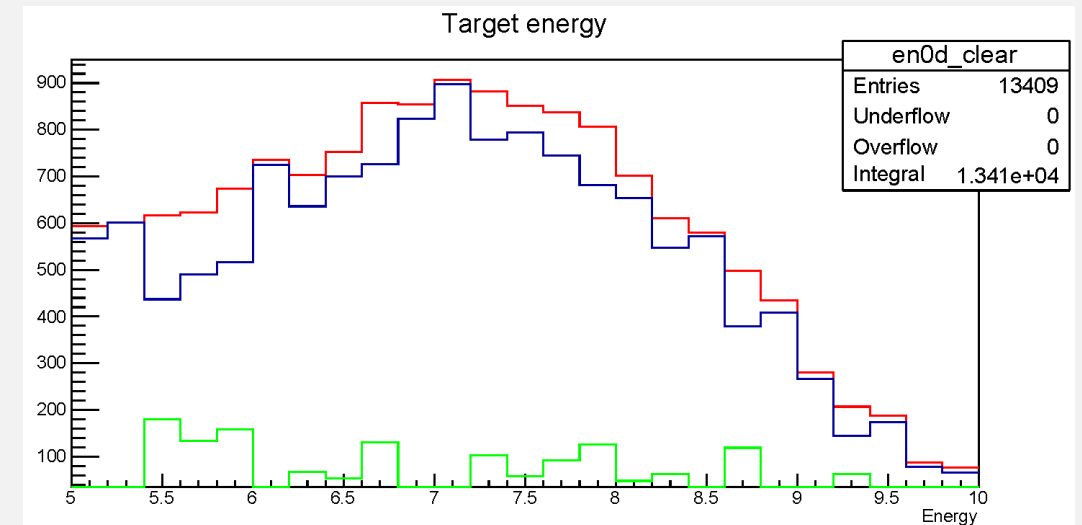
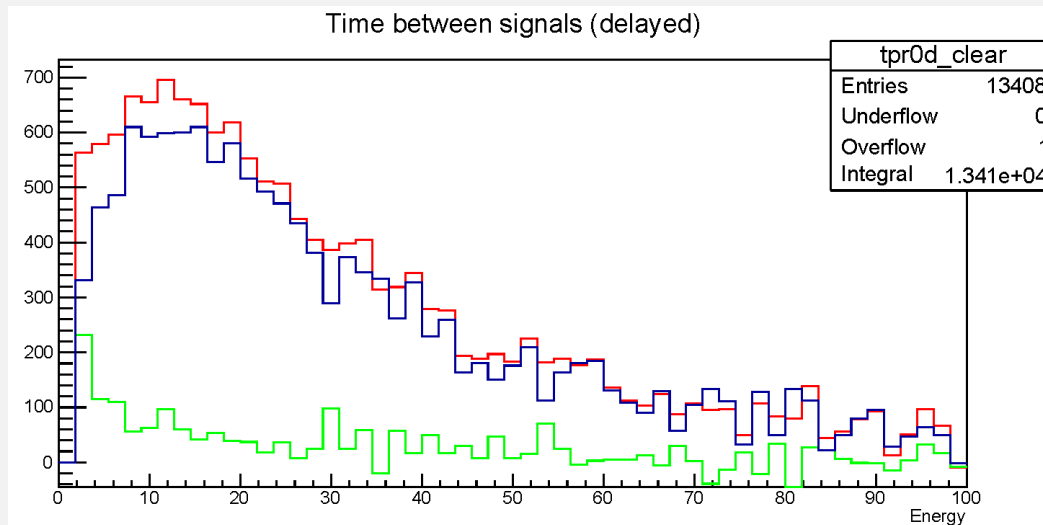
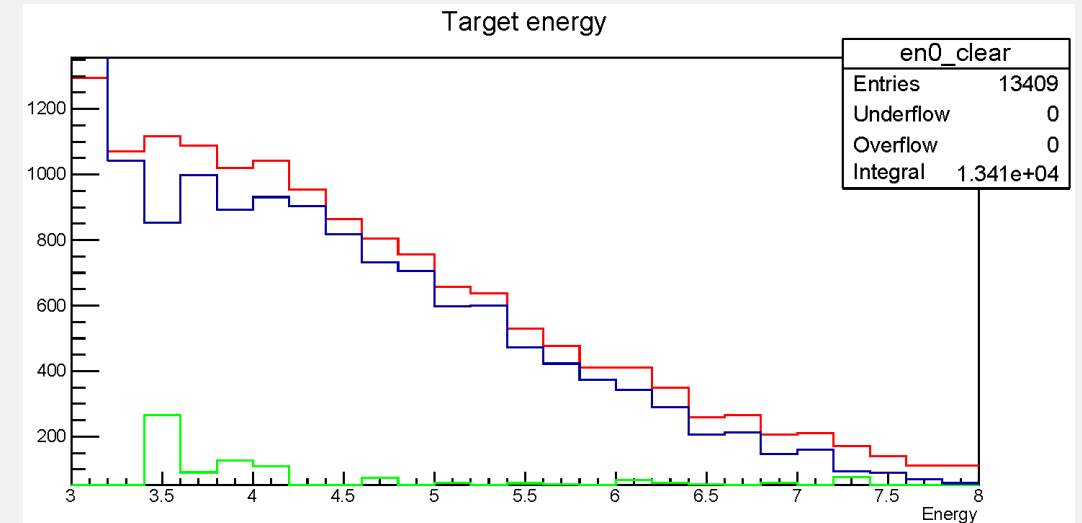
Энергетические и временные спектры iDREAM, соответствующие сигналу антинейтрино после учета случайного и коррелированного фонов

$$R_{\nu} = 1602 \pm 87 \text{ сутки}^{-1}$$

Красный – кандидаты;

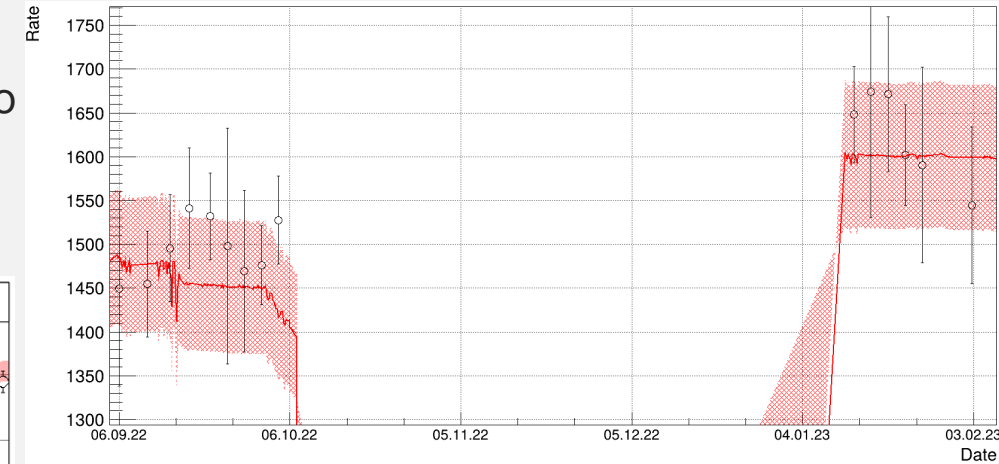
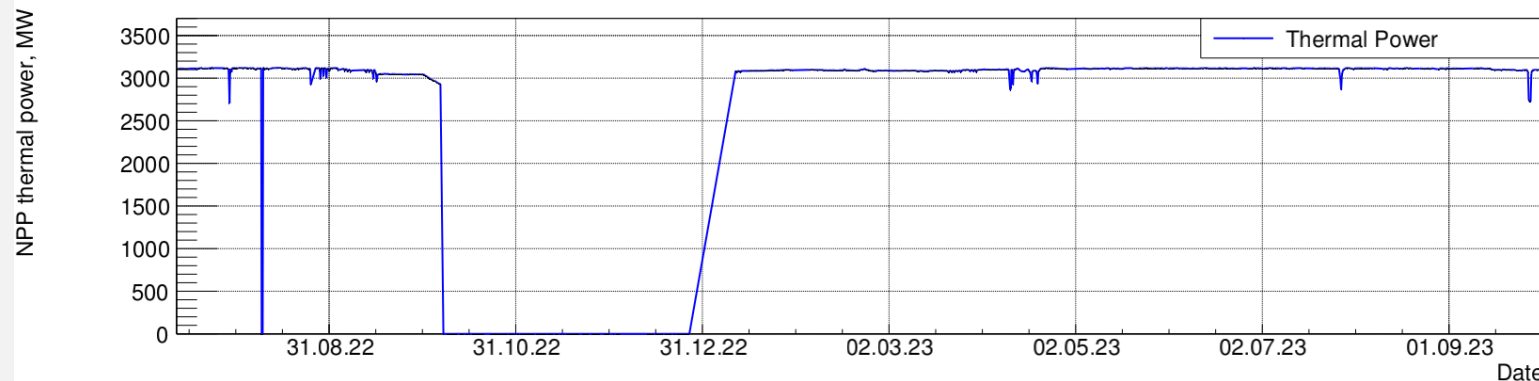
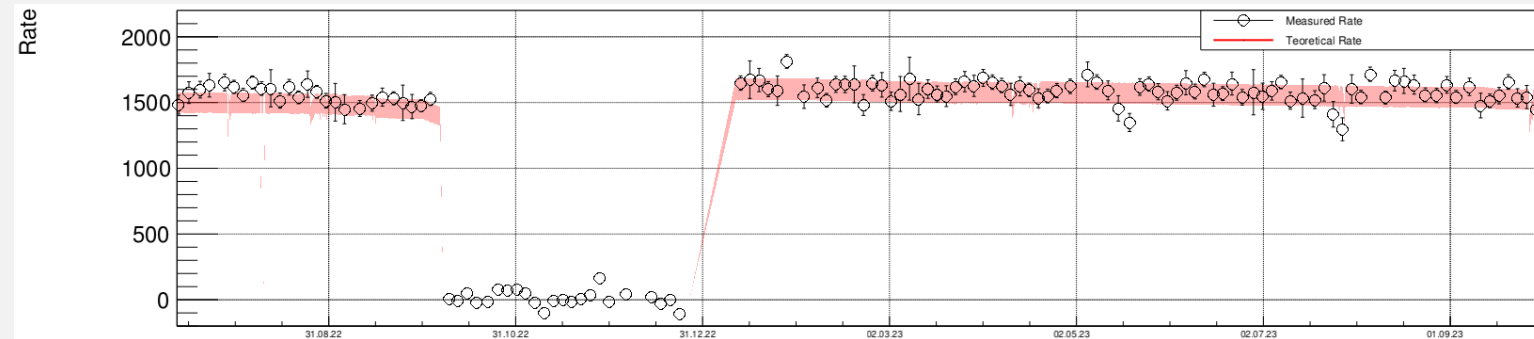
Зелёный – данные R_OFF.

Синий – разница;



СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

Методика описанная выше была применена для определения скорости счёта антинейтринных событий для периода соответствующего окончанию 13 топливной кампании, перегрузке топлива и началу 14 топливной кампании 3-го энергоблока Калининской АЭС



Полученные значения ожидаются при пороге на энергию позитрона 3 МэВ.

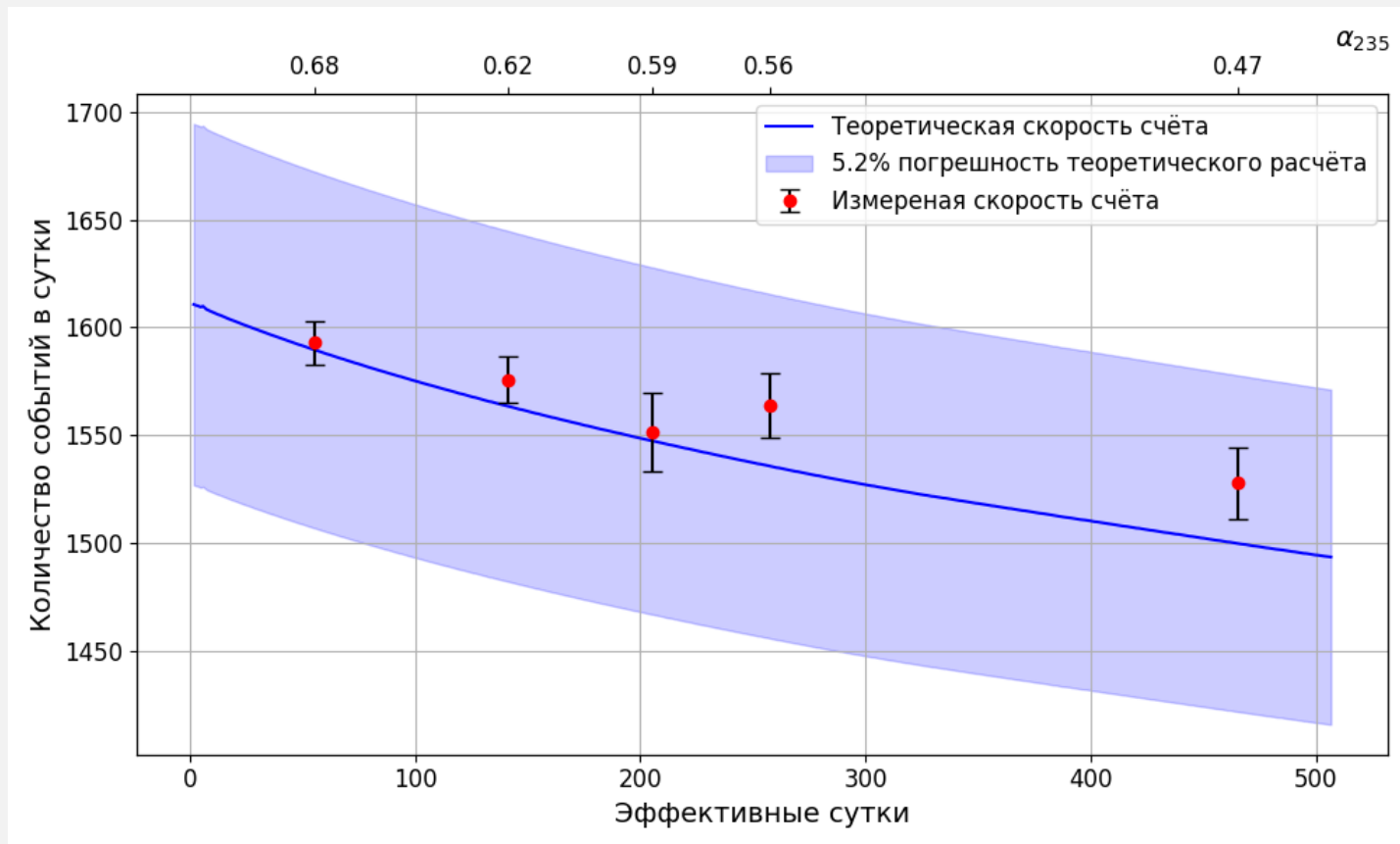
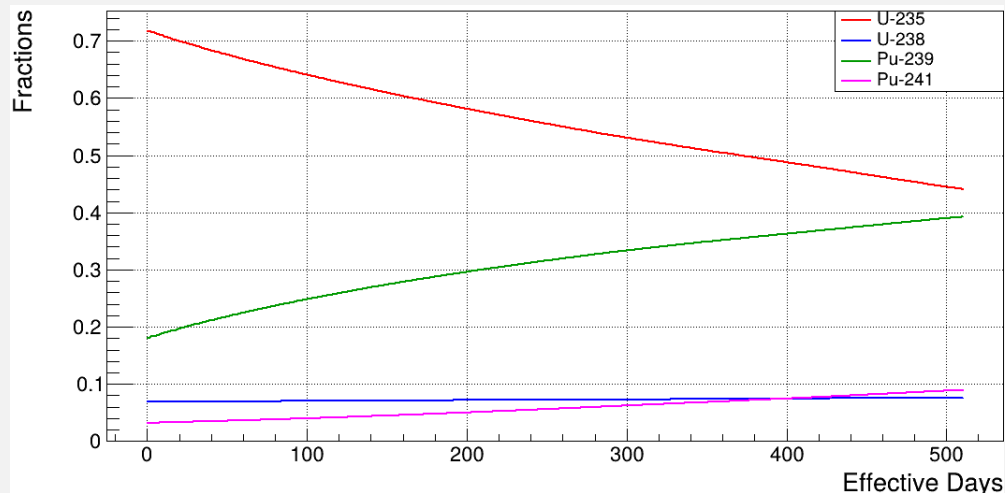
При условии одинаковой мощности в конце и начале топливной кампании, в конце кампании скорость счёта антинейтрино ниже вследствие выгорания топлива

СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

По полученным данным можно определить соотношение между скоростью счёта антинейтрино детектором iDream и изотопным составом топлива на протяжении топливной кампании реактора

Падение скорости счёта составляет $(4 \pm 1) \%$ Что находится в соответствии с ожидаемыми значениями.

Падение скорости счёта обусловлено выгоранием ядерного топлива



Изменение долей деления топлива в течение топливной кампании 3-го энергоблока Калининской АЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках исследований геометрической неоднородности светособирания нейтринного детектора **iDREAM** показано, что наилучшая неоднородность на уровне (-5%, -1%) достигается при удалении 100 л Gd-ЖОС из-под мембраны мишени
2. Рассчитана ожидаемая среднесуточная скорость счёта антинейтрино детектором **iDREAM** с порога на энергию позитрона 3 МэВ, которая составляет $R_{\bar{\nu}} = 1530 \pm 80$ сутки⁻¹
3. Измерена скорость счёта антинейтрино детектором **iDREAM** в период до и после перегрузки топлива.
4. Показано, что при одинаковой мощности реактора скорость счета антинейтрино отличается в конце и начале топливной кампании, что обусловлено выгоранием ядерного топлива и составляет (4+/-1) % при пороге на энергию позитрона 3 МэВ и находится в согласии с ожидаемой величиной

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

СЕЧЕНИЯ И ЭНЕРГИИ НА ОДНО ДЕЛЕНИЕ

Средние сечения реакции ОБР посчитаны по Курчатовской модели спектров реакторных антинейтрино

Kopeikin V., Skorokhvatov M., Titov O. «Reevaluating reactor antineutrino spectra with new measurements of the ratio between U235 and Pu239 β -spectra»
<https://arxiv.org/abs/2103.01684>

Таблица 2.2 — Среднее сечение реакции ОБР для учитываемых изотопов

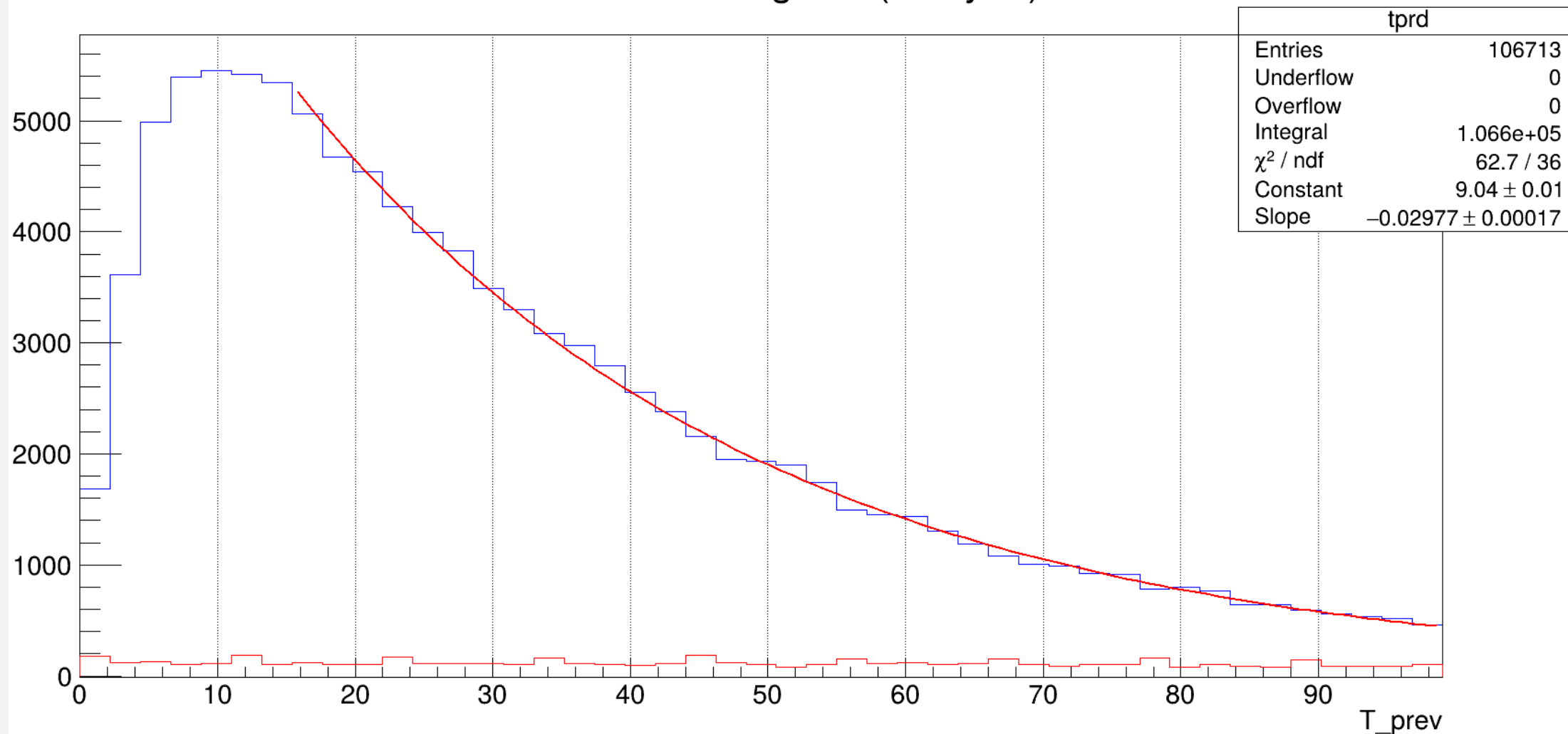
Isotope	$\bar{\sigma}_i, 10^{-43} \frac{\text{cm}^2}{\text{fission}}$
^{235}U	6.27 ± 0.13
^{238}U	9.34 ± 0.47
^{239}Pu	4.33 ± 0.11
^{241}Pu	6.01 ± 0.13

Таблица 2.1 — Среднее энерговыделение изотопов

Isotope	$\bar{E}_f, \frac{\text{МэВ}}{\text{деление}}$
^{235}U	201.92 ± 0.46
^{238}U	205.52 ± 0.96
^{239}Pu	209.99 ± 0.6
^{241}Pu	213.6 ± 0.65

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

Time between signals (delayed)



СЛУЧАЙНЫЕ НА КАЛИФОРНИИ

Чёрный – зарегистрированные первые события, Красный – случайные наложения, Синий – разница

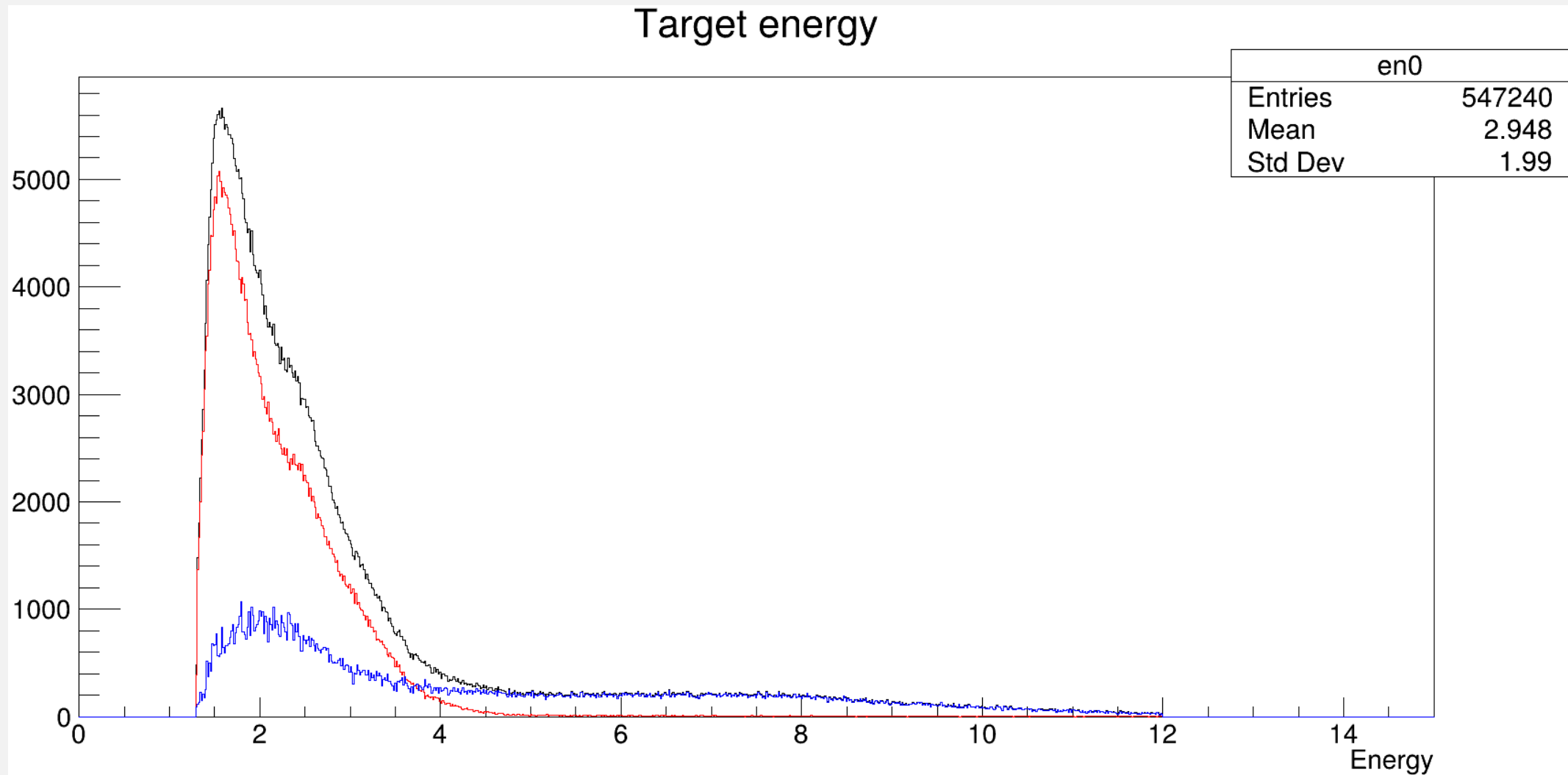
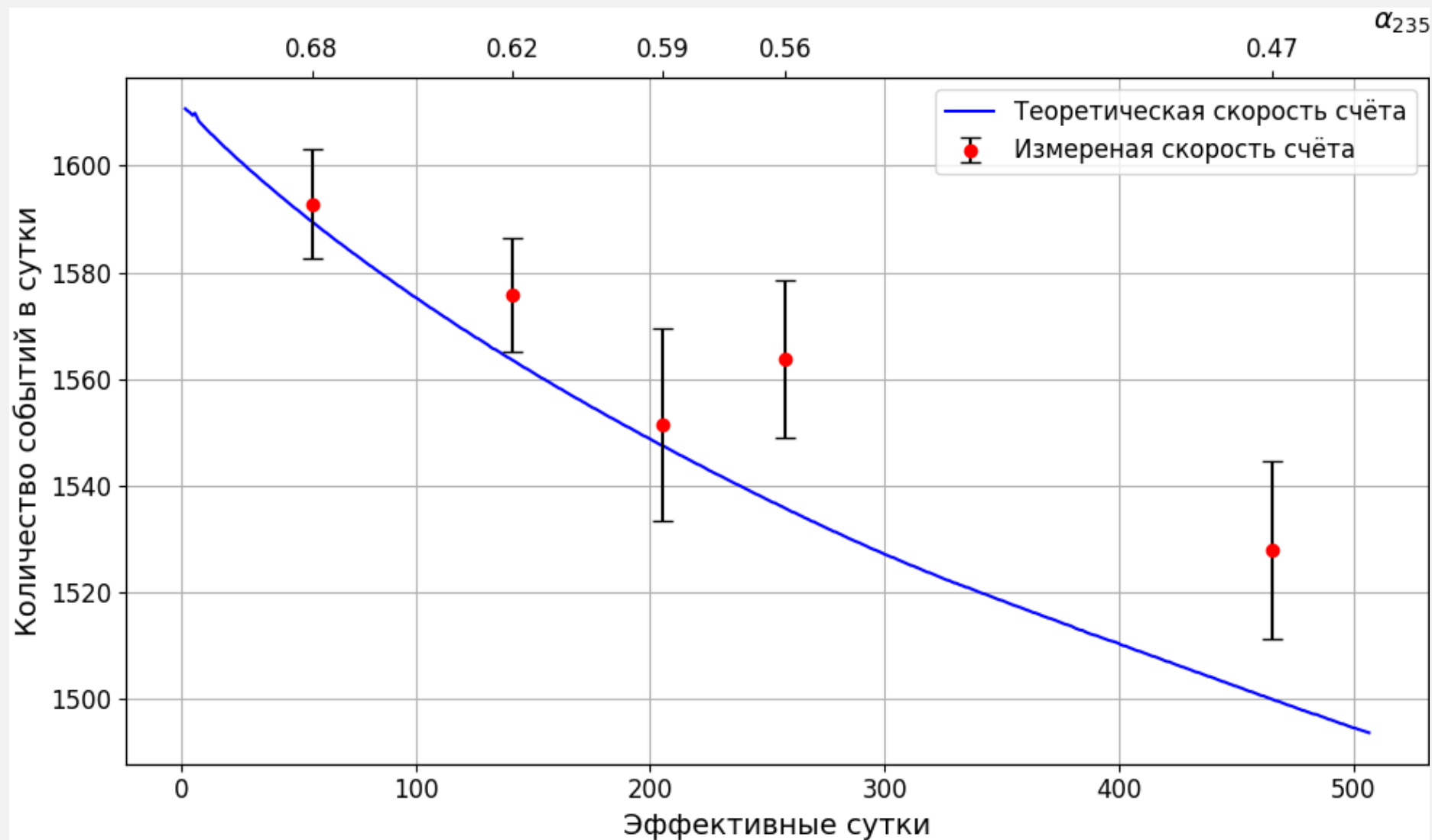


РИСУНОК 3.9 БЕЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ



ЧИСЛО ПРОТОНОВ В МИШЕНИ

- Суммарное количество протонов в 1 грамме ЛАБ = $73.09 \cdot 10^{21}$ шт
- Объём мишени = 1.112 м^3
- Средняя плотность = 0.86 г/см^3
- Масса мишени = $0.86 \cdot 1.112 \cdot 10^6 \approx 0.956 \cdot 10^6 \text{ гр.}$
- Количество протонов в мишени:

$$N_p = 73.09 \cdot 10^{21} \cdot 0.956 \cdot 10^6 \approx 7 \cdot 10^{28} \text{ протонов}$$

Компоненты ЛАБ	Эмп. ф-ла	Массовая доля, %	Молярный вес	Число молекул в 1 грамме	$N_p/\text{гр}$
Децилбензолы	$C_{16}H_{26}$	13,7	218	$3,78 \cdot 10^{20}$	$9.83 \cdot 10^{21}$
Ундецилбензолы	$C_{17}H_{28}$	32,4	232	$8.41 \cdot 10^{20}$	$23.55 \cdot 10^{21}$
Додецилбензолы	$C_{18}H_{30}$	33,3	246	$8.15 \cdot 10^{20}$	$24.45 \cdot 10^{21}$
Тридецилбензолы	$C_{19}H_{32}$	20,6	260	$4.77 \cdot 10^{20}$	$15.26 \cdot 10^{21}$

Табл. 8 Состав ЛАБ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ

$$\varepsilon = \varepsilon_{pos} \cdot \varepsilon_n \cdot \varepsilon_t \approx 0.22$$

- ε_{pos} - эффективность регистрации позитрона, в зависимости от порога ($E_{pos} > 3 \text{ МэВ}$) = 0.46
- ε_{pos} - эффективность регистрации нейтрона, определяемая при помощи моделирования методами Монте-Карло отклика детектора к нейтронам = 0.5
- ε_{pos} - вероятность зарегистрировать нейтрон в окне 100 мкс, которая определяется как $(1 - \exp(-t/\tau))$, где τ – время до захвата нейтрона в сцинтилляторе детектора = 0.95

ПОГРЕШНОСТЬ РАСЧЁТА

$$\sigma_{R_v} = \sqrt{\sigma_{P_{th}}^2 + \sigma_{E_f}^2 + \sigma_{\sigma_f}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_L^2} \approx 5.2\%$$

- $\sigma_{P_{th}} \approx 2\%$ - погрешность в определении мощности реактора
- $\sigma_{E_f} \approx 0.3\%$ - погрешность, вносимая энергией, выделяющейся на одно деление, с учётом погрешностей, вносимых долями деления
- $\sigma_{\sigma_f} \approx 1.5\%$ - погрешность, вносимая сечениями реакции ОБР, приходящимся на одно деление, с учётом погрешностей вносимых долями деления (KI модель)
- $\sigma_{\varepsilon} \approx 4.5\%$ - погрешность, вносимая эффективностью регистрации антинейтрино детектором
- $\sigma_L \approx 0.5\%$ - погрешность, вносимая расстоянием между АЗ реактора и центром детектора

