

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

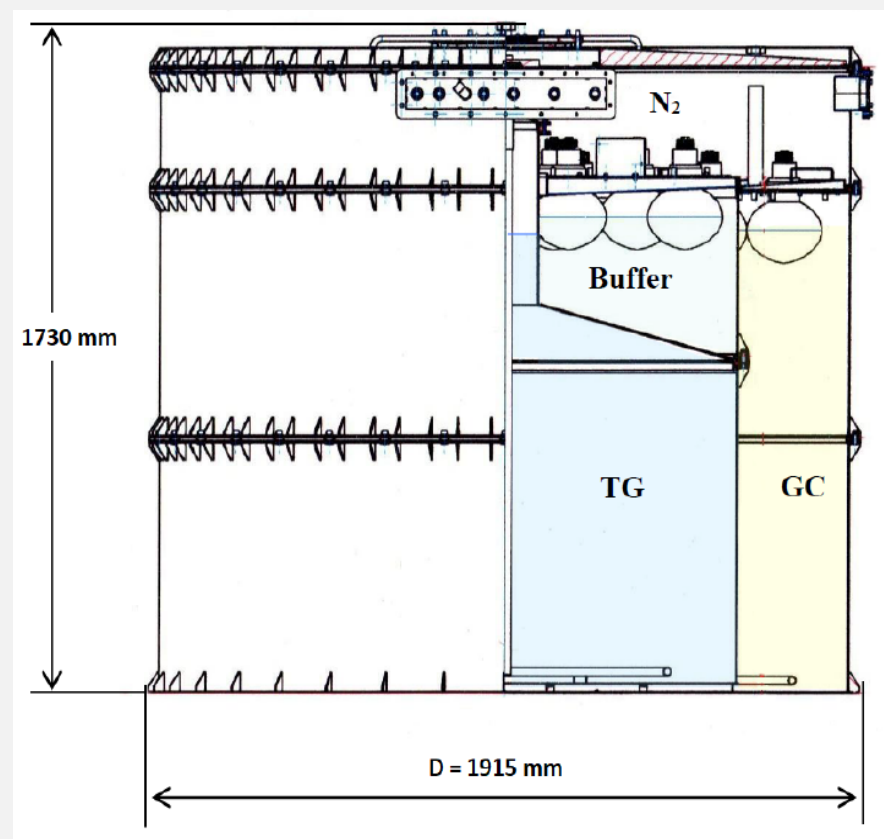
ДЕТЕКТОР IDREAM

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 сцинтилятора на основе LAB (линейный алкилбензол) с добавлением гадолиния с концентрацией 1 грамм/литр



ЦЕЛЬ

1. Выделение сигнала антинейтрино в данных детектора iDREAM, с учётом вкладов случайного и коррелированного фонов
2. Измерение скорости взаимодействий антинейтрино
3. Анализ методов измерения случайного фона

252Cf

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

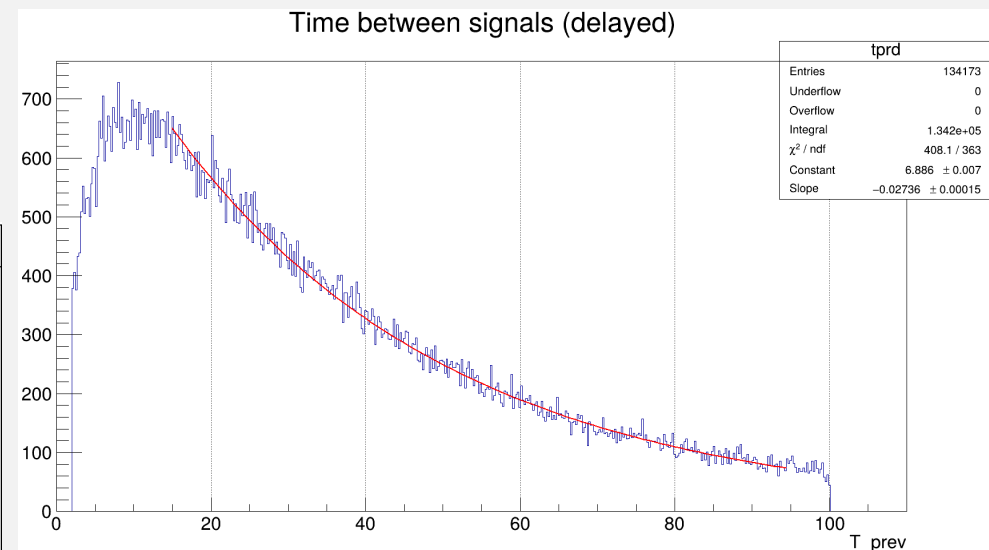
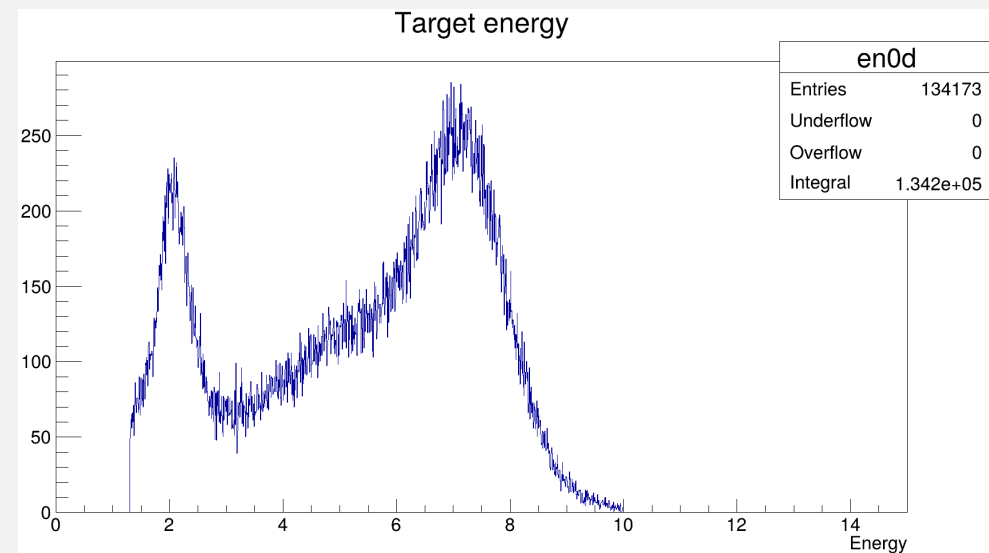
В качестве ориентира принимает пик от захвата нейтрона на водороде, значение которого принимается равным 2.2 МэВ

Первый пик – захват нейтрона на водороде,

Второй пик – захват нейтрона на гадолинии.

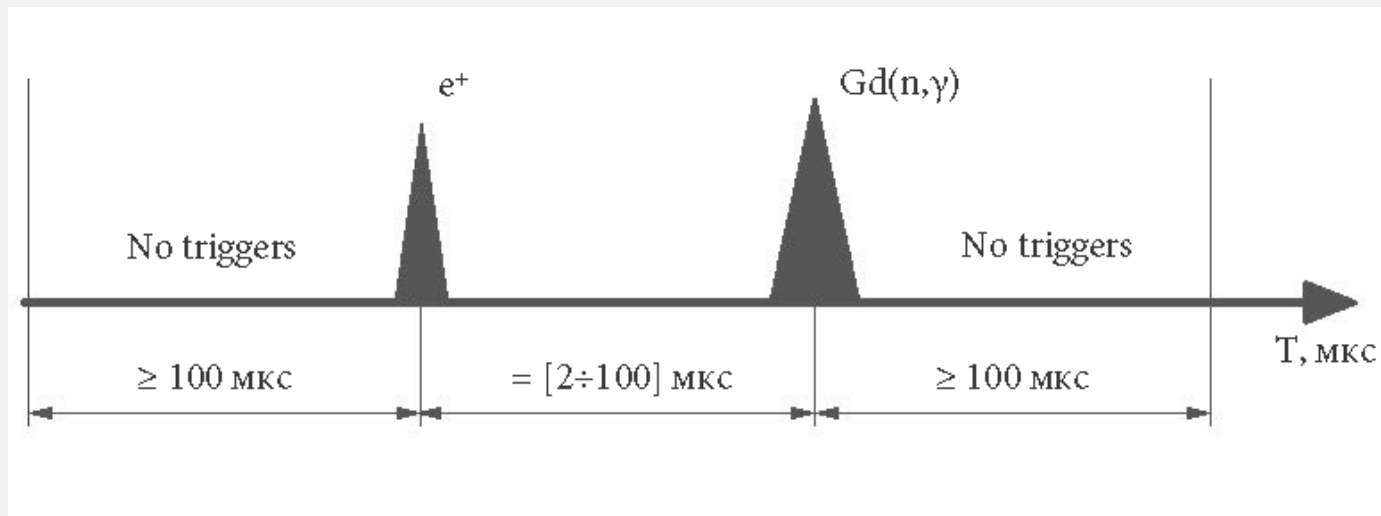
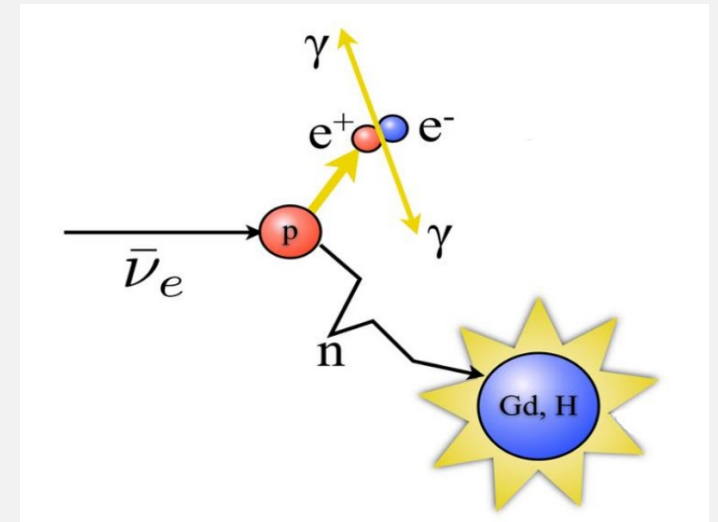
Аппроксимация временного спектра захвата нейтронов функцией $f(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \text{const}$, где τ – время захвата нейтронов, даёт $\tau \approx 36.55$ мкс.

tprd	
Entries	134173
Underflow	0
Overflow	0
Integral	1.342e+05
χ^2 / ndf	408.1 / 363
Constant	6.886 $\pm$ 0.007
Slope	-0.02736 $\pm$ 0.00015



ПРИНЦИП ОТБОРА АНТИНЕЙТРИНО

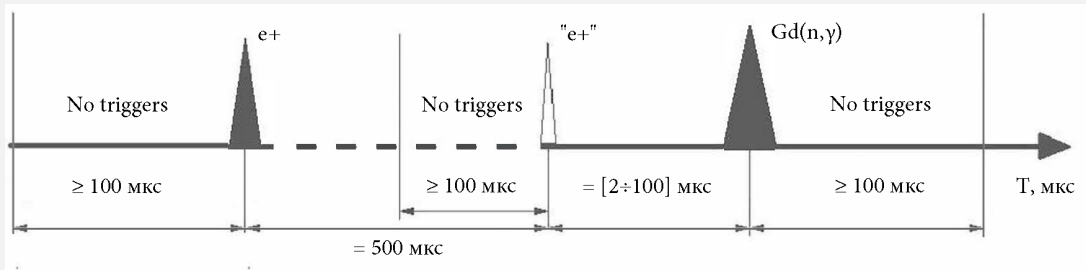
- Для регистрации реакторных антинейтрино:
- $E(e^+) = [3 \div 8] \text{ МэВ};$
- $E(n) = [5 \div 10] \text{ МэВ};$
- $\Delta T_{12} = [2 \div 100] \text{ мкс};$
- Отсутствие сигнала перед первым событием в течении $T_1 \geq 100 \text{ мкс};$
- Отсутствие сигнала после второго события в течении $T_2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



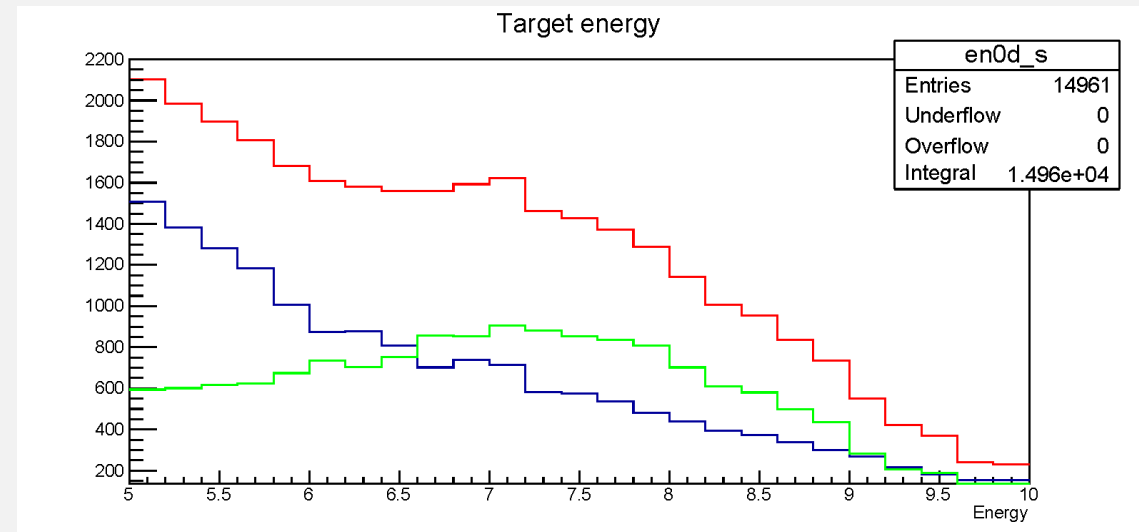
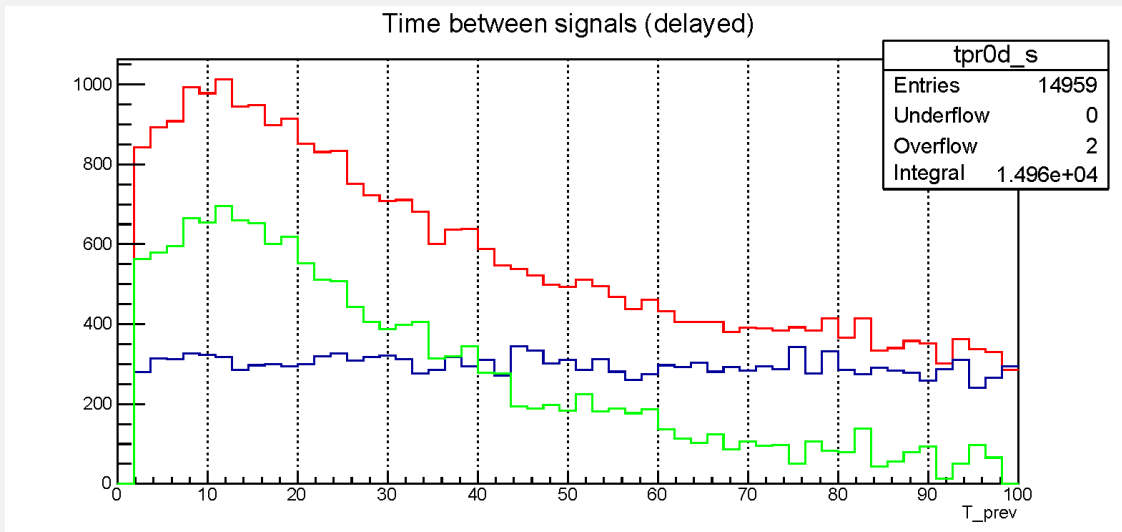
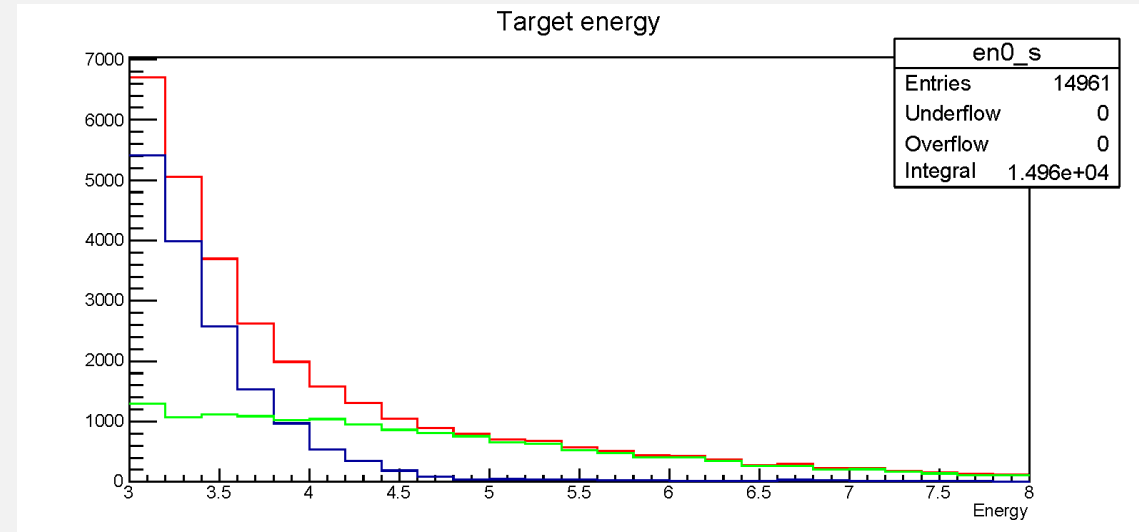
СЛУЧАЙНЫЙ ФОН

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 предполагаемого позитрона отступается временной промежуток $\gg$ времени жизни нейтрона (здесь принимается равным 500 мкс)



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



КОРРЕЛИРОВАННЫЙ ФОН

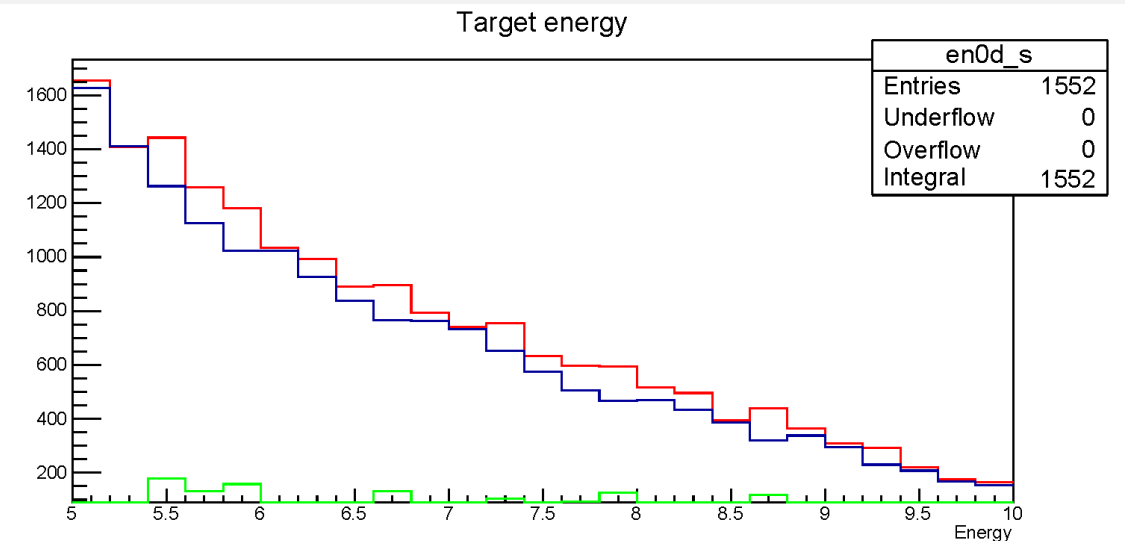
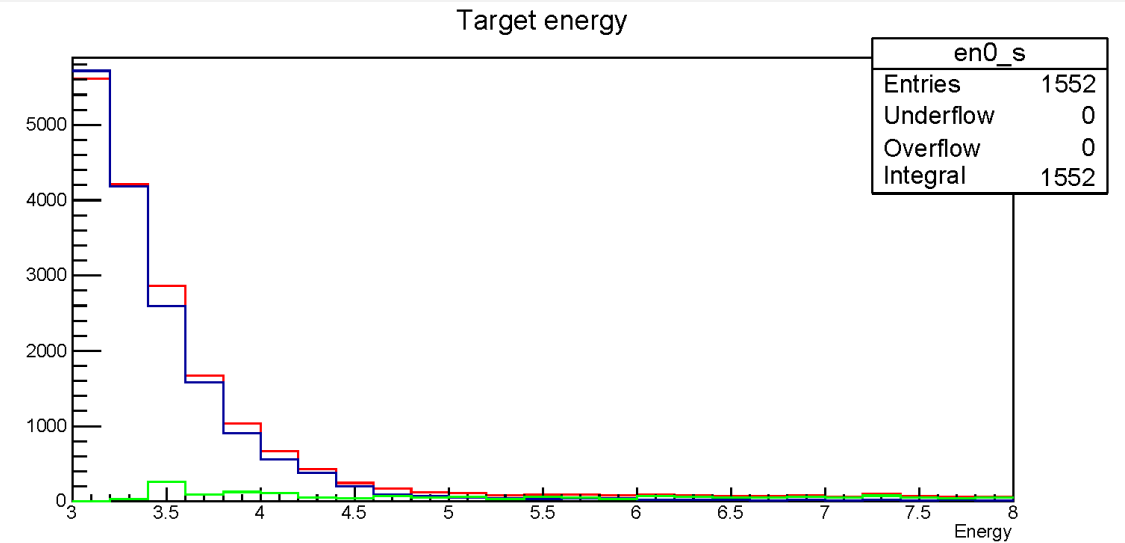
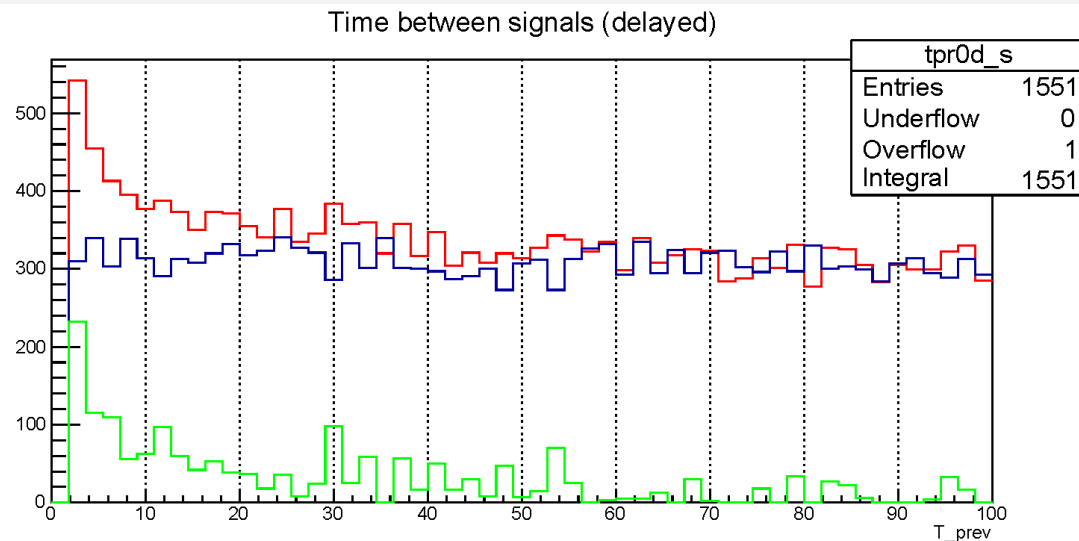
В качестве коррелированного фона выступают пары скоррелированных между собой событий, похожих на событие ОБР

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

Красный – кандидаты;

Синий – случайный фон;

Зелёный – разница.



СИГНАЛ АНТИНЕЙТРИНО

Для построения спектров ОБР от антинейтрино берём разницу спектров кандидатов с учётом случайного фона и данных коррелированного фона

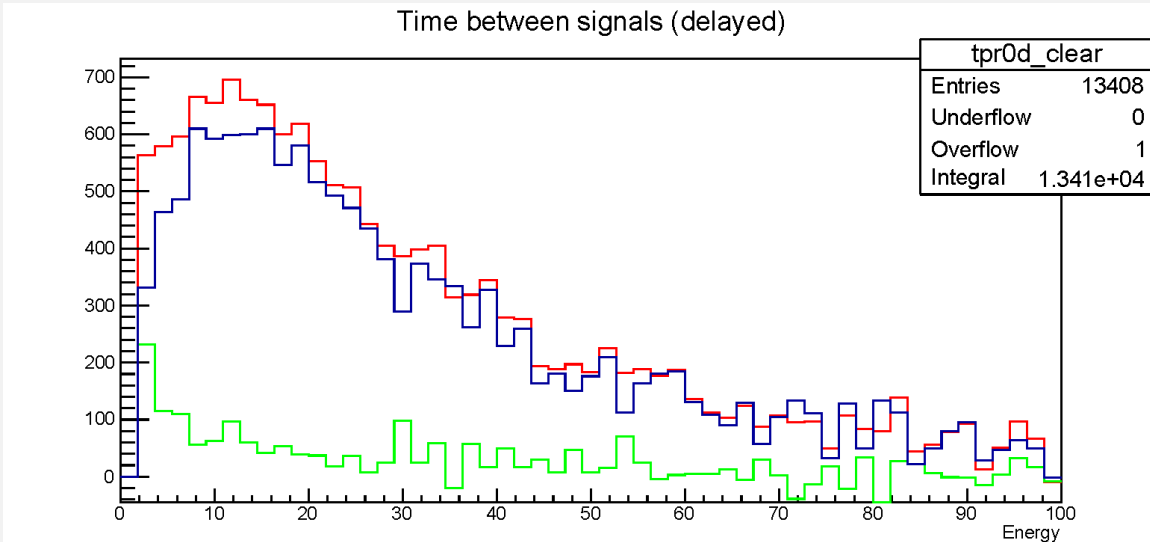
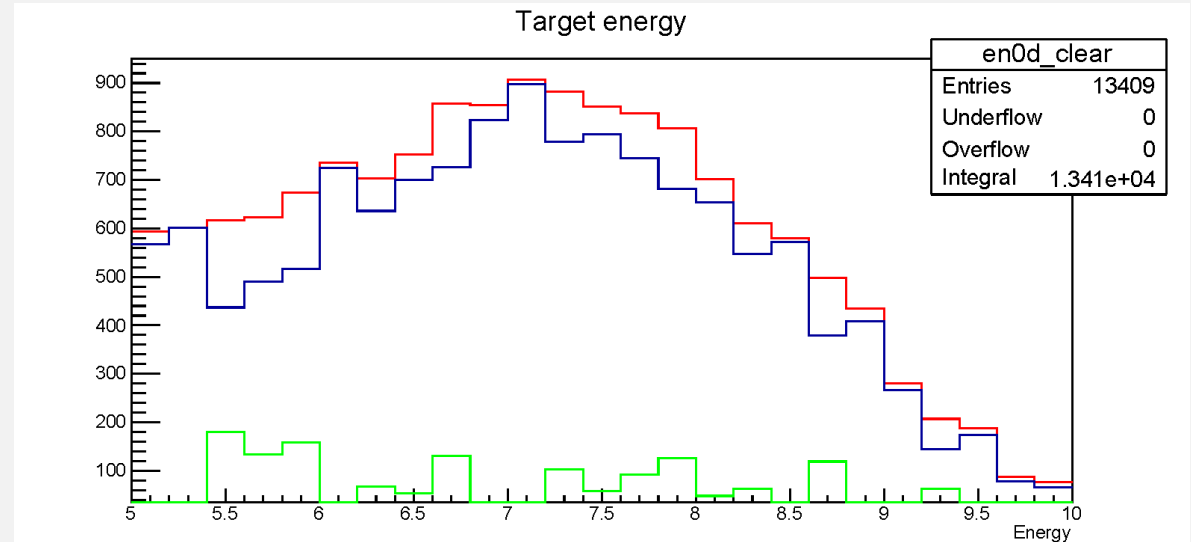
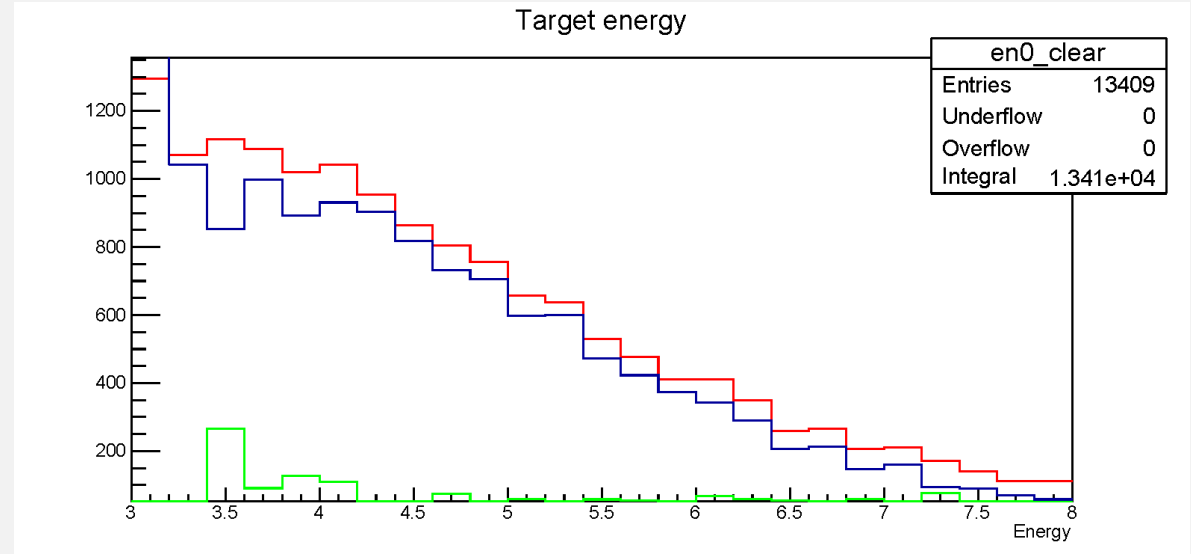
Набор данных в период: 12.01.2023 – 22.01.2023

$$R_v = 1629 \pm 81 \text{ сутки}^{-1}$$

Красный – кандидаты;

Зелёный – данные при R_OFF.

Синий – разница;



ОЖИДАЕМАЯ СКОРОСТЬ СЧЁТА

$$R_v = \frac{N_p \varepsilon \sigma_{235}}{4\pi L^2 E_{235}} (1 + k) P_{th}$$

- N_p – количество протонов в мишени = $7 \cdot 10^{28}$ протонов
- ε – эффективность регистрации детектором = 0.22
- σ_{235} - сечение ОБР, усреднённое по спектру антинейтрино от Урана-235 = $(6.27 \pm 0.13) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2$
- L – расстояние от АЗ до детектора = $19.5 \pm 0.1 \text{ м}$
- E_{235} - средняя энергия на деление Урана-235 = $201.9 \pm 0.5 \text{ МэВ}$
- $(1+k)$ – вклады изотопов урана-238, плутония-239, плутония-241, в течении кампании реактора типа ВВЭР варьируется в пределах (0.92 – 0.96)
- P_{th} - тепловая мощность АЭС = 3 ГВт.

При данных параметрах ожидаемая скорость счёта составит $1522 \pm 36 \text{ сутки}^{-1}$

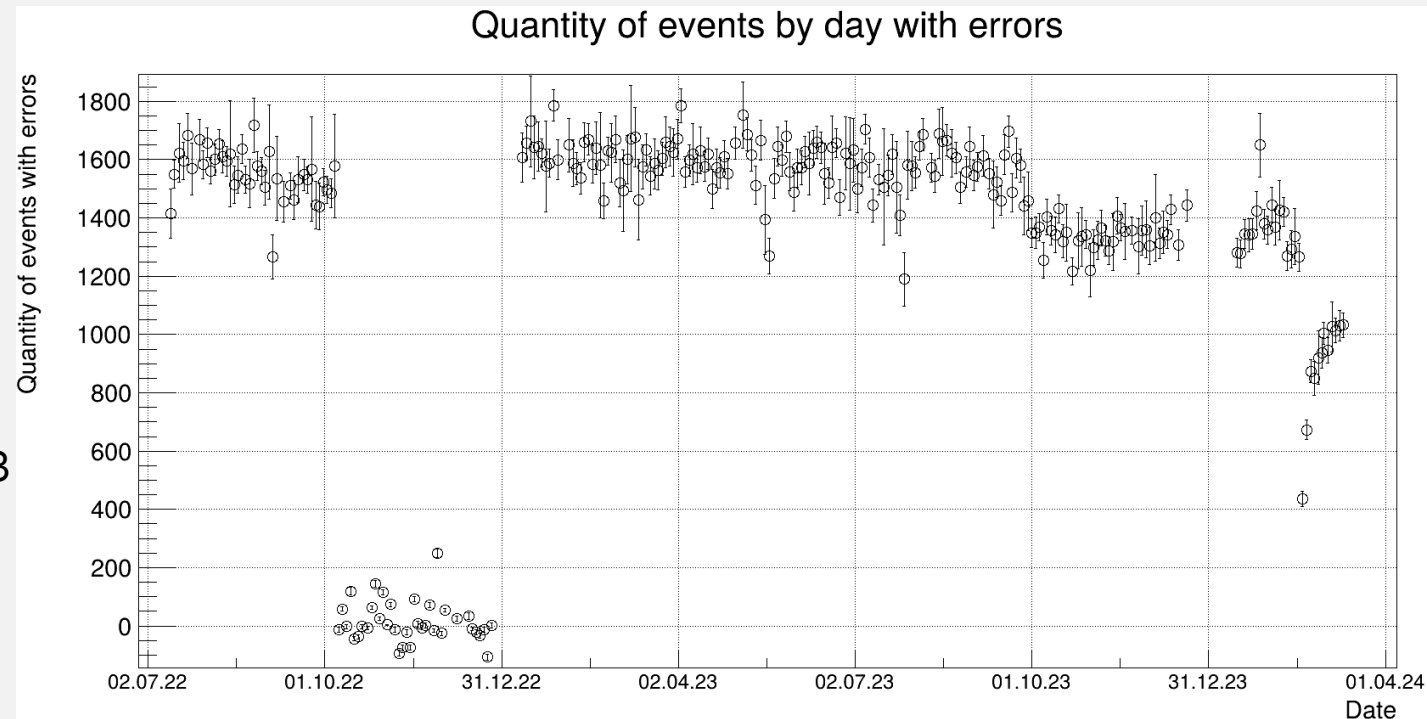
СКОРОСТЬ СЧЁТА АНТИНЕЙТРИНО

Методика описанная выше была применена для определения скорости счёта антинейтринных событий на протяжении всей кампании

Ожидается снижение потока антинейтрино из АЗ реактора, таким образом на начало и конец кампании ожидаются равными:

- 1) 1554 ± 37 сутки⁻¹, на момент начала кампании;
- 2) 1490 ± 36 сутки⁻¹, на момент конца кампании;

Полученные значения ожидаются при пороге 3 МэВ



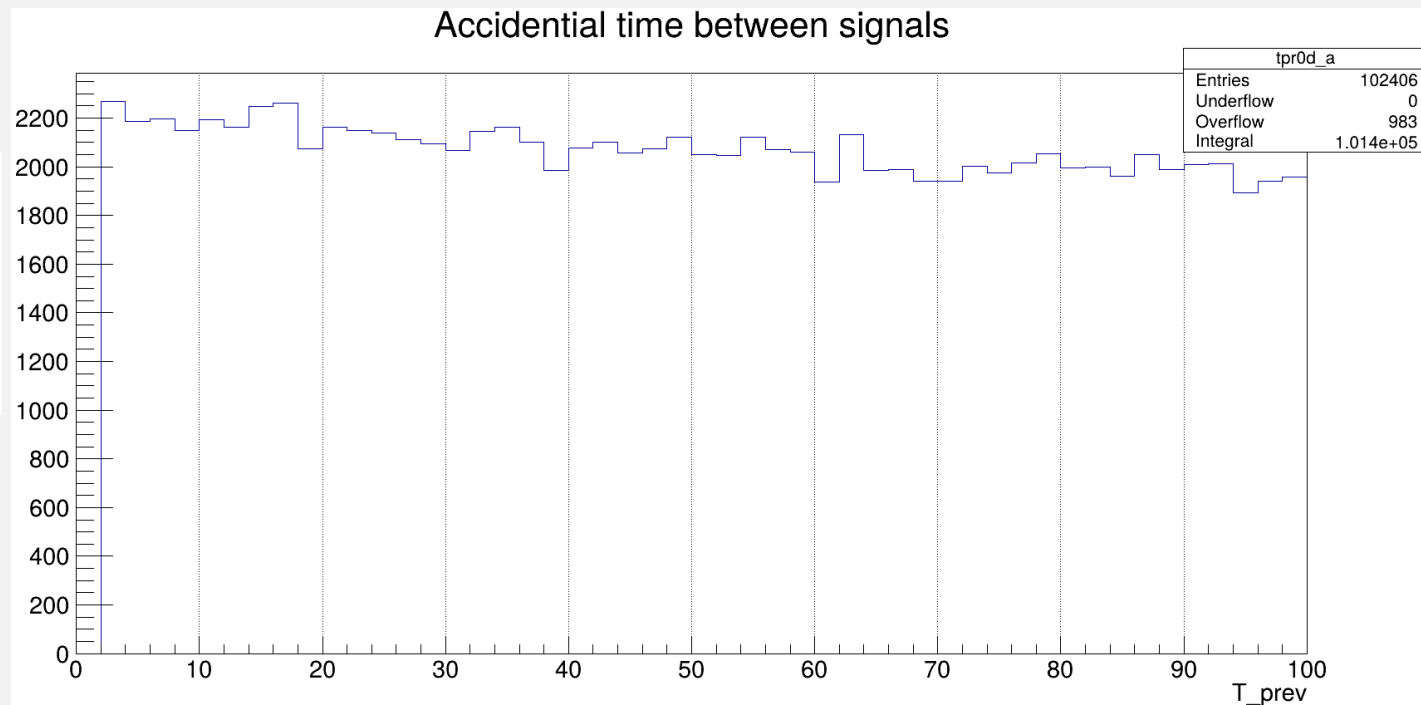
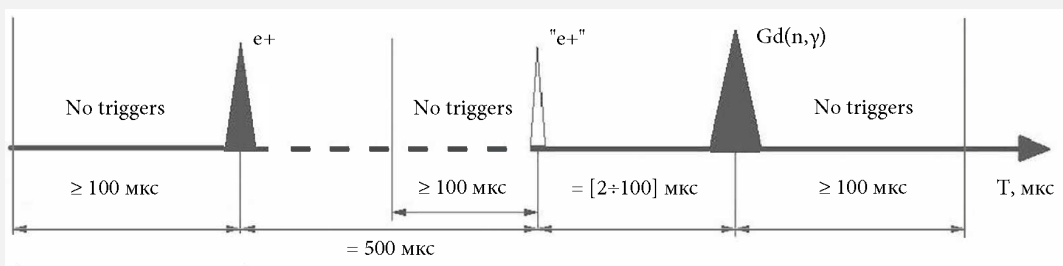
ПЕРВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ФОНА

От предполагаемого позитрона вперёд во времени отступается промежуток $\gg$ времени жизни нейтрона (здесь принимается равным 1000 мкс)

Для сравнения с остальными методами был выбран большой временной период. Данные в анализе набирались:

23.03.2023 ÷ 23.06.2023

Живое время составило 70.15 суток.



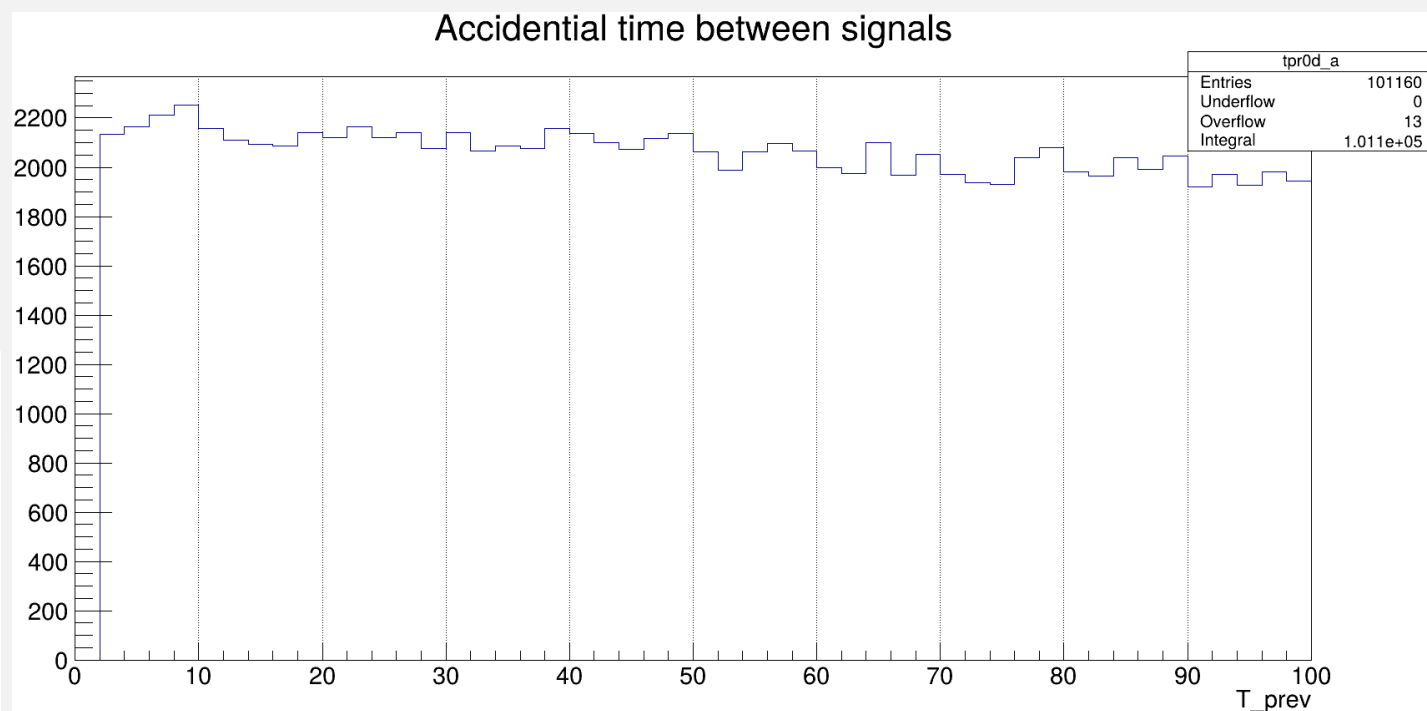
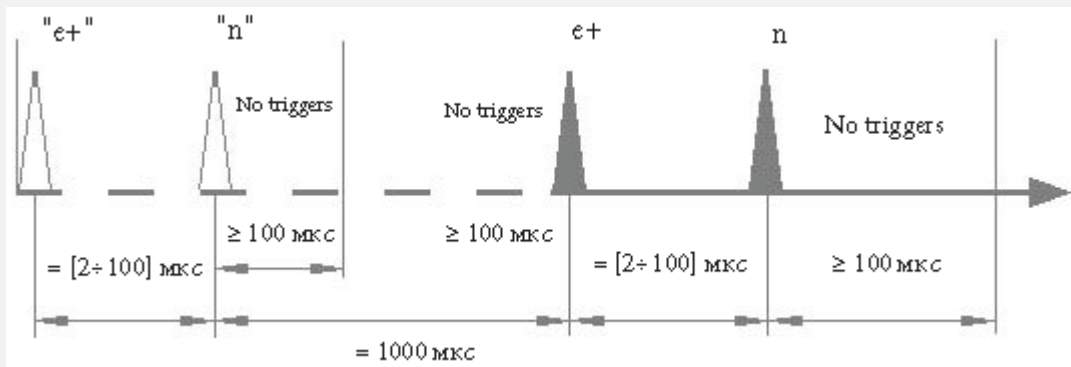
ВТОРОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ФОНА

От предполагаемого позитрона назад во времени отступается промежуток $\gg$ времени жизни нейтрона (здесь принимается равным 1000 мкс)

Для сравнения с остальными методами был выбран большой временной период. Данные в анализе набирались:

23.03.2023 ÷ 23.06.2023

Живое время составило 70.15 суток.



ТРЕТИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ФОНА

Данный метод использовался раньше, когда было невозможно сохранять полный набор данных.

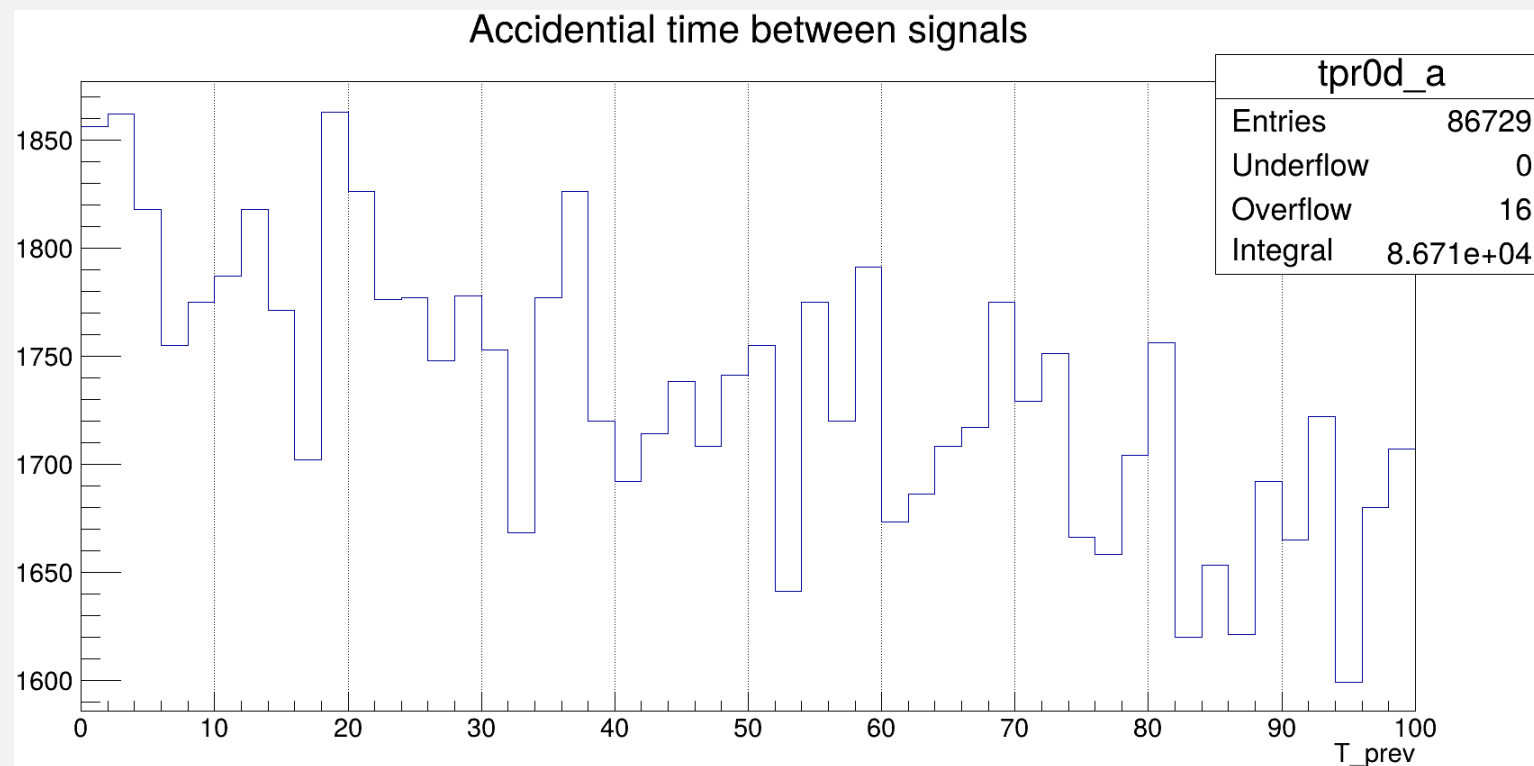
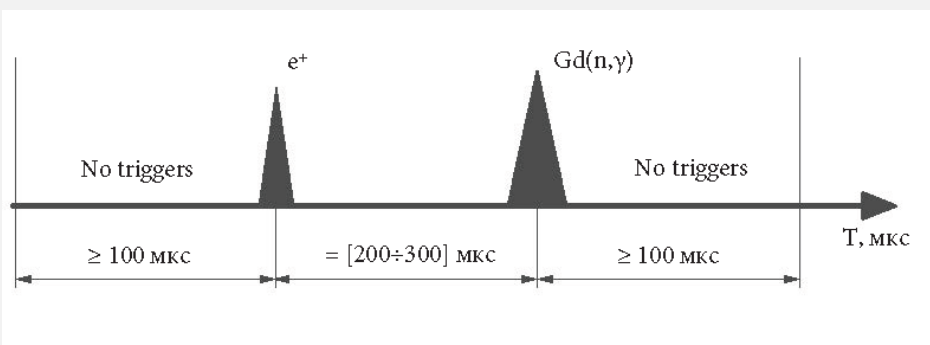
При регистрации кандидата на позитрон открывается временное окно в 300 мкс:

- 1) Если следующее событие попадает в первые 100 мкс, оно считается кандидатом на нейтрон
- 2) Если следующее событие попадает в промежуток 200 – 300 мкс, пара считается случайным наложением

Для сравнения с остальными методами был выбран большой временной период. Данные в анализе набирались:

23.03.2023 ÷ 23.06.2023

Живое время составило 70.15 суток.



СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ФОНА

На графике синим цветом обозначены отобранные кандидаты без учёта коррелированного и случайного фонов.

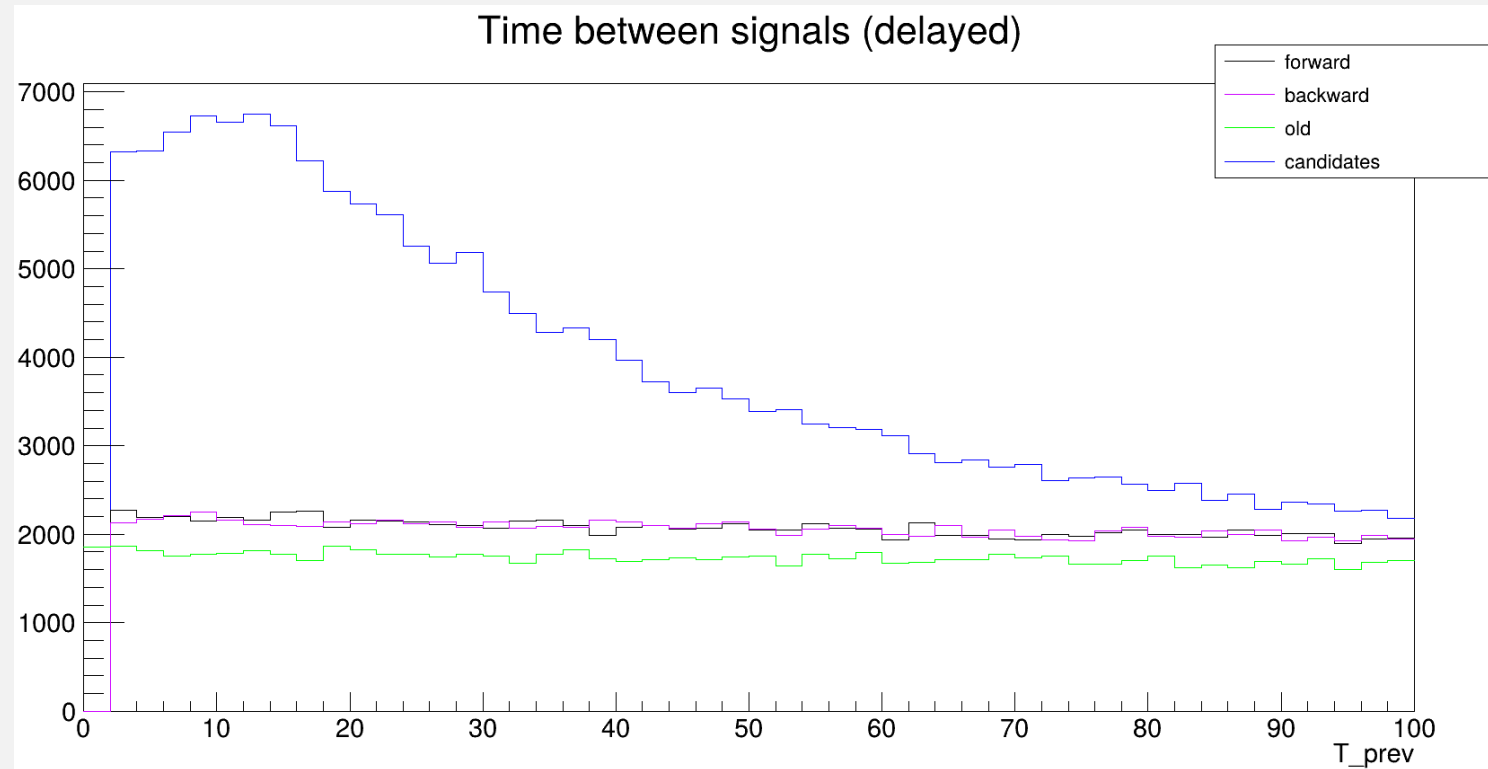
Третий метод показывает наихудшие результаты в силу наименьшей равномерности распределения и схождения со спектром кандидатов на временах близких к 100 мкс.

Первые два метода дают очень похожий результат, если фиттировать каждый спектр полиномом первой степени получим:

1. $y = -2.687x + 2206$

2. $y = -2.325x + 2182$

Отсюда можно сделать вывод, что наиболее оптимальным методом вычисления случайного фона из рассмотренных является второй метод



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

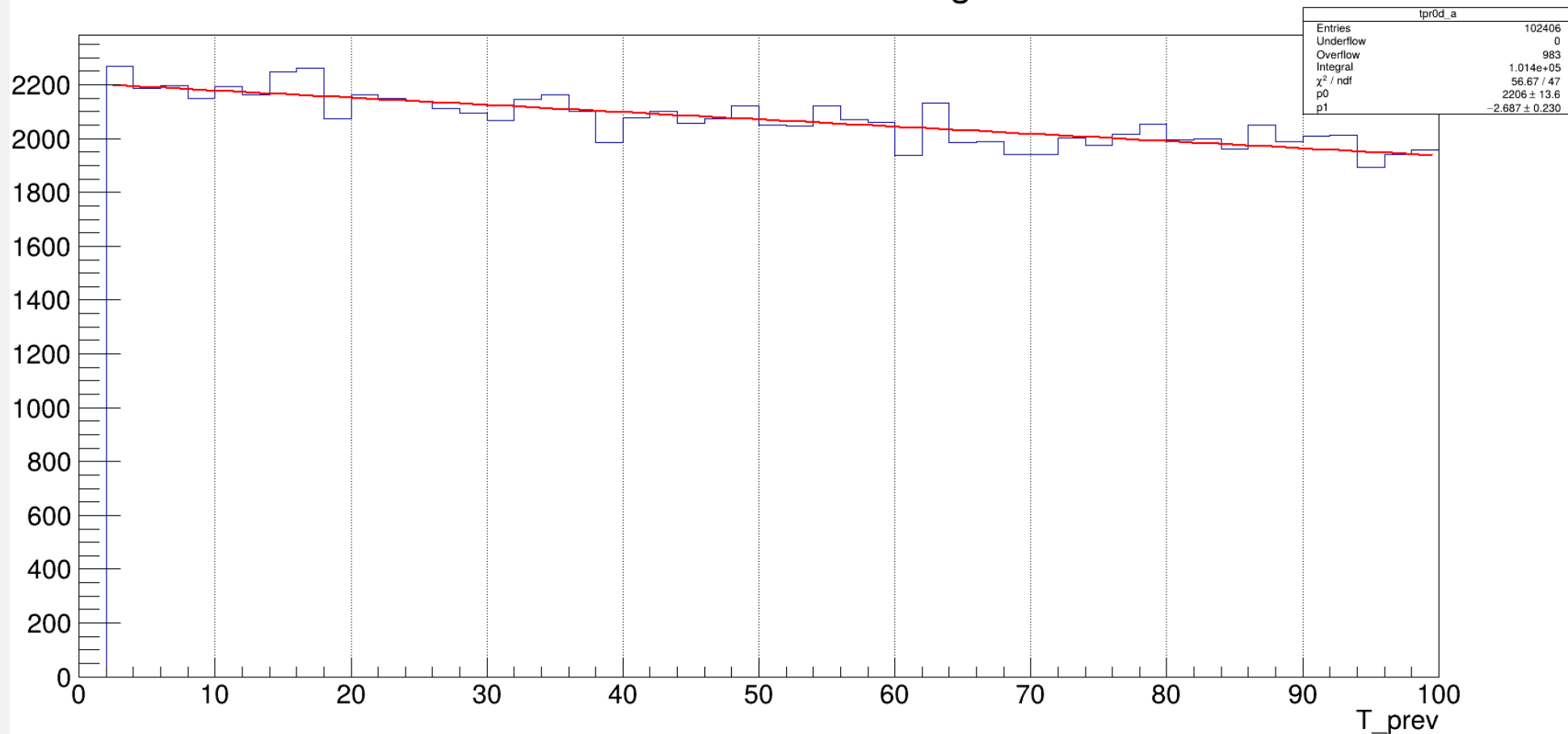
1. Получены спектры позитронов от взаимодействия антинейтрино в детекторе iDREAM, с учётом вкладов случайного и коррелированного фонов
2. Измерена скорость счёта антинейтрино детектором iDREAM в период до и после перегрузки топлива. Показано, что при одинаковой мощности реактора скорость счёта антинейтрино отличается в конце и начале топливной кампании.
3. Рассчитана ожидаемая, средняя скорость счёта антинейтрино детектором iDREAM.
4. Проведен сравнительный анализ алгоритмов измерения случайного фона.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

I.Standart

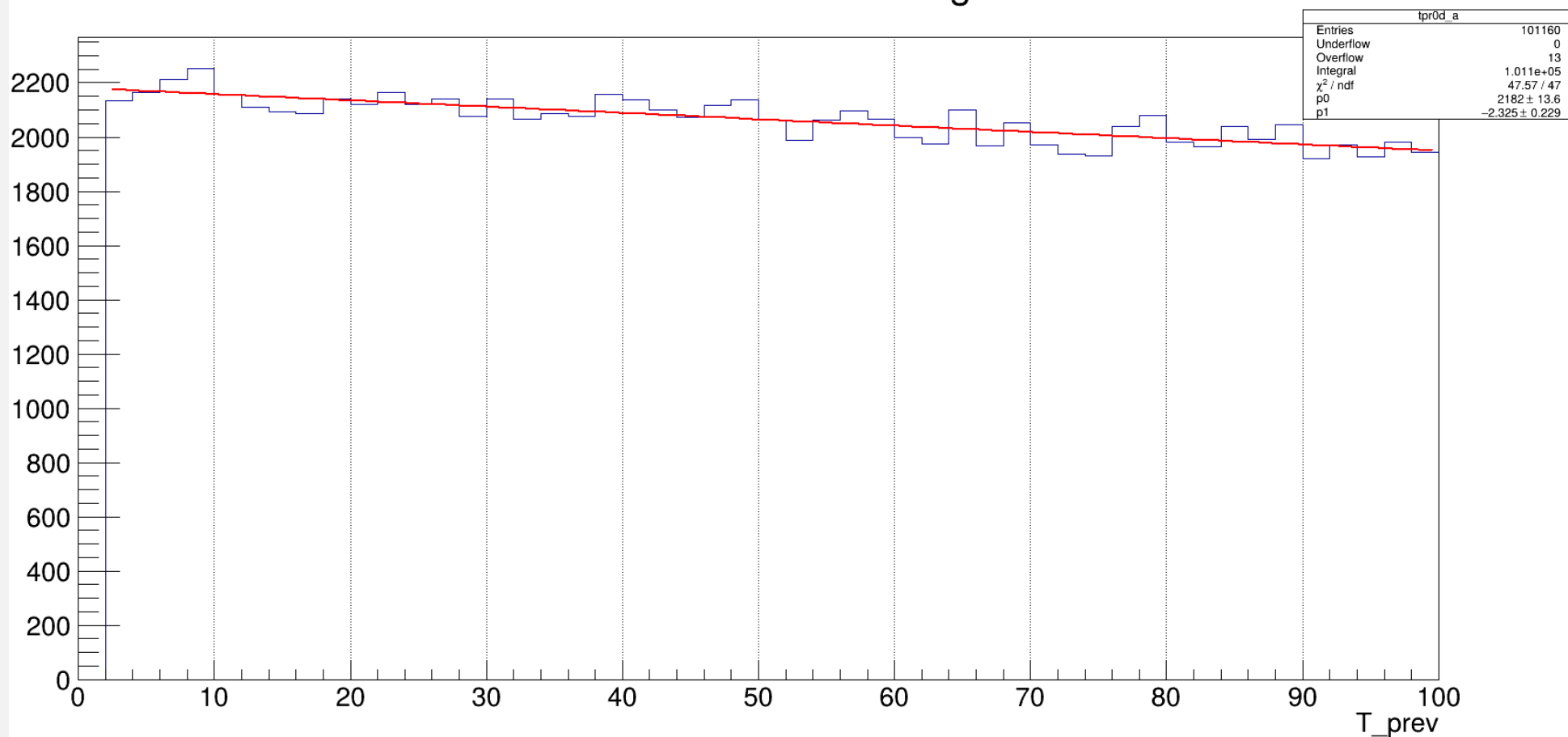
Accidental time between signals



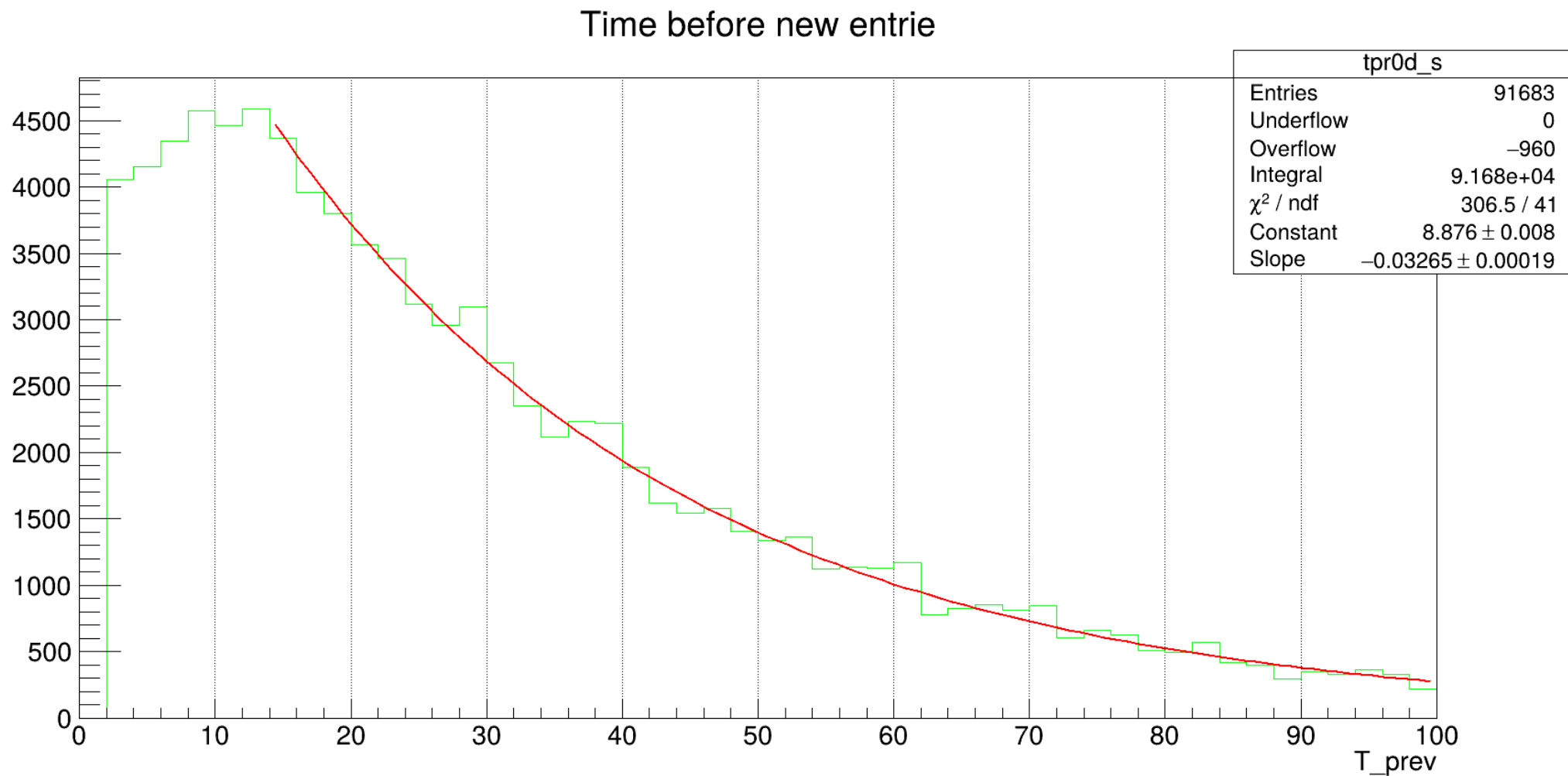
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

2.Backward

Accidental time between signals



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ



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	$8.41 \cdot 10^{20}$	$23.55 \cdot 10^{21}$
Додещилбензолы	$C_{18}H_{30}$	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 =

ПОГРЕШНОСТЬ РАСЧЁТА

$$\sigma_{\Phi} = \sqrt{\sigma_W^2 + \sigma_E^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{\alpha}^2} \approx 2.4\%$$

- σ_W - погрешность в определении мощности реактора $\approx 1.8\%$
- σ_E - погрешность, вносимая энергией, выделяющейся на одно деление $\approx 0.1\%$
- σ_S - погрешность, вносимая спектром антинейтрино, приходящимся на одно деление $\approx 1.16\%$ (KI модель)
- σ_{α} - погрешность, вносимая долями деления $\approx 1\%$