

Изучение отклика детектора iDREAM в потоке антинейтрино на Калининской АЭС

Выполнил: Растимешин А.А.

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

2022

Применение антинейтринного излучения от ядерного реактора

Какие задачи можно решать с помощью антинейтринного излучения?

1. Выявление несанкционированных режимов работы реактора, в т.ч. наработку оружейного плутония
2. Дистанционный контроль энерговыработки реакторов
3. Мониторинг отработавшего ядерного топлива



Реакция обратного бета-распада

При регистрации антинейтрино используется метод задержанных совпадений: сначала регистрируется позитрон, после чего регистрируется нейтрон. По энергии позитрона восстанавливается энергия антинейтрино, регистрация нейтрона служит подтверждением того, что произошёл обратный бета-распад.

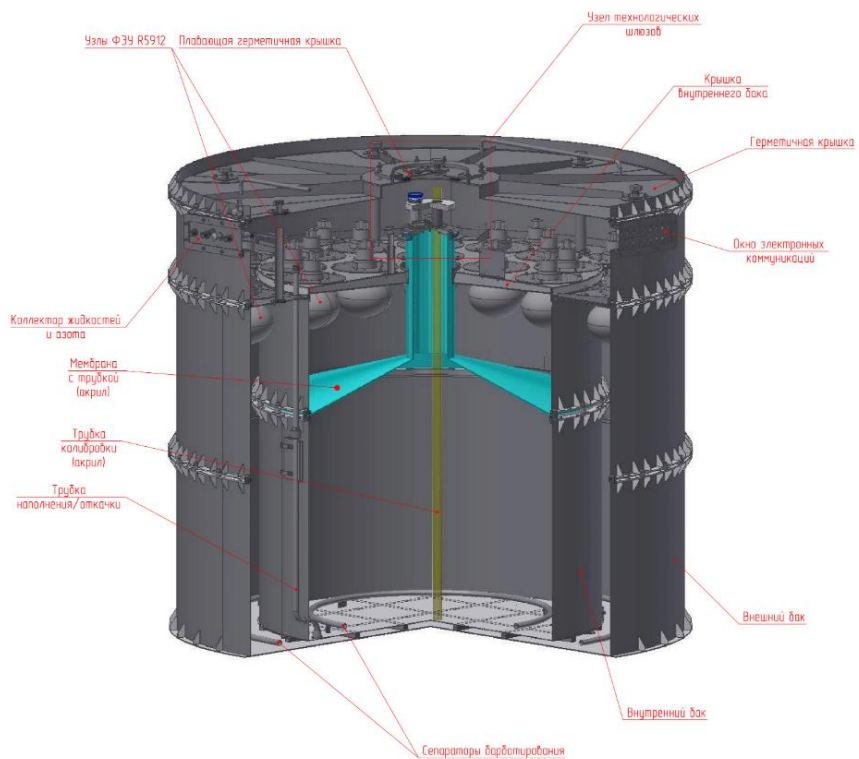
Цель и задачи работы

Цель: изучение отклика детектора iDREAM, установленного в потоке антинейтрино на энергоблоке №3 Калининской АЭС.

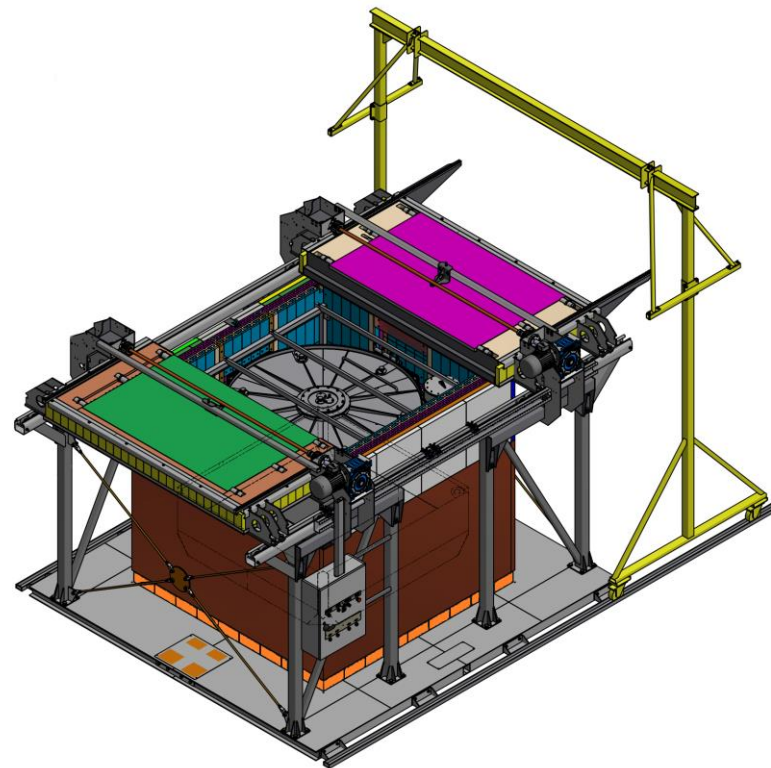
Задачи:

- Изучение энергетической шкалы детектора на основе калибровок радиоактивными источниками.
- Измерение времени захвата нейтрона в содержащем гадолиний сцинтилляторе детектора.
- Отбор событий взаимодействия антинейтрино, измерение скорости счета антинейтрино детектором.

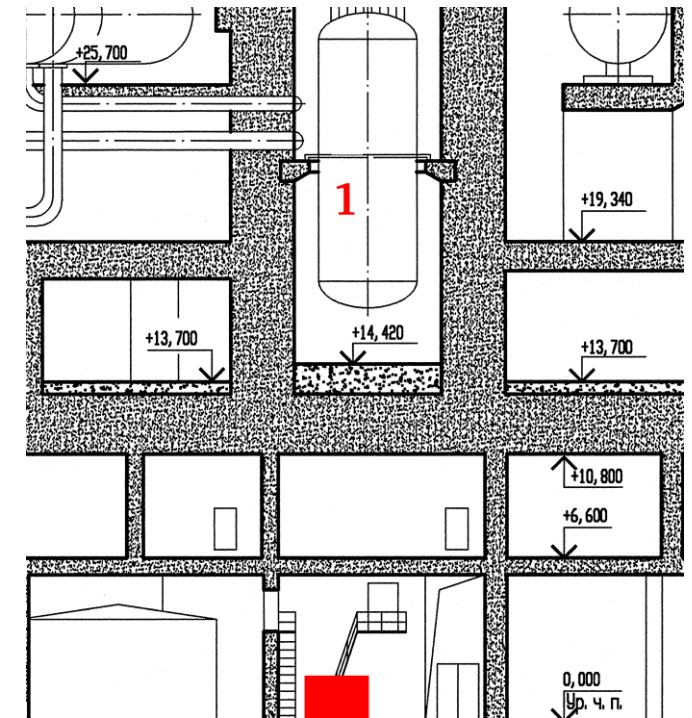
Устройство детектора iDREAM



Общий вид детектора iDREAM



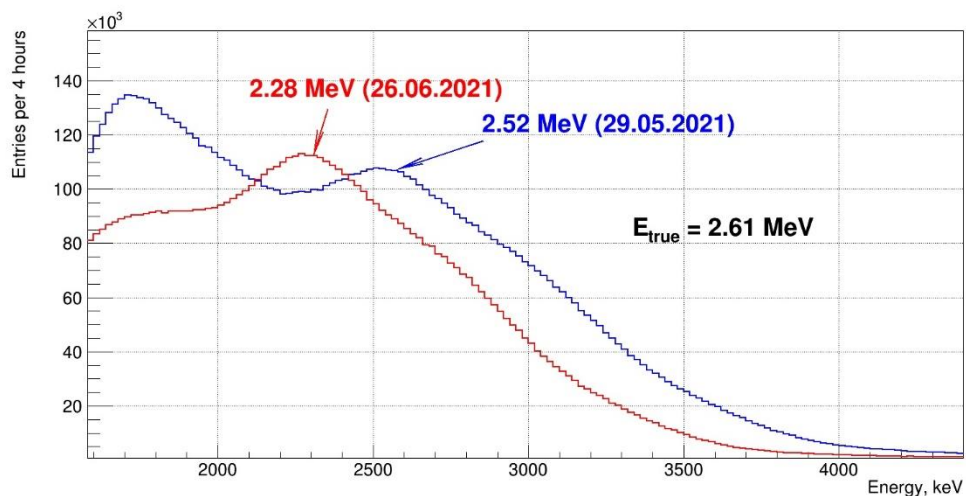
Вид детектора iDREAM в защите



Расположение детектора iDREAM на третьем энергоблоке КАЭС. Активная зона реактора помечена цифрой «1».

Изучение энергетической шкалы

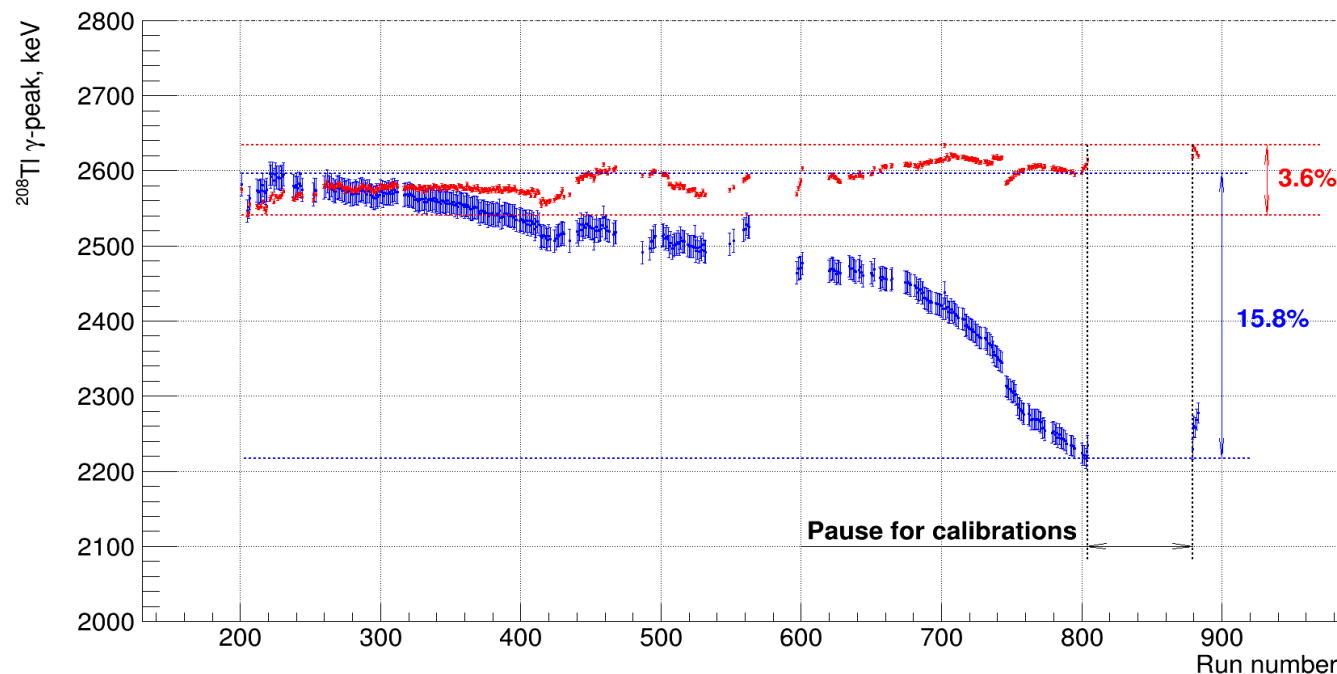
При анализе данных наблюдается «дрейф» энергетической шкалы, как результат изменения температуры сцинтиллятора.



Дрейф энергетической шкалы на примере пика ^{208}Tl ($E = 2.61 \text{ МэВ}$)

Проведена компенсация эффекта «дрейфа» по пику полного поглощения гамма-квантов источника ^{60}Co .

Результат: уменьшение «дрейфа» шкалы с 15.8% до 3.6% (в 4.4 раза)



Результат коррекции шкалы: синим показаны пики ^{208}Tl до коррекции шкалы, красным -- после коррекции.

Изучение сцинтилляционного дефекта

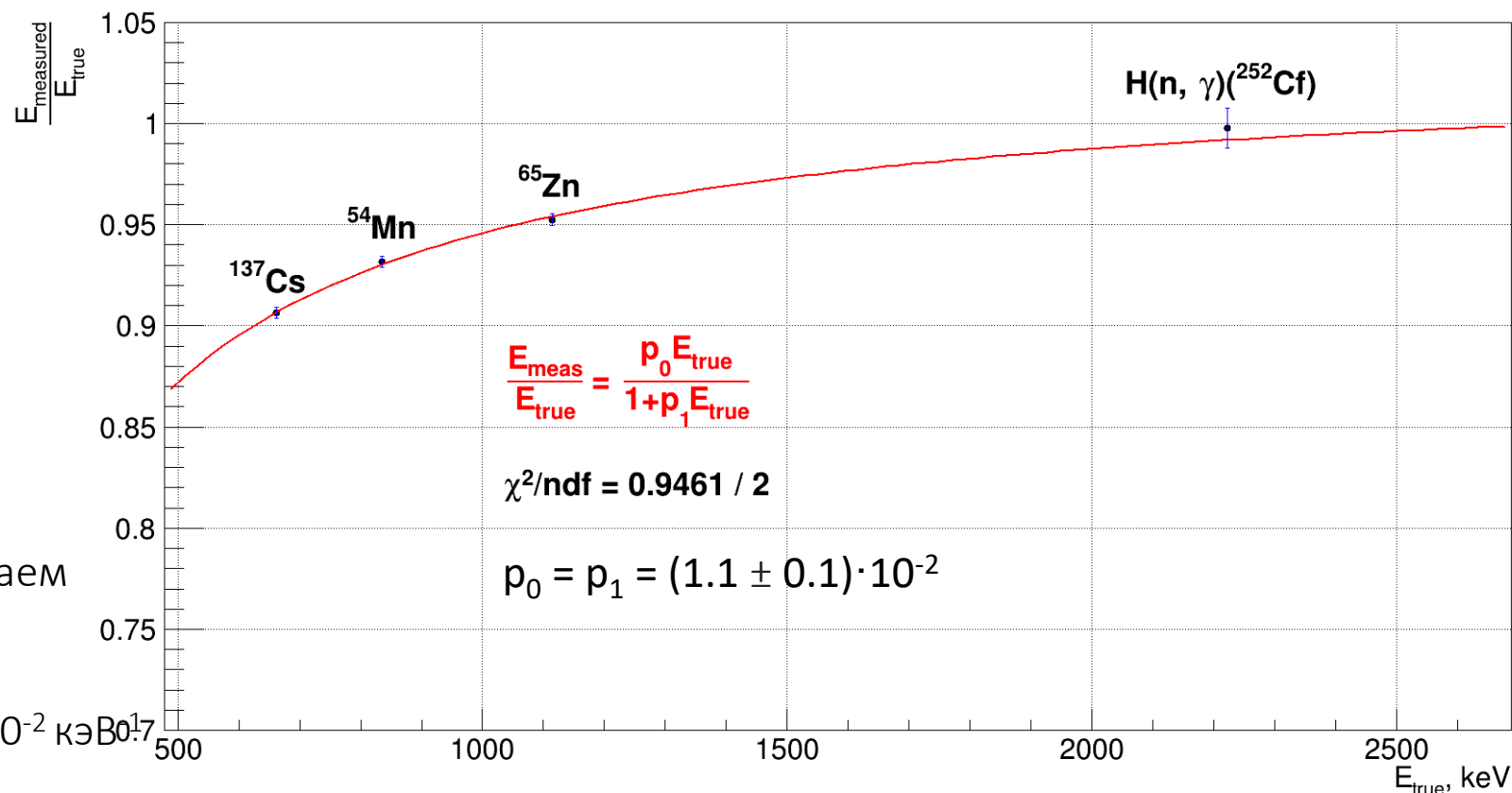
Используемые для калибровок

источники:

- ^{137}Cs ($E_\gamma = 662$ кэВ)
- ^{54}Mn ($E_\gamma = 835$ кэВ)
- ^{65}Zn ($E_\gamma = 1115$ кэВ)
- ^{252}Cf (по реакции (n, γ) на водороде, $E_\gamma = 2223$ кэВ)
- ^{60}Co ($E_{\gamma 1} = 1173$ кэВ, $E_{\gamma 2} = 1332$ кэВ)

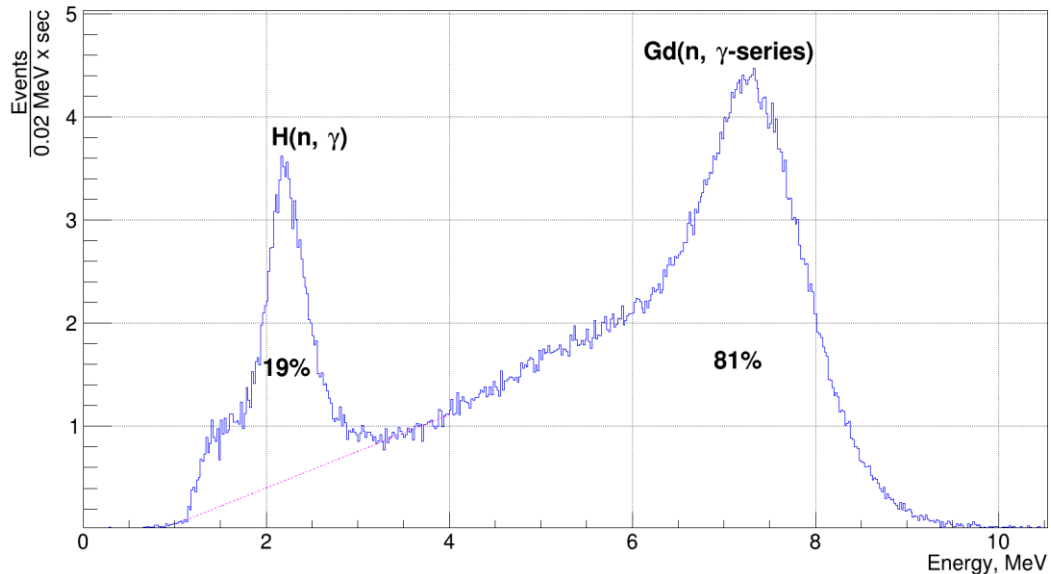
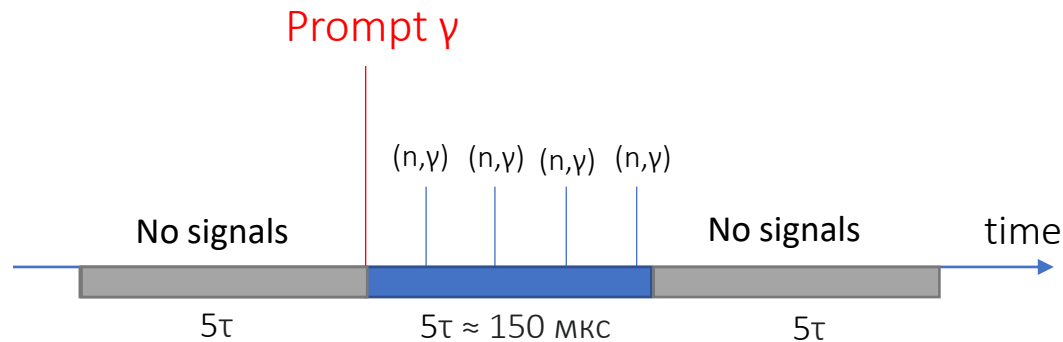
В результате фитирования найденных относительных изменений отклика получаем функцию:

$$f(E_\gamma) = \frac{p_0 \cdot E_\gamma}{1 + p_1 \cdot E_\gamma}, \text{ где } p_0 = p_1 = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$$



Относительный отклик детектора iDREAM

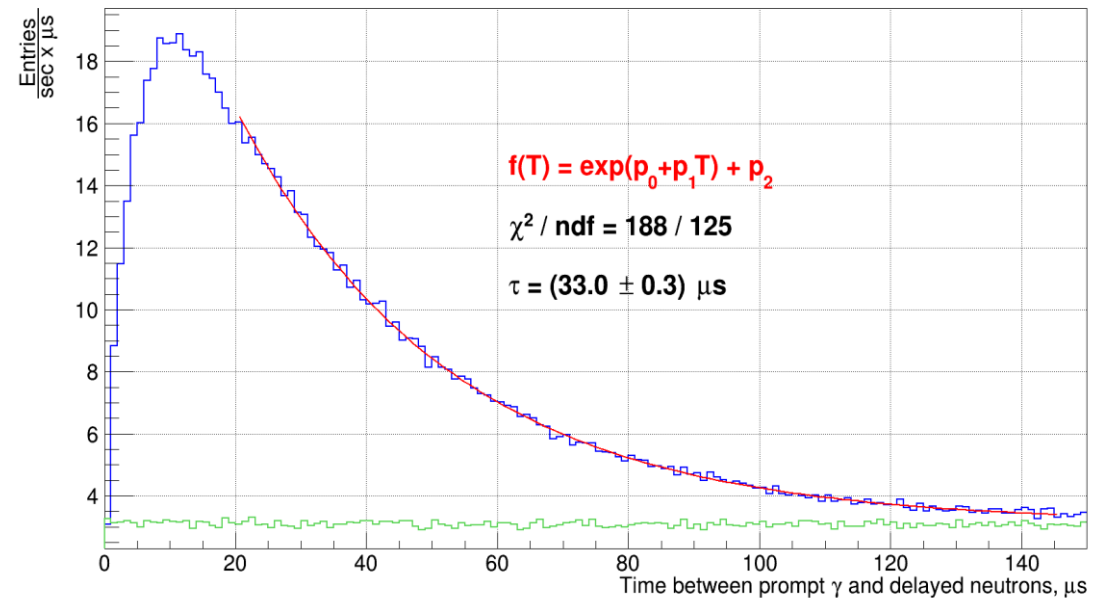
Определение времени захвата нейтрона в гадолиниевом сцинтилляторе



Спектр задержанных событий от ^{252}Cf

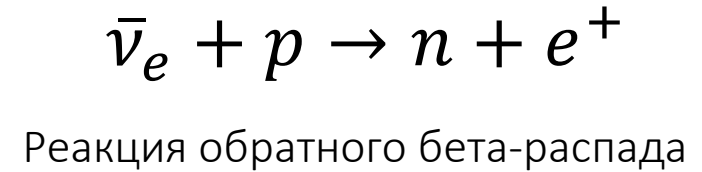
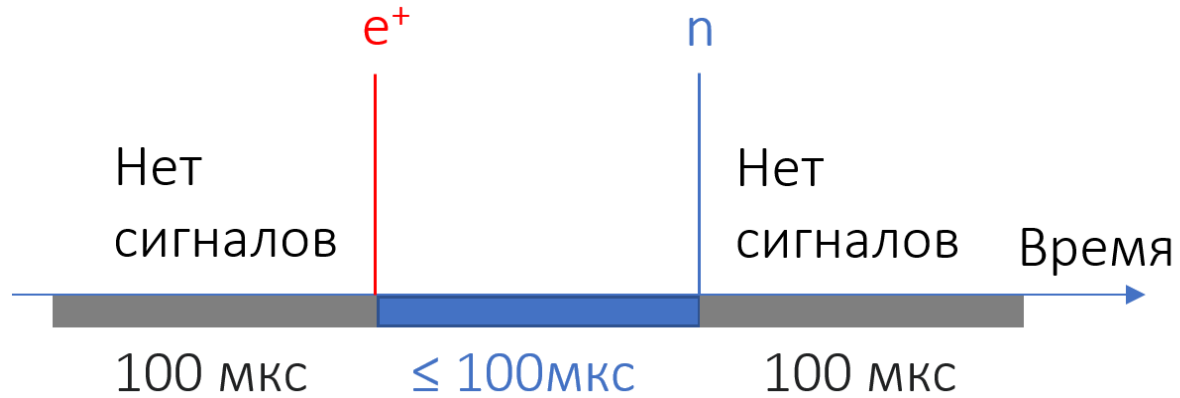
$\text{Eff} = 1 - e^{-t/\tau}$, где τ -- время захвата нейтрона;

$$\tau = (33.0 \pm 0.3) \text{ мкс}$$



Распределение времен захвата нейтронов в окне 150 мкс после регистрации мгновенных γ -квантов (синий) при распаде ^{252}Cf . Зеленым цветом показано распределение случайных совпадений.

Регистрация антинейтринного излучения. Отбор событий.



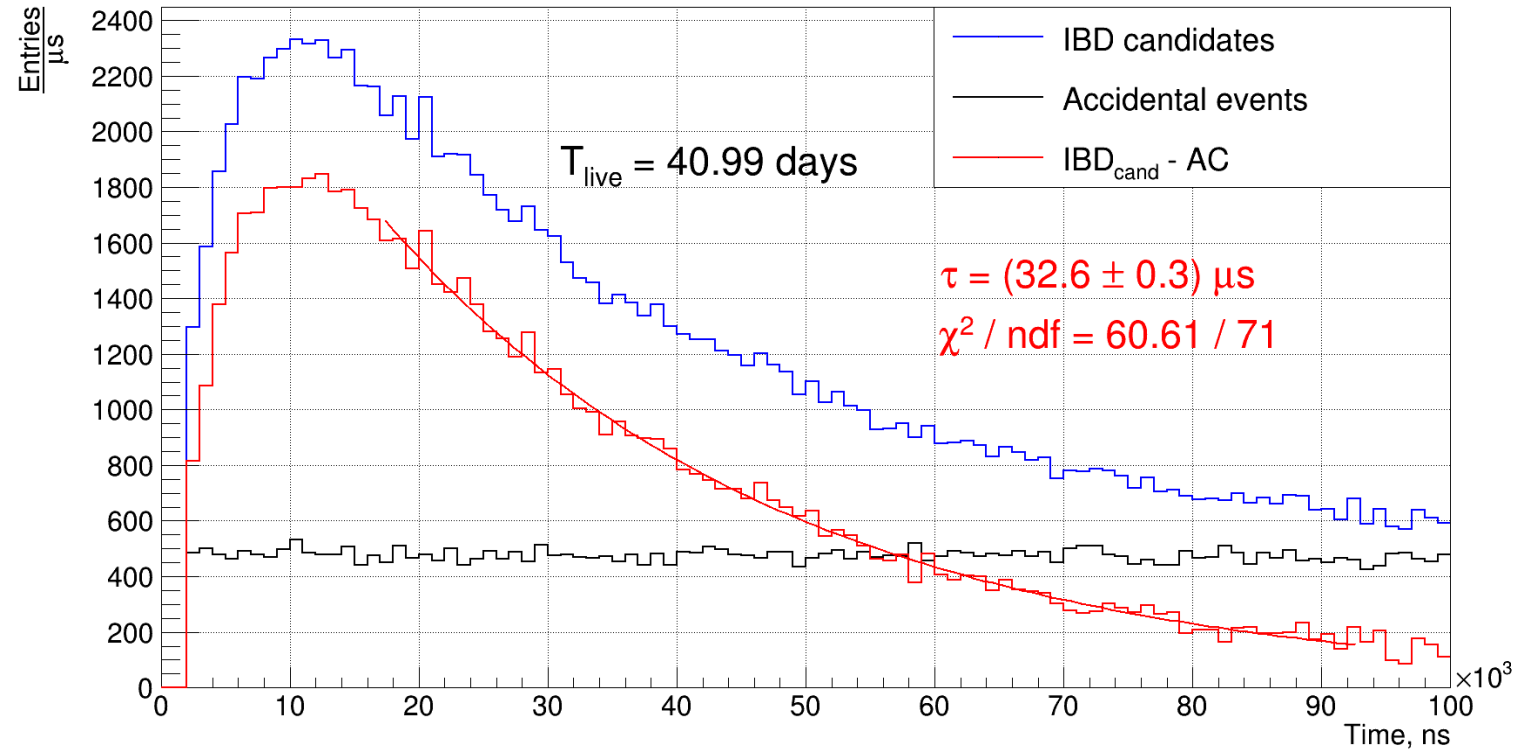
Условия отбора событий:

- Энергия мгновенного (позитронного) события лежит в пределах (3 ÷ 8) МэВ
- Энергия задержанного (нейтронного) события лежит в пределах (5 ÷ 10) МэВ
- Время между событиями меньше 100 мкс
- В течение 100 мкс до первого события и 100 мкс после второго не зарегистрировано ни одного события

Регистрация антинейтринного излучения. Результаты

За 77 суток в период с 4 августа 2021 по 20 октября 2021 отобрано:

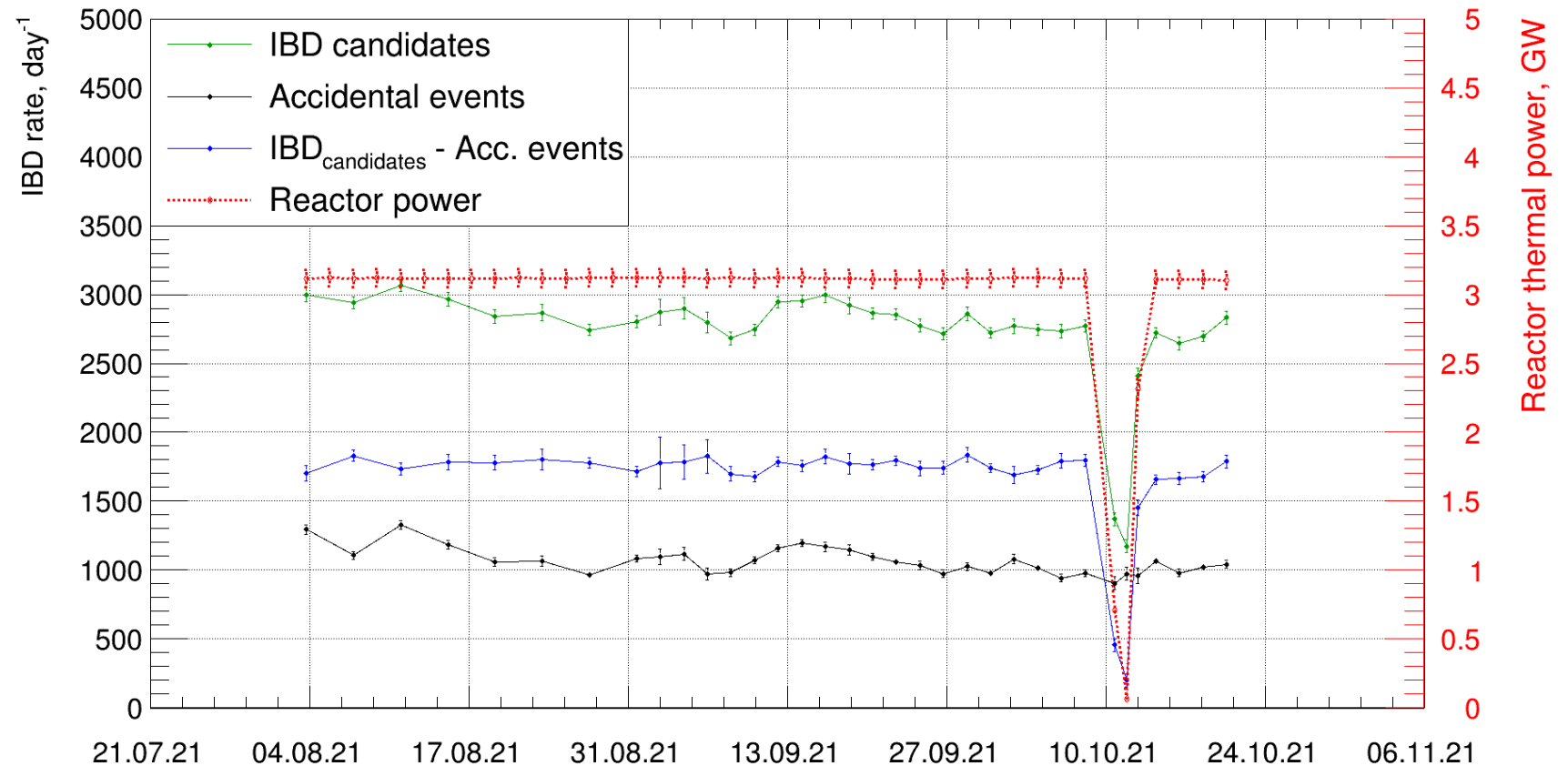
- 40.99 суток "живого" времени
- 115005 событий-кандидатов на обратный бета-распад
- 44520 событий-пар случайных совпадений
- $115005 - 44520 = 70485$ событий - кандидатов за вычетом случайных совпадений.



Распределение времён между событиями в парах-кандидатах на взаимодействие антинейтрино по реакции ОБР (синий), в парах-случайных совпадениях (черный) и их разность (красный)

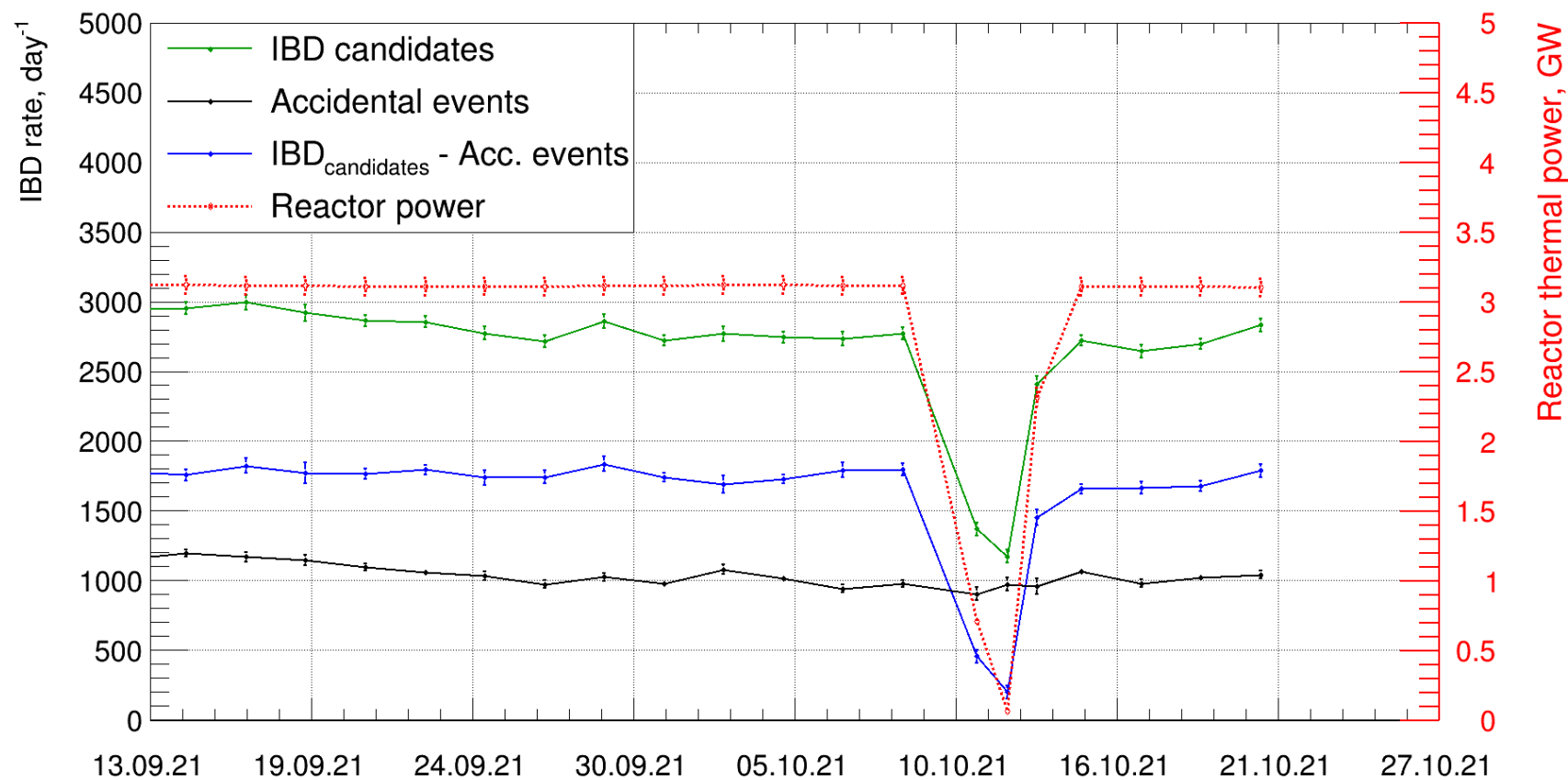
Регистрация антинейтринного излучения. Результаты

- 11-12 октября: Падение мощности реактора: с 3.1 до 0.02 ГВт (почти на 100%)
- Падение скорости счета детектора с (1720 ± 143) до (276 ± 155) событий в сутки (~84%). Большая ошибка скорости счета при выключенном реакторе объясняется малой статистикой



Регистрация антинейтринного излучения. Результаты

- Средняя скорость счета при включенном реакторе $R_{ON} = (1720 \pm 12)$ соб/сутки
- Средняя скорость счета при остановленном реакторе $R_{OFF} = (276 \pm 80)$ соб/сутки
- Средняя скорость счета антинейтринных событий: $R_{IBD} = R_{ON} - R_{OFF} = (1444 \pm 80)$ соб/сутки



Заключение

В ходе работы получены следующие основные результаты:

- Изучена энергетическая шкала детектора iDREAM. Показано, что шкала детектора меняется вследствие колебаний температуры сцинтиллятора. Для компенсации «дрейфа» энергетической шкалы разработан алгоритм коррекции по калибровкам ^{60}Co . Данный алгоритм позволяет снизить эффект от дрейфа в 4.4 раза.

- Изучен сцинтилляционный дефект. Отклик детектора в области энергий (0.66 ÷ 2.22) МэВ описан

$$\text{функцией } f(E_\gamma) = \frac{p_0 \cdot E_\gamma}{1 + p_1 \cdot E_\gamma}$$

- Измерено время захвата нейтрона в содержащем металлический гадолиний сцинтилляторе, которое составило $\tau = (33.0 \pm 0.3)$ мкс

- Изучен отклик детектора в потоке реакторных антинейтрино, достоверно зарегистрированы взаимодействия антинейтрино. Средняя скорость счета антинейтринных событий при включенном реакторе составила $R_{\text{IBD}} = (1444 \pm 80)$ событий в сутки.

Спонтанное деление калифорния-252

	²⁵² Cf ^b	
	Consensus	Standard Deviation
P_0	0.0021767	0.00012
P_1	0.0259869	0.00123
P_2	0.1251188	0.00132
P_3	0.2740459	0.00119
P_4	0.3050812	0.00144
P_5	0.1854741	0.00119
P_6	0.0658998	0.00065
P_7	0.0142918	0.00096
P_8	0.0018219	0.0003
P_9	0.0001022	0.00017
P_{10}	0.0000005	0.0000016
$\langle \nu(\nu - 1) \rangle$	11.9517	0.0188
$\langle \nu(\nu - 1)(\nu - 2) \rangle$	31.6680	0.175
$\langle \nu^2 \rangle$	15.7087	0.0188
$\langle \nu^2 \rangle - \langle \nu \rangle^2$	1.5936	0.0188
$\langle \nu(\nu - 1) \rangle / \langle \nu \rangle^2$	0.8467	0.0013

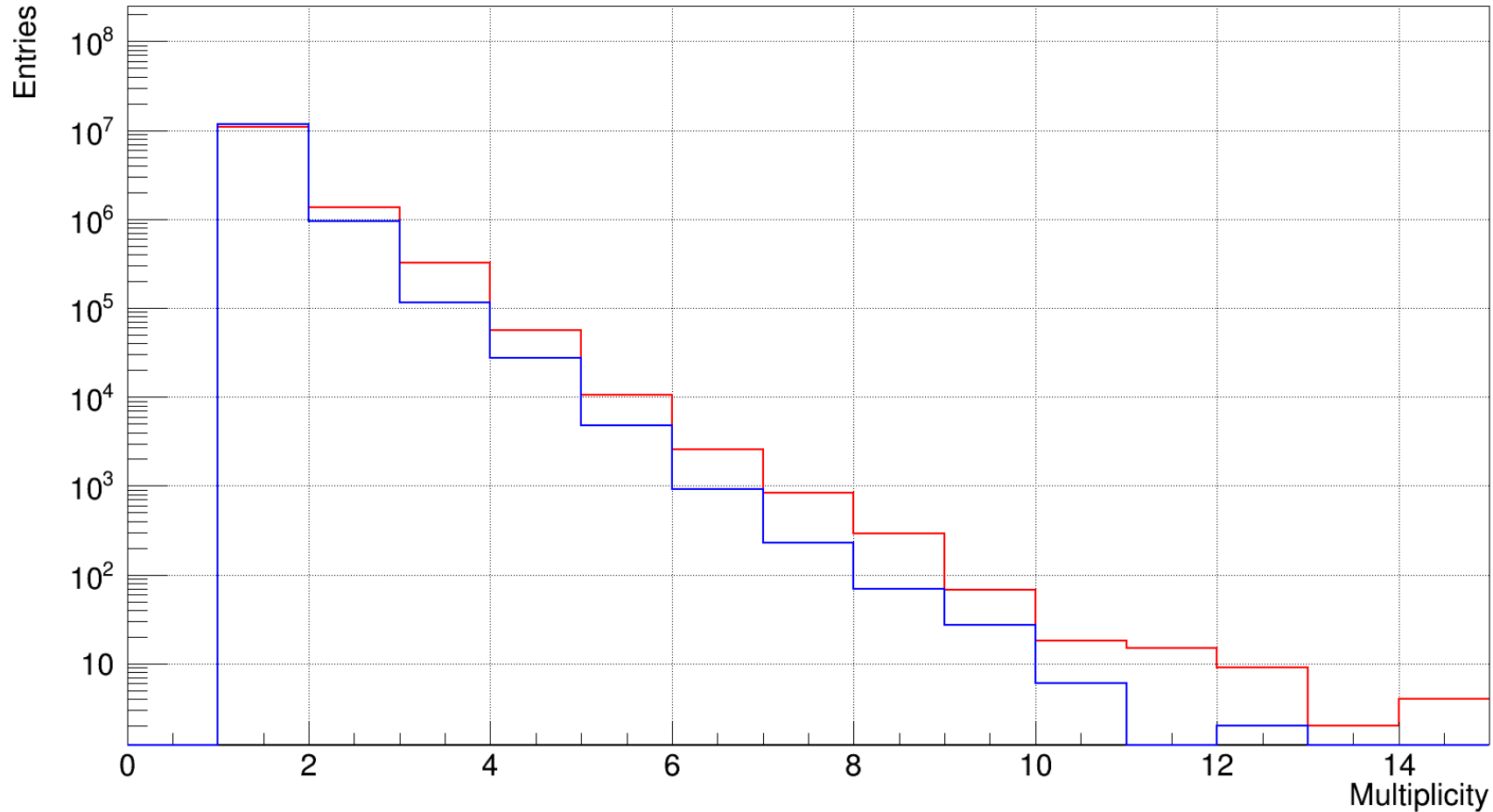
Вероятности испускания мгновенных нейтронов

Nuclide	Consensus Value
²⁵² Cf	3.757 ± 0.010

Среднее число испускаемых
мгновенных нейтронов изотопом
²⁵²Cf

Santi P., Miller M. Reevaluation of Prompt Neutron Emission Multiplicity Distributions for Spontaneous Fission // Nuclear Science and Engineering. — 2008. — Т. 160, No 2. — С. 190—199.

Распределение по кратностям кластеров



На примере 4-часового набора данных.

Всего набрано 14589351 \approx 15M событий.

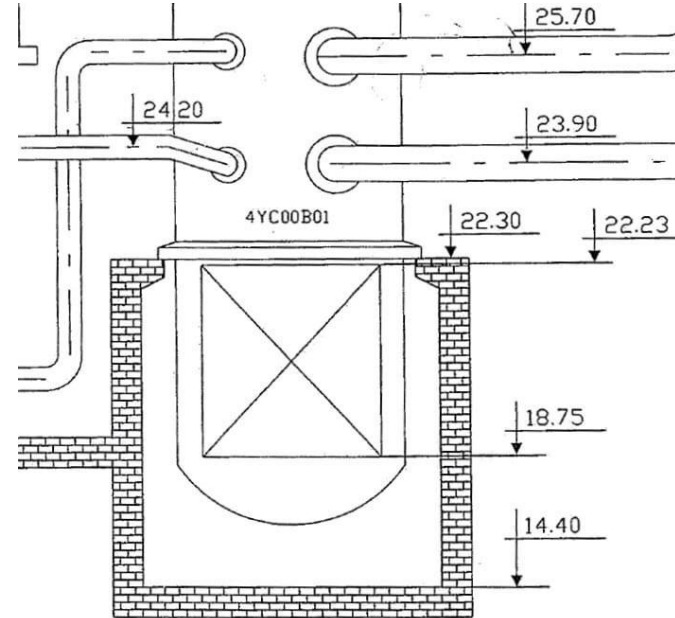
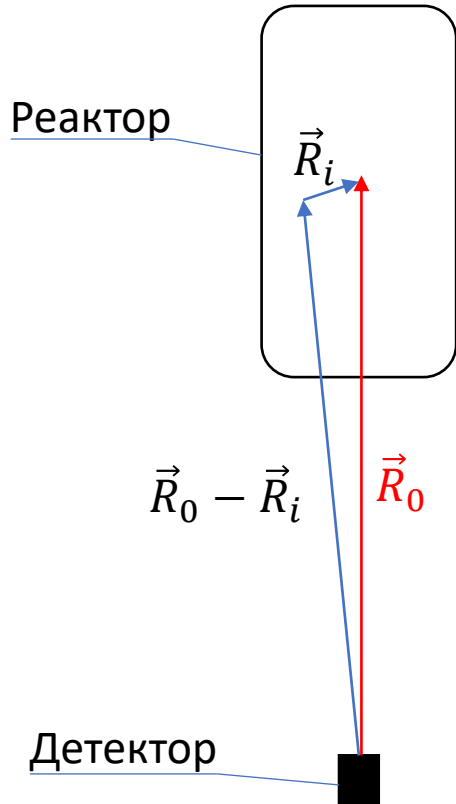
Из них в кластерах с кратностью «2»:

Кандидатов: 1358170

Случ. совпадений: 938672

Разность: 419498

Расстояние до реактора



- Высота активной зоны: 3.48м
- Диаметр активной зоны: 3.12м
- Расстояние от центра мишени детектора до центра активной зоны: 19.59 м

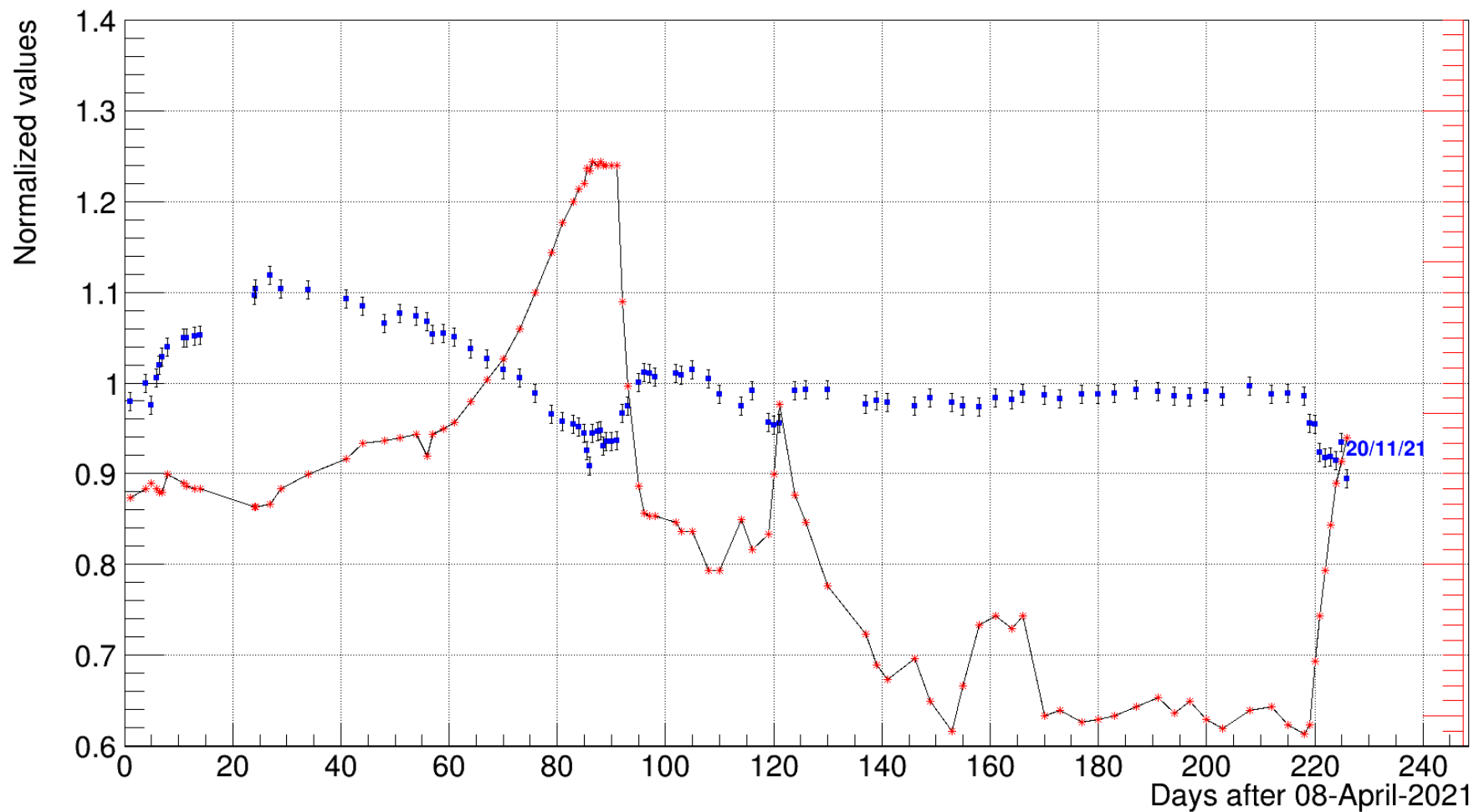
$$N_{\bar{\nu}_e} \sim \frac{1}{(\vec{R}_0 - \vec{R}_i)^2} \approx \frac{1}{R_0^2} + \frac{2(\vec{R}_i \vec{R}_0)}{R_0^4} \approx \frac{1}{R_0^2},$$

где $N_{\bar{\nu}_e}$ -- количество антинейтрино, проходящих через детектор.

\vec{R}_0 -- расстояние от центра мишени до центра активной зоны реактора.

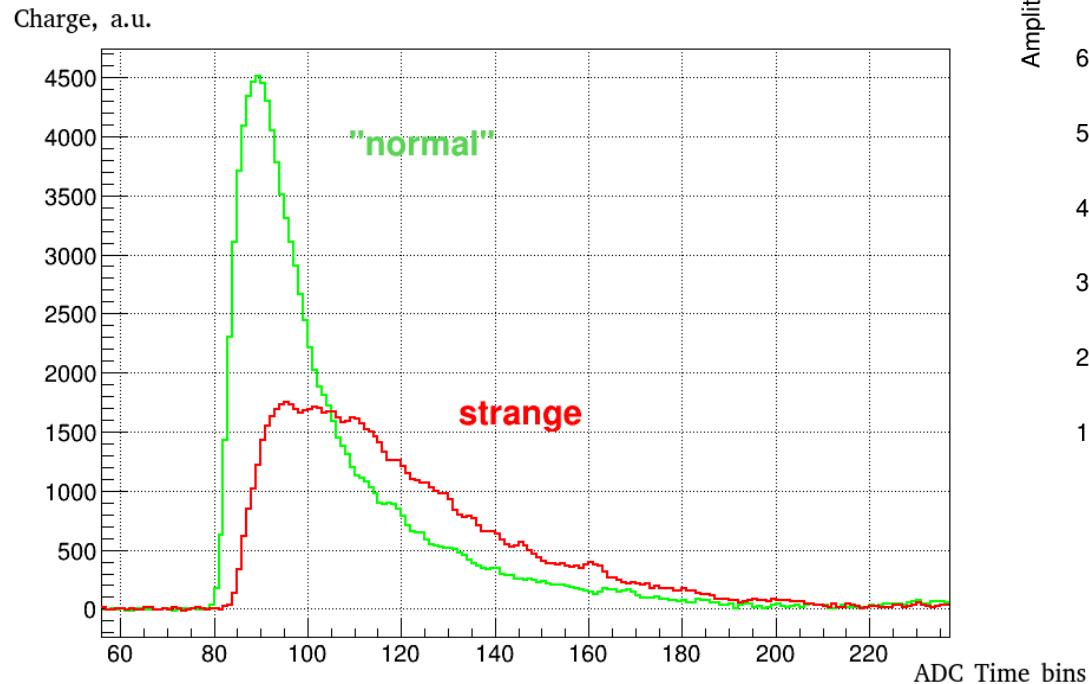
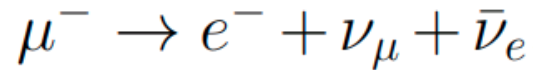
\vec{R}_i -- расстояние от центра активной зоны реактора до i -го излучающего элемента.

Зависимость отклика детектора от температуры

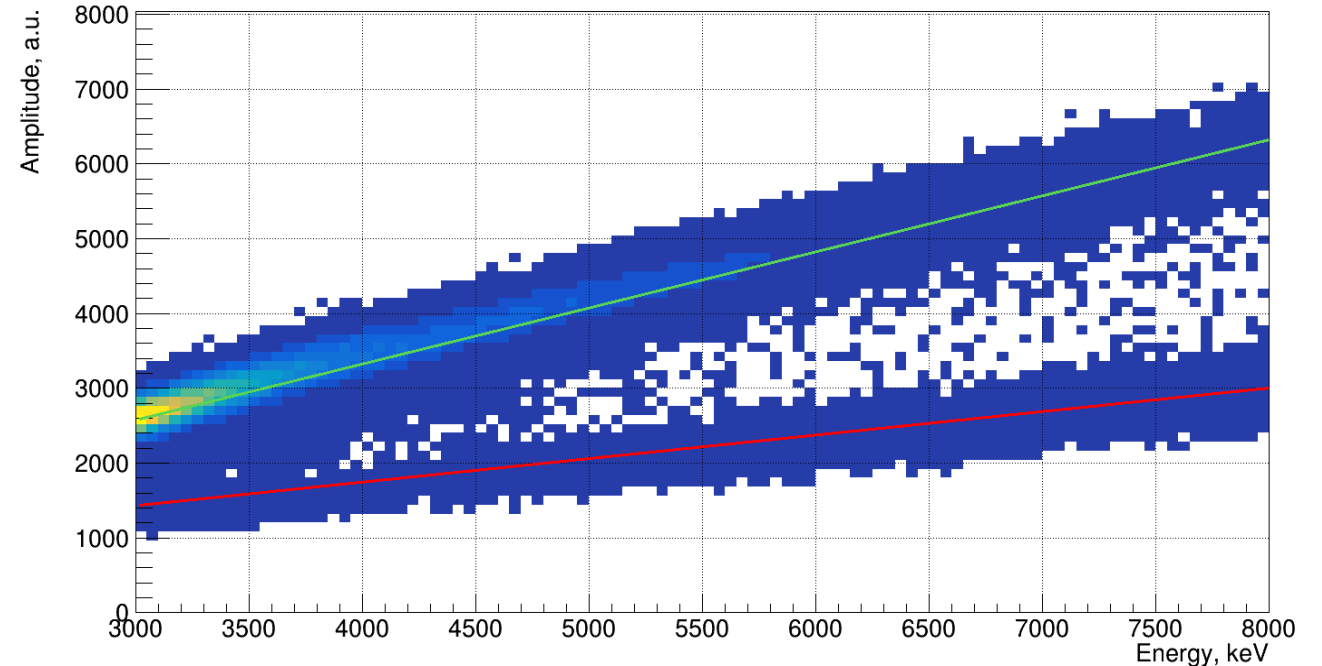


- Синие точки – относительный отклик детектора
- Красные точки – температура сцинтиллятора

Анализ коррелированного фона, связанного с остановками мюонов

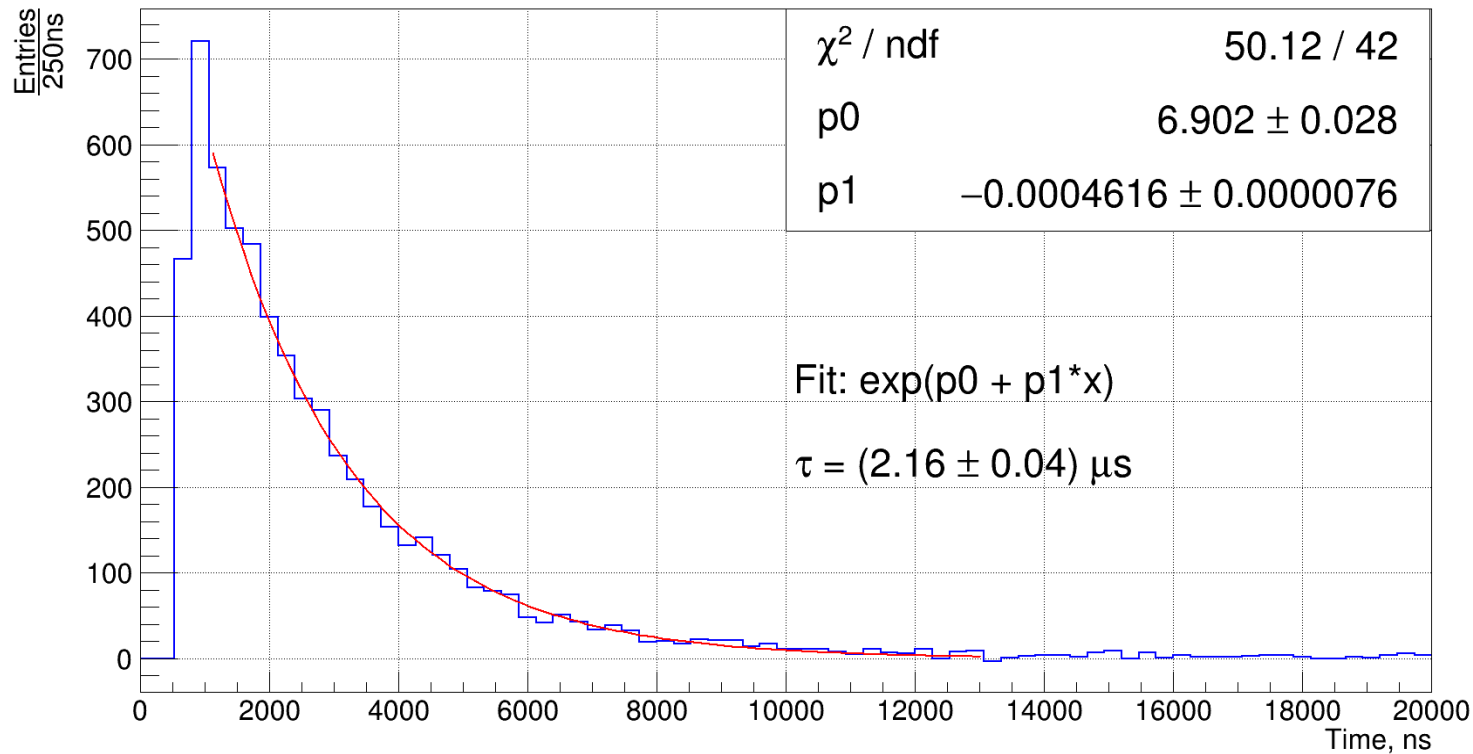


Усредненные формы двух типов сцинтилляционных сигналов



Распределение отношения амплитуд к энергии каждого события. Выделяются две линейные зависимости: для стандартных импульсов (зеленая линия) и сигналов с длительными фронтами (красная линия)

Анализ коррелированного фона, связанного с остановками мюонов



- Введено условие на форму импульса по отношению амплитуды к энергии
- За 40.99 суток "живого" времени отобрано 6519 "muon-like" событий (~ 3.5% от общего числа событий-кандидатов на ОБР)
- Фитирование временного распределения дает $\tau = (2.16 \pm 0.04) \mu\text{s}$

Распределение времен между первым и вторым событиями в парах с отборе по форме импульса