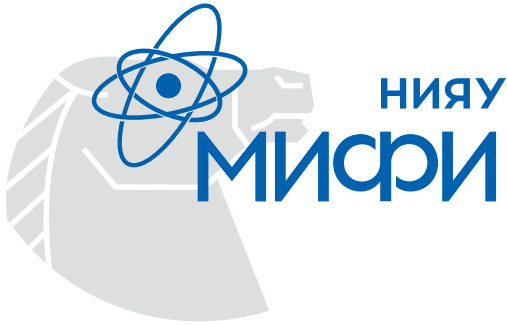




ПОДАВЛЕНИЕ ФОНА АННИГИЛЯЦИОННЫХ ГАММА-КВАНТОВ В БОР-НЕЙТРОНЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ МЕТОДОМ СОВПАДЕНИЙ

Студент: Иванова О.В., гр. М24-114

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Тетерин П.Е.

Научный консультант: Дубинин Ф.А.

26.06.2026

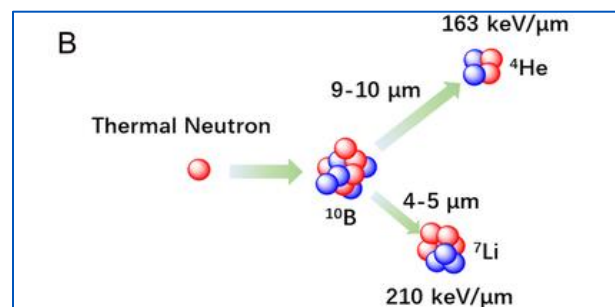
Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) – современная форма лучевой терапии.

Реакция БНЗТ:

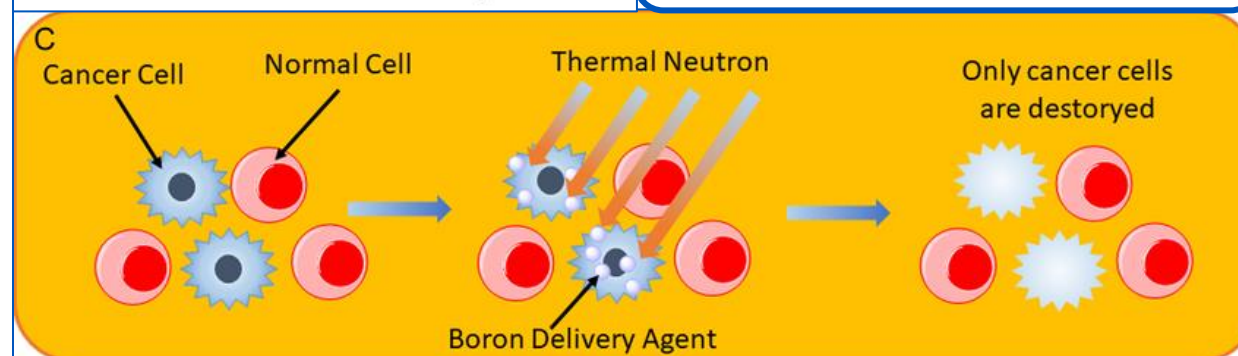


Регистрация гамма-кванта с энергией 478 кэВ позволяет мониторинг распределения и интенсивности борной дозы внутри биологических тканей

В БНЗТ используется препарат ^{18}F -ФБФА, в котором F-18 служит источником позитронов.



(B) Механизм БНЗТ.
(C) Схематическое изображение селективного уничтожения опухолевых клеток при БНЗТ



Сцинтилляционные детекторы не могут разделить такие близкие линии!

Предлагаемый метод: косвенное вычисление сигнала 478 кэВ через вычитание прогнозируемого фона 511 кэВ.

Цель работы: апробация методики выделения полезного сигнала 478 кэВ методом вычитания модельного фона 511 кэВ.

Для этого необходимо выполнить следующие задачи:

1. Подобрать оптимальный режим работы CZT для регистрации гамма-излучения с энергиями 662 кэВ.
2. Получить энергетическое разрешение детектора CZT на линиях 478 кэВ от В-11 и 511 кэВ от Na-22.
3. Апробировать методику выделения сигнала 478 кэВ на сцинтилляционном детекторе LYSO-SIPM с помощью источника Cs-137.
4. Апробировать методику выделения сигнала 478 кэВ от В-11 на сцинтилляционном детекторе LYSO-SIPM в условиях облучения нейтронами и аннигиляционными гамма-квантами.

Подбор параметров CZT

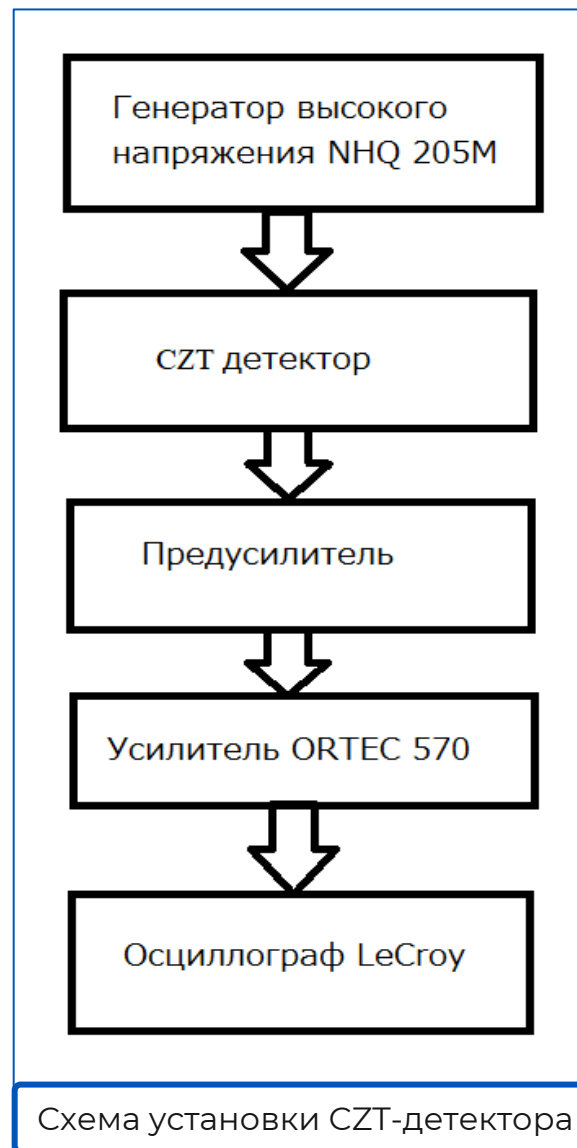
Использовался полупроводниковый детекторный зонд SDP 310/Z/60. Он содержит квазиполусферический детектор из CdZnTe и зарядочувствительный предусилитель.



Детекторный зонд SDP 310/Z/60

Детектор подключался к генератору высокого напряжения и спектрометрическому усилителю.

Регистрация импульсов осуществлялась с использованием цифрового осциллографа LeCroy. Снимался зарядовый спектр.

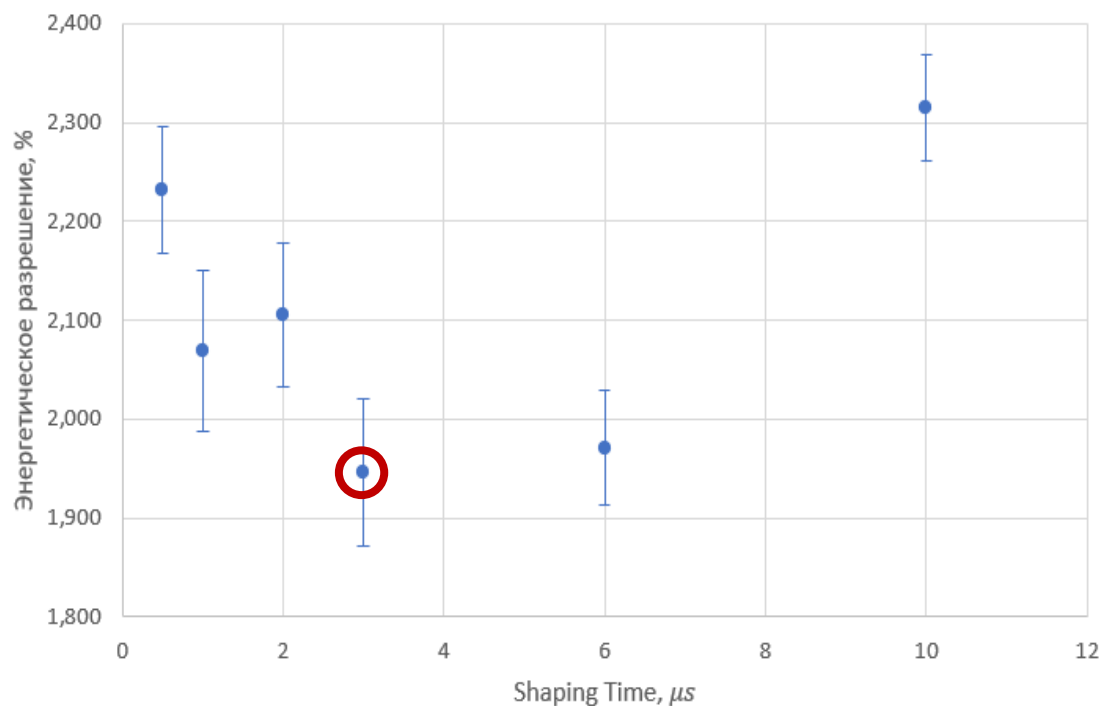


Подбор параметров CZT

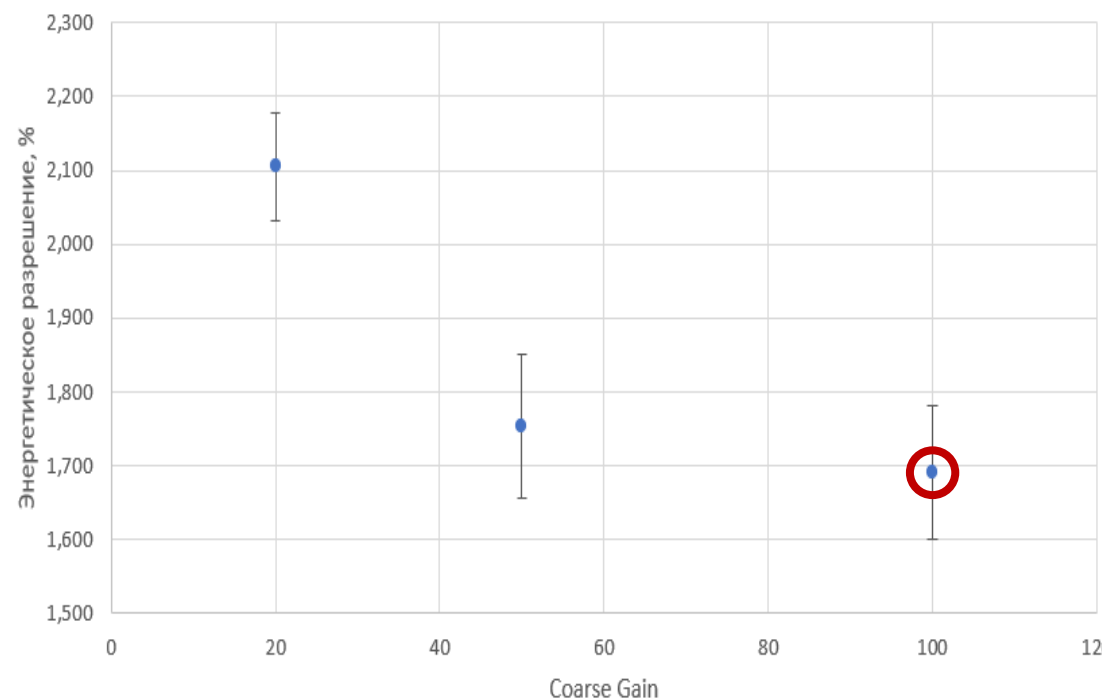
Fine Gain	0.5
Напряжение, В	250

Изучались параметры спектрометрического усилителя:

- грубый коэффициент усиления (Coarse Gain)
- время формирования сигнала (Shaping Time)



Зависимость энергетического разрешения от значений времени формирования сигнала



Зависимость энергетического разрешения от значений грубого коэффициента усиления

Подбор параметров CZT

Определялось напряжение при найденных значениях.
Исследуемый диапазон составлял от 50 до 350 В с шагом 50.

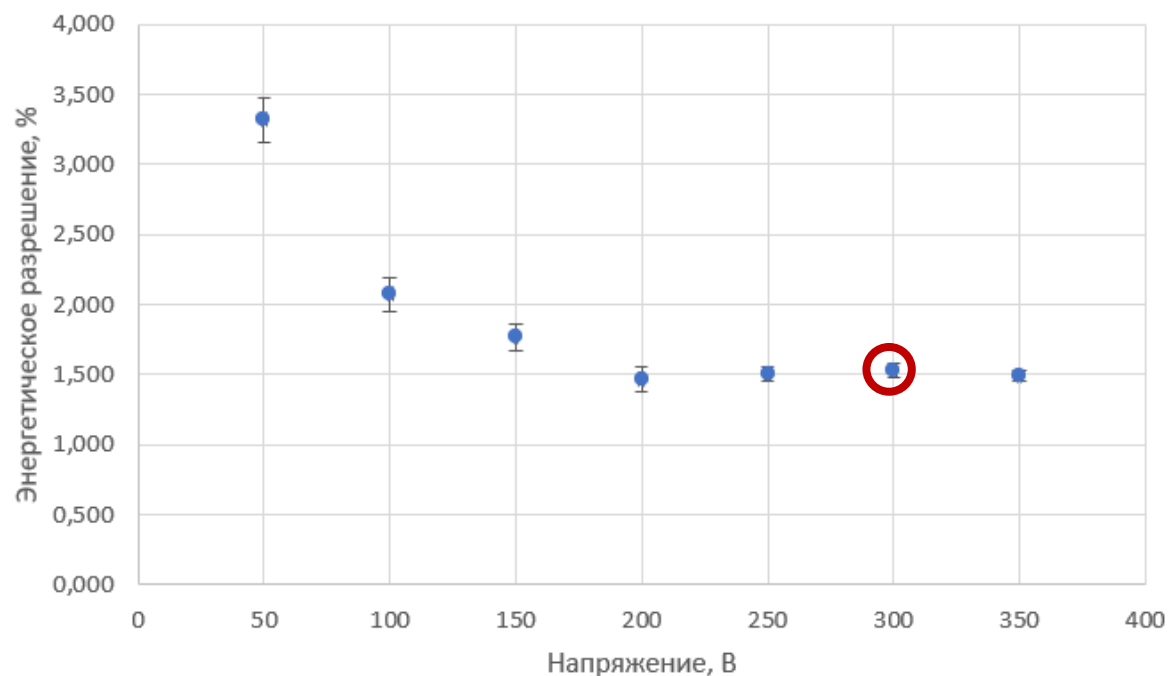


График зависимости энергетического разрешения при разных значениях напряжения

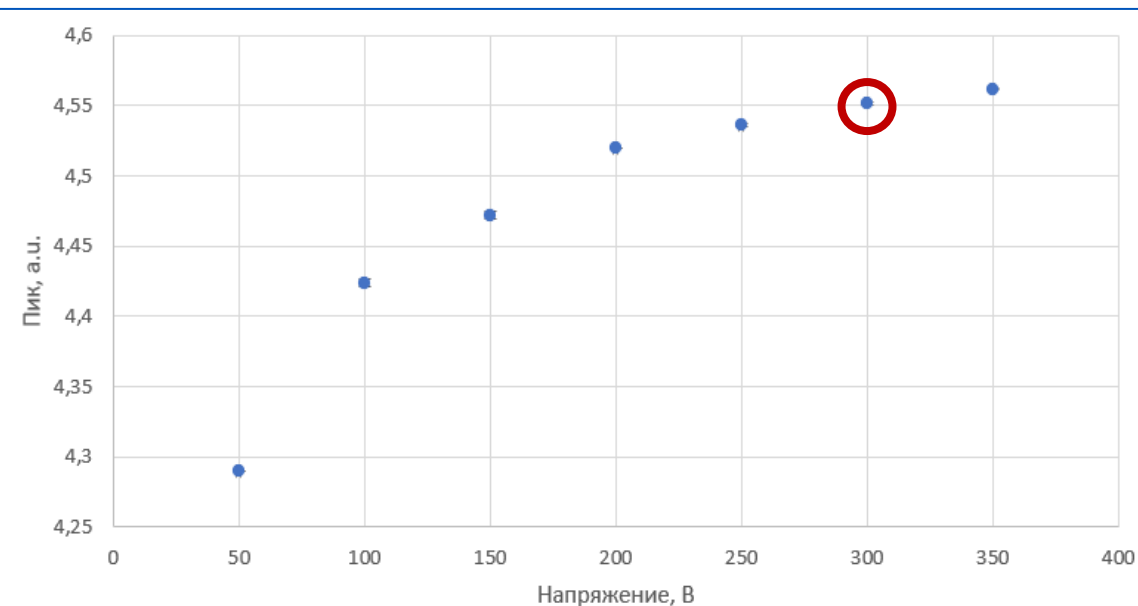


График зависимости положения пика при разных значениях напряжения

В итоге оптимальные параметры работы:

Shaping Time, μs	3
Gain	50
Напряжение, В	300

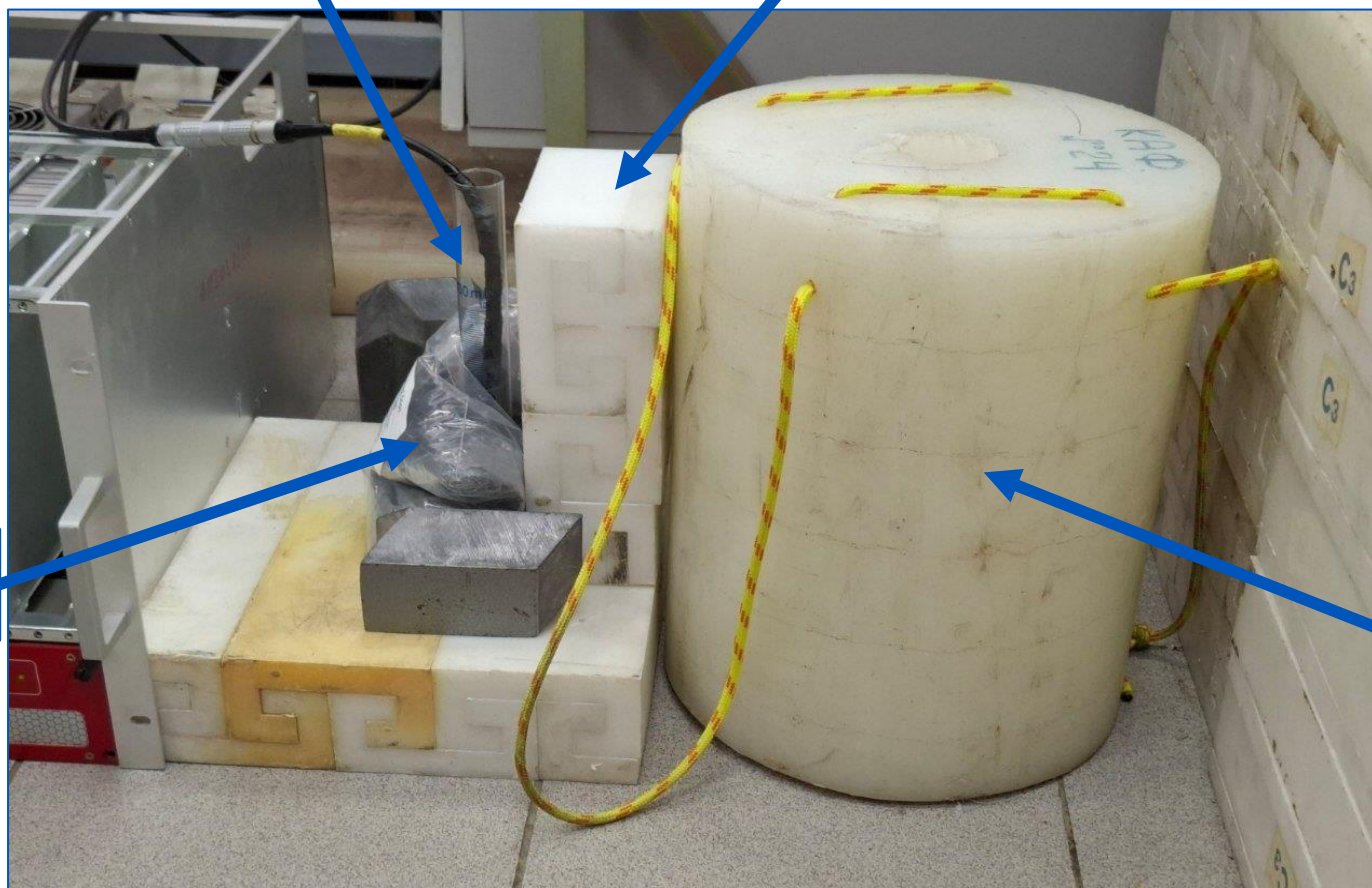
Описание экспериментальной установки

Детектор внутри стеклянной колбы, заполненной карбидом бора B_4C

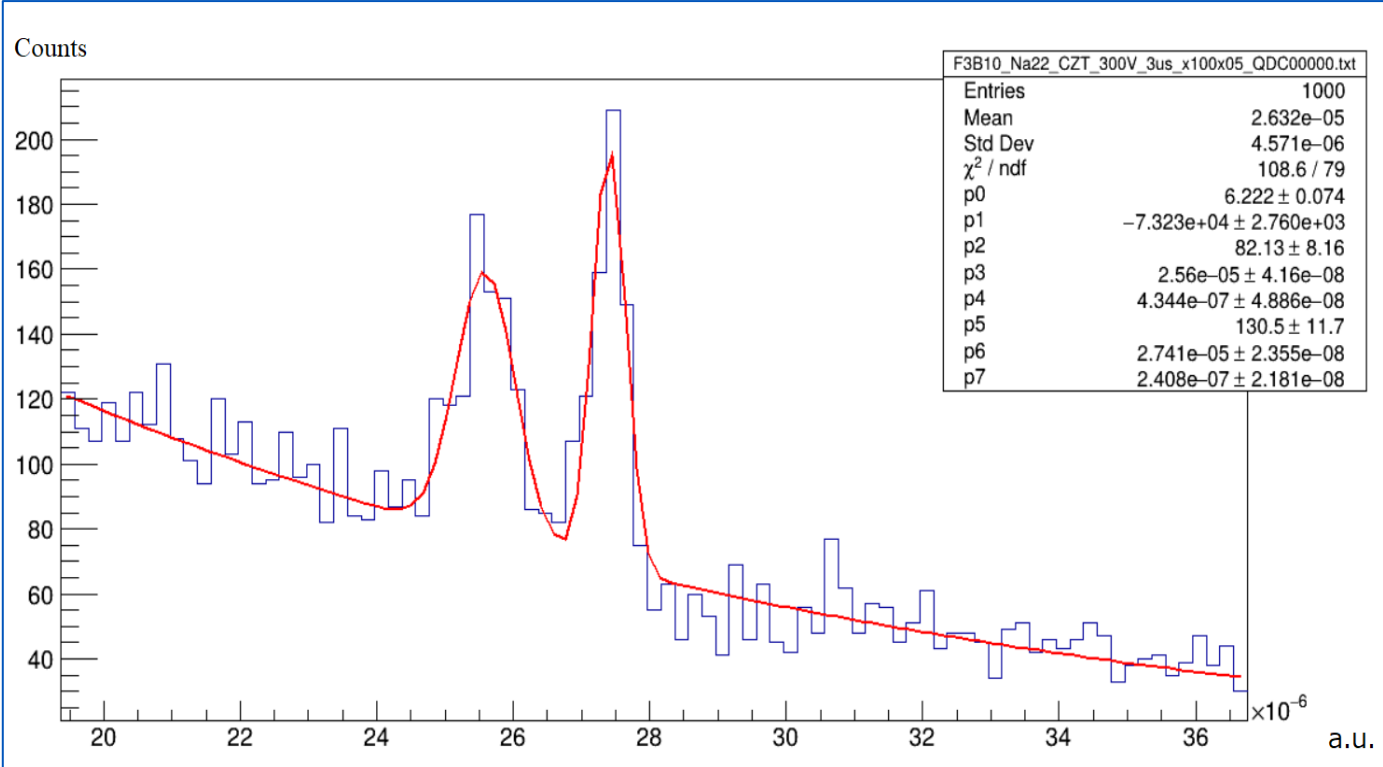
Борированный полиэтилен

1 кг порошкообразного карбида бора B_4C

Парафиновый замедлитель радиусом 14 см с источником нейтронов Pu-Be внутри



Экспериментальная установка с CZT-детектором



Аппроксимация 478 кэВ и 511 кэВ составной функцией

Для аппроксимации линий 478 кэВ и 511 кэВ из спектра импульсов использовалась составная функция, состоящая из экспоненциальной и двух гауссовских распределений.

Источник	Е, кэВ	Энергетическое разрешение, %	Ошибка, %
Na-22	511	1,9	0,1
B-11	478	4,0	0,4
Фон	511	2,0	0,1

Образование аннигиляционного фона 511 кэВ

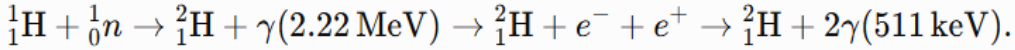


Схема установки с использованием сцинтилляционного детектора

- Детекторы располагались друг напротив друга и работали в режиме совпадений.
- Формирование линии 478 кэВ выполнялось с помощью отбора комптоновских событий взаимодействия гамма-квантов 662 кэВ от Cs-137 с веществом сцинтиллятора.
- В качестве источника аннигиляционных гамма-квантов использовался Ti-44.
- Регистрация и обработка сигналов осуществлялась с использованием специализированной 32-канальной микросхемы Petiroc2A.

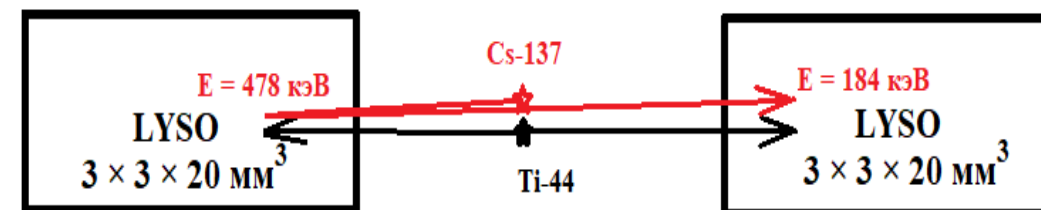
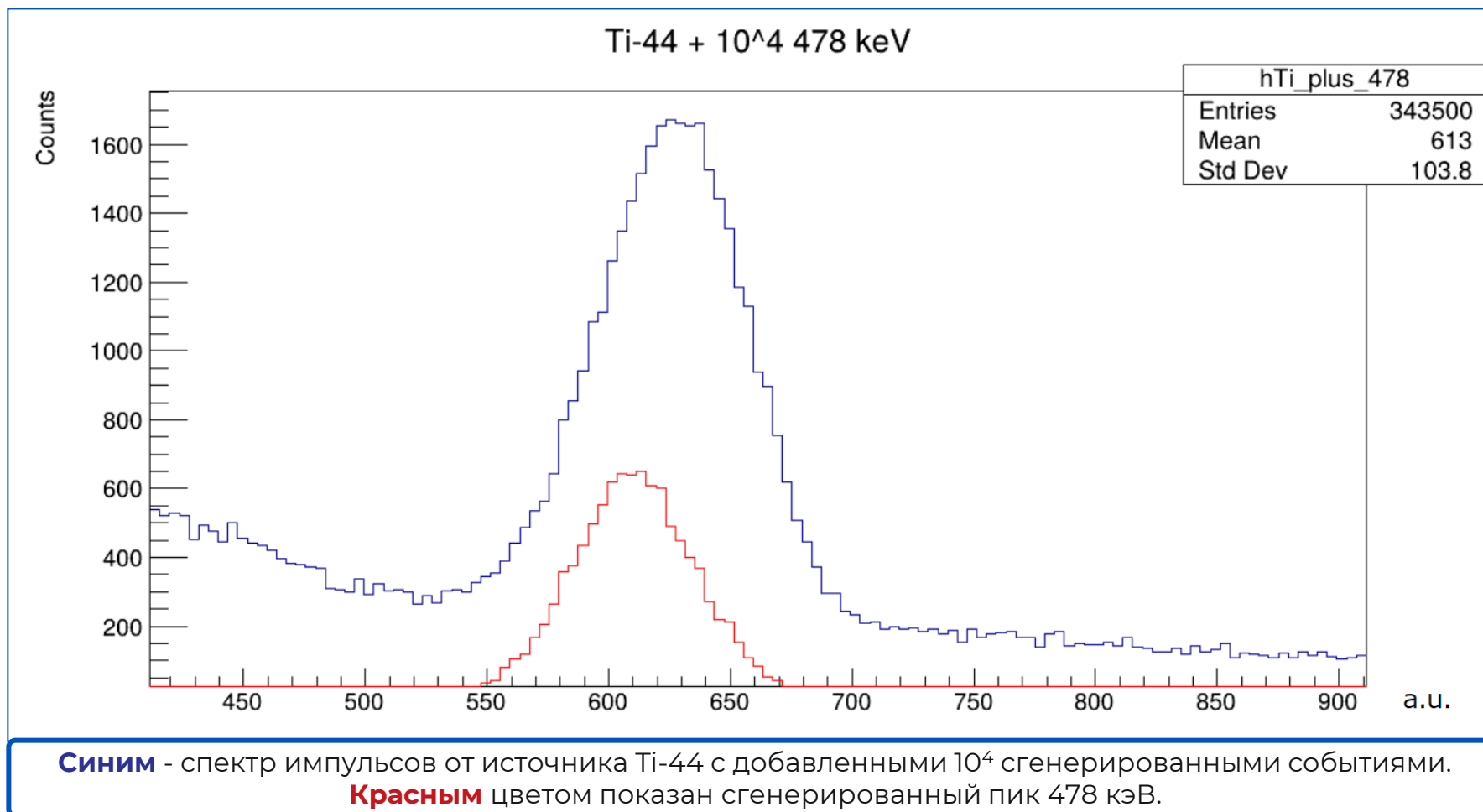


Схема расположения детекторов в эксперименте.

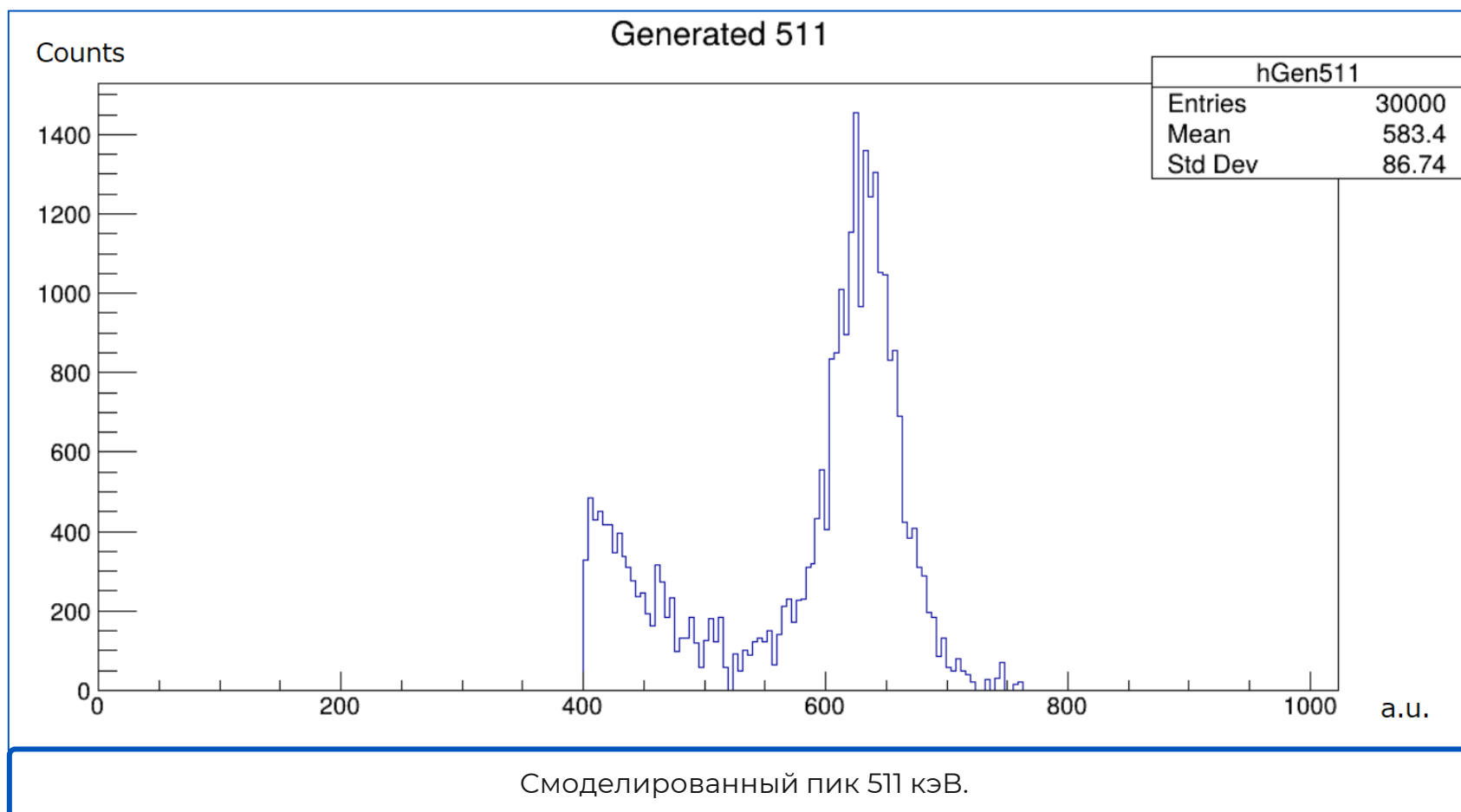
Получение и анализ спектров

Из спектра импульсов от источника Cs-137 был выделен пик 478 кэВ. После аппроксимирования пика функцией Гаусса было сгенерировано 10^4 событий, которые в итоге были добавлены к спектру Ti-44.



Получение и анализ спектров

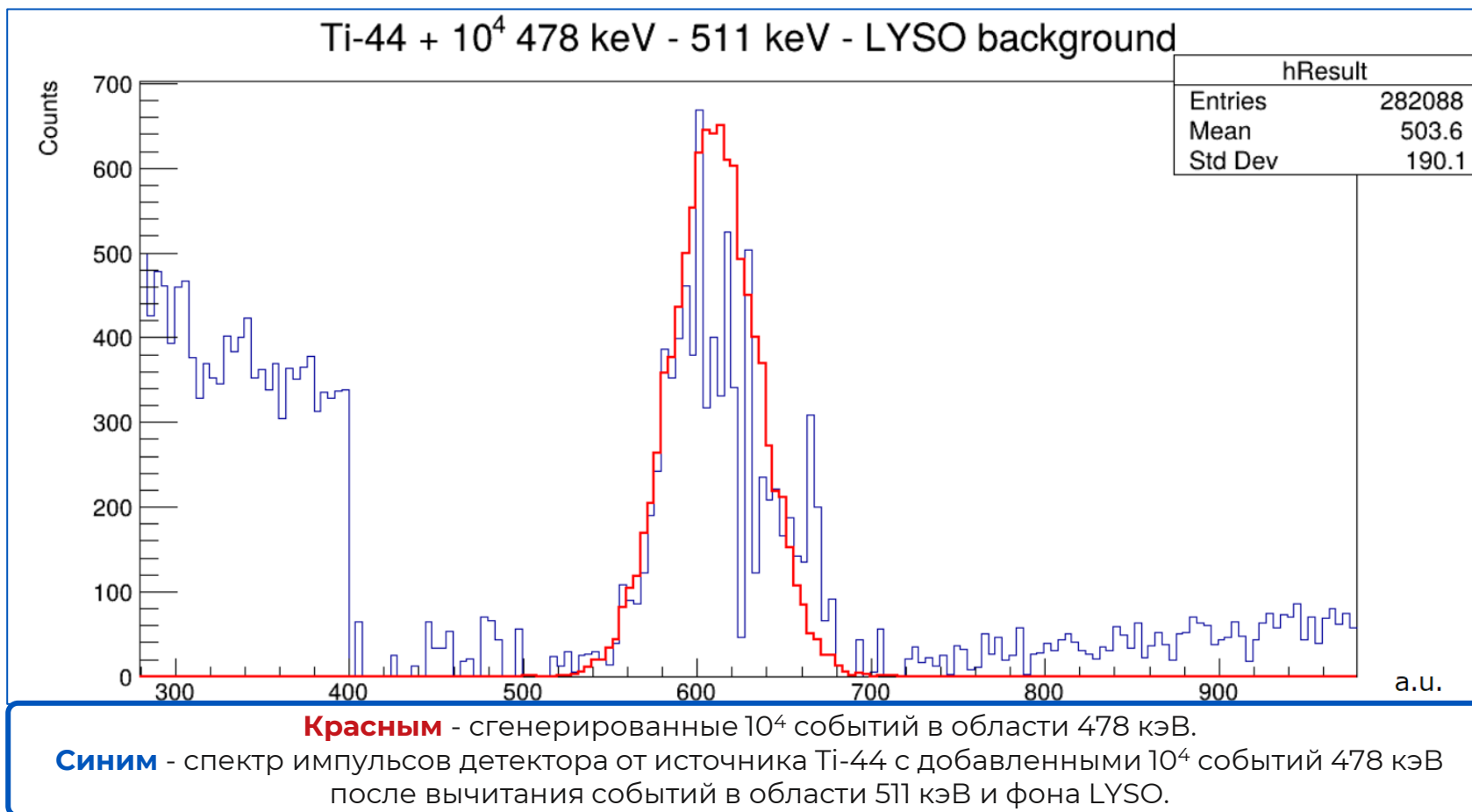
Из спектра импульсов $Ti-44$ был построен спектр совпадающих импульсов.
Из него был выделен и сгенерирован пик 511 кэВ.



Получение и анализ спектров

После вычитания фона LYSO и сгенерированного пика 511 кэВ из спектра импульсов Ti-44 с добавленными ранее событиями остаётся только пик, соответствующий энергии 478 кэВ.

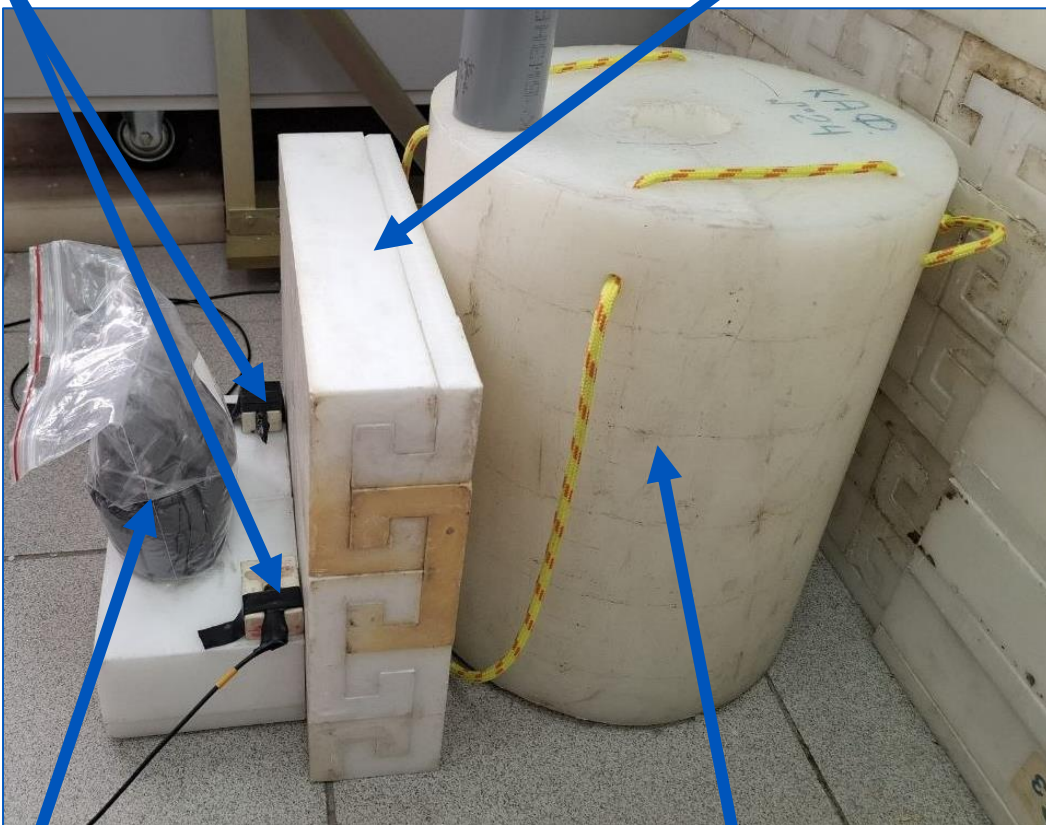
Эффективность составила $64,9 \pm 0,8 \%$.



Экспериментальная установка

Детекторы LYSO-SIPM

Борированный полиэтилен



1 кг
порошкообразного
карбида бора B_4C

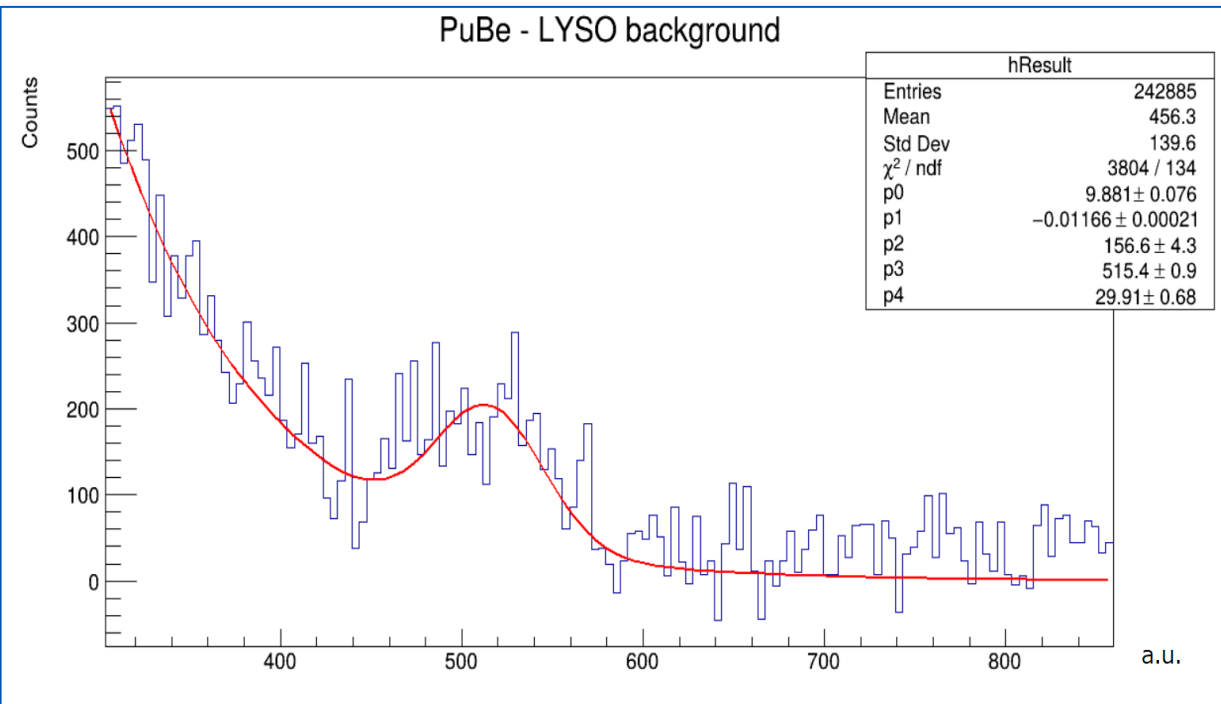
Парафиновый замедлитель
радиусом 14 см с источником
нейтронов Pu-Be внутри

Все измерения проводились в течение 1 часа.

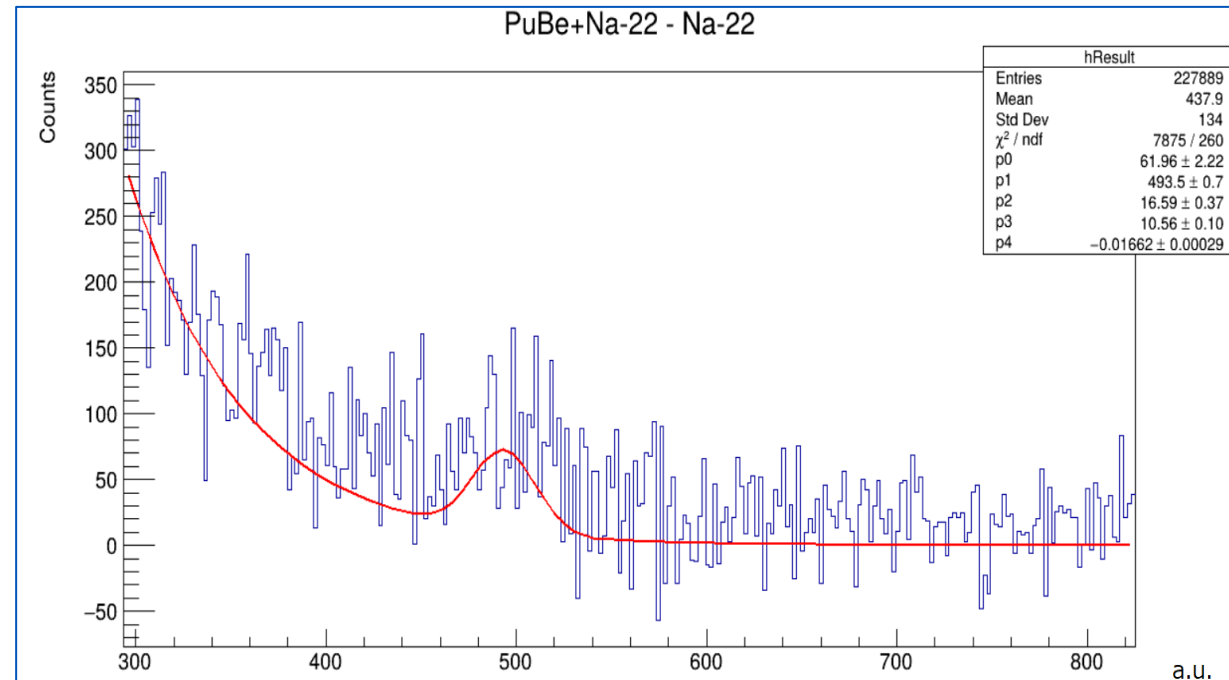
Были набраны:

- 1) фон без нейтронного источника (собственный фон LYSO);
- 2) фон позитронного источника Na-22;
- 3) измерение линии 478 кэВ в нейтронном поле источника Pu-Be;
- 4) измерение линии 478 кэВ в нейтронном поле источника Pu-Be в присутствии Na-22

Обработка данных и выделение сигнала 478 кэВ



Результат вычитания фона LYSO из спектра импульсов в нейтронном поле без позитронного источника

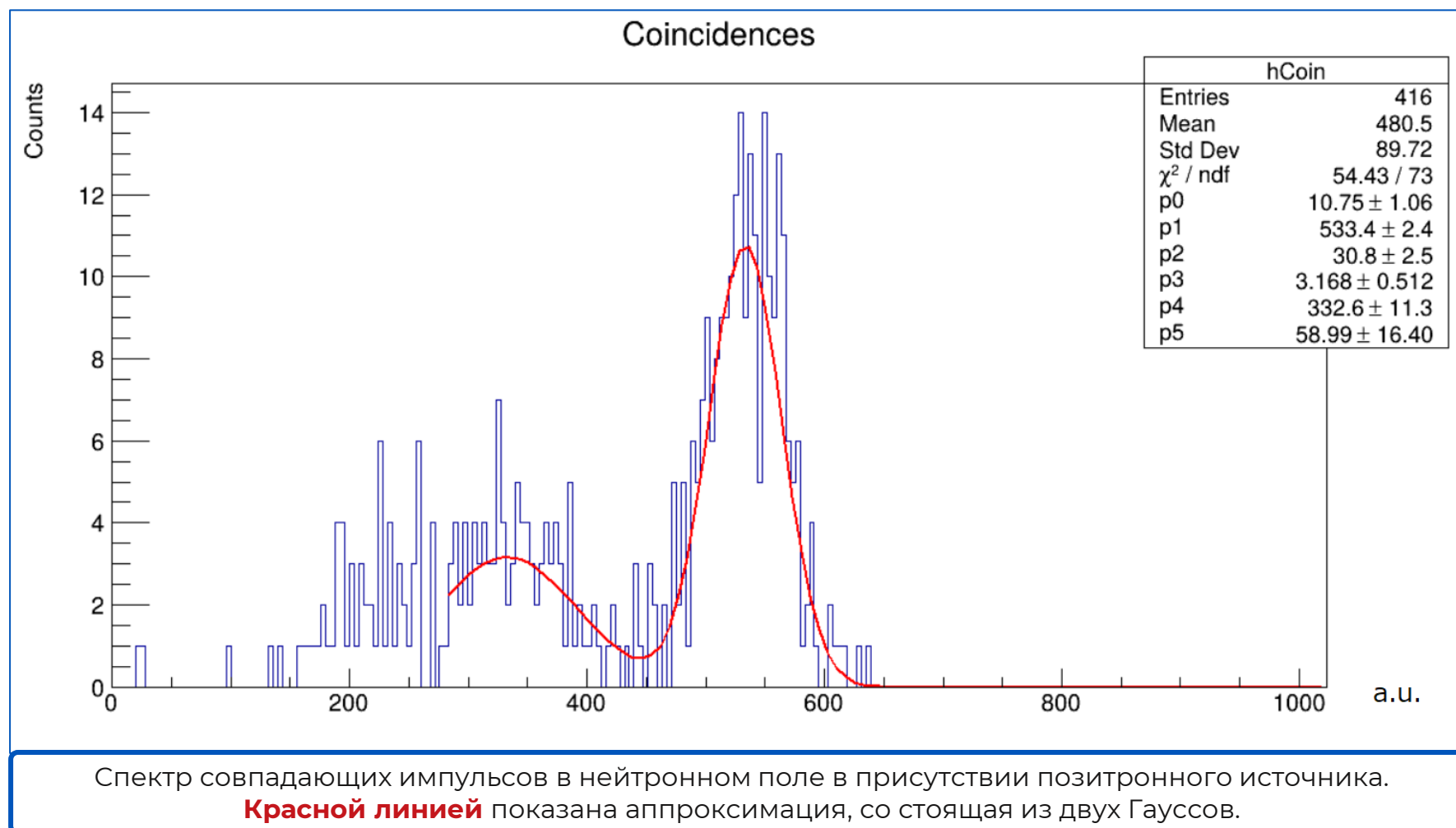


Результат вычитания Na-22 из спектра импульсов в нейтронном поле в присутствии позитронного источника

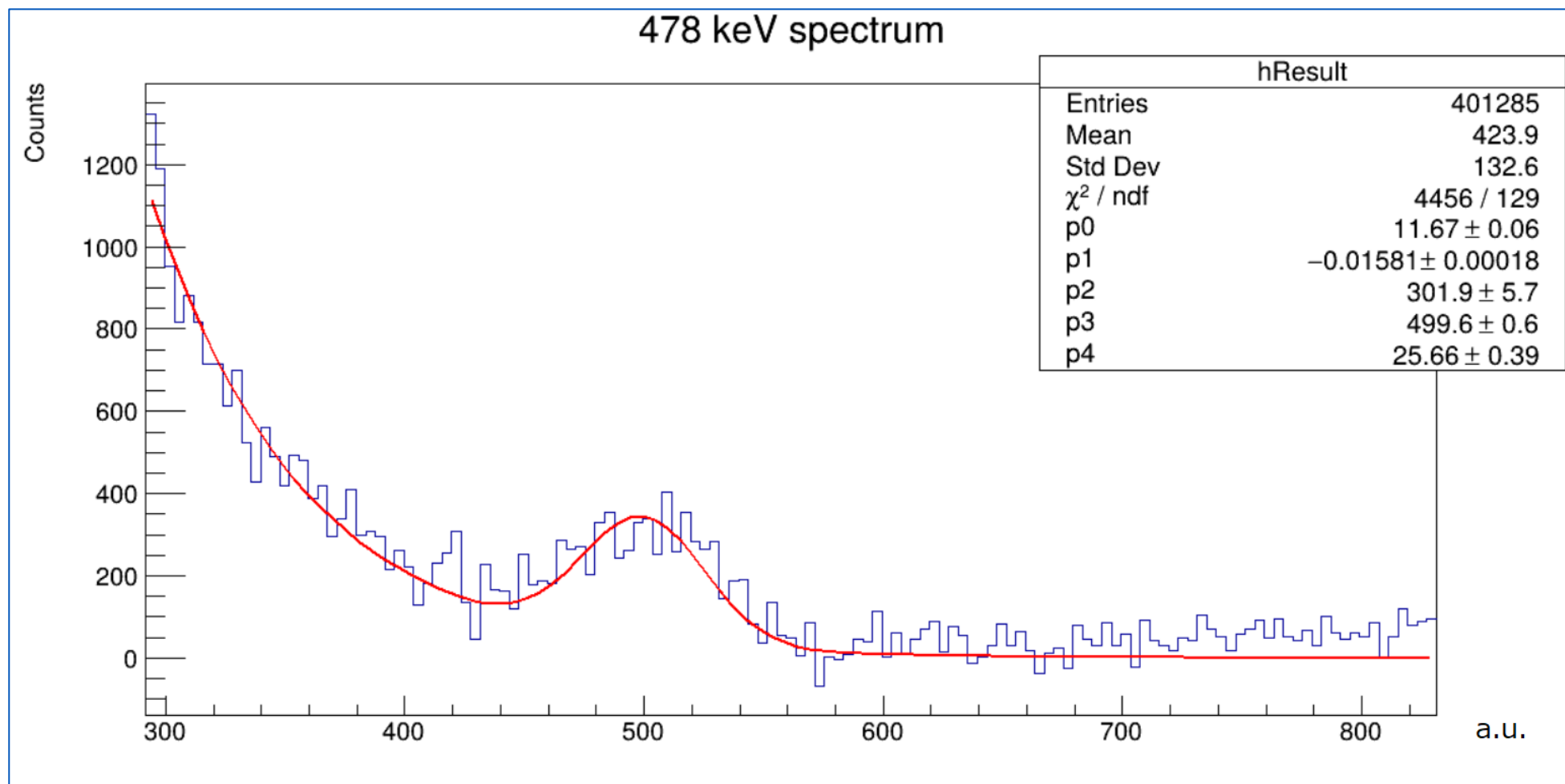
Красным показана аппроксимация линии 478 кэВ составной функцией.

Обработка данных и выделение сигнала 478 кэВ

Отношение статистики совпадений $\eta_c = 1,5 \cdot 10^4$.



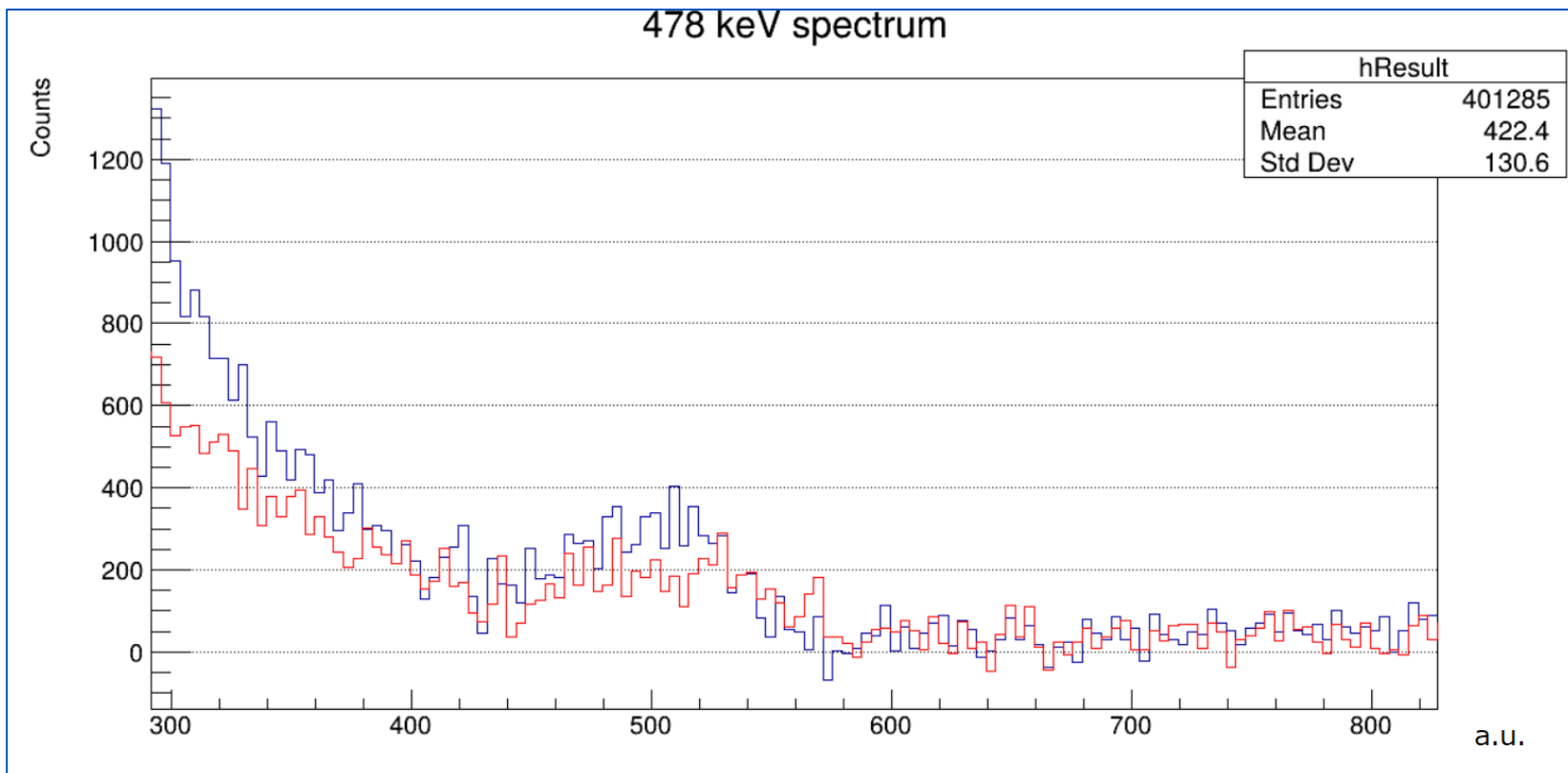
Обработка данных и выделение сигнала 478 кэВ



Результат вычитания спектра совпадающих импульсов и фона LYSO из спектра импульсов в нейтронном поле в присутствии позитронного источника с учётом коэффициента.

Красным показана аппроксимация линии 478 кэВ составной функцией.

Обработка данных и выделение сигнала 478 кэВ



Интеграл в области линии 478 кэВ составил

- Первым способом: $5,5 \cdot 10^3$
- Вторым способом: $7 \cdot 10^3$

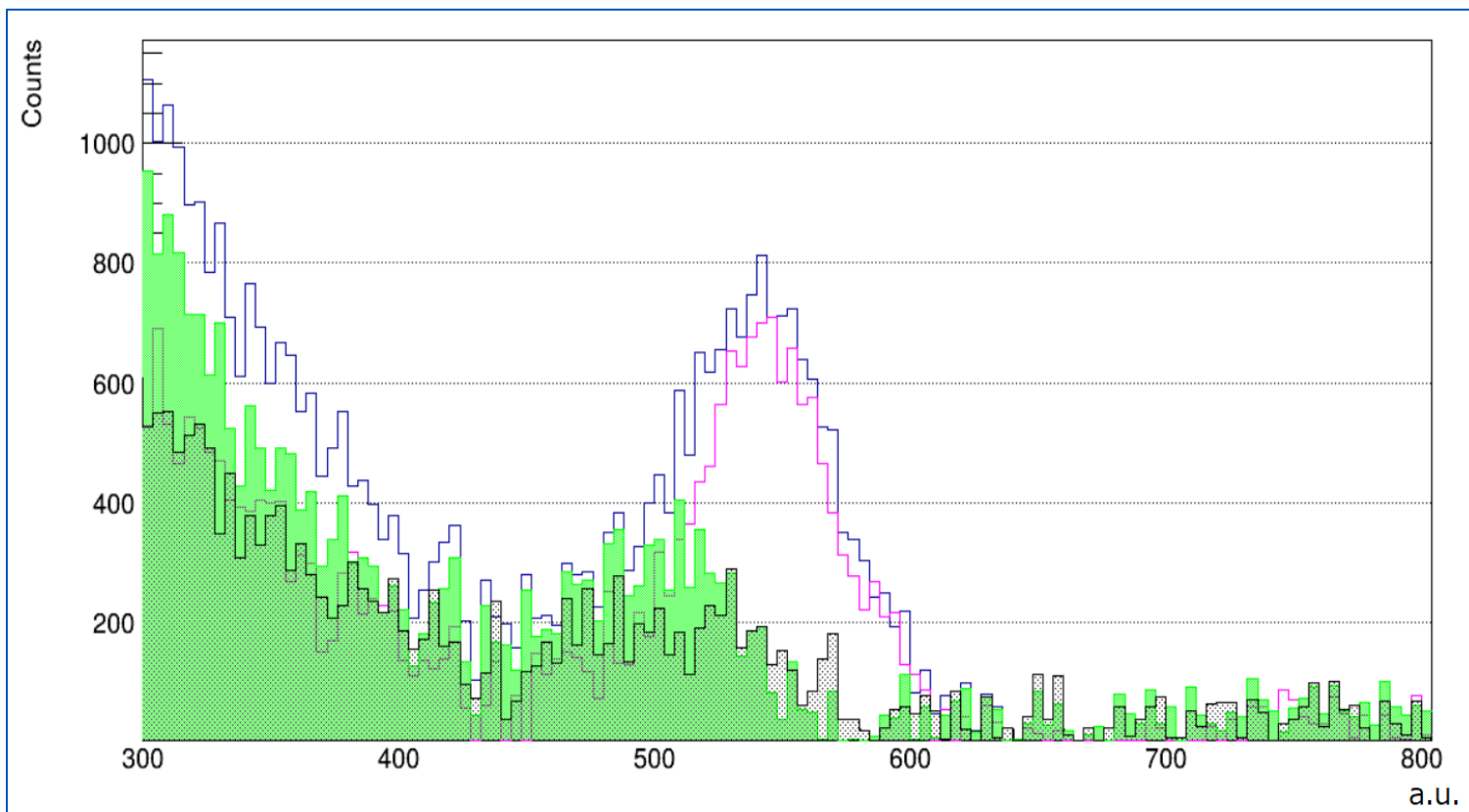
Превышение статистики по сравнению с ожидаемой на 30%

Сравнение гистограмм выделения линии 478 кэВ двумя способами вычитания.

Красным - результат вычитания фона LYSO из спектра с источником нейтронов,

Синим - вычитание фона с использованием коэффициента.

Применение методики вычитания аннигиляционного фона позволяет уменьшить вклад линии 511 кэВ.



Наложенные гистограммы спектров импульсов.

Синим - результат вычитания фона LYSO из спектра в нейтронном фоне с позитронным источником,

розовым - результат вычитания фона LYSO из Na-22,

зелёным - результат полученного спектра импульсов в нейтронном поле в присутствии позитронного источника после вычитания с учётом коэффициента эффективности совпадений,

чёрным - результат вычитания фона LYSO из спектра с нейтронным источником.

Апробирована методика выделения полезного сигнала 478 кэВ методом вычитания модельного фона 511 кэВ.

- ✓ Подобран оптимальный режим работы CZT для регистрации гамма-излучения с энергиями до 662 кэВ.
- ✓ Получено энергетическое разрешение для линии 478 кэВ от В-11 (4,0%) и 511 кэВ от Na-22 (2,0%).
- ✓ Апробирована методика выделения сигнала 478 кэВ на сцинтилляционном детекторе LYSO-SIPM с помощью источника Cs-137. После обработки данных получен пик, соответствующий энергии 478 кэВ. Эффективность составила $64,9 \pm 0,8$ %.
- ✓ Апробирована методика выделения сигнала 478 кэВ от В-11 на сцинтилляционном детекторе LYSO-SIPM в условиях облучения нейтронами и аннигиляционными гамма-квантами. Наблюдается превышение статистики по сравнению с ожидаемой на 30%. Несмотря на это результаты всё же согласуются с ожидаемыми в пределах погрешности.

В итоге полученные результаты показывают возможность применения методики для подавления фона и выделения полезного сигнала 478 кэВ.



**Спасибо за
внимание!**

26.06.2026

BACK-UP

Подбор параметров CZT

- Использовался полупроводниковый детекторный зонд SDP 310/Z/60.
- Он состоит из съёмного зонда и прикреплённого к нему кабеля с разъёмами.
- Съёмный зонд содержит квазиполусферический детектор из CdZnTe и зарядочувствительный предусилитель, размещённые внутри водонепроницаемого цилиндрического корпуса, соединённого с кабелем.

Данная модель имеет следующие характеристики:

Длина зонда	82 мм
Диаметр зонда	8 мм
Длина кабеля	20 см
Объём детектора	60 мм ³



Детекторный зонд SDP 310/Z/60

Подбор параметров CZT

Энергетическое разрешение при различных параметрах усиления и времени формирования

Coarse Gain	Shaping Time, μs	Пик	Сигма	Энергетическое разрешение, %	Ошибка, %
20	0,5	0,9579	0,009098	2,23	0,06
20	1	0,9592	0,008446	2,07	0,08
20	2	0,9839	0,008815	2,10	0,07
20	3	0,9836	0,008143	1,95	0,07
20	6	1,001	0,008395	1,97	0,06
20	10	1,055	0,01039	2,31	0,05
50	2	2,38	0,01776	1,75	0,09
100	2	4,742	0,03413	1,69	0,09

Подбор параметров CZT

Энергетическое разрешение при разных значениях напряжения				
Напряжение, В	Пик	Сигма	Энергетическое разрешение, %	Ошибка, %
350	4,562	0,02892	1,49	0,04
300	4,552	0,0297	1,53	0,04
250	4,536	0,029	1,50	0,05
200	4,52	0,02824	1,47	0,09
150	4,472	0,03371	1,78	0,09
100	4,424	0,03909	2,08	0,12
50	4,29	0,06064	3,32	0,15

Описание экспериментальной установки

Для оценки необходимой толщины карбида бора B_4C использовался закон ослабления потока нейтронов:

$$\frac{d\phi}{dx} = -\Sigma\phi,$$

где:

- ϕ - поток нейтронов,
- Σ - макроскопическое сечение взаимодействия,
- x - толщина поглотителя.

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-\Sigma x}.$$

Макроскопическое сечение:

$$\Sigma = N\sigma,$$

где:

- N - концентрация ядер,
- σ - микроскопическое сечение захвата.

Для изотопа ^{10}B сечение захвата тепловых нейтронов составляет

$$\sigma \approx 3800 \text{ барн} = 3.8 \times 10^{-21} \text{ см}^2.$$

Для порошкообразного карбида бора использовалась насыпная плотность

$$\rho \approx 1.3 \text{ г/см}^3.$$

Молярная масса карбида бора:

$$M(B_4C) \approx 55 \text{ г/моль}.$$

Концентрация атомов бора в карбиде бора определяется как

$$N_B = \frac{\rho N_A}{M} \cdot 4,$$

Тогда:

$$N_B \approx \frac{1.3 \cdot 6.02 \times 10^{23}}{55} \cdot 4 \approx 5.69 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

С учётом природного содержания изотопа ^{10}B :

$$N_{10} \approx 0.2 N_B \approx 1.14 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

Следовательно, макроскопическое сечение равно

$$\Sigma = N_{10}\sigma \approx 1.14 \times 10^{22} \times 3.8 \times 10^{-21} \approx 43 \text{ см}^{-1}.$$

Для подавления 90% потока нейтронов необходимо выполнение условия

$$\frac{\phi}{\phi_0} = 0.1.$$

Тогда:

$$e^{-\Sigma x} = 0.1,$$

откуда

$$\Sigma x = \ln 10 \approx 2.3,$$

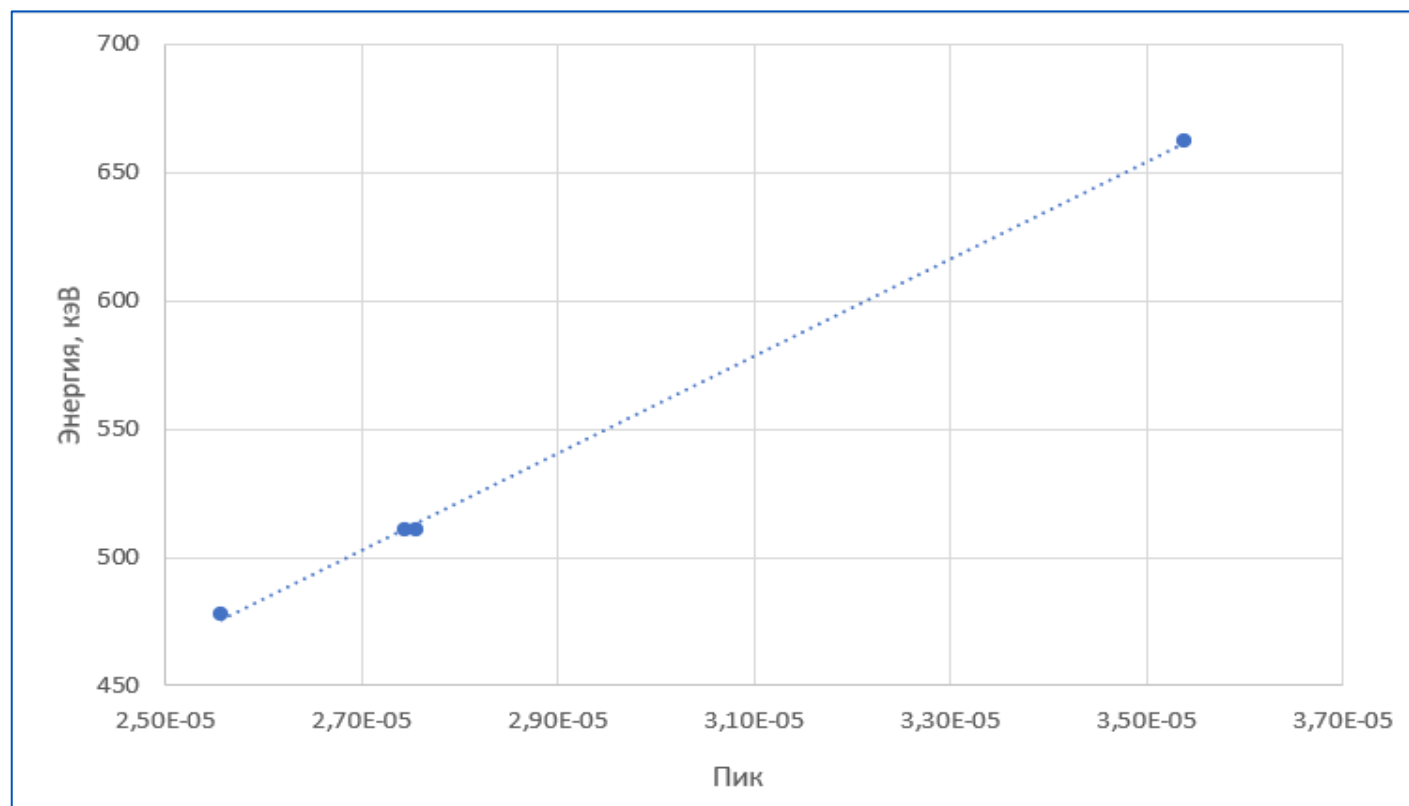
и искомая толщина составляет

$$x = \frac{2.3}{\Sigma} = \frac{2.3}{43} \approx 0.053 \text{ см} \approx 0.5 \text{ мм}.$$

Таким образом, слой карбида бора толщиной порядка 0.5 мм обеспечивает подавление около 90% тепловых нейтронов.

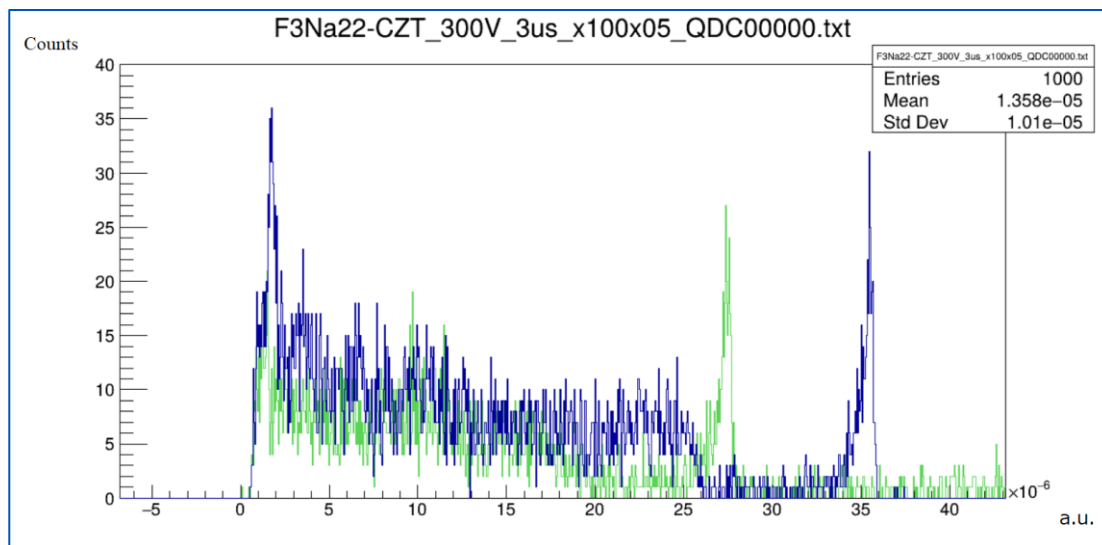
Получение и обработка спектров

Для проверки линейности шкалы была построена калибровочная зависимость энергии гамма-квантов от положения пиков в спектре.

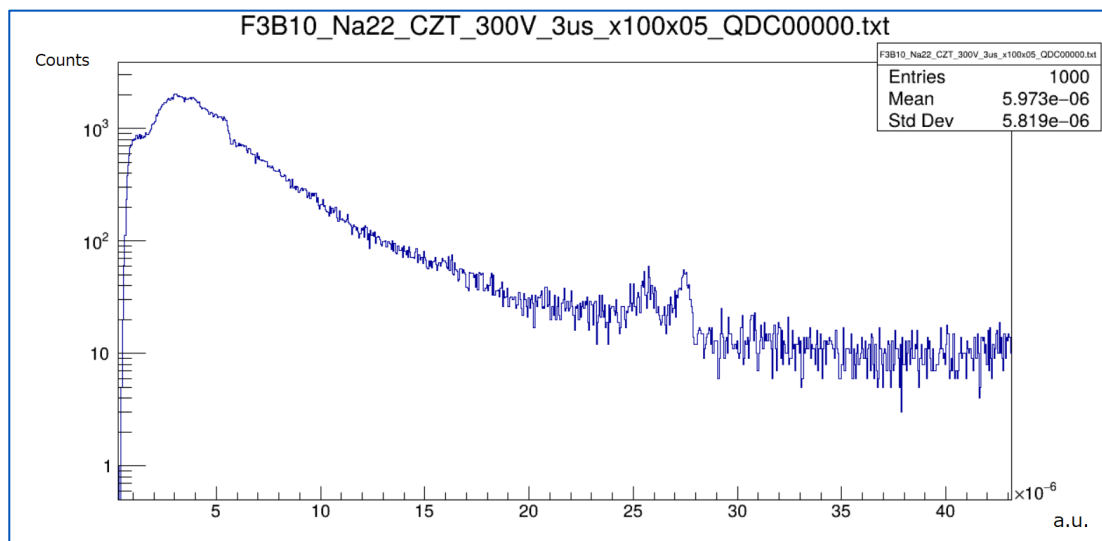


Калибровочная зависимость энергии от положения пика

Получение и обработка спектров



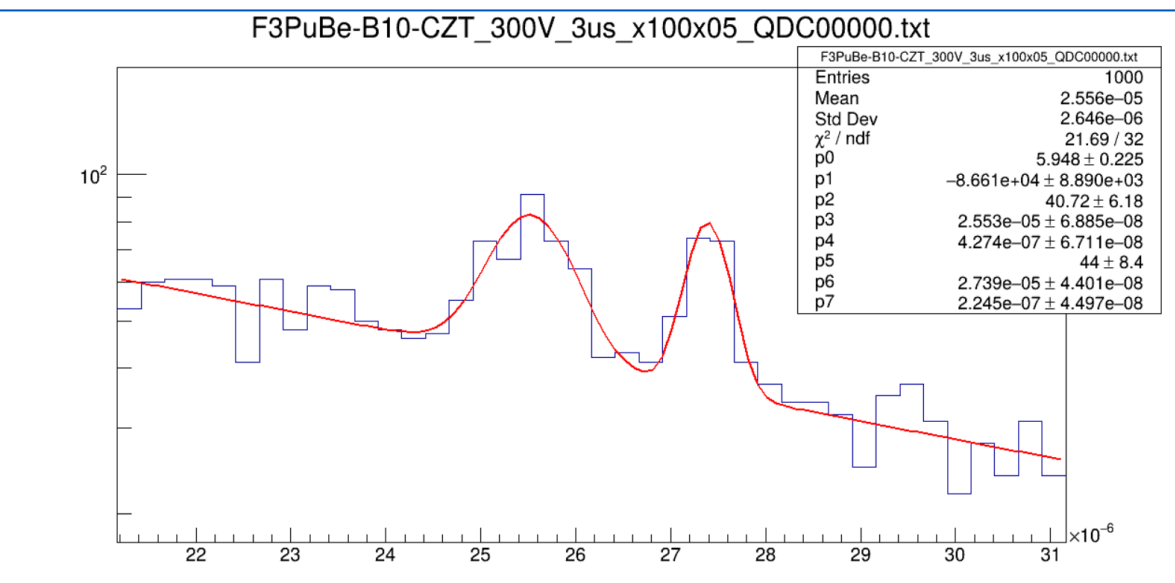
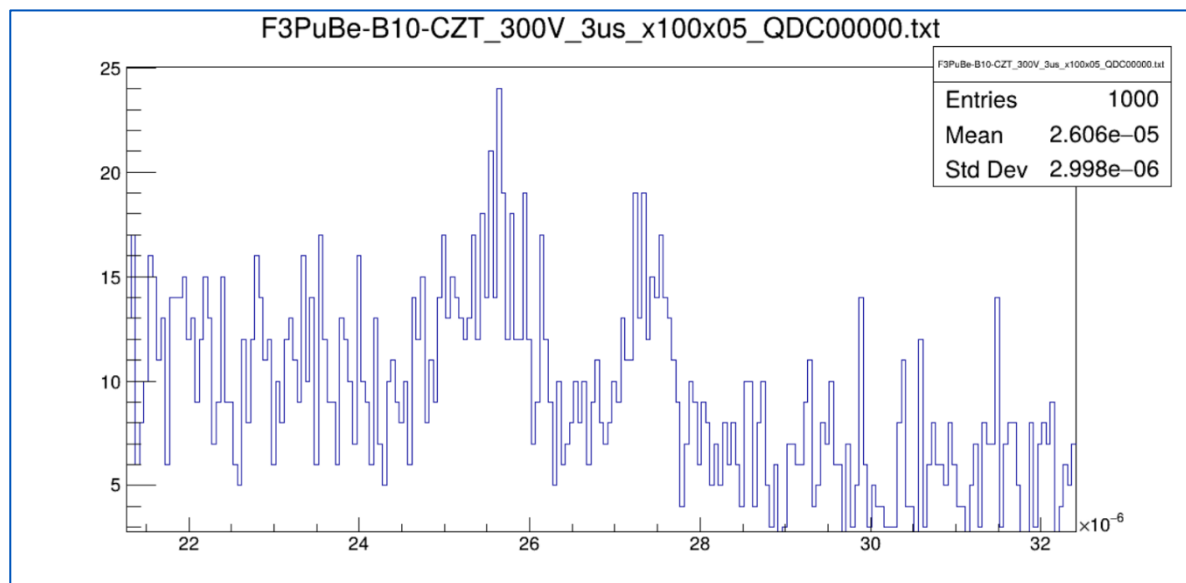
Наложенные спектры импульсов от источника Cs-137 (**синим**) и Na-22 (**зелёным**).



Спектр импульсов CZT-детектора

Получение и обработка спектров

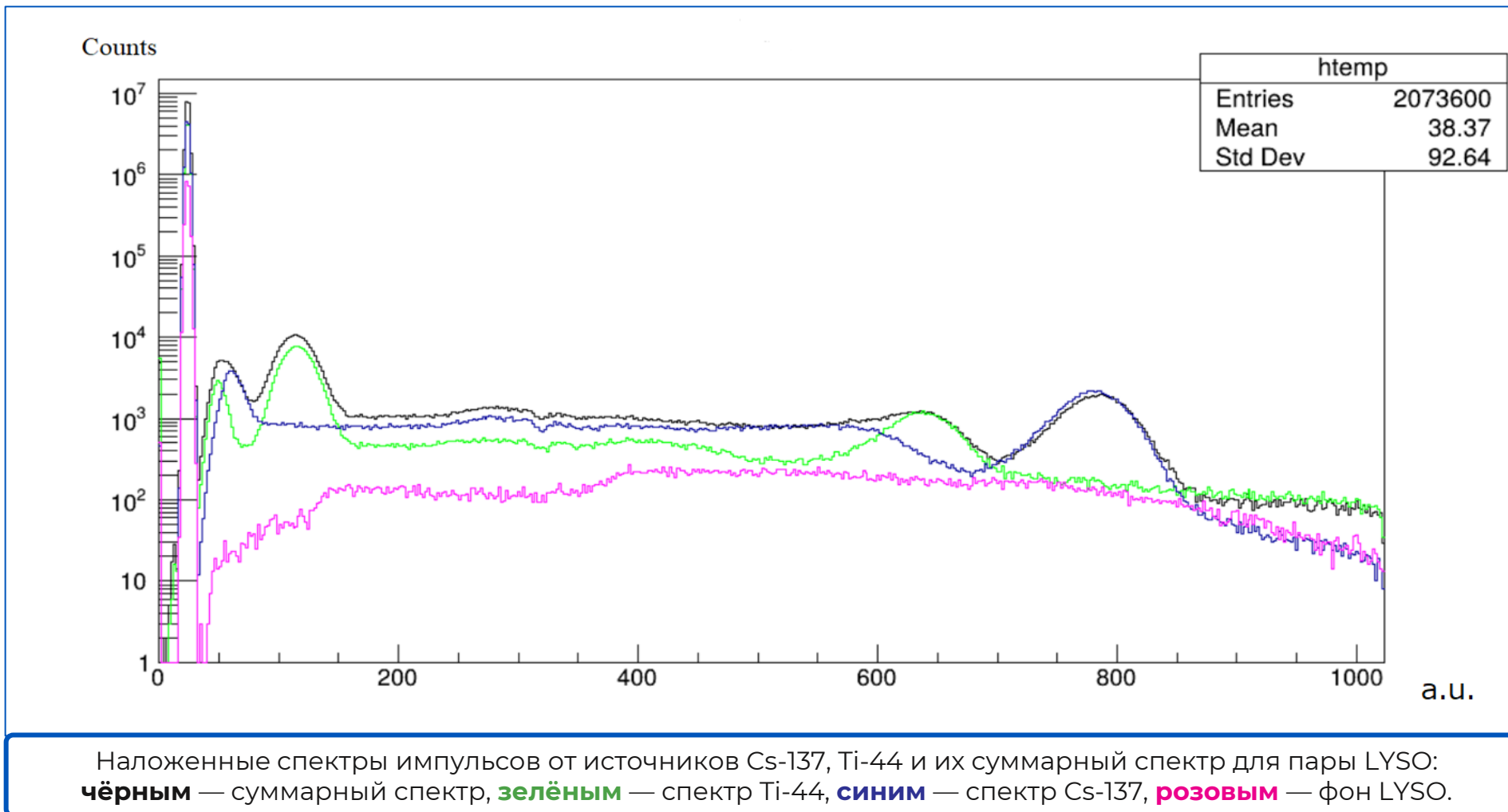
	Е, кэВ	Пик	Сигма	Энергетическое разрешение, %	Ошибка, %
Cs-137	662	3,55E-05	1,91E-07	1,3	0,1
Na-22	511	2,74E-05	2,42E-07	2,1	0,2
B-11	478	2,55E-05	4,27E-07	4,0	0,6
Фон	511	2,74E-05	2,25E-07	1,9	0,4



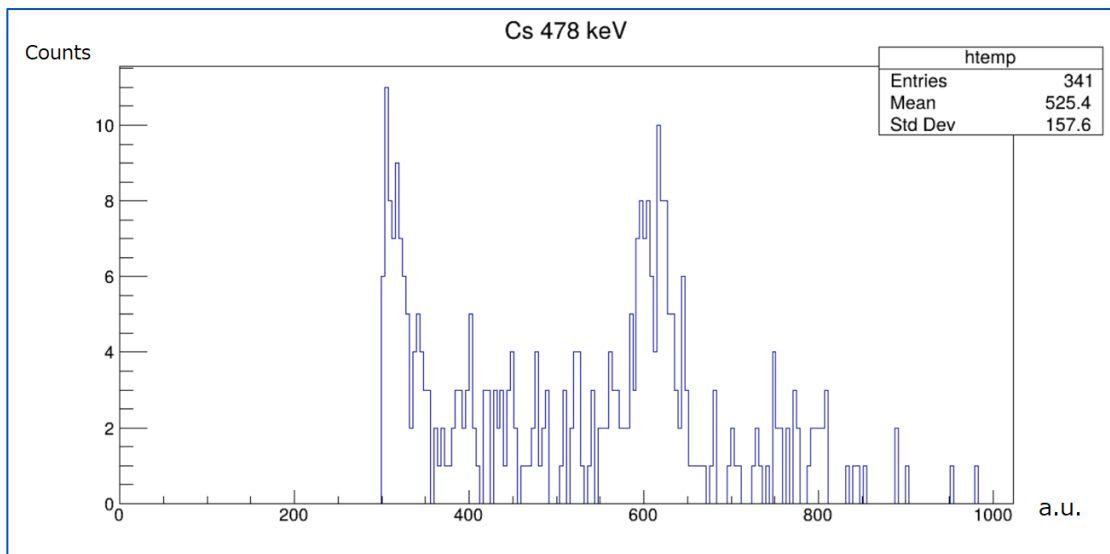
Результаты обработки данных первого эксперимента

Получение и анализ спектров

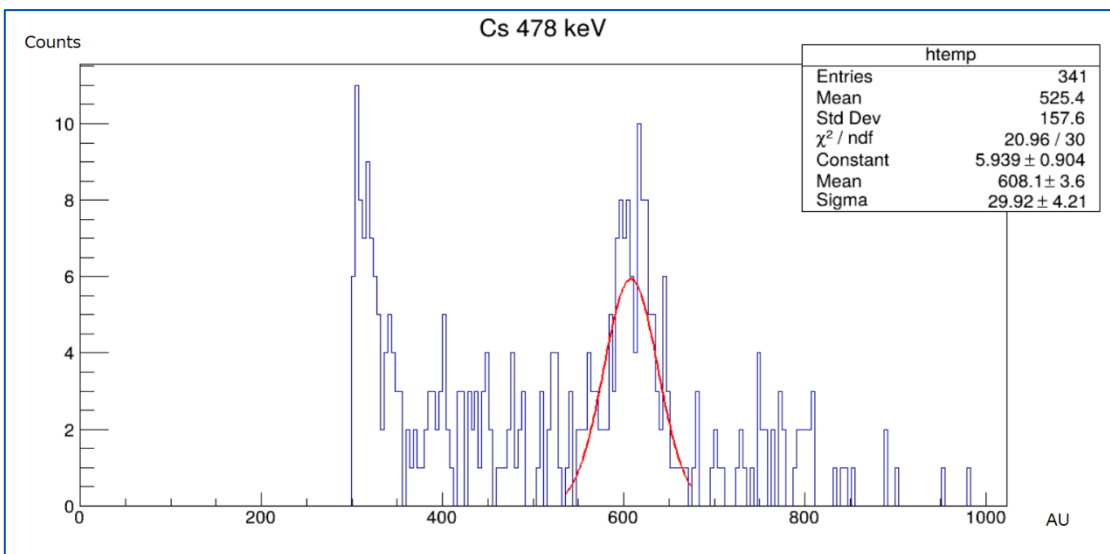
В каждом измерении набор статистики осуществлялся в течение 15 минут.



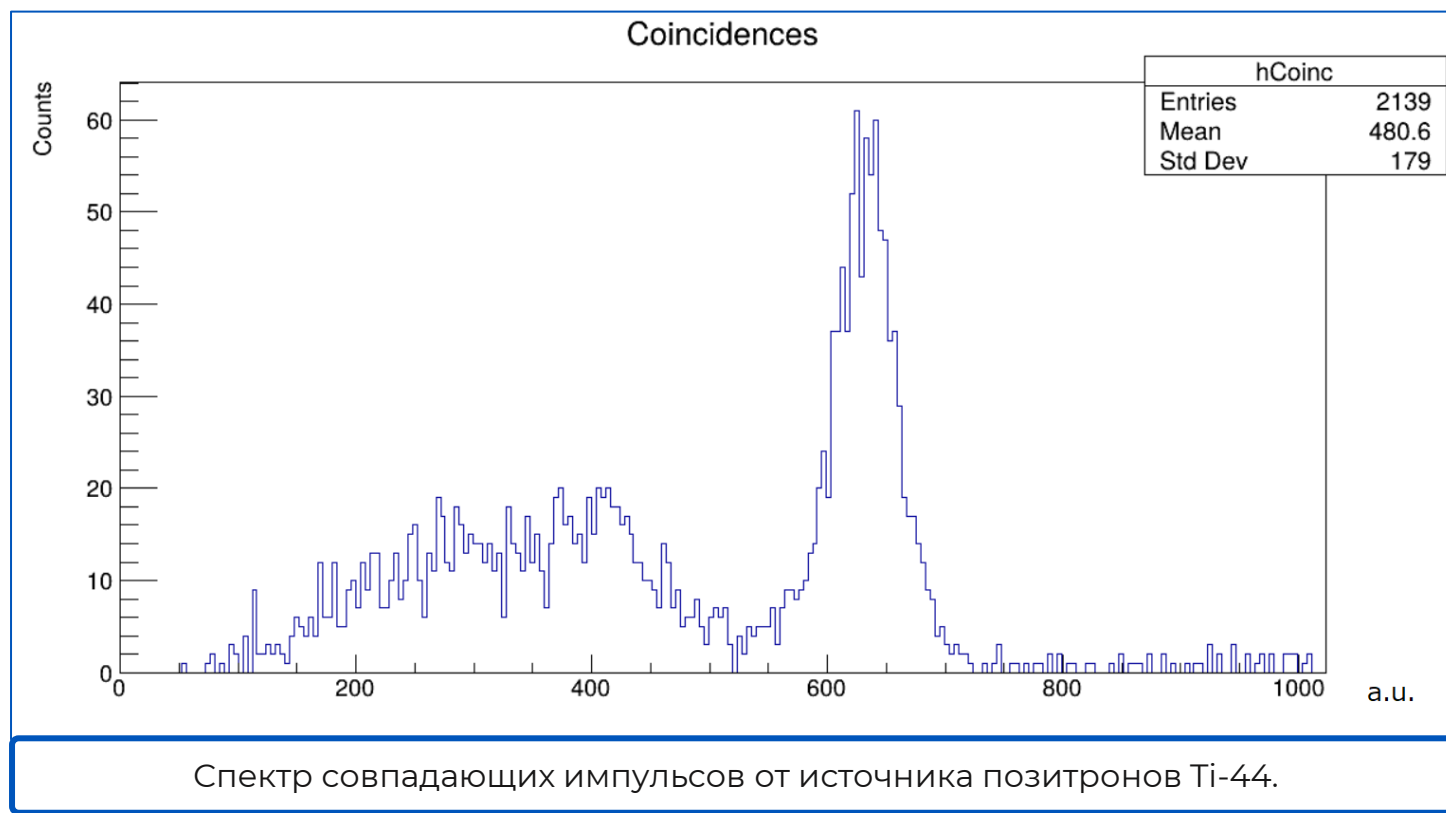
Получение и анализ спектров



Выделенный пик 478 кэВ из спектра Cs-137



Аппроксимация пика 478 кэВ из спектра Cs-137 функцией Гаусса



- Спектр строился на 20 канале при условии срабатывания обоих детекторов.
- Заряд на первом канале от 30 до 1000.
- Временное окно: $-1.1 > t_1 - t_2 > -2.8$

Обработка данных и выделение сигнала 478 кэВ

Перед началом эксперимента проводилась калибровка шкалы с использованием Cs-137 (662 кэВ) и Na-22 (511 кэВ). Подтверждается линейность энергетической шкалы.

