

Экспериментальная установка по измерению поляризационных корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов

**А. Г. Баранов
МНС, ИЯИ РАН, Москва**

По материалам диссертации представленной на звание к.ф.-м.н.

6 июня 2025

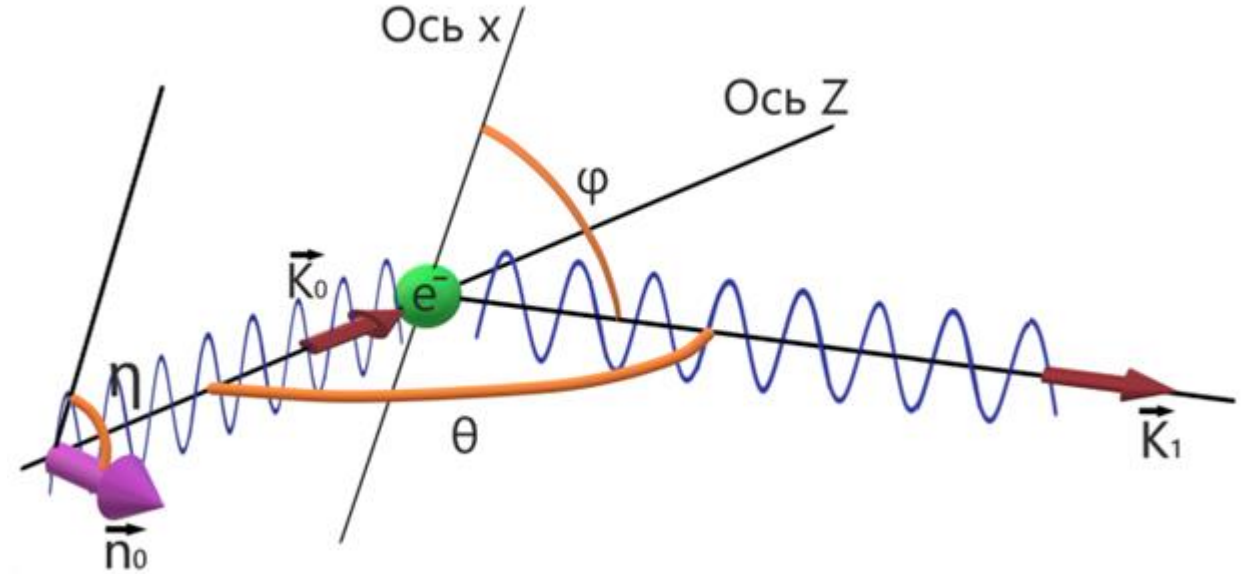
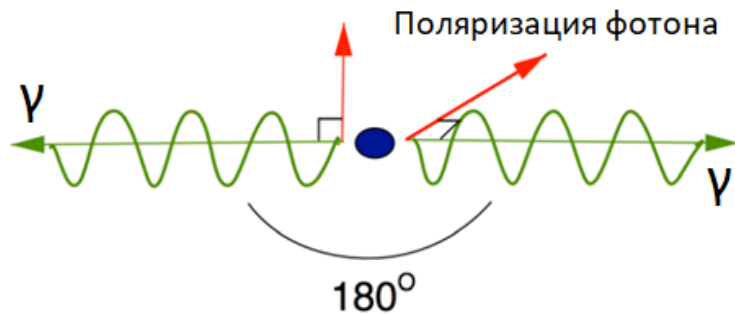
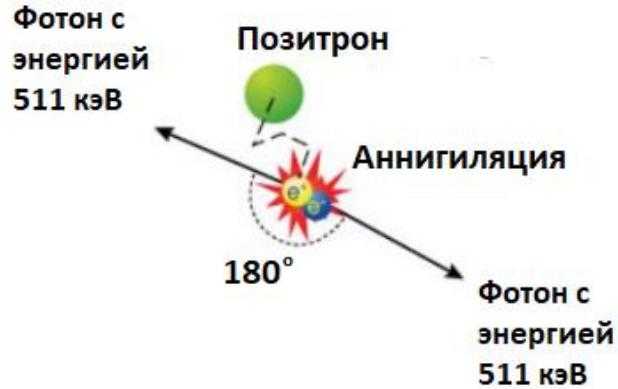
Основные положения, выносимые на защиту:

1. Системы детекторов и конструкция экспериментальной установки по исследованию поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях.
2. Методика получения контролируемой декогеренции аннигиляционных фотонов с помощью промежуточного активного комптоновского рассеивателя.
3. Результаты измерений параметров детекторов комптоновских поляриметров с различными типами сцинтилляторов и фотодетекторов.
4. Электронная схема установки, состоящая из аналоговых, цифровых, триггерных блоков электроники и источников питания вакуумных ФЭУ и кремниевых фотоумножителей.

Аннигиляционные фотоны и определение поляризации фотона

Волновая функция двухфотонного состояния:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|HV\rangle + |VH\rangle)$$



Формула Клейна-Нишины:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{m_e c^2} \cdot \frac{E_1^2}{E_0^2} \left(\frac{E_1}{E_0} + \frac{E_0}{E_1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2(\varphi) \right)$$

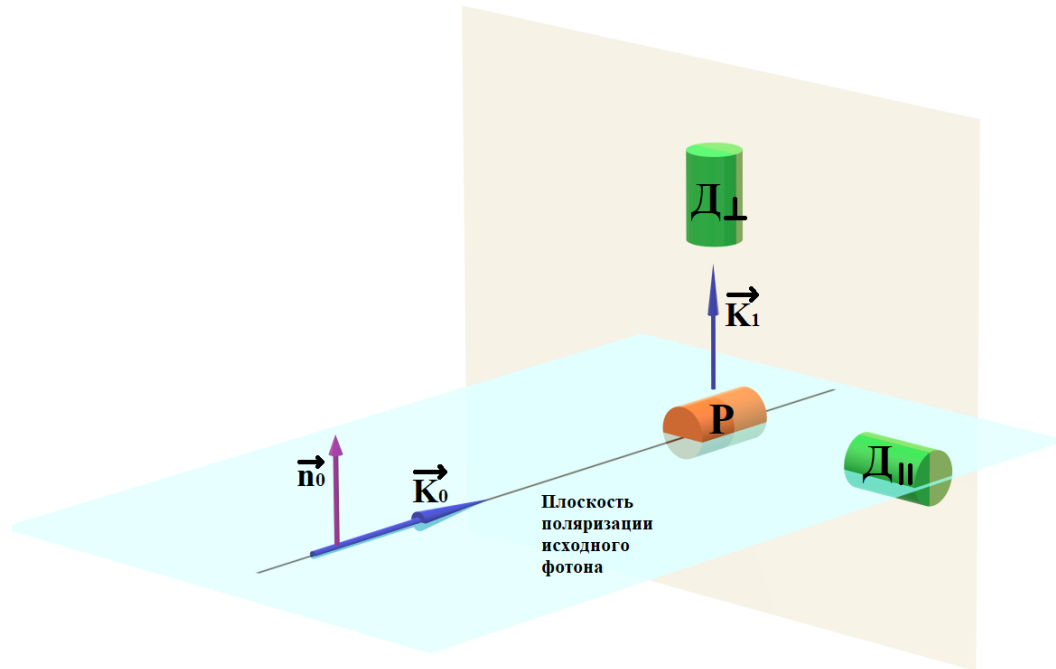
Сечение максимально для угла $\varphi = \pi/2$:

- Вероятность рассеяния максимальна в плоскости перпендикулярной плоскости поляризации.
- Рассеянный фотон вылетает преимущественно перпендикулярно плоскости поляризации.

- Согласно теории аннигиляционные фотоны максимально запутаны.
- Фотоны пары не обладают определённой поляризацией, однако их поляризации ортогональны друг другу.

Комптоновские поляриметры

Поляризация начального фотона может быть определена по углу рассеяния.



Анализирующая способность
(эффективность измерения поляризации):

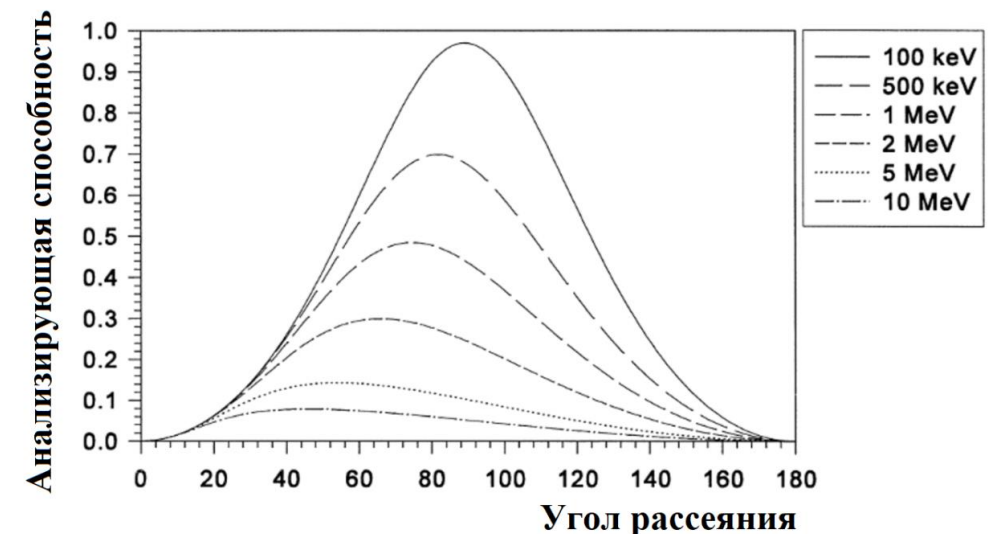
$$A = \frac{N_{\perp} - N_{\parallel}}{N_{\perp} + N_{\parallel}}$$

Анализирующая способность комптоновского поляриметра:

$$A(\theta) = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \phi = 90^\circ) - \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \phi = 0^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \phi = 90^\circ) + \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \phi = 0^\circ)} = \frac{\sin^2 \theta}{\frac{E_{\gamma_1}}{E_{\gamma}} + \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma_1}} - \sin^2 \theta}$$

Максимальное значение $A=0.7$ для энергии 511 кэВ в случае угла рассеяния $\theta=82^\circ$.

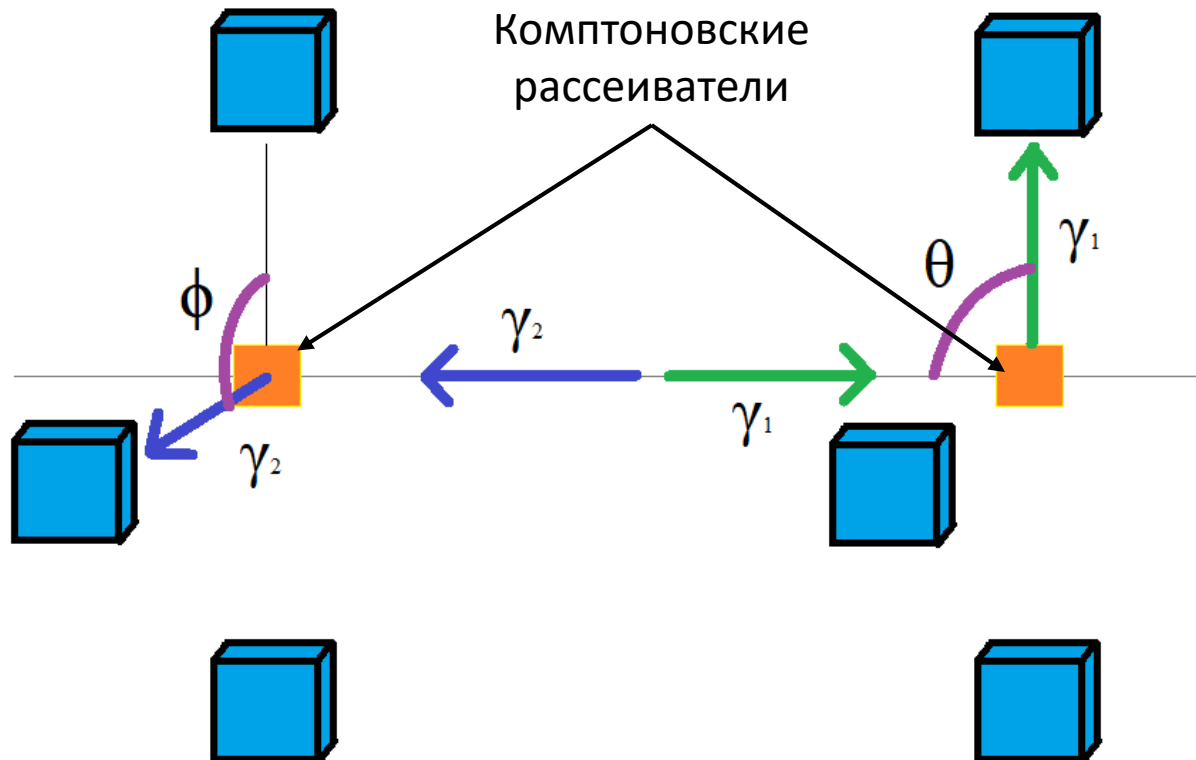
Это затрудняет поляризационные измерения характеристик пары аннигиляционных фотонов.



Методика измерения характеристик запутанных фотонов

Методика исследования квантовой запутанности в системе аннигиляционных фотонов заключается в измерениях азимутальных угловых распределений двух рассеянных фотонов, которые отражают поляризационные корреляции начальных аннигиляционных фотонов. [D. Bohm and Y. Aharonov, *Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky*, *Physical Review*, vol. 108, no. 4, pp. 1070–1076, Nov. 1957]

Методика требует использования двух комптоновских поляриметров.



Для запутанных фотонов $R = \frac{N_{\varphi=90}}{N_{\varphi=0}}$ должно быть максимальным. (N_{φ} - количество регистраций пар фотонов, рассеявшихся под углом φ друг к другу)

Согласно критериям Бома и Ааронова фотоны являются :

- запутанными при $R > 2$ ($R_{max} = 2.85$)
- независимыми, однако имеющими взаимно перпендикулярную поляризацию, если $R < 2$
- независимыми и имеющими случайную поляризацию относительно друг друга, если $R = 1$

Теоретические предсказания квантовых корреляций для аннигиляционных фотонов.

B. C. Hiesmayr and P. Moskal, “Witnessing Entanglement In Compton Scattering Processes Via Mutually Unbiased Bases,” *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 8166, Jun. 2019



В обоих квантовых состояниях (максимально запутанном и сепарабельном) поляризационные корреляции идентичны. Эти результаты противоречат выводам Бома и Ааронова, а также говорят о невозможности создания нового поколения Позитрон эмиссионных томографов (ПЭТ), использующих явление квантовой запутанности.



Полученные теоретические результаты поднимают множество вопросов и заставляют задуматься над самим фактом доказанности запутанности аннигиляционных фотонов, поскольку измерения корреляций для декогерентных фотонов не были проведены вообще.

P. Caradonna, D. Reutens, T. Takahashi, S. Takeda, and V. Vagh, “Probing entanglement in Compton interactions,” *J Phys Commun*, vol. 3, no. 10, p. 105005, Oct. 2019

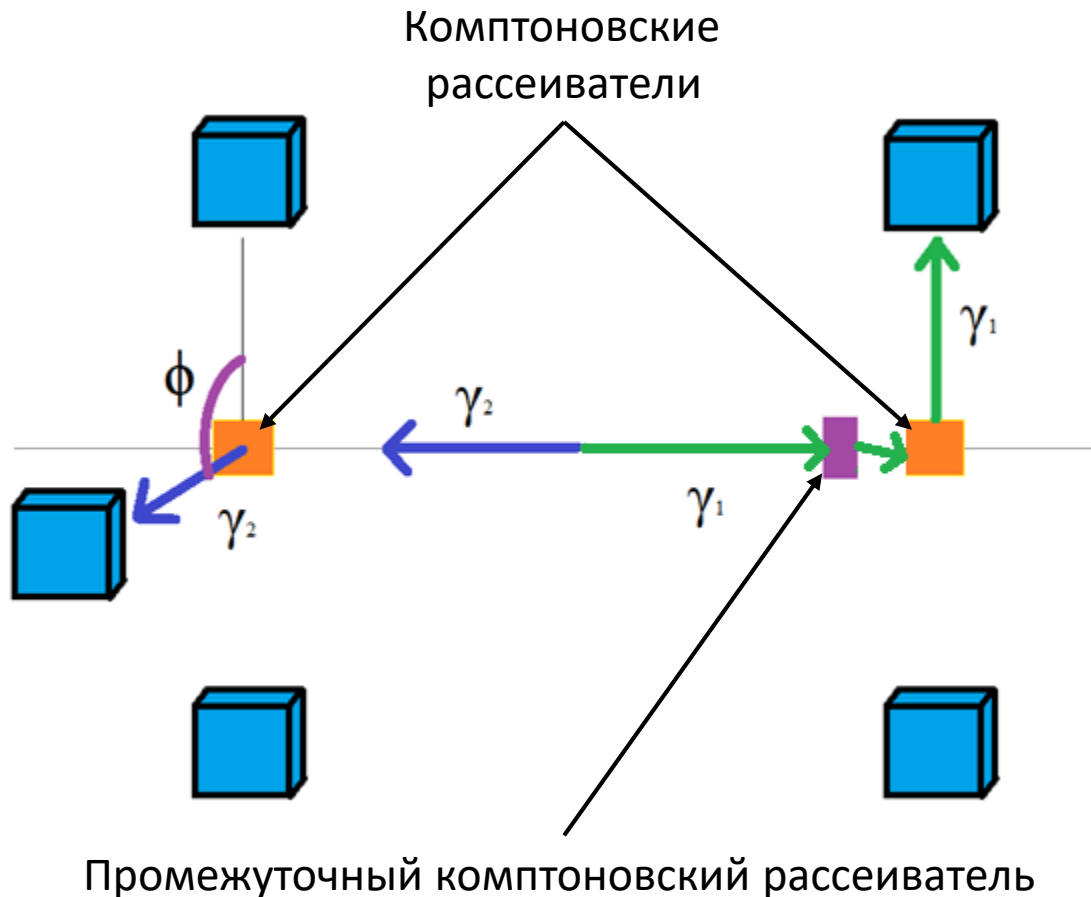


Результат повторил выводы Бома и Ааронова о кардинально различном поведении корреляций для максимально запутанных ($R = 2.85$) и декогерентных ($R = 1$) фотонов. В последнем случае поляризационных корреляций между двумя фотонами вообще не должно было наблюдаться.



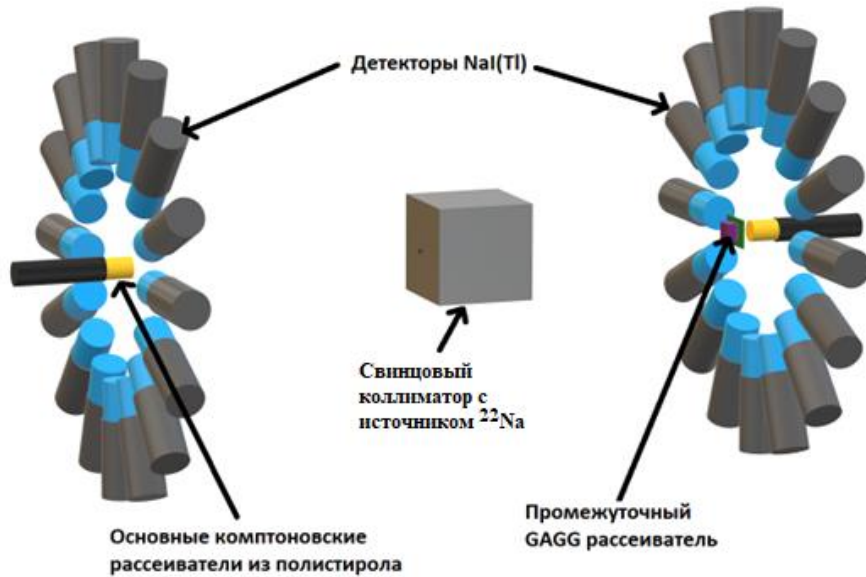
Метод получения декогерентных фотонов

Предлагается прямое сравнение поляризационных корреляций фотонов в начальном, максимально запутанном состоянии, и в декогерентном состоянии, полученном после измерения поляризации одного из исходных фотонов.

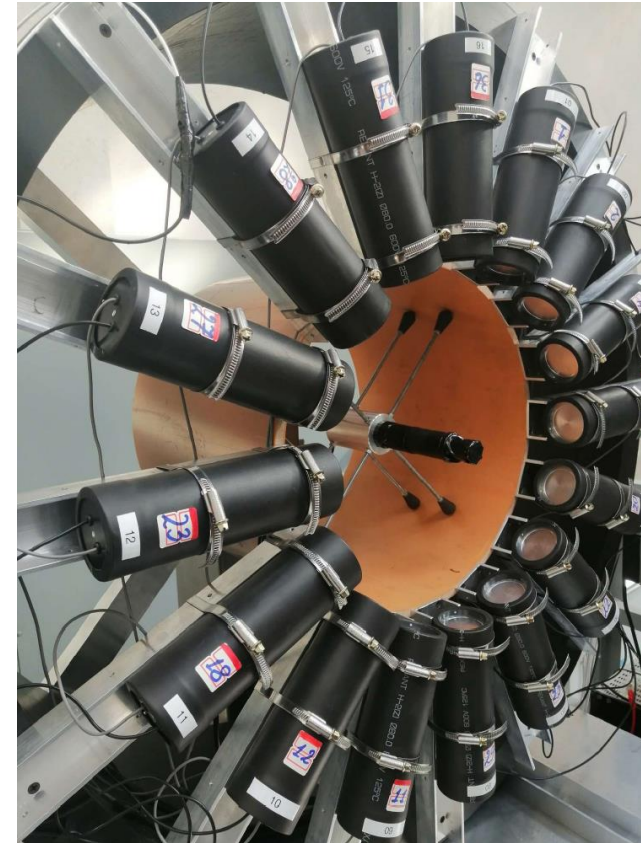
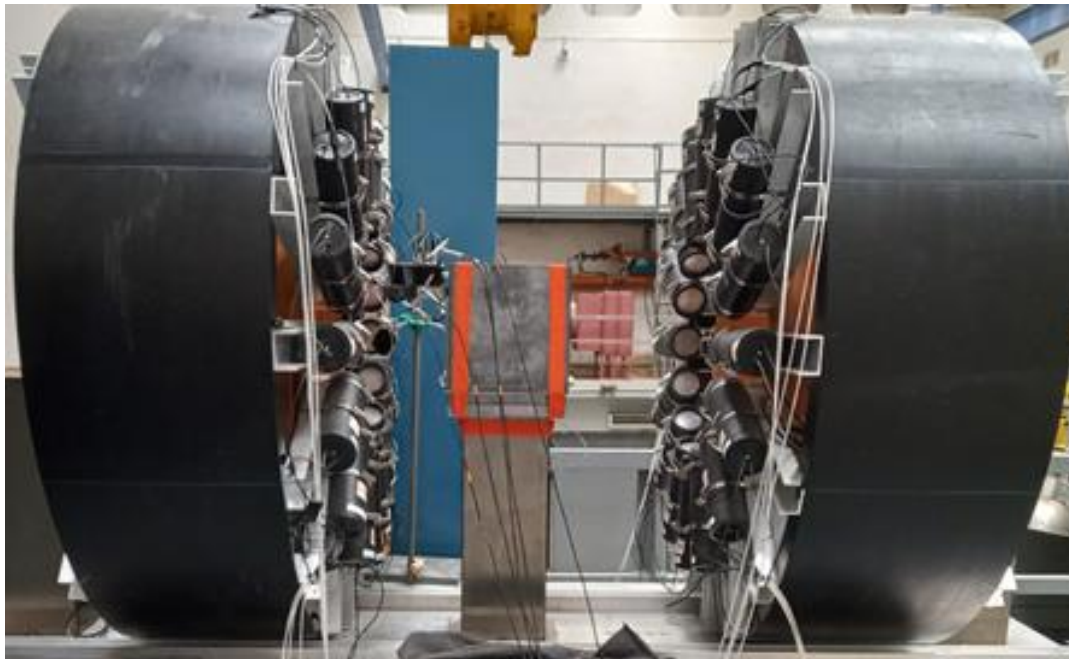


Для получения декогерентного состояния вводится дополнительный детектор — промежуточный комптоновский рассеиватель. Согласно квантовой теории, измерение поляризации внешним прибором должно привести к разрушению начального квантового состояния.

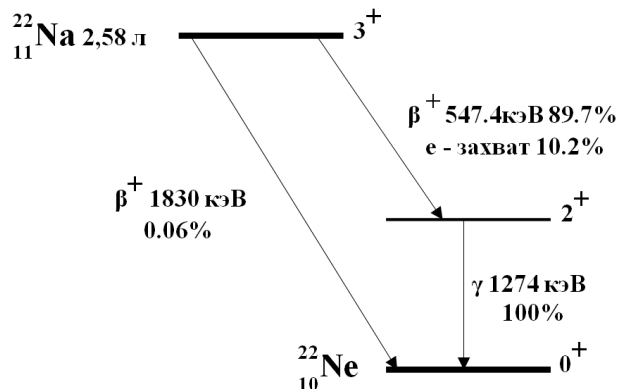
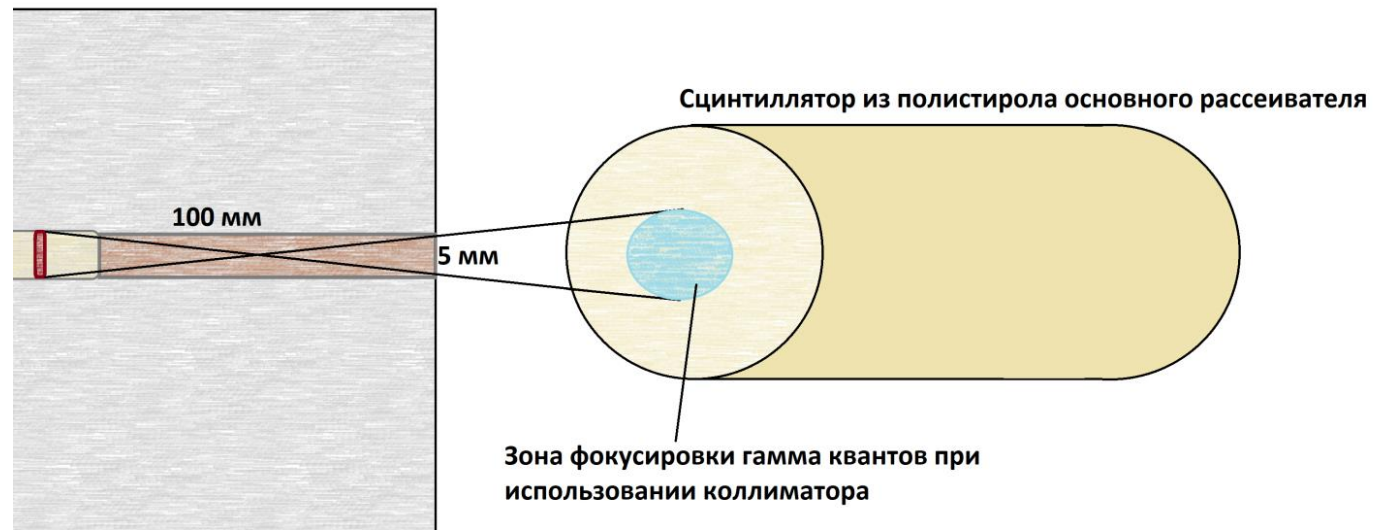
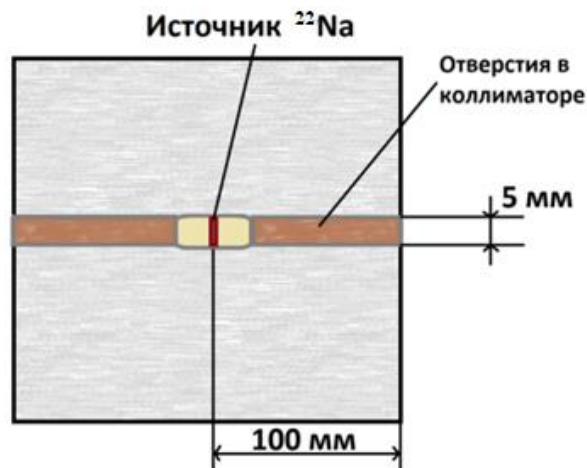
Экспериментальная установка



- Два плеча – регистрация двух аннигиляционных фотонов;
- В каждом плече – комптоновский рассеиватель и 16 детекторов рассеянных фотонов;
- Большой телесный угол – высокая скорость набора данных;
- Азимутальная симметрия – компенсация систематических ошибок, связанные с несовершенной геометрией установки;
- Промежуточный рассеиватель – механизм декогеренции.



Источник аннигиляционных фотонов

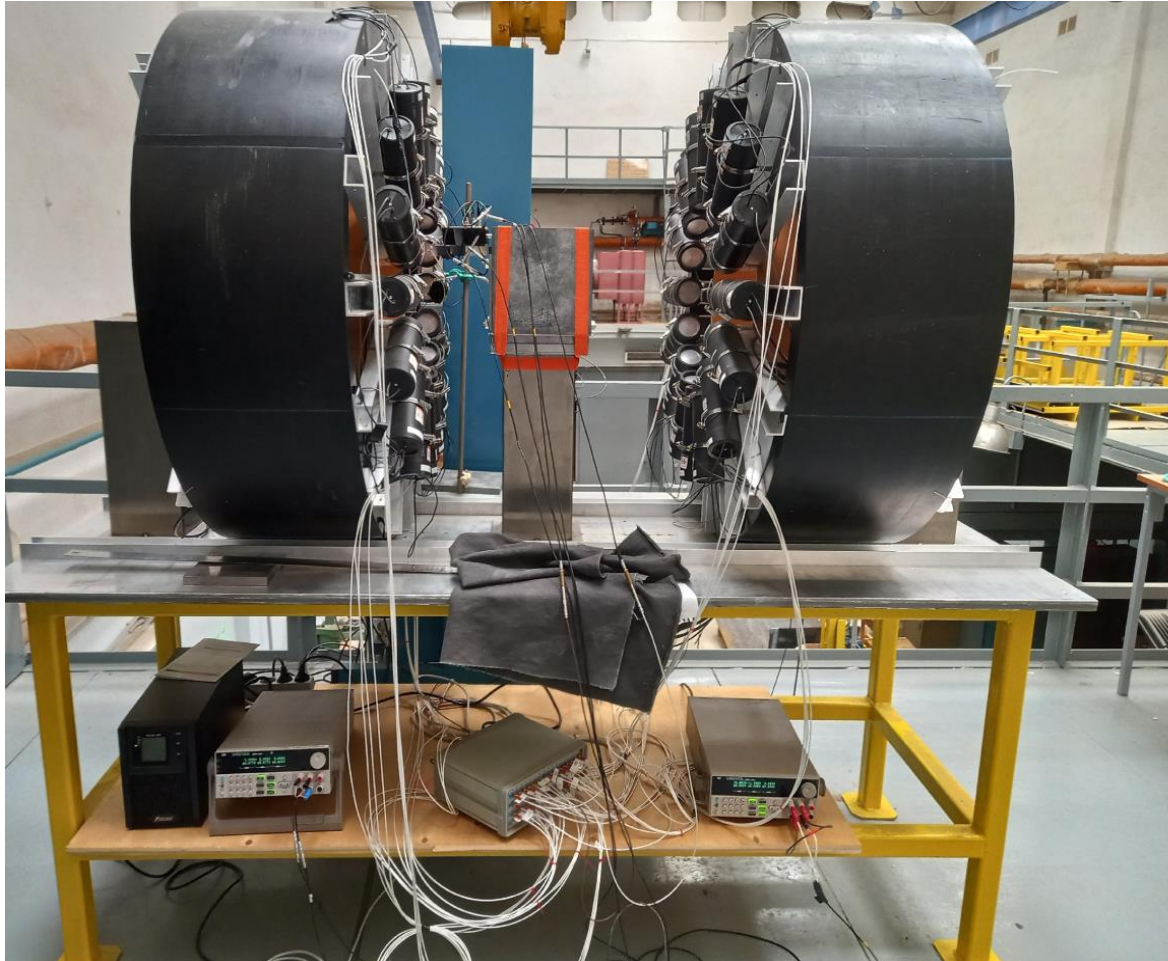


90% случаев ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu_e$

10% случаев ${}^{22}_{11}\text{Na} + e^- \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + \nu_e$

- Источником является алюминиевая фольга, облучённая протонами, имеющая диаметр 5 мм и толщину 1 мм.
- Алюминиевая фольга размещена в свинцовом коллиматоре с размерами 20x20x20 см³. В двух противоположных от источника сторонах, коллиматор имеет горизонтальные отверстия с диаметром 5 мм.
- Область попадания гамма квантов представляет собой круг с максимальным диаметром около 25 мм при расстоянии от коллиматора до детектора, равном 20 см.

Механическая структура.

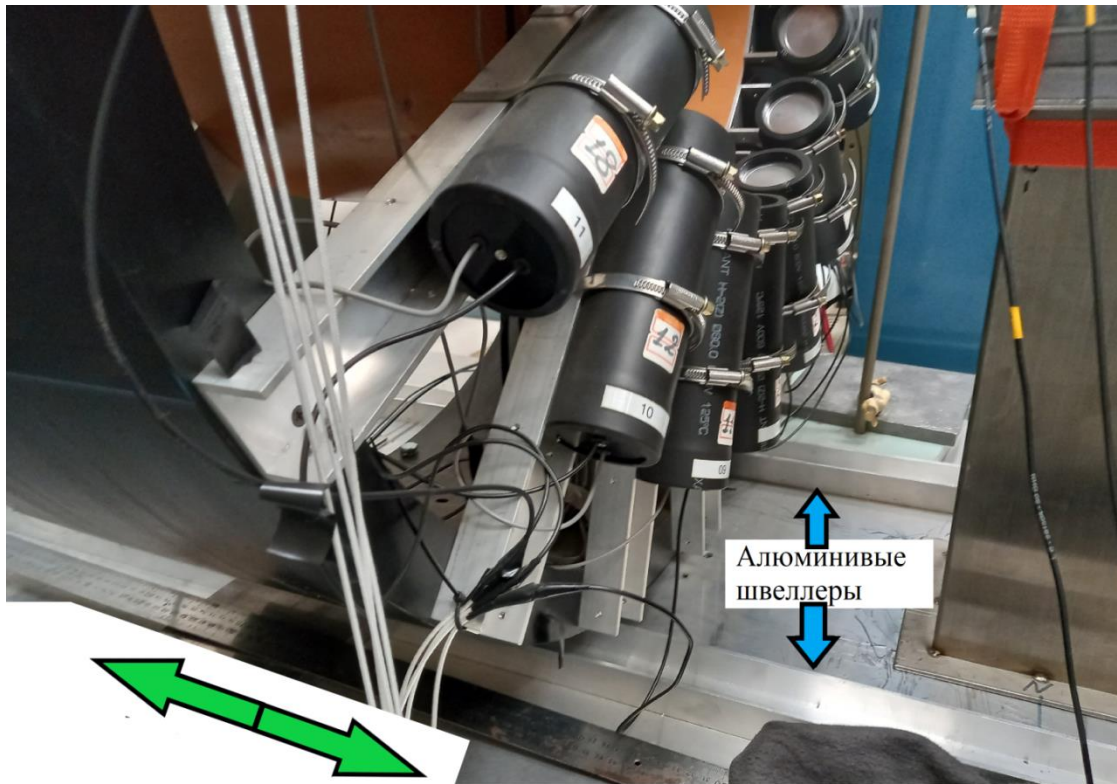


Верхний ярус для размещения детекторов

Нижний ярус для размещения электронной аппаратуры

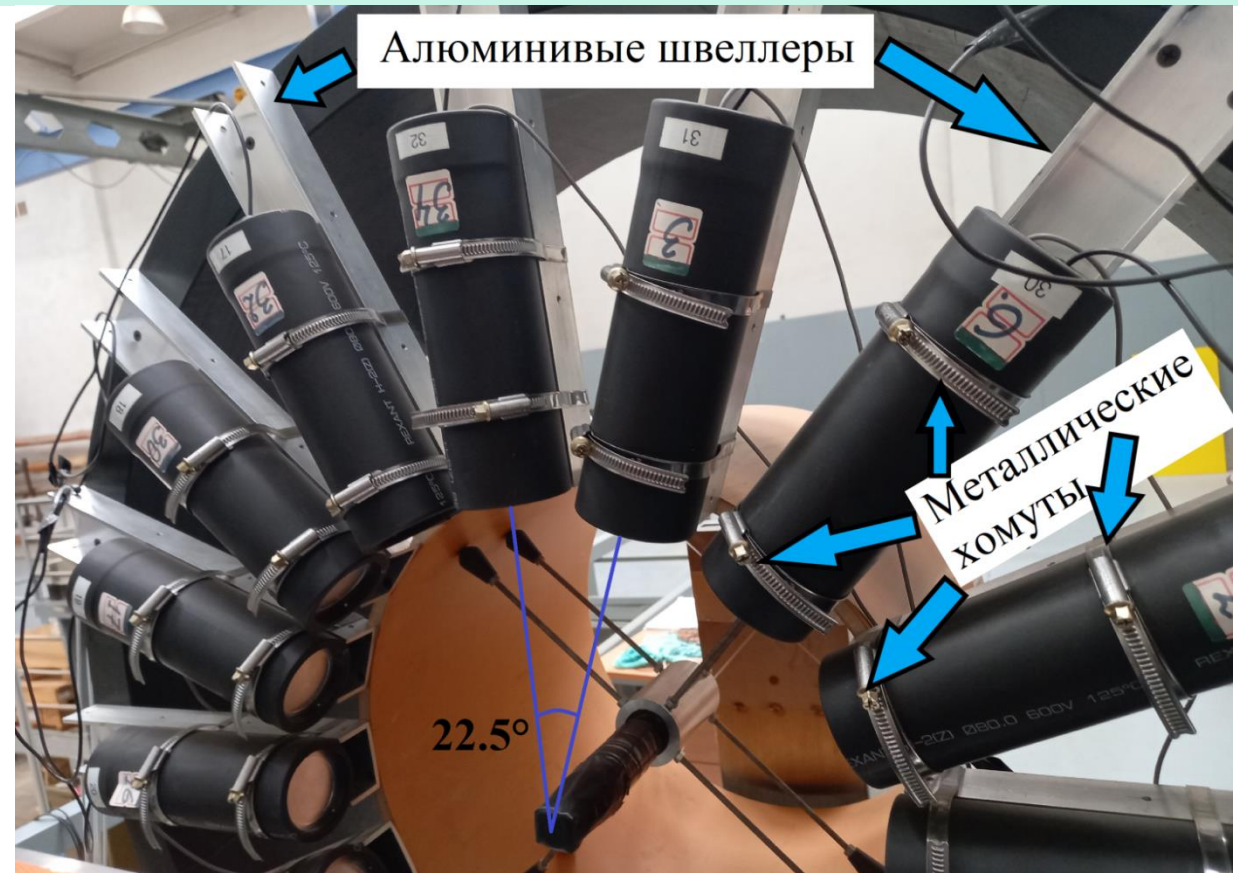
- Экспериментальная установка расположена на двухъярусной металлической платформе.
- Верхний ярус: сцинтилляционные детекторы, источник аннигиляционных фотонов
- Нижний ярус: источники питания, АЦП
- Общий каркас для крепления – две массивные ПВХ трубы с радиусом 49.5 см. и толщиной 5 см., внутри которых установлены две ПВХ трубы с меньшим радиусом 20.5 см. и толщиной 1 см.
- Трубы с большим и меньшим диаметрами скреплены 16 алюминиевыми швеллерами.

Устройство плеч поляриметров



Имеется возможность сдвига плеч в указанных направлениях

- Два алюминиевых швеллера закреплены вдоль металлической платформы, формируя опоры для плеч установки и позволяя их перемещение вдоль оси установки.

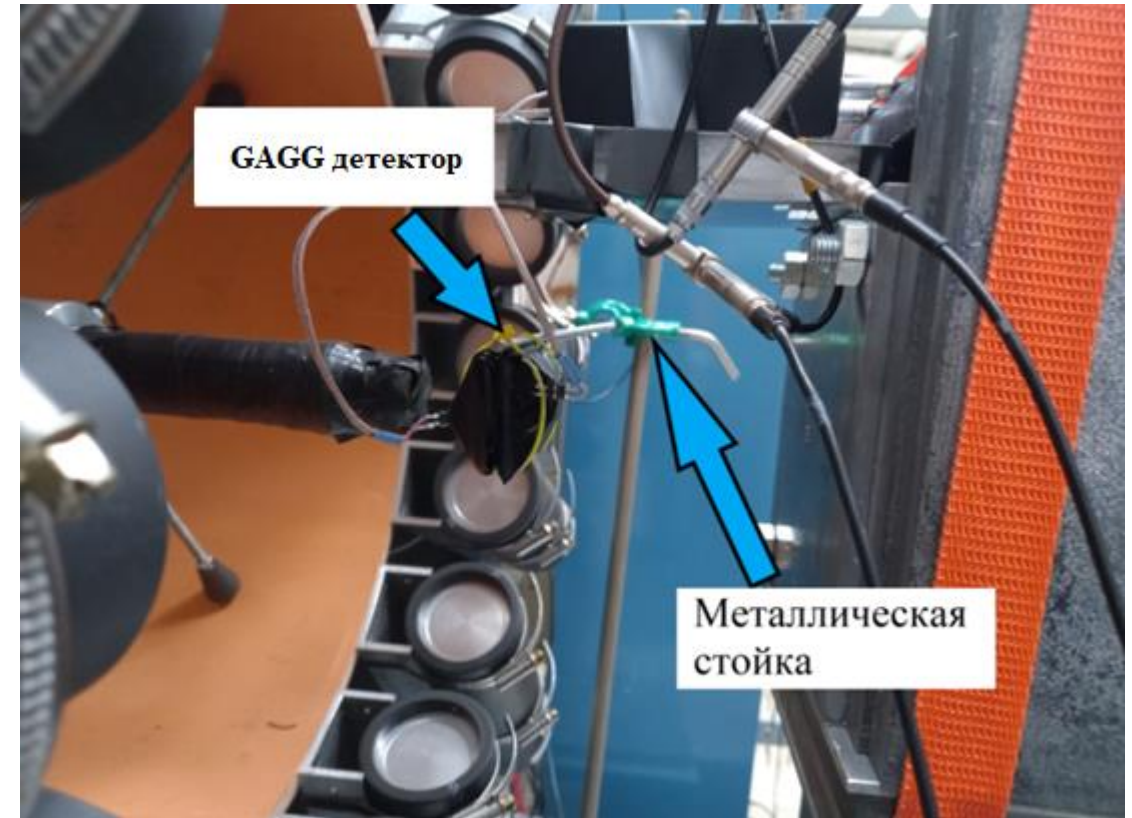


- В каждом плече установки размещено по 16 детекторов рассеянных фотонов.
- Азимутальный угол между соседними счетчиками составляет 22.5 градуса
- Расстояние от основных комптоновских рассеивателей до детекторов рассеянных фотонов составляет около 200 миллиметров. Диаметр детекторов равен 50 мм
- Диапазон полярных углов рассеянных фотонов меняется от 82 до 98 градусов.

Расположение комптоновских рассеивателей



- В каждом плече экспериментальной установки находится по одному комптоновскому рассеивателю, который состоит из органического сцинтиллятора на основе полистирола и вакуумного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

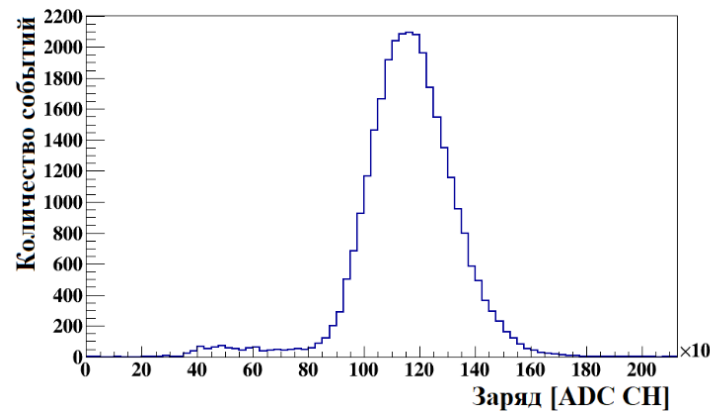


- Ключевым детектором экспериментальной установки является промежуточный (дополнительный) комптоновский рассеиватель, состоящий из GAGG(Ce) сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя.
- GAGG(Ce) (Гадолиний-алюминий-галлиевый гранат активированный ионами церия) детектор расположен перед основным рассеивателем, установленным в левом плече установки.

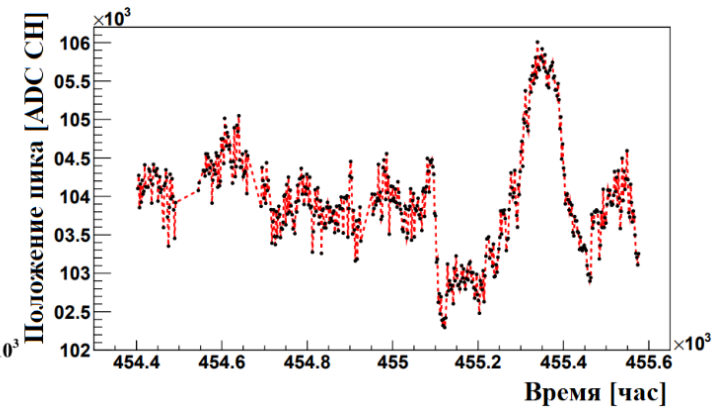
Основные комптоновские рассеиватели



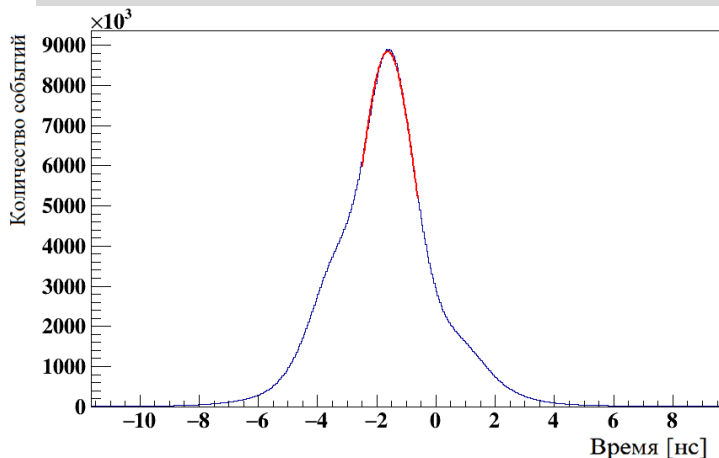
- Основные комптоновские рассеиватели представляют собой цилиндры из пластмассовых сцинтилляторов диаметром 20 мм и длиной 30 мм.
- Съём светового сигнала с сцинтиллятора осуществляется вакуумным фотоэлектронным умножителем Hamamatsu R7525.



Спектры энергоснабжения в основном комптоновском рассеивателе для событий с углом рассеивания фотонов, близким к 90 градусов, пик соответствует энергии 255 кэВ



- Корреляция положений пиков 255 кэВ со временем набора данных.
- Дрейф пика энергоснабжения в пластмассовом рассеивателе порядка 2%

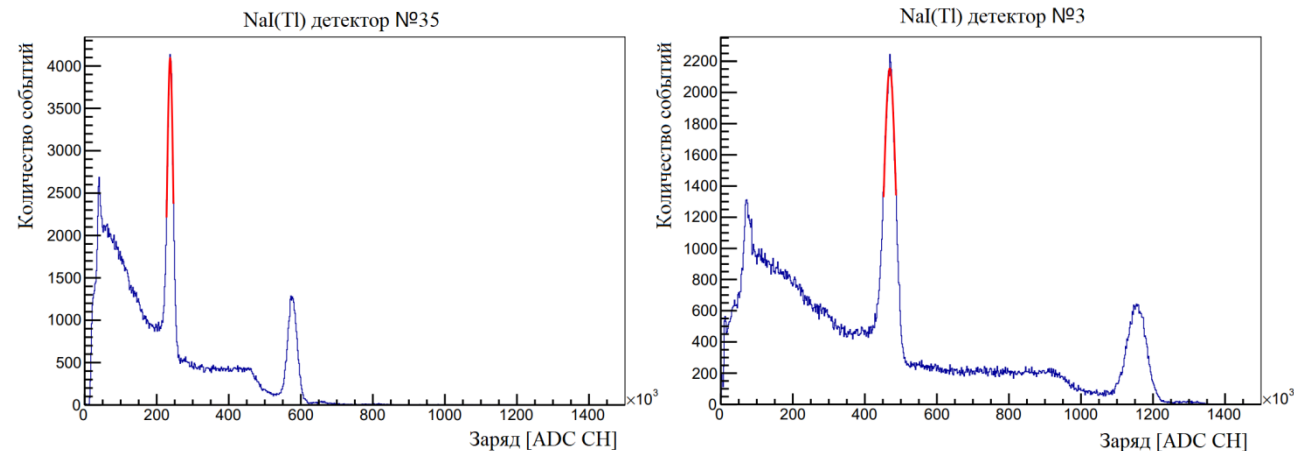


- Спектр разницы времен между сигналами основных рассеивателей. Значение временного разрешения $\sigma \approx 0.98$ нс. (во время работы установки)
- В ранних тестах с быстрым АЦП, временное разрешение получалось в 4 раза лучше.

Детекторы рассеянных фотонов (1)

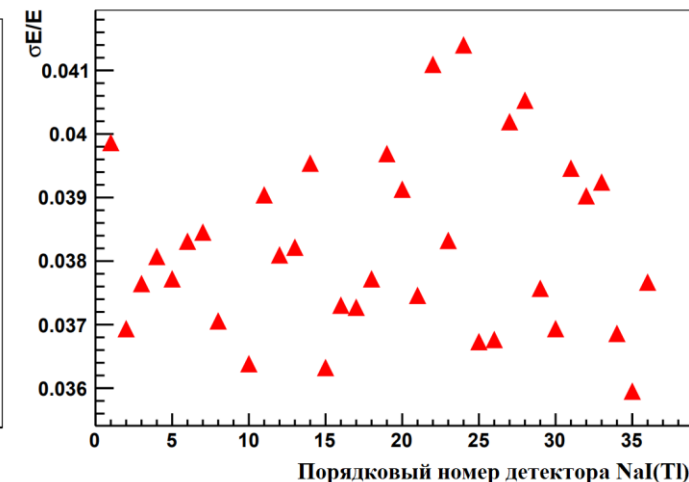
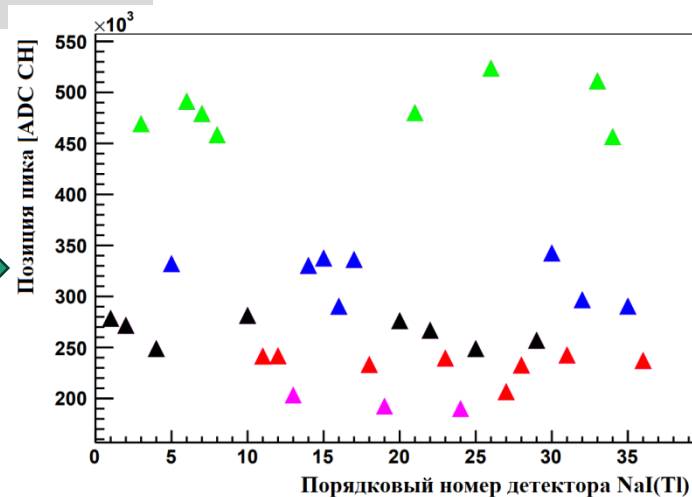


- Используются NaI(Tl) сцинтилляторы с высотой и диаметром $D=H=50$ мм.
- В NaI(Tl) детекторах используются фотоэлектронные умножители Hamamatsu R6231.
- Всего было собрано 35 идентичных по структуре детекторов при необходимых для установки 32 шт.



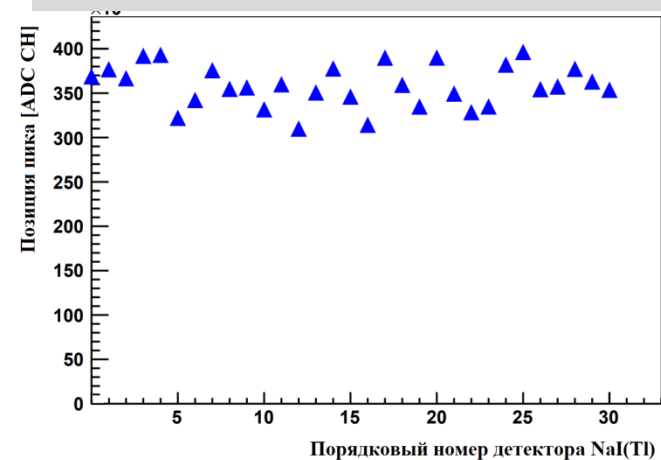
Примеры амплитудных спектров, полученных на первом этапе калибровки детекторов на основе NaI(Tl) с использованием источника ^{22}Na .

Зависимости энергетического разрешения и положения пиков 511 кэВ в амплитудных спектрах, полученных на первом этапе калибровки NaI(Tl) детекторов, от порядкового номера детектора. Были отобраны 4 группы детекторов с близкими рабочими напряжениями питания

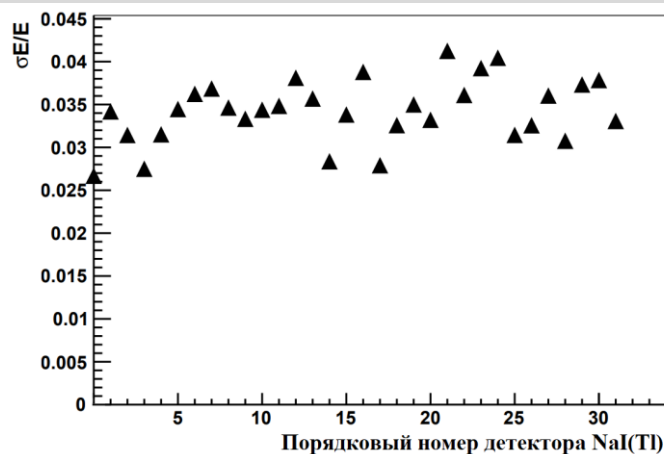


Детекторы рассеянных фотонов (2)

Финальные калибровки перед началом эксплуатации установки

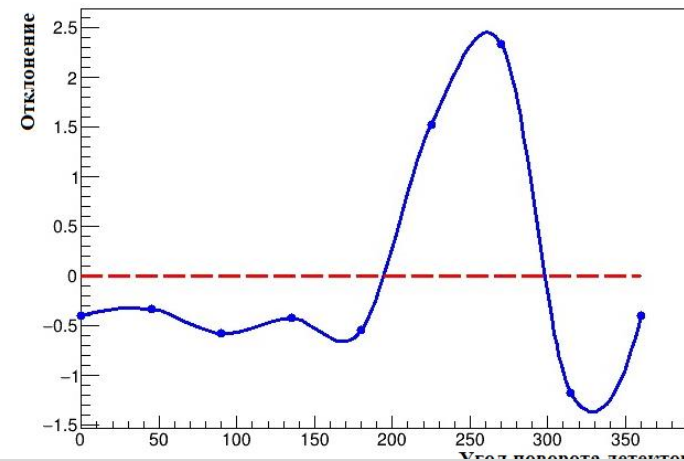


Зависимость положения пиков 511 кэВ в амплитудных спектрах от порядкового номера детектора

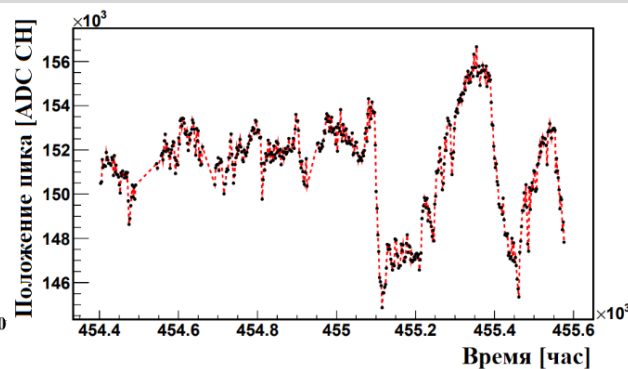
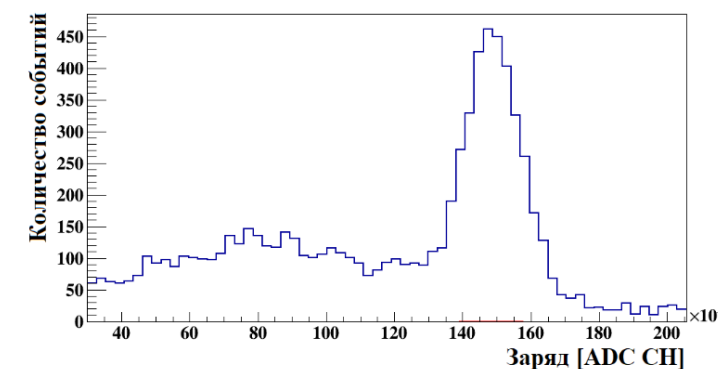


Зависимость энергетического разрешения пиков 511 кэВ в амплитудных спектрах от порядкового номера детектора

Оценка влияния магнитного поля на изменение коэффициента усиления используемых ФЭУ



Максимальные отклонения от среднего значения составляют от -1.4% до 2.5%.



- В среднем, разрешение сцинтилляционных детекторов, составляет ~3,2%
- Максимальные колебания в данных детекторах во время проведения эксперимента составили порядка 5.5%.

Слева – спектр энергвыделения в одном из NaI(Tl) детекторов на экспериментальной установке, набранный за 2 часа, пик соответствует энергии 255 кэВ. Справа – различия в положении пика 255 кэВ детектора NaI(Tl) в зависимости от времени.

Промежуточный рассеиватель GAGG(Ce)

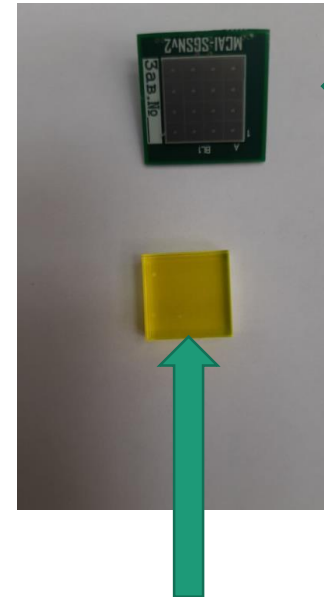
Для создания декогерентных пар в установку интегрирован промежуточный рассеиватель

Основные требования к промежуточному рассеивателю:

- 1) Надёжная регистрация событий с малым энерговыделением.
- 2) Минимальный пассивный материал детектора на пути фотонов, так как взаимодействие в этом материале также может привести к неправильной идентификации квантового состояния.

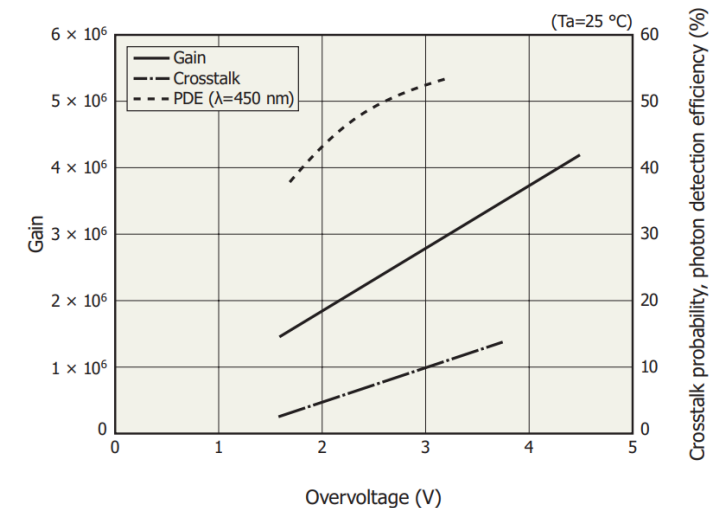
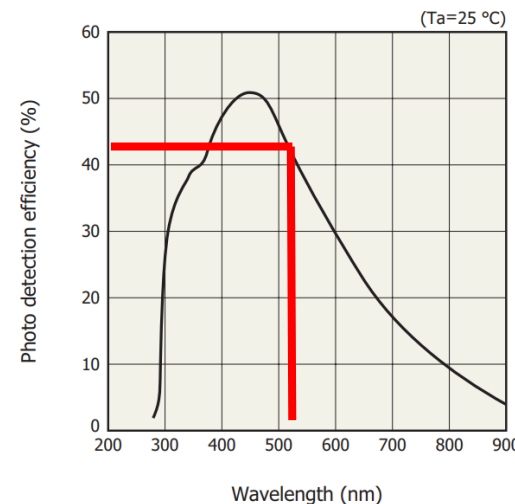
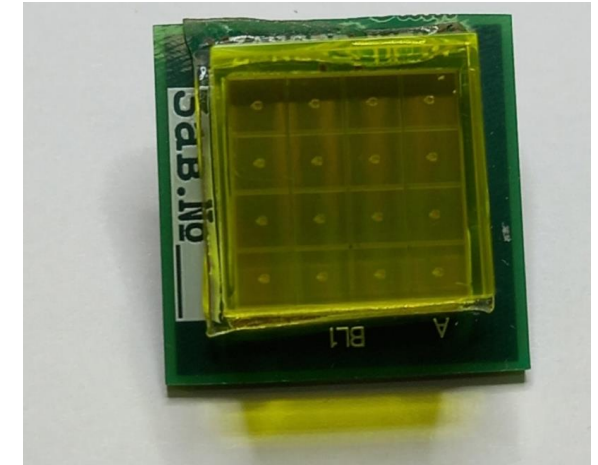
Основные преимущества GAGG(Ce) (Гадолиний-алюминий-галлиевый гранат активированный ионами церия):

- Высокий световыход (40-60 фотонов/кэВ)
- Высокая плотность (6.6 г/см^3)
- Негигроскопичность
- Максимум длины излучения GAGG (520 нм) близок к максимуму PDE SiPM Hamamatsu MPPC S14161-3050HS-04 (450 нм – 50%, для 520 нм ~ 43%)



GAGG(Ce)

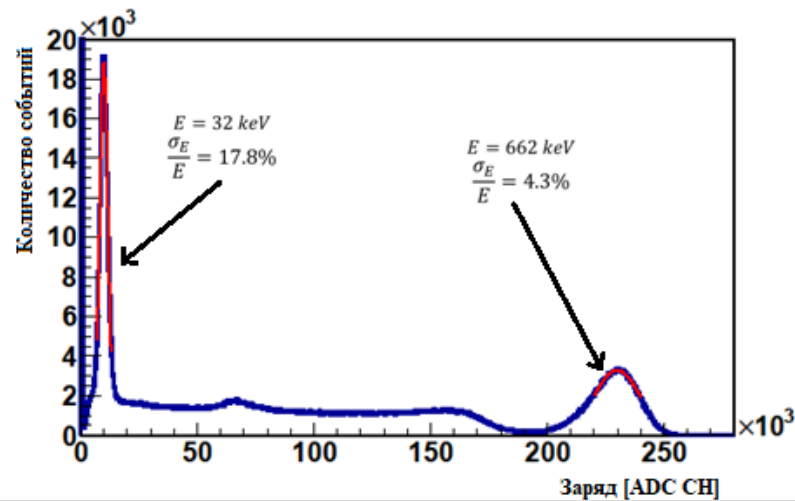
Hamamatsu MPPC S14161-3050HS-04



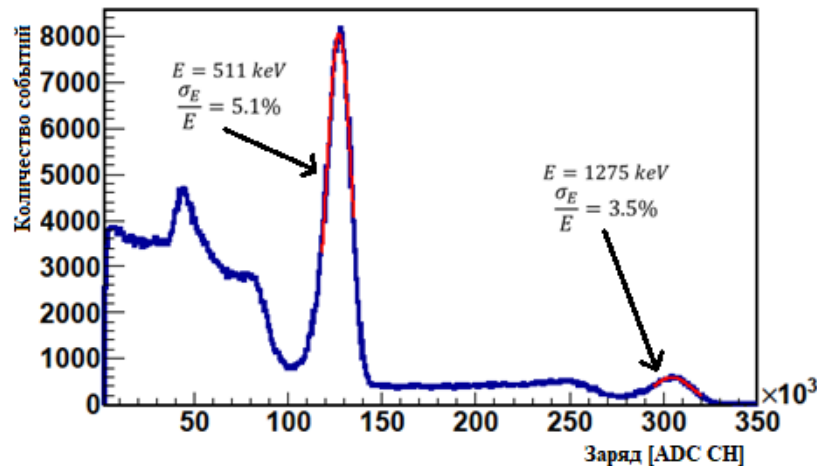
Параметры Hamamatsu MPPC S14161-3050HS-04

Параметры промежуточного рассеивателя в тестах

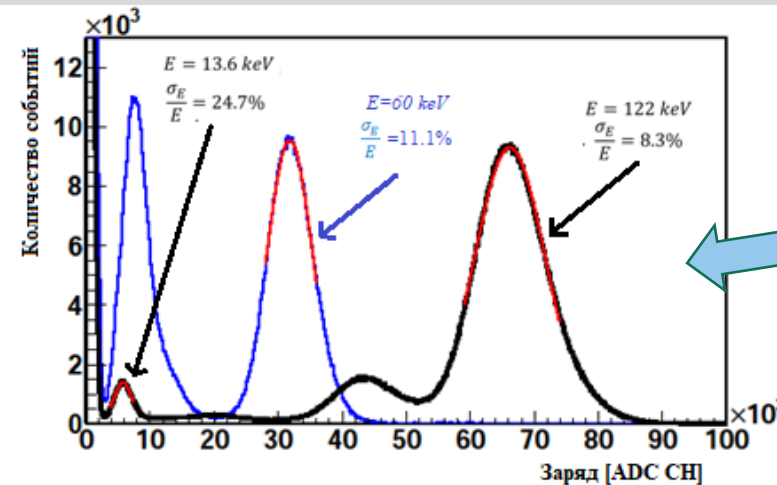
Проведено тестирование детектора на различных источниках гамма-квантов : ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs и ^{22}Na .



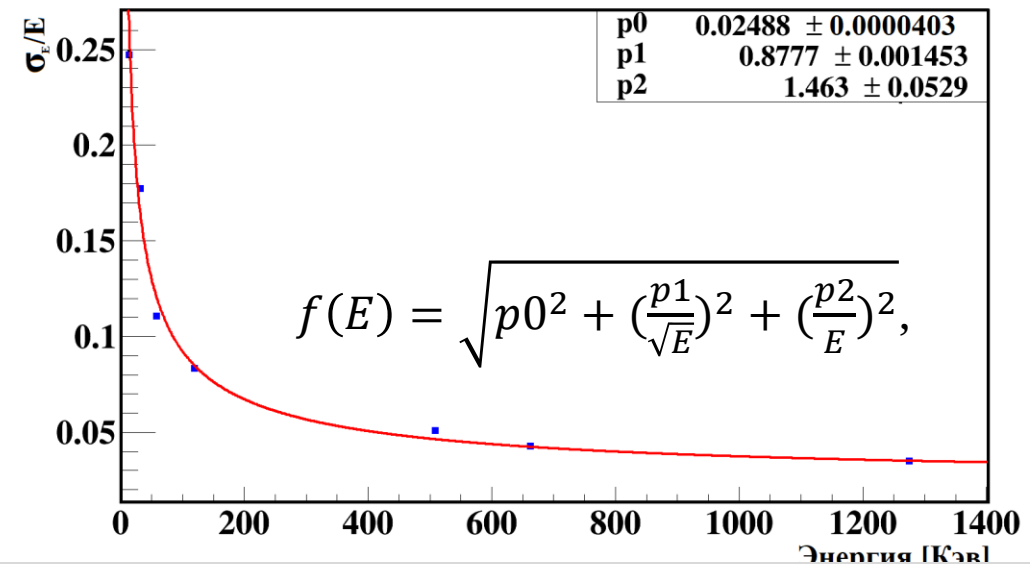
Амплитудный спектр в GAGG детекторе для источника ^{137}Cs



Амплитудный спектр в GAGG детекторе для источника ^{22}Na

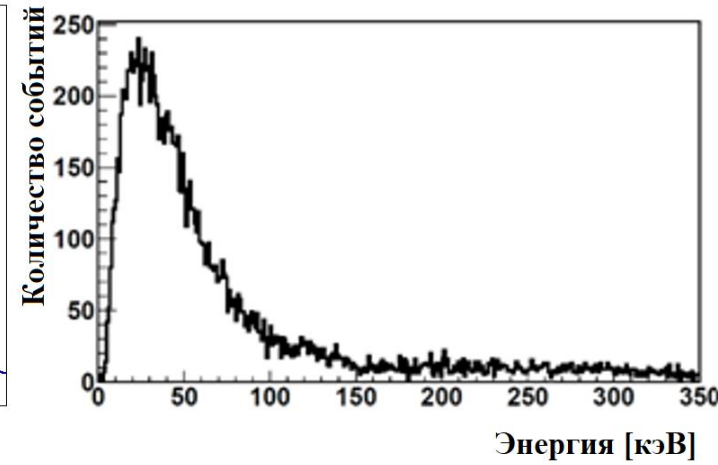
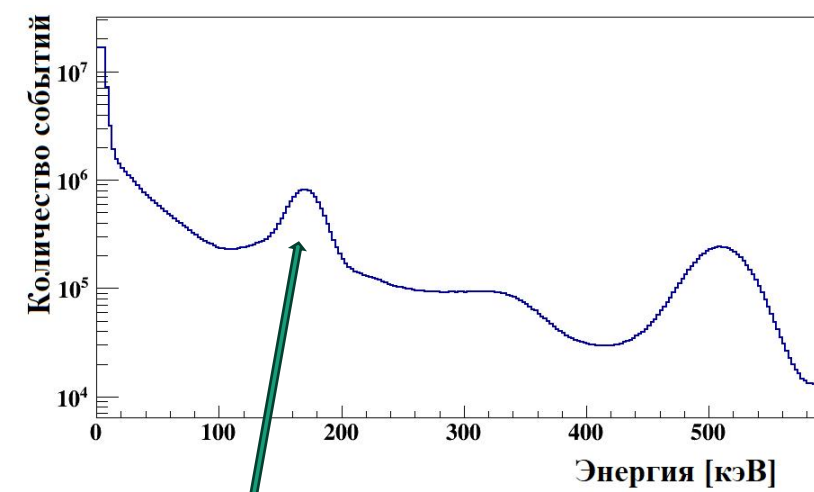


Амплитудные спектры в промежуточном GAGG рассеивателе, полученные при облучении детектора гамма-источниками ^{241}Am (синяя линия) и ^{57}Co (чёрная линия).

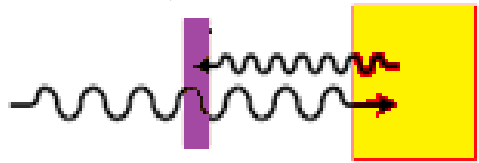


Зависимость энергетического разрешения GAGG детектора от выделенной в сцинтиляторе энергии

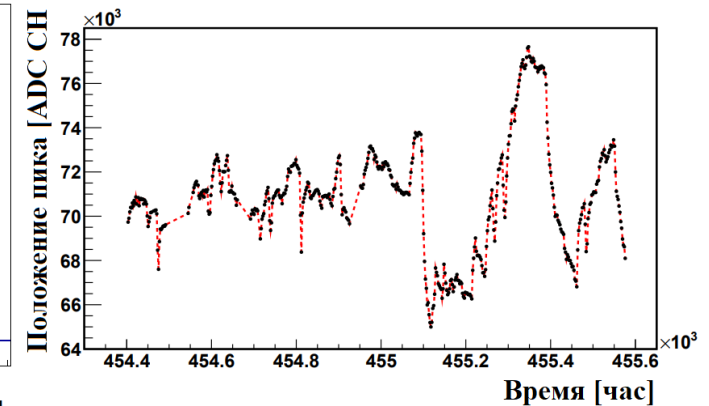
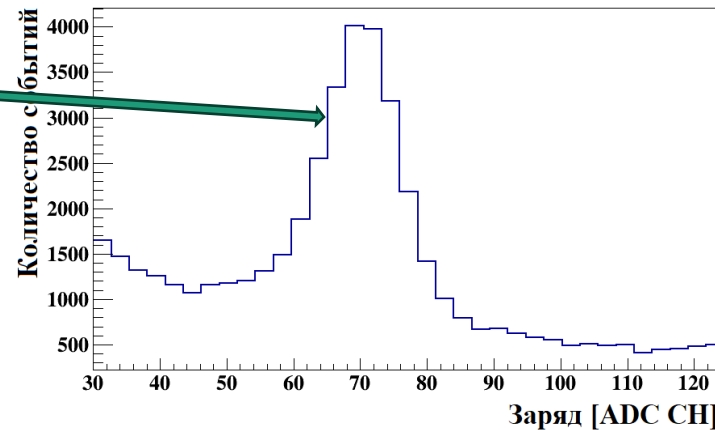
Параметры промежуточного рассеивателя в эксперименте



- Дрейф положения амплитудного пика 170.5 кэВ обратного комптоновского рассеяния в течение всего периода набора экспериментальных данных.
- Сдвиг положения пика 170.5 кэВ во время проведения эксперимента составил около 20%



Энергетический спектр в GAGG рассеивателе, полученный в эксперименте за 2 часа набора данных, фотопик соответствует энергии 170.5 кэВ (Поглощение обратно рассеянных фотонов в основном рассеивателе)



Формирование триггера.

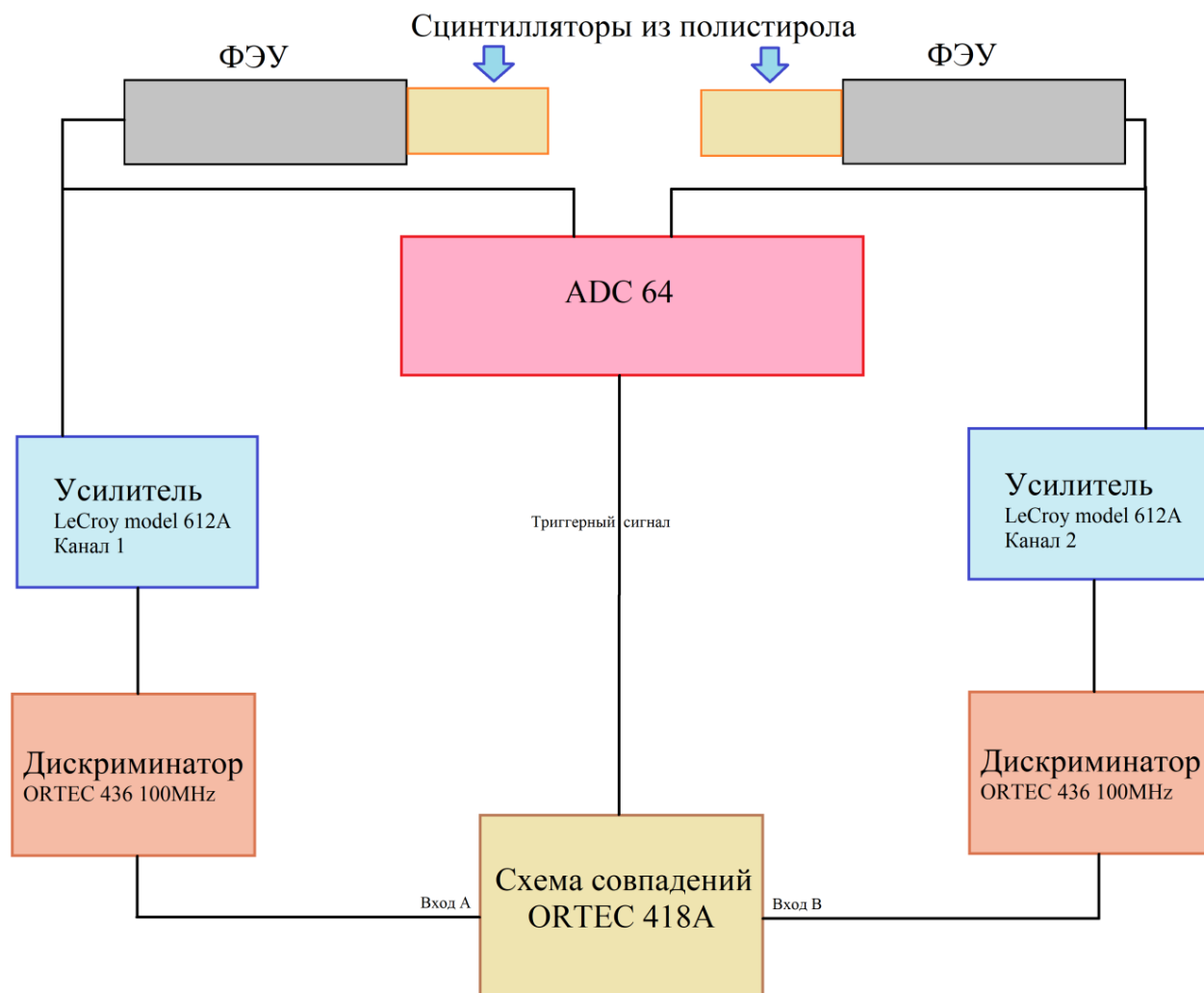
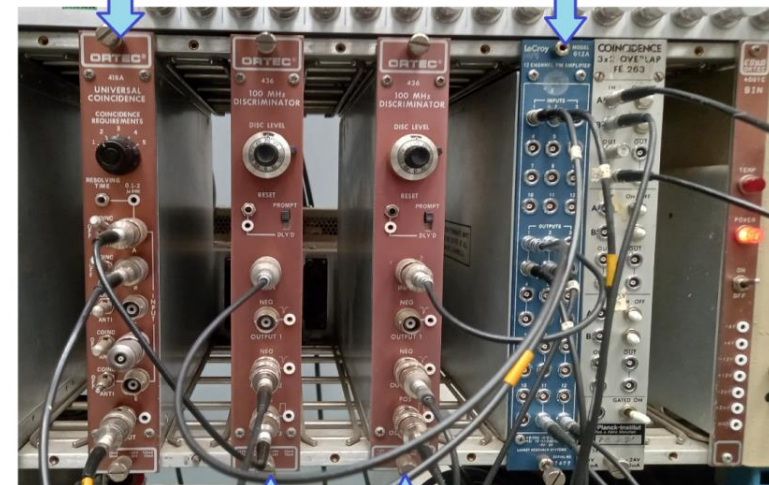


Схема совпадений

Усилитель



Дискриминаторы

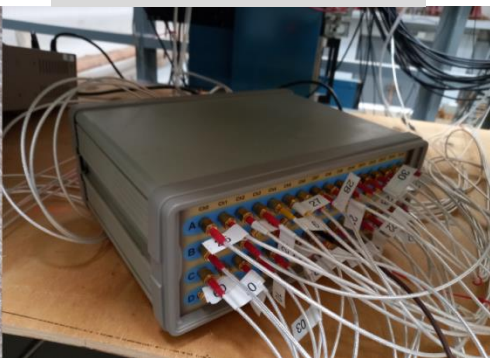
- Сигналы с основных рассеивателей разветвляются и поступают как в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), так и в аналоговый усилитель LeCroy model 612A.
- После усилителя сигнал поступает на дискриминаторы ORTEC 436 100MHz.
- Оцифрованный сигнал с дискриминатора поступает на схему совпадений ORTEC 418A для формирования итогового триггерного сигнала

Съём сигналов на установке

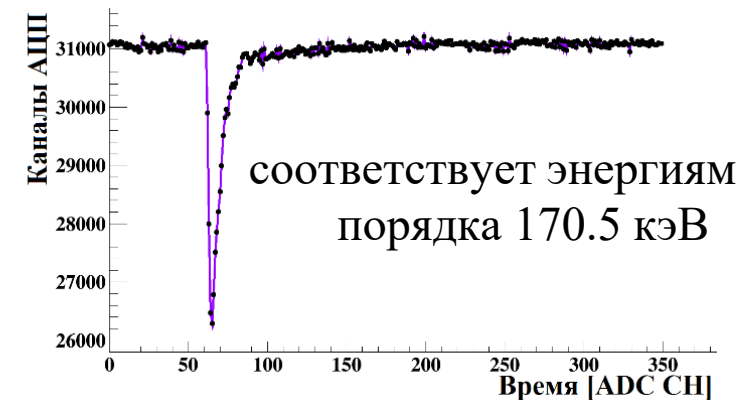
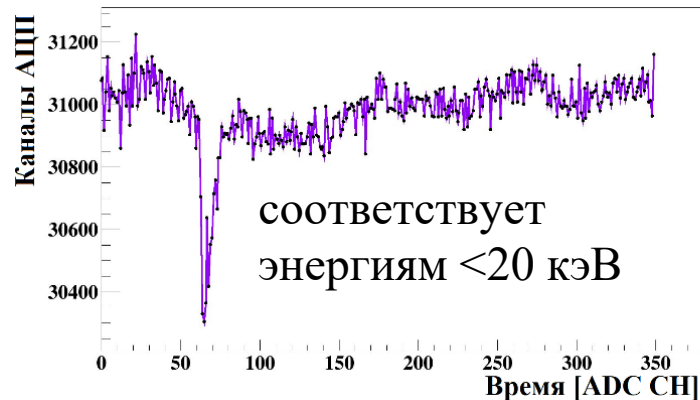
AFI ADC64



Блок АЦП

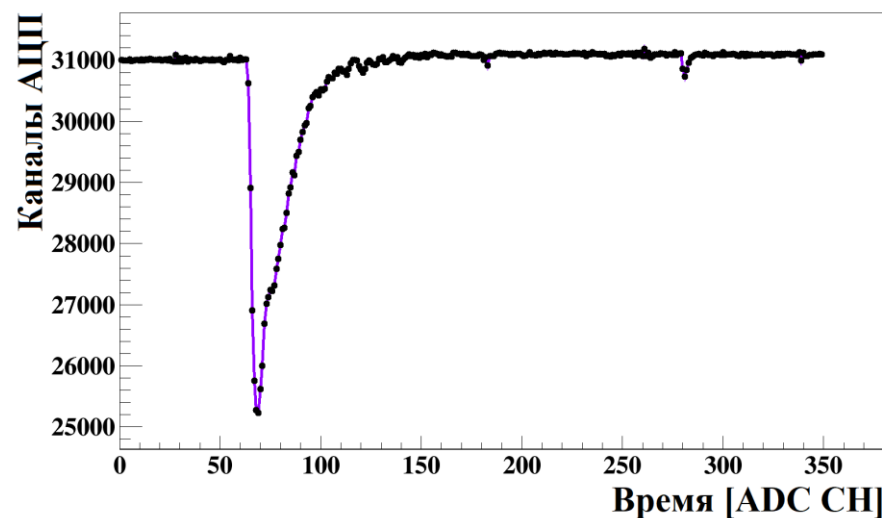


Форма сигналов с GAGG детектора

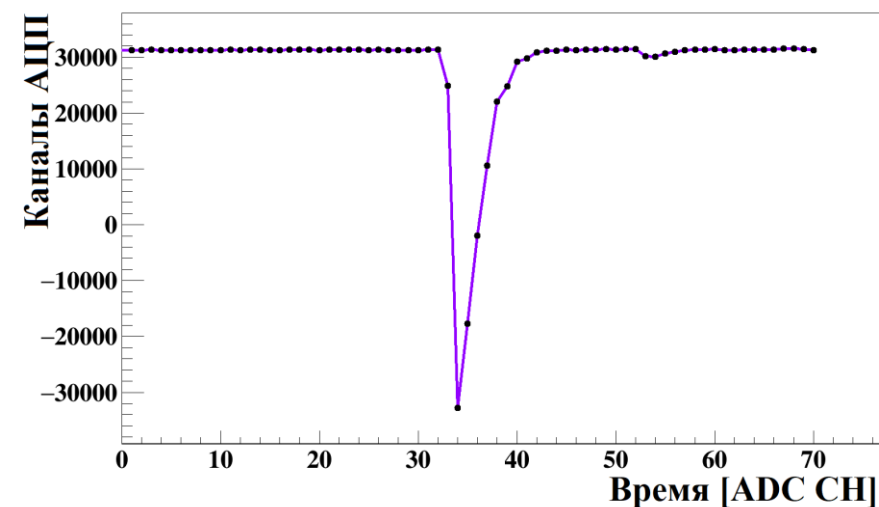


- Шаг оцифровки 16 нс.
- 12-битный (в окне 4096 каналов)
- Имеет 64 канала
- ADC64 Разработан в ОИЯИ в ЛФВЭ
- ADC 64 имеет дифференциальные входы.
- Была создана плата преобразователей униполярных сигналов

Форма сигнала с NaI(Tl) детектора

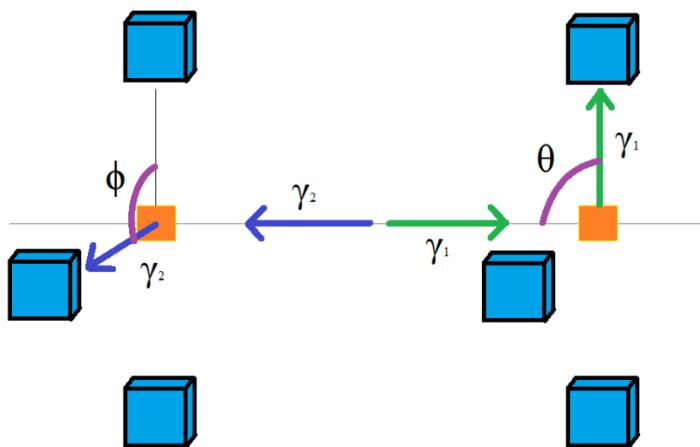


форма сигнала с основного комптоновского рассеятеля



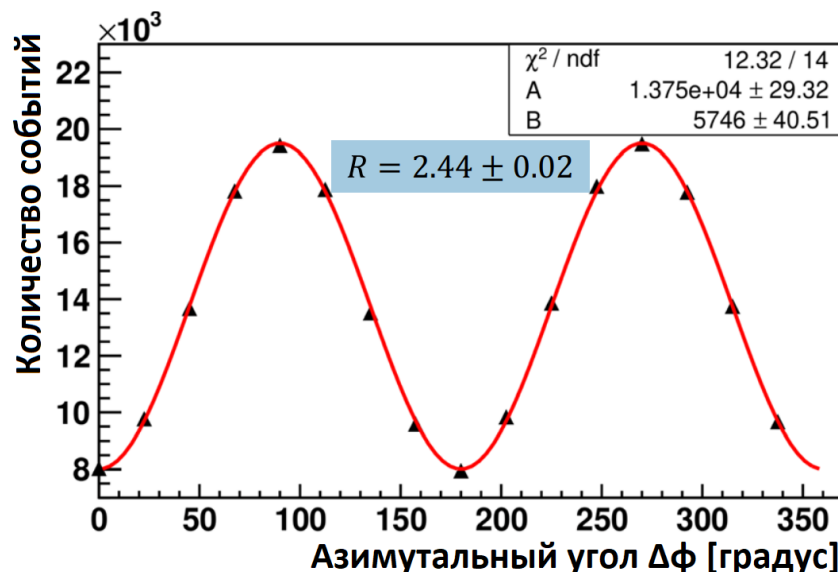
Азимутальные корреляции аннигиляционных фотонов

Запутанные фотоны



Азимутальная корреляция выражена в отношении числа рассеянных фотонов под азимутальными углами $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$

$$R = \frac{N_{\varphi=90}}{N_{\varphi=0}}$$



Красная кривая – результат аппроксимации экспериментальных точек функцией $N(\Delta\varphi) = A - B\cos(2\Delta\varphi)$

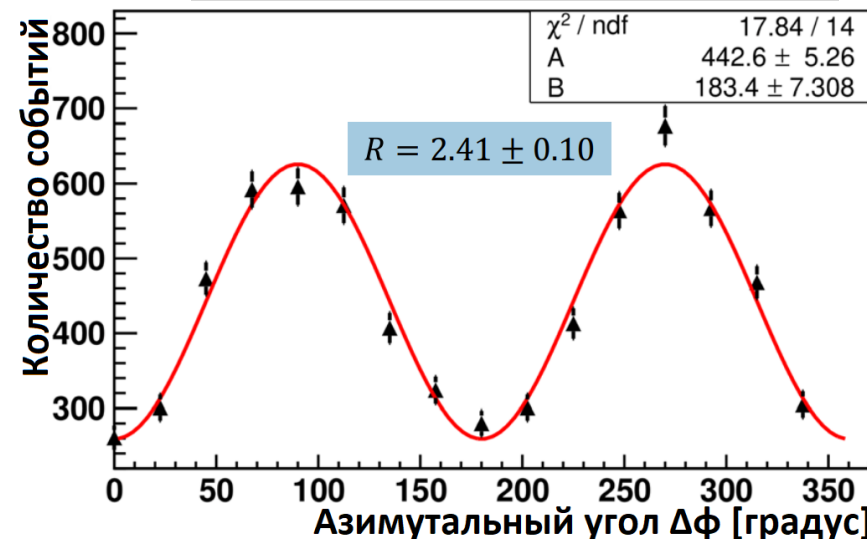
$$R_{\text{запут.}}(\theta = 90^\circ \pm 7^\circ) = 2,44 \pm 0,02$$

Отношение количества рассеянных фотонов:

$$R_{\text{теория}}(\theta) = \frac{N\left(\phi = \frac{\pi}{2}\right)}{N(\phi = 0)} = 1 + \frac{2\sin^4\theta}{\gamma^2 - 2\gamma\sin^2\theta}$$

$$\gamma = 2 - \cos\theta + (2 - \cos\theta)^{-1}$$

Декогерентные фотоны $1\text{кэВ} < E(\text{GAGG}) < 110\text{кэВ}$



$$R_{\text{деког.}}(\theta = 90^\circ \pm 7^\circ) = 2,41 \pm 0,10$$

$$R_{\text{теор.запут.}}(\theta = 90^\circ) = 2,6$$

Квантовая запутанность не может быть использована для подавления рассеянного фона в новом поколении позитрон-эмиссионной томографии (QE-PET).

Подходы в модернизации экспериментальной установки

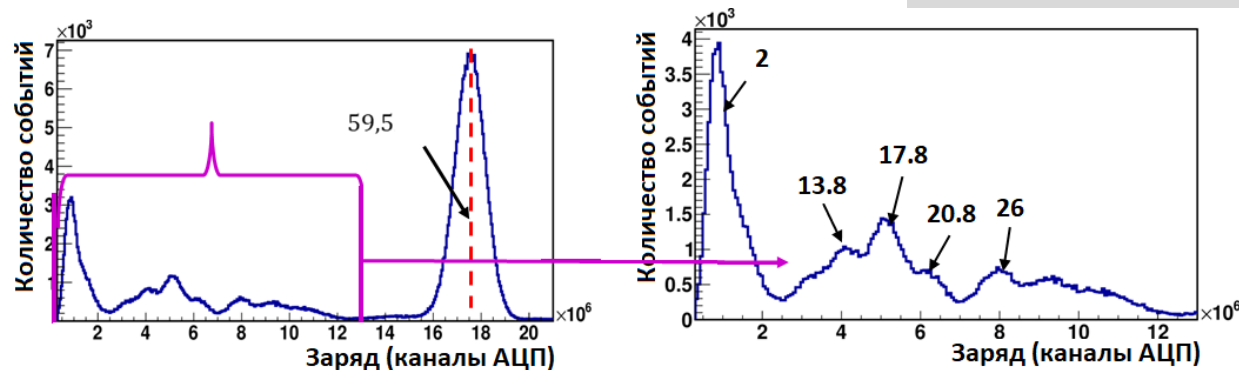
- Поляризационные корреляции оказались устойчивыми, что противоречит некоторым теоретическим предсказаниям
- Требуются дальнейшие экспериментальные исследования.

Один из возможных вариантов значительного улучшения промежуточного рассеивателя может являться замена сцинтиллятора с GAGG на $\text{SrI}_2(\text{Eu})$.



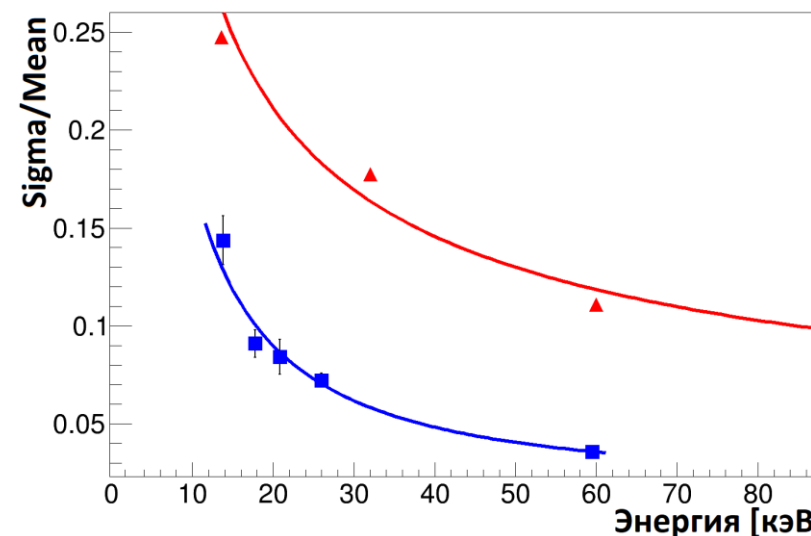
плата с матрицей
фотодиодов
S14161-3050HS-04

Сцинтиллятор $\text{SrI}_2(\text{Eu})$



Амплитудный спектр, полученный на детекторе $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ от гамма-источника ^{241}Am .

Полученный светосбор: 28.6 ф.э./кэВ



Зависимость энергетического разрешения $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ детектора (Синий график) и GAGG детектора (Красный график) от энергии, которая была выделена в сцинтилляторе.

Заключение

В рамках данной работы были достигнуты следующие результаты:

1. Были разработаны и созданы детекторные системы для экспериментальной установки по измерению поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях.
2. Созданы NaI(Tl) сцинтилляционные детекторы рассеянных фотонов, обеспечивающие большой телесный угол регистрации, необходимый для измерений декогерентных аннигиляционных фотонов. Энергетическое разрешение данных детекторов составляет около $\frac{\sigma_E}{E} = 3.2\%$ для гамма-линии 511 кэВ и обеспечивает надежную идентификацию рассеянных под углом 90° аннигиляционных фотонов.
3. Разработана методика получения декогерентных аннигиляционных фотонов за счет комптоновского рассеяния начальных фотонов на промежуточном активном рассеивателе. Степень декогеренции аннигиляционных фотонов определялась по измерению выделенной в этом рассеивателе энергии отдачи электронов.
4. В качестве активного рассеивателя использовался сцинтиллятор GAGG с высоким (на уровне 50000 фотоэлектронов/МэВ) световым выходом, а фотодетектором служила матрица кремниевых фотоумножителей с квантовой эффективностью около 50%. Комбинация высокого световыхода сцинтиллятора, большой квантовой эффективности фотодетектора и усилителя аналоговых сигналов с низким электронным шумом обеспечили минимальный порог регистрации на уровне 1 кэВ.

Заключение

В рамках данной работы были достигнуты следующие результаты:

5. Разработана и изготовлена уникальная конструкция экспериментальной установки, обеспечивающая большой телесный угол регистрации фотонов и азимутальную симметрию установки, необходимую для компенсации возможных систематических ошибок.
6. Разработана и создана электронная схема установки, состоящая из аналоговых, цифровых, триггерных блоков электроники, а также источников питания вакуумных ФЭУ и кремниевых фотоумножителей. Съем экспериментальных данных с детекторов установки основан на быстром многоканальном АЦП.
7. Полученные поляризационные корреляции максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов оказались практически идентичными для обоих типов квантовых состояний аннигиляционных фотонов, что указывает на невозможность использования явления квантовой запутанности для подавления рассеянного фона в новом поколении позитрон-эмиссионной томографии (QE-PET).
8. Учитывая полученные экспериментальные данные, предложены методы модернизации экспериментальной установки. В частности, замена сцинтиллятора GAGG в промежуточном рассеивателе на инновационный сцинтиллятор $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ позволит понизить порог регистрации энерговывделений до 0.3-0.5 кэВ и улучшить энергетическое разрешение детектора почти в три раза.

1. D. Abdurashitov et al., “Setup of Compton polarimeters for measuring entangled annihilation photons,” Journal of Instrumentation, vol. 17, no. 03, p. P03010, Mar. 2022, doi: 10.1088/1748-0221/17/03/P03010.
2. A. Strizhak, D. Abdurashitov, A. Baranov, A. Ivashkin, and S. Musin, “Study of the Compton Scattering of Entangled Annihilation Photons,” Physics of Particles and Nuclei Letters, vol. 19, no. 5, pp. 509–512, Oct. 2022, doi: 10.1134/S1547477122050405.
3. A. Strizhak et al., “Setup to study the Compton scattering of entangled annihilation photons,” J Phys Conf Ser, vol. 2374, no. 1, p. 012041, Nov. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2374/1/012041.
4. A. Ivashkin et al., “Testing entanglement of annihilation photons,” Sci Rep, vol. 13, no. 1, p. 7559, May 2023, doi: 10.1038/s41598-023-34767-8.
5. **А. Г. Баранов**, А. П. Ивашкин, С. А. Мусин, Г. Х. Салахутдинов, and А. О. Стрижак, “Сцинтилляционные детекторы комптоновских поляриметров для измерения поляризационных состояний аннигиляционных фотонов,” Приборы и техника эксперимента, № 2, **2024**, doi: 10.31857/S0032816224020055.
6. **A. G. Baranov**, A. P. Ivashkin, S. A. Musin , G. Kh. Salakhutdinov, and A. O. Strizhak, “CsI and SrI2(Eu) Scintillation Detectors with Signal Removal by Silicon Photomultipliers with a Registration Threshold below 200 Ev”, Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, No. 6, **2024**, doi: 10.1134/S0020441224701999

Спасибо за внимание

Научная новизна и практическая значимость

В работе получены следующие новые методические и научные результаты:

1. Были разработаны и созданы уникальные детекторные системы для установки по измерению поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях.
2. В экспериментальной установке впервые реализована схема из трех (двух основных и одного промежуточного) комптоновских рассеивателей. Данный подход обеспечил процесс контролируемой декогеренции аннигиляционных фотонов в активном промежуточном рассеивателе. Степень декогеренции аннигиляционных фотонов определялась по измерению выделенной в этом рассеивателе энергии отдачи электронов.
3. Созданы сцинтилляционные детекторы рассеянных фотонов, обеспечивающие большой телесный угол регистрации, необходимый для измерений декогерентных аннигиляционных фотонов.
4. Используемые сцинтилляционные детекторы образуют две системы комптоновских поляриметров для измерения поляризации обоих аннигиляционных фотонов. Определены амплитудные и временные параметры этих сцинтилляционных детекторов.
5. Разработана и изготовлена уникальная механическая конструкция экспериментальной установки, использующая эффективные решения и обеспечивающая азимутальную симметрию установки, необходимую для компенсации возможных систематических ошибок.
6. Разработана и создана электронная схема установки, включающая аналоговую, цифровую и триггерную части. Данная электронная схема позволяет записывать несколько типов событий и выполнять энергетическую и временную калибровки детекторов, образующих комптоновские поляриметры.
7. Полученные на установке результаты измерений поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов имеют как фундаментальное, так и прикладное значение для создания позитрон-эмиссионной томографии нового поколения, использующей явление квантовой запутанности аннигиляционных фотонов.

Параметры сцинтилляторов

NaI(Tl) обладает следующими характеристиками

- Плотность - 3.67 г/см^3 .
- Точка плавления - 924 К .
- **415 нм** максимум
- Коэффициент температурного расширения - $47.7 * 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.
- Параметр твёрдости равен 2 по шкале Мооса, но сцинтиллятор является сильно гигроскопичным.
- Основная длина волны излучения - 415 нм .
- Коэффициент преломления - 1.85 .
- Световой выход – 38 фотонов/кэВ .
- Температурная зависимость световыхода – $3\% \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Основные комптоновские рассеиватели.

- Сцинтиллятор изготовлен из полистирола с содержанием 0,01% PPOP (Пик его выходного спектра приходится на 410)

Параметры сцинтилляторов

Основные характеристики кристалла GAGG(

SrI₂(Eu)

- Световойход – 40000-60000 фотонов/МэВ.
 - Время затухания – 90 нс.
 - Длина волны с максимумом излучения – 520 нм.
 - Плотность – 6.6 г/см³.
 - Эффективный ядерный заряд (Zeff) – 54.
 - Время высвечивания в GAGG сцинтилляторе состоит из двух компонент: быстрая компонента соответствует времени высвечивания порядка 60-130 нс, а медленная компонента составляет порядка 260-530 нс.
- Плотность — 4.55 г/см³
 - Гигроскопичность — да
 - Длина волны (макс. эмиссия) — 435 нм
 - Время затухания — 1200 нс
 - Световойход — 115 фотонов/кэВ

Параметры ФЭУ

ФЭУ Hamamatsu R7525, на основных комптоновских рассеивателях

- Диапазон чувствительности – 300-650 нм.
- Максимальная чувствительность при длине волны 420 нм.
- Материал фотокатода – Bialkali (K_2CsSb).
Материал стекла фотокатода – боросиликатное стекло.
- Диаметр фотокатода - 25 мм.
- Усиление – $5 \cdot 10^5$
- Временные параметры импульсов: время нарастания – 1.3 нс; время спада – 14 нс.

Hamamatsu PMT R6231, детекторы рассеянных фотонов

- Рабочее напряжение 1000 В.
- Диапазон регистрируемых длин волн света от 300 нм до 650 нм с пиковой чувствительностью при 420 нм.
- Материал фотокатода – Бялкали. Материал окна – боросиликатное стекло.
- Структура динода - коробчато-сетчатая + линейно-ориентированная. Количество ступеней динодов – 8.
- Темновой ток при обычных условиях – 2 нА.
Максимальный темновой ток – 20 нА.
- Типичный коэффициент усиления – $2,7 \cdot 10^5$.

Параметры SiPM

Hamamatsu MPPC S14161-3050HS-04. Дополнительный комптоновский рассеиватель

- Размеры фотодиода $3 \times 3 \text{ мм}^2$.
- Размер 1 пикселя фотодиода 50 мкм .
- Количество пикселей 3531.
- Покрытие – силикон.
- Коэффициент преломления покрытия – 1.57.
- Геометрический процент рабочей поверхности фотодиода – 74%.
- Спектральный диапазон работы 270-900 нм.
- Максимальная чувствительность к длине волны 450 нм.
- Эффективность регистрации при длине волны 450 нм – 50%.
- Напряжение пробоя 38 В.
- Вероятность оптической связи (кроссток) – 7%.
- Усиление – 2.5×10^6 .
- Температурный коэффициент обратного напряжения – $34 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$.

