На правах рукописи

Баранов Александр Геннадьевич

Экспериментальная установка по измерению поляризационных корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов

1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Ивашкин Александр Павлович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел экспериментальной физики, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Харлов Юрий Витальевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», отделение экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

Баранов Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, отделение ядерной физики и астрофизики, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Защита состоится ______в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: http://www.inr.ru.

Автореферат разослан _

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.163.01, кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

Актуальность работы

Актуальность данной работы обусловлена как фундаментальными научными задачами, так и прикладным характером выполненной работы. Одной из фундаментальных физических проблем является сравнение свойств комптоновского рассеяния пары аннигиляционных фотонов в различных (максимально запутанном и декогерентном) квантовых состояниях. До последнего времени экспериментальной проверки и сравнения таких процессов не было выполнено. В то же время, недавние теоретические работы по расчетам комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов дают весьма противоречивые результаты, что указывает на необходимость выполнения экспериментальных исследований.

Прикладное значение представленной работы связано с предложениями использовать свойства квантовой запутанности аннигиляционных фотонов в новом поколении квантовой позитрон-эмиссионной томографии (Q-ПЭТ). Предполагаемая разница в кинематике рассеяния изначально запутанных и декогерентных фотонов может помочь в подавлении рассеянного фона, обусловленного паразитным рассеянием начальных аннигиляционных фотонов в теле человека. Идентификация такого рассеянного фона с использованием явления квантовой запутанности может помочь в улучшении качества томографического изображения.

Отметим, что комптоновское рассеяние декогерентных фотонов до последнего времени не было экспериментально изучено совсем. Создание настоящей экспериментальной установки позволило ответить на целый ряд фундаментальных и прикладных вопросов, а также решить методические задачи, связанные с регистрацией сверхнизких энерговыделений в сцинтилляционных детекторах.

3

Цели и задачи

Целью настоящей работы является создание детекторных систем для экспериментальной установки по измерению поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях. Достижение этой цели подразумевает решение комплекса экспериментальных и методических задач, которые коротко описаны ниже. Физическая задача эксперимента потребовала разработки методики получения пар аннигиляционных фотонов в начальных (максимально запутанных) и декогерентных состояниях, методов измерений поляризационных состояний и угловых корреляций этих фотонов.

Создание экспериментальной установки потребовало разработки и изготовления систем комптоновских поляриметров из десятков сцинтилляционных детекторов различных типов с использованием нескольких видов сцинтилляторов и типов фотодетекторов, включая вакуумные фотоэлектронные умножители и твердотельные кремниевые фотоумножители. Необходимым этапом работы было изготовление этих сцинтилляционных детекторов, исследование их параметров и подбор оптимальных режимов работы.

Другой важнейшей задачей данной работы была разработка конструкции экспериментальной установки, которая обеспечивала бы большой телесный угол регистрации фотонов, а также компенсацию систематических ошибок, связанных с фиксированной точностью позиционирования детекторов комптоновских поляриметров и источника аннигиляционных фотонов. Отметим, что большой телесный угол установки является необходимым условием получения статистически значимых результатов по измерению декогерентных пар аннигиляционных фотонов.

Следующей стадией создания экспериментальной установки является разработка электронной схемы, включающей в себя аналоговую, цифровую, триггерную электронику и систему питания различных фотодетекторов.

4

Результатом эксперимента является измерение поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях, что потребовало многомесячных сеансов по набору экспериментальных данных, а также постоянного контроля параметров детекторов. Эти параметры были использованы на конечном этапе анализа экспериментальных данных.

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.
- Созданы сцинтилляционные детекторы рассеянных фотонов, обеспечивающие большой телесный угол регистрации, необходимый для измерений декогерентных аннигиляционных фотонов.
- 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 азимуталь-

ную 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.

Методология и методы исследования

В процессе выполнения данной работы была разработана и создана методика создания сцинтилляционных детекторов различных типов, использующих вакуумные и твердотельные фотоэлектронные умножители. Разработанная конструкция экспериментальной установки обеспечила как азимутальную симметрию, необходимую для компенсации систематических ошибок, так и большой телесный угол регистрации рассеянных аннигиляционных фотонов.

Метод использования трех (двух основных и одного промежуточного) комптоновских рассеивателей обеспечил процесс контролируемой декогеренции аннигиляционных фотонов в активном промежуточном рассеивателе. Методические решения в создании активного промежуточного рассеивателя позволили регистрировать сверхнизкие энерговыделения от электронов отдачи, начиная с 1 кэВ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Системы детекторов и конструкция экспериментальной установки по исследованию поляризационных корреля-

ций 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, тригтерных блоков электроники и источников питания вакуумных ФЭУ и кремниевых фотоумножителей.

Достоверность результатов

Полученные в данной работе результаты многократно докладывались на международных конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах. Также, впервые полученные на обсуждаемой экспериментальной установке результаты по измерению азимутальных угловых корреляций декогерентных фотонов подтверждены другими экспериментальными группами.

Апробация работы

Перечисленные выше результаты, были доложены на следующих международных конференциях:

Экспериментальное измерение поляризационных корреляций в комптоновском рассеянии запутанных аннигиляционных фотонов // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024» <u>https://lomonosov-msu.ru/rus/event/schedule/1599?da</u> te=2024-04-16#13449

Криогенный сцинтилляционный детектор нейтрино со сверхнизким энергетическим порогом. // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», Москва, Россия

https://lomonosov-msu.ru/rus/event/8000/

A concept of neutrino scintillation detector with threshold below 1 keV. // 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics. Moscow, Russia.

https://indico.particle.mephi.ru/event/436/contributions/4193/

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в решении следующих задач:

- 1. Разработка и создание конструкции экспериментальной установки для исследования поляризационных корреляций максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов.
- 2. Создание детекторов комптоновских поляриметров для исследования комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов.
- 3. Разработка активного промежуточного комптоновского рассеивателя, необходимого для идентификации процесса декогеренции в системе аннигиляционных фотонах.
- 4. Измерение и калибровка энергетических и временных параметров детекторов экспериментальной установки.
- 5. Разработка, создание и настройка аналоговой, цифровой и триггерной электроники экспериментальной установки.

Публикации

Основные положения диссертационной работы изложены в 6 печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах, включённых в перечень ВАК (все статьи опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus). Список опубликованных работ приведён в конце автореферата.

Объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка публикаций, списка цитируемой литературы и приложения. Работа изложена на 124 страницах, включая 71 рисунок, и список цитированной литературы, содержащий 70 наименования.

Краткое содержание работы

Во **введении** проводится обоснование актуальности исследований поляризационных корреляций в комптоновском рассеянии аннигиляционных фотонов в запутанном и декогерентном состояниях. Кратко описана история исследований запутанных аннигиляционных фотонов. Формулируются общая цель и задачи диссертационной работы, а также описываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту основные результаты, приводится список публикаций по теме диссертации, приведены сведения об апробации и личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

В первой главе диссертации подробно описано состояние исследований запутанных аннигиляционных фотонов на данный момент. Также ведётся обсуждение современных теоретических исследований [1] [2], которые можно экспериментально проверить на установке по изучению аннигиляционных фотонов в ИЯИ РАН. Рассмотрены свойства запутанных фотонов, в частности особенности их комптоновского рассеяния. Показан принцип определения поляризации запутанных фотонов.

Особое внимание уделено рассмотрению предыдущих экспериментов [3] [4] [5], направленных на изучение азимутальных угловых корреляций аннигиляционных фотонов и исследованию неравенства Белла [6]. В качестве критерия доказательства запутанности в рассмотренных экспериментах использовалась азимутальная корреляция рассеянных аннигиляционных фотонов. Этот параметр выражен в отношении числа рассеянных фотонов под азимутальными углами $\varphi = 90^{\circ}$

и $\phi = 0^{\circ}$: $R = \frac{N_{\phi=90}}{N_{\phi=0}}$, где угол ϕ вычисляется между азимутальными углами комптоновского рассеяния для пары аннигиляционных фотонов. Согласно критерию Бома и Ааронова, при значении R>2, систему можно считать запутанной [7].

Во **второй** главе рассматриваются физические принципы, лежащие в основе экспериментальной установки по исследованию квантовых состояний аннигиляционных фотонов, созданной в ИЯИ РАН. Показана её принципиальная схема (Рис. 1), а также описаны основные особенности сконструированной установки. [A1, A2, A4]

Созданная установка состоит из двух плеч, каждое из которых включает систему комптоновских поляриметров. Соответственно, каждое плечо установки включает комптоновский рассеиватель из органического сцинтиллятора на основе полистирола со съемом сигнала вакуумным фотоэлектронным умножителем. Рассеянные фотоны регистрируются системой NaI(Tl) детекторов, также использующих вакуумные фотоэлектронные умножители. В каждом плече установлены по 16 NaI(Tl) счетчиков под разными азимутальными углами и позволяющими регистрировать рассеянные фотоны во всем диапазоне азимутальных углов. Схематичное изображение установки показано на рис. 1.

Важнейшей инновационной частью созданной установки и принципиально отличающей её от ранее проводимых экспериментов является дополнительный детектор комптоновского рассеяния (промежуточный комптоновский рассеиватель), позволяющий однозначно идентифицировать декогерентные фотоны. Взаимодействие начального аннигиляционного фотона в этом детекторе приводит к комптоновскому рассеянию и, следовательно, измерению его поляризации, а согласно основам квантовой теории, такое измерение поляризации внешним прибором должно привести к его декогеренции.

В качестве источника аннигиляционных запутанных фотонов использовался источник ²²Na, заключённый в свинцовую



Puc. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов



 $Puc.\ 2.$ Источник $^{22}Na,$ используемый в установке по исследованию аннигиляционных фотонов. Фотография (слева) и схема внутреннего устройства (справа)

оболочку, имеющую отверстия коллиматоров (рис. 2). Позитроны образуются в реакции β +-распада, происходящей в 90% случаев: $^{22}_{11}$ Na $\rightarrow ^{22}_{10}$ Ne+ e^+ + v_e , а образование пары запутанных фотонов происходит при последующей аннигиляцией на электроне окружающей среды. Активность используемого источника составляет порядка 50 МБк. Свинцовый коллиматор имеет

размеры 20×20×20 (Рис. 2). В двух противоположных от источника сторонах, коллиматор имеет горизонтальные отверстия с диаметром 5 мм. Благодаря такому устройству коллиматора формируются два пучка аннигиляционных фотонов, распространяющихся в противоположных направлениях и используемых в рассматриваемой установке.

Третья глава посвящена описанию структуры экспериментальной установки по исследованию поляризационных корреляций максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов. Приведены основные параметры электронной схемы съема сигналов с детекторов установки, включая аналоговую, цифровую и триггерную части, формирующие общую систему съема экспериментальной информации в установке. В данной главе также присутствует подробное описание каркаса и взаиморасположения входящих в рассматриваемую установку механических составляющих.

Экспериментальная установка расположена на двухъярусной металлической платформе (рис. 3). Верхний ярус предназначен для размещения всех используемых в установке детекторов и источника аннигиляционных фотонов, а также части аналоговой электроники, главным образом, усилителей сигналов промежуточного рассеивателя. Нижний ярус платформы предназначен для размещения низковольтных источников питания кремниевых фотоумножителей, многоканального аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), а также источника бесперебойного питания, обеспечивающего стабильным напряжением все детекторные элементы установки.

Приведено описание аналоговой, цифровой и триггерной части электронной схемы экспериментальной установки. Основой аналоговой электроники экспериментальной установки является усилитель сигналов с ключевого детектора — GAGG промежуточного комптоновского рассеивателя. Этот усилитель усиливает сигнал с кремниевого фотоумножителя, который используется в качестве фотодетектора в GAGG рассеивателе. Другой важной частью используемой электроники



Верхний ярус для размещения детекторов

Нижний ярус для размещения электронной аппаратуры

Рис. 3. Фотография собранной установки по исследованию аннигиляционных фотонов



Puc. 4. Слева — фото использованной при формировании триггера электроники. Справа — схема формирования основного триггера установки по исследованию аннигиляционных фотонов

являются электронные модули, формирующие триггерный сигнал экспериментальной установки (рис. 4, слева).

В качестве триггера был использован сигнал, соответствующий событию одновременного срабатывания комптоновских рассеивателей, что означает регистрацию (рассеивание) в них фотонов, образованных при позитрон-электронной аннигиляции в источнике позитронов. Схема триггера показана на рисунке (рис. 4, справа).

Система считывания экспериментальных данных установки основана на 64-канальном аналогово-цифровом преобразователе (АЦП) ADC64 производства компании AFI Electronics, Дубна, Россия [8]. Для записи данных в эксперименте использовалось 35 каналов. Каналы с номерами от 1 до 32 считывают сигналы с NaI(Tl) детекторов рассеянных фотонов. Каналы 33 и 34 используются для считывания данных с основных комптоновских рассеивателей. Частота оцифровки сигналов равна 62.5 МГц, таким образом, шаг оцифровки ADC64 составляет 16 нс. Максимальная амплитуда регистрируемого сигнала составляет 1 В. На канал 35 поступают сигналы с GAGG детектора. Примеры типичных сигналов с различных детекторов, записанные АЦП, приведены на рис. 5.

На рис. 6 показаны сигналы с GAGG детектора для сравнения их амплитуд с уровнем электронных шумов, определяющих флуктуации базовой линии АЦП. Необходимость регистрации слабых сигналов (вплоть до 1 кэВ выделенной энергии) в GAGG детекторе потребовала разработки методов фильтрации и анализа форм сигналов, которые обеспечили наилучшее соотношение сигнал/шум. Используемые процедуры позволяют отсеивать высокочастотные электронные наводки и идентифицировать слабые полезные сигналы.

В четвёртой главе обсуждаются различные сцинтилляционные детекторы, используемые в экспериментальной установке для создания двух систем комптоновских поляриметров [A5]. Эти поляриметры включают основные комптоновские рассеиватели из органического сцинтиллятора на основе полистирола и NaI(Tl) детекторы рассеянных фотонов. Особое внимание уделено промежуточному (дополнительному) комптоновскому рассеивателю. Рассмотрено устройство различных детекторов, параметры как сцинтилляторов, так и фотодетекторов, а также методы калибровки рассматриваемых детекторов.

Основные комптоновские рассеиватели представляют собой цилиндры из пластмассовых сцинтилляторов диаметром



Puc. 5. Слева – форма сигнала с NaI(Tl) детектора. Справа — форма сигнала с основного комптоновского рассеивателя



Puc. 6. Форма сигнала с GAGG детектора. Левая картинка — сигнал с малой амплитудой (соответствует энергиям <20 кэВ). Правая картинка — сигнал с большой амплитудой (соответствует энергиям порядка 170 кэВ)



Puc. 7. Фотографии основного комптоновского рассеивателя в сборе (слева) и расположенного в установке (справа)

20 мм и длиной 30 мм. Съем светового сигнала с сцинтиллятора осуществляется вакуумным фотоэлектронным умножителем, ФЭУ Hamamatsu R7525 (рис. 7).

В процессе работы экспериментальной установки необходимо было выполнять постоянную энергетическую калибровку основных рассеивателей. Изменение коэффициентов усиления ФЭУ обуславливалось как суточными, так и сезонными колебаниями температуры окружающей среды. В качестве процесса с фиксированным энерговыделением использовалось комптоновское рассеяние на близкий к прямому угол (рис. 8).

Точное измерение энерговыделения в детекторах рассеяных фотонов имеет принципиальное значение для определения углов рассеяния в комптоновских рассеивателях. Главной задачей этих детекторов является регистрация энерговыделения от рассеянных на близкий к 90° угол аннигиляционных фотонов. В реальном случае разброс углов рассеяния в диапазоне 80° - 100° приводит к уширению спектра даже для детекторов с идеальным энергетическим разрешением. Поскольку угол рассеяния определяет степень декогерентности рассматриваемой квантовой системы, измерение энергии в NaI(Tl) счетчиках имеет принципиальное значение для исследования процесса декогерентости. Детекторы состоят из NaI(Tl) сцинтилляторов с высотой и диаметром D=H=50 мм. В качестве



Puc. 8. Вверху — спектр энерговыделения в основном комптоновском рассеивателе для событий с углом рассеивания фотонов, близким к 90 градусов за 2 часа набора, пик соответствует энергии 255 кэВ. Внизу показана корреляция положений пиков 255 кэВ с временем набора данных

фотодетекторов используются фотоэлектронные умножители Hamamatsu PMT R6231 [9]. Фотография одного из детекторов рассеяных фотонов представлена на рисунке (рис. 9)

Была проведена первичная калибровка всех NaI(Tl) детекторов с использованием источника ²²Na. Калибровка проводилась по пику 511 кэВ. Показаны результаты, полученные до и после калибровки (рис. 10 и рис. 11).

Зависимость энергетического разрешения пиков 511 кэВ в амплитудных спектрах от порядкового номера детектора, полученная на финальном этапе настройки NaI(Tl) счетчиков, показана на рис. 11 справа. В среднем, разрешение сцинтил-



Puc. 9. Фотографии детектора на основе NaI(Tl) и ФЭУ в разобранном (слева) и собранном (справа) видах



Puc. 10. Зависимость положения пиков 511 кэВ в амплитудных спектрах от порядкового номера детектора, полученная на первом этапе калибровки (слева) и на финальном этапе (справа) настройки NaI(Tl) счетчиков



Puc. 11 Зависимость энергетического разрешения пиков 511 кэВ в амплитудных спектрах от порядкового номера детектора, полученная на первом этапе калибровки (слева) и на финальном этапе (справа) настройки NaI(Tl) счетчиков

ляционных детекторов, составляет ~3,2%, что позволяет проводить достаточно точную идентификацию энергии рассеянных фотонов.

Поскольку набор экспериментальных данных длился на протяжении нескольких месяцев, в течении которых параметры используемых детекторов могут изменятся, в процессе набора данных проводились калибровки по положению пика полного поглощения рассеянных под прямым углом фотонов с энергией 255 кэВ (рис. 12). Максимальные амплитудные колебания в детекторах составили порядка 5.5%.

Промежуточный рассеиватель, расположенный перед одним из основных рассеивателей, является ключевым элементом экспериментальной установки. В качестве фотодетектора при создании промежуточного рассеивателя был выбран кремниевый фотоумножитель Hamamatsu MPPC S14161-3050HS-04 [10]. В качестве сцинтиллятора для промежуточного детектора комптоновского рассеяния использовался кристалл GAGG(Ce) (Cd₃Al₂Ga₃O₁₂ легированный церием, далее GAGG) [11]. Фотография GAGG детектора представлена на рис. 13. Такой выбор был сделан в соответствии с основными требованиями к этому детектору:

а) как можно меньший порог регистрации сигнала, поскольку низкая эффективность в регистрации малых энерговыделений приведёт к ложной идентификации квантового состояния;

б) минимальный пассивный материал детектора на пути фотонов, так как взаимодействие в этом материале также может привести к неправильной идентификации квантового состояния.

После сборки детектора было определено энергетическое разрешение GAGG рассеивателя. Для тестирования детектора использовались следующие источники гамма-квантов: 241 Am (энергия 59.5 кэВ), 57 Co (122 кэВ), 137 Cs (662 и 32 кэВ) и 22 Na (1275 кэВ и 511 кэВ). Полученные спектры приведены на рис. 14 и рис. 15.

19



Puc. 12. Вверху — спектр энерговыделения в одном из NaI(Tl) детекторов на экспериментальной установке, набранный за 2 часа. Пик соответствует энергии 255 кэВ. Внизу — зависимость положения пика 255 кэВ детектора NaI(Tl) от времени набора данных

С использованием полученных амплитудных спектров была построена зависимость энергетического разрешения GAGG детектора от выделенной в сцинтилляторе энергии (рис. 16), которая была аппроксимирован функцией:

$$f(E) = \sqrt{p0^2 + (\frac{p1}{\sqrt{E}})^2 + (\frac{p2}{\sqrt{E}})^2}$$

где *Е* — энергия [кэВ]; *p*0, *p*1, *p*2 — коэффициенты аппроксимации.

С целью исследований температурных зависимостей GAGG рассеивателя проведено тестирование детектора в ди-



Puc. 13 Фотографии детектора " GAGG рассеиватель" в разобранном (слева) и собранном (справа) видах



Puc.~14. Амплитудные спектры и энергетические разрешения в промежуточном GAGG рассеивателе, полученные при облучении детектора гамма-источниками $^{241}{\rm Am}$ (синяя линия) и $^{57}{\rm Co}$ (чёрная линия)

апазоне от 10 °C до 50 °C по амплитудному отклику к гамма-источнику ¹³⁷Cs. В результате исследований были получены температурные зависимости положения и энергетического разрешения пика, соответствующего поглощённой сцинтиллятором энергии 662 КэВ (рис. 17).

Созданный сцинтилляционный GAGG детектор позволяет регистрировать низкую энергию отдачи электронов с порогом около 1-2 кэВ, см. рис. 18. Это достигается благодаря высокому световому выходу GAGG сцинтиллятора, квантовой эффек-



Puc.~15. Амплитудные спектры и энергетические разрешения в промежуточном GAGG рассеивателе при облучении детектора гамма-источниками $^{137}\mathrm{Cs}~(\mathrm{вверхy})$ и $^{22}\mathrm{Na}~(\mathrm{внизy})$

тивности ~50% кремниевого фотоумножителя и процедуре обработки формы сигнала с детектора, подавляющей шумы используемой аналоговой электроники.

Поскольку триггер событий в установке не требует регистрации рассеянного фотона в NaI(Tl) счётчике, часть событий в амплитудном спектре GAGG рассеивателя формируют пик в районе 170 кэВ (рис.18 и рис.19, слева). События в данном пике соответствуют рассеянию фотонов в основном рассеивателе на 180 и их дальнейшему поглощению в GAGG сцинтилляторе. Этот пик используется для постоянной кали-



Рис. 16. Зависимость энергетического разрешения GAGG детектора от выделенной в сцинтилляторе энергии



Puc. 17. Температурные зависимости положения пика (слева) и энергетического разрешения пика (справа), соответствующего поглощённой сцинтиллятором GAGG энергии 662 КэВ

бровки детектора в процессе набора экспериментальных данных. Максимальный относительный сдвиг положения пика 170 кэВ во время проведения эксперимента составил около 20% (рис. 19, справа).

В **пятой** главе приведены основные результаты, которые были получены за время эксплуатации установки по изучению аннигиляционных запутанных и декогерентных фотонов [АЗ]. Выполнены сравнения азимутальных угловых корреля-



Puc. 18. Слева — энергетический спектр в GAGG рассеивателе, полученный в эксперименте по регистрации декогерентных аннигиляционных фотонов за всё время эксперимента. Справа — энергетический спектр в GAGG сцинтилляторе при условии регистрации рассеянного фотона NaI(Tl) счётчиком



Рис. 19. Слева — энергетический спектр в GAGG рассеивателе, полученный за 2 часа набора данных. Пик соответствует энергии 170 кэВ. Справа — временной дрейф положения амплитудного пика 170 кэВ в течение всего периода набора экспериментальных данных

ций максимально запутанных и декогерентных фотонов. По результатам анализа данных была выявлена необходимость в более детальном изучении эффекта декогеренции фотонов с использованием дополнительного комптоновского рассеивателя лучшего качества. Приводятся результаты тестирования сцинтилляционного $SrI_2(Eu)$ детектора, который имеет лучшие световой выход и энергетическое разрешение, чем у ранее использованного GAGG детектора. Обсуждаются пути модернизации установки для проведения дальнейших более точных измерений квантовых корреляций в системе аннигиляционных фотонов.



Puc 20. Слева — азимутальные угловые корреляции для максимально запутанных пар фотонов. Справа — азимутальные угловые корреляции для декогерентных пар фотонов, рассеянных на малый угол

Основной задачей рассматриваемого эксперимента является сравнение поляризационных корреляций в комптоновском рассеянии различных (максимально запутанных и декогерентных) двух – фотонных состояний. Были получены результаты угловых азимутальных корреляций и проведено их сравнение для максимально запутанных и декогерентных фотонов, см. рис. 20. Черные треугольники на графиках обозначают экспериментальные точки. Красная кривая — результат аппроксимации экспериментальных точек функцией $N(\Delta \phi) = A - B \cos(2\Delta \phi)$.

Далее коэффициенты A и B используются для расчета параметра R, представляющего отношение максимального и минимального значений угловых корреляций: $R(\theta=90)=\frac{A+B}{A-B}$. Полученные для каждого случая значения параметра R показаны в виде вставок на рис. 20.

Результаты анализа различных групп декогерентных событий обнаружили, что в процессе комптоновского рассеяния на малый угол не происходит значительной декогеренции квантовой системы, хотя она и должна перейти из чистого максимально запутанного состояния в смешанное, с частиным сохранением запутанности. Это приводит к достаточно неожиданному выводу, что квантовые корреляции максималь-



 $Puc.\,21.$ Слева — фотография кубического сцинтиллятора $\rm SrI_2(Eu),$ обернутого светоотражающей тефлоновой лентой. Справа — плата с матрицей фотодиодов S14161-3050HS-04

но запутанных фотонов практически совпадают с такими же корреляциями декогерентных фотонов, по крайней мере, для относительно малых углов комптоновского рассеяния.

Наблюдаемый эффект почти полной идентичности поляризационных корреляций в системе аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях требует дальнейшего экспериментального исследования. В частности, планируется более детальное изучение зависимостей поляризационных корреляций от энерговыделения в промежуточном рассеивателе. Планируется улучшить промежуточный комптоновский рассеиватель для осуществления таких планов. Значительным улучшением данного детектора может являться замена GAGG сцинтиллятора на [A6].

Были проведены исследования параметров детектора со съёмом сигнала матрицей кремниевых фотоумножителей S14161-3050HS-04 (рис. 21). Задачами тестов были определение абсолютного светосбора детектора и его энергетического разрешения с использованием амплитудных спектров от гамма-источника ²⁴¹Am.

С использованием шумового спектра кремниевого фотоумножителя и амплитудных спектров от источника ²⁴¹Am было получено абсолютное значение светосбора — 28.6 ф.э./кэB, см. рис.22.

На втором этапе исследований была определена зависимость энергетического разрешения детектора от выделенной



Рис. 22. Слева — шумовой спектр с матрицы кремниевых фотоумножителей S14161-3050HS-04. Справа — амплитудный спектр, полученный на детекторе от гамма-источника ²⁴¹Am



Puc.~23.Слева — амплитудный спектр от источника $^{241}\mathrm{Am}.$ Справа — соответствие полученных пиков спектра гамма-линиям источника $^{241}\mathrm{Am}.$ Числа на графиках соответствуют энерговыделениям в кэВ

в нём энергии. С этой целью были измерены положения и ширины нескольких пиков в амплитудном спектре от источника ²⁴¹Am (рис. 23).

Была получена зависимость энергетического разрешения от энерговыделения в сцинтилляторе $SrI_2(Eu)$, а ее сравнение с аналогичной зависимостью для GAGG детектора приведено на рис. 24. Полученные результаты показывают, что замена сцинтиллятора GAGG в промежуточном рассеивателе на инновационный $SrI_2(Eu)$ детектор позволит понизить порог регистрации энерговыделений до 0.3-0.5 кэВ и улучшить энергетическое разрешение детектора почти в три раза.

В заключении представлены результаты, полученные в рамках проектирования, создания и эксплуатации установки, предназначенной для исследования поляризационных корре-



Puc.24. Зависимость энергетического разрешения $SrI_2(Eu)$ детектора (синяя кривая) и GAGG детектора (красная кривая) от энерговыделения в сцинтилляторе

ляций аннигиляционных фотонов в различных (максимально запутанных и декогерентных) квантовых состояниях. Также представлены результаты работы установки в 2021–2023 годах.

В рамках данной работы были получены 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 $\frac{\sigma_E}{E} \sim 3.2\%$ для гамма-линии 511 кэВ и обеспечивает надежную идентификацию рассеянных под углом 90⁰ аннигиляционных фотонов.
- 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.
- 5. Разработана и изготовлена уникальная конструкция экспериментальной установки, обеспечивающая большой телесный угол регистрации фотонов и азимутальную симметрию установки, необходимую для компенсации возможных систематических ошибок.
- 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).
- Учитывая полученные экспериментальные данные, предложены методы модернизации экспериментальной установки. В частности, замена сцинтиллятора GAGG в промежуточном рассеивателе на инновационный сцинтиллятор SrI₂(Eu) позволит понизить порог регистрации энерговыделений до 0.3–0.5 кэВ и улучшить энергетическое разрешение детектора почти в три раза.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- A1. D. Abdurashitov, A. Baranov, D. Borisenko, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, I. Tkachev, V. Volkov, B. Zhuikov, "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.
- A2. 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.
- A3. A. Strizhak, D. Abdurashitov, A. Baranov, D. Borisenko, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov, S. Musin, V. Volkov, "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.
- A4. A. Ivashkin, D. Abdurashitov, A. Baranov, F. Guber, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, I. Tkachev, "Testing entanglement of annihilation photons," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, p. 7559, May 2023, doi: 10.1038/s41598-023-34767-8.
- А5. А.Г. Баранов, А.П. Ивашкин, С.А. Мусин, Г.Х. Салахутдинов и А.О. Стрижак, "Сцинтилляционные детекторы комптоновских поляриметров для измерения поляризационных состояний аннигиляционных фотонов," Приборы и техника эксперименma, 2, 2024, doi: 10.31857/S0032816224020055.
- A6. 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, pp. 1088–1094, 2024, doi: 10.1134/ S0020441224701999.

Список литературы

 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, doi: 10.1038/ s41598-019-44570-z.

- P. Caradonna, D. Reutens, T. Takahashi, S. Takeda, and V. Vegh, "Probing entanglement in Compton interactions," *J Phys Commun*, vol.3, no.10, p.105005, Oct. 2019, doi: 10.1088/2399-6528/ab45db.
- [3] H. Langhoff, "Die Linearpolarisation der Vernichtungsstrahlung von Positronen," *Zeitschrift für Physik*, vol. 160, no. 2, pp. 186–193, Apr. 1960, doi: 10.1007/BF01336980.
- [4] M. Bruno, M. D'Agostino, and C. Maroni, "Measurement of linear polarization of positron annihilation photons," *Il Nuovo Cimento B Series 11*, vol. 40, no. 1, pp. 143–152, Jul. 1977, doi: 10.1007/BF02739186.
- [5] L.R.Kasday, J.D. Ullman, and C. S. Wu, "Angular correlation of compton-scattered annihilation photons and hidden variables," *Il Nuovo Cimento B Series 11*, vol. 25, no. 2, pp. 633–661, Feb. 1975, doi: 10.1007/BF02724742.
- [6] J.S. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen paradox," *Physics Physique Fizika*, vol. 1, no. 3, pp. 195–200, Nov. 1964, doi: 10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.
- [7] 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, doi: 10.1103/ PhysRev.108.1070.
- [8] "ADC64s2," http://afi.jinr.ru/ADC64s2.
- [9] HAMAMATSU, "https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/pmt_tube-alone/head-on-type/ R6231.html."
- [10]"Low breakdown voltage type MPPC for scintillation detector MPPC
 (Multi-Pixel Photon Counter)." [Online]. Available: www.hamamatsu.com
- [11]H. Yu, X. Meng, S. Yang, J. Zhao, X. Zhen, and R. Tai, "Photonic- crystals-based GAGG:Ce scintillator with high light output and fast decay time for soft X-ray detection," *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, vol. 1032, p. 166653, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.nima.2022.166653.

Научное издание

Баранов Александр Геннадьевич

Экспериментальная установка по измерению поляризационных корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Принято в печать 05.06.2025

Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 1,4 Зак. № 031/25 Тираж 80 экз. Бесплатно Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а