

УТВЕРЖДАЮ
Директор ОИЯИ
Трубников Г. В.

29.07. 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований

на диссертационную работу Баранова Александра Геннадьевича
**«Экспериментальная установка по измерению поляризационных
корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы
экспериментальной физики.

Актуальность темы диссертации.

Диссертационная работа А.Г. Баранова посвящена актуальной проблеме современной экспериментальной физики - разработке детекторных систем и специализированных электронных схем для изучения поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях. Данная работа имеет важное значение для развития квантовой оптики и исследований в области фундаментальных свойств фотонной запутанности, что открывает новые перспективы для квантовых технологий и прецизионных физических измерений.

Структура и содержание диссертации.

Диссертационная работа имеет четкую логическую структуру и включает: введение, пять содержательных глав, заключение с основными выводами, список литературы из 70 авторитетных источников.

Общий объем работы составляет 123 страницы, содержащие 71 иллюстрацию (графики, схемы и диаграммы), которые наглядно демонстрируют полученные результаты.

Во введении проведен детальный анализ исторического развития исследований запутанных аннигиляционных фотонов; четко сформулированы общая цель и конкретные задачи исследования; обоснована научная новизна работы; показана практическая значимость полученных результатов/ Представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о апробации результатов и личном вкладе автора.

В первой главе представлен комплексный аналитический обзор современных экспериментальных и теоретических исследований в области запутанных аннигиляционных фотонов.

В главе проведен критический анализ существующих теоретических моделей и их экспериментальных проверок, с особым акцентом на возможности верификации этих предсказаний на специализированной установке Института ядерных исследований РАН.

Систематизированы и детально рассмотрены фундаментальные свойства запутанных фотонных пар, включая особенности комптоновского рассеяния для таких состояний. Обсуждаются методологические принципы измерения поляризационных характеристик запутанных фотонов.

Во второй главе рассматриваются физико-технические основы разработанной экспериментальной установки для исследования квантовых состояний аннигиляционных фотонов.

В главе изложены фундаментальные физические принципы, положенные в основу конструкции установки, и представлена ее принципиальная схема. Детально описана оригинальная двухплечевая архитектура системы, где каждое плечо включает:

1. комптоновский поляриметр на основе полистирольного органического сцинтиллятора;
2. систему регистрации с вакуумными фотоэлектронными умножителями;
3. детекторный блок NaI(Tl) с ФЭУ для регистрации рассеянных фотонов.

Особое внимание уделено ключевым инновационным элементам установки: промежуточному комптоновскому рассеивателю, обеспечивающему селекцию декогерентных фотонов, и оптимизированному источнику аннигиляционных фотонов на основе позитронного излучателя

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. Основой аналоговой электроники экспериментальной установки является усилитель сигналов с кремниевого фотоумножителя ключевого детектора установки – промежуточного комптоновского рассеивателя GAGG. Важной частью используемой электроники являются электронные модули, формирующие триггерный сигнал. Система считывания экспериментальных данных установки основана на 64-канальном аналогово-цифровом преобразователе.

В четвертой главе обсуждаются сцинтилляционные детекторы, используемые в экспериментальной установке для создания двух систем комптоновских поляриметров. Последние включают основные комптоновские рассеиватели из органического сцинтиллятора на основе полистирола и детекторы рассеянных фотонов на неорганическом сцинтилляторе NaI(Tl). Особое внимание уделено промежуточному (дополнительному) комптоновскому рассеивателю. Рассмотрено устройство различных детекторов, параметры сцинтилляторов и фотодетекторов, а также методы калибровки используемых детекторов. Исследованы энергетические разрешения, температурные зависимости и пороги регистрации детекторов.

В пятой главе приведены основные результаты, полученные за время эксплуатации установки. Отмечено, что квантовые корреляции максимально запутанных фотонов практически совпадают с такими же корреляциями декогерентных фотонов для малых углов комптоновского рассеяния. Показано, что квантовую запутанность аннигиляционных фотонов невозможно использовать для подавления рассеянного фона в новом поколении позитрон-эмиссионной томографии (QE-PET). Наблюдаемый эффект требует дальнейшего экспериментального исследования, для чего планируется более детальное изучение зависимостей поляризационных корреляций от энерговыведения в промежуточном рассеивателе. Планируется улучшить параметры промежуточного комптоновского рассеивателя за счет замены GAGG сцинтиллятора на $\text{SrI}_2(\text{Eu})$. Показано, что новый сцинтиллятор $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ позволит понизить порог регистрации энерговыведений до 0,3-0,5 кэВ и улучшить энергетическое разрешение детектора почти в три раза.

В Заключении приводятся результаты, полученные при разработке, создании и эксплуатации установки, предназначенной для исследования поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных (максимально запутанных и декогерентных) квантовых состояниях.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1. 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 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.

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.

Достоверность полученных в данной работе результатов обусловлена докладами на международных конференциях и публикациями в ведущих научных журналах. Также, полученные на обсуждаемой экспериментальной установке результаты подтверждены другими международными экспериментальными группами.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы и 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).

Замечания. Существенных недостатков представленная диссертация не содержит. Тем не менее, по диссертации имеются замечания и некоторые пожелания:

1. В работе А.Г. Баранова детально описаны основные системы установки (детекторы, электроника, триггер, конструкция). Определяющий вклад диссертанта в разработку и создание этих систем неоспорим и подкреплён недавними публикациями А.Г. Баранова в журналах. Отметим, что защищённой годом ранее диссертации А.О. Стрижака “Измерение комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов”, на защиту выносилась экспериментальная установка в целом, как цельный инструмент для измерения исследуемых поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов. Представляется, что здесь нарушен хронологический порядок защиты диссертаций, поскольку было бы логично представить на защиту первой диссертацию А.Г. Баранова, поскольку именно в ней приведено описание систем установки, использовавшейся А.О. Стрижаком для получения физических результатов.

2. В пятой главе диссертации обсуждается модернизация существующей установки, в частности, использование инновационного сцинтиллятора $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ вместо существующего $\text{GAGG}(\text{Ce})$ промежуточного рассеивателя. Несмотря на значительные преимущества нового сцинтиллятора, он имеет один существенный недостаток, а именно, является сильно гигроскопичным. В то же время, в четвертой главе в требованиях к промежуточному рассеивателю указано отсутствие гигроскопичности во избежание присутствия пассивного материала на пути следования фотонов. Каким образом планируется избавиться от данного недостатка?

3. В третьей главе диссертации подробно описан триггер установки, но отсутствуют данные по эффективности триггера и частоты его срабатывания. Было бы интересно понять скорость записи событий, поскольку количество набранных событий определяет статистическую точность измерений исследуемых поляризационных корреляций.

4. При формировании пары запутанных фотонов важную роль играет коллиматор. В диссертации никак не обсуждается возможное нарушение когерентности за счет возможных взаимодействий гамма-квантов с веществом коллиматора с малыми передачами энергии.

5. Функция $f(E)$ на стр 88, использованная для описания поведения кривой на рис. 4.25, строго говоря, имеет представленный вид только в случае линейной зависимости количества регистрируемых фотонов, Q , от энергии. Для нелинейной зависимости $Q(E)$ параметры p_1 и p_2 будут зависеть от энергии.

6. На стр.92 приведена формула для температурной зависимости энергетического разрешения без указания единиц измерения.

7. Зачастую автор приводит слишком много десятичных знаков для численных значений параметров и/или их ошибок. Как пример: на рис.5.4 параметр $A=138$ с ошибкой 2.936. Поскольку основное значение приведено с точностью до единиц, то и ошибку следовало бы округлить до той же значащей цифры, $A=138\pm 3$.

8. На рис.5.7 представлен спектр с матрицы кремниевых ФЭУ, использовавшийся для амплитудной калибровки. В спектре отсутствует пьедестал, по-видимому, он “отрезан” порогом дискриминатора. В тексте нет обсуждения соответствующего измерения. Ненулевое значение пьедестала приведёт к смещению калибровки.

9. В тексте диссертации используется десятичная точка вместо принятой в русскоязычной литературе запятой.

10. В диссертации присутствует значительное количество опечаток. Так

- стр.15 и 21 пропущена вторая “а” в фамилии Ааронов;

- стр. 35: "сцинтиллятор GAGG(Ce) имеет минимальное времени высвечивания" вместо "имеет минимальное время высвечивания";
- стр. 95 "аннигиляционных фотонов" вместо "аннигиляционных";
- стр. 117 (Список сокращений) "сиинтиллятор" вместо "сцинтиллятор".

Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в какой мере не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов.

Заключение. Диссертация А.Г. Баранова является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для развития экспериментальных методов в ядерной и квантовой физике. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация А.Г. Баранова на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Результаты диссертационной работы Баранова А.Г. были представлены, обсуждены и одобрены на научном семинаре Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований 5 июня 2025 года.

Директор ЛЯП ОИЯИ

Доктор физико-математических наук Е.А.Якушев

Отзыв составил

ведущий научный сотрудник,

лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова,

доктор физико-математических наук О. Ю. Смирнов

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛЯП
e-mail: osmirnov@jinr.ru
Тел: +7(496)2163518

Подпись О. Ю. Смирнова удостоверяю,
Учёный секретарь
лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова И. В. Симоненко
Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛЯП
e-mail: titkova@jinr.ru
Тел.: +7(496)2162431

Сведения о ведущей организации

по защите диссертации Баранова Александра Геннадьевича
**«Экспериментальная установка по измерению поляризационных
корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов»**,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы
экспериментальной физики.

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ОИЯИ
Ведомственная принадлежность	Правительство РФ
Почтовый индекс, адрес организации	141980, Российская Федерация, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, д.6.
Телефон	Тел. (496) 216-50-59
Адрес электронной почты	post@jinr.ru
Веб-сайт	https://www.jinr.ru/

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации
соискателя

в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. O. Smirnov, "Note on intrinsic resolution in liquid organic scintillators"// JINST 18 (2023) 10, P10026.
2. O. Smirnov, D. Korablev, A. Sotnikov et al., "Magnetic shielding for large photoelectron multipliers for the OSIRIS facility of the JUNO detector"// JINST 18 (2023) 04, P04015.
3. N. Anfimov, T. Antoshkina, A. Bolshakova, ... O.Smirnov et al. (JUNO Collaboration), "Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO"//Eur.Phys.J.C 82 (2022) 12, 1168
4. A.S. Selyunin, N.V. Anfimov, K.I. Kuznetsova, A.V. Rybnikov, D.V. Fedoseev et al., "Method for Studying Characteristics of Light Readout Systems in Liquid Argon"//Phys.Part.Nucl.Lett. 21 (2024) 1, 55-59.
5. A.V. Rybnikov, N.V. Anfimov, D.V. Fedoseev, S.A. Sokolov, A.P. Sotnikov, "Optical Fiber Splitter for Photodetector Testing."//Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 6, 797-802.

6. C. Liu,..., N.Anfimov, .., A.G. Olshevskiy, et al., "Check on the features of potted 20-inch PMTs with 1F3 electronics prototype at Pan-Asia"//JINST 18 (2023) 02, P02003

Список удостоверяю,

Учёный секретарь

лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова И. В. Симоненко

Международная межправительственная организация

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

141980, Дубна, ул. Жолио Кюри 6, ЛЯП

e-mail: titkova@jinr.ru

Тел.: +7(496)2162431