

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от **20.06.2024 г. № 15/8**

О присуждении Стрижаку Александру Олеговичу, гражданину
Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация “Измерение комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики, принята к защите 28.03.2024 г., протокол № 12/5, диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Стрижак Александр Олегович, 1996 года рождения. В 2020 году соискатель освоил программу магистратуры с отличием Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки «03.04.01 - Прикладные математика и физика», (диплом 107724 4872526, выданный 17 июля 2020 г.). В 2020 году поступил в аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики, где и обучается в настоящий момент. В настоящее

время работает в должности младшего научного сотрудника отдела экспериментальной физики ИЯИ РАН.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, в отделе экспериментальной физики.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Ивашкин Александр Павлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел экспериментальной физики, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Балдин Антон Александрович, доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), Лаборатория физики высоких энергий, «Научно экспериментальный отдел теоретической и методической поддержки проектов», начальник отдела.

Кузаков Константин Алексеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, профессор.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) – в своем положительном заключении, подписанном Позаненко Алексеем Степановичем, кандидатом физико-математических наук, руководителем сектора быстропеременных космических источников лаборатории наблюдательной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии и утвержденном директором ИКИ РАН, доктором физико-математических наук, Петруковичем Анатолием Алексеевичем.

указала, что работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября

2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель имеет 5 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при непосредственном участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ, по результатам диссертационного исследования:

1. Abdurashitov D. et al. Setup of Compton polarimeters for measuring entangled annihilation photons // Journal of Instrumentation. – 2022. Vol. 17. – P. 03010.
2. Strizhak A. et al. Setup to study the Compton scattering of entangled annihilation photons // J Phys Conf Ser. – 2022. – Vol. 2374. – P. 12041.
3. Ivashkin A. et al. Testing entanglement of annihilation photons // Sci Rep. – 2023. – Vol. 13. – P. 7559.
4. Strizhak A. et al. Study of the Compton Scattering of Entangled Annihilation Photons // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2022. – Vol. 19. – P. 509-512.
5. Musin S., Ivashkin A., Strizhak A. Monte Carlo Simulation of the Experimental Setup for Studying Entangled Annihilation Photons // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2022. – Vol. 19. – P. 681-684.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация написана хорошим грамотным языком, содержит важные научные и методические результаты, имеющие большое фундаментальное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским

диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

1. В начале первой главы автор дает определение запутанной системы, как такой, в которой отдельную подсистему нельзя описать собственным вектором состояния. Однако, далее обсуждается незапутанное смешанное состояние (1.2), в которое коллапсирует запутанное состояние (1.1) в результате измерения, но при этом отдельную подсистему в (1.2) нельзя описать собственным вектором состояния.

2. Экспериментальные результаты для азимутальных угловых корреляций в случае декогерентных фотонов согласуются с теоретическим предсказанием работы [52] для сепарабельного состояния (1.2). Но при этом отсутствует обсуждение того, почему в результате комптоновского рассеяния одного из фотонов в промежуточном рассеивателе с большой вероятностью формируется именно состояние (1.2), а не другое сепарабельное состояние.

3. В разделе 1.5 первой главы обсуждается, что для аннигиляционных фотонов наблюдается нарушение неравенства Белла, скорректированного на анализирующую способность комптоновских поляриметров. Однако, в разделе 5.7 пятой главы, где автором приведены полученные экспериментальные результаты, свидетельствующие о ненарушении неравенства Белла, корректировка на анализирующую способность не используется. В то же время, если применить указанную корректировку к полученным результатам, неравенство Белла нарушается. В этой связи возникает закономерный вопрос: как можно объяснить наблюдаемое нарушение скорректированного неравенства Белла не только в случае запутанных, но и в случае декогерентных фотонов?

4. В статье A Strizhak et al “Setup to study the Compton scattering of entangled annihilation photons” были представлены результаты, полученные на установке без использования промежуточного рассеивателя. В диссертации данные результаты недостаточно упоминаются, хотя они представляют определенный интерес, так как наличие дополнительного вещества на пути фотонов вносит неопределённость в идентификацию квантового состояния. А именно, некоторая часть событий с энерговыведением в промежуточном рассеивателе ниже порога регистрации может быть ложно воспринята как фотоны в максимально запутанном состоянии.

5. В диссертации достаточно кратко отражена временная калибровка детекторов установки, поскольку, как было заявлено, она слабо влияет на итоговые результаты измерений. Было бы интересно увидеть рисунки, подтверждающие данное утверждение.

6. В эксперименте исследуются аннигиляционные фотоны, рождённые при электрон-позитронной аннигиляции в металле (алюминиевой мишени). Возникает вопрос о том, являются ли такие аннигиляционные фотоны максимально запутанными, поскольку они рождаются в присутствии электромагнитных полей атомов металла.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, является оригинальным, завершённым и логически согласованным исследованием, но не лишена небрежностей и неточностей в оформлении, грамматических и стилистических ошибок. В ходе защиты соискатель Стрижак А.О. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и согласился с замечаниями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Была создана оригинальная экспериментальная установка для исследования комптоновского рассеяния максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов. Используемые в установке комптоновские поляриметры установки обладают высокой анализирующей способностью $A \approx 0.65$, что близко к максимальному теоретическому значению

$A=0.67$. Высокая анализирующая способность установки позволяет получить высокую точность определения поляризации начальных фотонов.

2. Разработаны методы анализа форм сигналов с различных детекторов установки. В результате применения данных методов в анализе удалось снизить энергетические пороги регистрации сигналов до энергии 1 кэВ, что позволяет надежно идентифицировать процесс декогеренции максимально запутанных фотонов. Также, с помощью разработанных методов удалось получить временное разрешение органического сцинтилляционного детектора, которое на порядок ниже времени оцифровки АЦП.

3. Разработаны методы интервальной энергетической калибровки сцинтилляционных детекторов различных типов с использованием отбора на фиксированные углы в процессе комптоновского рассеяния. Использование разработанного подхода позволяет с точностью лучше 1% учесть температурный дрейф отклика детекторов.

4. Сравнение результатов измерения азимутальных корреляций и корреляционных функций неравенства Белла позволяют сделать вывод об отсутствии разницы в поляризационных корреляциях в комптоновском рассеянии для запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. Проведённый эксперимент позволил впервые сравнить кинематики комптоновского рассеяния максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов. Полученные результаты позволяют глубже исследовать свойства запутанных состояний. Результаты данного эксперимента помогут прояснить противоречивые результаты теоретического описания процессов комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов.

2. Полученное отношение максимального к минимальному количеству пар фотонов, зарегистрированных в детекторах NaI(Tl) противоположных плеч, составляет $R_{entangled} \approx 2.43 \pm 0.02$ для максимально запутанного состояния и $R_{decoherent} \approx 2.41 \pm 0.10$ для декогерентного состояния. Их равенство в пределах статистической ошибки показывает близость

кинематик комптоновского рассеяния в обоих процессах и ставит под вопрос гипотезу о полной потере запутанности пары с переходом в смешанное состояние в результате комптоновского рассеяния.

3. Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что в настоящее время несколько международных групп занимаются разработкой нового поколения позитрон-эмиссионного томографа, использующего предполагаемую разницу в угловых распределениях при рассеянии запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов для подавления фонов, возникающих в результате рассеяния фотонов в веществе. Такое рассеяние приводит к декогеренции начальной пары. Однако, экспериментально такая разница показана не была. Полученные результаты показывают невозможность такой концепции томографов.

Таким образом, полученные в диссертации результаты имеют большую практическую ценность и могут улучшить понимание запутанных состояний и процесса декогеренции. В работе раскрыты противоречия с гипотезой о потере запутанности аннигиляционными фотонами и переходе в смешанное состояние в результате комптоновского рассеяния одного из фотонов пары.

Оценка достоверности результатов выявила, что результаты получены на сертифицированном оборудовании, а калибровки детекторов установки тщательно выполнены. В диссертации были получены результаты для азимутальной корреляции и корреляционной функции запутанных фотонов, согласующиеся с результатами других групп и предыдущих исследований. Кроме этого, полученные в эксперименте корреляции для запутанных фотонов подтверждаются результатами, полученными при моделировании.

Личный вклад соискателя состоит в получении основных результатов диссертации, выносимых на защиту. Автор занимался разработкой экспериментальной установки, тестированием и калибровкой детекторов установки, созданием системы считывания и хранения экспериментальных данных в формате root-дерева, удобного для хранения большого объёма данных. Автором были разработаны методы анализа экспериментальных данных, позволившие получить низкий энергетический порог регистрации

процесса декогеренции пары аннигиляционных фотонов. Лично автор принимал непосредственное участие в подготовке основных публикаций по теме диссертации, а также в процессе апробации результатов исследования.

На заседании 20 июня 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Стрижаку Александру Олеговичу ученую степень кандидата физико-математических наук за разработку и проведение эксперимента, позволяющего более подробно изучить свойства запутанности аннигиляционных фотонов в запутанном и декогерентном квантовых состояниях.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **21** человека, из них **9** докторов наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - **21**, против - **0**, недействительных бюллетеней - **0**.

Председатель

диссертационного совета 24.1.163.01

доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01

кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С.В.

20.06.2024 г.

М.П.