

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН  
А.А. Петрукович

---

« 07» мая 2024 г.

**Отзыв ведущей организации**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт**  
**Космических Исследований Российской академии наук**  
на диссертационную работу Стрижака Александра Олеговича  
**«Измерение комптоновского рассеяния 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.О. Стрижака посвящена исследованию комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов в максимально запутанном и декогерентном квантовых состояниях. Исследование таких квантовых состояний является одной из наиболее актуальных тем в современной физике. Уникальные свойства подобных состояний востребованы в широком спектре приложений, которые в настоящее время характеризуются общим понятием, как вторая квантовая революция. Система максимально запутанных высокоэнергичных фотонов, рождаемых в аннигиляции электрон-позитронных пар, занимает особое место в квантовой физике. Именно с аннигиляционных фотонов во второй половине двадцатого века началась эра исследования квантовых запутанных состояний и проверка знаменитого ЭПР-парадокса. К сожалению, данная система была незаслуженно забыта на протяжении полувека, когда основной фокус исследований сместился в область атомной физики и квантовой оптики. И только около десяти лет назад интерес к квантовым свойствам аннигиляционных фотонов снова возродился в связи с их использованием в позитрон-эмиссионной томографии (ПЭТ). Предполагаемая разница в

кинематике комптоновского рассеяния изначально запутанных и декогерентных фотонов способствовала развитию нового поколения ПЭТ, где подавление рассеянного фона в исследуемом объекте должно было осуществляться благодаря идентификации максимально запутанных и декогерентных состояний. В настоящее время разработкой таких ПЭТ занимаются несколько международных групп.

Вызывает удивление тот факт, что сравнение кинематики рассеяния запутанных и декогерентных фотонов не было выполнено вплоть до последнего времени. Основным достоинством данной диссертации является исправление данного недостатка, что и обуславливает актуальность и значимость исследований, проведенных диссертантом.

В диссертации подробно обсуждается созданная экспериментальная установка, позволившая провести сравнение процессов комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов. Полученные экспериментальные данные и выполненный анализ этих данных обеспечили надежные результаты этого исследования.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка литературы из 104 наименований. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, включает в себя 60 рисунков.

**Введение** включает в себя краткий обзор современного состояния области исследований. В нём определены цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна, обосновывается актуальность проводимого исследования. Приведены выносимые на защиту положения и их научная и практическая значимость. Дана информация об апробации полученных результатов, сделанных по результатам работы публикациях, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена описанию современной ситуации в исследовании свойств максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов. В ней приводится теоретическое обоснование запутанного состояния аннигиляционных фотонов, а также способы экспериментального доказательства запутанности пары фотонов. В главе подробно рассмотрены предыдущие эксперименты, в которых исследовалось комптоновское рассеяние аннигиляционных фотонов.

**Во второй главе** описаны принципы работы комптоновских поляриметров, являющихся единственным инструментом исследования поляризационных состояний высокоэнергетических фотонов. Подробно

описывается созданная в ИЯИ РАН экспериментальная установка ИЗАФ (Исследование Запутанных Аннигиляционных Фотонов). Установка состоит из двух плеч, расположенных симметрично относительно источника аннигиляционных фотонов. Каждое плечо состоит из основного рассеивателя, изготовленного из пластмассового сцинтиллятора и 16 NaI(Tl) сцинтилляционных счётчиков, которые измеряют фотоны, рассеянные под прямым углом. Счётчики расположены под азимутальным углом  $\pi/8$  друг относительно друга, что соответствует максимальной чувствительности неравенства Белла к доказательству запутанности фотонов. Принципиально важным элементом установки является промежуточный рассеиватель, в котором при комптоновском рассеянии фотона происходит декогеренция изначально максимально запутанного состояния с переходом в смешанное состояние. Описаны причины, повлиявшие на выбор сцинтиллятора GAGG(Ce) в качестве промежуточного рассеивателя, такие как высокий световыход, хорошие временные параметры, негигроскопичность и высокая плотность.

**Третья глава** посвящена разработанной системе считывания и записи экспериментальных данных. Запись сигнала на носитель осуществляется с помощью 64-х канального АЦП в формате root-дерева. Данный формат широко распространён в физике высоких энергий и обладает средой для удобного анализа экспериментальных данных. Созданная система записи поддерживает запись кадра переменной длины, что способствует значительному уменьшению объёма экспериментальных данных. В главе обсуждается процедура редукции данных с сохранением важнейших амплитудных и временных параметров сигнала. Для определения времени прихода сигнала был разработан метод нахождения среднего времени по форме сигнала, позволивший получить временное разрешение на порядок лучше временного шага оцифровки АЦП. В процессе первичного анализа экспериментальных данных отдельно идентифицировались взаимодействия в промежуточном рассеивателе. Был разработан метод надёжного выделения низкоэнергетических сигналов в промежуточном рассеивателе с энергией выше 1 кэВ. Такие декогерентные события с минимальным энерговыделением в промежуточном рассеивателе максимально близки по кинематике рассеяния к запутанным фотонам.

**В четвёртой главе** обсуждается процедура анализа экспериментальных данных, приведены энергетические и временные спектры, полученные в различных детекторах установки. Пристальное внимание уделено процедуре повременной интервальной энергетической калибровки данных. Такая

процедура необходима при длительном наборе экспериментальных данных в условиях нестабильной температуры окружающей среды, что приводило к дрейфу коэффициентов усиления фотодетекторов и, соответственно, энергетических спектров сцинтилляционных детекторов. В процессе набора данных происходила энергетическая калибровка всех детекторов в фиксированном временном интервале. Точность полученной энергетической калибровки сцинтилляционных детекторов составляет лучше 1%. Также, в главе проведено исследование временного разрешения различных детекторов установки.

**Пятая глава** посвящена полученным на установке результатам измерений комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов в максимально запутанном и декогерентном состояниях. В главе подробно описаны основные методы исследования квантовых состояний по угловым азимутальным распределениям рассеянных фотонов и по корреляционной функции в неравенстве Белла. С помощью обоих методов было проведено изучение комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов для запутанного и декогерентного состояний. В главе приведено детальное исследование корреляций декогерентных пар для нескольких групп событий, соответствующих различным процессам рассеивания. Полученные результаты указывают на идентичность корреляций в рассеянии как изначальных, максимально запутанных, так и подвергшихся процессу декогеренции аннигиляционных фотонов. Согласно данным результатам, использование квантовой запутанности в ПЭТ не приведет к подавлению рассеянного фона и улучшению качества изображения. Отметим, что полученные результаты являются достаточно неожиданными, но, тем не менее, они подтвердились в недавних работах других экспериментальных групп, занимающихся разработкой ПЭТ нового поколения.

**В Заключении** суммируются основные результаты диссертационной работы и приводятся основные результаты, полученные на установке.

**Научная новизна** данной работы заключается в следующем:

1. Была создана уникальная экспериментальная установка для исследования корреляций в комптоновском рассеянии максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов. Осевая симметрия установки позволяет минимизировать систематические ошибки, возникающие из-за возможных неточностей в расположении отдельных детекторов установки. Наличие промежуточного рассеивателя позволяет получить декогерентные пары фотонов.

2. В установке был разработан и использован метод контролируемого получения некогерентных аннигиляционных фотонов. Процесс декогеренции происходил при комптоновском рассеянии в сцинтилляторе GAGG(Ce).
3. Был разработан и реализован в виде программного пакета оригинальный метод энергетической калибровки, позволяющий с высокой точностью учесть температурный дрейф энергетических спектров.
4. Для созданной установки были разработаны методы получения азимутальных угловых распределений и корреляционных функций в неравенстве Белла.
  5. С использованием разработанных методов и подходов получены новые физические результаты по угловым распределениям и корреляционным функциям для максимально запутанных и некогерентных аннигиляционных фотонов.

**Основные положения** диссертационной работы состоят в следующем:

1. Создана экспериментальная установка по исследованию комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов, состоящая из двух плеч из комптоновских поляриметров, расположенных с шагом  $\pi/8$ . Для создания некогерентных пар фотонов у одного из плеч расположен промежуточный сцинтилляционный GAGG(Ce) детектор, регистрация взаимодействия в котором позволяет выделять некогерентные пары аннигиляционных фотонов.
2. Разработана система считывания сигналов с быстрых АЦП и их записи в широко распространённом в физике высоких энергий формате root-дерева. Данная система позволяет записывать экспериментальные данные в переменном временном окне.
3. Разработаны методы анализа форм сигналов с АЦП с применением фильтрации по скорости роста сигнала. Применение данного подхода позволило надёжно регистрировать события с энергосвободением выше 1 кэВ в промежуточном рассеивателе, а также получить необходимые энергетические и временные разрешения детекторов.
4. Создан метод интервальной энергетической калибровки сцинтилляционных детекторов установки с использованием процессов комптоновского рассеяния под фиксированными углами.

Разработанный подход позволяет проводить получить точность энергетической калибровки лучше 1%.

5. Разработаны методы анализа экспериментальных данных, позволяющие определить угловые азимутальные распределения и корреляционные функции неравенства Белла в комптоновском рассеянии аннигиляционных фотонов.
6. Получены результаты измерений азимутальных угловых распределений и корреляционной функции неравенства Белла для аннигиляционных фотонов в максимально запутанном и декогерентном квантовых состояниях. Проведено сравнение поляризационных корреляций для обоих квантовых состояний.

**Достоверность и обоснованность** впервые полученных результатов подтверждаются недавними исследованиями других независимых экспериментальных групп. Результаты, полученные в диссертационной работе, были доложены на нескольких международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы.

Полученные результаты имеют безусловную **научную и практическую значимость**. Данные результаты указывают на невозможность использования квантовой запутанности в ПЭТ для подавления рассеянного фона и улучшения качества изображения.

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

**Апробация результатов работы и публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 7 научных публикациях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, а 2 - в материалах конференций. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях.

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

1. 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 почти не 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.

2. 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.

3. В тексте диссертации постоянно используются термины “максимально запутанные состояния” и просто “запутанные состояния”, значения и разница которых недостаточно объяснены.

4. В эксперименте исследуются аннигиляционные фотоны, рождённые при электрон-позитронной аннигиляции в металле (алюминиевой мишени). Можно ли считать такие аннигиляционные фотоны максимально запутанными, поскольку они рождаются в присутствии электромагнитных полей атомов металла?

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

**Заключение.** Диссертация А.О. Стрижака является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для квантовой физики. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация А.О. Стрижака на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного 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 были представлены и обсуждены 10 апреля 2023 года на научно-техническом семинаре отдела 64 «Наблюдательной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии» ИКИ РАН.

Отзыв подготовил

к.ф.-м.н. А.С. Позаненко

Секретарь НТС отдела 64

к.ф.-м.н. М.В. Глушихина

Подписи подтверждаю

Директор ИКИ РАН

чл. корр. РАН А.А. Петрукович



## Сведения о ведущей организации

по защите диссертации Стрижака Александра Олеговича  
«Измерение комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов» 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	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Космических Исследований Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ИКИ РАН
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	117997, Российская Федерация, г.Москва, ул. Профсоюзная д.84/32
Телефон	(495) 333-52-12, 333-25-88
Адрес электронной почты	<a href="mailto:iki@cosmos.ru">iki@cosmos.ru</a>
Веб-сайт	<a href="https://iki.cosmos.ru/">https://iki.cosmos.ru/</a>

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя

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

1. Pavlinsky, M. et al. The ART-XC telescope on board the SRG observatory// Astronomy and Astrophysics, 2021. – vol. 650.
2. Predehl, P. et al. The eROSITA X-ray telescope on SRG // Astronomy and Astrophysics, 2021. – vol. 647.
3. Pavlinsky, M. et al. On-ground calibration of the ART-XC/SRG mirror system and detector unit at IKI. Part II // Experimental Astronomy, 2019. – vol. 47, no. 1–2, pp. 1–27.
4. Pavlinsky, M., et al. On-ground calibration of the ART-XC/SRG mirror system and detector unit at IKI. Part III // Experimental Astronomy, 2019. – vol. 48, no. 2–3, pp. 233–244.
5. Khorkin, V. S. et al. ExoMars-2022 Mission ODS Instrument: Modeling and Ground Field Measurements, 2023 // Solar System Research. – vol. 57, no. 4,

pp. 324–335.

6. Mokrousov, M. I. et al. The Second Stage of BTN Neutron Space Experiment onboard the Russian Section of the International Space Station: the BTN-M2 Instrument // *Cosmic Research*, 2022. – vol. 60, no. 5, pp. 387–396.
  7. Malakhov, A. V. et al. Physical Calibrations of the FRENDA Instrument Installed Onboard TGO Martian Orbiter, 2022 // *Cosmic Research*. – vol. 60, no. 1, pp. 23–37.
  8. Serbinov, D. V. et al. MVN experiment - All sky monitor for measuring cosmic X-ray background of the universe onboard the ISS // *Experimental Astronomy*, 2021. – vol. 51, no. 2, pp. 493–514.
- Sunyaev, R. et al. SRG X-ray orbital observatory. Its telescopes and first scientific results // *Astronomy and Astrophysics*, 2021. – vol. 656.