

Отзыв

официального оппонента Кузакова Константина Алексеевича на диссертацию 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.

Диссертационная работа Стрижака Александра Олеговича посвящена экспериментальному изучению комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов в максимально запутанном и декогерентном квантовых состояниях. Запутанные квантовые состояния, а также динамика запутанности при квантовых измерениях являются одной из самых актуальных тем современной фундаментальной физики. Истоки изучения данной темы тесно связаны с ЭПР-парадоксом, в результате анализа которого и возникло понятие запутанности. Изначально исследования данного феномена проводились именно на аннигиляционных фотонах. Однако, из-за низкой точности измерения поляризации гамма-квантов высокой энергии с помощью комптоновских поляриметров, фокус внимания сместился в сторону оптических фотонов, поляризацию которых можно определять очень точно. Интерес к квантовым состояниям аннигиляционных фотонов вновь возник благодаря разработке нового поколения позитрон-эмиссионных томографов (ПЭТ). Концепция новых ПЭТ предполагает использование различия в азимутальных угловых корреляциях максимально запутанных и декогерентных фотонов для подавления фона рассеянных фотонов и улучшения качества изображения. Однако, теоретически предсказанная разница в процессах комптоновского рассеяния экспериментально подтверждена не была. Именно данное важное исследование является центральным в работе диссертанта, а основное внимание сконцентрировано на созданной в ИЯИ РАН установке по исследованию запутанности аннигиляционных фотонов (эксперимент ИЗАФ). Полученные на установке результаты для аннигиляционных фотонов полностью согласуются с теоретическими расчетами и предыдущими экспериментальными данными, что подтверждает достоверность и надёжность обсуждаемой работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Список литературы состоит из 104 наименования. Полный объем диссертации составляет 126 страниц и включает в себя 60 рисунков.

Во **введении** представлен краткий обзор современного состояния области исследования. Также, во введении указывается цель диссертационной работы, описываются задачи, стоящие перед автором, упоминается научная новизна исследования, обосновывается его актуальность, обсуждается практическая значимость и методология работы, формулируются положения, выносимые на защиту. Далее обосновывается достоверность результатов, говорится об их апробации на международных конференциях, отмечается личная роль автора в данной работе. В конце указаны объём и структура диссертационной работы.

В первой главе описывается современная ситуация в области исследования свойств запутанности аннигиляционных фотонов. Обсуждается запутанность пары аннигиляционных фотонов от распада парапозитрония. Даны описания запутанного, смешанного и декогерентного состояний. В главе кратко описаны методы экспериментального доказательства запутанности аннигиляционных фотонов, использованные в экспериментах ранее: азимутальные угловые корреляции комптоновского рассеяния и корреляционная функция неравенства Белла. Наконец, в первой главе обсуждаются некоторые эксперименты по исследованию запутанности аннигиляционных фотонов и обсуждается их возможное использование в ПЭТ.

Вторая глава посвящена непосредственно экспериментальной установке ИЗАФ. В начале главы описаны комптоновские поляриметры, так как они являются единственным методом, позволяющим определять поляризацию высокоэнергетических аннигиляционных фотонов. Основное внимание уделено описанию экспериментальной установки, её конструкции и детекторам, которые в ней были использованы. Приведены параметры сцинтилляционных детекторов, использованных в качестве рассеивателей и детекторов рассеянных фотонов. Важнейшим новшеством установки является механизм создания декогерентных пар фотонов, в качестве которого выступает процесс комптоновского рассеяния в промежуточном рассеивателе. Поскольку комптоновское рассеяние чувствительно к поляризации, взаимодействие в промежуточном рассеивателе можно рассматривать как процесс квантового измерения поляризации фотона. Согласно современным теоретическим представлениям, такое взаимодействие должно привести к декогеренции изначально максимально запутанного квантового состояния.

Третья глава посвящена системе считывания и записи данных, реализованной на экспериментальной установке. Обсуждаются преимущества

записи данных в формате гоот-дерева, обладающего удобной средой для анализа данных. Также, в главе описывается способ определения времени по среднему времени сигнала. Разработанный метод позволил получить временное разрешение, почти на порядок лучше временного шага оцифровки сигнала в АЦП. В связи с высоким световыходом промежуточного рассеивателя на установке возможно выделять сигналы с энерговыведением от 1 кэВ. Подробно описан метод фильтрации сигналов в промежуточном рассеивателе по величине производной. Благодаря этому методу удалось подавить шум в рассеивателе и обеспечить уникально низкий энергетический порог регистрации сигнала.

В четвёртой главе основное внимание уделено процедуре анализа экспериментальных данных. В результате анализа были получены энергетические спектры фотонов при комптоновском рассеянии на фиксированные углы, а также временные спектры при регистрации событий в различных детекторах установки. Особое внимание уделено методам энергетической калибровки, позволившим значительно улучшить энергетическое разрешение детекторов установки. Процесс калибровки необходим вследствие температурных изменений параметров детекторов. Показаны полученные временные разрешения отдельных детекторов

В пятой главе представлены основные физические результаты эксперимента. Приводятся значения азимутальных угловых корреляций и корреляционной функции неравенства Белла, полученные на установке для максимально запутанного и декогерентного квантовых состояний. Для изначально запутанных состояний оба метода показали полное согласие с результатами предыдущих экспериментов. Однако, вопреки ожиданиям, результаты измерения корреляций для декогерентных состояний оказались достаточно неожиданными. А именно, оба типа корреляций как для начального, так и декогерентного состояний практически совпадают. Полученные результаты противоречат общепринятому предположению о разнице в квантовых корреляциях максимально запутанных и декогерентных фотонов, которое является необходимым условием корректной работы ПЭТ нового поколения.

В Заключение кратко приведены основные результаты диссертационной работы.

Диссертация не свободна от некоторых недостатков.

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. Встречаются небрежности и неточности в оформлении диссертации. В частности, в первой главе за пунктом 1.2 следует сразу пункт 1.4. В ряде мест пропущены слова и не согласуются падежи. Часто вместо термина «рассеяние» используется «рассеивание», а для комптоновского рассеяния назад используется «процесс обратного комптоновского рассеяния». В правой части последнего равенства в формуле (1.7) пропущена мнимая единица, в формуле (2.3) пропущена вторая степень у классического радиуса электрона r_e , в формуле (5.14) пропущена переменная λ в аргументе функции s .

Заключение. Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в коей мере не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов. Работа по-прежнему является оригинальным завершённым и логически согласованным исследованием, которое характеризует автора как состоявшегося научного исследователя. Полученные им результаты являются новыми и достоверными и имеют существенное значение для квантовой физики и физики взаимодействия частиц и излучений с веществом. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах

автора.

С учётом вышеизложенного считаю, что диссертация Стрижака Александра Олеговича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук полностью 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.

Официальный оппонент:

Кузаков Константин Алексеевич,
доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика», профессор кафедры физики атомного ядра и квантовой теории столкновений физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М. В. Ломоносова, Дом 1, строение 2, тел. +7 (495) 939-24-65, адрес электронной почты: kouzakov@srd.sinp.msu.ru

«27» мая 2024г.

К. А. Кузаков

И.о. декана физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор

В. В. Белокуров

Сведения об оппоненте

Кузаков Константин Алексеевич,
доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 –
«Теоретическая физика».

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Кузаков К.А. и др. Эффекты квантовой запутанности в протон–протонном рассеянии при низких энергиях // Вестник Московского университета, 2022. Серия 3: Физика, астрономия, № 3, с. 14-20.
2. Kouzakov, K.A. Quantum Entanglement in the Nonrelativistic Collision Between Two Identical Fermions with Spin 1/2. *Theor Math Phys*, 2019, 201, 1664–1679.
3. Kouzakov, K.A. et al. Entanglement balance of quantum ($e, 2e$) scattering processes // *Phys. Rev. A*, 2019, 100, 022311.
4. Kouzakov, K.A., the JUNO collaboration et al. Radioactivity control strategy for the JUNO detector // *J. High Energ. Phys.*, 2021, 2021, 102.
5. Kouzakov, K.A., the JUNO collaboration et al. Calibration strategy of the JUNO experiment. *J. High Energ. Phys.*, 2021, 4.
6. Kouzakov, K.A., the JUNO collaboration et al. Sub-percent precision measurement of neutrino oscillation parameters with JUNO. *Chinese Phys. C*, 2022, 46, 123001.