

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 энерговыделением 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.