

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Баранова Сергея Павловича
на диссертацию Баранова Александра Геннадьевича
**"Экспериментальная установка по измерению
поляризационных корреляций запутанных и декогерентных
аннигиляционных фотонов"**

представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 –
"Приборы и методы экспериментальной физики".

Актуальность работы

Исследование явления квантовой запутанности интересно уже потому, что оно противоречит почти всему, чему учили на уроках физики в школе. В строгом смысле слова оно противоречит концепции *локального реализма*, лежащего в основе всей классической физики. Примечательно, что несовместимость квантовой запутанности с концепцией локального реализма выявляется не гуманитарными философскими рассуждениями, не плетениями словес, а строгой количественной проверкой определённых математических соотношений. Известно, что квантовая механика пользуется иной арифметикой, чем классическая физика.

Впервые математическая мера несовместимости классических и квантовых представлений была предложена Джоном Беллом в 1964 году в виде неравенства, носящего теперь его имя. Несколько позже было предложено неравенство CHSH (по именам его авторов: Clauser-Horne-Shimony-Holt, 1969), пригодное, в отличие от оригинального неравенства Белла, уже и для описания существенно релятивистских систем. Экспериментальные попытки проверки неравенств Белла и CHSH с тех пор предпринимались неоднократно. Неравенства всегда исправно нарушались, – во торжество квантовой картины мироустройства, – однако проделанные эксперименты обозначают не завершение, а лишь начало большого пути.

Всестороннее изучение явления квантовой запутанности в различных системах является насущной задачей современной физики. Практическое использование явления квантовой запутанности в различных технических устройствах представляется делом недалёкого будущего.

Задача и предмет исследования диссертации

Предметом исследования диссертации являются поляризационные корреляции между фотонами, родившимися в аннигиляции пара-позитрония. Метод исследования поляризационных состояний фотонов состоит в измерении их азимутальных углов в процессе Комптоновского рассеяния. Непо-

средственной задачей диссертационной работы является сборка и отладка соответствующей измерительной установки, проведение собственно измерений и математическая обработка полученных угловых распределений.

Научная новизна

Принципиальная новизна диссертационной работы состоит в осуществлении измерений с коррелированными (запутанными) и некоррелированными (декогерентными) фотонами в рамках одной и той же рабочей схемы, без дополнительного изменения конфигурации установки и без её перенастройки.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ И ЕЁ ОФОРМЛЕНИЕ

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объём диссертации составляет 123 страницы, включая 71 рисунок, 4 таблицы и список литературы из 70 наименований. Структура и объём диссертации полно и точно отражены в автореферате.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе, формулируются цель и задачи работы, выделяются положения выносимые на защиту, разъясняется научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе сообщается о состоянии исследований запутанных аннигиляционных фотонов на текущий момент. Обсуждаются предложенные в литературе теоретические подходы; разбираются ранее проведённые эксперименты.

Во второй главе детально описывается геометрия установки, взаимное расположение её частей и их механическая реализация.

В третьей главе описывается электронная часть установки (т.е. схема съёма сигналов), и приводятся её основные параметры.

В четвёртой главе обсуждаются сцинтилляционные детекторы, используемые для систем комптоновских поляриметров.

В пятой главе, представляющей собою итог всех проведённых исследований, показаны оригинальные экспериментальные результаты и даётся их анализ.

В заключении излагаются основные достижения диссертационной работы.

В качестве отдельных разделов вынесены **Благодарности** и **Список сокращений и условных обозначений**.

Практическая значимость результатов

Практическая значимость полученных результатов обусловлена их высокой точностью и уникальным сопоставлением коррелированных и некоррелиро-

ванных фотонов в рамках единой экспериментальной процедуры.

Достоверность полученных результатов и их апробация

Достоверность результатов обеспечивается их многократной экспертной оценкой; их подтверждением (в рамках оцененных погрешностей) данными, полученными от других внешних детекторов; хорошим соответствием с результатами других экспериментальных исследований.

Результаты работы докладывались автором устно на следующих конференциях:

- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов-2024", Москва, Россия;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов-2023", Москва, Россия;
- XXIV International Conference "Nucleus-2024", Дубна, Россия
- 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Москва, Россия.

Вклад автора в получение результатов Все задачи, решённые в ходе выполнения данной работы, выполнены либо автором лично, либо при активном его участии. Основная часть задач решена при определяющем участии автора.

Публикации Материалы диссертации опубликованы в шести печатных работах, в том числе в пяти реферируемых журналах, индексируемых в базах SCOPUS, WEB OF SCIENCE, RSCI, и одном сборнике трудов конференции.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ

Диссертация производит выгодное впечатление большим объёмом проведённой работы и её скрупулёзностью. В диссертации детально обосновывается выбор материалов и измерительной аппаратуры, большое внимание уделяется тестированию и калибровке всех весьма разнообразных по своей физической сути узлов установки. Столь тщательный и основательный подход к делу вызывает естественное и заслуженное уважение.

Не менее интересны и результаты работы, оказавшиеся до некоторой степени неожиданными. Обнаружено, что угловые азимутальные корреляции между запутанными и не запутанными фотонами неразличимы в пределах экспериментальной погрешности. Автор пишет, что вопрос требует дальнейших экспериментальных исследований и предлагает ряд мер по модернизации измерительной процедуры. Мне же кажется, что наступил момент передать эстафету теоретикам и должным образом осмыслить увиденное. С моей точки зрения следовало бы провести полный прямой расчёт амплитуды всего процесса в целом - от рождения пары запутанных фотонов

в аннигиляции пара-позитрония до их регистрации через Комптоновское и двукратное Комптоновское рассеяние. Проведение нового независимого вычисления смогло бы к тому же разрешить противоречие между предсказаниями двух теоретических групп, упомянутых в диссертации в списке литературы под номерами [49] и [50].

Мои замечания к диссертации носят преимущественно литературный характер. При всех достоинствах работы стиль изложения оставляет желать лучшего. Среди многочисленных грамматических огрехов наиболее болезненной для моего восприятия оказалась запятая между подлежащим и сказуемым в предпоследней фразе на стр. 11: "...результаты, были доложены ...".

Неуклюжее построение фраз порой приводит к бессмыслице (читаем на стр. 16: "...теорема Белла ... является основным инструментом экспериментальных исследований..."), а порой к изменению смысла фразы на противоположный (читаем на стр. 4: "...неравенство Белла стало основным условием доказательства запутанности"). Имеются и просто ошибочные высказывания, как то на стр. 14: "Запутанность квантовой системы является простым следствием принципа суперпозиции".

Загадочно выглядит многократно упоминаемое значение коррелятора $R = 2.85$, соответствующее максимальной запутанности фотонов. На этом месте привычнее видеть число $2\sqrt{2}$. Если предположить, что автор привёл округлённое значение точного предела, то должно было бы получиться 2.83. Да и вообще замена точного числа приближённым выглядит диковато, как если бы сказать, что спин электрона равен пятидесяти процентам.

Приведу несколько примеров не самых удачных выражений: стр. 16: "Измерение фотона ... произведено при изменении его энергии"; стр. 16: "формула для определения сечения обнаружения"; стр. 19: "Детекторы, расположенный под перпендикулярным углом"; стр. 20: "Выражение совпадает с параметром"; стр. 22: "Частота совпадений в минуту"; фамилия "Аронов" на стр. 15, 21 превращается в "Ааронов" на стр. 26, 32, 33. Присутствует также и заметное количество опечаток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Александра Геннадьевича Баранова выполнена на высоком профессиональном уровне, полученные в ней результаты обладают высокой познавательной ценностью.

Диссертация основана на работах, опубликованных в реферируемых высокорейтинговых журналах. Основные её результаты докладывались автором на семинарах, рабочих совещаниях и международных конференци-

ях. Выводы диссертации обоснованы, полностью соответствуют поставленной задаче и логично вытекают из проведённой работы. Все выносимые на защиту результаты получены при определяющем вкладе самого автора. Автореферат полно и ясно отражает содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты могут использоваться в ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯИ, НИИЯФ, ПИЯФ, ОИЯИ, ФИАН, а также других научных центрах России, Европы, Азии и США.

Указанные в настоящем отзыве замечания не умаляют достоинств диссертационного исследования и не снижают его ценности.

Диссертация Баранова Александра Геннадьевича «Экспериментальная установка по измерению поляризационных корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов» отвечает всем требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Баранов Александр Геннадьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

Высококвалифицированный главный научный сотрудник
Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН
доктор физико-математических наук
Баранов Сергей Павлович

Контактные данные:

Тел.: (916) 192 0988 e-mail: baranovsp@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.04.16 – "Физика атомного ядра и элементарных частиц"

Полный адрес института:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
"Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии Наук",
119991 Москва, Ленинский проспект, д. 53

Подпись сотрудника ФИАН С.П.Баранова удостоверяю,
заместитель директора ФИАН

С.Ю.Савинов

08.09.25г

**Публикации оппонента по теме рецензируемой диссертации
в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:**

1. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, M.A.Malyshev, A.M.Snigirev, Double parton scattering versus jet quenching, JETP Letters 119, 823 (2024); DOI:10.1134/S0021364024601064
2. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, M.A.Malyshev, A.A.Prokhorov, P.M.Zhang, Forward $J/\psi + J/\psi$ and $J/\psi + \psi'$ production with High Energy Factorization, Phys. Rev. D 110, 054001 (2024); DOI:10.1103/PhysRevD.110.054001
3. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, A.A.Prokhorov, X.Chen, Towards higher-order calculations of quarkonia production with k_t -factorization: P-wave charmonia Eur. Phys. J. C 84, 348 (2024); DOI:10.1140/epjc/s10052-024-12690-0
4. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, M.A.Malyshev, Semihard QCD Processes beyond the Collinear Approximation, Physics of Particles and Nuclei 55, 256-397 (2024); DOI:10.1134/S1063779624020047
5. S.P.Baranov, A.G.Bagdatova, Exclusive W -boson decays, LPI Bulletin 51, №5, 151 (2024); DOI:10.3103/S1068335624600360
6. S.P.Baranov, A.G.Bagdatova, A.S.Sakharov, Study of exclusive two-body W decays with fully reconstructible kinematics, Mod. Phys. Lett. A 38, 2350073 (2023); DOI:10.1142/S0217732323500736
7. S.P.Baranov, A.B.Martinez, S.T.Monfared, H.Jung, A.V.Lipatov, M.A.Malyshev, Discriminating the heavy jet production mechanisms in associated $Z +$ heavy flavor events at the LHC, The European Physical Journal C82, 157 (2022); DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10104-7
8. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, A.A.Prokhorov Role of initial gluon emission in double J/ψ production at central rapidities, Physical Review D106, 034020 (2022); DOI: 10.1103/PhysRevD.106.034020
9. S.P.Baranov, H.Jung, F.Hautmann, et al. CASCADE3 A Monte Carlo event generator based on TMDs, The European Physical Journal C81, 425 (2021); DOI: 0.1140/epjc/s10052-021-09172-y
10. B.Z.Kopeliovich, Fragmentation of charmed quark to double-charmed hadrons, The European Physical Journal C81, 379 (2021); DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09203-8
11. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, A.A.Prokhorov, Charm fragmentation and associated $J/\psi + Z/W^\pm$ production at the LHC, Physical Review D104, 034018 (2021); DOI: 10.1103/PhysRevD.104.034018
12. S.P.Baranov, Positively defined color-singlet fragmentation function $g \rightarrow \chi c J$, The European Physical Journal Plus 136, 836 (2021); DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01836-8

13. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, M.A.Malyshev, Particle event generator: a simple-in-use system PEGASUS version 1.0, The European Physical Journal C80, 330 (2020); DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-7898-6
14. S.P.Baranov, A.V.Lipatov, χ_{c1} and χ_{c2} polarization as a probe of color octet channel, The European Physical Journal C80, 1022 (2020); DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-08617-0
15. S.P.Baranov, A.A.Prokhorov, A.V.Lipatov, M.A.Malyshev, Revisiting the production of J/ψ pairs at the LHC, The European Physical Journal C80, 1046 (2020); DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-08631-2