

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 **13.11.2025 г. № 36/14**

О присуждении **Баранову Александру Геннадьевичу**, гражданину Российской федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальная установка по измерению поляризационных корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов» по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 05.06.2025, протокол № 27/5 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 Баранов Александр Геннадьевич 1997 года рождения. В 2025 году соискатель окончил аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования „Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“ по направлению подготовки 03.06.01 – «Физика и астрономия». Справка о сдаче кандидатских экзаменов по научной специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики» выдана в 2024 году Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования „Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“.

В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника отдел экспериментальной физики (ОЭФ) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел экспериментальной физики (ОЭФ).

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

Официальные оппоненты:

Баранов Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, отделение ядерной физики и астрофизики, главный научный сотрудник.

Харлов Юрий Витальевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», отделение экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) (г. Дубна).

В своем положительном заключении, подписанном Якушевым Евгением Александровичем, доктором физико-математических наук, директором лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), и Смирновым Олегом Юрьевичем, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова Объединенного института ядерных

исследований (ОИЯИ), и утверждённом Трубниковым Григорием Владимировичем, доктором физико-математических наук, академиком РАН, директором Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна)

указала, что диссертация А.Г. Баранова на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 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.

Соискатель имеет 6 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК (все статьи опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus).

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

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. D. Abdurashitov, A. Baranov, D. Borisenko, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, I. Tkachev, V. Volkov, B. Zhuikov, “Setup of Compton polarimeters for measuring entangled annihilation photons,” *Journal of Instrumentation*, vol. 17, no. 03, p. P03010, Mar. 2022, doi: 10.1088/1748-0221/17/03/P03010.
2. A. Strizhak, D. Abdurashitov, A. Baranov, A. Ivashkin and S. Musin, “Study of the Compton Scattering of Entangled Annihilation Photons,” *Physics of Particles and Nuclei Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 509–512, Oct. 2022, doi: 10.1134/S1547477122050405.
3. A. Strizhak, D. Abdurashitov, A. Baranov, D. Borisenko, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov, S. Musin, V. Volkov, “Setup to study the Compton scattering of

- entangled annihilation photons,” J Phys Conf Ser, vol. 2374, no. 1, p. 012041, Nov. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2374/1/012041.
4. A. Ivashkin, D. Abdurashitov, A. Baranov, F. Guber, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, I. Tkachev, “Testing entanglement of annihilation photons,” Sci Rep, vol. 13, no. 1, p. 7559, May 2023, doi: 10.1038/s41598-023-34767-8.
5. А. Г. Баранов, А. П. Ивашкин, С. А. Мусин, Г. Х. Салахутдинов и А. О. Стрижак, “Сцинтилляционные детекторы комптоновских поляриметров для измерения поляризационных состояний аннигиляционных фотонов,” Приборы и техника эксперимента, 2, стр.39–45, 2024, doi: 10.31857/S0032816224020055.
6. A. G. Baranov, A. P. Ivashkin, S. A. Musin, G. Kh Salakhutdinov and A. O. Strizhak, “CsI and SrI2(Eu) Scintillation Detectors with Signal Removal by Silicon Photomultipliers with a Registration Threshold below 200 Ev,” Instruments and Experimental Techniques, vol. 67, no. 6, pp. 1088–1094, 2024, doi: 10.1134/S0020441224701999.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что Диссертационная работа Баранова Александра Геннадьевича обладает внутренним единством, выполнена на высоком профессиональном уровне, полученные в ней физические и методические результаты имеют большое научное значение и практическую ценность. Полученные автором результаты имеют существенное значение для развития экспериментальных методов в ядерной и квантовой физике. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

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 Главе 2 в описании экспериментальной установки по исследованию квантовых состояний аннигиляционных фотонов достаточно подробно описаны все элементы установки. В частности, промежуточный комптоновский рассеиватель выполнен из кристалла GAGG(Ce). Однако, не сказано, как была выбрана толщина этого рассеивателя. Важно понимать, что GAGG является достаточно плотным веществом с малой радиационной длиной, поэтому слишком большая толщина дополнительного рассеивателя может привести к потере позитрона, а слишком малая толщина — к неэффективному комптоновскому рассеивателю. В разделе 4.3 приведена толщина кристалла — 7 мм. Не ясно, была ли оптимизирована толщина GAGG, какой сигнал регистрирует SiPM на доп.рассеивателе и какая амплитуда этого сигнала (в количестве фотоэлектронов).

2. В разделе 3.2 в описании электронной схемы установки говорится о микросхеме AD8099 в первом каскаде усилителя. Желательно дать описание этой микросхемы (операционный усилитель с обратной связью) и привести ссылку на спецификацию на сайте производителя. Не ясно на чем реализованы второй и третий каскады усилителя.

3. В разделе 4.1 не хватает ссылки на ФЭУ R7525 (на самом деле она приведена ниже в описании конструкции комптоновских рассеивателей, но для удобства читателя необходимо давать ссылки сразу, как появляется описание нового элемента). Не ясно, чем был обусловлен выбор именно этого ФЭУ для прототипов сцинтилляционных детекторов.

4. На рис. 4.6, правой панели, числа по оси Y не все пропечатаны полностью. По оси X отложено время измерения, по-видимому, относительно начала Unix-эпохи. Было бы удобнее привести время относительно начала измерений. Из диссертации не ясно, какой вывод можно сделать из этого рисунка.

5. В спецификации ФЭУ R7525 (стр. 66) и R6231 (стр. 71) материал фотокатода назван по-разному — Bialkali и Бялкали. В обоих случаях следует использовать принятое русское название «бищелочной».

6. В работе А.Г. Баранова детально описаны основные системы установки (детекторы, электроника, триггер, конструкция). Определяющий вклад диссертанта в разработку и создание этих систем неоспорим и подкреплён недавними публикациями А.Г. Баранова в журналах. Отметим, что в защищённой годом ранее диссертации А.О. Стрижака “Измерение комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов”, на защиту выносилась экспериментальная установка в целом, как цельный инструмент для измерения исследуемых поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов. Представляется, что здесь нарушен хронологический порядок защиты диссертаций, поскольку было бы логично представить на защиту первой диссертацию А.Г. Баранова, поскольку именно в ней приведено описание систем установки, использовавшейся А.О. Стрижаком для получения физических результатов.

7. В пятой главе диссертации обсуждается модернизация существующей установки, в частности, использование инновационного сцинтиллятора $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ вместо существующего $\text{GAGG}(\text{Ce})$ промежуточного рассеивателя. Несмотря на значительные преимущества нового сцинтиллятора, он имеет один существенный недостаток, а именно, является сильно гигроскопичным. В то же время, в четвертой главе в требованиях к промежуточному рассеивателю указано отсутствие гигроскопичности во избежание присутствия пассивного материала на пути следования фотонов. Не ясно, каким образом планируется избавиться от данного недостатка.

8. В третьей главе диссертации подробно описан триггер установки, но отсутствуют данные по эффективности триггера и частоты его срабатывания. Было бы интересно понять скорость записи событий, поскольку количество набранных событий определяет статистическую точность измерений исследуемых поляризационных корреляций.

9. При формировании пары запутанных фотонов важную роль играет коллиматор. В диссертации никак не обсуждается возможное нарушение когерентности за счет возможных взаимодействий гамма-квантов с веществом коллиматора с малыми передачами энергии.

10. Функция $f(E)$ на стр 88, использованная для описания поведения кривой на рис. 4.25, строго говоря, имеет представленный вид только в случае линейной зависимости количества регистрируемых фотонов, Q , от энергии. Для нелинейной зависимости $Q(E)$ параметры p_1 и p_2 будут зависеть от энергии.

11. На стр.92 приведена формула для температурной зависимости энергетического разрешения без указания единиц измерения.

12. Зачастую автор приводит слишком много десятичных знаков для численных значений параметров и/или их ошибок. Как пример: на рис.5.4 параметр $A=138$ с ошибкой 2.936. Поскольку основное значение приведено с точностью до единиц, то и ошибку следовало бы округлить до той же значащей цифры, $A=138\pm 3$.

13. На рис.5.7 представлен спектр с матрицы кремниевых ФЭУ, использовавшийся для амплитудной калибровки. В спектре отсутствует пьедестал, по-видимому, он “отрезан” порогом дискриминатора. В тексте нет обсуждения соответствующего измерения. Ненулевое значение пьедестала приведёт к смещению калибровки.

14. В тексте диссертации используется десятичная точка вместо принятой в русскоязычной литературе запятой.

15. В диссертации присутствует значительное количество опечаток. Так

- стр.15 и 21 пропущена вторая “а” в фамилии Ааронов;
- стр. 35: "сцинтиллятор GAGG(Ce) имеет минимальное времени высвечивания" вместо "имеет минимальное время высвечивания";
- стр. 95 "аннигиляционных фотонов" вместо "аннигиляционных";

- стр. 117 (Список сокращений) "сиинтиллятор" вместо "сцинтиллятор".

Указанные замечания не умаляют достоинств диссертационного исследования и не снижают его ценности. Соискатель Баранов А.Г. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и дал исчерпывающие пояснения по всем высказанным замечаниям.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Впервые были разработаны и созданы детекторные системы для экспериментальной установки по измерению поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях.

2. Созданы NaI(Tl) сцинтилляционные детекторы рассеянных фотонов, обеспечивающие большой телесный угол регистрации, необходимый для измерений декогерентных аннигиляционных фотонов. Энергетическое разрешение данных детекторов составляет около $\frac{\sigma_E}{E} \sim 3.2\%$ для гамма-линии 511 кэВ и обеспечивает надежную идентификацию рассеянных под углом 90° аннигиляционных фотонов.

3. Впервые разработана методика получения декогерентных аннигиляционных фотонов за счет комптоновского рассеяния начальных фотонов на промежуточном активном рассеивателе. Степень декогеренции аннигиляционных фотонов определялась по измерению выделенной в этом рассеивателе энергии отдачи электронов.

4. Комбинация высокого световыхода сцинтиллятора, большой квантовой эффективности фотодетектора и усилителя аналоговых сигналов с низким электронным шумом обеспечили минимальный порог регистрации на уровне 1 кэВ.

5. Впервые разработана и изготовлена уникальная конструкция экспериментальной установки, обеспечивающая большой телесный угол регистрации фотонов и азимутальную симметрию установки, необходимую для компенсации возможных систематических ошибок.

6. Разработана и создана уникальная электронная схема установки, состоящая из аналоговых, цифровых, триггерных блоков электроники, а также источников питания вакуумных ФЭУ и кремниевых фотоумножителей. Съем экспериментальных данных с детекторов установки основан на быстром многоканальном АЦП.

7. Полученные поляризационные корреляции максимально запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов оказались практически идентичными для обоих типов квантовых состояний аннигиляционных фотонов, что указывает на невозможность использования явления квантовой запутанности для подавления рассеянного фона в новом поколении позитрон-эмиссионной томографии (QE-PET).

8. Учитывая полученные экспериментальные данные, предложены методы модернизации экспериментальной установки. В частности, замена сцинтиллятора GAGG в промежуточном рассеивателе на инновационный сцинтиллятор $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ позволит понизить порог регистрации энерговывделений до 0.3-0.5 кэВ и улучшить энергетическое разрешение детектора почти в три раза.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. Были разработаны и созданы уникальные детекторные системы для установки по измерению поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в различных квантовых состояниях.

2. В экспериментальной установке впервые реализована схема из трех (двух основных и одного промежуточного) комптоновских рассеивателей. Данный подход обеспечил процесс контролируемой декогеренции аннигиляционных фотонов в активном промежуточном рассеивателе. Степень декогеренции аннигиляционных фотонов определялась по измерению выделенной в этом рассеивателе энергии отдачи электронов.

3. Созданы сцинтилляционные детекторы рассеянных фотонов, обеспечивающие большой телесный угол регистрации, необходимый для измерений декогерентных аннигиляционных фотонов.

4. Используемые сцинтилляционные детекторы образуют две системы комптоновских поляриметров для измерения поляризации обоих аннигиляционных фотонов. Определены амплитудные и временные параметры этих сцинтилляционных детекторов.

5. Разработана и изготовлена уникальная механическая конструкция экспериментальной установки, использующая эффективные решения для компенсации возможных систематических ошибок.

6. Разработана и создана уникальная электронная схема установки, которая позволяет записывать несколько типов физических событий и выполнять энергетическую и временную калибровки детекторов, образующих комптоновские поляриметры.

7. Полученные на установке результаты измерений поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов имеют как фундаментальное, так и прикладное значение для создания позитрон-эмиссионной томографии нового поколения, использующей явление квантовой запутанности аннигиляционных фотонов.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Они были получены в процессе разработки, создания и эксплуатации оригинальной экспериментальной установки, включающей системы комптоновских поляриметров с калиброванными сцинтилляционными детекторами. Проведены энергетические и временные калибровки детекторов, исследованы их параметры в различных условиях эксплуатации. Показана воспроизводимость результатов измерений в течении многомесячных сеансов набора данных.

Личный вклад соискателя заключается в получении основных результатов диссертации, выносимых на защиту. Автор занимался разработкой и созданием конструкции, детекторов, аналоговой, цифровой и триггерной электроники экспериментальной установки, проводил измерения и калибровку энергетических и временных параметров созданных детекторов.

На заседании 13 ноября 2025 года диссертационный совет принял решение присудить **Баранову Александру Геннадьевичу** ученую степень

кандидата физико-математических наук за разработку, создание и настройку детекторных систем, конструкции, аналоговой, цифровой и триггерной электроники для экспериментальной установки по измерению поляризационных корреляций запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **20** человек, из них **8** 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 — **20**, 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.

13.11.2025 г.

М.П.