

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 **25.09.2025** г. № **33/11**

О присуждении **Калашникову Дмитрию**, гражданину Республики Молдова, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Коллайдерные эксперименты как окно в новую физику: предсказания для легких частиц» по специальности 1.3.3 - Теоретическая физика, принята к защите 05.06.2025 г., 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 Калашников Дмитрий, 1997 года рождения. В 2021 году соискатель окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». В 2025 году соискатель успешно освоил программу аспирантуры Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика, (диплом об окончании аспирантуры 107724 2133566, регистрационный номер 25402019, выдан 16.07.2025). В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника отдела теоретической физики ИЯИ РАН.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), в отделе теоретической физики.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН Горбунов Дмитрий Сергеевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел теоретической физики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Афонин Сергей Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет", кафедра физики высоких энергий и элементарных частиц, профессор,

Пархоменко Александр Яковлевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова", кафедра теоретической физики, доцент, заведующий кафедрой, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) - в своем положительном заключении, подписанном кандидатом физико-математических наук, ученым секретарем ИЯФ СО РАН - Резниченко Алексеем Викторовичем; заместителем директора ИЯФ СО РАН по научной работе, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН - Логашенко Иваном Борисовичем; и утвержденном ВРИО директора ИЯФ СО РАН, Беркаевым Дмитрием Сергеевичем;

указала, что работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Калашников Дмитрий заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Соискатель имеет 5 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

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

Список основных работ, по результатам диссертационного исследования:

1. Demidov S., Gorbunov D., Kalashnikov D., Sgoldstino signal at FASER: prospects in searches for supersymmetry. J. High Energ. Phys., 2022, 155, 2022.

2. Feng J. L. et al, «The Forward Physics Facility at the HighLuminosity LHC». J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 50 30501, 2023

3. Gorbunov D., Kalashnikov D., «Probing light exotics from a hidden sector at $c\text{-}\tau$ factories with polarized electron beams». Phys. Rev. D 107 15014, 2023.

4. Gorbunov D., Kalashnikov D., Pakhlov P., Uglov T., «On direct observation of millicharged particles at $c\text{-}\tau$ factories and other e^+e^- -colliders». Physics Letters B, 843 138033, 2023.

5. Gorbunov D., Kalashnikov D., «NICA prospects in searches for light exotics from hidden sectors: The cases of hidden photons and axion-like particles». Physics Letters B, 852 138599, 2024.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные научные и методические результаты, имеющие фундаментальное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

1. Из текста диссертации сложно оценить уровень понимания соискателем многочисленных выписанных формул. Текст написан скорее в стиле журнальной статьи, а не квалификационной работы, по которой можно было бы судить о глубине понимания и широте знаний диссертантом тематики его исследований. Тем не менее, такой стиль может быть оправдан, поскольку, основной упор был сделан на использование приведенных выражений для ширин распадов и сечений в численных расчетах допустимых областей параметров моделей новых частиц.

2. Теоретическая часть изложена крайне лаконично. Совершенно не обсуждаются технические подробности происхождения лагранжиана (1), на котором основан весь последующий анализ главы 1, дается только ссылка на работу [20]. Можно было отметить, что используется только часть полного лагранжиана, пропорциональная $1/F$ и в [20] можно найти другие слагаемые, подавленные степенью F . Более того, стоило бы указать в диссертации определения использованных в вычислениях тензора Леви-Чивита и матрицы γ_5 . Не приведён вывод ни одной формулы для ширины распада — в диссертации было бы естественно показать вывод хотя бы наиболее важных ширин, что можно было бы вынести в приложения.

3. Из текста диссертации не очевидно, что параметр B_0 в формулах (1.8) и (1.9) (а также в двух скобках формулы (1.13)) — это один и тот же B_0 , определённый из формулы Гелл-Манна—Оакеса-Реннера для массы каона. А именно, на первый взгляд кажется, что в (1.8) нужно подставлять значение B_0 , определённое из аналогичной формулы для массы пиона. Имело бы смысл вообще не вводить параметр B_0 , а прямо подставлять в соответствующие формулы его выражение через массу каона и массы кварков — тогда стало бы сразу понятным, что выражения, содержащие массы токовых кварков, не зависят от масштаба нормировки этих масс и выбора схемы их регуляризации, поскольку в формулы входили бы только отношения линейных комбинаций масс кварков. Иначе может возникнуть вопрос о том, почему в данном анализе для масс кварков подставляются значения на масштабе 2 ГэВ в схеме минимальных вычитаний (как приведено в Particle Data Group).

4. В формулу (1.7) входит β -функция КЭД. Можно было бы привести явный вид этой функции, чтобы понимать, в каком порядке теории возмущений она используется в расчетах. То же самое относится и к β -функция КХД, входящей в (1.29).

5. В диссертации рассматривается η -мезон, однако его кварковый состав в работе не указан явно. Следует отметить, что η -мезон — суперпозиция октетного η_8 и синглетного η_0 -состояний, определенных по группе SU(3) ароматов легких кварков. Более того, не исключена и примесь чисто глюонного состояния с квантовыми числами псевдоскалярного мезона. С точностью до 10-15% эффектами смешивания можно пренебречь, отождествив η -мезон с октетным по аромату состоянием, однако более прецизионные измерения и анализ результатов потребуют учета этого смешивания. Данное замечание следует рассматривать как пожелание к дальнейшему развитию исследований в этом направлении.

6. В формулах (1.10) и (1.11) представлены ширины распадов $S \rightarrow \pi \pi$ и $S \rightarrow K K$. Не ясно, почему не рассматривается процесс $S \rightarrow \eta \eta$.

7. В формулах (1.46) и (1.47) приведены переходные формфакторы $B \rightarrow K$ и $B \rightarrow K^*$. Тем не менее, для определения зависимости от передаваемого импульса существует несколько моделей. Было бы полезно дать определения переходных формфакторов посредством матричного элемента $b \rightarrow s$ тока, перечислить известные в литературе параметризации и пояснить выбор в пользу использованной параметризации.

8. В главе 2 детально рассматривается российский проект SCTF, параметры которого приводятся и на их основе получены оценки ожидаемых событий. Однако, аналогичный проект STCF (Super c - τ factory) предложен Китае. Поскольку планируемые параметры этой фабрики не представлены в диссертации, то остается непонятным, какие ограничения можно получить с STCF в сравнении с SCTF. В диссертации имело бы смысл привести детали китайского проекта.

9. Во второй главе рассматривается процесс рождения аксионоподобной частицы в аннигиляции электрона и позитрона через промежуточный фотон. Однако, если учесть прямое взаимодействие

аксионоподобных частиц с заряженными лептонами, то появятся дополнительные диаграммы, аналогичные двухфотонной аннигиляции электронпозитронной пары с заменой одного из фотонов на аксионоподобную частицу. Очевидно, что эта другая модель взаимодействия, тем не менее в тексте главы можно было бы указать на эту возможность рождения аксионоподобных частиц.

10. Из текста диссертации не совсем понятно, в каких расчетах использовалось готовое программное обеспечение, а где программы, написанные лично соискателем.

11. В первой главе, посвященной поиску сголдстино с помощью детектора FASER, предполагается, что фон пренебрежимо мал. Вместе с тем, из детектора ATLAS в направлении FASER идет довольно приличный поток высокоэнергичных нейтрино, которые будут взаимодействовать с веществом детектора FASER. При условии неправильной идентификации частиц, рожденных в результате взаимодействия нейтрино, такие события могут быть фоном, как минимум, к некоторым из конечных состояний, в которых предлагается искать сголдстино. Из текста диссертации не очень понятно, какое влияние этот фон оказывает на чувствительность FASER к сголдстино. В работе, на которую ссылается автор (<https://arxiv.org/pdf/1708.09389>) указано, что число заряженных лептонов, созданных нейтрино с энергией ~ 200 ГэВ в FASER оставляет ~ 10 на кг массы детектора при интегральной светимости в 300 fb^{-1} . Так как детектор имеет массу порядка 500 кг, то речь должна идти о нескольких тысячах взаимодействий нейтрино с детектором! Падение до 0.1 события на кг якобы происходит только потому, что рассматриваются нейтрино с энергией более 1ТэВ. В одной из последних работ (<https://arxiv.org/pdf/2402.13318>) ожидаемый поток нейтрино достаточно детально изучался. Странно, что автор не ссылается на эту работу. В упомянутой работе предсказывается не менее 8.5 тыс взаимодействий за счет заряженного тока для мюонных нейтрино и антинейтрино. Т.е. будет рождаться мюон и какая-то адронная система. Непонятно, есть ли вероятность из этих 8.5 тыс событий перепутать родившийся адрон с мюоном и неправильно идентифицировать эту систему как рождение мюонной пары. В другой

недавней работе (<https://arxiv.org/pdf/2507.06022>) приведено моделирование ожидаемого спектра нейтрино, и этот спектр имеет максимум на энергии 1 ТэВ, в то время как в оценке из статьи <https://arxiv.org/pdf/1708.09389>, на которую ссылается соискатель, на этой энергии взаимодействующих нейтрино уже почти не должно было быть. Возможно, этот фон действительно будет очень мал, но это требует более убедительных аргументов, чем те, которые приведены в диссертации.

12. Во второй главе, посвященной прямой регистрации миллизаряженных частиц (МСР), обсуждается только фон от ложных хитов в камере. При этом не приведено ясного описания, как именно предлагается отделять события с миллизаряженными частицами от остальных событий, рождаемых на коллайдере, например, событий от процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Автором утверждается, что характерная скорость МСР составляет $\beta \approx 0.1$, в то время как электроны имеют $\beta \approx 1$ (что очевидно) и сигнал от электронов и МСР можно отличить по времени пролета через дрейфовую камеру. Было бы неплохо, чтобы соискатель обосновал свои оценки для скорости МСР.

13. Нерелятивистским миллизаряженным частицам (если предположить, что оценка соискателя $\beta \approx 0.1$ верна), рожденным в реакции $e^+e^- \rightarrow \chi \chi \gamma$, потребуется потратить часть своей энергии чтобы преодолеть стенки вакуумной камеры и обечайку дрейфовой камеры. Из текста диссертации (глава 2, раздел 2.3) непонятно, как учет этого эффекта повлияет на изучаемую чувствительность к регистрации миллизаряженных частиц.

14. На стр. 67 диссертации сказано: «Расчёты показали, что процесс (2.1) подавляется положительной поляризацией до незначительного уровня в исследуемой сигнатуре». Процесс (2.1) это $e^+ e^- \rightarrow \gamma \nu \bar{\nu}$ (см. стр.66), где γ -квант излучается начальным e^+/e^- . Кажется, что подавление фонового процесса $e^+ e^- \rightarrow \gamma \nu \bar{\nu}$ при положительной поляризации пучка e^- (ось Z направим вдоль импульса e^-) возможно только для полярного угла системы $\nu\bar{\nu}$ 0 градусов (нейтрино ν летит вдоль оси Z) по закону сохранения полного момента реакции и его проекции на ось Z . Для всех других полярных углов оси разлёта $\nu\bar{\nu}$ никакого подавления не будет, а амплитуда реакции будет просто пропорциональна D -функции, выражающей коэффициент разложения

состояния системы $\nu\bar{\nu}$: $|J, J_{Z'}\rangle = |1, -1\rangle$ (на ось Z' направленную вдоль импульса нейтрино ν на состояние $|J, J_Z\rangle = |1, +1\rangle$ вдоль оси Z . D-функция порядка 1 для произвольного угла. Таким образом, кажется, что поляризацией электронного пучка нельзя существенно задавить сечение фонового процесса $e^+ e^- \rightarrow \gamma \nu \bar{\nu}$, т.е. никакого параметрического подавления здесь нет. В этой связи возникает вопрос к соискателю, какой фактор подавления сечения $e^+ e^- \rightarrow \gamma \nu \bar{\nu}$ он получил в своих расчётах для положительной поляризации электронного пучка по сравнению со случаем неполяризованного пучка электронов.

15. Во второй главе диссертации на стр. 73 на рис. 2.33 приведены диаграммы процесса $e^+ e^- \rightarrow \gamma A'$ (A' - т.н. тёмный фотон). Там же в формуле (2.12) приведено сечение этой реакции. Формула (2.12) показывает, что в сечении/амплитуде реакции имеется полюс в s-канале $\sim 1/(s-m_{A'}^2)$, где $-m_{A'}$ – масса тёмного фотона. Необходимо пояснение, откуда взялся этот полюс (ведь в s-канале реакции нет A'). Кроме того, требует объяснения сингулярный характер дифференциального сечения (2.12) при $\theta_\gamma=0$ и $\theta_\gamma=\pi$ (артефакты приближения нулевой массы электрона?) и полного сечения процесса. Тот же вопрос относится к формулам (2.14) и (2.15).

16. В главе 1 диссертации на стр. 17 приведены выражения для матричных элементов $\langle \eta | Q | \pi\pi \rangle$ и проч.: см. формулы (1.14)-(1.25). Насколько можно судить, данные матричные элементы получены из простой кварковой SU(3)-модели, в т.ч. не учитывающей смешивание η -мезонов, (хотя соискатель об этом не пишет, как и не вводит используемый параметр ϵ). Таким образом, точность данных выражений невысока (это скорее оценки). Было бы неплохо, чтобы соискатель пояснил, с какой точностью получены данные выражения, какова итоговая точность формулы (1.13), какие массы кварков в ней используются, и откуда в (1.13) возникает выражение $(m_\rho^2 - m_{\pi,\eta})^2$ в знаменателе, явно некорректное по размерности.

17. В тексте диссертации на стр. 31, смысл последнего абзаца перед 1.2.2 непонятен (т.е. в нем нет ни логики, ни пояснения появившихся входящих величин Q , x , $M_{\text{soft};1}$, $M_{\text{soft};2}$ и др.). Полезно было бы дополнительно объяснить, о чем все-таки идет в данном абзаце. К сожалению, стоит отметить,

что подобные стилистические и семантические огрехи присутствуют в тексте диссертации в заметном количестве.

18. Имеются также замечания и по поводу оформления диссертации, а именно, большинство рисунков в первой главе состоят из двух графиков, расположенных по вертикали, в то время как в подписях они указаны как правый и левый график. В главе 1 на стр. 37 автор использует обозначение N_s (на стр. 35) и N (на стр. 37). Величина N не была введена в тексте диссертации, и непонятно, имеется в виду N_s (т.е. это опечатка) или имеется в виду что-либо еще.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена некоторого количества опечаток, орфографических и стилистических ошибок. Соискатель Калашников Д. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и согласился с замечаниями.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Сделана оценка чувствительности проектов FASER-I и FASER-II к минимальному суперсимметричному расширению Стандартной модели, включающему частицы сголдстино.

2. Сделана оценка чувствительности проекта SCTF к моделям скрытого сектора, включающим тёмный фотон, миллизаряженные частицы, аксионоподобные частицы и Z' - бозон. Оценка, полученная соискателем для проекта SCTF, актуальна и для STCF, что было отмечено соискателем в ответе на замечание 8.

3. Сделана оценка чувствительности проекта NICA MPD к моделям скрытого сектора, включающим тёмный фотон и аксионоподобные частицы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. Впервые проект эксперимента FASER рассматривался как инструмент для поиска легких сголдстино. Учитывались особенности геометрии детектора,

ее возможности по регистрации частиц. Впервые предложены различные варианты сигналов для поиска легких столдстино на FASER-I и FASER-II.

2. Изучены перспективы проектов электрон-позитронных коллайдеров: STCF в Китае и SCTF в России, по проверке моделей новой физики с тёмным фотоном, аксионоподобной частицей, миллизаряженными частицами и Z' -бозонами. Также впервые был предложен метод прямых поисков миллизаряженных частиц на проектах STCF и SCTF.

3. Впервые предложен механизм поиска частиц новой физики на проекте NICA MPD, использующий возможности внутреннего трекера по определению вторичных вершин. Установлено, что область параметров моделей, включающих темные фотоны и аксионоподобные частицы, которая может быть исследована на NICA MPD, не закрыта предыдущими экспериментами.

Результаты данного исследования обладают значительной теоретической и практической значимостью в области физики элементарных частиц и космологии, поскольку позволяют оценить перспективы планируемых и действующих проектов по поиску новой физики за пределами Стандартной модели. Результаты диссертации позволят ограничить или исключить определённые теоретические модели, предложив взамен другие.

Оценка достоверности результатов диссертации показала, что они получены с использованием апробированных в научной практике методов квантовой теории поля. Полученные соискателем выводы согласуются по ряду результатов с выводами работ мирового уровня других исследователей. Основные результаты диссертации прошли апробацию на научных конференциях и семинарах, в том числе международных. Таким образом, результаты диссертации обоснованы и достоверны.

Личный вклад соискателя состоит в том, что им либо при его непосредственном участии получены все представленные в диссертации результаты. Вклад соискателя во всех опубликованных работах по теме диссертации был определяющим.

На заседании 25 сентября 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Калашникову Дмитрию ученую степень кандидата физико-математических наук за теоретическое исследование чувствительности

современных экспериментов к ряду моделей новой физики с легкими, в том числе долгоживущими частицами.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **19** человек, из них **7** докторов наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **19**, 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.

25.09.2025 г.

М.П.