Минобрнауки России

**Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки**

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии
наук
(ИЯФ СО РАН)**

**Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г.
Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su
ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136
ИНН/КПП 5408105577 / 540801001**

от 20 августа 2025 № 15311 – 06/11-38/2095

«УТВЕРЖДАЮ»

ВРИО директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института ядерной физики им. Г. И.
Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук

Беркаев Дмитрий Евгеньевич

« 20 » августа 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт
ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук»

на диссертацию

Калашникова Дмитрия

**«Ускорительные эксперименты как окно в новую физику: анализ и
предсказания»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.3 «теоретическая физика»

Актуальность темы диссертации

Перед началом экспериментальных исследований ключевой задачей
становится предсказание возможных сигналов новой физики с помощью
феноменологических расчётов. Эти расчёты помогают оценить ожидаемое
число событий, связанных с новыми частицами, проанализировать фоновые

процессы и определить диапазон параметров модели, доступных для изучения. Данная диссертационная работа как раз и посвящена таким расчётам. Расчёты проведены для важных экспериментальных проектов FASER, STCF, SCTF, NICA.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Д. Калашникова состоит из введения, трех разделов, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 131 страница. Список литературы достаточно полон и содержит 121 наименование.

Во введении отмечена актуальность работы; обозначены цель, основные задачи работы, методы исследования, теоретическая и практическая значимость, научная новизна, а также положения, выносимые на защиту, и обоснована степень достоверности и апробация результатов

Первый раздел посвящен анализу сигнала сголдстино в эксперименте FASER в трех основных модах рождения сголдстино. Рассмотрена модель сголдстино в рамках эффективной суперсимметричной теории. Рассмотрен класс моделей с различными соотношениями параметров. Определены области чувствительности проектов экспериментов FASER-I и FASER-II на LHC к суперсимметричным моделям с легкими сголдстино. Вычислены темпы прямого рождения сголдстино в столкновениях протонов на коллайдере и темпы рождения в распадах мезонов. Рассмотрены различные варианты сигнала с лептонами, адронами и фотонами в конечном состоянии. Рассмотрен вопрос о чувствительности к псевдоскалярным сголдстино.

Второй раздел посвящен поиску скрытого сектора на с-тау фабриках (эксперимент STCF в Китае и эксперимент SCTF в России). В данном разделе оценивается чувствительность эксперимента на SCTF к моделям с тёмным фотоном, миллизаряженными частицами (прямые поиски), с тёмным массивным Z_0 -бозоном и с аксионоподобной частицей в рамках т.н. скалярного портала. Учитывалась возможность поляризации пучка

электронов (как в STCF, так и на SCTF), что заметно улучшает чувствительность эксперимента к моделям.

Третий раздел посвящен поиску частиц скрытого сектора на ускорительном комплексе NICA на детекторах MPD и SPD. Хотя основной целью экспериментов является исследование адронной материи и кварк-глюонной плазмы, однако возможности данных детекторов также позволяют проводить исследования в области фундаментальной новой физики. Для оценки перспектив экспериментов на коллайдере NICA рассмотрены три минимальных расстояния вторичной вершины от точки взаимодействия. В данном разделе рассмотрены модели с темным фотоном (рассматривались только распады в электрон-позитронную пару), со скалярными и псевдоскалярными частицами (аксиноподобная модель без взаимодействия с фермионами, рассмотрены только распады в два фотона). Рассмотрена роль ультрапериферических столкновений в поисках аксиноподобных частиц. Утверждается, что после модернизации детектора MPD и установки внутреннего трекера появится принципиальная возможность определять вторичные вершины с достаточной точностью для использования их в качестве сигнатуры при поиске новой физики.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, даны перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

Содержание диссертации в целом соответствует цели диссертации, а также заявленной специальности 1.3.3 «теоретическая физика». Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертации обусловлена тем, что для впервые проект эксперимента FASER рассматривался как инструмент для поиска легких сголдстино: предложены различные варианты сигналов для поиска легких сголдстино на экспериментах FASER-I и FASER-II. В диссертационной работе рассмотрены перспективы электрон-позитронных коллайдеров STCF в Китае

и SCTF в России на предмет верификации моделей с тёмным фотоном, аксионоподобной частицей, миллизаряженными частицами и Z' -бозонами. Впервые предложен способ прямого поиска миллизаряженных частиц на проектах STCF и SCTF. Наконец, впервые предложен механизм поиска частиц новой физики на проекте NICA MPD, использующий возможности внутреннего трека по определению вторичных вершин.

Научная и практическая значимость результатов работы

Результаты данного исследования имеют важное значение для экспериментальной физики элементарных частиц и космологии. Они позволяют оценить в будущих экспериментах перспективы обнаружения явлений за пределами Стандартной модели в рамках суперсимметричных теорий, включающих взаимодействие обычных частиц с сголдстино, а также в рамках моделей тёмного фотона, миллизаряженных частиц и аксионоподобных моделей. Результаты могут быть непосредственно использованы в проектах FASER, STCF и NICA.

Замечания по диссертационной работе

1. 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, как влияние этого фона 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 $N_{\ell P \nu} \sim 10$ 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, что этот фон действительно будет очень мал, но это требует более убедительных аргументов, чем те, которые приведены в диссертации.

2. Во второй главе, посвященной прямой регистрации миллиардов заряженных частиц (МСР), обсуждается только фон от ложных хитов в камере. При этом не приведено ясного описания, как именно предлагается отделять события с миллиардов заряженными 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.

3. Нерелятивистским миллиардов заряженным 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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).

8. 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 (1.13) возникает выражение $(m_p^2 - m_{\pi,\eta})^2$ в знаменателе, явно некорректное по размерности.

Перечисленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. По итогу анализа публикаций соискателя в высокорейтинговых журналах достоверность выводов и результатов работы, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений.

Заключение

Диссертационная работа Калашникова Дмитрия «Ускорительные эксперименты как окно в новую физику: анализ и предсказания» на соискание ученой кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой и содержит решения актуальных задач в области физики элементарных частиц. Достоверность полученных результатов, их научная новизна и практическая значимость обоснованы и подкреплены качественными публикациями в высокорейтинговых зарубежных журналах. Исследование выполнено на достаточно высоком научном уровне и его результаты, связанные с оценкой чувствительности проектов FASER-I и FASER-II, SCTF и STCF, NICA MPD к моделям вне рамок Стандартной модели, могут быть полезны для будущего анализа перечисленных экспериментов. Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 (в редакции, действующей на 1 января 2025 г.), а ее автор Калашников Дмитрий, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 «теоретическая физика».

Отзыв составлен с учетом мнений и замечаний, высказанных на экспериментальном семинаре ИЯФ СО РАН, состоявшемся 20 июня 2025 г. Отзыв утвержден на заседании профильного совета ИЯФ СО РАН по физике элементарных частиц 20 августа 2025 г.

Отзыв составил:

Старший научный сотрудник теоретического отдела ИЯФ СО РАН, учёный секретарь ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н. Резниченко Алексей Викторович, специальность 01.04.02 – «теоретическая физика»,

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, к. 330, г. Новосибирск, 630090

телефон (383) 329-47-99

электронная почта: A.V.Reznichenko@inp.nsk.su

подпись _____ Резниченко Алексей Викторович

20 августа 2025 г.

Подпись Резниченко Алексея Викторовича заверяю:

заместитель директора ИЯФ СО РАН по научной работе

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

_____ Логашенко Иван Борисович

телефон (383) 329-47-14

электронная почта: I.V.Logashenko@inp.nsk.su

**Список публикаций работников организации по теме диссертации в
рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет**

№	Публикация
1	Aad G., Collab. ATLAS, Anisenkov A.V., Baldin E. M., Beloborodov K., Bobrovnikov V. S., Bogdanchikov A. G., Buzykaev A. R., Kazanin V. F., Kharlamov A. G., Kharlamova T., Maslennikov A. L., Maximov D. A., Peleganchuk S. V., Rezanova O. L., Talyshev A. A., Tikhonov Yu. A., Zhulanov V. Search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and three or more b-jets in 139 fb ⁻¹ of proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector // European Physical Journal C. - 2023. - Vol. 83, Is. 7. - Art.nr 561. -41 p. - Bibliogr.: 104 ref. - DOI 10.1140/epjc/s10052-023-11543-6.
2	Ablikim M., Collab. BESIII, Achasov M.N., Muchnoi N.Yu., Nikolaev I.B. Search for invisible decays of a dark photon using e ⁺ e ⁻ annihilation data at BESIII // Physics Letters B. - 2023. - Vol. 839. - Art.nr 137785. - Bibliogr.: 34 ref. - DOI 10.1016/j.physletb.2023.137785.
3	Reznichenko A.V., I.S. Terekhov, A.I. Chernykh, S.V. Smirnov, Log-log growth of channel capacity for nondispersive nonlinear optical fiber channel in intermediate power range: Extension of the model, PHYSICAL REVIEW E Vol. 99, Iss.1, 012133 (2020), DOI: 10.1103/PhysRevE.99.012133
4	A. Reznichenko, A. Bondar, A. Grabovsky, A. Rudenko, V. Vorobyev, Measurement of the weak mixing angle at a Super Charm-Tau factory with data-driven monitoring of the average electron beam polarization, Journal of high energy physics, 3, 076 DOI: 10.1007/JHEP03(2020)076
5	V. Reznichenko, I.S. Terekhov, Path Integral Approach to Nondispersive Optical Fiber Communication Channel, Entropy, 22, 607, 2020, doi:10.3390/e22060607

6	<p>A.V. Reznichenko, A. I. Chernykh, E. V. Sedov, I. S. Terekhov, Optimal input signal distribution for nonlinear optical fiber channel with small Kerr nonlinearity, Journal of the Optical Society of America B Vol. 39, Issue 3, pp. 810-820 (2022) https://doi.org/10.1364/JOSAB.445376</p>
7	<p>A.V. Reznichenko, V.O. Guba, Path-integral approach to mutual information calculation for nonlinear channel with small dispersion at large signal-to-noise ratio, Physical Review E. - 2024. - Vol. 110, Is. 6. Art.nr 064152, DOI 10.1103/PhysRevE.110.064152</p>
8	<p>Aad G., Collab. ATLAS, Anisenkov A.V., Baldin E. M., Beloborodov K., Bobrovnikov V. S., Bogdanchikov A. G., Buzykaev A. R., Kazanin V. F., Kharlamov A. G., Kharlamova T., Maslennikov A. L., Maximov D. A., Peleganchuk S. V., Rezanova O. L., Talyshev A. A., Tikhonov Yu. A., Zhulanov V. Measurements of W^+W^- production in decay topologies inspired by searches for electroweak supersymmetry // European Physical Journal C. - 2023. - Vol. 83, Is. 8. - Art.nr 718. -29 p. - Bibliogr.: 103 ref. - DOI 10.1140/epjc/s10052-023-11508-9.</p>