

## ОТЗЫВ

официального оппонента Пархоменко Александра Яковлевича на диссертацию Калашникова Дмитрия “Коллайдерные эксперименты как окно в новую физику: предсказания для лёгких частиц”, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – “Теоретическая физика”.

Диссертационная работа Д. Калашникова посвящена рассмотрению перспектив обнаружения частиц новой физики в диапазоне масс от 10 МэВ до 5 ГэВ в ускорительных экспериментах FASER в ЦЕРНе, на планируемой Супер чарм-тау фабрике (Super c-tau factory — SCTF) и MPD на NICA в ОИЯИ (г. Дубна). В работе рассматривались различные варианты моделей новой физики, а именно, суперсимметричное расширение Стандартной Модели (СМ) с лёгкими сголдстино, а также модели с темным фотоном, миллизаряженными частицами, аксионоподобной частицей и  $Z'$ -бозоном. В диссертации предложены различные интересные каналы для поиска рассмотренных в работе новых частиц, проведена оценка фона и представлены области параметров моделей, к которым будут чувствительны эксперименты.

**Актуальность** и **значимость** проведенных исследований подтверждается тем, что приоритетная задача большинства экспериментов по физике элементарных частиц — обнаружение новой физики. Теоретические оценки ожидаемых сигналов от новой физики позволяют определить область параметров моделей, пригодных для исследований.

**Практическая значимость работы** заключается в определении областей параметров моделей, к которым чувствительны современные и предлагаемые ускорительные эксперименты. Результаты работы могут способствовать развитию исследований в рассмотренных моделях, поскольку в обозримом будущем разрешенные области значений параметров моделей можно проверить экспериментально. Возможное исключение части или всей допустимой области позволяет наложить ограничения на определённые теоретические модели, что представляет собой важный вклад в развитие физики элементарных частиц.

Диссертация Дмитрия Калашникова состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 131 страницу, включая 61 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 121 наименование.

**Во введении** представлен краткий обзор состояния ускорительных исследований в области новой физики, сформулированы задачи проведенных исследований, обоснована актуальность работы и указана практическая значимость полученных результатов. Также приводится список работ Д. Калашникова из пяти наименований по теме диссертации и отмечено, что результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии.

**В первой главе** рассмотрена феноменология модели суперсимметричного расширения СМ с лёгкими (0.2 — 5 ГэВ) сголдстино на экспериментах FASER-I и FASER-II на LHC. Во введении к главе дается краткий обзор суперсимметричных моделей и их возможная роль в дальнейшем развитии теории фундаментальных взаимодействий. Основную часть главы автор начинает с эффективного лагранжиана, описывающего взаимодействие лёгких скалярных и псевдоскалярных сголдстино с частицами СМ. Далее представлены формулы для различных мод распада: в лептоны, мезоны и фотоны, а также приведены оценки темпов рождения сголдстино в распадах мезонов, происходящего напрямую в столкновениях протонов и посредством эффекта Примакова. Далее

приводится описание детекторов FASER-I и FASER-II и возможности регистрации сголдстино на них. В вычислительной части главы представлены результаты расчётов в виде областей параметров модели, к которым чувствителен FASER-I и которые можно исследовать на FASER-II. В работе по-отдельности детально рассматриваются три моды распада сголдстино: пара фотонов, лептонная пара и адронный канал. В протон-протонных столкновениях сголдстино могут рождаться напрямую или в распадах вторичных мезонов. Взаимодействие сголдстино с частицами Стандартной модели определяется параметром нарушения суперсимметрии  $F$ , поэтому поиски этой частицы напрямую связаны с определением масштаба нарушения. В предположении отсутствия фоновых событий, при построении областей чувствительности ставилось условие наличия более 3 сигнальных событий. Было получено, что на FASER-I можно исследовать суперсимметричные модели с параметром нарушения  $\sqrt{F} \approx (1500 - 5000)$  ТэВ, а на FASER-II — на 1–2 порядка больше.

**Вторая глава** посвящена изучению возможности поиска частиц темного сектора в рамках проекта Супер чарм-тау фабрики (SCTF) – российского электрон-позитронного коллайдера. Рассмотрены различные модели скрытого сектора: тёмный фотон, миллизаряженные частицы,  $Z'$ -бозон, аксионоподобные частицы. Для поисков выбраны события с недостающей энергией и сигнальной частицей – фотоном. В первом разделе оценивается фон для выбранной сигнатуры и приводятся кинематические ограничения на параметры фотона, которые позволят уменьшить влияние фона и улучшить чувствительность установки к частицам новой физике. В качестве еще одной возможности, способствующей уменьшению фона, указана поляризация пучка электронов. В зависимости от конкретной модели, перспективы SCTF хорошо дополняют другие экспериментальные проекты или даже превосходят их. Отдельно автором рассматривается возможность прямых поисков миллизаряженных частиц, основанная на том, что на пороге рождения частицы будут иметь малую скорость и могут быть задетектированы. Прямые поиски могут дополнить результаты, полученные при изучении процессов с недостающей энергией. В диссертации рассматриваются два режима работы эксперимента. В первом набирается большая статистика в нескольких точках по энергии пучков, во втором статистика набирается сканированием по энергии с малым шагом. В главе представлены результаты расчета и области параметров моделей, к которым будут чувствительны эксперименты на SCTF.

**В третьей главе** рассматриваются перспективы эксперимента MPD на NICA в ОИЯИ (г. Дубна) по поиску гипотетических частиц в моделях с аксионоподобной частицей и тёмными фотонами. Предложен способ поиска новой физики на MPD, основанный на событиях со смещённой вершиной. В такой сигнатуре частица новой физики, рождаясь в распадах короткоживущих мезонов, пролетает макроскопическое расстояние в детекторе перед распадом. Сигнал с наличием такой смещённой вершины используется автором для установления ограничений на параметры моделей. Показано, что перспективы NICA в поиске новой физики превосходят текущие ограничения на рассматриваемые модели новой физики.

**В заключении** даются перспективы дальнейшей разработки тематики и сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

По представленной диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**.

1) Теоретическая часть диссертации изложена крайне лаконично и представляет собой множество формул без вывода и излишних пояснений. На мой взгляд, текст написан скорее в стиле журнальной статьи, а не квалификационной работы. Тем не менее, такой стиль может быть оправдан, поскольку, как я понял, основной упор был сделан на

использование приведенных выражений для ширин распадов и сечений в численных расчетах допустимых областей параметров моделей новых частиц. Тем не менее, в диссертацию было бы естественно включить вывод наиболее важных ширин распадов и сечений и вынести их в приложения, которые вообще отсутствуют в диссертации.

2) В первой главе представлен эффективный лагранжиан (1.1) – (1.4), технические подробности происхождения которого не обсуждаются и дается 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  $\gamma_5$ .

3) В формулу (1.7) входит  $\beta$ -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  $\beta$ -функции КХД, входящей в (1.29).

4) В диссертации рассматривается  $\eta$ -мезон, однако его кварковый состав в работе не указан явно. Следует отметить, что  $\eta$ -мезон — суперпозиция октетного  $\eta_8$ - и синглетного  $\eta_0$ -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  $\eta$ -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.

5) В формулах (1.10) и (1.11) представлены ширины распадов  $S \rightarrow \pi \pi$  и  $S \rightarrow K K$ . Почему не рассматривается процесс  $S \rightarrow \eta \eta$ ?

6) В главе 2 детально рассматривается российский проект SCTF, параметры которого приводятся и на их основе получены оценки ожидаемых событий. Однако, аналогичный проект STCF (Super  $c$ - $\tau$  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.

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 неплохо дать определения переходных формфакторов посредством матричного элемента  $b \rightarrow s$  тока, перечислить известные в литературе параметризации и пояснить выбор в пользу использованной параметризации.

8) 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 электрон-позитронной 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.

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

10) Имеется 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.

Отмеченные недостатки имеют довольно субъективный характер и не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы, выполненной Дмитрием Калашниковым. Видно, что проделан огромный труд по анализу чувствительности

обсуждаемых в работе экспериментов к различным моделям новой физики. Полученный опыт может быть полезен и весьма востребован при проведении аналогичного анализа других экспериментов, что делает диссертанта ценным специалистом в данной актуальной области исследований. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и отвечает требованиям ВАК. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Результаты, полученные автором, являются новыми, так как чувствительность рассматриваемых экспериментов к данным моделям была исследована впервые. Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывают сомнений, поскольку в работе использовались хорошо известные методы квантовой теории поля, а полученные выражения для сечений и ширин распадов воспроизводят результаты, известные для других экспериментов и моделей. Достоверность, обоснованность и новизна результатов также подтверждаются их успешной апробацией в форме докладов на международных и российских конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых высокорейтинговых научных журналах, входящих в список ВАК. **Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.**

Диссертация Д. Калашникова «Коллайдерные эксперименты как окно в новую физику: предсказания для лёгких частиц», удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Дмитрий Калашников, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика.

01.08.2025

Официальный оппонент

доцент, кандидат физ.-мат. наук,

заведующий кафедрой теоретической физики

Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования

«Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

А.Я. Пархоменко

parkh@uniyar.ac.ru,

+79159666498

150003, г. Ярославль,

Ярославская область,

ул. Советская, д. 14

«Ярославский государственный  
университет им. П.Г. Демидова»

*Подпись А.Я. Пархоменко заверяю:*

Заместитель начальника управления-

директор центра кадровой политики

Л.Н. Куфрина

Сведения об официальном оппоненте  
**Пархоменко Александр Яковлевич**

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика, тел. +79159666498, адрес электронной почты: parkh@uniyar.ac.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», кафедра теоретической физики, доцент, заведующий кафедрой.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A. Ya. Parkhomenko, A. Ali, I. M. Parnova "Branching fraction of the decay  $B^+ \rightarrow \pi^+ \tau^+ \tau^-$  and lepton flavor universality test via the ratio  $R_\pi(\tau/\mu)$ ", Physics Letters B.2023. V. 842. P. 137961
2. A. Ya. Parkhomenko, M. M. Voronenko, A. A. Dobrynina, "Pentaquark Production in Weak Decays of Bottom Baryons." Phys. Atom. Nuclei 86, 874–877 (2023).
3. A. Ya. Parkhomenko, I. M. Parnova "Theoretical analysis of  $B^0 \rightarrow \phi \ell^+ \ell^-$  decay", PoS (Proceedings of Science) Tenth Annual Conference on Large Hadron Collider Physics (LHCP2022). 2023. V. 422. P. 256
4. A. Ya. Parkhomenko, I. M. Parnova "Theoretical Analysis of Rare Decay  $B^+ \rightarrow \pi^+ \tau^+ \tau^-$ ", Physics of Particles and Nuclei Letters. 2023. V. 20. P. 1150—1152
5. A. Ya. Parkhomenko, A. Ali, I. Ahmed, M. J. Aslam, A. Rehman "Interpretation of LHCb Hidden Charm Pentaquarks within the Compact Diquark Model", PoS (Proceedings of Science) 40<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020). 2021. V. 390. P. 527.
6. A. Ya. Parkhomenko, A. Ali, I. M. Parnova "Impact of weak annihilation contribution on rare semileptonic  $B^+ \rightarrow \pi^+ \ell^+ \ell^-$  decay", Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1690. P. 012162