

На правах рукописи

Калашников Дмитрий

Коллайдерные эксперименты  
как окно в новую физику:  
предсказания для легких частиц

1.3.3 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Научный руководитель:**

*Горбунов Дмитрий Сергеевич*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, 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 физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра физики высоких энергий и элементарных частиц, профессор.

*Пархоменко Александр Яковлевич*. Кандидат физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», кафедра теоретической физики, доцент.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН).

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.163.01,  
кандидат физ.-мат. наук

*Демидов Сергей Владимирович*

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Более пятидесяти лет прошло с момента формирования Стандартной модели физики элементарных частиц. Однако, несмотря на её впечатляющие успехи и обнаружение предсказанного бозона Хиггса, остается ряд проблем, нерешенных в Стандартной модели. Пока не удаётся дать ответы на многие вопросы: природа темной материи и темной энергии, осцилляции нейтрино, барионная асимметрия и другие. Таким образом, несмотря на экспериментальное подтверждение предсказаний Стандартной модели, она рассматривается скорее как приближение некоторой более полной теории.

В стремлении раскрыть суть явлений, выходящих за пределы Стандартной модели, научным сообществом было разработано множество теорий, предполагающих существование новых частиц. Среди таких теорий: суперсимметрия [1, 2, 3, 4, 5], модели со скрытыми секторами [6, 7], стерильные нейтрино [8, 9] и множество других моделей. Эти направления, объединённые под общим названием новая физика, нацелены на решение существующих задач, оставаясь в рамках уже подтверждённых экспериментально предсказаний Стандартной модели. Сколь убедительной ни казалась бы теоретическая модель на бумаге, она требует экспериментального подтверждения. Таким подтверждением могут служить различные наблюдаемые: от спектров излучения астрономических объектов до непосредственного открытия частиц, принадлежащих модели новой физики.

Многочисленные экспериментальные проекты, включая FASER [10], STCF [11], SCTF [12], MATHUSLA [13], были специально разработаны для поиска явлений новой физики. Они различаются по своей конструкции, типам и расположению детекторов, источникам частиц и энергетическим характеристикам столкновений, что в совокупности позволяет охватить обширный диапазон моделей новой физики. Важной задачей перед началом экспериментальных поисков является определение ожидаемых сигналов от новой физики, что достигается посредством феноменологических расчётов. Эти расчёты позволяют предсказать вероятное количество событий, связанных с новыми частицами, оценить фоновые процессы и определить область параметров модели, которую можно исследовать. Именно таким расчётам и посвящена данная диссертационная работа.

### **Цель работы**

Целью данной работы является исследование чувствительности экспериментов к различным моделям новой физики: минимальному суперсимметричному расширению Стандартной модели, частицам, подобным аксионам, скрытому сектору, в том числе модели с миллизаряженными частицами. Также ставится задача установления ограничений на параметры этих моделей.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **Задачи**:

1. Оценка чувствительности проектов FASER-I и FASER-II к минимальному суперсимметричному расширению Стандартной модели, включающему частицы сголдстино.
2. Оценка чувствительности проектов SCTF и STCF к моделям скрытого сектора, включающим тёмный фотон, миллизаряженные частицы, аксионоподобные частицы и  $Z'$ -бозон.
3. Оценка чувствительности проекта NICA MPD к моделям

скрытого сектора, включающим тёмный фотон и аксионоподобные частицы.

### **Методы исследования**

Для достижения целей исследования были применены как численные, так и аналитические подходы в рамках квантовой теории поля. Численные методы включали расчёты сечений столкновений, а также анализ сигнала и фона. Аналитические методы были направлены на вывод, где это возможно, точных аналитических формул для описания вероятностей различных процессов. В исследовании активно использовались как программное обеспечение и библиотеки с открытым исходным кодом, так и разработанные автором программы и алгоритмы, что позволило более детально проанализировать и интерпретировать данные.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Результаты данного исследования обладают значительной теоретической и практической значимостью в области физики элементарных частиц и космологии, поскольку позволяют оценить перспективы поиска новой физики за пределами Стандартной модели. Экспериментальные поиски создают возможности для открытия новых фундаментальных частиц и взаимодействий. И даже если результаты оказываются отрицательными, то уточняются или исключаются определённые теоретические модели, что предоставляет ценную информацию для дальнейших разработок.

### **Научная новизна**

1. Впервые проект эксперимента FASER рассматривался как инструмент для поиска легких столдстино. 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. Впервые учитывались возможность проекта ускорительного комплекса по изменению поляризации электронного пучка и сканированию по энергии столкновений. Также впервые был предложен способ прямых поисков миллизаряженных частиц на проектах STCF и SCTF.
3. Впервые предложен механизм поиска частиц новой физики на проекте NICA MPD, использующий возможности внутреннего трека для определения вторичных вершин. Установлено, что область параметров моделей, включающих темные фотоны и аксионоподобные частицы, которая может быть исследована на NICA MPD, не закрыта предыдущими экспериментами.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Определены области чувствительности проектов экспериментов FASER-I и FASER-II на LHC к суперсимметричным моделям с легкими сголдстино. Рассмотрен широкий класс моделей с различными соотношениями параметров. 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.
2. Определены области чувствительности проектов STCF и SCTF к моделям со скрытым сектором: модели с тёмным фотоном, миллизаряженными частицами, аксионоподобной частицей,  $Z'$ -бозоном. В качестве сигнала выбрана сигнатура с фотоном и потерянной энергией. Для таких собы-

тий вычислен фон и предсказаны ожидаемые ограничения на модели при отсутствии сигнала.

3. Определены перспективы прямого поиска миллизаряженных частиц на проектах SCTF и STCF. Рассматривалось возможное рождение пар частиц на пороге их массы. В таком случае они имеют малую скорость и могут быть заметны в трекаре. Оценен комбинаторный фон и предсказаны ограничения на модель, которые дополняют ограничения, полученные из не прямых поисков.
4. Показано, что NICA MPD является перспективным проектом для поисков новой физики, так как он позволяет исследовать области параметров моделей с темным фотоном и аксионоподобной частицей ещё не закрытых предыдущими экспериментами. В работе показано, что при установке внутреннего трекара, способного к точным измерениям вторичной вершины, можно исключить фоновые процессы и поставить новые ограничения на исследуемые модели.

**Степень достоверности и апробация результатов** Достоверность результатов диссертационного исследования обуславливается использованием в нем апробированных в научной практике методов теоретической физики, а также их сравнением с уже известными результатами. Все результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а также изложены на семинарах и международных конференциях:

1. 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021). OAC conference center, Колимбари, остров Крит, Греция. Август 2021.
2. International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology. Лаборатория теоретической физики им.Боголюбова, г.Дубна, Россия. Июль 2022.

3. Летняя научная школа "Супер  $c - \tau$  фабрика". НЦФМ, г.Саров, Россия. Июль 2022
4. 55 Зимняя школа ПИЯФ. Зеленый Бор, г.Луга, Россия. Март 2023.
5. Международная конференция по космологии и физике частиц им. В.А.Рубакова. ЕГУ, г.Ереван, Армения. Октябрь 2023.
6. The 2024 International Workshop on Future Tau Charm Facilities (FTCF2024). USTC, г.Хефэй, Китай. Январь 2024.
7. Московская международная школа по физике 2024. Учебный центр ВШЭ "Вороново", с.Вороново, Россия. Февраль-март 2024.
8. Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН. ОИ-ЯИ, Дубна, Россия. Апрель 2024.
9. Международная конференция "QUARKS-2024". Переславль-Залесский, Россия. Май 2024.
10. Конференция, посвященная 100-летию Ефима Фрадкина. ФИАН, Москва, Россия. Сентябрь 2024.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 131 страницу, включая 61 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 121 наименование.

# Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий обзор текущего состояния исследований в области поиска новой физики, а также выражены благодарности автора.

**Первая глава** посвящена оценке чувствительности эксперимента FASER-I и проекта FASER-II [14, 15, 10] к суперсимметричным расширениям Стандартной модели с лёгкими сголдстино [16, 17, 18, 19]. Рассматриваются различные каналы рождения и распада сголдстино. Определены области параметров модели, к которым будет чувствителен FASER: масса сголдстино ( $m_S$ ), параметр нарушения симметрии ( $F$ ), а также диапазоны значений масс суперпартнёров ( $M_{\gamma\gamma}, M_3$ ) и триллинейные константы связи сголдстино с лептонами и кварками ( $A_l, A_Q$ ), к которым будет чувствителен FASER.

**В разделе 1.1** представлено описание модели со сголдстино, а также ширины распадов скалярных и псевдоскалярных сголдстино в частицы Стандартной модели. Также рассчитаны парциальные ширины распадов мезонов в сголдстино с учётом сохраняющих и нарушающих аромат взаимодействий сголдстино.

**В разделе 1.2** детально описана процедура расчёта ожидаемого числа сигнальных событий на FASER. Приведены фиты для сечения прямого рождения сголдстино в  $pp$ -столкновениях через процесс слияния глюонов. Также рассмотрено сечение рождения сголдстино в процессе Примакова. В заключении раздела анализируется кинематика распадов мезонов в сголдстино, даны формулы для вычисления числа сигнальных событий

и выделены области фазового пространства, вносящие вклад в сигнал.

**В разделе 1.3** представлены области чувствительности FASER-I и FASER-II к моделям с лёгкими сголдстино. Отдельно рассмотрены случаи доминирования распадов сголдстино в два фотона, два лептона или адронные состояния. В конце раздела кратко обсуждается случай псевдоскалярных сголдстино. Для каждой моды распада определены области параметров (параметр нарушения симметрии  $\sqrt{F}$ , масса фотино  $M_{\gamma\gamma}$ , масса глюино  $M_3$ , триллинейные константы связи кварков  $A_Q$  и лептонов  $A_l$ , недиагональные элементы массовой матрицы кварков  $m_{ij}^{LR}$  и массы сголдстино  $m_S$ ), к которым будут чувствительны эксперимент FASER-I и проект FASER-II. Для сигнатуры с двумя фотонами область чувствительности FASER-I

$$\begin{aligned}
\sqrt{F} &< 32 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\
M_{\gamma\gamma} &< \sqrt{F} \\
M_3 &< \sqrt{F} \\
A_Q &< \sqrt{F} \\
m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}
\end{aligned} \tag{1}$$

для масс сголдстино меньше двух масс пиона ( $m_S < 2m_\pi$ ).

Возможности FASER-II значительно больше, и размер области параметров модели, которая может быть исследована шире:

$$\begin{aligned}
\sqrt{F} &< 125 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\
M_{\gamma\gamma} &< \sqrt{F} \\
M_3 &< \sqrt{F} \\
A_Q &< \sqrt{F} \\
m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}
\end{aligned} \tag{2}$$

для  $m_S < 2m_\pi$  и

$$\begin{aligned}
\sqrt{F} &< 25 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\
M_{\gamma\gamma} &< \sqrt{F} \\
A_Q &< \sqrt{F} \\
m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}
\end{aligned} \tag{3}$$

для  $1.5 \text{ ГэВ} < m_S < 4.8 \text{ ГэВ}$ .

При доминировании распадов в пару лептонов, на FASER-I можно изучить следующую область параметров модели

$$\begin{aligned}
\sqrt{F} &< 25 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\
3 \text{ ТэВ} &< A_l < \sqrt{F} \\
M_3 &< \sqrt{F} \\
m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}
\end{aligned} \tag{4}$$

только для  $2m_\mu < m_S < 2m_\pi$ , тогда как FASER-II

$$\begin{aligned}
\sqrt{F} &< 92 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\
3 \text{ ТэВ} &< A_l < \sqrt{F} \\
M_3 &< \sqrt{F} \\
A_Q &< \sqrt{F} \\
m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}
\end{aligned} \tag{5}$$

для  $m_S < 2m_\pi$  и

$$\begin{aligned}
2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} &< \sqrt{F} < 14 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\
2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} &< A_l < \sqrt{F} \\
A_Q &< \sqrt{F} \\
m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}
\end{aligned} \tag{6}$$

для более тяжелых сголдстино,  $1.5 \text{ ГэВ} < m_S < 4.8 \text{ ГэВ}$ .

И наконец для адронной сигнатуры на FASER-I область параметров следующая

$$\begin{aligned}\sqrt{F} &< 3500 \text{ ТэВ} \\ M_3 &< \sqrt{F} \\ 10 \text{ ГэВ} &< m_{ij}^{LR} < 100 \text{ ГэВ}\end{aligned}\tag{7}$$

При  $2m_\pi < m_S < 0.46 \text{ ГэВ}$ . Для FASER-II

$$\begin{aligned}\sqrt{F} &< 25 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \\ M_3 &< \sqrt{F} \\ A_Q &< \sqrt{F} \\ m_{ij}^{LR} &< 100 \text{ ГэВ}\end{aligned}\tag{8}$$

При  $2m_\pi < m_S < 4.8 \text{ ГэВ}$ .

В **разделе 1.4** обсуждаются полученные результаты и перспективы эксперимента FASER-I и проекта FASER-II.

Во **второй главе** рассматриваются перспективы проекта SCTF [11, 12] для поиска новой физики с использованием сигнатуры с недостающей энергией. Такой метод заключается в поиске событий, где суммарная энергия зарегистрированных частиц меньше энергии столкновений. Эта разница свидетельствует о рождении частиц, которые избежали регистрации в детекторе. Такими частицами могут быть частицы новой физики. В качестве сигнальной частицы выбран фотон, такая сигнатура называется монофотонной. Анализируя его распределения по энергии и углу, можно определить характеристики гипотетических частиц, либо установить более строгие ограничения на параметры моделей.

В **разделе 2.1** рассматриваются различные источники фона для монофотонных событий. Основным источником являются процессы с заряженными лептонами и фотонами в конечном состоянии, когда они не попадают в чувствительную область детектора. Этот тип фона можно частично устранить, установив

кинематических ограничений на параметры сигнального фотона, что описано в данном разделе. Также рассматривается фон от событий с рождением нейтрино. Поскольку в проекте SCTF отсутствует нейтринный детектор, такие процессы могут вносить вклад в монофотонные события. Приведены формулы для расчёта сечения рождения фотона вместе с парой нейтрино, а также схема оценки минимального сигнала, необходимого для установления ограничений на параметры модели на уровне достоверности выше 95%.

В **разделе 2.2** рассматривается чувствительность проекта SCTF к модели с тёмным фотоном [6]. Приведено дифференциальное сечение его рождения в паре с фотоном Стандартной модели. В конце раздела представлены графики (Рис.1 и Рис.2), демонстрирующие области чувствительности эксперимента к параметрам модели ( $\varepsilon$  – параметр смешивания темного фотона и фотона Стандартной модели,  $m_{A'}$  – масса темного фотона). Рассмотрены два сценария: в первом тёмный фотон либо вылетает из детектора, не оставляя следов, либо распадается в невидимую моду; во втором он в половине случаев распадается в видимую моду.

В **разделе 2.3** рассмотрена модель новой физики с миллизаряженными частицами [21], представленными фермионами и скалярами. Процедура их поиска аналогична подходу для тёмного фотона, а результаты представлены на графиках Рис.3 и Рис.4. Также в этом разделе описан метод прямого поиска миллизаряженных частиц, рождающихся на пороге массы ( $\sqrt{s} = 2m_\chi$ ). Приведены формулы для расчёта количества ионизаций при прохождении таких частиц через трекер, а также выполнена оценка фоновых процессов. Результаты анализа представлены на Рис.5, где показаны области чувствительности эксперимента к параметрам модели ( $\varepsilon$ -заряд миллизаряженной частицы в единицах заряда позитрона,  $m_\chi$  – масса миллизаряженных частиц). Рассмотрена возможность тонкой настройки энер-

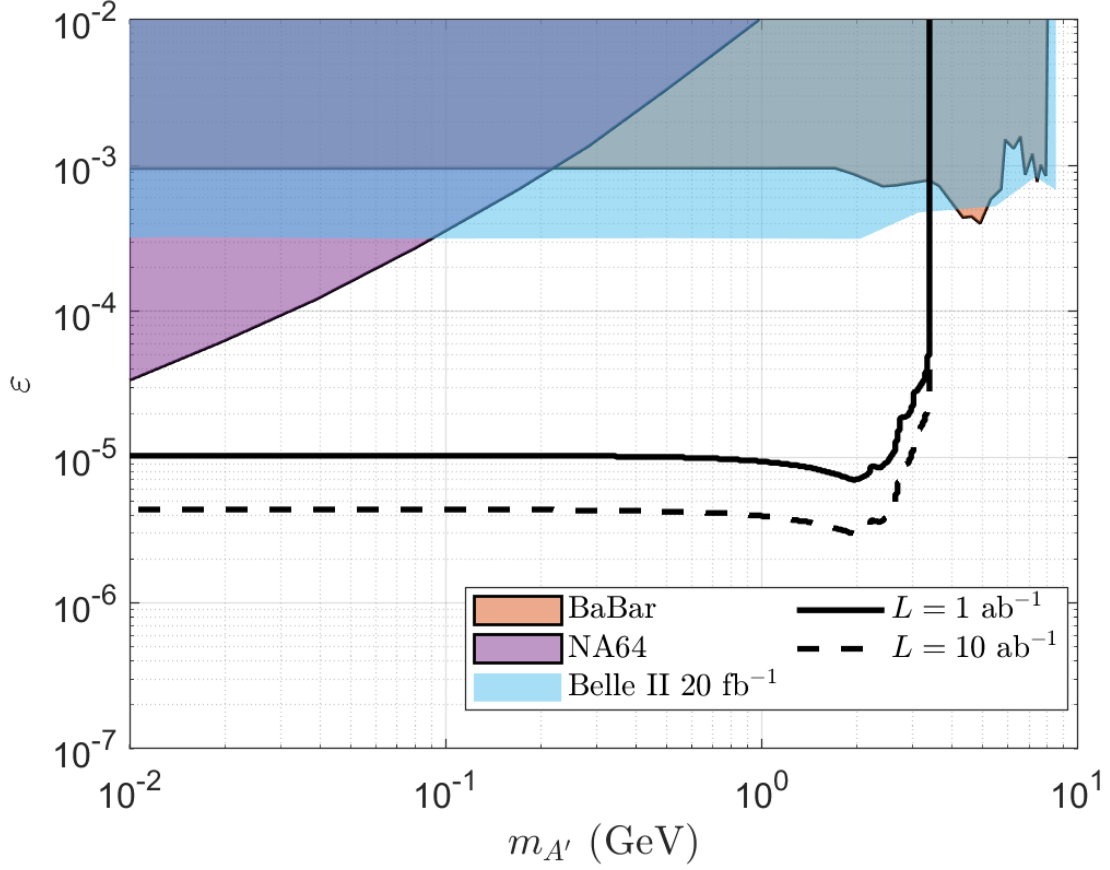


Рис. 1: Области выше черных сплошной и пунктирных линий могут быть протестированы на уровне достоверности выше 95% в  $e^+e^- \rightarrow \gamma A'$  за один год и за десять лет работы, соответственно. Существующие ограничения (цветные и очерченные зоны) и ожидаемые ограничения из Belle-II (цветные зоны) взяты из работ [20].

гии столкновений на SCTF.

В разделе 2.4 рассматривается модель с гипотетическим векторным  $Z'$ -бозоном [7, 27, 28], который по-разному взаимодействует с левыми и правыми спинорами. Сигнатура поиска аналогична модели с тёмным фотоном:  $Z'$ -бозон рождается в

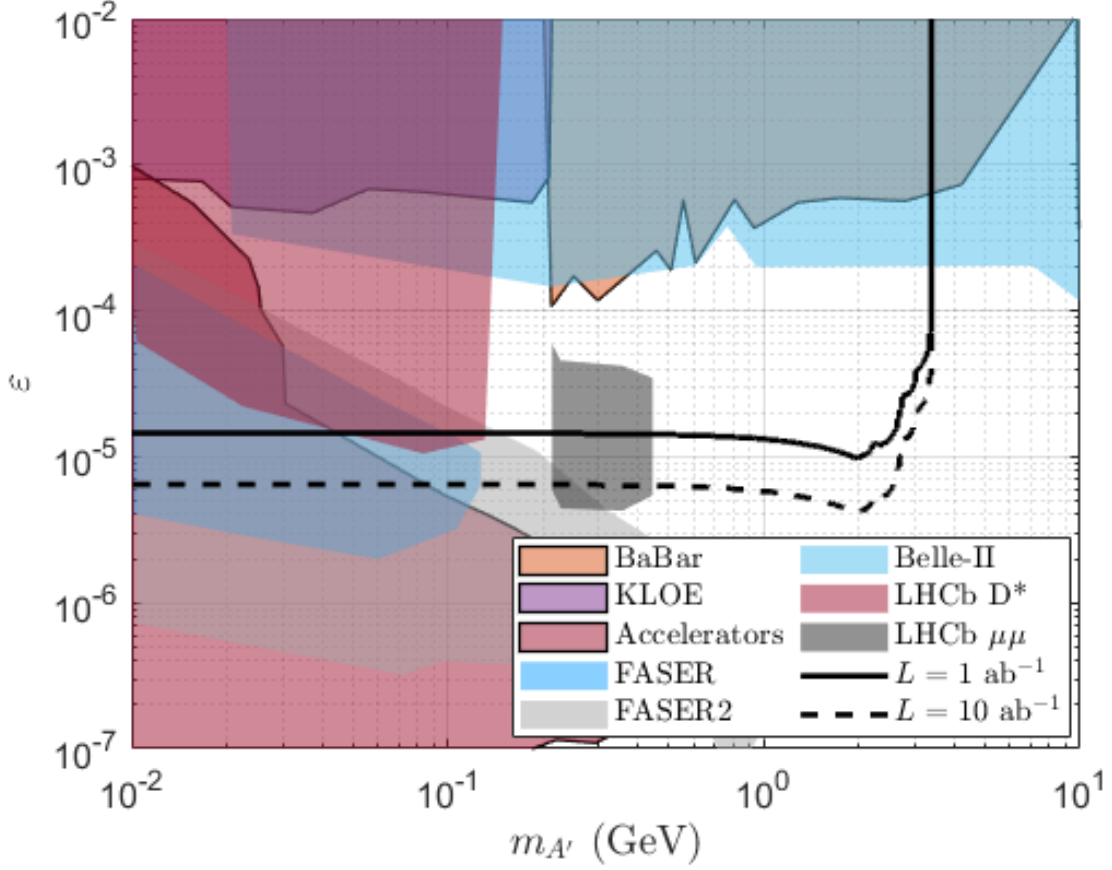


Рис. 2: Области выше черных сплошной и пунктирной линии могут быть протестированы в модели с полускрытым сектором на уровне достоверности выше 95% в  $e^+e^- \rightarrow \gamma A'$  за один год и за десять лет работы, соответственно. Существующие ограничения (цветные и очерченные зоны) и ожидаемые (цветные зоны) взяты из работ [A2].

паре с фотоном Стандартной модели. В разделе приведено сечение его рождения, а также представлены области чувствительности SCTF к параметрам моделей с разным соотношением  $g_V$  и  $g_A$ . Здесь  $g_V$  и  $g_A$  — константы взаимодействия  $Z'$ -бозона с векторным и псевдовекторным токами, соответственно. Резуль-

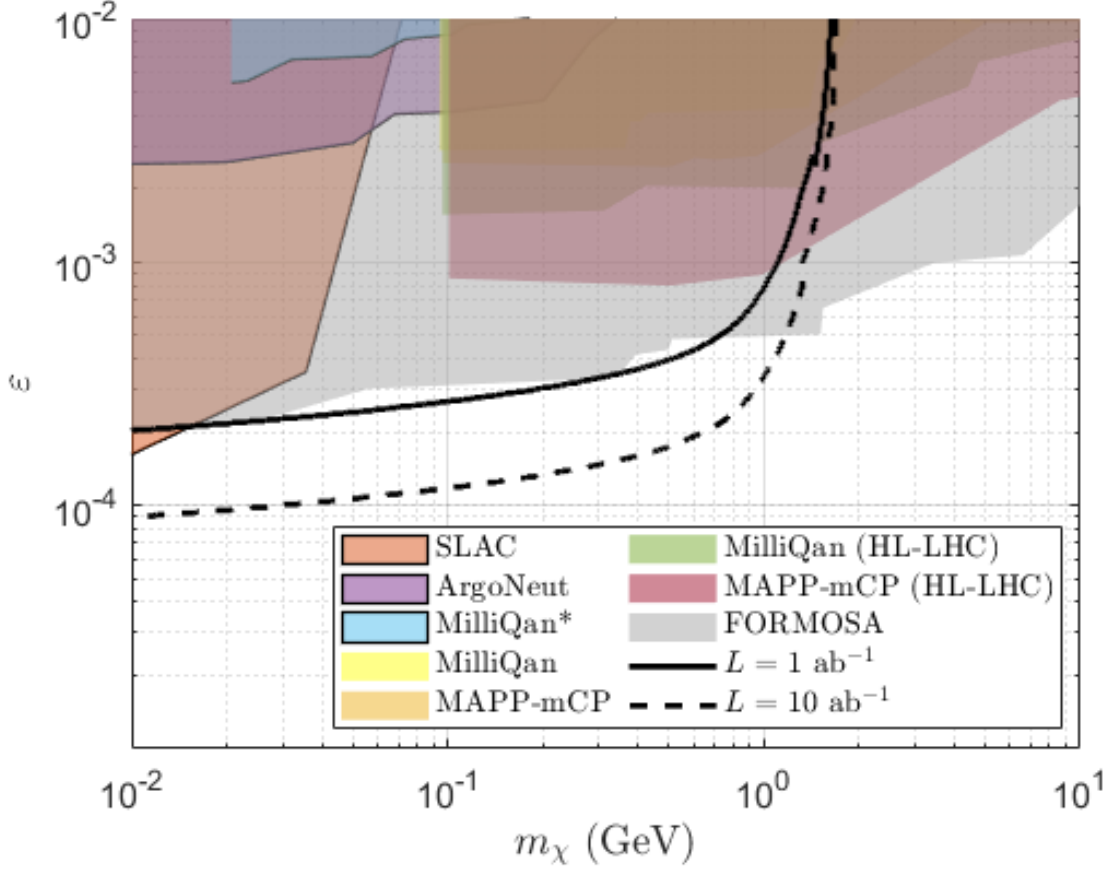


Рис. 3: Области, которые могут быть протестированы на уровне выше 95% в  $e^+e^- \rightarrow \gamma\bar{\chi}\chi$ . Сплошная черная линия соответствует одному году работы, пунктирная – десяти годами. Существующие ограничения (цветные и очерченные) взяты из работы [A2], ожидаемые ограничения MAPP-mCP и MilliQan взяты из работы [22], ограничения для стадии работы HL-LHC и эксперимента FORMOSA взяты из работы [A2].

таты анализа показаны на графиках (Рис.6, Рис.7), иллюстрирующих диапазоны параметров ( $g_v$ ,  $g_A$  и масса  $Z'$ -бозона –  $m_{Z'}$ ), которые могут быть исследованы в эксперименте.

В разделе 2.5 рассматривается модель с (псевдо)скаляр-

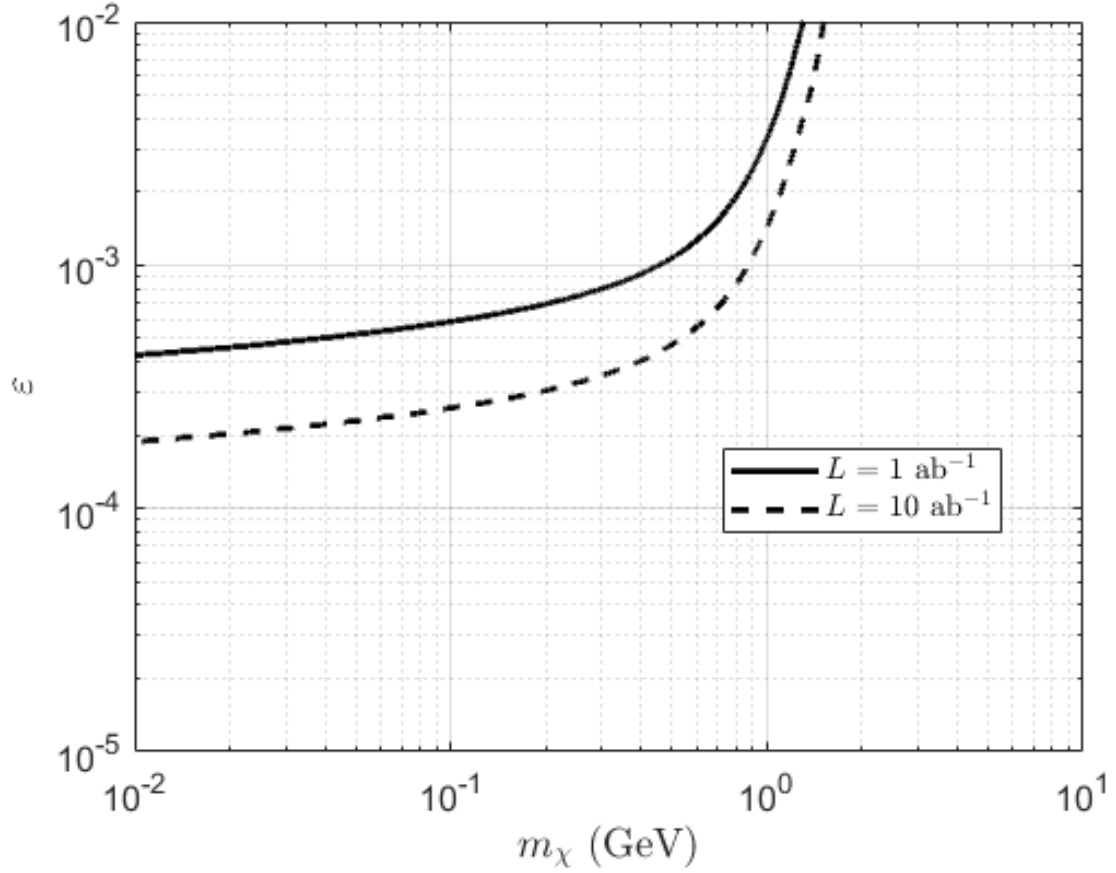


Рис. 4: Области выше черных сплошной и пунктирных линий будут протестированы на уровне выше 95% в  $e^+e^- \rightarrow \gamma\bar{\chi}\chi$  со скалярными миллизаряженными частицами за один год и десять лет работы.

ным гипотетическим бозоном [30]. Приведено сечение его рождения в паре с фотоном, а также результаты анализа, отображённые на графиках (Рис.8), которые иллюстрируют область чувствительности Супер Чарм-Тау Фабрики к параметрам модели. (Рис. 9 показывает результаты для случая полускрытого сектора).

В разделе 2.6 обсуждаются полученные результаты.

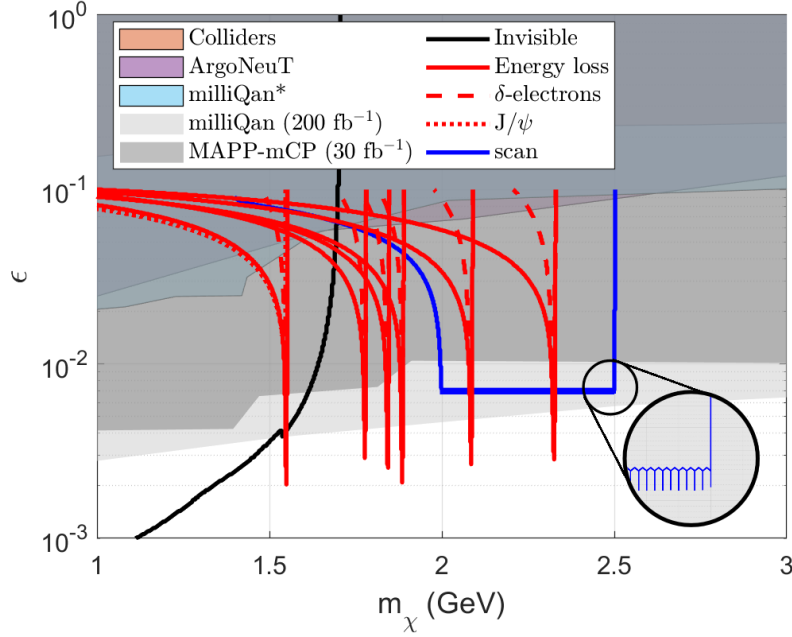


Рис. 5: Области, которые будут протестированы на уровне выше 95% с  $e^+e^- \rightarrow \chi\chi$  и нерелятивистскими МСР (красные сплошные линии для ионизации, пунктирные для  $\delta$ -электронов) за один год работы. Область выше синей линии ( $\epsilon \approx 7 \times 10^{-3}$  с вертикальными скачками величиной 5.7%) может быть исследована при сканировании по энергиям, как описано в [23]. Закрашенные области исключены на 95% уровне достоверности ArgoNeuT [24], milliQan [25], и отработавшими коллайдерами [26]. Закрашенные серым области будут исследованы будущими экспериментами MAPP-mCP and milliQan [22]. Черная сплошная линия соответствует поискам с недостающей энергией.

**Третья глава** посвящена оценке перспектив экспериментального проекта NICA MPD [33] для обнаружения новой физики.

В разделе 3.1 обсуждается сигнатура поиска гипотетических частиц. Для уменьшения фона рассматривалась модерни-

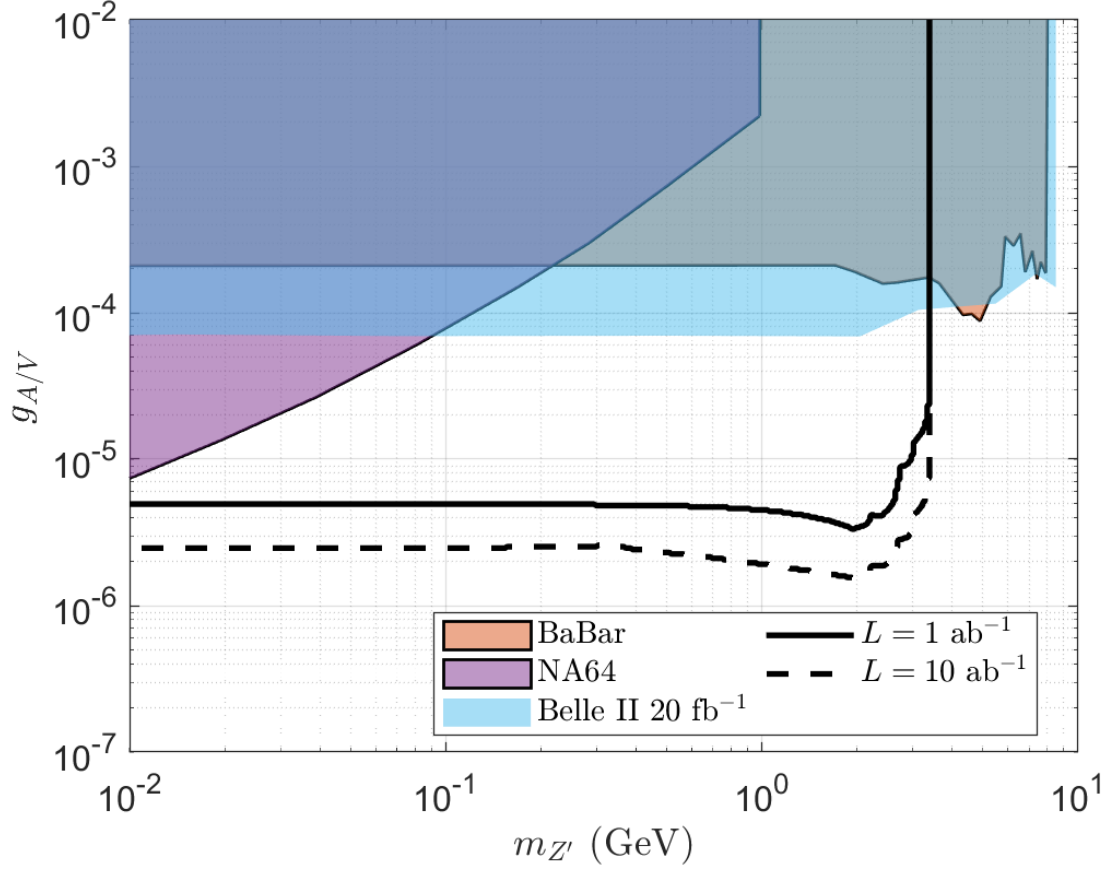


Рис. 6: Области параметров модели с  $Z'$  и  $g_V = g_A$ , который будут протестированы на  $s$ - $\tau$  фабрике за 1 год (черная сплошная линия) и 10 лет (черная пунктирная линия) работы на уровне достоверности выше 95% в  $e^+e^- \rightarrow \gamma Z'$  с 80% положительной поляризацией электронного пучка. Мы получили такие же результаты для моделей с  $g_A = -g_V$  и отрицательной поляризацией, тогда как чувствительность за 10 лет на 7% хуже, чем в модели с  $g_A = g_V$ , из-за фона.

зация внутреннего трекера установки NICA MPD [34], позволяющая обнаруживать вторичные вершины с точностью до 10 мкм. Рассмотрены модели, в которых новые частицы облада-

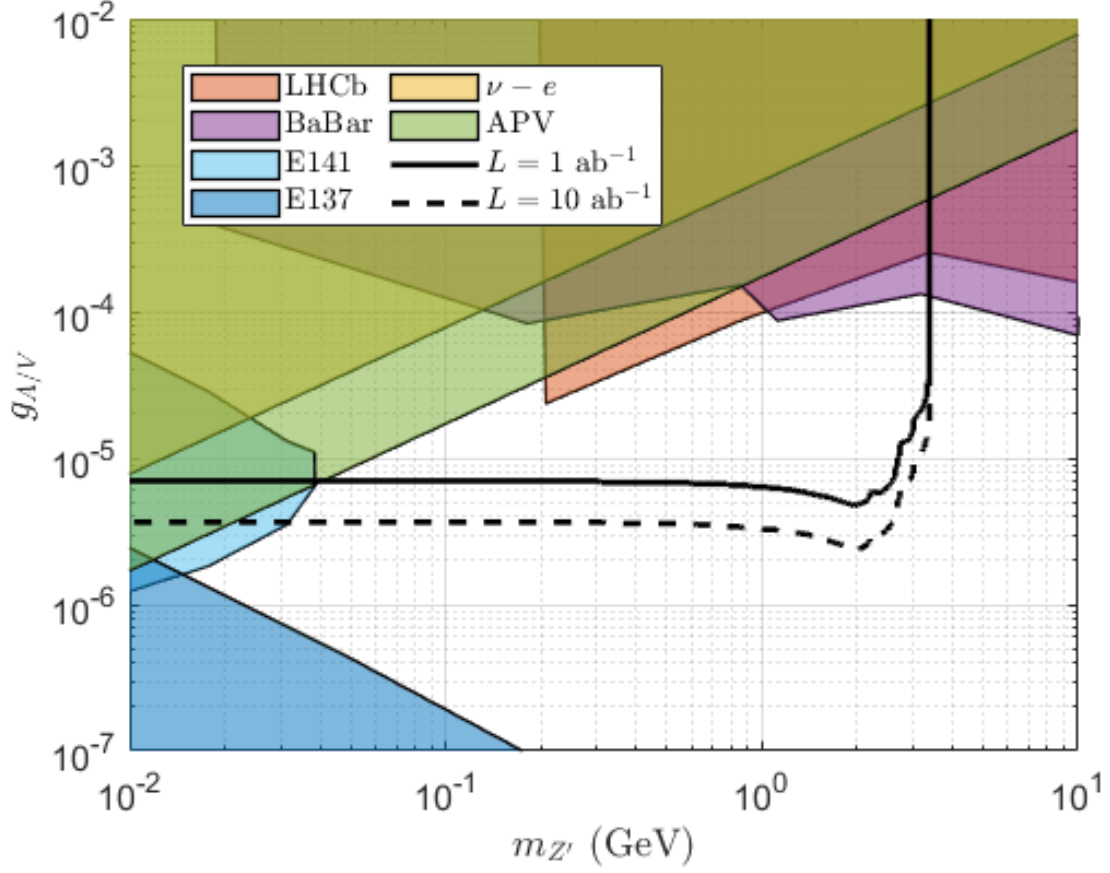


Рис. 7: Области параметров модели с  $Z'$  в случае полускрытого сектора и  $g_V = g_A$ , которые будут протестированы за 1 год (черная сплошная линия) и 10 лет (черная пунктирная линия) на уровне выше 95% в процессах  $e^+e^- \rightarrow \gamma Z'$  с 80% положительной поляризацией электронного пучка. Такие же результаты получаются для моделей  $g_A = -g_V$  и отрицательной поляризацией, где для 10 лет работы область на 7% меньше, чем в модели с  $g_A = g_V$ , из-за большего фона. Ограничения из экспериментов (цветные и очерченные области) взяты из работы [29].

ют большим временем жизни. После рождения в столкновениях ионов на NICA они пролетают макроскопическое расстояние

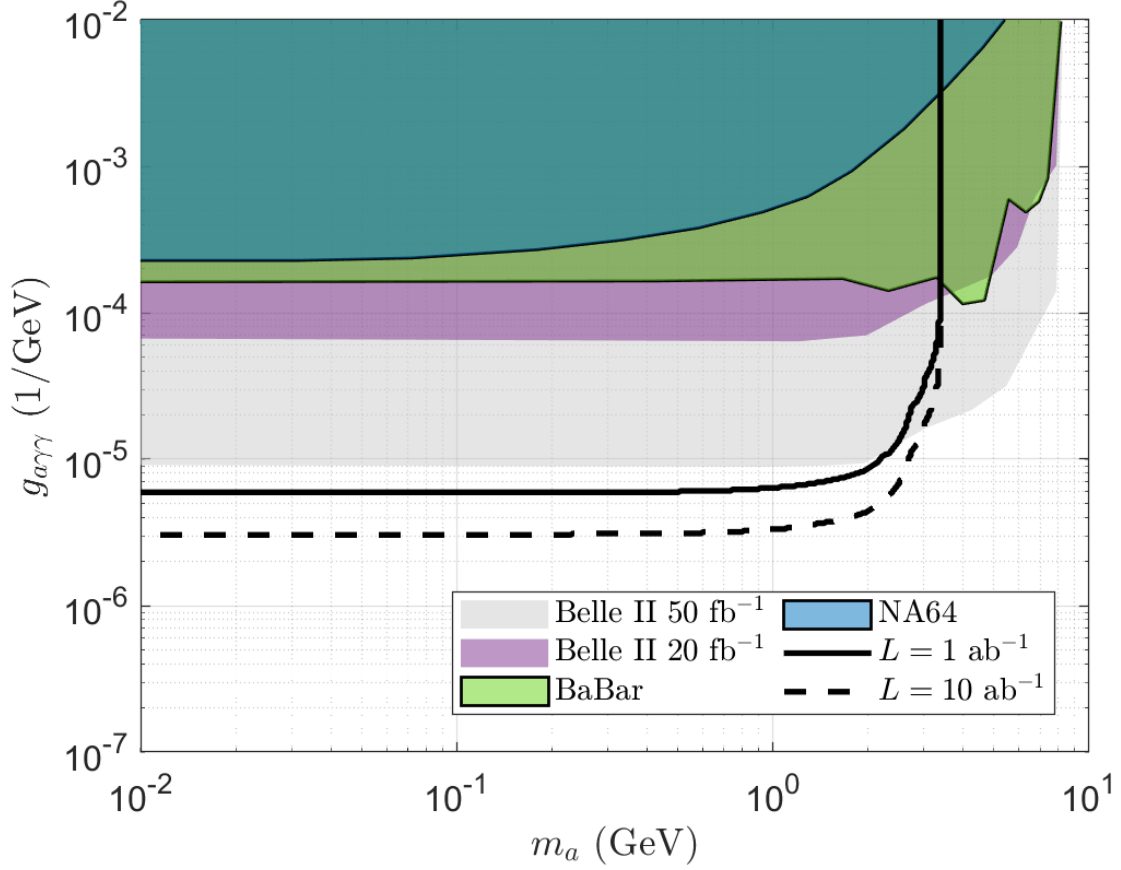


Рис. 8: Ограничения на константу связи с фотоном  $g_{a\gamma\gamma}$ . Черная сплошная линия отвечает статистике, собранной за 1 год, черная пунктирная – за 10 лет. Области над линиями соответствуют уровню достоверности выше 95%. Существующие ограничения (цветные и очерченные) и ожидаемые (цветные) взяты из работы [31].

и распадаются на частицы Стандартной модели. Также анализировались источники фона, связанные с ограниченной точностью работы детекторов.

В разделе 3.2 рассматриваются возможности NICA MPD по поиску новой физики на примере модели с тёмным фотоном,

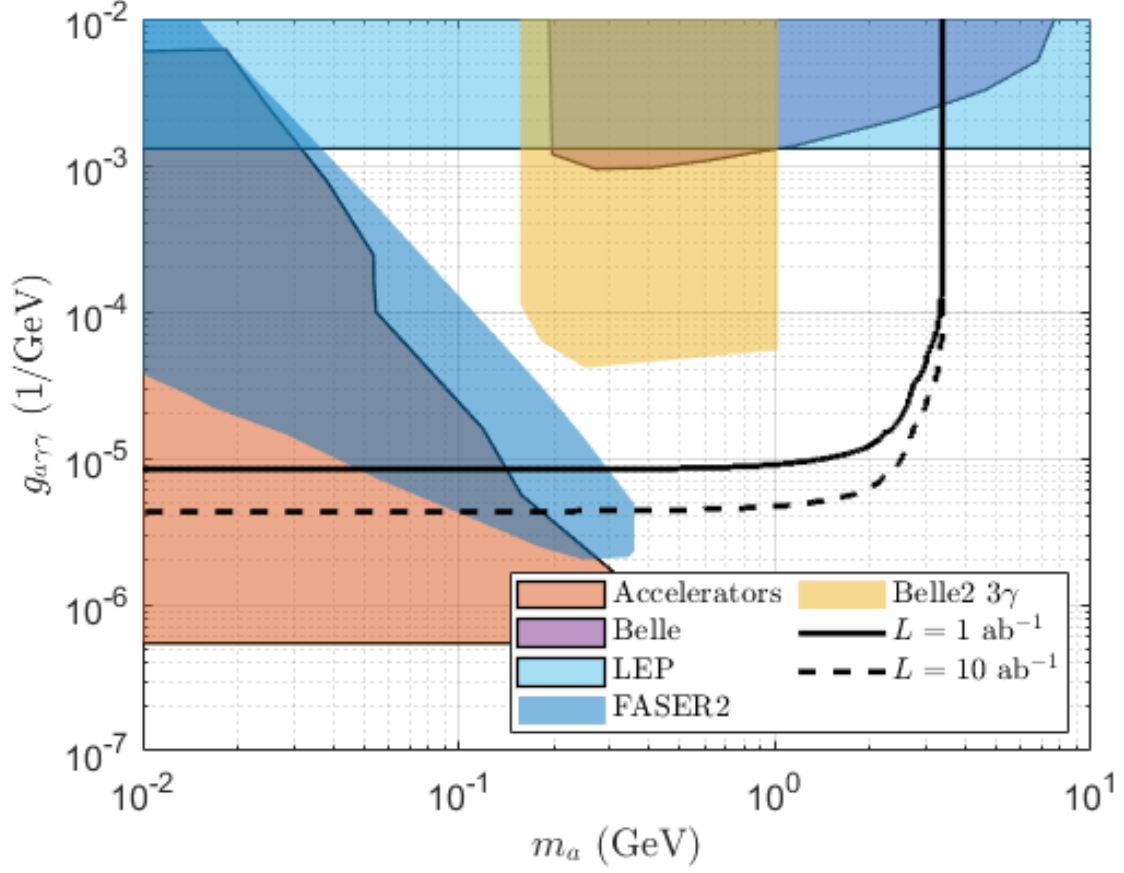


Рис. 9: Ограничения на константу связи с фотоном  $g_{a\gamma\gamma}$  в случае полускрытого сектора. Черная сплошная линия отвечает статистике, собранной за 1 год, черная пунктирная – за 10 лет. Области над линиями соответствуют уровню достоверности выше 95%. Существующие ограничения (цветные и очерченные) и ожидаемые на FASER, Belle2( $3\gamma$ ) и ускорительных экспериментах (цветные) взяты из работы [A2]. Ограничения из Belle и LEP взяты из [32].

который рождается в распадах мезонов. Приведены оценки темпов рождения и распада тёмных фотонов, а также вероятность покрытия ими заметного расстояния ( $L_{min}$ ) перед распадом с

учетом характеристик внутреннего трекера. Результаты представлены на Рис.10: на левом графике показано влияние минимального расстояния пролёта тёмного фотона, а на правом — модели, в которых тёмный фотон может распадаться в скрытый сектор, оставаясь невидимым.

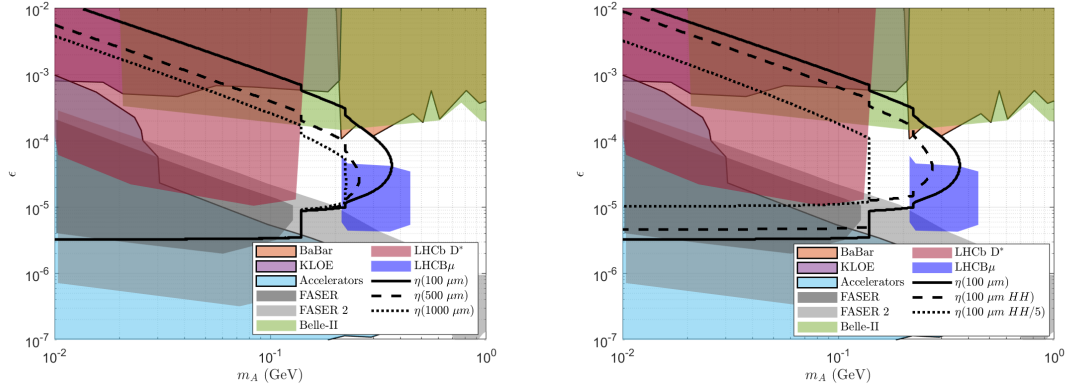


Рис. 10: Области, которые будут протестированы на NICA за 1 год работы на уровне выше 95% для  $A'$ , рожденных в распадах  $\eta$  мезонов. Левый график показывает результаты для разной минимальной дистанции  $L_{min}$ . Правый график показывает результаты для разных значений  $\Gamma_{tot}$ . Существующие ограничения (цветные и очерченные) взяты из BaBar на уровне 90% [35], KLOE при 90% CL [36], ускорительные эксперименты (NA64 при 90% CL [37], E141 при 95% CL [38], NuCal при 95% CL [39]) и ожидаемые ограничения (цветные) для FASER при 95% CL [40], Belle-II при 90% CL [41], LHCb  $D^*$  при 95% CL [42], LHCb  $\mu$  при 95% CL [43].

В разделе 3.3 рассматривается модель с псевдоскалярным бозоном, взаимодействующим с фотонами Стандартной модели. Помимо распадов мезонов, аксионоподобные частицы могут рождаться в ультрапериферических столкновениях, то есть столкновениях с большим прицельным параметром в результате слияния фотонов, порождённых заряженными ионами в

движении. В разделе описана методика [44] расчёта числа таких событий, а результаты анализа представлены на Рис.11, где показаны области чувствительности эксперимента к параметрам модели (константа взаимодействия аксионоподобной частицы с фотоном  $g_{a\gamma\gamma}$  и масса аксионоподобной частицы  $m_a$ ).

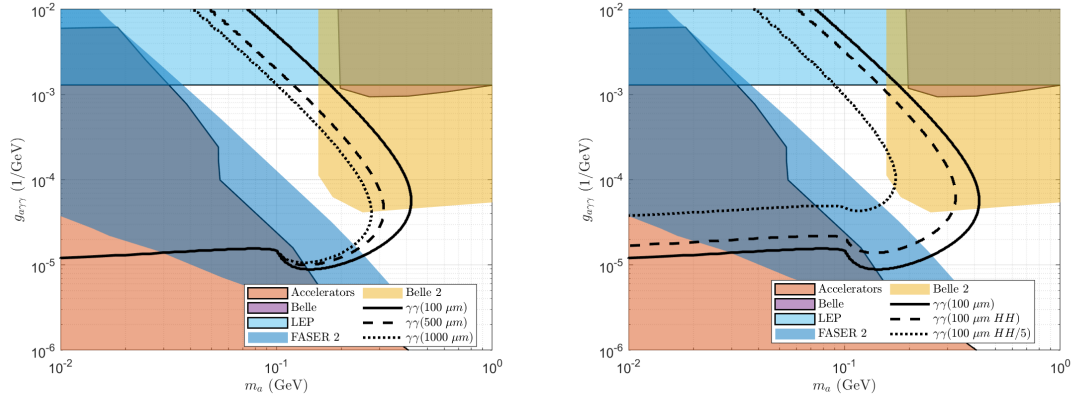


Рис. 11: Области параметров модели с аксионоподобной частицей, которые могут быть протестированы на NICA за 1 год работы на уровне достоверности выше 95%. Аксионоподобные частицы рождаются в ультрапериферических столкновениях ионов. Левый график показывает результаты для разных  $L_{\min}$ . Правый график показывает результаты для разных  $\Gamma_{\text{tot}}$ . Существующие ограничения (цветные и очерченные) взяты из работ по Belle при 95% CL [32], LEP при 95% CL [45], ускорительные эксперименты (NA64 при 90% CL [46], E137 при 95% CL [47], NuCal при 90% CL [48]) и ожидаемые ограничения от FASER при 95% CL [49], Belle-II при 90% CL [50].

В разделе 3.4 обсуждаются полученные результаты.

В заключении обсуждаются перспективы дальнейшей разработки темы и кратко перечислены основные результаты работы.

## Список публикаций по теме диссертации

- [A1] Demidov S., Gorbunov D., Kalashnikov D., Sgoldstino signal at FASER: prospects in searches for supersymmetry. J. High Energ. Phys., 2022, 155, 2022.
- [A2] Feng J. L. et al, «The Forward Physics Facility at the High-Luminosity LHC». J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 50 30501, 2023
- [A3] 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.
- [A4] 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.
- [A5] 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.

## Список литературы

- [1] Giudice G. F. Naturalness after LHC8 // PoS. — 2013. — Vol. EPS-HEP2013. — P. 163. — 1307.7879.
- [2] Schwarz J. H. Superstring Theory // Phys. Rept. — 1982. — Vol. 89. — P. 223–322.
- [3] Witten E. Symmetry Breaking Patterns in Superstring Models // Nucl. Phys. B. — 1985. — Vol. 258. — P. 75.
- [4] Jungman G., Kamionkowski M., Griest K. Supersymmetric dark matter // Phys. Rept. — 1996. — Vol. 267. — P. 195–373. — hep-ph/9506380.
- [5] Bertone G., Hooper D., Silk J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints // Phys. Rept. — 2005. — Vol. 405. — P. 279–390. — hep-ph/0404175.
- [6] Holdom B. Two U(1)'s and Epsilon Charge Shifts // Phys. Lett. B. — 1986. — Vol. 166. — P. 196–198.
- [7] Simplest Z-prime model / He X.-G., Joshi G. C., Lew H., and Volkas R. R. // Phys. Rev. D. — 1991. — Vol. 44. — P. 2118–2132.
- [8] Pontecorvo B. Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge // Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 1967. — Vol. 53. — P. 1717–1725.

- [9] Abazajian K. N., et al. Light Sterile Neutrinos: A White Paper. — 2012. — 4. — 1204.5379.
- [10] FASER: ForwArd Search ExpeRiment at the LHC. — 2019. — arXiv:1901.04468 [hep-ex]. 1901.04468.
- [11] Luo Q., Xu D. Progress on Preliminary Conceptual Study of HIEPA, a Super Tau-Charm Factory in China // 9th International Particle Accelerator Conference. — 2018. — 6.
- [12] Bondar A. E. et al. Project of a Super Charm-Tau factory at the Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk // Phys. Atom. Nucl. — 2013. — Vol. 76. — P. 1072–1085.
- [13] Exploring the Hidden Valley at MATHUSLA / Liebersbach S., Sandick P., Shiferaw A., and Zhao Y. — 2024. — 8. — 2408.07756.
- [14] ForwArd Search ExpeRiment at the LHC / Feng J. L., Galon I., Kling F., and Trojanowski S. // Physical Review D. — 2018. — Feb. — Vol. 97, no. 3. — arXiv:1708.09389 [hep-ph].
- [15] FASER’s physics reach for long-lived particles / Ariga A., Ariga T., Boyd J., Cadoux F., Casper D. W., Favre Y., Feng J. L., Ferrere D., Galon I., Gonzalez-Sevilla S., and et al. // Physical Review D. — 2019. — May. — Vol. 99, no. 9. — arXiv:1811.12522 [hep-ph].
- [16] Ellis J. R., Enqvist K., Nanopoulos D. V. A Very Light Gravitino in a No Scale Model // Phys. Lett. B. — 1984. — Vol. 147. — P. 99–102.
- [17] Ellis J. R., Enqvist K., Nanopoulos D. V. NONCOMPACT SUPERGRAVITY SOLVES PROBLEMS // Phys. Lett. B. — 1985. — Vol. 151. — P. 357–362.

- [18] Giudice G. F., Rattazzi R. Theories with gauge mediated supersymmetry breaking // Phys. Rept. — 1999. — Vol. 322. — P. 419–499. — hep-ph/9801271.
- [19] Dubovsky S. L., Gorbunov D. S., Troitsky S. V. Gauge mechanism of mediation of supersymmetry breaking // Phys. Usp. — 1999. — Vol. 42. — P. 623–651. — hep-ph/9905466.
- [20] Kou E. et al. The Belle II Physics Book // PTEP. — 2019. — Vol. 2019. — P. 12. — 1808.10567.
- [21] Foot R. New Physics From Electric Charge Quantization? // Mod. Phys. Lett. A. — 1991. — Vol. 6. — P. 527–530.
- [22] Acharya B. et al. MoEDAL-MAPP, an LHC Dedicated Detector Search Facility // 2022 Snowmass Summer Study. — 2022. — 9. — 2209.03988.
- [23] Achasov M. et al. STCF Conceptual Design Report: Volume I - Physics & Detector. — 2023. — 3. — 2303.15790.
- [24] Acciarri R. et al. Improved Limits on Millicharged Particles Using the ArgoNeuT Experiment at Fermilab // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 124, no. 13. — P. 131801. — 1911.07996.
- [25] Ball A. et al. Search for millicharged particles in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 3. — P. 032002. — 2005.06518.
- [26] Davidson S., Hannestad S., Raffelt G. Updated bounds on millicharged particles // JHEP. — 2000. — Vol. 05. — P. 003. — hep-ph/0001179.
- [27] Bodas A., Coy R., King S. J. D. Solving the electron and muon  $g - 2$  anomalies in  $Z'$  models // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 12. — P. 1065. — 2102.07781.

- [28] Anomalous and axial  $Z'$  contributions to  $g-2$  / Anastasopoulos P., Kaneta K., Kiritsis E., and Mambrini Y. — 2022. — 9. — 2209.12947.
- [29] Testing freeze-in with axial and vector  $Z'$  bosons / Cosme C., Dutra M., Godfrey S., and Gray T. R. // JHEP. — 2021. — Vol. 09. — P. 056. — 2104.13937.
- [30] Bezrukov F., Gorbunov D. Light inflaton Hunter’s Guide // JHEP. — 2010. — Vol. 05. — P. 010. — 0912.0390.
- [31] Invisible decays of axion-like particles: constraints and prospects / Darmé L., Giacchino F., Nardi E., and Raggi M. // JHEP. — 2021. — Vol. 06. — P. 009. — 2012.07894.
- [32] Abudinén F. et al. Search for Axionlike Particles Produced in  $e^+e^-$  Collisions at Belle II // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Oct. — Vol. 125. — P. 161806.
- [33] Abgaryan V. et al. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA // The European Physical Journal A. — 2022. — jul. — Vol. 58, no. 7.
- [34] MPD-ITS TDR, 2022.
- [35] Lees J. P. et al. Search for a Dark Photon in  $e^+e^-$  Collisions at BaBar // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Nov. — Vol. 113. — P. 201801.
- [36] Anastasi A. et al. Limit on the production of a low-mass vector boson in  $e^+e^- \rightarrow U\gamma$ ,  $U \rightarrow e^+e^-$  with the KLOE experiment // Physics Letters B. — 2015. — Vol. 750. — P. 633–637.
- [37] Banerjee D. et al. Improved limits on a hypothetical  $X(16.7)$  boson and a dark photon decaying into  $e^+e^-$  pairs // Phys. Rev. D. — 2020. — Apr. — Vol. 101. — P. 071101.

- [38] Andreas S., Niebuhr C., Ringwald A. New limits on hidden photons from past electron beam dumps // Phys. Rev. D. — 2012. — Nov. — Vol. 86. — P. 095019.
- [39] Blümlein J., Brunner J. New exclusion limits on dark gauge forces from proton Bremsstrahlung in beam-dump data // Physics Letters B. — 2014. — Vol. 731. — P. 320–326.
- [40] Kling F., Trojanowski S. Forward experiment sensitivity estimator for the LHC and future hadron colliders // Phys. Rev. D. — 2021. — Aug. — Vol. 104. — P. 035012.
- [41] Kou E. et al. The Belle II Physics Book // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2019. — 12. — Vol. 2019, no. 12. — P. 123C01.
- [42] Dark photons from charm mesons at LHCb / Ilten P., Thaler J., Williams M., and Xue W. // Phys. Rev. D. — 2015. — Dec. — Vol. 92. — P. 115017.
- [43] Proposed Inclusive Dark Photon Search at LHCb / Ilten P., Soreq Y., Thaler J., Williams M., and Xue W. // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Jun. — Vol. 116. — P. 251803.
- [44] Vysotsky M. I., Zhemchugov E. V. Equivalent photons in proton and ion–ion collisions at the LHC // Usp. Fiz. Nauk. — 2019. — Vol. 189, no. 9. — P. 975–984.
- [45] Abbiendi et al. G. Multi-photon production in ee collisions at  $\sqrt{s}=181\text{--}209$  GeV // The European Physical Journal C - Particles and Fields. — 2003. — March. — Vol. 26.
- [46] Banerjee D. et al. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Aug. — Vol. 125. — P. 081801.

- [47] Search for neutral metastable penetrating particles produced in the SLAC beam dump / Bjorken J. D., Ecklund S., Nelson W. R., Abashian A., Church C., Lu B., Mo L. W., Nunnaker T. A., and Rassmann P. // Phys. Rev. D. — 1988. — Dec. — Vol. 38. — P. 3375–3386.
- [48] Döbrich B., Jaeckel J., Spadaro T. Erratum to: Light in the beam dump. Axion-Like Particle production from decay photons in proton beam-dumps // author = Döbrich, B. and Jaeckel, J. and Spadaro, T., — 2020. — Oct. — Vol. 2020.
- [49] Axionlike particles at FASER: The LHC as a photon beam dump / Feng J. L., Galon I., Kling F., and Trojanowski S. // Phys. Rev. D. — 2018. — Sep. — Vol. 98. — P. 055021.
- [50] Dolan M., Ferber T., Hearty C. e. a. Revised constraints and Belle II sensitivity for visible and invisible axion-like particles // Journal of High Energy Physics. — 2017. — Dec. — Vol. 2017.

Научное издание  
Калашников Дмитрий  
Коллайдерные эксперименты как окно в новую физику:  
предсказания для легких частиц

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 05.06.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 032/25 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а