

*На правах рукописи*

Краснов Игорь Вячеславович

Перспективы поиска новой физики  
в экспериментах на фиксированной мишени  
нового поколения

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

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:**

*Мелихов Дмитрий Игоревич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”. Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, отдел экспериментальной физики высоких энергий, лаборатория тяжелых кварков и редких распадов, ведущий научный сотрудник.

*Высоцкий Михаил Иосифович*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, лаборатория квантовой теории поля, высококвалифицированный главный научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 на базе 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 и на сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.119.01,  
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

## Общая характеристика работы

Физика за пределами Стандартной Модели (Beyond the Standard Model) является одним из наиболее бурно развивающихся направлений в феноменологии и физике высоких энергий. Самой последней “новой” частицей, чье существование подтвердилось в эксперименте, по-прежнему остается бозон Хиггса, предсказанный в рамках Стандартной Модели уже более полувека тому назад [1] и экспериментально обнаруженный в ЦЕРН в 2012 году [2]. Однако, несмотря на феноменальный успех Стандартной Модели физики частиц, на сегодняшний день она не в силах дать объяснение целому ряду наблюдаемых явлений в нескольких различных направлениях исследований (см. [3], в частности главу “Hypothetical Particles and Concepts”). Поэтому можно с уверенностью сказать, что существует более общая теория, включающая в себя Стандартную Модель как некоторый предел, которая будет согласованно описывать эти явления. Поиск такой теории и исследования модификаций Стандартной Модели для объяснения отдельных явлений как раз и объединяют под общим названием “физики за пределами Стандартной Модели”.

Один из наиболее наглядных примеров неполноты Стандартной Модели дает “нейтринный сектор”. Существование нейтрино было предсказано Паули ещё в 30-х годах 20 века, но, ввиду того что они слабо взаимодействуют с веществом, долгое время нейтрино оставались одними из наименее изученных частиц Стандартной Модели. В рамках Стандартной Модели [4, 5, 6, 7] существует три типа (или, как иногда пишут в литературе, *флэйвора*) нейтрино – связанных с квантовым числом, называемым “лептонным зарядом”, причём все нейтрино Стандартной Модели обладают строго нулевой собственной массой. Это предположение имеет несколько существенных последствий, например, скорость безмассовых нейтрино должна быть равна скорости света, и с поиском отклонений от неё наблюдаемых значений скорости нейтрино, в частности, было связано оказавшееся впоследствии ошибочным [8] заявление эксперимента OPERA о регистрации нейтрино со скоростями, превышающими скорость света. Другим прямым следствием безмассовости нейтрино является то, что флэйворные состояния являются “чистыми”, а значит флэйвор такого нейтрино может меняться только в рамках взаимодействия с веществом. Однако с развитием экспериментальных возможностей целый ряд экспериментов, первыми из которых как правило называют Супер-Камиоканде и SNO [9, 10, 11], обнаружил явление осцилляций нейтрино – изменение флэйвора нейтрино, не объяснимое взаимодействием с веществом. Это явление легко описывается в предположении наличия у нейтрино масс [12, 13, 14], хотя это и заставляет выйти за рамки Стандартной Модели. Рождающееся в ядерных реакциях или во взаимодействиях “флэйворное” нейтрино не обязано являться “чистым” состоянием, отвечающим нейтрино ненулевой массы. Различие флэйворного базиса с массовым приводит к тому, что в общем случае каждое “флэйворное” нейтрино представляет из себя смешанное состояние трёх “массивных” состояний нейтрино, которые по-разному эволюци-

онируют со временем. Легко увидеть, что любое смешанное состояние обладает ненулевой вероятностью перейти в другое смешанное состояние – а значит со временем одно “флэйворное” состояние может перейти в другое. Приведенное описание процесса хорошо согласуется с экспериментальными данными: такие параметры как массы нейтрино и их смешивание продолжают активно изучаться в современных экспериментах, и их уточнение является одним из перспективных направлений изучения для экспериментов нового поколения.

Для того чтобы объяснить явление осцилляций, было выдвинуто большое количество различных теорий, включающих в себя механизм генерации масс нейтрино. Этот вопрос будет кратко рассмотрен в первой главе, но, как правило, будет рассматриваться лишь один такой механизм – добавление (нескольких) массивных тяжелых лептонов (также называемых в литературе *стерильными нейтрино*), смешивающихся с обычными нейтрино (называемых в рамках данной терминологии “*активными*”). Это смешивание дает активным нейтрино массу в рамках так называемого “качельного” механизма [15, 16, 17, 18].

Кратко отметим, что осцилляции нейтрино – не единственное указание на неполноту Стандартной Модели, следующее из нейтринных экспериментов. Существует ряд аномалий, таких как, например, *галлиева*, которые указывают на возможное существование четвертого нейтрино, эффективно смешивающегося с остальными – не существующего в рамках Стандартной Модели. Очевидно, те или иные расхождения с предсказаниями Стандартной Модели наблюдаются во многих областях физики частиц, но полный обзор существующих проблем и экспериментальных “аномалий” далеко выходит за рамки целей диссертации: интересующиеся данной тематикой могут обратиться, например, к обзорам PDG [3].

Помимо наблюдения у обнаруженных частиц свойств, отличных от предсказываемых Стандартной Моделью, есть и другие указания на ее неполноту. Особенно чувствительными к существованию новых частиц являются космология и теории ранней Вселенной. Изучение далеких галактик, реликтового излучения и даже просто количества барионной материи во Вселенной ставит ученых перед необходимостью объяснения таких явлений как изотропность нашей Вселенной, барионная асимметрия Вселенной, наличие темной материи и темной энергии, и не только. Все эти проблемы требуют модифицировать существующие представления: добавить в них новые частицы, изменить сам механизм описания взаимодействий, или и то и другое одновременно. Однако такое коренное изменение теории ведет к далеко идущим последствиям: наблюдаемые данные дают сильные ограничения на подобные модификации и параметры новых моделей. Такие ограничения можно условно разделить на моделезависимые и прямые. Космология дает множество таких ограничений на новые частицы: предполагая некоторую роль, которую эта частица могла играть в ранней Вселенной, можно получить дополнительные ограничения на параметры частицы. В то же время, если новая частица взаимодействует с частицами Стандартной Модели, то это должно быть отражено в соответствующих экспериментальных результатах. Отсутствие указания на подобные частицы в существующих данных позволяет

ограничить параметры гипотетических новых частиц. Как правило, причиной, из-за которой такие частицы до сих пор избегают обнаружения, называется недостаточная статистика или недостаточная точность нынешних экспериментов, за счёт которой малые эффекты теряются в фоновых событиях. Другое объяснение заключается в том, что многие расширения Стандартной Модели предсказывают чрезвычайно массивные новые частицы, которые просто не могут быть рождены в существующих экспериментах. Этот сценарий весьма популярен, многие кандидаты в частицы темной материи попадают в эту категорию. Выбор больших масс также зачастую обуславливается теоретическими соображениями о поведении таких частиц в ранней Вселенной. Однако, поиск подобных частиц текущими установками практически невозможен, более того – для особо массивных частиц в ближайшие десятилетия их обнаружение не представляется реалистичным в принципе. В данной работе этот вариант, по сути, не будет рассматриваться, но по мере возможности будут приводиться уже предложенные в литературе ограничения на рассматриваемые частицы, следующие из космологии и теории ранней Вселенной.

С другой стороны, есть модели с чрезвычайно мало взаимодействующими массивными частицами (*feebly interacting massive particles, FIMP*) – слабее “слабого” взаимодействия – с массами достаточно низкими, чтобы их можно было потенциально обнаружить. Подобные новые частицы должны рождаться наравне с частицами Стандартной Модели (пусть и крайне редко из-за малости константы взаимодействия). Как правило, это нейтральные частицы, которые практически не взаимодействуют с обычным веществом прежде чем вновь распасться в частицы Стандартной Модели. Способ поиска подобных частиц зачастую во многом похож на поиск редких короткоживущих частиц Стандартной Модели. Малость взаимодействия является, безусловно, большой преградой для обнаружения этих частиц, однако в некоторых особых случаях она может быть отличительной чертой, позволяющей выделить предполагаемые события новой физики среди прочих кандидатов. Таким образом, некоторые существующие эксперименты ставят “ограничение сверху” на параметры смешивания таких частиц без каких-либо специальных усилий, направленных на поиск новой физики. В то же время, все больше современных проектов ставят поиск новой физики в качестве одной из своих основных целей и в том числе модифицируют схемы построения экспериментов, чтобы лучше справляться с этой задачей. Первые две главы посвящены именно таким частицам.

Также стоит отметить, что некоторые новые частицы могут быть стабильными, и тогда сигналом их обнаружения могут быть только эти редкие взаимодействия. С теоретической точки зрения подобные частицы зачастую могут играть роль кандидата в частицы темной материи или хотя бы некоторой ее части. У таких гипотетических частиц будет несколько другой сигнал обнаружения чем у распадающихся частиц, и детекторы, направленные на их поиск, должны учитывать этот момент. Третья глава посвящена более подробному изучению такого подхода на конкретном примере.

Механизмы рождения частиц новой физики определяются моделью. В данной работе я ограничусь рассмотрением нескольких конкретных моделей новой физики, таких как “темные” скаляры, уже упомянутые “стерильные” нейтрино и миллизаряженные частицы – частицы с электрическим зарядом, много меньшим заряда электрона. Эти модели ни в коем случае не исчерпывают весь круг возможных сценариев новой физики, но могут служить хорошей иллюстрацией нескольких подходов, которые впоследствии могут быть легко модифицированы, чтобы охватить куда больший спектр конкретных теорий.

Помимо экспериментов на встречных пучках, в последнее время часто для изучения физики за пределами Стандартной Модели строят и используют так называемые эксперименты с пучком на фиксированной мишени (beam dump experiments). Название вполне описывает их – в отличие от коллайдерных экспериментов, где рождение новых частиц происходит в результате столкновения встречных пучков, в этих экспериментах пучок направляется на неподвижную мишень. Такие эксперименты уже давно используются в физике частиц и такие эксперименты как PS191, NA62, T2K и другие были построены по этой схеме. С точки зрения поиска новых гипотетических частиц они, несмотря на существенно меньшую энергию в системе центра масс, обладают серьезным преимуществом – потенциально большей светимостью и контролируемостью продуктов столкновения. Среди преимуществ таких экспериментов по сравнению с экспериментами на встречных пучках можно отнести то, что частицы, рождаемые в столкновении пучка с мишенью, можно фокусировать магнитами, запускать их в распадные объемы больших размеров, или, например, отсеивать “ненужные” частицы с помощью поглотителей. В таких экспериментах благодаря их сравнительно большому времени жизни можно получать существенные пучки пионов и каонов и, тем самым, изучать как сами эти частицы так и продукты их распада. В частности, это служит причиной, почему большое количество нейтринных экспериментов построены именно по такой схеме.

Процесс обнаружения частицы новой физики в экспериментах с фиксированной мишенью можно условно разбить на три важные составляющие:

- рождение частиц новой физики в столкновении пучка с мишенью и во вторичных процессах.
- дальнейшее поведение частиц новой физики и определение геометрического фактора
- детектирование частицы новой физики

Стоит заметить, что в приближении частиц, крайне мало взаимодействующих с веществом, второй пункт целиком определяется начальными координатами и импульсами новых частиц, а также геометрией детектора.

Частицы новой физики могут рождаться в различных процессах в зависимости от того, какие свойства для них предполагаются. Эти свойства определяются целью, ради которой их рассматривают: будь то предсказание их существования какой-то более общей теорией или попытка найти объяснение экспериментального результата, не укладывающегося в рамки Стандартной Модели.

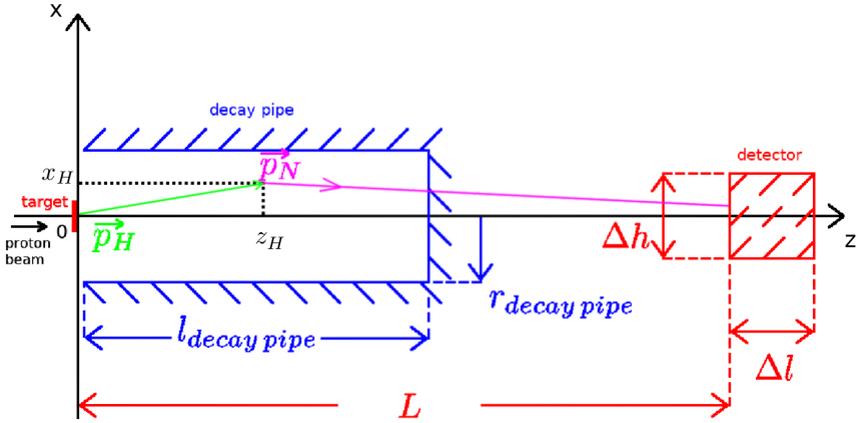


Рис. 1 — Схематическая зарисовка процесса детектирования частицы N рождаемой в распаде вторичного мезона N.

Как правило, в дальнейшем будет рассматриваться лишь рождение частиц новой физики в распадах короткоживущих тяжёлых частиц Стандартной Модели, а не в самих столкновениях (см. рис. 1).

В таком случае точки рождения частиц новой физики и их начальный импульс определяются кинематикой распада родительской частицы. Это сразу выделяет в рассмотрении лёгкие долгоживущие частицы: мюоны, пионы и каоны, поскольку все остальные частицы Стандартной Модели, в распадах которых могут рождаться частицы новой физики, слишком короткоживущие, а потому распадаются прямо в мишени. Для обеспечения распадов мюонов, пионов и каонов эксперименты предусматривают расположенный за мишенью распадный объем, нередко используют фокусирующие системы для увеличения процента частиц, летящих в сторону детектора. Отдельно отметим, что в связи с их долгим временем жизни, фоном космических лучей и рядом других факторов, мюоны часто рассматриваются как “паразитная” составляющая, и для ограничения её влияния предпринимаются особые меры, от установки мюонного щита до сложных магнитных систем.

Для рассмотрения процесса “доставки” частиц новой физики до детектора важно отметить ограничения, которые накладывает тот факт, что они до сих пор не были обнаружены. Устройство экспериментов с фиксированной мишенью, как правило, подразумевает разнесение детектора и мишени на существенные расстояния, а потому они сравнительно плохо приспособлены для изучения

короткоживущих частиц новой физики и не будут рассматриваться в данной работе. Очевидно, долгоживущая частица не может обладать электрическим зарядом, сравнимым с зарядом электрона, поскольку иначе она должна была бы активно участвовать в электромагнитных взаимодействиях, что не соответствует наблюдаемым данным. С другой стороны, нет жестких ограничений на значения заряда, много меньше заряда электрона, поэтому такая возможность может рассматриваться. Третья глава посвящена вопросу поиска миллизаряженных частиц. Схожие соображения позволяют ввести малый “параметр смешивания”, характеризующий частицу новой физики и обеспечивающий достаточную малость взаимодействий, чтобы объяснить причину, из-за которой данная частица не была обнаружена в существующих экспериментах. Можно искать взаимодействия (и распады) частиц новой физики в экспериментах, в которых характерные расстояния много меньше длины свободного пробега частицы. В противном случае количество долетающих до детектора частиц дополнительно подавлено за счёт распада этих частиц, что ослабляет возможности их обнаружения. Схожим образом учитывается вероятность взаимодействия с веществом (грунтом) во время пролета частицы от места рождения до детектора: если взаимодействиями нельзя пренебречь, то нужно дополнительно учитывать, как изменится число долетающих до детектора частиц.

Есть два основных подхода расположения детектора: на оси распространения частиц, или в стороне от неё. Естественно, наибольшее число частиц статистически сконцентрировано на оси. Однако это относится ко всем рождаемым частицам, и большой фон частиц Стандартной Модели в некоторых случаях оказывается нежелательным. Даже небольшое смещение детектора с оси может привести к существенному снижению фона, несущественно снижая число частиц новой физики, долетающих до детектора. Это обусловлено тем, что частицы, рождаемые в распадах массивных мезонов, имеют существенный разброс в поперечном импульсе, обеспечивающем их равномерный разлёт в некотором конусе.

Единственным общим требованием детектирования частицы можно назвать лишь пролёт частицы новой физики через область детектора. Этот момент отражает геометрический фактор таких частиц в рамках определенного эксперимента. Сам процесс регистрации зависит от свойств частицы новой физики и параметров детектора и будет обсуждаться отдельно для каждого рассматриваемого случая.

**Актуальность темы.** Поиск Новой Физики – одно из ключевых направлений в физике высоких энергий. Невозможно недооценить важность восстановления картины фундаментальных частиц (и взаимодействий) с учетом накопившихся противоречий. На данный момент существует великое множество теорий, призванных объяснить эти несоответствия. В рамках каждой теории, в зависимости от той роли, которую в ее рамках призваны играть новые частицы, эти частицы должны по-разному проявляться в существующих экспериментах и наблюдениях. Но в рамках конкретного эксперимента зачастую, помимо ограничений, получаемых для каждой теории с учетом её особенностей, можно выделить и

несколько типов условно “моделезависимых” ограничений. Можно выделить два основных типа моделей частиц Новой Физики, которые должны оставлять различные сигналы в детекторе:

1. *Распад частицы Новой Физики в частицы Стандартной Модели, регистрируемые детектором.*

Это основной способ регистрации, предполагаемый в большинстве экспериментов, занимающихся поиском Новой Физики. Крайне популярны модели, приводящие к подобному сигналу и предполагающие наличие массивных, но короткоживущих частиц, которые должны рождаться в ускорительных экспериментах. Помимо этого, этим же способом можно искать и долгоживущие частицы, если их поток через детектор достаточно высок. Так как изучение внеземных источников гипотетических частиц выходит за рамки данной работы, в данной работе в качестве таких источников рассматриваются только ускорительные эксперименты. Схема в таком предположении крайне проста и отличается от модели к модели только каналами рождения и распада частиц Новой Физики, а также вероятностями этих процессов. При столкновении пучков частиц (или при ударе пучка о мишень в экспериментах с пучком на фиксированной мишени) могут рождаться гипотетические частицы, как правило, в распадах тяжёлых частиц Стандартной Модели. Конечно, от состава пучков частиц (и мишени), как и от других параметров установки, зависят те гипотетические частицы, которые могут быть исследованы в конкретном эксперименте. Явным ограничением, например, является масса этих частиц – она ограничена сверху массами рождаемых частиц Стандартной Модели, служащими источником таких частиц, а значит и характерными энергиями столкновения в этом эксперименте. Если источником гипотетических частиц служат долгоживущие частицы, такие как пионы или каоны, то, помимо импульсов, играет значение и распределение точек рождения новых частиц в пространстве. Родившиеся гипотетические частицы с определенной вероятностью долетают до детектора и распадаются в нем: для этого требуется, чтобы они летели по направлению в детектор. Поскольку гипотетические частицы либо короткоживущие, либо очень мало взаимодействующие с обычным веществом, то зачастую можно пренебречь вероятностью частицы провзаимодействовать в грунте. Таким образом, у каждого детектора получается свой геометрический фактор, отражающий, какая часть гипотетических частиц потенциально способна распасться в объеме детектора и быть впоследствии детектированной. Эффективность обнаружения подобных распадов сильно разнится от эксперимента к эксперименту. Поскольку интерес представляют крайне редкие события, то первостепенной задачей становится отделение сигнала от фона. Для этого экспериментаторы используют множество приемов, о которых подробнее написано в последующих главах. В данной работе случай долгоживущих распадающихся

частиц рассматривается на примерах тяжелых нейтральных лептонов и легких скаляров.

2. *Взаимодействие частицы Новой Физики с веществом детектора, с последующей регистрацией последствий этого взаимодействия.*

Второй важный случай касается стабильных частиц и частиц со столь большими временами жизни, что в рамках рассматриваемого эксперимента распадами таких частиц можно пренебречь по сравнению с их взаимодействиями. Как и в предыдущем случае, будут рассматриваться только ускорительные эксперименты. Поиск одиночного взаимодействия в целом сравним с поиском распада. Гипотетические частицы рождаются в распадах частиц Стандартной Модели или в самом столкновении пучков (пучка с мишенью), и к ним применим такой же геометрический фактор. Естественно, в отличие от распада при взаимодействии, гипотетическая частица сохраняет за собой существенную часть энергии, и поэтому сигнал от него оказывается куда слабее. Поэтому, как правило, поиск таких взаимодействий требует специализированного эксперимента, заточенного на поиск частиц Новой Физики. В данной работе этот случай будет рассматриваться на примере миллизаряженных частиц.

3. *Переход (осцилляция) частицы Новой Физики в частицу Стандартной Модели, регистрируемый детектором.*

Напоследок стоит упомянуть ещё одну возможность: переход частицы Стандартной Модели в частицу Новой Физики. Этот случай часто рассматривается в связи с аксионами и аксиноподобными частицами, но также может встречаться и в других моделях Новой Физики. Например, легкие стерильные нейтрино, призванные объяснить галлиеву и реакторные аномалии, попадают под эту категорию. Можно обобщить схему подобных экспериментов следующим образом: берется известный пучок частиц Стандартной Модели, для которых предполагается наличие осцилляций, и направляется на отстоящий на некоторое расстояние детектор. Зная, какой поток ожидается измерить в детекторе, ищутся отличия предсказываемого значения, вызванные осцилляциями в гипотетические частицы. В зависимости от конфигурации эксперимента может искажаться как “исчезновение” сигнала, так и его “избыток”.

Этот сценарий существенно отличается от предыдущих двух и выбивается за рамки рассмотрения экспериментов на фиксированной мишени и далее в данной работе не будет рассматриваться.

**Целью** данной работы является изучение чувствительности экспериментов на фиксированной мишени к различным моделям Новой Физики и построение подхода, позволяющего оценить ограничения на ту или иную модель Новой Физики, которые сможет поставить предполагаемый эксперимент, свободно меняя его параметры. Эти ограничения будут зависеть как от различных возможных компоновок эксперимента, так и от характеристик предполагаемых частиц Новой Физики.

Выделены следующие задачи:

1. Вычисление чувствительности экспериментов SHiP и DUNE к тяжёлым нейтральным лептонам.
  - Построение метода регистрации стерильных нейтрино с учётом экспериментальных особенностей рассматриваемых экспериментов.
  - Написание программного кода для моделирования процесса рождения, распространения и распада стерильного нейтрино.
  - Получение предсказаний ограничений, которые данные эксперименты поставят на стерильные нейтрино, в отсутствие обнаружения сигнала за время их работы.
  - Оценка точности моделирования и рассмотрение потенциальных источников погрешностей.
2. Вычисление чувствительности эксперимента PS191 к легким скалярам.
  - Проведение сравнения потенциального сигнала от стерильных нейтрино и от лёгких скаляров в эксперименте PS191 и построение критерия ограничения их сигнала из отрицательного результата поиска стерильных нейтрино.
  - Написание программного кода для моделирования процесса рождения, распространения и распада лёгких скаляров.
  - Проведение моделирования и получение ограничений которые PS191 ставят на лёгкие скаляры.
  - Оценка точности моделирования и рассмотрение потенциальных источников погрешностей.
3. Вычисление чувствительности эксперимента T2K к миллизаряженным частицам.
  - Оценка метода регистрации сигнала миллизаряженных частиц в новом нейтринном детекторе SuperFGD эксперимента T2K.
  - Написание программного кода для моделирования процесса рождения, распространения и взаимодействия миллизаряженных частиц.
  - Получение предсказаний ограничений, которые поставит эксперимент T2K и его преемник T2HK на миллизаряженные частицы в отсутствие обнаружения сигнала за время их работы.
  - Оценка точности моделирования и рассмотрение потенциальных источников погрешностей.

**Методология и методы исследования.** Для данного исследования использовались моделирование GEANT4 с использованием моделей QGSP, Friti и BERTip и самостоятельно разработанные программы, написанные на языке C++. С помощью GEANT4 моделировалось производство, распространение и взаимодействия частиц Стандартной Модели в ударе пучка о мишень вплоть до момента их распада. Код C++ создавался для каждой теории и моделировал рож-

дение, распространение и распад частиц Новой Физики. Случайные процессы разыгрывались методом Монте Карло.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Реализован метод оценки чувствительности экспериментов с пучком на фиксированной мишени для нескольких моделей Новой Физики. На его основе написан оригинальный численный код, легко обобщаемый на применение к широкому классу моделей и экспериментов.
2. Получены предсказания ограничений на стерильные нейтрино из экспериментов SHiP и DUNE. Хорошей площадкой поиска стерильных нейтрино являются эксперименты по определению параметров активных нейтрино. В литературе широко изучался вопрос рождения стерильных нейтрино в распадах D-мезонов и более тяжёлых частиц, но также интерес представляет изучение их рождения в распадах более лёгких долгоживущих частиц, в первую очередь каонов. В частности, полученные оценки чувствительности DUNE предсказывают улучшение вплоть до порядка по сравнению с текущими ограничениями, а SHiP должен будет оказаться способен полностью исследовать центральную часть кинематически разрешенной области масс HNL и значений смешивания с электронными и мюонными нейтрино, вплоть до нижней космологической границы.
3. Для эксперимента PS191 получены ограничения на угол смешивания для легких скаляров массы, меньшей массы каона. Предложенный подход проверяется на другой физической модели. Используя ту же сигнатуру, что использовалась для поиска стерильных нейтрино, ставится задача интерпретации отрицательных результатов этого поиска в эксперименте PS191 для получения новых ограничений на легкие скаляры. В частности, результаты разработанного моделирования говорят о том, что ранее разрешенная область масс 100–150 МэВ и смешивания выше  $4 \times 10^{-4}$  оказывается закрытой отрицательными результатами PS191 для легких скаляров, связанных со Стандартной Моделью (СМ) через смешивание с бозоном Хиггса.
4. Для эксперимента T2K получены ограничения на заряд миллизаряженных частиц с массой меньше каона. Описанный подход проверен для принципиально другого метода обнаружения – регистрации взаимодействия стабильных частиц с веществом детектора. Для этого проведено моделирование процесса рождения и взаимодействий гипотетических миллизаряженных частиц в эксперименте T2K (и его преемнике T2HK). Сделана оценка сигнала двух взаимодействий миллизаряженной частицы в объёме детектора, и предсказана область параметров частиц, которую эти эксперименты исследуют за время своей работы. В частности, получено, что ранее недоступная для прямых поисков область зарядов  $5 \times 10^{-4} - 10^{-2} e$  и масс MCP 0,1-0,5 ГэВ, может быть исследована за 10 лет работы эксперимента.

### **Научная новизна:**

1. Написан оригинальный код, используемый для установления ограничений на частицы новой физики в экспериментах с пучком на фиксированной мишени. Показана адаптивность реализации метода оценки для различных моделей и экспериментов.
2. Получены предсказания ограничений на стерильные нейтрино из планируемых экспериментов SHiP и DUNE с учётом актуальных на момент написания статей параметров этих экспериментов.
3. Впервые получены ограничения на угол смешивания для легких скаляров из результатов эксперимента PS191.
4. Для эксперимента T2K впервые получены предсказания на ограничения заряда миллизаряженных частиц к концу времени его работы.

### **Практическая значимость:**

1. Полученный код может быть в дальнейшем использован для получения ограничений на другие модели и эксперименты, а также может послужить основой для создания универсального инструмента оценки ограничений на модели Новой Физики для экспериментов с пучком на фиксированной мишени.
2. Полученные предсказания ограничений для 10 лет работы эксперимента T2K и для планируемых экспериментов SHiP и DUNE, наравне с другими предсказаниями ограничений на частицы физики за пределами Стандартной Модели, являются важным фактором для уточнения итоговой конфигурации этих экспериментов и всех последующих экспериментов, работающих в данной области.
3. Полученные ограничения для эксперимента PS191 закрывают ранее неисследованные области параметров и потому влияют на все дальнейшие исследования в данной области.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 4 работы в рецензируемых международных изданиях, рекомендованных ВАК [A1, A2, A3, A4].

**Апробация работы.** Результаты диссертации были доложены на следующих российских и международных семинарах и конференциях:

1. 54-я Зимняя Школа ПИЯФ, Рощино Ленинградская область, Россия, 10 – 15 марта 2020 года
2. Ломоносов 2020, Москва, Россия, 10 – 27 ноября 2020 года
3. Онлайн-воркшопы Кварки-2020 в 2021 году (Quarks-2020 Online Workshops in 2021), онлайн, 31 мая – 24 июня 2021 года
4. 10-я Международная Конференция о Новых Фронтах в Физике (ICNFP 2021), Крит, Греция, 23 августа – 7 октября 2021 года

**Достоверность.** Статьи [A1, A2, A3, A4] были опубликованы в международно признанных изданиях, где прошли процедуру рецензирования.

**Личный вклад.** Все результаты, представляемые в диссертации, получены автором, либо при его непосредственном участии. Весь код на языке C++, моделирующий распространение и распад частиц Новой Физики и используемый

во всех главах, а в первой главе используемый также для моделирования рождения стерильных нейтрино, написан и оптимизирован автором. Статья [A1], лежащая в основе половины результатов, представленных в первой главе, целиком написана автором. Также автор принимал прямое участие в написании текста и подготовке рисунков, предоставленных в остальных работах [A2, A3, A4], лёгших в основу данной диссертации.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложения. Объем работы составляет 135 страниц, включая 40 рисунков и 12 таблиц. Список литературы насчитывает 130 наименований.

**Во Введении** обоснована актуальность постановки вопроса поиска частиц новой физики в экспериментах с пучком на фиксированной мишени и обрисованы общие методы, использующиеся далее для получения предсказаний ограничений тех или иных экспериментов, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**Первая глава** посвящена поиску тяжёлых нейтральных лептонов, также называемых стерильными нейтрино. В первой части главы анализируются перспективы поиска стерильных нейтрино с массами в масштабе ГэВ в строящемся эксперименте DUNE. Приводится ожидаемое число распадов стерильных нейтрино в объеме ближнего детектора, поскольку вероятность детектирования продуктов распада стерильного нейтрино сильно зависит от конструкции ближнего детектора, которая ещё не была определена на момент написания статьи. Самые оптимистичные из полученных предсказаний показывают, что соответствующие ограничения значений смешивания могут быть примерно того же порядка, что и предыдущие оценки, сделанные для проекта эксперимента LBNE. Результаты представлены в виде отдельных графиков для смешивания стерильных нейтрино с электронными, мюонными и тау-нейтрино. В целом у DUNE есть хорошие перспективы протестировать большую область ранее неизученной части пространства параметров до того, как к поискам присоединятся новые проекты (типа SHiP). Во второй части главы оценивается интенсивность сигнала стерильных нейтрино, рождаемых в распадах каонов в эксперименте SHiP. Рассматриваются каоны, рождающиеся в адронных ливнях, инициированных ударами пучков протонов с энергией 400 ГэВ из CERN SPS о фиксированную мишень. Для достаточно легкого HNL (когда распады кинематически разрешены) обнаруживается, что распады каонов являются заметно более богатым источником HNL по сравнению с распадами  $D$ -мезонов, принятыми в качестве основного сигнала в предыдущих исследованиях феноменологии HNL в SHiP. В частности, можно утверждать, что SHiP будет способен полностью исследовать центральную часть кинематически разрешенной области масс HNL и значений смешивания с электронными и мюонными нейтрино, вплоть до нижней космологической границы

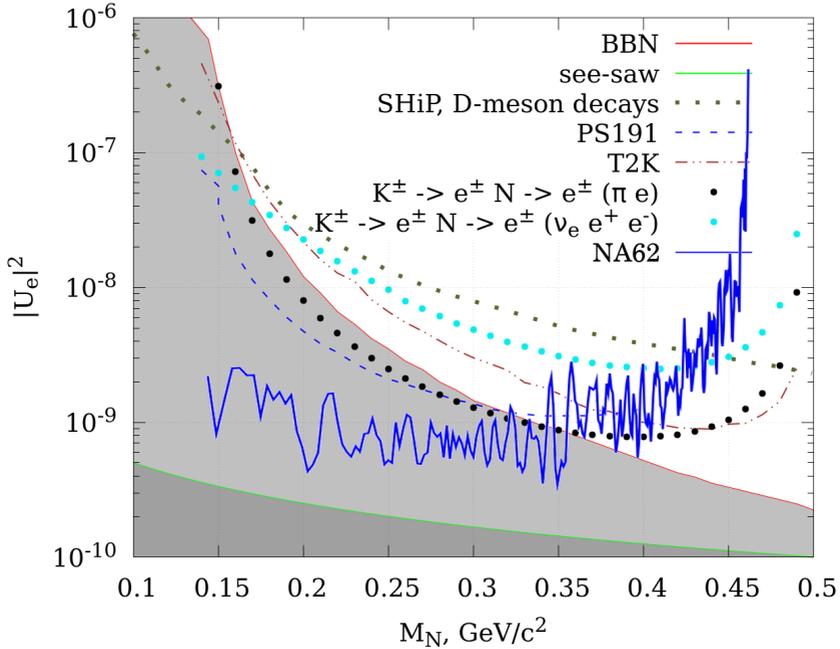


Рис. 2 — Существующие ограничения на смешивание HNL с электронными нейтрино и ожидаемая чувствительность эксперимента SHiP со статистикой  $N_{POT} = 2 \times 10^{20}$

(см. рис. 2). Последняя связана с ограничениями на распады HNL в ранней Вселенной, поскольку обилие продуктов распада HNL вызывало бы подогрев космической плазмы с последующим уничтожением легких ядер, образовавшихся в первичном нуклеосинтезе. Непротиворечивость модели HNL с меньшими значениями смешивания потребовала бы либо иерархии – т.е. гораздо большего смешивания всех HNL с тау-нейтрино, не ограничиваемого в эксперименте – либо нестандартной космологии и новых частиц в секторе HNL, отличных от предсказаний качельного механизма I типа.

Результаты первой главы опубликованы в работах [A1, A2].

**Вторая глава** посвящена применению разработанного подхода к другой модели новой физики – лёгким скалярам. В восьмидесятых годах в ЦЕРНе работал эксперимент PS191 с протонным пучком с энергией 19,2 ГэВ на фиксированной мишени, посвященный поиску стерильных нейтрино. Предполагалось, что стерильные нейтрино образуются при распадах слабых мезонов и распадаются в конечные состояния с парами заряженных частиц: электронов и мюонов. В качестве сигнатуры сигнала были приняты два заряженных трека, выходящих из одной и той же точки. Гипотетические лёгкие скаляры, рождающиеся в распадах

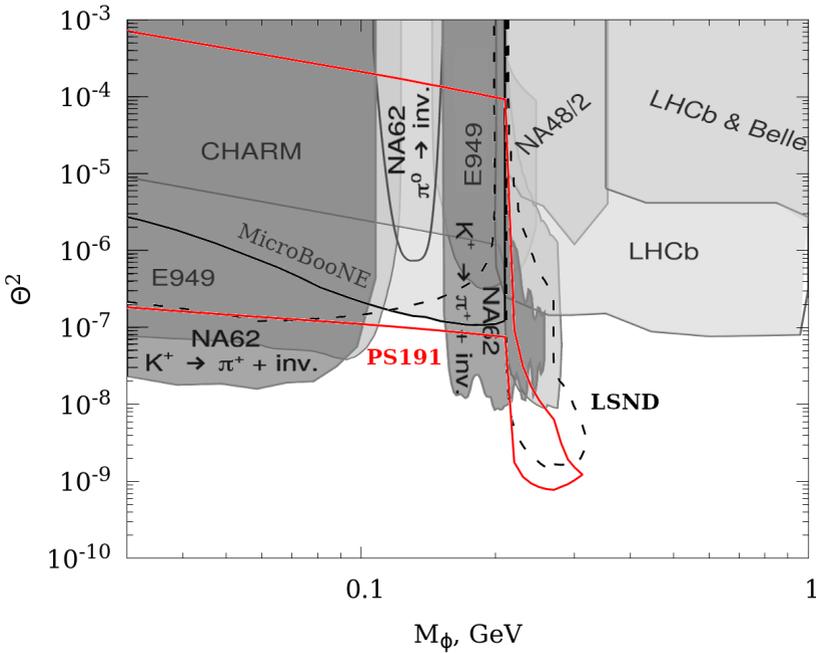


Рис. 3 — Ограничения на лёгкие скаляры: область, обведенная сплошной красной линией, исключена при 90% CL из отрицательных результатов поиска на PS191.

мезонов и распадающиеся на заряженные частицы Стандартной Модели, могут давать такой же сигнал в детекторе, что и стерильное нейтрино. Поиск стерильных нейтрино в PS191 дал отрицательные результаты, что позволило, используя ту же сигнатуру, получить новые ограничения на легкие скаляры, смешивающиеся с бозоном Хиггса Стандартной Модели. В частности, показано, что ранее разрешенная область масс 100–150 МэВ и смешивания выше  $4 \times 10^{-4}$  закрывается полученными ограничениями. Анализ можно прямо обобщить на теории с другими моделями взаимодействий скаляров с частицами СМ (см. рис. 3).

Результаты второй главы опубликованы в работе [A3].

**Третья глава** посвящена поиску стабильных частиц за счёт их взаимодействия с веществом детектора. Моделируется процесс рождения и детектирования гипотетических миллизаряженных частиц (millicharged particles, MCP) с массой менее ГэВ пучком протонов J-PARC в рамках эксперимента по изучению нейтринных осцилляций T2K и его запланированного преемника эксперимента T2HK. Сосредоточив внимание на области пространства параметров модели, где MCP может дважды провзаимодействовать в веществе ближнего детектора нейтрино, этот процесс принимается в качестве бесфоновый сигнал и используется для оценки чувствительности экспериментов T2K и T2HK к MCP. Таким обра-

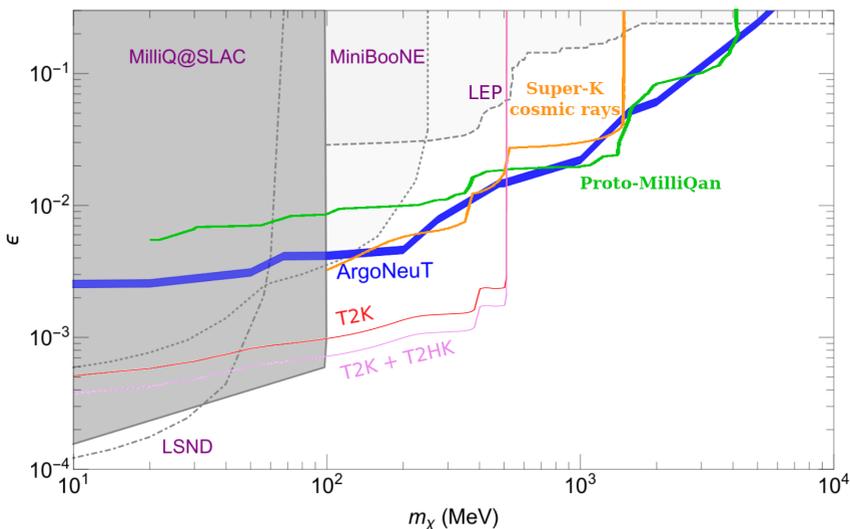


Рис. 4 — Ожидаемая чувствительность T2K и T2HK к моделям с миллизаряженными частицами.

зом получено, что за 10 лет работы может быть исследована ранее недоступная для прямых поисков область зарядов  $5 \times 10^{-4} - 10^{-2} e$  и масс MCP 0,1-0,5 ГэВ (см. рис. 4).

Результаты третьей главы опубликованы в работе [A4].

**В Заключение** подводятся итоги работы и обсуждаются полученные результаты.

**В Приложении** приведен более полный список параметров и формул, использовавшихся в первой главе.

## Публикации автора по теме диссертации

- [A1] Igor Krasnov. — «DUNE prospects in the search for sterile neutrinos». — B: *Phys. Rev. D* 100.7 (2019), с. 075023. — arXiv: [1902.06099 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1902.06099).
- [A2] Dmitry Gorbunov, Igor Krasnov, Yury Kudenko и Sergey Suvorov. — «Heavy Neutral Leptons from kaon decays in the SHiP experiment». — B: *Phys. Lett. B* 810 (2020), с. 135817. — arXiv: [2004.07974 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2004.07974).
- [A3] Dmitry Gorbunov, Igor Krasnov и Sergey Suvorov. — «Constraints on light scalars from PS191 results». — B: *Phys. Lett. B* 820 (2021), с. 136524. — arXiv: [2105.11102 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2105.11102).
- [A4] Dmitry Gorbunov, Igor Krasnov, Yury Kudenko и Sergey Suvorov. — «Double-Hit Signature of Millicharged Particles in 3D segmented neutrino detector». — B: (2021). — arXiv: [2103.11814 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2103.11814).

## Список литературы

- [1] Peter W. Higgs. — «Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons». — В: *Phys. Rev.* 145 (1966), с. 1156—1163.
- [2] Georges Aad и др. — «Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC». — В: *Phys. Lett. B* 716 (2012), с. 1—29. — arXiv: [1207.7214 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1207.7214).
- [3] P. A. Zyla и др. — «Review of Particle Physics». — В: *PTEP* 2020.8 (2020), с. 083C01.
- [4] S. L. Glashow. — «Partial Symmetries of Weak Interactions». — В: *Nucl. Phys.* 22 (1961), с. 579—588.
- [5] Steven Weinberg. — «A Model of Leptons». — В: *Phys. Rev. Lett.* 19 (1967), с. 1264—1266.
- [6] Abdus Salam. — «Weak and Electromagnetic Interactions». — В: *Conf. Proc. C* 680519 (1968), с. 367—377.
- [7] Gerard 't Hooft и M. J. G. Veltman. — «Regularization and Renormalization of Gauge Fields». — В: *Nucl. Phys. B* 44 (1972), с. 189—213.
- [8] T. Adam и др. — «Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam». — В: *JHEP* 10 (2012), с. 093. — arXiv: [1109.4897 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1109.4897).
- [9] Y. Fukuda и др. — «Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos». — В: *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998), с. 1562—1567. — arXiv: [hep-ex/9807003](https://arxiv.org/abs/hep-ex/9807003).
- [10] Q. R. Ahmad и др. — «Measurement of the rate of  $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$  interactions produced by  $^8\text{B}$  solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory». — В: *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001), с. 071301. — arXiv: [nucl-ex/0106015](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0106015).
- [11] Q. R. Ahmad и др. — «Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory». — В: *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002), с. 011301. — arXiv: [nucl-ex/0204008](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0204008).
- [12] B. Pontecorvo. — «Mesonium and anti-mesonium». — В: *Sov. Phys. JETP* 6 (1957), с. 429.
- [13] B. Pontecorvo. — «Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge». — В: *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 34 (1957), с. 247.
- [14] Ziro Maki, Masami Nakagawa и Shoichi Sakata. — «Remarks on the unified model of elementary particles». — В: *Prog. Theor. Phys.* 28 (1962), с. 870—880.
- [15] Rabindra N. Mohapatra и Goran Senjanovic. — «Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation». — В: *Phys. Rev. Lett.* 44 (1980), с. 912.

- [16] Murray Gell-Mann, Pierre Ramond и Richard Slansky. — «Complex Spinors and Unified Theories». — В: *Conf. Proc. C* 790927 (1979), с. 315—321. — arXiv: [1306.4669](https://arxiv.org/abs/1306.4669) [[hep-th](#)].
- [17] Peter Minkowski. — « $\mu \rightarrow e\gamma$  at a Rate of One Out of  $10^9$  Muon Decays?» — В: *Phys. Lett. B* 67 (1977), с. 421—428.
- [18] Tsutomu Yanagida. — «Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos». — В: *Prog. Theor. Phys.* 64 (1980), с. 1103.

Научное издание

Краснов Игорь Вячеславович

Перспективы поиска новой физики  
в экспериментах на фиксированной мишени  
нового поколения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 22483 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