

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 539.12

ВАСИЛЕВСКАЯ Дарья Сергеевна

ПРОВЕРКА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ПРЕЦИЗИОННЫХ  
ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных  
частиц**

Минск 2024

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Научный руководитель

**Шёлковый Дмитрий Викторович**

кандидат физико-математических наук,  
заместитель заведующего центра  
«Фундаментальные взаимодействия и  
астрофизика» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН  
Беларуси

Официальные оппоненты:

**Лобко Александр Сергеевич**

доктор физико-математических наук,  
заместитель директора по научной работе  
Научно-исследовательского учреждения  
«Институт ядерных проблем» Белорусского  
государственного университета

**Серенкова Инна Александровна**

кандидат физико-математических наук,  
руководитель лаборатории физических  
исследований Учреждения образования  
«Гомельский государственный технический  
университет им. П.О. Сухого»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Международный  
государственный экологический институт  
имени А.Д. Сахарова» Белорусского  
государственного университета

Защита состоится «06» марта 2024 г. в 14:30 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу пр. Независимости 68-2, г. Минск, Республика Беларусь, тел. ученого секретаря совета +375 17 284 15 59, e-mail: vyblyi@gmail.com  
С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «01» февраля 2024 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат физико-математических наук



Ю.П. Выблый

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день Стандартная модель является наиболее полной теорией строения и взаимодействий элементарных частиц. За исключением нескольких случаев, Стандартная Модель описывает всю область современного эксперимента с очень хорошей точностью (доли процента). Однако, Стандартную модель, все же нельзя считать полностью удовлетворительной теорией, так она не объясняет ряд фундаментальных вопросов. Она не описывает количество барионной материи во Вселенной, не содержит кандидатов на состав темной материи. Экспериментальное открытие осцилляций нейтрино доказывает, что они имеют ненулевую массу, тогда как в Стандартной модели все известные нейтрино с самого начала предполагаются безмассовыми. Для решения этих вопросов неизбежно требуется расширение Стандартной модели, такие теории, называют физикой за рамками/пределами Стандартной модели или Новой физикой.

Стандартная модель не содержит в себе механизмов нарушения электронного, мюонного и тау-лептонного чисел, но они возникают практически во всех теориях, расширяющих Стандартную модель. Поэтому экспериментальное подтверждение процесса, проходящего с нарушением закона сохранения лептонного аромата, станет большим прорывом в физике и будет означать обнаружение сигнала Новой физики.

Также одним из эффективных способов проверки Стандартной модели является измерение аномального магнитного момента мюона. На текущий момент полученное значение аномального магнитного момента мюона в эксперименте Muon  $g-2$  (FNAL, США) отличается на более 4 стандартных отклонения от теоретического значения, рассчитанного в рамках Стандартной модели. Такое отклонение от теории при дальнейшем уменьшении погрешности измерений и уточнение данных по сечению адронных каналов с систематической погрешностью менее 3%, которая диктуется точностью экспериментов  $\sim 0.1$  pp может указать на существование Новой физики.

В связи с вышеизложенным, данная работа посвящена проверке Стандартной модели, через исследование процессов, идущих с нарушением лептонного квантового числа: 1) распадов нейтрального бозона Хиггса и  $Z$ -бозона; 2) безнейтринной конверсии мюона в электрон в эксперименте COMET (J-PARC, Япония). А также прецизионному измерению сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трех пионов в конечном состоянии в области энергий омега-мезона с детектором КМД-3 (криогенный магнитный детектор) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 с целью улучшения точности расчета аномального магнитного момента мюона в рамках Стандартной модели.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует следующим приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021-2025 годы (Указ президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156), пункту 1: Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства:

физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, нейроцифровые, антропоморфные);

а также соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 №190), пункту 12: Междисциплинарные исследования.

Настоящая работа выполнена в рамках ГПНИ «Конвергенция-2020» подпрограмма «Микромир и Вселенная», задание 2.2.02 «Поиск физических явлений в и вне Стандартной модели в рамках проектов Международных ускорительных центров. Моделирование процессов и явлений на базе новых экспериментальных данных. Разработка новых детекторных технологий для экспериментов на большом адронном коллайдере с увеличенной светимостью (LHC) и будущем циркулярном коллайдере (FCC)», подзадание «Поиск физических явлений вне Стандартной Модели в рамках проектов международных ускорительных центров. Моделирование процессов и явлений на базе новых экспериментальных данных» (утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190, № гос. регистрации 20160182); ГПНИ Конвергенция 2021-2025 НИР 2.1.01.1 «Физика частиц и ядерная спектроскопия в широком диапазоне энергий. Обработка новых данных, полученных на современных ускорительных установках и в космических лучах, выработка предложений для новых экспериментальных проектов. Математические методы для моделирования проблем современной физики и астрофизики» (утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь 27.07.2020 № 438, № гос. регистрации 20210850). А также в рамках проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф21М-016 (№ гос. регистрации 20213126), № Ф20Р-053 (№ гос. регистрации 20201350)), и в рамках ряда проектов с Научно-исследовательским учреждением «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета по линии программы сотрудничества Республика Беларусь-ОИЯИ (г. Дубна) (№ гос. регистрации 20201586, 20213094, 20221688).

## **Цель и задачи исследования**

Целью данной диссертационной работы является проверка Стандартной модели, через исследование распадов нейтрального бозона Хиггса и  $Z$ -бозона с нарушением лептонного квантового числа, и определение ширины распадов; разработка метода реконструкции событий для устранения фона от наложения сигналов в электромагнитном калориметре эксперимента COMET; прецизионное измерение сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трех пионов в конечном состоянии в области энергий омега-мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 с целью улучшения точности расчета аномального магнитного момента мюона в рамках Стандартной модели.

Для достижения цели потребовалось решить следующие задачи:

1. теоретически исследовать процесс распада бозона Хиггса и  $Z$ -бозона с нарушением лептонного числа в рамках лево-правой симметричной модели и оценить ширины распадов;
2. определить среднюю форму сигнала от электрона в калориметре на основе сцинтилляционных кристаллов LYSO из экспериментальных данных по тестированию калориметра на пучке электронов;
3. исследовать зависимость средней формы сигнала от амплитуды сигнала;
4. разработать метод для реконструкции событий с наложением сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром  $^{175}\text{Lu}$ ; и в случае наложения сигналов от двух электронов, родившихся в результате распада мюонов в связанном состоянии с ядром алюминия с импульсами, вызывающий «ложный» сигнал  $\mu$ - $e$ -конверсии;
5. разработать критерии отбора для выделения событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ;
6. определить эффективность отбора сигнальных событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ;
7. определить поправку к эффективности реконструкции треков заряженных пионов в дрейфовой камере детектора КМД-3;
8. измерить сечение процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии на основе статистики 2013-2018 гг., набранной детектором КМД-3 в области энергий  $\omega$ -мезона.

## **Объект и предмет исследования**

Объект исследования – Стандартная модель физики элементарных части.

Предмет исследования – свойства процессов, идущих с нарушением закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе Стандартной модели; характеристики процесса электрон-позитронной аннигиляции с

образованием трёх пионов в конечном состоянии.

### **Научная новизна**

Впервые получены следующие результаты:

- получены относительные вероятности распадов бозона Хиггса и  $Z$ -бозона на мюон и тау-лептон пару, идущих с нарушением лептонного квантового числа в рамках лево-правой симметричной модели;

- разработан метод идентификации эффекта наложения сигналов в калориметре. Разработанный метод применен к реконструкции событий: 1) с наложением сигналов от радиационного захвата нейтронов ( $n$ , гамма) ядром  $^{175}\text{Lu}$  в кристалле LYSO; 2) с наложением сигналов от двух электронов от распада мюона в связанном состоянии с ядром алюминия, маскирующих сигнал конверсии;

- рассчитана поправка к эффективности реконструкции треков заряженных пионов в дрейфовой камере детектора КМД-3, что позволило улучшить точность измерения сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии;

- измерено сечение процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии на основе статистики 2013-2018 гг., набранной детектором КМД-3 в области энергий  $\omega$ -мезона.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, носят важный фундаментальный характер. Разработанный метод реконструкции событий с наложением сигналов будет использован при анализе экспериментальных данных, полученных в эксперименте СОМЕТ по поиску сигнала за рамками Стандартной модели. Исследование процессов, протекающих с нарушением закона сохранения лептонного квантового числа, позволяет осуществить поиск Новой физики, то есть явлений, не укладывающихся в рамки Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц. Полученные экспериментальные ограничения на вероятности этих процессов позволят сузить круг теоретических моделей.

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

1. Результат расчета парциальной ширины распада бозона Хиггса на положительный мюон и отрицательный тау-лептон, идущий с нарушением лептонного квантового числа в рамках лево-правой симметричной модели, показавший, что теоретическое значение не менее чем на 2 порядка меньше чувствительности текущих экспериментов.

2. Результат расчета ширины распада  $Z$ -бозона на мюон и тау-лептон пару, идущий с нарушением лептонного квантового числа в рамках лево-правой симметричной модели, показавший, что теоретическое значение на несколько порядков меньше чувствительности текущих экспериментов.

3. Метод реконструкции событий на основе аппроксимации

зарегистрированных сигналов стандартной формой сигнала, позволявший значительно уменьшить фон от наложения сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий в калориметре для эксперимента СОМЕТ; время полного разделения значительно меньше длительности сигнала на уровне половинной амплитуды, что соответствует требованиям эксперимента СОМЕТ.

4. Установление ограничений на кинематические переменные для выделения событий процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии, позволившие значительно уменьшить уровень физического, космического и пучкового фона ускорителя и получение, на их основе, предварительных значений для сечения изучаемого процесса в диапазоне энергий 660-980 МэВ в системе центра масс с детектором КМД-3.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

В работах [1] - [4], [8] соавторами являются доктор физико-математических наук О.М. Бояркин и кандидат физико-математических наук Г.Г. Бояркина. Соискателем совместно с О.М. Бояркиным были отмечены основные цели и сформулированы задачи исследования, проведен анализ научной литературы по тематике диссертации. Соискатель принимала участие в уточнении математической формулировки задачи, а также в обобщении полученных результатов и в написании статей. Соискателем выполнены аналитические расчеты процессов распада  $S_1$ -бозона (аналог бозона Хиггса в Стандартной модели) и  $Z$ -бозона в  $\mu$ -пару в третьем порядке теории возмущения, осуществлена разработка вычислительных алгоритмов и программного кода для численной интерпретации полученных результатов.

Деятельность [5], [9], [10] по разработке метода идентификации эффекта наложения сигналов в калориметре эксперимента СОМЕТ проводилась совместно с кандидатом физико-математических наук Д.В. Шёлковым, а также с кандидатом физико-математических наук Д.Н. Григорьевым (Институт ядерной физики СО РАН). Соискателем применен данный метод к разделению событий с наложением сигналов от радиационного захвата нейтронов ядром  $^{175}\text{Lu}$ .

Работы, связанные с детектором КМД-3, [6], [7], [11], [12] проводились под руководством кандидата физико-математических наук Д.В. Шёлкового и доктора физико-математических наук Г.В. Федотовича (Институт ядерной физики СО РАН). Соискателем проведено моделирование сигнального процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , трех фоновых процессов  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ;  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ;  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ; выработаны оптимальные критерии отбора сигнальных событий  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , разработан метод расчета поправки к эффективности реконструкции треков заряженных пионов и получено видимое сечение

процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии на основе статистики 2013-2018 гг., набранной детектором КМД-3 в области энергий  $\omega$ -мезон.

### **Апробация диссертации и информация об использовании её результатов**

Результаты исследований, включенные в диссертацию, прошли апробацию на следующих конференциях: XXV Международном семинаре «Нелинейные явления в сложных системах» (г. Минск, Беларусь, 21-25 мая 2018 г.); IX Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2020», (г. Минск, Беларусь, 4-6 ноября 2020 г.); X Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2022», (г. Минск, Беларусь, 27-29 апреля 2022г.); XVIII Международной научной конференции «Молодежь в науке 2.0'20», (г. Минск, Беларусь, 22-25 сентября 2020 г.); XVIII Международной научной конференции «Молодёжь в Науке – 2022». (г. Минск, Беларусь, 25-28 октября 2022 г.); на научных семинарах центра «Фундаментальные взаимодействия и астрофизика» Института физики НАН Беларуси, Института ядерной физики СО РАН и коллаборации COMET (J-PARC).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты диссертации изложены в 12 научных работах, 7 из которых опубликованы в рецензируемых международных и республиканских журналах, 5 - в сборниках научных трудов. Общее количество страниц опубликованных материалов - 99 страниц.

Общий объём опубликованного материала составляет 7,22 авторского листа.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа написана на русском языке, включает в себя оглавление, введение, общую характеристику работы, четыре главы (включая разделы и подразделы), заключение, список использованных источников и приложения.

Работа изложена на 94 страницах печатного текста, содержит 3 таблицы и 33 рисунка. Список использованных источников состоит из 140 источников (130 – на английском, 10 – на русском языке) и списка публикаций соискателя, включающего 12 научных работ.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Во введении** обосновывается актуальность и значимость темы диссертации, цель. Рассматривается текущее состояние экспериментов по поиску процессов за рамками Стандартной модели и поиску Новой физики в редких мюонных распадах, определены основные направления исследования.

**В первой главе** представлено описание Стандартной модели и приведены её недостатки. Дано описание экспериментов по поиску физики за рамками Стандартной модели, осуществляемых в прецизионных экспериментах, при относительно низких энергиях, но с высокой интенсивностью пучков. Представлено описание эксперимента COMET (J-PARC, Япония) по поиску  $\mu$ - $e$ -конверсии с чувствительностью к одному событию  $10^{-17}$ .

В разделах 1.1-1.2 обоснованы основные принципы Стандартной модели и показаны основные недостатки данной модели физики элементарных частиц. После обнаружения бозона Хиггса в 2012 году на БАК, завершено экспериментальное обнаружение всех элементарных частиц Стандартной модели. Также Стандартная модель с хорошей точностью описывает большинство полученных на сегодняшний день экспериментальных данных в физике элементарных частиц. Но ряд вопросов остается открытым: проблема темной материи, барионная асимметрия Вселенной, проблема массы нейтрино и др. Поэтому остается актуальным вопрос о поиске теории, которая расширит Стандартную модель и предоставит решение данных проблем. И следовательно, не менее актуальным остается экспериментальный поиск эффектов и явлений, выходящих за рамки Стандартной модели, так называемой Новой физики.

В разделе 1.3 описаны процессы, проходящие с нарушением лептонного квантового числа и экспериментальные поиски таких процессов, в частности процесс  $\mu$ - $e$ -конверсии, приведено описание эксперимента COMET. Эксперименты по поиску процессов, идущих с нарушением лептонного числа, с интенсивными мюонными пучками представляют собой высокочувствительные тесты Новой физики, которые вместе могут дать ответы на некоторые из фундаментальных проблем, стоящих перед Стандартной моделью физики элементарных частиц. Относительные вероятности радиационного распада  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu$ - $e$ -конверсии в тяжелых ядрах ограничены границами  $4,2 \times 10^{-13}$  и  $7,0 \times 10^{-13}$  экспериментами MEG и SINDRUM-II соответственно. Ожидается, что в строящихся экспериментах COMET, Mu2e, Mu3e чувствительность поиска редких мюонных распадов, идущих с нарушением лептонного числа, будет увеличена на несколько порядков  $10^{-15}$ - $10^{-17}$ , достигнув вероятности  $10^{-19}$  в планируемом эксперименте PRISM/PRIME.

**Во второй главе** исследованы распады нейтрального бозона Хиггса и Z-бозона в рамках лево-правой симметричной модели. В нейтринный сектор лево-правой симметричной модели помимо легких левых нейтрино, входят также тяжелые правые нейтрино, которые являются партнерами по see-saw механизму (механизм качелей) для легких нейтрино, что приводит к существованию процессов, идущих с нарушением лептонного квантового числа в рамках этой модели.

В разделе 2.1 исследован распад нейтрального бозона Хиггса в  $\mu\tau$ -пару. В лево-правой симметричной модели  $S_1$ -бозон является аналогом бозона Хиггса Стандартной модели.

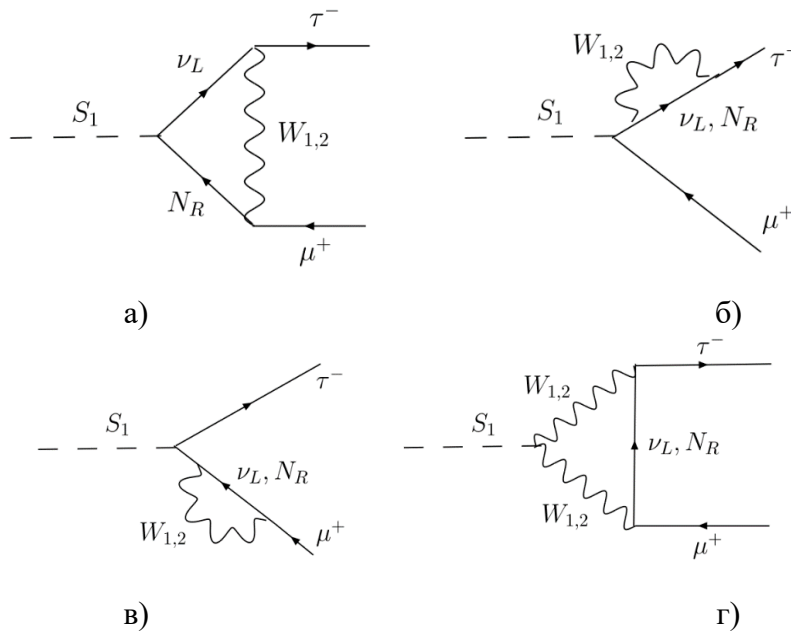
Лагранжианы описывающие взаимодействие заряженных бозонов с  $S_1$ -бозоном Хиггса могут быть записаны следующим образом:

$$\sqrt{2}\mathcal{L}_W^n = g_L^2 \left\{ k_+ \left[ W_{1\mu}^*(x)W_1^\mu(x) + W_{2\mu}^*(x)W_2^\mu(x) \right] - \frac{2k_1k_2}{k_+} \left[ c_{2\xi} \left( W_{2\mu}^*(x)W_1^\mu(x) + W_{1\mu}^*(x)W_2^\mu(x) \right) + s_{2\xi} \left( W_{2\mu}^*(x)W_{2\mu}(x) - W_{1\mu}^*(x)W_{1\mu}(x) \right) \right] \right\} S_1(x) \quad (1)$$

и для лептонов

$$\mathcal{L}_l^{CC} = \frac{g_L}{2\sqrt{2}} \sum_l \left[ \bar{l}(x)\gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_{lL}(x)W_{L\mu}(x) + \bar{l}(x)\gamma^\mu (1 + \gamma_5) N_{lR}(x)W_{R\mu}(x) \right]. \quad (2)$$

Далее в рамках лево-правой симметричной модели рассматривается распад бозона Хиггса по каналу  $S_1 \rightarrow \mu^+ + \tau^-$ , представленный на рисунке 1.



**Рисунок 1 - Диаграммы Фейнмана для распада бозона Хиггса**

Диаграмме на рисунке 1а соответствует матричный элемент

$$M_1^{(a)} = \frac{g_L^2 m_D^2 \cos \alpha \sin 2\theta_N \sin \xi}{32k_+ \sqrt{2}} \sqrt{\frac{m_\tau m_\nu}{2m_{S_1} E_\tau E_\mu}} \bar{u}(p_1) \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \left\{ \int_{\Omega} \frac{\hat{p} - \hat{k} + m_{\nu_i}}{(p-k)^2 - m_{\nu_i}^2} (1 + \gamma_5) \right. \\ \left. \times \left[ \frac{\hat{k} + m_{N_2}}{k^2 - m_{N_2}^2} - \frac{\hat{k} + m_{N_1}}{k^2 - m_{N_1}^2} \right] \gamma_\sigma (1 + \gamma_5) \frac{g^{\lambda\sigma} - (k-p_2)^\lambda (k-p_2)^\sigma / m_{W_1}^2}{(k-p_2)^2 - m_{W_1}^2} d^4 k \right\} v(p_2), \quad (3)$$

где  $m_{N_j}$  ( $j = 1, 2$ ) – масса тяжелого нейтрино,  $p_1$  и  $p_2$  – импульсы  $\tau$ -лептона и  $\mu$ -мезона.

Матричный элемент, соответствующий всем диаграммам, имеет вид

$$M^{(a)} = \sum_{i=1}^8 M_i^{(a)} = \frac{g_L^2 \cos \alpha \sin 2\varphi \sin 2\theta_N \sin \xi}{16k + \sqrt{2}} \sqrt{\frac{m_\tau m_\mu}{2m_{S_1} E_\tau E_\mu}} \bar{u}(p_1) \gamma_\lambda (1 - \gamma_5) \times \\ \times \left\{ \int_{\Omega} \frac{\hat{p} - \hat{k} + m_{\nu_i}}{(p-k)^2 - m_{\nu_i}^2} (1 + \gamma_5) \left[ \frac{m_{N_2} (\hat{k} + m_{N_2})}{k^2 - m_{N_2}^2} - \frac{m_{N_1} (\hat{k} + m_{N_1})}{k^2 - m_{N_1}^2} \right] \times \right. \\ \left. \times \gamma_\sigma (1 + \gamma_5) \frac{g^{\lambda\sigma} - (k-p_2)^\lambda (k-p_2)^\sigma / m_{W_1}^2}{(k-p_2)^2 - m_{W_1}^2} d^4 k \right\} v(p_2). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в формулу для парциальной ширины распада и интегрирую по  $p_1$ ,  $p_2$  воспользовавшись процедурой размерной регуляризации, получим

$$\Gamma(S_1 \rightarrow \bar{\nu}_L^* N_R^* W_1^* \rightarrow \mu^+ \tau^-) = \frac{\pi^3 (g_L^2 \cos \alpha \sin 2\varphi \sin 2\theta_N \sin \xi)^2}{16m_{S_1}^3} \left\{ 4m_\tau m_\mu (\delta L)^2 (\delta R)^2 \times \right. \\ \left. \times (m_{S_1}^2 - m_\tau^2 - m_\mu^2) [(\Delta L)^2 + (\Delta R)^2] \right\} \sqrt{(m_{S_1}^2 - m_\mu^2 - m_\tau^2)^2 - 4m_\mu^2 m_\tau^2}.$$

Вклады диаграмм, представленных на рисунке 1б-1г в парциальную ширину распада, даются выражением:

$$\Gamma(S_1 \rightarrow W_1^{+*} W_1^{-*} \nu_L^* \rightarrow \mu^+ \tau^-) = \frac{\pi^3 (g_L^4 + \sin^2 2\theta_N)^2}{128m_{S_1}^3} \left\{ 4m_\tau m_\mu (\Delta L') (\Delta R') + \right. \\ \left. + [(\Delta L')^2 + (\Delta R')^2] \right\} \sqrt{(m_{S_1}^2 - m_\tau^2 - m_\mu^2)^2 - 4m_\mu^2 m_\tau^2}. \quad (5)$$

Анализ показывает, что наибольший вклад в распад по каналу  $S_1 \rightarrow \mu^+ + \tau^-$ , даёт диаграмма, изображённая на рисунке 1а.

Принимая во внимания экспериментальные ограничения на угол смешивания тяжелых и легких нейтрино  $\varphi$ :

$$(\sin \varphi)_{max} \simeq 2.3 \times 10^{-2} \text{ при } m_N = 250 \text{ ГэВ,}$$

$$(\sin \varphi)_{max} \simeq 3.2 \times 10^{-3} \text{ при } m_N = 140 \text{ ГэВ,}$$

оценим парциальную ширину распада  $S_1 \rightarrow \mu^+ + \tau^-$ :

$$\text{BR}(S_1 \rightarrow \mu^+ + \tau^-) \simeq \begin{cases} 0,24 \times 10^{-4} & \text{при } \sin \varphi \simeq 2.3 \times 10^{-2}, \\ 0,45 \times 10^{-6} & \text{при } \sin \varphi \simeq 3.2 \times 10^{-3}. \end{cases} \quad (6)$$

Полученная величина ширины распада в случае угла смешивания  $\sin \varphi \simeq 2.3 \times 10^{-2}$  на два порядка меньше текущей экспериментальной верхней границы, равной  $0.25 \times 10^{-2}$ .

Отметим, что ширина распада сильно зависит от величин углов смешивания как в нейтринном секторе  $\phi$ , так и в секторе заряженных калибровочных бозонов  $\xi$ .

В разделе 2.2 описана задача расчета ширины распада нейтрального Z-бозона с нарушением лептонного числа в лево-правой симметричной модели. На рисунке 2 представлены диаграммы Фейнмана для распада  $Z_1 \rightarrow \mu^+ + \tau^-$ .

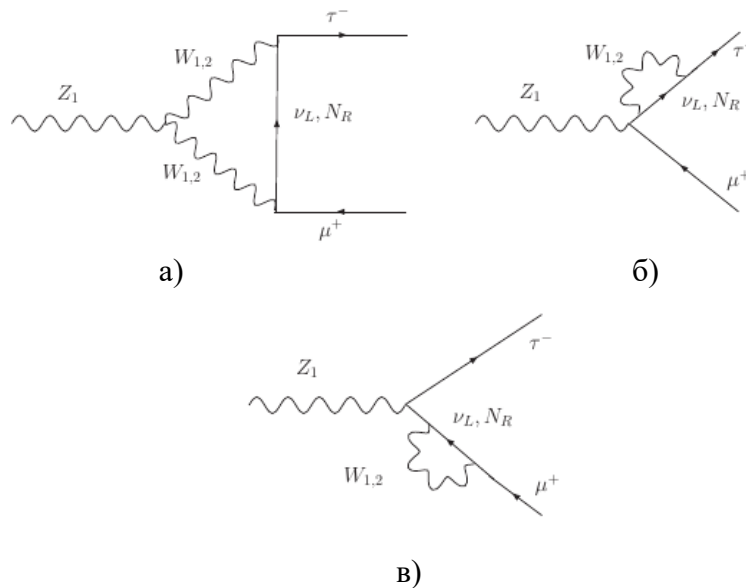


Рисунок 2 - Диаграммы Фейнмана, способствующие распаду  $Z_1 \rightarrow \mu^+ + \tau^-$

Лагранжиан, описывающий взаимодействие заряженных

калибровочных бозонов с  $Z_{1,2}$ -бозонами в лево-правой симметричной модели, удобно представить в следующем виде:

$$\mathcal{L}_{WWW} = i\rho_{kl}^{(V)} B_{\mu\nu,\lambda\sigma} \{ [\partial^\mu W_k^{\lambda*}(x)] W_l^\nu(x) V^\sigma(x) + W_l^{\sigma*}(x) [\partial^\mu W_l^\lambda(x)] V^\nu(x) + W_k^{\nu*}(x) W_l^\sigma(x) [\partial^\nu V^\lambda(x)] \}, \quad (7)$$

где  $k, l = 1, 2, V = Z_1, Z_2$ .

Сначала рассматриваем диаграмму, представленную на рисунке 2а, матричный элемент которой будет имеет вид

$$M^a = \frac{g^3 c_W \sin 2\theta_{\mu\tau} \sin^2 \varphi \cos \varphi \cos^2 \xi}{8} \sqrt{\frac{m_\tau m_\mu}{2m_{Z_1} E_\tau E_\mu}} \bar{u}(p_1) \gamma^m (1 - \gamma_5) \times \\ \times \int_\Omega \left\{ \left[ \frac{\hat{k} - \hat{p}_2 + m_{N_2}}{(k-p_2)^2 - m_{N_2}^2} - \frac{\hat{k} - \hat{p}_2 + m_{N_1}}{(k-p_2)^2 - m_{N_1}^2} \right] \gamma^n (1 - \gamma_5) v(p_2) [g_{\sigma\lambda} \Lambda_{m\nu}(k-p) \Lambda_{n\beta}(k) k_\mu - \right. \\ \left. - g_{\nu\lambda} \Lambda_{n\sigma}(k) \Lambda_{m\beta}(k-p) (k-p)_\mu - g_{\beta\lambda} \Lambda_{m\sigma}(k-p) \Lambda_{n\nu}(k) p_\mu] B^{\mu\nu,\beta\sigma} Z^\lambda(p) \right\} d^4 k, \quad (8)$$

где

$$\Lambda_{\mu\nu}(k) = \frac{g_{\mu\nu} - k_\mu k_\nu / m_{W_1}^2}{k^2 - m_{W_1}^2},$$

здесь  $m_{N_j}$  ( $j = 1, 2$ ) - масса тяжелого нейтрино,  $p_1(p_2)$  - импульс  $\tau$ -лептона ( $\mu$ -мезона),  $\theta_{\mu\nu}$  - угол смешивания между тяжелым тау-лептоном и мюонными нейтрино.

Зная верхние ограничения на углы смешивания в секторе калибровочных бозонов можем положить  $\cos \varphi \cos 2\xi$  равным 1.

Схема дальнейших расчетов, следующая: используя процедуру размерной регуляризации и учитывая уравнения движения найдём часть парциальной ширины распада, связанную с диаграммой, представленной на рисунке 2а:

$$\Gamma(Z_1 \rightarrow W_1^{-*} W_1^{+*} \nu_L^* \rightarrow \tau^- \mu^+) = \frac{g^6 c_W^2 \pi^3 \sin^4 \varphi \sin^2 2\theta_{\mu\tau}}{384 m_{Z_1}^3} \{ (m_{Z_1}^2 - m_\mu^2 - m_\tau^2) \times \\ [3f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2}) + 3f_{C,C}(m_{N_1}, m_{N_2}) + \beta_z (f_{B,B}(m_{N_1}, m_{N_2}) + f_{D,D}(m_{N_1}, m_{N_2}))] + \\ + 4f_{A,C}(3m_\mu m_\tau - 2\beta_z) - \beta_z [4(m_\mu + m_\tau) (f_{C,B}(m_{N_1}, m_{N_2}) + f_{A,D}(m_{N_1}, m_{N_2})) + \\ + 4m_\mu m_\tau (m_{N_1}, m_{N_2})] \} \sqrt{(m_{Z_1}^2 - m_\mu^2 - m_\tau^2)^2 - 4m_\mu^2 m_\tau^2}, \quad (9)$$

где

$$f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2}) = [A(m_{N_1})] - A(m_{N_2})^2,$$

$$f_{A,B}(m_{N_1}) = [A(m_{N_1}) - A(m_{N_2})] \times [B(m_{N_1}) - B(m_{N_2})], \text{ и так далее.}$$

Расчеты показывают, что вклад  $3(m_{Z_1}^2 - m_\mu^2 - m_\tau^2) f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2})$  превышает вклад от всех остальных слагаемых в фигурных скобках на несколько порядков. Принимая во внимание, что  $m_{Z_1}^2 \gg m_\tau^2, m_\mu^2, m_\tau m_\mu$ , получаем парциальную ширину распада:

$$\Gamma(Z_1 \rightarrow W_1^{-*} W_1^{+*} \nu_L^* \rightarrow \tau^- \mu^+) \simeq \frac{g^6 c_W^2 \pi^3 \sin^4 \varphi \sin^2 2\theta_{\mu\tau} m_{Z_1}}{128} f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2}). \quad (10)$$

Диаграммы, изображённые на рисунках 2б и рисунок 2в, переходят друг в друга при замене  $m_\mu \rightarrow m_\tau$  поэтому достаточно рассмотреть вклад только одной из них. После процедуры размерной регуляризации матричный элемент, соответствующий диаграмме, показанной на рисунке 2б, можно представить в виде:

$$M^b = \frac{i\pi^2 g^3 \sin 2\theta_{\mu\tau} \sin^4 \varphi}{16c_W} \sqrt{\frac{m_\tau m_\mu}{2m_{Z_1} E_\tau E_\mu}} \bar{v}(p_1) \gamma^m (1 - \gamma_5) [F(m_{N_2}) - F(m_{N_2})] \times$$

$$\times \gamma^n \frac{\hat{p}_1}{m_\tau^2 - m_\mu^2} \gamma^v (\gamma_5 - 1 + 4s_W^2) v(p_2) Z_\nu(p), \quad (11)$$

где

$$F(m_{N_j}) = \int_0^1 \left\{ g_{mn} \hat{p}_1 (1-x) \ln \left| \frac{l_{xy}^j}{l_{xy}^j - p_x^2} \right| - \frac{\hat{p}_1 (1-x)}{2m_{W_1}^2} [(2p_{xm} p_{xn} + \right.$$

$$+ g_{mn} (p_x^2 - l_x^j)) \ln \left| \frac{l_{xy}^j}{l_{xy}^j - p_x^2} \right| + g_{mn} p_x^2] + \frac{1}{2m_{W_1}^2} [(p_x^2 - l_{xy}^j) (\gamma_m p_{xn} + \gamma_n p_{xm}) \times$$

$$\left. \times \ln \left| \frac{l_{xy}^j}{l_{xy}^j - p_x^2} \right| + p_x^2 (\gamma_m p_{xn} + \gamma_n p_{xm}) \right] \Big\} dx, \quad (12)$$

где

$$p_x = p_1 x, \quad l_{xy}^j = (m_\tau^2 - m_{W_1}^2 - m_{N_j}^2) x - m_{W_1}^2.$$

Используя выражение (12) находим  $\Gamma(Z_1 \rightarrow \tau^{-*} W_1^{+*} \nu_L^* \rightarrow \tau^- \mu^+)$  и  $\Gamma(Z_1 \rightarrow W_1^{-*} W_1^{+*} \nu_L^* \rightarrow \tau^- \mu^+)$ . При этом имеет место следующее приближенное

соотношение:

$$\frac{\Gamma(Z_1 \rightarrow \tau^- W_1^{+*} \nu_L^* \rightarrow \tau^- \mu^+)}{\Gamma(Z_1 \rightarrow W_1^{-*} W_1^{+*} \nu_L^* \rightarrow \tau^- \mu^+)} \simeq 10^{-6} \div 10^{-7}. \quad (13)$$

Поэтому основной вклад в распад  $Z_1 \rightarrow \tau\mu$  будет давать диаграмма, изображённая на рисунке 2а.

Приведём оценку относительной вероятности распада  $BR(Z_1 \rightarrow \tau\mu) = BR(Z_1 \rightarrow \tau\mu^+) + BR(Z_1 \rightarrow \tau^+\mu^-)$ . Отметим, что функция  $f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2})$  входящая в формулу (9) зависит от разности масс тяжелых нейтрино. Например, при изменении  $m_{N_2}$  от 100 до 200 ГэВ и  $m_{N_1} = 100$  ГэВ ( $m_{N_1} = 150$  ГэВ) имеем

$$f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2}) \in [0, 0.958], \quad (f_{A,A}(m_{N_1}, m_{N_2}) \in [0, 0.125]).$$

Тогда установив

$$\theta_{\mu\tau} = \frac{\pi}{4},$$

мы получим относительную ширину распада

$$BR(Z_1 \rightarrow \mu\tau) \leq \begin{cases} 9.7 \times 10^{-8}, & \text{при } \varphi = 3.2 \times 10^{-2}, & m_{N_1} = 100 \text{ ГэВ}, m_{N_2} = 150 \text{ ГэВ}, \\ 1.4 \times 10^{-8}, & \text{при } \varphi = 5 \times 10^{-3}, & m_{N_1} = 100 \text{ ГэВ}, m_{N_2} = 150 \text{ ГэВ}, \\ 7.6 \times 10^{-11} & \text{при } \varphi = 10^{-3}, & m_{N_1} = 100 \text{ ГэВ}, m_{N_2} = 150 \text{ ГэВ}. \end{cases}$$

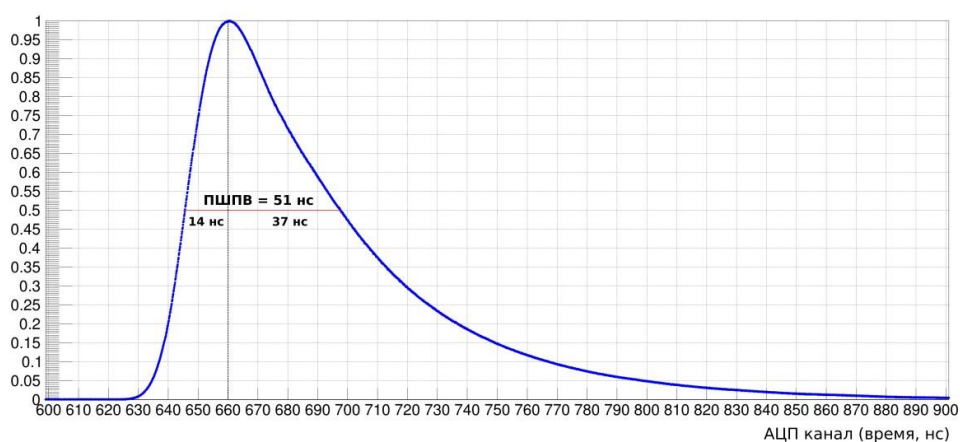
Экспериментальная верхняя граница ширины распада  $Z_1 \rightarrow \mu\tau$  установлена в экспериментах на ATLAS и CMS и равна  $BR(Z_1 \rightarrow \mu\tau)_{exp} < 1.2 \times 10^{-5}$ , таким образом рассчитанное в рамках лево-правой симметричной модели значение оказалось на три порядке меньше.

Отметим, что выражение (9) для парциальной ширины распада практически не зависит от масс лептонов. Поэтому все расхождения между коэффициентами ветвления распадов  $BR(Z_1 \rightarrow \mu\tau)$ ,  $BR(Z_1 \rightarrow \tau e)$  и  $BR(Z_1 \rightarrow e\mu)$  определяются исключительно значениями углов смешивания в секторе тяжелых нейтрино.

**В третьей главе** описан метод реконструкции событий позволявший эффективно подавлять фон от наложения сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий в калориметре для эксперимента

СОМЕТ. В основе метода лежит использование распределения по параметру хи-квадрат, полученному при аппроксимации зарегистрированного сигнала средней формой сигналов.

Для построения средней формы из экспериментальных данных по тестированию прототипа калориметра на выведенном пучке электронов (КЕК, Япония) отбирались «чистые» (без наложения) сигналы электронов с энергосвободой в кристалле более 8 МэВ на статистике 100 тыс. событий. Методика получения средней формы заключалась в том, чтобы для каждого отобранного «чистого» сигнала определить его параметры: амплитуду, время, пьедестал, затем отнормировать и усреднить по событиям.



**Рисунок 3 - Средняя форма сигнала отнормированная на амплитуду**

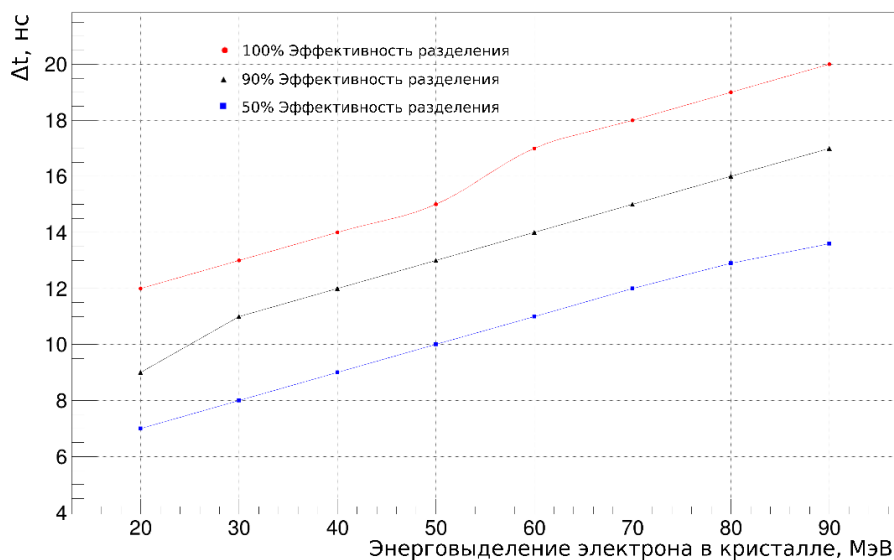
Построенная таким образом форма сигнала представлена на рисунке 3 и используется для аппроксимации сигналов с калориметра. Для отбора «чистых» сигналов от сигналов с наложением предлагается использовать хи-квадрат, полученный при аппроксимации сигналов.

Монте-Карло моделирование показало, в условиях первой стадии эксперимента для калориметра за 100 дней ожидается поток нейтронов  $10^{12}$  на квадратный сантиметр и в энергетическом спектре преобладают медленные нейтроны, которые можно считать равномерно распределенными во времени. Калориметр эксперимента СОМЕТ основан на сцинтилляционных кристаллах LYSO (Lu – 71.44%, Y – 4.03%, Si – 6.37%, O – 18.14%, Ce – 0.02%). Лютеций имеет большое сечение захвата для медленных нейтронов  $\sim 100$  бн, при этом энергия возбуждения образующегося составного ядра излучается в виде  $\gamma$ -квантов.

В результате в кристалле LYSO образуется дополнительное энергосвободы  $\sim 7$  МэВ от реакции (n, гамма), которое будет сдвигать спектр фоновых событий в сигнальную область.

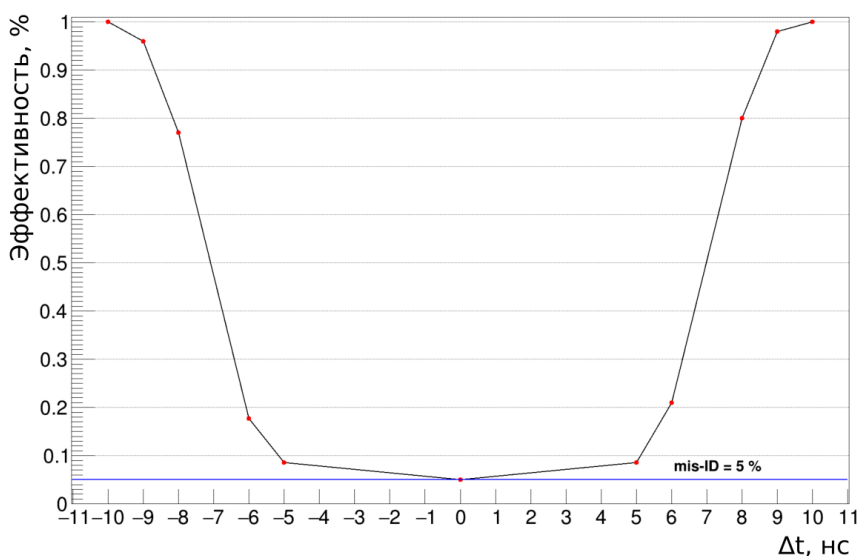
Для апробации метода были смоделированы возможные ситуации

наложения сигналов в калориметре эксперимента COMET, а именно наложением сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром  $^{175}\text{Lu}$  в кристалле LYSO, и наложение двух фоновых электронов от распада мюона в связанном состоянии с ядром алюминия, вызывающим «ложный» сигнал ( $\mu$ -e)-конверсии.



**Рисунок 4 - Эффективность разделения событий в зависимости от времени между сигналами**

Эффективность предложенного метода по разделения «чистых» событий от событий с наложением в зависимости от времени между наложенными сигналами для обеих ситуаций представлена на рисунках 4-5.

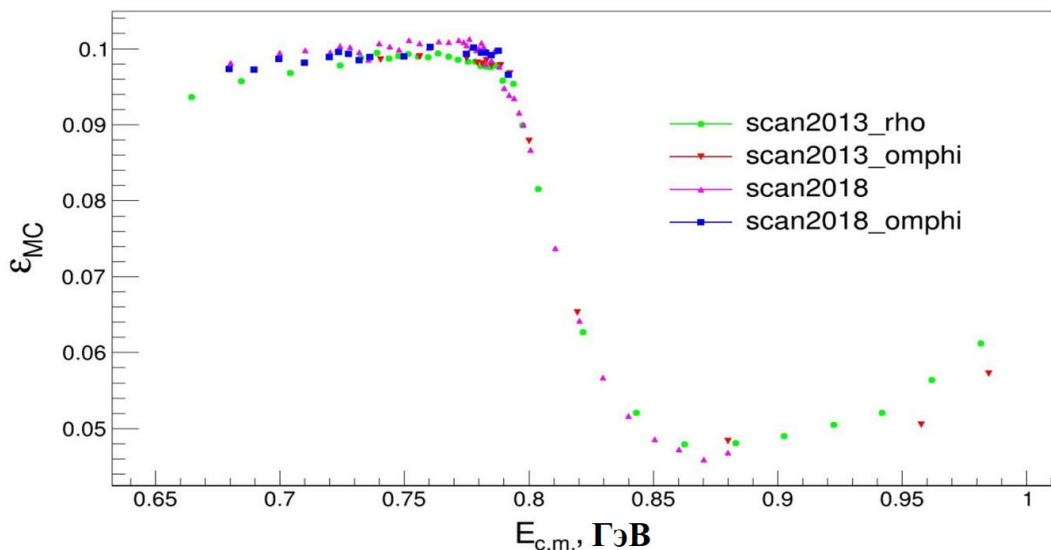


**Рисунок 5 – Зависимость эффективности разделения событий от разницы времени между сигналами, соответствующими энерговыделению в кристалле ~ 50 МэВ каждый при разрешенной «ложной» идентификации (mis-ID) для 5% событий**

Предложенный подход показал хорошую способность к разделению событий с наложением сигналов, время разделения значительно меньше ширины длительности сигнала на уровне половинной амплитуды и планируется его использование в офф-лайн анализе эксперимента СОМЕТ.

**В четвертой главе** представлены результаты предварительного изменения сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области энергий  $\omega$ -мезона с использованием интегральной светимости  $\sim 40 \text{ пб}^{-1}$  набранной в сезоне 2013-2018 гг., в диапазоне энергий от 660 МэВ до 980 МэВ.

На первом этапе анализа проведено полное моделирование процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  и основных фоновых процессов ( $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ) с использованием программного инструментария CMD3SIM, написанная на основе пакета Geant4. Для подавления основных фоновых процессов разработаны критерии отбора. Из полного моделирования определяли эффективность регистрации детектором КМД-3 процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в зависимости от энергии в системе центра масс (см. рисунок 6).



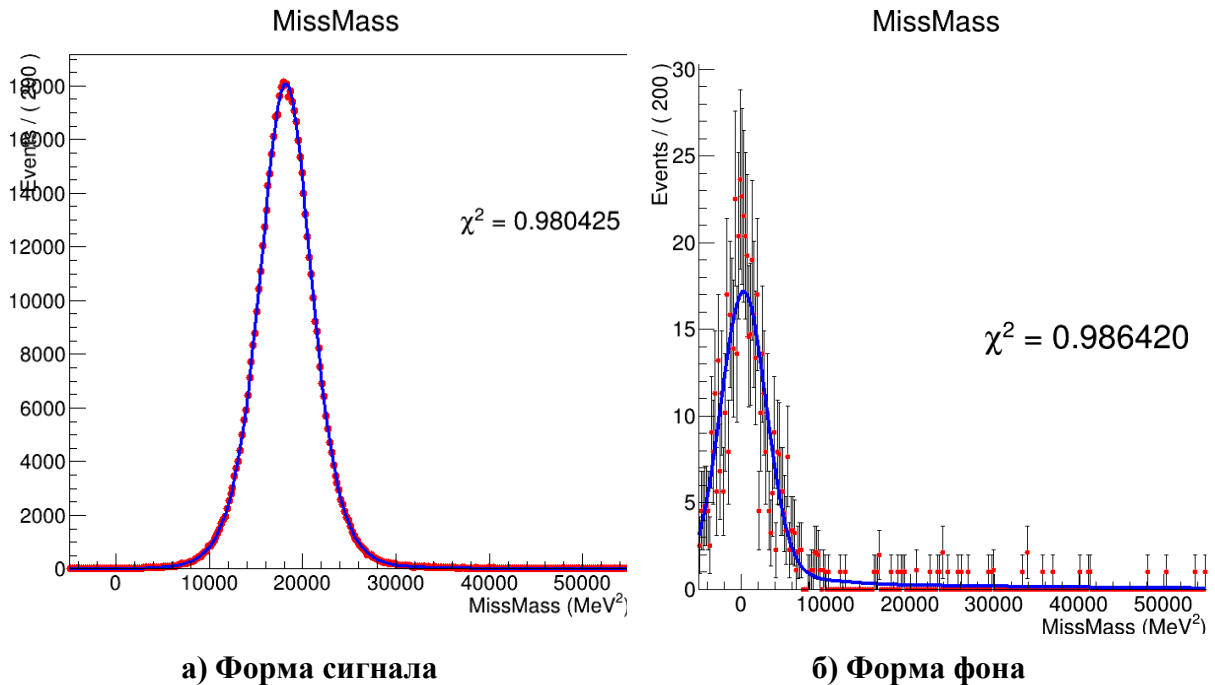
**Рисунок 6 - Эффективность регистрации событий сигнала в зависимости от энергии в с.ц.м.**

Следующий шаг – это определение функций, описывающих форму сигнала и фона. Определение числа сигнальных событий основано на аппроксимации распределения по квадрату недостающей массы. Форма сигнала и форма физического фона представлены на рисунке 7.

После определения числа полезных событий вычислялось видимое сечение:

$$\sigma_{vis} = \frac{N_{sel}}{L\epsilon_{MC}(1+\delta_{trig})(1+\delta_{track})}, \quad (12)$$

где  $N_{sel}$  – число отобранных событий,  $L$  – интеграл светимости,  $\varepsilon_{MC}$  – эффективность регистрации событий (моделирование),  $\delta_{trig}$  – поправка к эффективности триггера,  $\delta_{track}$  – поправка на эффективность реконструкции трека в ДК.



**Рисунок 7 - Определение формы сигнала и фона из моделирования, энергия в с.ц.м.  $E_{с.м} = 781,04$  МэВ**

Для учета эффекта был разработан метод расчета дополнительной поправки на отличие эффективности реконструкции треков в экспериментальных данных и данных моделирования сигнального процесса. Расчет поправки к эффективности реконструкции треков состоит из следующих шагов:

1) Из моделирования сигнального процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  необходимо определить число треков, которые «пропадают», хотя частицы летят в чувствительную область дрейфовой камеры.

2) Для определения «пропавших треков» выработаны две более «жесткие» система отбора для того, чтобы получить чистую выборку сигнальных событий из экспериментальных данных для событий, в которых в чувствительную область дрейфовой камера попало 2 заряженных трека, и для случая, когда зарегистрирован только один трек.

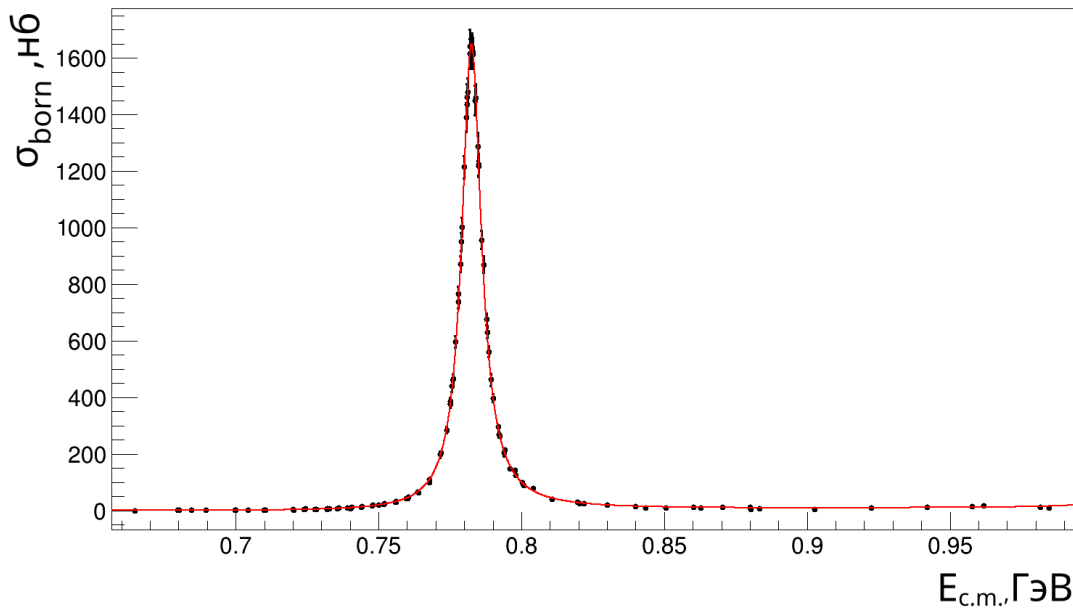
3) Поправка вычисляется как отношение числа одотрековых событий к двухтрековым событиям в эксперименте и в моделировании.

Борновское сечение  $\omega$ -мезона определялось решением интегрального

уравнения (рисунок 8, где точками представлены данные CMD-3, красной кривой – результат их аппроксимации):

$$\sigma_{vis}(s) = \int_0^{x_0} dx \sigma_{born}(s(1-x))F(x,s), \quad (13)$$

где  $s = 4E_{c.m.}^2$ ,  $x_0$  – определяется порогом реакции,  $1 - S_{пор}/s$ ,  $F(x,s)$  – функция Кураева – Фадына, учитывающая излучение многих фотонов в коллинеарной области.



**Рисунок 8 - Борновское сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi$  в области  $\omega$ -мезона**

Параметры аппроксимации борновского сечения функцией (13), полученные в результате минимизации, приведены в таблице 1, где первая ошибка представляет статистическую точность, а вторая - систематическую погрешность.

**Таблица 1 - Параметры  $\omega$ -мезона, полученные в результате оптимизации**

Параметры	Значения
$M_\omega$ , МэВ	$782.67 \pm 0.01 \pm 0.1$
$\Gamma_\omega$ , МэВ	$8.56 \pm 0.02 \pm 0.07$
$\sigma_0(\omega \rightarrow 3\pi)$ , нб	$1629 \pm 3 \pm 36$
$\Phi_{\omega\phi}$	$117 \pm 10 \pm 23$
$\sigma_0(\rho \rightarrow 3\pi)$ , нб	$0.77 \pm 0.05 \pm 0.1$
$\Phi_{\omega\rho}$	$249 \pm 2 \pm 5$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации:

Сектор калибровочных бозонов в лево-правой симметричной модели включает два нейтральных  $Z_{1,2}$  и два заряженных  $W_{1,2}$  калибровочных бозона, где бозоны  $Z_1$  и  $W_1$  являются аналогами  $Z$  и  $W$  бозонов Стандартной модели. В рамках данной модели рассмотрен распад  $Z_1$  бозона на мюон и тау-лептон пару, а также распад бозона Хиггса  $S_1$ , который является аналогом бозона Хиггса в Стандартной Модели, по каналу  $S_1 \rightarrow \mu^+ \tau^-$ .

1. Установлено, что основной вклад в ширину распада бозона Хиггса по каналу  $S_1 \rightarrow \mu^+ \tau^-$  вносит диаграмма с легкими и тяжелым нейтрино в виртуальном состоянии. Рассчитанная в третьем порядке теории возмущения в зависимости от угла смешивания тяжелых и легких нейтрино  $\phi$  парциальная ширина распада оказывается не менее чем на 2 порядка меньше текущей экспериментальной верхней границы распада, которая является ни чем иным как пределом точности ее измерения [1, 3, 4, 8].

2. Установлено, что теоретическая ширина распада  $Z_1$  бозона на пару мюон и тау-лептон  $BR(Z_1 \rightarrow \tau \mu) = BR(Z_1 \rightarrow \tau^- \mu^+) + BR(Z_1 \rightarrow \tau^+ \mu^-)$  в рамках лево-правой симметричной модели оказывается отличной от нуля только при наличии нейтринных смешиваний и отсутствие вырождения масс в секторе тяжелых нейтрино, что дает указание на то указывает, что нарушения лептонного числа в нейтральном и заряженном секторе имеет одну и ту же природу [2, 4, 8].

3. Разработан метод реконструкции событий на основе аппроксимации зарегистрированных сигналов средней формой сигнала, позволяющий значительно снизить фон от наложения сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий в калориметре для международного эксперимента COMET [5, 9, 10].

4. Выполнена апробация метода на возможных ситуациях наложения сигналов в калориметре, а именно перекрытие сигналов от двух фоновых электронов от распада мюона в связанном состоянии с ядром алюминия и наложением сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром  $^{175}\text{Lu}$  в кристалле LYSO [5, 9, 10].

5. Выполнен анализ экспериментальных данных, набранных на детекторе КМД-3, измерено борновское сечение процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии в широком диапазоне энергий и с большой статистикой вокруг  $\omega$ -мезона. [6, 7, 11, 12].

6. Определены параметры  $\omega$ -мезона на основе аппроксимации борновского сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трёх пионов в конечном состоянии в модели векторной доминантности. [6, 7, 11, 12].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты, полученные в диссертационной работе, носят важный фундаментальный характер. Полученные результаты будут использованы при анализе экспериментальных данных Фазы-II эксперимента СОМЕТ, а также в проектировке будущих экспериментов по поиску процессов, идущих с нарушением лептонного квантового числа, и также позволят сузить круг теоретических моделей.

Полученные результаты предварительного анализа процесса  $e^-e^+ \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^0$  будут использованы для последующей обработки всей накопленной детектором КМД-3 статистики с целью уточнения вклада адронного сечения в аномальный магнитный момент мюона.

Предварительный анализ набранной статистики показал, что мы впервые сможем достоверно измерить  $\rho$ - $\omega$  интерференцию в канале  $3\pi$  на основе анализа всего имеющегося / набирающегося набора данных на детекторе КМД-3.

Полученные результаты будут использованы для реализации научных исследований в рамках научных программ, реализуемых в Республике Беларусь, при создании учебных программ для студентов, обучающихся по программам подготовки специалистов в области ядерной физики.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Статьи в научных изданиях, включенных в перечень изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертаций, и в иностранных научных изданиях**

1. Boyarkin, O.M. Lepton flavor-violating decays of the Higgs boson within the left-right symmetric model / O.M. Boyarkin, G.G. Boyarkina, D.S. Vasileuskaya // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2018. – Vol. 21, № 2. – P. 102–113.
2. Boyarkin, O.M. The Higgs boson decays with the lepton flavor violation / O.M. Boyarkin, G.G. Boyarkina, D.S. Vasileuskaya // *International Journal of Modern Physics A*. – 2018. – Vol. 33, № 17. – P. 185010. – 12 p.
3. Boyarkin, O.M. Neutrino mixing as a source of lepton flavor violations / O.M. Boyarkin, G.G. Boyarkina, D.S. Vasileuskaya // *International Journal of Modern Physics A*. – 2018. – Vol. 33, № 32. – P. 1850201–1850214.
4. Бояркин, О.М. Осцилляции трех поколений нейтрино / О.М. Бояркин, Г.Г. Бояркина, Д.С. Василевская // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук*. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 361–372.
5. Василевская, Д.С. Метод разделения событий с наложением сигналов / Д.С. Василевская, Д.Н. Григорьев, Д.В. Шёлковий // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук*. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 470–478.
6. Василевская, Д.С. Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  с детектором КМД-3 в области энергии  $\sqrt{s} = 756\text{--}800$  МэВ / Д.С. Василевская, Д.Н. Григорьев, И.Г. Дудко, В.Л. Иванов, В.Ф. Казанин, А.Н. Козырев, А.А. Рубан, А.Е. Рыжененков, С.С. Толмачев, Г.В. Федотович, Д.Н. Шемякин, Д.В. Шёлковий, Л.Б. Эпштейн // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук*. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 449–456.
7. Василевская, Д.С. Измерение параметров омега-мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 / Д.С. Василевская, Д.Н. Григорьев, И.Г. Дудко, В.Л. Иванов, В.Ф. Казанин, А.Н. Козырев, А.А. Рубан, А.Е. Рыжененков, С.С. Толмачев, Г.В. Федотович, Д.Н. Шемякин, Д.В. Шёлковий, Л.Б. Эпштейн // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук*. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 327–336.

### **Тезисы докладов**

8. Neutrino mixings as a source of charged lepton flavor violations / O.M. Boyarkin, V.V. Makhnach, D.S. Vasileuskaya // *In Proc. Nonlinear Phenomena in*

Complex Systems, Fractals, Chaos, Phase Transitions, Self-organization, XXV Annual Seminar, Minsk, May 21-25 2018, P. 25-32.

9. Метод реконструкции событий с наложением сигналов / Д.С. Василевская, Д.В. Шёлковий // Мат. IX Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики - 2020». Минск, 4-6 ноября 2020, С. 19-21.

10. Метод реконструкции событий с наложением сигналов / Д.С. Василевская, Д.В. Шёлковий // Мат. XVII Международной научной конференции «Молодежь в науке – 2020». Минск, 22-25 сентября 2020, С. 413-415.

11. Измерение параметров омега-мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 / Д.С. Василевская, Д.Н. Григорьев, С.С. Толмачев, Г.В. Федотович, Д.В. Шёлковий // В кн.: Мат. X Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2022». Минск, 27-29 апреля 2022, С. 39-42.

12. Измерение параметров омега-мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 / Д.С. Василевская, Д.Н. Григорьев, С.С. Толмачев, Г.В. Федотович, Д.В. Шёлковий // В кн.: Мат. XIX Международной научной конференции «Молодежь в науке – 2022». Минск, 25-28 октября 2022, С. 405-408.



## РЭЗІЮМЭ

Васілеўская Дар'я Сяргееўна

### Праверка Стандартнай мадэлі ў прэцызійных эксперыментах пры нізкіх энергіях

**Ключавыя словы:** Стандартная мадэль, лева-правая сіметрычная мадэль, парушэнне лептоннага ліку, эксперымент COMET, анамальны магнітны момант мюона, працэс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , дэтэктар КМД-3

**Мэта дысертацыі:** праверка Стандартнай мадэлі, праз даследаванне распадаў нейтральнага базона Хігса і Z-базона з парушэннем лептоннага квантавага ліку, і вызначэнне шырыні распаду. Распрацоўка метаду рэканструкцыі падзей для ўхілення фону ад накладання сігналаў у электрамагнітным каларыметры эксперыменту COMET. Прэцызійнае вымярэнне сячэння працэсу электрон-пазітроннай анігіляцыі з утварэннем трох піонаў у канчатковым стане ў вобласці энергій амега-мезона з дэтэктарам КМД-3 на электрон-пазітронным калайдэры ВЭПП-2000 з мэтай паляпшэння дакладнасці разліку анамальнага магнітнага моманту мюона ў рамках Стандартнай мадэлі.

**Метады даследавання:** метады тэарэтычнай і матэматычнай фізікі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** даследаванне працэсу  $H \rightarrow \tau\mu$  паказала, што асноўны ўклад у шырыню распаду ўносіць дыяграма з лёгкімі і цяжкім нейтрына ў віртуальным стане. Таму даследаванне гэтых распадаў можа даць інфармацыю аб нейтрынным сектары лева-правай сіметрычнай мадэлі. Верхняя мяжа шырыні распаду  $Z \rightarrow \tau\mu$  апыняецца на два парадку менш верхняй мяжы  $BR(Z \rightarrow \tau\mu)_{exp} < 1.2 \times 10^{-5}$ , атрыманай у эксперыментах на ATLAS і CMS. Для эксперыменту COMET распрацаваны метады рэканструкцыі падзей на аснове апраксімацыі зарэгістраваных сігналаў стандартнай формай сігнала. У шырокім дыяпазоне энергій і з вялікай статыстыкай вакол  $\omega$ -мезона з дэтэктарам КМД-3 на электрон-пазітронным калайдэры ВЭПП-2000 вымерана борнаўскае сячэнне працэсу  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ . Параметры  $\omega$ -мезона вымераны з лепшай статыстычнай дакладнасцю, а сістэматычная хібнасць супастаўная з дакладнасцю лепшых папярэдніх эксперыментаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Атрыманыя вынікі будуць выкарыстаныя, пры аналізе эксперыментальных дадзеных Фазы-II эксперыменту COMET, у праекціроўцы будучых эксперыментаў па пошуку працэсаў, якія ідуць з парушэннем лептоннага квантавага ліку, а таксама для наступнай апрацоўкі ўсёй назапашанай дэтэктарам КМД-3 статыстыцы з мэтай удакладнення ўкладу адроннага сячэння ў анамальны магнітны момант мюона.

**Галіна прымянення:** фізіка элементарных часціц.

## РЕЗЮМЕ

Василевская Дарья Сергеевна

### Проверка Стандартной модели в прецизионных экспериментах при низких энергиях

**Ключевые слова:** Стандартная модель, лево-правая симметричная модель, нарушение лептонного числа, эксперимент СОМЕТ, аномальный магнитный момент мюона, процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , детектор КМД-3

**Цель диссертации:** проверка Стандартной модели, через исследование распадов нейтрального бозона Хиггса и  $Z$ -бозона с нарушением лептонного квантового числа, и определение ширины распада. Разработка метода реконструкции событий для устранения фона от наложения сигналов в электромагнитном калориметре эксперимента СОМЕТ. Прецизионное измерение сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием трех пионов в конечном состоянии в области энергий  $\omega$ -мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 с целью улучшения точности расчета аномального магнитного момента мюона в рамках Стандартной модели.

**Методы исследования:** методы теоретической и математической физики.

**Полученные результаты и их новизна:** исследование процесса  $H \rightarrow \tau\mu$  показало, что основной вклад в ширину распада вносит диаграмма с легкими и тяжелым нейтрино в виртуальном состоянии. Поэтому исследование этих распадов может дать информацию о нейтринном секторе лево-правой симметричной модели. Верхняя граница ширины распада  $Z \rightarrow \tau\mu$  оказывается на два порядка меньше верхней границы  $BR(Z \rightarrow \tau\mu)_{exp} < 1.2 \times 10^{-5}$ , полученной в экспериментах на ATLAS и CMS. Для эксперимента СОМЕТ разработан метод реконструкции событий на основе аппроксимации зарегистрированных сигналов стандартной формой сигнала. В широком диапазоне энергий и с большой статистикой вокруг  $\omega$ -мезона с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 измерено борновское сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ . Параметры  $\omega$ -мезона измерены с лучшей статистической точностью, а систематическая погрешность сопоставима с точностью лучших предыдущих экспериментов.

**Рекомендации по использованию результатов:** полученные результаты будут использованы, при анализе экспериментальных данных Фазы-II эксперимента СОМЕТ, в проектировке будущих экспериментов по поиску процессов, идущих с нарушением лептонного квантового числа, а также для последующей обработки всей накопленной детектором КМД-3 статистике с целью уточнения вклада адронного сечения в аномальный магнитный момент мюона.

**Область применения:** физика элементарных частиц.

## SUMMARY

Vasileuskaya Darya Syargeeuna

### Testing of the Standard Model in precision experiments at relatively low energies

**Keywords:** Standard model, left-right symmetric model, lepton number violation, COMET experiment, muon anomalous magnetic moment,  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  process, CMD-3 detector

**Aim of the work:** verification of the Standard Model by studying the decays of the neutral Higgs boson and the Z-boson with violation of the lepton quantum number and determining the decay width. Development of an event reconstruction method to reject the background caused by overlapping signals in the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment. Precise measurement of the cross section of the process of electron-positron annihilation with the production of three pions in the final state in the omega-meson energy region with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 electron-positron collider in order to improve the accuracy of calculating the anomalous magnetic moment of the muon within the framework of the SM.

**Research methods:** methods of theoretical and mathematical physics.

**Results obtained and their novelty:** the study of the  $H \rightarrow \tau\mu$  process showed that the diagram with light and heavy neutrinos in the virtual state makes the main contribution to the decay width. Therefore, the study of these decays can provide information about the neutrino sector of the left-right symmetric model. The upper limit of the  $Z \rightarrow \tau\mu$  decay width  $BR(Z \rightarrow \tau\mu)_{exp} < 1.2 \times 10^{-5}$  turns out to be two orders of magnitude smaller than the upper limit obtained in the ATLAS and CMS experiments. For the COMET experiment, a method for reconstructing events based on the approximation of the recorded signals with a standard waveform has been developed. The Born cross section of the  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  process was measured in a wide energy range and with large statistics around the  $\omega$ -meson with the CMD-3 detector at the VEPP-2000 electron-positron collider. The parameters of the  $\omega$  meson are measured with the best statistical accuracy, and the systematic error is comparable with the accuracy of the best previous experiments.

**Recommendations for use:** the results obtained will be used in the analysis of the experimental data of Phase-II of the COMET experiment, in the design of future experiments to search for processes that violate the lepton quantum number, as well as for the subsequent processing of all statistics collected by the CMD-3 detector in order to clarify the contribution of the hadronic cross section to the anomalous muon magnetic moment.

**Application area:** physics of elementary particles.

ВАСИЛЕВСКАЯ Дарья Сергеевна

ПРОВЕРКА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ПРЕЦИЗИОННЫХ  
ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Подписано в печать 26.01.2024. Формат 60x90/16.

Тип бумаги – офисная. Гарнитура – «Times». Печать – ризография.

Объем: 1,5 усл.печ.л.; 1,3 уч.изд. л.

Тираж 60 экз. Заказ №1.

---

Государственное научное учреждение  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»  
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2.

Отпечатано на ризографе ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

ЛИСТ ИЗМЕНЕНИЙ В ТЕКСТ АВТОРЕФЕРАТА И ДИССЕРТАЦИИ  
Д.С. ВАСИЛЕВСКОЙ «ПРОВЕРКА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ПРЕЦИЗИОННЫХ  
ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ»

Напечатано	Следует читать
<b>Положения, выносимые на защиту</b>	<b>Положения, выносимые на защиту</b>
<p>1. Результат расчета парциальной ширины распада бозона Хиггса на положительный мюон и отрицательный тау-лептон, идущий ...</p> <p>2. Результат расчета ширины распада Z-бозона на мюон и тау-лептон пару, идущий ...</p> <p>3. Метод реконструкции событий на основе аппроксимации сигналов стандартной формой сигнала, позволявший ...</p> <p>4. Установление ограничений ...и получение, на их основе, предварительных значений для сечения изучаемого процесса в диапазоне энергий 660-690 МэВ в системе центра масс с детектором КМД-3.</p> <p><b>Основные научные результаты диссертации:</b></p> <p>2. Установлено, что ... и отсутствие вырождения масс в секторе тяжелых нейтрино, что дает указание на то, что указывает, что нарушения лептонного числа в нейтральном и заряженном секторе имеет одну и ту же природу [2, 4, 8].</p> <p>4. Выполнена апробация метода ... и наложением сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром <math>^{175}\text{Lu}</math> в кристалле LYSO [5, 9, 10].</p>	<p>1. Результат расчета парциальной ширины распада бозона Хиггса на положительный мюон и отрицательный тау-лептон, идущего ...</p> <p>2. Результат расчета ширины распада Z-бозона на мюон и тау-лептон пару, идущего ...</p> <p>3. Метод реконструкции событий на основе аппроксимации сигналов стандартной формой сигнала, позволивший ...</p> <p>4. Установление ограничений ...и получение на их основе предварительных значений для сечения изучаемого процесса в диапазоне энергий 660-690 МэВ в системе центра масс с детектором КМД-3.</p> <p><b>Основные научные результаты диссертации:</b></p> <p>2. Установлено, что ... и отсутствии вырождения масс в секторе тяжелых нейтрино, что дает указание на то, что нарушения лептонного числа в нейтральном и заряженном секторе имеют одну и ту же природу [2, 4, 8].</p> <p>4. Выполнена апробация метода ... и наложение сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром <math>^{175}\text{Lu}</math> в кристалле LYSO [5, 9, 10].</p>

Соискатель

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат физ.-мат. наук



Д.С. Василевская



Ю.П. Выблый