

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Литова Леандра Борисова** «**Исследование полуплептонных распадов каонов**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Стандартная модель электрослабых и сильных взаимодействий (СМ) является самой проверенной теорией, охватывающей огромную область своей применимости, и во многих случаях она с беспрецедентной точностью описывает все известные экспериментальные данные. Однако, в то же время СМ является все же некоторым эффективным приближением более общей теории, так как СМ содержит более двадцати параметров (массы частиц и их иерархия, константы взаимодействий, параметры нарушения СР-четности и т.п.), значения которых должны объясняться этой еще неизвестной общей теорией.

С другой стороны, параметры СМ нарушения СР-четности, заключенные в фазе матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (СКМ) не могут в настоящее время объяснить асимметрию между материей и антиматерией во Вселенной.

Таким образом, физика связанная с изучением эффектов СР-четности, являющаяся окном в мир еще неизвестной физики за пределами СМ, еще и тесно связана с проблемами понимания происхождения и эволюции Вселенной. Поэтому **актуальность** темы исследования диссертации не вызывает никаких сомнений.

Основной **целью** представленной диссертации Литова Леандра Борисова является использование полуплептонных каонных распадов для исследования предсказаний СМ и поиска новой физики вне СМ путем прецизионного измерения параметров СМ и параметров низкоэнергетических моделей сильных взаимодействий, и исследование параметров СР-нарушения в слабом секторе СМ.

Методология исследований в рассматриваемой диссертации концептуально базируется на использовании специально сформированных уникальных пучков нейтральных и заряженных каонов на ускорителях ИФВЭ в Протвино и ЦЕР-На в Женеве.

Это и определило **методику исследований**: разработка и создание экспериментальной исследовательской аппаратуры нового поколения, соответствующей как уникальности пучка, так и целям исследований, направленных на достижение предельных точностей, и параллельная разработка высокоспециали-

зированной программного обеспечения для анализа экспериментальных данных. Решающую роль для получения представленных в диссертации результатов имели разработанные автором оригинальные методики идентификации частиц и учёта радиационных поправок.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, перечня цитируемой литературы, содержащего 119 ссылок, списка рисунков и списка сокращений. В диссертации содержится 41 рисунок и 4 таблицы. Общий объем диссертации составляет 119 страниц.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, формулировку цели и направлений работы, обсуждение новизны работы, методологии и методики исследований, основных положений, выносимых на защиту, и апробацию работы.

В **первой главе** дано краткое введение в Стандартную модель сильных и электрослабых взаимодействий. Рассмотрены основные аспекты теории электрослабых взаимодействий Глэшоу-Вайнберга-Салама и квантовой хромодинамики — теории сильных взаимодействий. Особое внимание уделено механизму смешивания кварков. Показано, что для определения параметров матрицы СКМ необходимо исследовать слабые адронные полулептонные распады, связанные с соответствующими переходами легких кварков.

Вторая глава посвящена мотивации, представленных в диссертации исследований. В этой главе рассмотрены особенности физики слабых распадов каонов, делающих ее важнейшим инструментом прецизионной проверки СМ. Рассмотрен формализм СМ для полулептонных распадов K_{l3} и K_{l4} , радиационных распадов $K_{e3\gamma}$, редких распадов $K \rightarrow \pi^0 l^+ l^-$. Даны определения матричных элементов распадов, их ширин и относительных вероятностей, Мезонные формфакторы представлены в различных моделях низкоэнергетической КХД.

В **третьей главе** дано описание экспериментальных установок, с помощью которых получены результаты диссертации, и обсуждена процедура анализа данных. Представленные исследования проводились с использованием двух экспериментальных комплексов — HYPERON, расположенный на Серпуховском ускорителе У-70 в ИФВЭ и NA48 на ускорителе SPS в ЦЕРНе. В этой главе дано краткое описание этих комплексов установок и представлены основные элементы реконструкции событий и анализа экспериментальных данных.

Четвертая глава диссертации содержит результаты исследования полулептонных K_{l3} распадов по измерению формфакторов, входящих в матричные элементы процессов распадов. Отмечено, что полученные в эксперименте HYPERON ненулевые значения скалярного и тензорного формфакторов, которые могли бы свидетельствовать о вкладе новой физики за пределами СМ, не были

подтверждены проведенными спустя десятилетие измерениями в экспериментах ISTRA+ и КЕК E296. С другой стороны, эти результаты, полученные на 15 лет ранее эксперимента NA48, сыграли решающую роль для мотивации проведения программы прецизионных измерений матричных элементов K_{13} распадов, успешно реализованной коллаборацией NA48.

Пятая глава посвящена измерениям относительных вероятностей K_{13} распадов и проблеме унитарности матрицы СКМ. Как известно, в СМ условие унитарности матрицы СКМ приводит к соотношению для членов первой строки: сумма квадратов их модулей должна быть равна 1. В 2004 г значение $|V_{us}|$ в Particle Data Group отличалось на 22 стандартных отклонений от значения, нужного для выполнения данного условия унитарности. Для выяснения проблемы унитарности матрицы СКМ нужны были измерения $|V_{us}|$ с точностью лучше 1%. Значение для матричного элемента $|V_{us}|$, полученное в NA48 путем измерения относительных вероятностей K_{13} распадов находится в полном согласии с СМ и, таким образом, проблема унитарности матрицы СКМ на существующем уровне точности была решена.

Также в данной главе представлено измерение с высокой точностью отношение ширины распадов $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ и $K_L \rightarrow \pi^\pm e^\pm \nu$, определены относительная вероятность CP-нарушающего распада $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ и значение CP-нарушающего параметра $|\eta_{+-}|$.

В **шестой главе** представлены результаты по прецизионному измерению формфакторов и относительных вероятностей распадов K_{14} . Полученные точности в измерениях NA48 для формфакторов и относительных вероятностей K_{14} распадов в большинстве случаев превосходили точности в предыдущих экспериментах. Для формфакторов это позволило достичь уровня теоретической точности, достигнутой в решеточных вычислениях КХД и уточнить параметры различных моделей низкоэнергетической КХД.

Седьмая глава посвящена поискам редких распадов $K_S \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ и $K_S \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$, впервые наблюдавшихся в эксперименте NA48. Приведены результаты относительных вероятностей и параметров матричных элементов $K \rightarrow \pi^0 1^+ 1^-$ распадов. Получена верхняя оценка зарядовой асимметрии CP-нарушения.

В **заключении** сформулированы основные результаты, представленные в диссертации. Затем отмечается личный вклад автора в полученные результаты.

Основные результаты диссертации выносимые на защиту:

1. Разработан новый метод идентификации частиц в эксперименте NA48/2 с использованием нейронных сетей, который позволил уменьшить в 38 раз вероятность ошибочного распознавания пионов как электронов, сохраняя

при этом эффективность идентификации электронов выше 95%. Показано, что таким способом можно успешно выделить K_{e4} распады из фоновых событий без применения дополнительного детектора переходного излучения.

2. Получены с прецизионной точностью значения параметров формфакторов распада K_{l3} . Получены наиболее жесткие ограничения на значения скалярного и тензорного формфакторов, которые могли бы свидетельствовать об отклонении V-A структуры слабых взаимодействий СМ.

3. Измерены с прецизионной точностью значения относительных вероятностей K_{l3} распадов:

$$\text{Br}(K_L \rightarrow \pi e \nu), \text{Br}(K^\pm \rightarrow \pi e^\pm \nu) \text{ и } \text{Br}(K^\pm \rightarrow \pi \mu^\pm \nu)$$

которые поправили опубликованные ранее значения Particle Data Group в 2004 г. на уровне до 3σ .

4. Используя результаты прецизионных измерений относительных вероятностей K_{l3} распадов, определены значения элемента V_{us} матрицы Кабиббо-Кобаяши- Маскавы (СКМ).

Показано, что условие унитарности для элементов первой строки матрицы СКМ выполняется в пределах точности измерений, и отклонения от предсказаний СМ не обнаружены, что таким образом сняло с повестки дня давно стоявшую проблему СМ.

5. Измерена с высокой точностью относительная вероятность радиационного распада $K_{e3\gamma}$: $\text{Br}(K_{e3\gamma})/\text{Br}(K_{e3})$.

6. Измерено с высокой точностью отношение ширин распадов $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $K_L \rightarrow \pi^\pm e^\pm \nu$, определены относительная вероятность СР-нарушающего распада $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)$ и значение СР-нарушающего параметра $|\eta_{+-}|$.

7. Измерено отношение ширин распадов $K_S \rightarrow \pi e \nu$ и $K_L \rightarrow \pi e \nu$. Результат с высокой точностью сравним с единицей в согласии с предсказаниями СМ. Получаемое при этом значение относительной вероятности распада $\text{Br}(K_S \rightarrow \pi e \nu)$ является самым точным измерением этой величины.

8. Измерена относительная вероятность распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^\pm \nu_e$ и значения параметров формфакторов соответствующего матричного элемента. Определено значение параметра L_3 кирального лагранжиана, с точностью, превышающей точности теоретических оценок, полученных на основе данных предыдущих измерений.

9. Исследованы с высокой точностью формфакторы адронного матричного элемента распада $K^\pm \rightarrow \pi^+\pi^- e^\pm \nu_e$ в десяти независимых интервалах по инвариантной массе двух пионов $\pi^+\pi^-$. Измерена также относительная вероятность этого распада. Точность измерения всех параметров повышена в

несколько раз (от 2 до 5). Впервые достигнута точность измерений, сопоставимая с точностью теоретических предсказаний.

10. Впервые наблюдался редкий распад $K_S \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$. Зарегистрированы 7 событий при ожидаемом фоне 0.15 событий. Получена относительная вероятность этого распада $\text{Br}(K_S \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)$.
11. Впервые наблюдался редкий распад $K_S \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$. Зарегистрированы 6 событий при ожидаемом фоне 0.22 событий. Получена относительная вероятность этого распада $\text{Br}(K_S \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-)$.
12. На рекордной статистике измерена в полном кинематическом диапазоне относительная вероятность радиационного распада $K_S \rightarrow \pi^0 e^+ e^- (\gamma)$. Используя для параметризации формфактора матричного элемента данного распада предсказания нескольких теоретических моделей, были получены наиболее точные значения соответствующих параметров теории. Впервые исследована возможная CP-нарушающая разница ширин K^+ и K^- распадов и поставлена соответствующая верхняя граница на 90% уровне достоверности.

Личный вклад автора диссертации в работах, составляющих ее основу, является определяющим. Основу данной диссертации составляют результаты завершеного цикла исследований автора, который занял период около последних трех десятилетий. Автор внес существенный вклад в создание установок, организацию и проведение экспериментов HYPERON и NA48.

Эксперимент HYPERON: разработка физической программы исследования каонных распадов, разработка конфигурации оборудования, схемы триггера для набора данных и создание аппаратуры для реализации программы исследования каонных распадов; существенное участие в создании и эксплуатации электромагнитного калориметра SHD-1; разработка алгоритма реконструкции многотрековых событий и программного обеспечения для моделирования отклика установки; ведущая роль в организации сеансов набора данных и создании программного обеспечения для анализа данных и получения физических результатов по исследованию каонных распадов.

Цикл экспериментов NA48, NA48/1, NA48/2: разработка нового метода идентификации частиц в эксперименте NA48/2 с использованием нейронных сетей; разработка алгоритмов для анализа данных и моделирования отклика установки; разработка методики учета радиационных поправок в полулептонных распадах; участие во всех сеансах набора данных по изучению распадов заряженных каонов; создание программ и ответственность за экспресс-анализ данных во время их набора.

Физические результаты экспериментов HYPERON и NA48, представленные в диссертации, получены с определяющим участием автора.

Диссертация Литова Леандра Борисова является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Содержащиеся в ней многие **новые результаты** получены впервые и имеют важнейшую **научную и практическую ценность** для фундаментальных представлений современного естествознания.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждена независимыми экспериментальными измерениями, компьютерным моделированием и согласием с теоретическими ожиданиями и вычислениями. Результаты, на которых основана диссертация, получили заслуженное мировое признание: семнадцать результатов включены в таблицы Particle Data Group. Достигнутая точность представленных в диссертации измерений для широкого спектра наблюдаемых величин практически исчерпала на ближайшее время необходимость в дальнейшем экспериментальном исследовании ряда ключевых проблем физики слабых взаимодействий в распадах каонов.

Результаты диссертации могут быть использованы во всех зарубежных мировых центрах физики элементарных частиц (ЦЕРН, ФЕРМИЛАБ, КЕК, ДЭЗИ и др.), а также в России в ОИЯИ, НИЦ КИ, ПИЯФ НИЦ КИ, ИФВЭ НИЦ КИ, ИТЭФ НИЦ КИ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИЯФ СО РАН, НИИЯФ МГУ, СПбГУ, СПбПУ и др.

Результаты, полученные в диссертации с достаточной полнотой опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах, и неоднократно **апробировались** на международных научных конференциях, совещаниях и семинарах. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации.

Диссертация написана довольно хорошим языком, в кратком, но ясном стиле. Небольшим недостатком диссертации можно считать немного фрагментарное изложение, употребление сленга и некритичное использование переведенных терминов (“софтуера” вместо “программного обеспечения” на стр. 11 и т. п.). Несмотря на довольно тщательное оформление, все же имеются опечатки (“ИФВЕ” вместо “ИФВЭ” на стр. 11, “расположений” вместо “расположенный” на стр. 35, “той же фигуре” вместо “том же рисунке” на стр. 86, “умноженной” вместо “умноженный” на стр. 117, “каонный” вместо “каонный” на стр. 117, “Collaider” вместо “Collider” стр. 119 и т. д.). Но эти отмеченные недостатки ни в какой мере не меняют общей высокой положительной оценки диссертации.

Диссертационная работа Литова Леандра Борисова «Исследование полупетонных распадов каонов», выполненная на высоком уровне, соответствует специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц» и отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Литов Леандр Борисов несомненно заслуживает присуждения

ему ученой степени доктора физико-математических наук.

21 ноября 2016 г.

Ким Виктор Тимофеевич
доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

Высшая школа прикладной физики и космических технологий
Институт физики нанотехнологий и телекоммуникаций ФГАОУВО
«Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого»



Подпись Ким В. Т.

УДОСТОВЕРЯЮ

Ведущий специалист

по кадрам

21 ноября 2016 г.



Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого»

Ведущий научный сотрудник

Научно-исследовательская лаборатория «Физика элементарных частиц и нейтронные исследования»

Высшая школа прикладной физики и космических технологий

Института физики нанотехнологий и телекоммуникаций

Тел. (812) 552 75 31

e-mail: victor.t.kim@gmail.com