

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su
ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136
ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 10.11.2021 № 15311 – 39/9317-2294

на № _____ от _____

Утверждаю:

Директор ФГБУН Институт
ядерной физики им.

Г.И. Будкера СО РАН

Академик РАН

Доктор физ.-мат. наук

Логачев Павел Владимирович



« 8 » ноября 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Попова Виталия Евгеньевича «Новые методы измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Актуальность темы исследования.

Диссертация Виталия Евгеньевича Попова посвящена разработке универсального метода измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны. Метод применим для измерения слабых фаз в распадах нейтральных и заряженных очарованных адронов и B -мезонов. Эти измерения важны для объяснения большого эффекта CP -нарушения в распадах D -мезонов, обнаруженного в эксперименте LHCb. С одной стороны, можно предположить, что результат LHCb указывает на проявление физических явлений, которые не учтены в Стандартной модели (Новая физика). Но

возможно, что более точное вычисление адронной части матричного элемента позволило бы объяснить наблюдаемое явление в рамках Стандартной модели. Такой расчёт в рамках КХД в настоящее время не представляется возможным. Для оценки этого вклада необходимо использовать экспериментальные данные об амплитудах и фазах двухчастичных распадов. Представленная в диссертации методика позволяет измерить эти фазы и оценить вклад сильного взаимодействия в этих распадах, таким образом разрешая вопрос о источниках наблюдаемого большого CP -нарушения в D -мезонах. Актуальность темы сомнений не вызывает.

Оценка структуры и содержания работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **введении** обоснована актуальность работы, приведены цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** изложено основное феноменологическое описание распадов нейтральных каонов. Приведён формализм, используемый для описания смешивания и осцилляций нейтральных мезонов, уравнения эволюции для нейтральных каонов, формализм нарушения CP -инвариантности в смешивании нейтральных каонов.

Вторая глава посвящена обзору современного состояния физики очарованных адронов. Представлено феноменологическое описание ряда распадов очарованных адронов с точки зрения симметрии ароматов и обзор измерения разности сильных фаз в распаде $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ (\pi^- \pi^+)$. Получены численные предсказания для разности сильных фаз в распадах $D^0 \rightarrow K^0 \pi^0$, $D^+ \rightarrow K^0 \pi^+$ и $D_s^+ \rightarrow K^0 K^+$ очарованных адронов в нейтральные каоны для модели, объясняющей CP -нарушение в распадах D^0 -мезонов вкладом взаимодействия в конечном состоянии.

В **третьей главе** изложены методы измерения разности сильных фаз в распадах очарованных адронов. Первый метод определения разности фаз между комплексными амплитудами рождения K^0 и анти- K^0 в распадах

очарованных адронов основан на использовании полулептонных распадов K^0 мезонов. Выбор этого конечного состояния для восстановления K^0 фиксирует его странность в момент распада. Эволюция рожденной смеси в собственное состояние аромата рассмотрена на примере распада $D^+ \rightarrow K^0 \pi^+$ (анти- $K^0 \pi^+$). Полученные уравнения справедливы для распадов $D_s^+ \rightarrow K^0 K^+$ (анти- $K^0 K^+$), $\Lambda_c \rightarrow K^0 p$ (анти- $K^0 p$). Записаны амплитуды эволюции в собственные состояния аромата нейтрального каона из распада $D^+ \rightarrow K^0 \pi^+$ и соответствующие этим амплитудам зависящие от времени вероятности распада каона. Сильная фаза может быть определена из анализа зависящих от времени вероятностей распада. Описан разработанный автором метод восстановления полулептонных распадов нейтральных каонов с потерянными нейтрино. С помощью моделирования методом Монте-Карло оценена эффективность метода, составившая около 70%. Также из анализа событий моделирования были выбраны критерии для подавления фона.

Второй метод основан на анализе зависящей от времени вероятности распада $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Были получены выражения для вероятности распада. Рассмотрены условия применимости методов в экспериментах. Показано, что они могут быть использованы в экспериментах Belle II и на будущей Супер c–t фабрике. Для этих экспериментов выполнена оценка потенциальной точности методов с помощью моделирования методом Монте-Карло. Оценена систематическая погрешность измерения сильных фаз за счёт регенерации нейтральных каонов на веществе детектора. Оценена неопределённость, связанная со смешиванием в системе D^0 -анти- D^0 .

В **четвертой главе** описаны детекторы Belle и Belle II. Особое внимание уделено детектору мюонов и долгоживущих нейтральных каонов (мюонная система) Belle II. Система изготовлена на основе сцинтилляционных стрипов. В качестве фотоприёмников используются кремниевые фотоумножители. Описана процедура калибровки подстроечного напряжения смещения на кремниевых фотоумножителях, которая обеспечила высокую эффективность

работы системы. Калибровка проводится регулярно и позволяет поддерживать эффективность регистрации срабатывания от мюона в каждом слое на уровне 95...98%. Проведено изучение фона от ускорителя в мюонной системе. Для этого были записаны и проанализированы специальные заходы с различными режимами работы колец коллайдера. Для снижения уровня фона по результатам анализа было оптимизировано временное окно записи данных. Также на основании результатов моделирования было принято решение об установке дополнительной защиты.

Пятая глава посвящена анализу рождения нейтральных каонов в распадах $D_s^+ \rightarrow K_S K^+$, $D^+ \rightarrow K_S \pi^+$, $D^{*+} \rightarrow (K_S \pi^0)_{\text{D}} \pi^+$ и соответствующих зарядово-сопряжённых модах на данных эксперимента Belle с интегральной светимостью 951 фб^{-1} . Описаны условия отборов и процедура их оптимизации. Для разделения событий сигнала и фона создан параметр, основанный на машинном обучении. На событиях моделирования изучены фоновые процессы и показано, что вклад фона в сигнальной области может быть хорошо описан с помощью данных из контрольных областей, соседних с сигнальной. Проведён анализ зависимости вероятности распадов K_S мезонов от времени. Определены разности сильных фаз и отношения дважды Кабиббо-подавленной к Кабиббо-разрешённой амплитуд распада. Впервые наблюдалось нарушение CP-инвариантности в распадах нейтральных каонов, рождённых в распадах очарованных адронов. Измерен эффект CP-нарушения для трёх типов мезонов на уровне значимости, превышающем 5 стандартных отклонений.

В **заключении** перечислены основные результаты, полученные в работе.

Содержание и структура диссертации соответствуют цели исследования. Теоретические и методологические положения работы, результаты, выводы и предложения являются новыми. Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 01.04.23 – физика высоких энергий, и теме диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Все результаты представленного исследования получены лично Виталием Евгеньевичем Поповым. Методы измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны обоснованы теоретически, исследованы на моделировании, проверены с использованием экспериментальных данных детектора Belle, выполнены оценки систематических ошибок. Таким образом, результаты исследования являются достоверными. Результаты работы докладывались на конференциях, опубликованы в международных научных журналах, обсуждались на рабочих совещаниях по экспериментам Belle и Belle II, семинарах ФИАН, МФТИ, НИУ ВШЭ, ИЯФ СО РАН.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации обусловлена тем, что предложенные в работе новые методы можно использовать как для измерения фундаментальных параметров CP-нарушения и для поиска Новой физики, так и для проверки моделей сильного взаимодействия. Методы являются универсальными, их можно применить в современных и будущих экспериментах в области физики высоких энергий, в частности в экспериментах Belle II на коллайдере Super KEKB и на будущей Супер с-т фабрике. Отметим, что разработанный в работе метод калибровки кремниевых фотоумножителей системы регистрации мюонов и долгоживущих нейтральных каонов эксперимента Belle II, его автоматизация, классификация и оценка фонов в мюонной системе от ускорителя SuperKEKB являются важным вкладом в успешную работу эксперимента Belle II.

Новизна полученных результатов. Впервые разработаны универсальные методы измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны. Предложенные и разработанные в работе методы позволяют измерять разность сильных фаз для распадов заряженных мезонов и барионов. Впервые предложен метод использования полулептонных распадов нейтральных каонов для измерения параметров очарованных адронов. Разработан эффективный алгоритм восстановления импульса каонов и

оптимального подавления фона. Предложен новый метод измерения параметров начального состояния системы каонов с помощью распада в $\pi^+\pi^-$ и эффекта нарушения CP-инвариантности в нём. Метод впервые применён на данных эксперимента Belle. Впервые наблюдался эффект CP-нарушения в системе нейтральных K-мезонов, рождённых в распадах очарованных адронов, продемонстрирована пригодность метода для решения поставленных задач и возможность достижения точности измерения, соответствующей полученным оценкам для эксперимента Belle II.

В качестве замечаний можно отметить следующее.

В работе обсуждаются роль взаимодействия в конечном состоянии в распадах очарованных адронов, но не приводятся диаграммы этого процесса. На наш взгляд, включение этих диаграмм упростило бы восприятие и оживило бы текст. В разделе, посвящённом мюонной системе Belle II, нет графиков зависимости эффективности системы от времени и токов коллайдера во время набора данных. Такая иллюстрация представила бы опыт работы системы и применения процедуры калибровки кремниевых фотоумножителей в эксперименте. В работе также имеются мелкие неточности и неточная терминология. Так нумерация глав в диссертации сдвинута на 1, часто используется термин «образец данных», хотя по-русски более правильно было бы использовать «массив данных», не совсем понятно выражение на стр. 53 «Подсистемы детектора (рисунок 5.1) расположены сферически симметрично вокруг точки взаимодействия...».

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное исследование. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений.

Диссертация Попова Виталия Евгеньевича на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые методы измерения комплексных фаз в

распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны. Она имеет существенное значение для развития современной физики высоких энергий, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Отзыв рассмотрен и утверждён на заседании Ученого Совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук 8 ноября 2021 года, протокол № 43.

Отзыв составил:

Ачасов Михаил Николаевич

доктор физико-математических наук

шифр и наименование научной специальности: 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц,

Профессор РАН,

старший научный сотрудник лаборатории 3-1

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11

электронная почта: achasov@inp.nsk.su

21 октября 2021 года.

Ачасов М.Н.

Подпись М.Н. Ачасова заверяю

Учёный секретарь ФГБУН

ИЯФ СО РАН им. Г.И.Будкера

кандидат физико-математических наук

электронная почта:



А.В. Резниченко