

ОТЗЫВ

**официального оппонента Ю.Г.Куденко на диссертацию
Попова Виталия Евгеньевича
«Новые методы измерения комплексных фаз в распадах тяжелых
адронов в нейтральные каоны »,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий**

Диссертационная работа В.Е.Попова посвящена разработке универсального метода измерения комплексных фаз в распадах тяжелых адронов в нейтральные каоны и его расширению для измерения слабых фаз в распадах В-мезонов. Разработанный метод может быть использован в анализе распадов как нейтральных, так и заряженных очарованных адронов.

Актуальность и научная новизна проведенных В.Е.Поповым в этой работе исследований не вызывают сомнения. Измерение комплексных фаз в распадах тяжелых адронов связаны с очень интересным результатом, полученным в распадах D-мезонов – большой величиной прямого CP нарушения, которое на порядок превосходит предсказание Стандартной Модели, что может расцениваться как проявление Новой физики за рамками Стандартной Модели (СМ). Однозначное утверждение о том, действительно ли обнаруженное прямое CP нарушение не может быть описано в рамках СМ, или может быть описано, например за счет взаимодействий в конечном состоянии, требует знания амплитуд и комплексных фаз.

Диссертация В.Е.Попова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы(106 ссылок). Во **Введении** диссертации кратко обоснована актуальность, сформулированы цели работы, обоснована актуальность, показана новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора.

В **первой главе** диссертации представлена феноменология распадов нейтральных каонов, изложен формализм, описывающий осцилляции нейтральных каонов. Рассмотрено CP нарушение в системе нейтральных каонов, СКМ матрица, обсуждается статус комплексной фазы в СКМ матрице.

Вторая глава диссертации посвящена обзору современного состояния физики очарованных адронов. Вследствие сильного подавления электрослабых диаграмм типа «пингвин» за счет GIM механизма и малости CP нарушения из-за малости вклада кварков третьего поколения. Обнаруженный большой эффект CP нарушения в распадах D-мезонов с одной стороны может трактоваться как проявление Новой физики, но с другой стороны, это эффект может быть вызван вкладом сильных взаимодействий на больших расстояниях за счет взаимодействий в конечном состоянии и перераспределения, которые не поддаются точной оценке. Представлен обзор измерения разности сильных фаз в распаде $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, получены численные предсказания для разности сильных

фаз в распадах очарованных адронов в нейтральные каоны для модели, которая объясняет CP нарушение в распадах D^0 взаимодействиями в конечном состоянии. Были рассмотрены и проанализированы правила сумм для конечных состояний, получены предсказания для разности сильных фаз в распадах D^0 и D^+ на каон и пион. Рассмотрен метод, основанный на исследовании диаграммы Далитца трехчастичного распада D^0 , позволяющий определить разность сильных фаз δ с точностью лучше 10 градусов. Тем не менее, автором подчеркнуто, что требуется измерение фаз в распадах всех очарованных мезонов, включая заряженные и странные. Этот подход составляет основное содержание диссертации.

В третьей главе рассмотрены новые методы измерения разности сильных фаз в распадах тяжелых мезонов. Показано, что интерференция амплитуд распада начальной суперпозиции в системе K^0 -анти- K^0 дает хорошую возможность определить фазу между комплексными амплитудами различных состояний аромата каонов. Наибольший эффект от разности сильных фаз проявляется в интервале от 0.5 до 5 времен жизни короткоживущего каона. Из этого следует, что необходимо измерять с высокой точностью время жизни каонов. Для этого предложен и рассмотрен метод, позволяющий получить хорошее импульсное и пространственное разрешение. Отмечено, что таким требованиям могут удовлетворить эксперименты Belle-II и будущая Супер c- τ фабрика. Отмечено, что такие измерения невозможно выполнить в экспериментах LHCb и CMS. Проведена оценка достижимой точности в измерении разности сильных фаз с использованием нелептонных и полуплептонных распадов, которая составила от 3 до 10 градусов для различных мод. Также были рассмотрены эффекты взаимодействия нейтральных каонов с веществом детектора и сделаны оценки погрешностей. Сделана оценка неопределенностей в измерение разности сильных фаз из-за смешивания D^0 -анти- D^0 .

Четвертая глава посвящена описанию установок Belle и Belle-II. Кратко описаны параметры ускоритель КЕКВ, состоящего из двух накопительных колец с энергиями электронов 8 ГэВ и позитронов 3.5 ГэВ. Детектор Belle регистрирует частицы от столкновений электронов и позитронов в телесном угле $0.92 \times 4\pi$ в системе центра масс e^-e^+ пучков. Основными элементами детектора являются следующие: вершинный детектор, дрейфовая камера, черенковский детектор, время-пролетная система, электромагнитный калориметр, мюонная система и детектор долгоживущих нейтральных каонов. Также изложен метод идентификации треков заряженных в детекторе и триггерная система эксперимента.

Пятая глава диссертации посвящена анализу данных эксперимента Belle. Были проанализированы распады положительных D-мезонов, накопленных для интегральной светимости 951 fb^{-1} . Описаны критерии предварительного отбора событий, поясняются методы отбора короткоживущих каонов, нейтральных пионов, очарованных адронов. Дальнейшая оптимизация критериев отбора проводилась с помощью Монте Карло моделирования, а затем дальнейший отбор сигнальных событий проводился с помощью машинного обучения, где использовался алгоритм BDT. Фоновые процессы изучались с помощью моделирования. Рассмотрены главные источники фона и определены их вклады в сигнальные области. Значительное место уделено сигнальным распределениям, приведены полученные спектры инвариантных

масс $K_S^0 K^+$ и $K_S^0 K^-$, а также распределения по инвариантной массе комбинаций $D^0 \pi_S^\pm$ и приведены численные значения с погрешностями полученных событий. Получены отношения дважды Каббибо-подавленных распадов к Каббибо-разрешенным распадам и значения разностей сильных фаз. Впервые было наблюено CP нарушение в распадах нейтральных каонов, которые получены из распадов очарованных адронов. Эффект был измерен для трех типов очарованных адронов на уровне значимости более 5σ .

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы, которые выносятся на защиту.

Следует особо подчеркнуть наиболее интересные результаты, полученные в диссертации. Автором был разработан новый метод измерения разности сильных фаз в распадах очарованных адронов с использованием полулептонных распадов каонов и разработан метод анализа, позволяющий идентифицировать эти распады и эффективно подавлять фоны. Автором были сделаны теоретические предсказания величин разностей сильных фаз в распадах D-мезонов с точностью 4-6 градусов. Им была сделана оценка чувствительности к разности сильных фаз в экспериментах Belle-II и Супер c- τ фабрике. Показано, что они могут быть измерены с точностью 4-7 градусов, сопоставимой с точность теоретических расчетов на основании SU(3) симметрии ароматов. Также очень интересным является оценка систематических погрешностей и показано, что они не превышают уровня статистических ошибок.

К замечаниям работы можно отнести следующие. 1.Представляется, что было бы важно в начале диссертации (Введение или Глава 1) показать, какая Новая физика (например, Z' , 2HDM, MSSM и др.) может проявляться в обнаруженном большом CP нарушении в распадах D мезонов, допуская, что SM не объясняет этот эффект. 2.Стр.80, таблица 6.2. В третьей колонке приведено количество сигнальных событий с ошибками. Неясно, что представляют эти ошибки (сумма статистической и систематической?) и как они получены. Учитывая чистоту сигнала от 78% до 90%, трудно объяснить полученные ошибки. 3.Стр. 84-85, рис.6.15-6.17. На этих рисунках приведены 1σ , 3σ , 5σ контуры, показывающие CP нарушение, а также центральные величины параметров ϕ^{+-} и η^{+-} . Однако из-за близкого цвета точек мировых значений и значений Belle трудно понять какие токи им соответствуют. Было бы лучше использовать, например, точки и крестики. 4.На рис. 6.12-6.14 показана асимметрии распадов $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, измеренные для различных распадных мод D-мезонов. Поскольку каждый рисунок содержит две кривых асимметрии, то следовало бы обозначить какой моде соответствует каждая кривая. 5.Также в диссертации имеется ряд неточностей и опечаток. Так на стр.35 дана ссылка на вероятности распада (4.12) и (4.13) без учета вещества. Вероятно автор имел в виду выражения (4.11) и (4.12), т.к. (4.13) описывает модификацию гамильтониана. После Введения смещена нумерация глав, вместо Глава 1 написано Глава 2; на стр.10 “ормализм” вместо формализм.

Однако перечисленные выше недостатки не могут изменить общего положительного впечатления от работы и существенным образом повлиять на итоговую оценку диссертации, которая представляет собой логически законченное исследование с интересными результатами. Качество работы, уровень и объем исследований, выполненный В.Е.Поповым, оставляют в целом хорошее впечатление. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Результаты,

представленные в диссертации, важны для исследований по распадам очарованных адронов, и могут быть использованы при проведении экспериментов в различных лабораториях, занимающихся этой тематикой, например, на установке Belle-II, в эксперименте LHCb, на Супер c-т фабрике. Работа оформлена довольно аккуратно, хорошо проиллюстрирована, основные положения и полученные результаты ясно изложены, выводы четко сформулированы. Основные результаты и положения, вошедшие в диссертацию, доложены автором на международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах. Библиография полно представляет исследования в этой области. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что диссертация В.Е.Попова «Новые методы измерения комплексных фаз в распадах тяжелых адронов в нейтральные каоны» полностью удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Куденко Юрий Григорьевич
доктор физ.-мат. наук, профессор
Главный научный сотрудник,
Заведующий отделом физики высоких энергий
Институт ядерных исследований РАН,
Адрес: 117312 Москва, пр-кт 60-летия Октября, 7А
Тел: +7(495)8504248
Эл. почта: kudenko@inr.ru


18.11.2021

Ю.Г. Куденко

Подпись Ю.Г. Куденко заверяю
Зам. директора по научной работе ИЯИ РАН,
Доктор физ.-мат. наук



А.В. Фещенко