

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **ВОРОБЬЕВА Виталия Сергеевича «Модельно-независимое получение CP-нарушающих параметров с использованием когерентных состояний нейтральных D-мезонов»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Рецензируемая диссертационная работа Воробьева Виталия Сергеевича включает выполненные им исследования по измерению параметров нарушения CP-инвариантности в распадах B -мезонов в эксперименте Belle на B -фабрике КЕКВ.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 5 приложений. Во введении описывается постановка задачи. Все обнаруженные до настоящего времени CP-нарушающие явления находятся в согласии с механизмом CP-нарушения Кобаяши-Маскава (KM). Анализ многочастичных распадов позволяет выполнить измерение параметров CP-нарушения и осцилляций нейтральных мезонов. Амплитуда распада может быть измерена с помощью построения феноменологической модели. Такой подход, однако, приводит к зависимости результата от модели. Альтернативный подход состоит в использовании экспериментальных измерений, например, измерения средних значений разности фаз амплитуд распадов промежуточных D^0 - и $\bar{D}^0$ -мезонов, которые образуются при распадах B -мезонов. В данной работе представлены разработка и практическое использование модельно-независимого подхода к измерению параметров смешивания мезонов и параметров нарушения CP-симметрии с использованием многочастичных распадов D - и B -мезонов.

В первой главе описаны феноменологические подходы и экспериментальный статус изучения нарушения CP-симметрии. Кобаяши и Маскава предложили механизм, который в случае трех поколений кварков приводит к нарушению CP-симметрии в слабых заряженных токах. Введена комплексная унитарная матрица смешивания кварков. Матрица задается тремя углами Эйлера и фазой δ , которая является единственным параметром CP-нарушения в Стандартной Модели. Взаимодействие

кварков отличается от взаимодействия антикварков, если матрица изменяется при комплексном сопряжении.

В распадах B -мезонов участвуют кварки трех поколений, что позволяет детально изучить параметры CP -нарушения и проверить согласие наблюдаемых параметров с ограничениями, которые заложены в механизме Кобаяши-Маскава. Проверка эта сводится к измерению величин элементов матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава и проверки условия унитарности. Это условие может быть графически представлено в виде треугольника на комплексной плоскости (Треугольник Унитарности). Углы α , β , γ в этом треугольнике соответствуют CP -нарушающим фазам и являются свободными параметрами Стандартной Модели. Описаны осцилляции B - и D -мезонов, CP -нарушение в распадах B -мезонов, методы измерения угла γ в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ и угла β с использованием осцилляций нейтральных B -мезонов.

Во второй главе описан модельно-независимый подход к анализу многочастичных распадов B -мезонов. Для модельно-независимого получения угла γ в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ с последующим распадом $\bar{D}^0 \rightarrow K^0_s \pi^+ \pi^-$ используется измерение среднего значения разности фаз амплитуд распадов D^0 и $\bar{D}^0 \rightarrow K^0_s \pi^+ \pi^-$ в нескольких областях на диаграмме Далица. Рассмотрено получение параметров смешивания в когерентных и некогерентных распадах D -мезонов, а также влияние смешивания D -мезонов и прямого CP -нарушения в распаде D^0 на измерение угла γ . Выработанный метод измерения амплитуд распадов D^0 - и $\bar{D}^0$ -мезонов используется затем в модельно-независимом измерении угла β в распаде $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0} h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^0_s \pi^+ \pi^-$ (h^0 означает π^0 , η , η' , ω).

В третьей главе описан эксперимент Belle на ускорителе KEKB. Пары B -мезонов образуются при энергии коллайдера в резонансе $\Upsilon(4S)$. Подробно описан детектор. Следует отметить малый фон от других процессов. Трековая система позволяет реконструировать распады с высокой точностью, необходимой для измерения времени жизни B -мезонов. Электромагнитный калориметр позволяет реконструировать фотоны, начиная с энергии 40 МэВ. Имеется система идентификации адронов по времени пролета и с помощью аэрогелевых черенковских детекторов, что позволяет определить аромат исследуемого B -мезона в момент рождения из анализа продуктов распада второго B -мезона в

событии. Детектор Belle набрал интеграл светимости 711 fb^{-1} , зарегистрировано 772 миллиона $B\bar{B}$ -пар.

В четвертой главе представлено модельно-независимое измерение угла β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0} H^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^0_s \pi^+ \pi^-$. Описаны реконструкция и отбор событий, определение аромата B -мезона, кинематическая реконструкция распадов, подавление фона от легких кварков. Существенным элементом модельно-независимого анализа является измерение амплитуды распада $D^0 \rightarrow K^0_s \pi^+ \pi^-$ с помощью детального измерения распределения событий на диаграмме Далица. Параметр β измеряется с помощью метода максимального правдоподобия, используя параметризацию временного разрешения для сигнала и фона. CP-нарушающие параметры $\sin(2\beta)$ и $\cos(2\beta)$ рассматриваются как независимые и неограниченные величины. Полученный коэффициент корреляции между $\sin(2\beta)$ и $\cos(2\beta)$ мал. Проведен детальный анализ систематических неопределенностей. В результате получено значение $\cos(2\beta) = 1.06 \pm 0.33 \text{ (стат.)}^{+0.21}_{-0.15} \text{ (сист.)}$. Данное измерение превосходит по точности результаты предыдущих измерений в других распадах B^0 . Величина $\sin(2\beta) = 0.691 \pm 0.017$ была измерена ранее. Представленное в данной работе измерение исключает отрицательное значение $\cos(2\beta)$ для этого значения $\sin(2\beta)$, соответствующее значению $\beta = 68.1^\circ$, на уровне 5.1 стандартных отклонений и находится в согласии с положительным значением. Таким образом, представленное измерение разрешает неопределенность значений угла β , присущую измерению параметра $\sin(2\beta)$.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях описаны дополнительные детали используемого формализма, процедура проведения численных экспериментов методом Монте-Карло, реконструкция вершин распадов и параметризация временного разрешения.

Научная ценность и достоверность данной работы не вызывает сомнений. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых журналах Phys.Rev.D и European Physics Journal C и Journal of Instrumentation (JINST) и представлены на конференциях.

Практическая ценность состоит в разработке модельно-независимого анализа многочастичных распадов B -мезонов, что позволяет избавиться от

плохо контролируемых эффектов, связанных с модельными предположениями. Предложенные автором методы использованы в экспериментах Belle II, LHCb и на Чарм-Тау-фабрике.

Замечание по диссертации:

- возможно, следовало бы привести сравнение полученного автором измерения параметра $\cos(2\beta)$ с результатами в других каналах распада B^0 (2016 Review of Particle Physics, Mesons, Bottom mesons, B^0 , p.206).

Замеченные опечатки:

- на стр.19, рисунок 1.5 (б) - обозначения $\bar{D}^0$ и K^- переставлены;
- на стр. 34, 7-я строка снизу – опечатка в $K^+\pi^+$.

Отмеченные недостатки не влияют на качество результатов, полученных в диссертации.

Данная работа представляет собой законченное исследование на актуальную тему – измерение параметров нарушения СР-инвариантности в распадах B -мезонов. Предложены методы модельно-независимого измерения параметров смешивания и СР-нарушения в смешивании нейтральных D -мезонов. Впервые выполнено модельно-независимое измерение фазы β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0} H^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^0_s \pi^+ \pi^-$ и получен результат $\beta = 11.7^\circ \pm 7.8^\circ \pm 2.1^\circ$. Представленное в данной работе измерение согласуется с измерениями $\sin(2\beta)$, выполненными с использованием других распадов и позволяет исключить решение с $\cos(2\beta) < 0$ на уровне достоверности, превышающем 5 стандартных отклонений.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Данная работа полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Воробьев Виталий Сергеевич, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Кандидат физ.-мат. наук

Подпись В.И. Николаенко

Заверяю

Ученый секретарь



В.И. Николаенко

Н.И. Прокопенко