

На правах рукописи

ВОРОБЬЕВ Виталий Сергеевич

**МОДЕЛЬНО-НЕЗАВИСИМОЕ
ПОЛУЧЕНИЕ СР-НАРУШАЮЩИХ
ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОГЕРЕНТНЫХ СОСТОЯНИЙ
НЕЙТРАЛЬНЫХ D-МЕЗОНОВ**

Специальность 01.04.16 —
«физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БОНДАРЬ — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор,
Александр Евгеньевич ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

НИКОЛАЕНКО — кандидат физико-математических наук,
Владимир Иванович Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации — Институт физики высоких энергий», г. Протвино, ведущий научный сотрудник

РОСТОВЦЕВ — доктор физико-математических наук,
Андрей Африканович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник

ВЕДУЩАЯ — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва
ОРГАНИЗАЦИЯ:

Защита состоится « 26 » декабря 2016 г. в « 15:45 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 на базе ФГБУН Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск 90, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р физ.-мат. наук

В.С. Фадин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Эксперименты Belle и BaBar, начавшие в 1999 году набирать данные на B -фабриках КЕКВ и РЕР-II, соответственно, существенно продвинули понимание физики тяжелых кварков. Ключевым результатом работы этих экспериментов стало наблюдение и детальное изучение нарушения CP -симметрии в распадах B -мезонов. Все обнаруженные CP -нарушающие явления находятся в согласии с механизмом CP -нарушения Кобаяши-Маскавы (КМ) для слабых заряженных токов.

В некоторых случаях использование многочастичных распадов является необходимым условием для измерения величины параметра (а не установления факта отличия его величины от нуля). Особенностью таких измерений является необходимость обладать информацией о не наблюдаемой непосредственно фазе амплитуды многочастичного распада. Амплитуда распада не может быть получена из первых принципов из-за непертурбативных эффектов квантовой хромодинамики. Эта проблема может быть решена с помощью построения феноменологической модели амплитуды распада и вычисления фазы с помощью этой модели. Такой подход, однако, неизбежно приводит к неустранимой и плохо контролируемой модельной неопределенности, которая может стать определяющей при выполнении прецизионных измерений в экспериментах LHCb и Belle II.

Альтернативный подход, в котором среднее значение разности фаз амплитуд распадов D^0 - и \bar{D}^0 -мезонов для определенной области фазового пространства извлекаются из эксперимента, не требует построения модели. Этот подход может применяться в экспериментах LHCb, Belle II, а также на Чарм-Тау-фабрике.

Целью данной работы является разработка и доказательство практической реализуемости модельно-независимого подхода к измерению параметров смешивания мезонов и параметров нарушения CP -симметрии с использованием многочастичных распадов D - и B -мезонов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние осцилляций и прямого нарушения CP -симметрии в распадах D -мезонов на измеряемую величину

\mathcal{CP} -нарушающего параметра γ модельно-независимо измеряемую в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$.

2. Разработать модельно-независимый метод получения параметров осцилляций и параметров нарушения \mathcal{CP} -симметрии в осцилляциях D -мезонов.
3. Разработать модельно-независимый метод получения параметра \mathcal{CP} -нарушения β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^0 h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, $h^0 \in \{\pi^0, \eta^{(\prime)}, \omega\}$.
4. Выполнить модельно-независимое измерение параметра β в вышеупомянутом распаде, используя разработанный метод.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Изучено влияние осцилляций нейтральных D -мезонов на наблюдаемую величину параметра γ в модельно-независимом измерении в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ и предложена процедура, при которой осцилляции D -мезонов смещают наблюдаемую величину не более, чем на 0.2° .
2. Показано, что в предположении сохранения \mathcal{CP} -симметрии в распадах $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ и при существующих экспериментальных ограничениях на величину этого нарушения, смещение наблюдаемой величины γ при модельно-независимом измерении в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, не превосходит 3° .
3. Показано, что модельно-независимое получение параметра γ в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ возможно без предположения сохранения \mathcal{CP} -симметрии в распадах $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$; при этом не наблюдается существенного снижения статистической чувствительности.
4. Предложен метод модельно-независимого измерения параметров смешивания и \mathcal{CP} -нарушения в смешивании нейтральных D -мезонов в процессе $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}^*$ без измерения времени распада D .
5. Предложен метод модельно-независимого получения параметров смешивания и \mathcal{CP} -нарушения в смешивании нейтральных D -мезонов в процессе $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$, $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ с измерением времени распада D .

6. Предложен метод модельно-независимого измерения \mathcal{CP} -нарушающей фазы β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$; данный метод позволяет разрешить неопределенность, присущую измерению 2β в переходах $b \rightarrow c\bar{c}s$.
7. Впервые выполнено модельно-независимое измерение фазы β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ и получен результат $\beta = 11.7^\circ \pm 7.8^\circ \pm 2.1^\circ$, позволяющий разрешить неопределенность значения 2β на уровне достоверности, превышающем 5 стандартных отклонений.
8. Подготовлен алгоритм для автоматического измерения характеристик модуля усилителя-формирователя калориметра Belle II, который был использован для проверки характеристик всех изготовленных модулей.

Научная новизна: впервые выполнено модельно-независимое измерение параметра β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$; впервые предложены свободные от модельной неопределенности методы измерения параметров смешивания D -мезонов и \mathcal{CP} -нарушающего параметра β с использованием многочастичных распадов нейтральных D -мезонов.

Практическая значимость: предложенный метод измерения параметра β , а также результаты исследования процедуры модельно-независимого измерения параметра γ используются и будут использоваться при выполнении прецизионных измерений в экспериментах BaBar, Belle, Belle II и ЛНСб. Предложенный метод измерения параметров осцилляций D -мезонов может быть использован при выполнении измерений в эксперименте BES-III и в будущих экспериментах на Чарм-Тау-фабрике.

Достоверность полученных результатов обеспечивается публикацией основных результатов в рецензируемых журналах с высокой цитируемостью. Результаты измерения параметра β находятся в согласии с предыдущим измерением в эксперименте Belle, а также с результатом измерения, выполненного группой BaBar.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН и КЕК (Цукуба, Япония). Результаты измерения параметра β были доложены на конференциях XIII Heavy

Quarks and Leptons conference (HQL 2016) и 38th International Conference On High Energy Physics (ICHEP 2016).

Личный вклад. Изложенные в работе результаты получены автором лично либо при его определяющем вкладе.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Объем диссертации составляет 172 страницы текста с 59 рисунками и 19 таблицами. Список литературы содержит 138 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена рассмотрению основных феноменологических подходов к изучению нарушения \mathcal{CP} -симметрии в ускорительных экспериментах и описанию экспериментального статуса изучения нарушения \mathcal{CP} -симметрии.

В рамках Стандартной Модели (СМ) нарушение \mathcal{CP} -симметрии (\mathcal{CP} -нарушение) описывается механизмом Кобаяши-Маскавы (КМ), согласно которому лагранжиан слабых заряженных токов описывает взаимодействие кварковых полей q_u и q'_b , где $q_u = \{u, c, t\}$ — вектор полей верхних кварков, а $q'_b = \{d', s', b'\}$ — вектор линейных комбинаций полей нижних кварков:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{\text{СКМ}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $V_{\text{СКМ}}$ — унитарная матрица смешивания кварков, называемая матрицей Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (ККМ). Матрица смешивания антикварков получается комплексным сопряжением матрицы $V_{\text{СКМ}}$. Взаимодействие квар-

ков отличается от взаимодействия антикварков, если $V_{\text{СКМ}}^* \neq V_{\text{СКМ}}$. Матрица $V_{\text{СКМ}}$ задается тремя углами Эйлера и фазой δ , которая является единственным параметром СМ, отвечающим за \mathcal{CP} -нарушение.

Экспериментальная проверка механизма КМ сводится к измерению величин элементов и проверке условия унитарности матрицы ККМ. Наиболее подходящим для экспериментальной проверки является соотношение

$$\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + 1 = 0, \quad (2)$$

которое можно представить в виде треугольника на комплексной плоскости (рисунок 1), называемого Треугольником Унитарности (ТУ). Величины углов ТУ выражаются через элементы матрицы ККМ следующим образом:

$$\alpha = \arg\left(-\frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*}\right), \quad \beta = \arg\left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right), \quad \gamma = \arg\left(-\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*}\right). \quad (3)$$

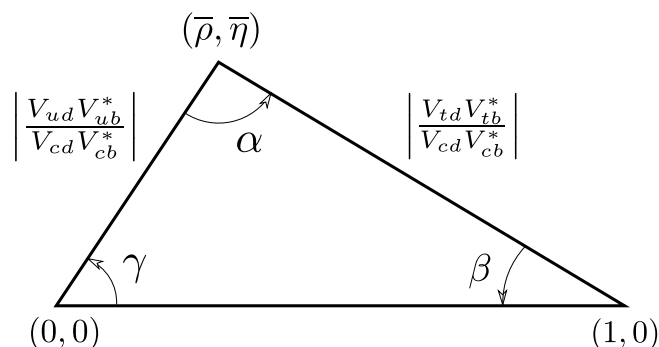


Рис. 1 — Геометрическое представление соотношения (2).

Величины всех углов и сторон ТУ можно определить из наблюдений. Получившаяся переопределенная система ограничений позволяет выполнить прецизионную проверку соотношений треугольника для ТУ. Анализ показывает, что при текущей точности измерения параметров ТУ, составляющей в среднем 5%-10%, значимых нарушений СМ не выявлено. Таким образом, необходимо дальнейшее повышение точности измерений.

Вторая глава посвящена описанию модельно-независимого подхода к анализу многочастичных распадов. В этой главе предложены программы исследований для симметричной Чарм-Тау-фабрики и асимметричной B -фабрики, а также для эксперимента ЛНСь, основанные на этом подходе.

Гири с соавторами предложили идею модельно-независимого получения угла γ ТУ в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$. Предложение состоит в использовании среднего значения разности фаз $\Delta\delta_D$ амплитуд распадов $\mathcal{A}_D \equiv \mathcal{A}(D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-)$ и $\overline{\mathcal{A}}_D \equiv \mathcal{A}(\overline{D}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-)$ для нескольких областей фазового пространства:

$$Z_i \equiv C_i + iS_i = \frac{\int_{\mathcal{D}_i} |\mathcal{A}_D| |\overline{\mathcal{A}}_D| e^{i\Delta\delta_D} dm_+^2 dm_-^2}{\int_{\mathcal{D}_i} |\mathcal{A}_D|^2 dm_+^2 dm_-^2 \int_{\mathcal{D}_i} |\overline{\mathcal{A}}_D|^2 dm_+^2 dm_-^2}, \quad (4)$$

где индекс i обозначает номер области фазового пространства, \mathcal{D} обозначает полное фазовое пространство, \mathcal{D}_i обозначает область фазового пространства, соответствующую номеру i и $m_\pm^2 \equiv m^2(K_S^0 \pi^\pm)$ обозначают квадраты масс пар частиц конечного состояния (переменные Далица). Параметры C_i и S_i близки по смыслу к среднему в i -й области значению $\cos \Delta\delta_D$ и $\sin \Delta\delta_D$, соответственно. Кроме того, вводят параметры K_i и \overline{K}_i , обозначающие вероятность попадания события в i -ю область при распаде D^0 - и \overline{D}^0 -мезона, соответственно. Для произвольного разбиения значения параметров K_i , \overline{K}_i , C_i и S_i могут быть получены в когерентных распадах $D^0 \overline{D}^0$ на симметричном коллайдере, работающем вблизи резонанса $\psi(3770)$.

Предполагая отсутствие \mathcal{CP} -нарушения в распадах D -мезонов, т.е. используя соотношение $\mathcal{A}_D(m_+^2, m_-^2) \equiv \overline{\mathcal{A}}_D(m_-^2, m_+^2)$, можно оптимизировать способ разбиения диаграммы Далица распада $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$: выбрать $2\mathcal{N}$ областей симметрично относительно перестановки $m_+^2 \leftrightarrow m_-^2$. Номера областей i при этом принимают значения от $-\mathcal{N}$ до \mathcal{N} , исключая 0, такие, что инверсия знаков номеров областей $i \rightarrow -i$ соответствует перестановке $m_+^2 \leftrightarrow m_-^2$. При таких договоренностях выполняются соотношения

$$Z_i \equiv Z_{-i}^* \quad (C_i \equiv C_{-i}, \quad S_i \equiv -S_{-i}), \quad \overline{K}_i \equiv K_{-i}. \quad (5)$$

Форму областей разумно выбрать так, чтобы получить максимальную статистическую чувствительность к измеряемым параметрам. Хорошее приближение к оптимальному способу разбиения дает критерий

$$\frac{2\pi(i - \frac{1}{2})}{\mathcal{N}} < \Delta\delta_D(m_+^2, m_-^2) < \frac{2\pi(i + \frac{1}{2})}{\mathcal{N}} \quad (\text{для } m_+^2 > m_-^2 \text{ и } i > 0). \quad (6)$$

Полученное таким способом разбиение называют *равномерным по фазе*. Критерий (6) может быть использован только на основе модельных соображений, поскольку функция $\Delta\delta_D(m_+^2, m_-^2)$ неизвестна. Такое использование модели, однако, не приводит к систематической ошибке измерения.

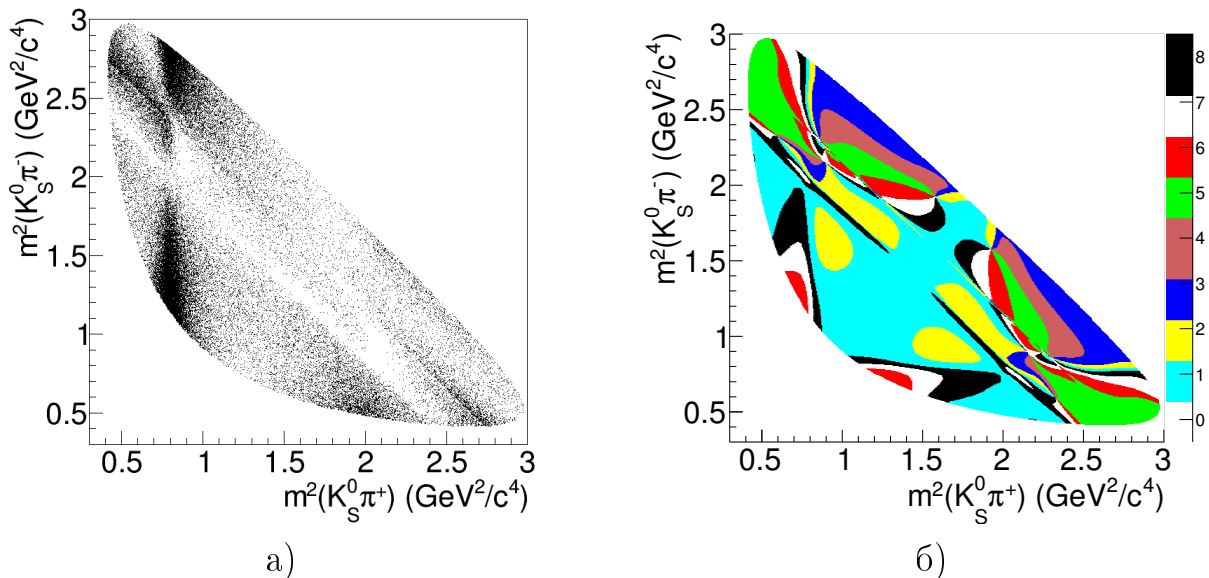


Рис. 2 — а) Диаграмма Далица для распада $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ и б) равномерное по фазе разбиение этой диаграммы, выполненное с помощью модели, полученной с данными детектора Belle.

На рисунке 2 показано распределение по переменным Далица (диаграмма Далица) для распада $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ и равномерное по фазе разбиение, выполненное на основе полученной в эксперименте Belle модели.

Получение параметров смешивания в когерентных распадах D -мезонов. Осцилляции D -мезонов описывают *параметры смешивания*

$$x_D \equiv \frac{\Delta m_D}{\Gamma_D}, \quad y_D \equiv \frac{\Delta \Gamma_D}{2\Gamma_D}, \quad (7)$$

где Δm_D ($\Delta \Gamma_D$) обозначает разность масс (ширин) массовых состояний нейтральных D -мезонов и Γ_D обозначает полусумму ширин этих состояний. Параметры смешивания малы $x_D \sim y_D \sim 10^{-2}$, поэтому мы всюду используем разложение в ряд по этим параметрам.

Параметры смешивания могут быть получены модельно-независимым образом в когерентных распадах пар $D^0 \bar{D}^0$, находящихся в симметричном

по перестановке состояния с $\mathcal{C} = +1$.¹ Такие пары можно получить в распадах $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^{*0}$, $\bar{D}^{*0} \rightarrow \bar{D}^0\gamma$. Пусть один из D -мезонов такой пары переходит в состояние $K_S^0\pi^+\pi^-$. Вероятность попадания в область диаграммы Далица с индексом i при этом зависит от типа конечного состояния второго D -мезона. При переходе второго D -мезона в \mathcal{CP} -собственное состояние с \mathcal{CP} -четностью η_D эта вероятность задается выражением

$$\langle M_{i,\eta_D}^{\mathcal{C}^+} \rangle \propto (K_i + K_{-i})(1 + 2\eta_D y_D) + 2C_i \sqrt{K_i K_{-i}} (\eta_D + 2y_D) + \mathcal{O}(x_D + y_D)^2. \quad (8)$$

Соответствующая вероятность при переходе второго D -мезона в состояние с определенным ароматом:

$$\langle M_i^{\mathcal{C}^+} \rangle \propto K_i + 2\sqrt{K_i K_{-i}} (y_D C_i + x_D S_i) + \mathcal{O}(x_D + y_D)^2. \quad (9)$$

Дополнительно можно рассмотреть некогерентный переход \bar{D}^0 -мезона, рожденного в процессе $e^+e^- \rightarrow D^+D^{*-}$, $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0\pi^+$, в состояние $K_S^0\pi^+\pi^-$. Вероятность попадания в область номер i в этом случае:

$$K'_i \propto K_i + \sqrt{K_i K_{-i}} (y_D C_i + x_D S_i) + \mathcal{O}(x_D + y_D)^2. \quad (10)$$

При известных значениях параметров K_i , C_i и S_i соотношения (8), (9) и (10) позволяют получить параметры смешивания x_D и y_D .

В процессе $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^{*0}$, $\bar{D}^{*0} \rightarrow \bar{D}^0\pi^0$ образуется когерентная пара $D^0\bar{D}^0$ -мезонов в антисимметричном состоянии с $\mathcal{C} = -1$, которое позволяет получить не искаженные смешиванием значения параметров K_i , C_i и S_i . Таким образом, рассматривая совместно распады $\bar{D}^{*0} \rightarrow \bar{D}^0\pi^0$ и $\bar{D}^{*0} \rightarrow \bar{D}^0\gamma$, можно выполнить измерения, достаточные для получения параметров смешивания D -мезонов. Оптимальной энергией коллайдера для предложенного измерения является 4.01 ГэВ, которая находится под порогом рождения $D^*\bar{D}^*$ -пар. Численные эксперименты показывают, что параметры смешивания могут быть получены с точностью около 10^{-3} с данными, соответствующими году работы Чарм-Тау-фабрики со светимостью $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

¹Для наглядности мы предполагаем сохранение \mathcal{CP} -симметрии в смешивании D -мезонов, хотя обсуждаемые ниже методы позволяют получить параметры \mathcal{CP} -нарушения в смешивании вместе с параметрами смешивания D -мезонов, если рассмотреть более общий формализм.

Получение параметров смешивания в некогерентных распадах D -мезонов с измерением времени распада. Плотность вероятности перехода D^0 -мезона, рожденного в процессе $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$, в состояние $K_S^0\pi^+\pi^-$ при условии попадания в i -ю область диаграммы Далица:

$$K'_i(t) \propto e^{-\Gamma_D t} \left[K_i + \sqrt{K_i K_{-i}} (y_D C_i + x_D S_i) \Gamma t + \mathcal{O}((\Gamma_D t)^2 (x_D + y_D)^2) \right]. \quad (11)$$

Соотношение (11) впервые опубликовано в работе автора диссертации и позволяет получить параметры K_i и параметры смешивания D -мезонов во времязависимых измерениях на B -фабрике или в эксперименте ЛНСб. Как уже обсуждалось, значения параметров C_i и S_i могут быть получены независимо. Первое получение параметров смешивания описанным методом было выполнено недавно группой ЛНСб.

Влияние смешивания D -мезонов и прямого \mathcal{CP} -нарушения в распаде $D^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ на получение угла γ . В перспективе прецизионного модельно-независимого получения угла γ в экспериментах Belle II и ЛНСб важным вопросом является влияние осцилляций D -мезонов на величину γ , полученную модельно-независимым способом в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$. Мы рассмотрели две процедуры: согласно первой процедуре для определения γ используются значения параметров K_i , C_i и S_i , полученные в когерентных распадах $D^0\bar{D}^0$ -пар; вторая процедура отличается от первой тем, что значения параметров K_i получены в некогерентных распадах, и поэтому искажены смешиванием (смотрите уравнение (10)).

Смещение γ для обеих процедур оценено с помощью численных экспериментов. Первая процедура (K_i получены в когерентных распадах) приводит к смещению, не превышающему

$$\delta\gamma^{(\max)} = 3^\circ \times \frac{\sqrt{x_D^2 + y_D^2}}{0.1r_B} \approx 3^\circ, \quad r_B = \left| \frac{\mathcal{A}(B^+ \rightarrow D^0 K^+)}{\mathcal{A}(B^+ \rightarrow \bar{D}^0 K^+)} \right|. \quad (12)$$

При использовании второй процедуры вклад смешивания в вероятность попадания события в область фазового пространства с индексом i дополнительно

подавлен фактором порядка r_B и максимальное смещение составляет

$$\delta\gamma^{(\max)} \approx 3^\circ \times r_B \times \frac{\sqrt{x_D^2 + y_D^2}}{0.1r_B} \approx 0.2^\circ. \quad (13)$$

Полученные результаты позволяют заключить, что получение параметров K_i в некогерентных распадах позволяет не учитывать смешивание D -мезонов даже при прецизионном модельно-независимом получении γ в эксперименте Belle II (точность которого может быть близка к 1°).

С помощью численных экспериментов изучено влияние прямого \mathcal{CP} -нарушения в распадах $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ на извлекаемую модельно-независимым способом величину угла γ в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$. Показано, что смещение γ не превосходит 3° . Эта величина определяется точностью экспериментального ограничения величины \mathcal{CP} -нарушения в распадах $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, полученного в эксперименте CDF. Ожидается, что измерения в экспериментах LHCb и Belle II позволят значительно уменьшить эту величину, поскольку в SM не ожидается значимых \mathcal{CP} -нарушающих эффектов в распадах D -мезонов.

Кроме того, показано, что угол γ может быть извлечен в распадах $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ модельно-независимо и без предположения сохранения \mathcal{CP} -симметрии в распадах $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$. При этом статистическая чувствительность метода уменьшается незначительно.

Модельно-независимое получение угла β . Бондарь, Гершон и Кроковный предложили получать угол β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0} h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, $h \in \{\pi^0 \eta^{(\prime)}, \omega\}$. Этот метод позволяет разрешить дискретную неопределенность $2\beta \rightarrow \pi - 2\beta$, присущую классическому получению величины $\sin 2\beta$ в кварковых переходах $b \rightarrow c\bar{c}s$. Модельно-независимая модификация этого метода, предложенная автором диссертации, приводит к следующему выражению для плотности вероятности распада в i -й области:

$$\mathcal{P}_i(\Delta t) \propto e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau_B}} \left[1 + q_B \frac{K_i - K_{-i}}{K_i + K_{-i}} \cos(\Delta m_B \Delta t) + 2q_B \eta_{h^0} (-1)^l \frac{\sqrt{K_i K_{-i}}}{K_i + K_{-i}} \sin(\Delta m_B \Delta t) (S_i \cos 2\beta + C_i \sin 2\beta) \right], \quad (14)$$

где Δt обозначает разность собственных времен распада сигнального и помечающего B -мезонов, $q_B = 1$ ($q_B = -1$) соответствует аромату B^0 (\bar{B}^0) сигнального B -мезона при $\Delta t = 0$, η_{h^0} обозначает \mathcal{CP} -четность h^0 -мезона и l обозначает орбитальный момент Dh^0 -системы.²

Третья глава посвящена описанию асимметричного электрон-позитронного ускорителя КЕКВ и детектора Belle. В этой главе также обсуждается участие автора в модернизации калориметра детектора Belle для подготовки работы калориметра в эксперименте Belle II.

В **четвертой главе** обсуждается выполненное впервые модельно-независимое измерение угла β в распадах $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$, $h^0 \in \{\pi^0, \eta, \eta', \omega\}$ (смотрите уравнение (14)). Для измерения использован полный интеграл светимости 711 фбн^{-1} , набранный детектором Belle вблизи резонанса $\Upsilon(4S)$, соответствующий 771 миллионам $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ -событий. Равномерное по фазе разбиение фазового пространства распада $D^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ выполнено с помощью модели, полученной ранее в эксперименте Belle. Значения параметров C_i и S_i для этого разбиения были измерены в эксперименте CLEO. Значения параметров K_i получены с помощью распадов $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$.

Процедура анализа событий состоит из нескольких основных этапов. На первом этапе происходит отбор кандидатов $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0}h^0$ с помощью различных кинематических параметров, изучение компонент фона и применение классифицирующих алгоритмов для подавления фона. На втором этапе для каждого реконструируемого распада определяется доля сигнальных событий посредством анализа двумерного распределения параметров ΔE и M_{bc} :

$$\Delta E = E_B^{\text{СЦМ}} - E_{\text{beam}}^{\text{СЦМ}}, \quad M_{bc} = \sqrt{\left(E_{\text{beam}}^{\text{СЦМ}}\right)^2 - \left(p_B^{\text{СЦМ}}\right)^2}, \quad (15)$$

где $E_B^{\text{СЦМ}}$, $p_B^{\text{СЦМ}}$ и $E_{\text{beam}}^{\text{СЦМ}}$ обозначают соответственно энергию B -кандидата, импульс B -кандидата и энергию пучка в системе центра масс. Форма сигнального и фонового распределений ΔE - M_{bc} изучаются с помощью моделирования. Заключительный этап анализа состоит анализе распределений по Δt . Фоновые Δt -распределения предварительно изучаются с помощью мо-

²Для распадов $B^0 \rightarrow \bar{D}^{*0}h^0$, $\bar{D}^{*0} \rightarrow \bar{D}^0\pi^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ в функции \mathcal{S} возникает дополнительный множитель -1 .

делирования, а затем уточняются с помощью экспериментальных событий. Корректность описания фоновых Δt -распределений и функции разрешения по Δt для сигнальных событий контролируется посредством измерения времени жизни B^0 -мезона в распадах $B^0 \rightarrow \overline{D}^{(*)0}h^0$, $\overline{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$. Получение \mathcal{CP} -нарушающих параметров осуществляется методом максимального правдоподобия с функцией правдоподобия вида

$$\mathcal{L}(\xi) = \prod_{j=1}^N \left[f_{\text{sig}}^j p_{\text{sig}}(\Delta t_j, \xi) + (1 - f_{\text{sig}}^j) p_{\text{bkg}}(\Delta t_j) \right], \quad (16)$$

где N обозначает количество отобранных событий, p_{sig} (p_{bkg}) обозначает плотность вероятности для сигнальных (фоновых) событий, f_{sig}^j обозначает вероятность того, что событие j является сигнальным и $\xi \in \{\sin 2\beta, \cos 2\beta, \beta\}$. Границы (асимметричных) доверительных интервалов $[\xi_{\text{nl}}, \xi_{\text{nr}}]$, соответствующие n стандартным отклонениям, определяются условием

$$n^2 = -2 \log \lambda(\xi_{\text{nl}}) = -2 \log \lambda(\xi_{\text{nr}}), \quad (17)$$

где ξ_{nl} (ξ_{nr}) обозначает левую (правую) границу интервала и $-2 \log \lambda(\xi)$ обозначает логарифм отношения вероятностей

$$-2 \log \lambda(\xi) = -2 \log \mathcal{L}(\xi, \hat{\mathbf{p}}) + 2 \log \mathcal{L}(\hat{\xi}, \hat{\mathbf{p}}). \quad (18)$$

Здесь \mathbf{p} обозначает множество параметров за исключением ξ , от которых зависит функция правдоподобия \mathcal{L} , $\hat{\xi}$ и $\hat{\mathbf{p}}$ обозначают значения параметров, минимизирующее функцию правдоподобия, $\hat{\hat{\mathbf{p}}}$ обозначает значения параметров, минимизирующие функцию правдоподобия для текущего значения ξ . На рисунке 3 показаны логарифмы отношения вероятностей для \mathcal{CP} -нарушающих параметров. Следующие значения соответствуют одному стандартному отклонению:

$$\begin{aligned} \sin 2\beta &= 0.43 \pm 0.27 (\text{стат.}) \pm 0.08 (\text{сист.}), \\ \cos 2\beta &= 1.06 \pm 0.33 (\text{стат.})_{-0.15}^{+0.21} (\text{сист.}), \\ \beta &= 11.7^\circ \pm 7.8^\circ (\text{стат.}) \pm 2.1^\circ (\text{сист.}). \end{aligned} \quad (19)$$

Величина $\sin 2\beta = 0.691 \pm 0.017$, полученная в кварковых переходах $b \rightarrow c\bar{c}s$, определяет абсолютное значение $\cos 2\beta$, которому соответствуют два значения угла $\beta \in [0^\circ; 180^\circ)$. Представленное в данной работе измерение исключает отрицательное значение $\cos 2\beta$, соответствующее $\beta = 68.1^\circ$, на уровне 5.1 стандартных отклонений и находится в согласии с положительным значением $\cos 2\beta$, соответствующим значению $\beta = 21.9^\circ$ на уровне 1.3 стандартных отклонений. Таким образом, представленное измерение разрешает неопределенность в значении угла β , присущую измерению параметра $\sin 2\beta$ в переходах $b \rightarrow c\bar{c}s$.

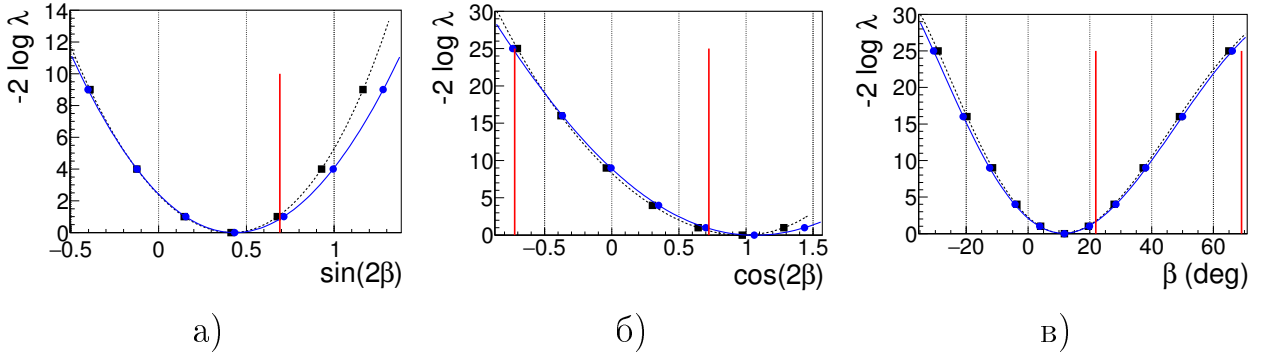


Рис. 3 — Логарифмы отношений вероятностей (18) для а) $\sin 2\beta$, б) $\cos 2\beta$ и в) β . Квадраты (круги) показывают значения без учета (с учетом) систематических неопределенностей. Пунктирные и непрерывные линии показывают аппроксимацию полученных значений. Вертикальные линии показывают значения, соответствующие $\sin 2\beta = 0.691$.

Доминирующие систематические неопределенности представленного измерения имеют статистическую природу. Основной вклад вносит неопределенность значений параметров C_i и S_i , полученных в эксперименте CLEO. Эти неопределенности могут быть уменьшены с помощью измерений в эксперименте BES-III. Другие существенные неопределенности связаны с описанием временного разрешения и распределений по параметрам ΔE и M_{bc} . Эти неопределенности зависят от статистики и будут меньше при выполнении измерения в эксперименте Belle II. При выполнении описанного анализа, таким образом, показано отсутствие систематических неопределенностей, потенциально ограничивающих точность прецизионного измерения в эксперименте Belle II.

В **заключении** приведены основные результаты работы и кратко описаны перспективы развития и практической реализации предложенных в ра-

боте методов модельно-независимого получения параметров в экспериментах Belle II, LHCb и на Чарм-Тау-фабрике.

Публикации автора по теме диссертации

1. A. Bondar, A. Poluektov, V. Vorobiev Charm mixing in a model-independent analysis of correlated $D^0\bar{D}^0$ decays // Phys. Rev. D. — 2010. — Aug. — Vol. 82, issue 3. — P. 034033. — DOI: 10.1103/PhysRevD.82.034033.
2. Effect of direct CP violation in charm on γ extraction from $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ Dalitz plot analysis / A. Bondar, A. Dolgov, V. Vorobiev, [et al.] // The European Physical Journal C. — 2013. — Vol. 73, no. 6. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2476-9.
3. Measurement of the CKM angle φ_1 in $B^0 \rightarrow \bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ decays with time-dependent binned Dalitz plot analysis / V. Vorobyev, I. Adachi, H. Aihara, [et al.] // Phys. Rev. D. — 2016. — Sept. — Vol. 94, issue 5. — P. 052004. — DOI: 10.1103/PhysRevD.94.052004.
4. Testbench of shaper-digitizer modules for Belle II calorimeter / V. Vorobyev, A. Kuzmin, D. Matvienko, [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Vol. 9, no. 08. — P. C08016. — DOI: 10.1088/1748-0221/9/08/C08016.
5. First measurement of ϕ_3 with a model-independent Dalitz plot analysis of $B^\pm \rightarrow DK^\pm$, $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ decay / H. Aihara, K. Arinstein, D. M. Asner, [et al.] // Phys. Rev. D. — 2012. — June. — Vol. 85, issue 11. — P. 112014. — DOI: 10.1103/PhysRevD.85.112014.