

Попов Виталий Евгеньевич

**Новые методы измерения комплексных фаз в распадах
тяжёлых адронов в нейтральные каоны**

Специальность 01.04.23 –
«Физика высоких энергий»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный
руководитель:

Пахлов Павел Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук

Официальные
оппоненты:

Бережной Александр Викторович,

доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук,

Заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Куденко Юрий Григорьевич,

доктор физико-математических наук, профессор, Главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Ведущая
организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 13 декабря 2021 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.02 при Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и на сайте института: www.lebedev.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53., ученому секретарю диссертационного совета Д 002.023.02

Автореферат разослан « » октября 2021 года. Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.023.02

канд. физ.-мат. наук

Вагин Константин Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Изучение смешивания нейтральных мезонов даёт уникальную возможность проверки Стандартной модели (СМ) и поиска Новой физики за её пределами, поскольку переходы мезона в антимезон обусловлены так называемыми box-диаграммами, вклад в которые вносят виртуальные частицы. Эти частицы могут быть до сих пор не открытыми и столь тяжёлыми, что для их прямого рождения недостаточно энергии современных ускорителей. Система D^0 - $\bar{D}^0$ уникальна, поскольку в рамках СМ вклад в box-диаграммы её смешивания дают нижние кварки в отличие от трёх других известных нейтральных мезон-антимезонных систем. В то время как смешивание нейтральных K^0 - и B^0 -мезонов изучается на протяжении последних десятилетий [1, 2, 3, 4], D^0 - $\bar{D}^0$ смешивание было обнаружено только в 2007 году [5, 6], а измерить его параметры на уровне значимости, превышающем три стандартных отклонения от нулевого значения, удалось лишь в 2019 году [7]. Принимая во внимание малость смешивания в системе D^0 - $\bar{D}^0$ в СМ, обусловленную СКМ [8] и GIM [9] подавлением, вклады Новой Физики (НФ) могут быть существенны и обнаружены [10] на фоне этого малого стандартного эффекта.

Одним из наиболее значимых результатов в физике тяжёлых ароматов за последнее десятилетие стало обнаружение CP -нарушения в распадах очарованных мезонов коллаборацией LHCb [11]:

$$\Delta A_{CP} = A_{CP}(K^+ K^-) - A_{CP}(\pi^+ \pi^-) = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}, \quad (1)$$

где CP асимметрия для каждого конечного состояния f определена как

$$A_{CP}(f) = \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow f)}{\Gamma(D^0 \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow f)}. \quad (2)$$

В приведенном выражении CP -нарушение можно разбить на прямое (нарушение CP -симметрии в амплитуде распада) и зависящую от времени часть. Тогда

$$A_{CP}(t) = a_f^d + \Delta Y_f \frac{t}{\tau_{D^0}}. \quad (3)$$

Здесь использован факт малости параметров смешивания в системе D^0 - $\bar{D}^0$ и опущены члены порядка $\mathcal{O}(\Delta Y_f^2)$. Измерения зависящей от времени компоненты в CP -асимметрии в эксперименте LHCb дают следующие значения [12]:

$$\begin{aligned} \Delta Y_{KK} &= (-2.3 \pm 1.5 \pm 0.3) \times 10^{-4}, \\ \Delta Y_{\pi\pi} &= (-4.0 \pm 2.8 \pm 0.4) \times 10^{-4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученный результат является сегодня наиболее точным измерением в распадах $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ и $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ и на уровне двух стандартных отклонений согласуется с отсутствием зависящего от времени CP -нарушения.

В рамках Стандартной модели прямое CP -нарушение для D^0 -мезона может проявиться только за счет однопетлевых пингвинных распадов, поскольку в древесных диаграммах участвуют исключительно кварки первых двух поколений, и комплексная фаза матрицы СКМ не может проявиться в интерферирующих амплитудах. Пингвинные распады в свою очередь могут приводить к появлению как слабой, так и сильной фазы в распаде по отношению к лидирующему древесному вкладу.

По порядку величины CP -нарушение в распадах $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ и $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ можно оценить, как $\mathcal{O}(\alpha_s/\pi)((\mathbf{V}_{ub}\mathbf{V}_{cb}^*)/(\mathbf{V}_{us}\mathbf{V}_{cs}^*)) \sim 10^{-4}$. Сопоставление этой оценки с экспериментальным значением, действительно, может указывать на проявление Новой Физики [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Однако столь смелая интерпретация полученного результата требует более точной оценки вклада СМ [19, 20]. Хотя древесные переходы $c \rightarrow us\bar{s}$, $c \rightarrow u\bar{d}\bar{d}$ без затруднений вычисляются в рамках электрослабого сектора СМ на кварковом уровне, вычисление адронного матричного элемента $\langle K^+ K^- | (\bar{u}\Gamma_1 s)(\bar{s}\Gamma_2 c) | D^0 \rangle$ является не столь очевидной задачей. В пределе тяжёлого кварка [21, 22] адронный матричный элемент факторизуется, и лидирующий член имеет вид $\langle K^+ | (\bar{u}\Gamma_1 s) | 0 \rangle \langle K^- | (\bar{s}\Gamma_2 c) | D^0 \rangle$. Поскольку поправки к лидирующему матричному элементу порядка $\mathcal{O}(1/m_c)$, они могут вносить существенный вклад. При таком подходе игнорируется вклад аннигиляционных диаграмм и эффекты перераспределения в конечном состоянии, когда конститuentные s -кварки конечного состояния $K^+ K^-$ переходят в d -кварки конечного состояния $\pi^+ \pi^-$. В пренебрежении указанными эффектами вычисление с учётом поправок порядка $\mathcal{O}(1/m_c)$ даёт значение $\Delta A_{CP} \sim 0.4\%$ [23].

Альтернативный подход заключается в организации диаграмм, соответствующих вкладам различных токов, в топологические группы и в определении вкладов различных топологий на основании $SU(3)_f$ -симметрии ароматов [24, 25]. Такой подход позволяет обойтись без прямого вычисления адронного матричного элемента и значительно упрощает описание. Анализ распадов очарованных адронов с точки зрения $SU(3)_f$ -симметрии показал, что обнаруженное в эксперименте ЛНСб прямое CP -нарушение можно описать в рамках СМ, если вклады “пингвинных” диаграмм являются усиленными, и согласно предположениям теории такое усиление может быть обусловлено взаимодействиями в конечном состоянии. Это предположение носит спекулятивный характер и нуждается в проверке, основным инструментом которой

являются правила сумм для амплитуд распада. Экспериментальная проверка выполнения таких правил сумм, необходимая для подтверждения адекватности $SU(3)_f$ подхода, требует знания не только модулей амплитуд, но и комплексных фаз.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования: Разработка универсального метода измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны, применимого как для нейтральных, так и для заряженных очарованных адронов, а также его распространение для измерения слабых фаз в распадах B -мезонов.

Основные задачи:

- феноменологический анализ эволюции нейтральных каонов в собственные состояния аромата и CP -чётности для произвольных начальных условий;
- проверка потенциала метода, основанного на анализе зависящей от времени вероятности полулептонных распадов нейтральных каонов, для извлечения параметров рожденной в начальный момент суперпозиции странного и анти-странного каонов без модельных и тригонометрических неопределённостей;
- разработка процедуры восстановления полулептонных распадов с потерянными нейтрино в условиях современных экспериментов;
- вычисление значений разности сильных фаз в распадах очарованных адронов в нейтральные каоны;
- оценка объёма данных, который будет накоплен будущими экспериментами в области физики высоких энергий и оценка потенциальной точности предложенных методов в этих экспериментах;
- оценка эффектов, вносящих систематическую неопределённость в измерение параметров распадов очарованных адронов;
- анализ данных эксперимента Belle для распадов $D_s^\pm \rightarrow K_S K^\pm$, $D^+ \rightarrow K_S \pi^\pm$ и $D^0 \rightarrow K_S \pi^0$; оптимизация отбора сигнальных событий, исследование источников фона на событиях моделирования и разработка методов их подавления; анализ зависящей от времени вероятности распада нейтральных каонов в исследуемых процессах и извлечение исследуемых параметров;

- разработка и автоматизация процесса калибровки кремниевых фотумножителей мюонной системы детектора Belle II; анализ ускорительных фонов и проверка эффективности работы мюонной системы при существующих фоновых нагрузках.

Научная новизна. Впервые разработаны универсальные методы измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов в нейтральные каоны. Такие измерения необходимы для определения параметров смешивания, проверки правил сумм, основанных на $SU(3)_f$ симметрии, и поиска Новой физики. Ранее подобные измерения были доступны лишь в отдельных экспериментах, в которых изучали сразу пару D^0 - и $\bar{D}^0$ -мезонов, рожденных в квантово-спутанном состоянии. Важно отметить, что анализ квантово-спутанных пар очарованных мезонов применим лишь для нейтральных частиц, в то время как предложенные и разработанные в данной работе методы позволяют измерять разность сильных фаз для распадов заряженных мезонов и барионов.

Впервые предложен метод использования полупертоновых распадов нейтральных каонов для измерения параметров очарованных адронов. Несмотря на небольшую относительную вероятность полупертоновых распадов и невозможность реконструкции нейтрино, автором разработан эффективный алгоритм восстановления импульса каонов и оптимального подавления фона. Метод основан на изучении зависимости времени жизни каонов до распада в разные состояния аромата. Показана чувствительность предложенного метода к параметрам рожденной в начальный момент смеси нейтральных каонов.

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

Теоретическая и практическая значимость работы. Обнаруженное недавно аномально большое CP -нарушение в распадах очарованных адронов может быть интерпретировано как проявление эффектов Новой физики. Однако ряд спекулятивных предположений относительно вклада сильного взаимодействия позволяет объяснить полученный результат в рамках СМ. Поскольку количественную оценку вклада сильного взаимодействия на больших расстояниях выполнить проблематично для современного состояния КХД, подобная гипотеза остаётся качественной. Количественная проверка возможна с привлечением экспериментальных данных об амплитудах и фазах.

зах двухчастичных распадов. Полную картину о фазах всех амплитуд можно получить, используя разработанные автором методы. Предложенные в работе измерения позволяют оценить вклад сильного взаимодействия на больших расстояниях и корректно интерпретировать полученный результат.

Перечисленные новые методы можно использовать как для измерения фундаментальных параметров CP -нарушения, так и для поиска Новой физики. Безусловным достоинством методов является их универсальность, поскольку они применимы в целом ряде существующих и будущих экспериментов в области физики высоких энергий.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новый метод измерения разности сильных фаз в распадах очарованных адронов с использованием полулептонных распадов нейтральных каонов. Феноменологический анализ эволюции суперпозиции странности нейтральных каонов, рожденных в распадах очарованных адронов, в собственные состояния аромата.
2. Разработка метода экспериментального восстановления полулептонных распадов нейтральных каонов с потерянным нейтрино в конечном состоянии и оценка его эффективности и выбор критериев подавления фона.
3. Новый метод измерения разности сильных фаз в распадах очарованных адронов с использованием распада $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Феноменологический анализ эволюции суперпозиции нейтральных каонов, рождённых в распадах тяжёлых адронов, в CP собственные состояния.
4. Теоретические предсказания для значений разностей сильных фаз в распадах $D_s^\pm \rightarrow K_S K^\pm$, $D^+ \rightarrow K_S \pi^\pm$ и $D^0 \rightarrow K_S \pi^0$, полученные на основе $SU(3)_f$ симметрии ароматов.
5. Оценка потенциальной точности для обоих методов в эксперименте Belle II и эксперименте на Супер c - τ -фабрике.
6. Оценка систематической погрешности, вносимой регенерацией нейтральных каонов на веществе детектора, в измерение разности сильных фаз. Оценка значения неопределенности, связанной со смешиванием в системе D^0 - $\bar{D}^0$.
7. Разработка и автоматизация метода калибровки кремниевых фотоумножителей для системы регистрации мюонов и долгоживущих нейтраль-

ных каонов эксперимента Belle II. Классификация и оценка фонов ускорителя Super KEKB в мюонной системе.

8. Обоснование требований для перспективных экспериментальных установок для достижения максимальной точности, используя предложенные методы.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, представлены на международных конференциях “Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics 2019” (Флоренция, Италия), “Joint Workshop on Future charm-tau Factory 2019” (Москва, Россия), Сессия-конференция секции Ядерной физики ОФН РАН 2020 (Новосибирск, Россия), а также на конференциях “Физика элементарных частиц и Космология” 2020, 2021 (Москва, Россия). Результаты обсуждались на рабочих совещаниях коллабораций Belle и Belle II, семинарах ФИАН, МФТИ, НИУ ВШЭ, ИЯФ СО РАН.

Личный вклад. Автор лично выполнил феноменологический анализ эволюции суперпозиции странности нейтральных каонов, рожденных в распадах очарованных адронов, и показал возможность измерения разности сильных фаз рождения с помощью анализа зависящей от времени вероятности распада каонов как в полулептонном конечном состоянии, так и в конечном состоянии $\pi^+\pi^-$. Автором получены численные результаты для точности предложенных измерений в эксперименте Belle II и в эксперименте на Супер c - τ -фабрике, а также выполнены оценки неопределенностей предложенного измерения, связанного с регенерацией каонов на веществе детектора и смешивания в системе очарованных адронов. Автор выполнил анализ данных эксперимента Belle и показал применимость разработанного им метода в реальном эксперименте. Автор подготовил публикации по результатам работы, представил несколько докладов. Автор собирал и налаживал считывающую электронику для системы сбора данных системы регистрации мюонов и долгоживущих нейтральных каонов эксперимента Belle II, в котором будут осуществлены предложенные измерения.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации [A1–A4] опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка таблиц, списка рисунков и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 100 страниц, включая 40 рисунков и 8 таблиц.

Содержание работы

В первой главе представлены основные результаты в области феноменологического описания распадов нейтральных каонов. Представлены формализм K^0 - $\bar{K}^0$ смешивания и уравнения эволюции для нейтральных каонов как в CP -собственные состояния, так и собственные состояния аромата для случаев, когда в начальный момент времени рождается чистое состояние аромата. Приведен формализм нарушения CP -инвариантности в смешивании нейтральных каонов.

Вторая глава посвящена обзору современного состояния исследований в области физики очарованных адронов. Особое внимание уделено применению $SU(3)_f$ -симметрии, которая является мощным инструментом для анализа распадов очарованных адронов. В то время как вычисление адронных матричных элементов распадов сильно затруднено, правила сумм для амплитуд, основанные на симметрии ароматов, позволяют учесть нетривиальные динамические эффекты без прямого вычисления.

На основании изоспиновой симметрии можно получить правила сумм, которые выполняются с $\sim 1\%$ точностью [26]:

$$-A_{D^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-} + \sqrt{2}A_{D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0} = 0, \quad (5)$$

$$\sqrt{2}A_{D^0 \rightarrow \bar{K}^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow K^- \pi^+} - A_{D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+} = 0, \quad (6)$$

$$\sqrt{2}A_{D^0 \rightarrow K^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow K^+ \pi^-} + \sqrt{2}A_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^0} - A_{D^+ \rightarrow K^0 \pi^+} = 0. \quad (7)$$

Каждое из приведенных правил сумм отвечает одному порядку по изменению странности $-\Delta S$, и, следовательно, одному порядку по параметру матрицы смешивания кварков $-\lambda = \sin(\theta_C) \simeq 0.23$. В работе использовалась общепринятая классификация для адронных распадов в соответствии с иерархией элементов матрицы СКМ: Кабиббо-разрешенные (CF) – $\mathcal{O}(1)$; Кабиббо-подавленные (SCS) – $\mathcal{O}(\lambda)$; дважды Кабиббо-подавленные (DCS) – $\mathcal{O}(\lambda^2)$. Таким образом, правило сумм (5) отвечает SCS распадам, (6) – CF и (7) – DCS распадам.

На рисунке 1 проиллюстрированы правила сумм для CF и DCS распадов очарованных адронов, проверка которых позволит количественно оценить вклад сильных взаимодействий на больших расстояниях. Рисунок 1 демонстрирует, что для проверки правил сумм необходимы измерения не только модулей амплитуд, но и разности сильных фаз между амплитудами. Для амплитуд с $K^0(\bar{K}^0)$ в конечном состоянии до сих пор не измерены ни отношения DCS/CF амплитуд, ни разности сильных фаз, что делает предлагаемые в этой работе методы особенно актуальными.

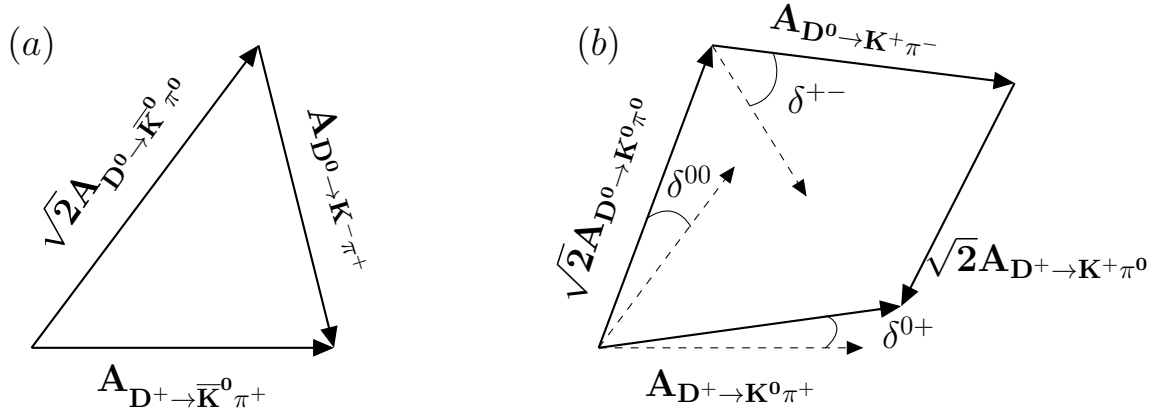


Рис. 1: Правила сумм для (a) Кабиббо-разрешенных и (b) дважды Кабиббо-подавленных амплитуд распада очарованных мезонов. δ^{+-} , δ^{00} , δ^{0+} обозначают разности сильных фаз между амплитудами.

Используя результаты, полученные в работе [27] для относительных вкладов различных топологий и изоспиновых фаз, впервые получено предсказание для разности сильных фаз в распадах $D^0 \rightarrow \bar{K}^0 \pi^0$, $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+$ и $D_s^+ \rightarrow \bar{K}^0 K^+$:

$$\delta^{00} = (-3 \pm 6)^\circ; \quad (8)$$

$$\delta^{0+} = (-76 \pm 4)^\circ; \quad (9)$$

$$\delta_s^{0+} = (108 \pm 4)^\circ. \quad (10)$$

В третьей главе представлены новые методы измерения разности сильных фаз в распадах тяжелых адронов.

Первый метод извлечения разности фаз между комплексными амплитудами рождения K^0 и $\bar{K}^0$ в распадах очарованных адронов основан на использовании полулептонных распадов K^0 -мезонов [A1, A2]. Выбор именно этого конечного состояния восстановления K^0 фиксирует его странность в момент распада. Эволюция рожденной смеси в собственное состояние аромата рассмотрена на примере распада $D^+ \rightarrow K^0 \pi^+ (\bar{K}^0 \pi^+)$. Полученные уравнения будут также справедливы для распадов $D_s^+ \rightarrow K^0 K^+ (\bar{K}^0 K^+)$, $\Lambda_c \rightarrow K^0 p (\bar{K}^0 p)$ и с некоторыми оговорками для $D^0 \rightarrow K^0 \pi^0 (\bar{K}^0 \pi^0)$. Для вывода эволюционного уравнения удобно работать в базисе собственных состояний аромата: $(K^0 \bar{K}^0)$. Начальное условие можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} K^0(t) \\ \bar{K}^0(t) \end{pmatrix} \Big|_{t=0} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где a и b в общем случае некоторые комплексные параметры. Поскольку результаты измерений не могут зависеть от общей фазы, положим a веществен-

ным и выделим явно разность фаз, $\delta: e^{i\delta} = b/|b|$. Для такой начальной суперпозиции состояний аромата были получены уравнения для зависящей от времени вероятности распада

$$\begin{aligned} R_{\ell^+}(t) &= \frac{1}{4} e^{-\Gamma t} |A_{\ell^+}|^2 \left[|a|^2 K_+(t) + \left| b \left(\frac{p}{q} \right)_K \right|^2 K_-(t) + 2 \operatorname{Re} \left\{ ab \left(\frac{p}{q} \right)_K K_i(t) \right\} \right], \\ R_{\ell^-}(t) &= \frac{1}{4} e^{-\Gamma t} |A_{\ell^-}|^2 \left[|a|^2 K_-(t) + \left| b \left(\frac{q}{p} \right)_K \right|^2 K_+(t) + 2 \operatorname{Re} \left\{ ab \left(\frac{q}{p} \right)_K K_i(t) \right\} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

где $K_{\pm,i}(t)$ определены, как

$$K_{\pm}(t) = 1 \pm 2e^{\frac{1}{2}\Delta\Gamma t} \cos(\Delta m t) + e^{\Delta\Gamma t}, \quad K_i(t) = 1 + 2ie^{\frac{1}{2}\Delta\Gamma t} \sin(\Delta m t) - e^{\Delta\Gamma t}, \quad (13)$$

а амплитуды полулептонного распада определены следующим образом:

$$A_{\ell^+} = \langle \pi^- \ell^+ \nu | \mathcal{H} | K^0 \rangle, \quad \bar{A}_{\ell^-} = \langle \pi^+ \ell^- \bar{\nu} | \mathcal{H} | \bar{K}^0 \rangle. \quad (14)$$

Третий член в выражениях (12) представляет собой интерференцию полулептонных распадов, рожденных в начальный момент времени K^0 - и $\bar{K}^0$ -мезонов. Сильная фаза, δ , входит в оба выражения и может быть извлечена из анализа зависящих от времени вероятностей распада. Благодаря интерференции $K^0(t)$ - и $\bar{K}^0(t)$ -амплитуд такое измерение можно выполнить без тригонометрической неопределенности.

Эффект, вносимый разностью сильных фаз в асимметрию знака лептона в конечном состоянии, проиллюстрирован на рисунке 2. Как можно видеть, максимальный эффект, обусловленный разностью сильных фаз, приходится на времена жизни $\sim [0.5, 5] \tau_{K_S}$.

Для выполнения анализа зависящей от времени вероятности распада K^0 -мезонов необходимо с хорошей точностью измерить время жизни каонов. Для этого необходимо восстановить импульс и вершину распада нейтрального каона. В то время как вершину распада можно реконструировать по заряженным трекам $\pi\ell$, прямое измерение импульса затруднено потерянными нейтрино в конечном состоянии. Однако импульс каона можно восстановить из известной вершины распада очарованного адрона, направления на вершину распада каона и известного импульса системы $\pi\ell$. Закон сохранения импульса $((P_K - P_{\pi\ell})^2 = P_\nu^2 = 0)$ позволяет получить квадратное уравнение с двумя возможными решениями для импульса нейтрального каона:

$$|\mathbf{p}_K|_{(1,2)} = \frac{|p_{\pi\ell}| \cos \theta (m_K^2 + m_{\pi\ell}^2) \pm \sqrt{w}}{2(E_{\pi\ell}^2 - p_{\pi\ell}^2 \cos^2 \theta)}, \quad (15)$$

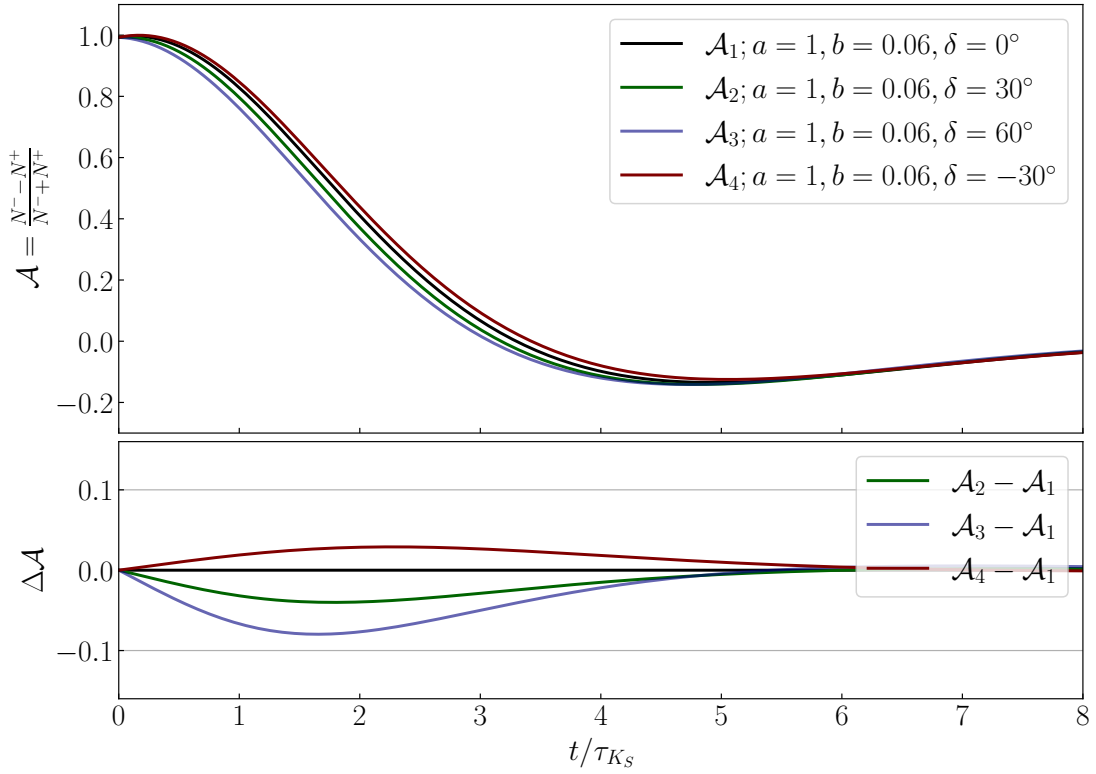


Рис. 2: Асимметрия знака лептона из распада каонов для различных значений отношения модулей амплитуд и разности сильных фаз DCS и CF распадов. На нижнем рисунке приведены разности асимметрий для различных значений разности сильных фаз и случая $\delta = 0^\circ$.

где $\mathbf{p}_K$, m_K – импульс и масса нейтрального каона, $E_{\pi\ell}$, $\mathbf{p}_{\pi\ell}$, $m_{\pi\ell}$ – энергия, импульс и инвариантная масса системы $\pi\ell$, и θ – угол между направлением K^0 -мезона, полученного из восстановленных вершин его рождения и распада, и измеренного импульса системы $\pi\ell$, а параметр w задан выражением

$$w = E_{\pi\ell}^2 (4m_K^2 p_{\pi\ell}^2 \cos^2 \theta - 4E_{\pi\ell}^2 m_K^2 + m_{\pi\ell}^2 (m_K^2 + m_{\pi\ell}^2)). \quad (16)$$

Таким образом, задача определения импульса каона сводится к выбору одного из двух решений. Такой выбор можно осуществить с помощью имеющихся кинематических ограничений. Эффективность предложенного метода восстановления зависит от пространственного и импульсного разрешения детектора, и для современных установок составляет $\sim 70\%$. Разрешение по времени жизни при восстановлении полуплептонного распада составляет $\sim 4\%$, что является достаточным для выполнения анализа зависящей от времени вероятности распада.

Альтернативой использованию полуплептонных распадов каонов для изме-

рения параметров рождения смеси $K^0\text{-}\bar{K}^0$ является измерение распада $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ [А3]. Наличие CP -нарушения в системе нейтральных каонов позволяет эффективно разделить вклады K^0 - и $\bar{K}^0$ -мезонов в зависящую от времени вероятность распада каона. Для оценки вклада DCS распадов необходимо рассмотреть эволюцию

$$\Psi^+(t) = |\bar{K}^0(t)\rangle + \sqrt{r_f}e^{i\delta}|K^0(t)\rangle, \quad (17)$$

$$\Psi^-(t) = |K^0(t)\rangle + \sqrt{r_f}e^{i\delta}|\bar{K}^0(t)\rangle, \quad (18)$$

где δ , r_f – разность сильных фаз и отношение модулей амплитуд DCS и CF распадов. Для таких начальных условий зависящие от времени вероятности распада будут иметь вид

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^+(t) \equiv |\Psi^+(t)|^2 &= \bar{\mathcal{R}}(t) + r_f\mathcal{R}(t) \\ &+ \sqrt{r_f}(\cos\delta + 2|\eta_{+-}|\sin\delta\sin\phi_{+-}) \times \left(e^{-\Gamma_s t} - |\eta_{+-}|^2 e^{-\Gamma_L t}\right) \\ &+ 2\sqrt{r_f}|\eta_{+-}| \left(\sin\delta + 2|\eta_{+-}|\cos\delta\sin\phi_{+-}\right) e^{-\frac{1}{2}(\Gamma_L+\Gamma_s)t} \sin(\Delta m t - \phi_{+-}), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^-(t) \equiv |\Psi^-(t)|^2 &= \mathcal{R}(t) + r_f\bar{\mathcal{R}}(t) \\ &+ \sqrt{r_f}(\cos\delta - 2|\eta_{+-}|\sin\delta\sin\phi_{+-}) \times \left(e^{-\Gamma_s t} - |\eta_{+-}|^2 e^{-\Gamma_L t}\right) \\ &- 2\sqrt{r_f}|\eta_{+-}| \left(\sin\delta - 2|\eta_{+-}|\cos\delta\sin\phi_{+-}\right) e^{-\frac{1}{2}(\Gamma_L+\Gamma_s)t} \sin(\Delta m t - \phi_{+-}). \end{aligned} \quad (20)$$

где $\mathcal{R}(\bar{\mathcal{R}})$ – зависящая от времени вероятность распада для рожденного в начальный момент времени чистого состояния аромата $K^0(\bar{K}^0)$. Как видно из полученных выражений, наличие комплексной фазы в смешивании нейтральных каонов приводит к вкладу как $\cos\delta$, так и $\sin\delta$, что устраняет тригонометрическую неопределенность. На рисунке 3 продемонстрированы, полученные с помощью моделирования, распределения по времени жизни нейтральных каонов, рожденных в распадах очарованных мезонов.

Полученные результаты для эволюции нейтральных каонов позволяют сформулировать требования для эксперимента, в котором можно выполнить подобные измерения. В первую очередь, оба метода основаны на малых эффектах, а именно малой относительной вероятности полулептонных распадов, либо малого эффекта CP -нарушения в распадах $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Поэтому для измерений необходим большой образец данных. Анализ зависящей от времени вероятности распада каонов предполагает прецизионное измерение времени жизни нейтральных каонов, и, следовательно, хорошее импульсное и пространственное разрешения детектора. Наибольшая чувствительность к

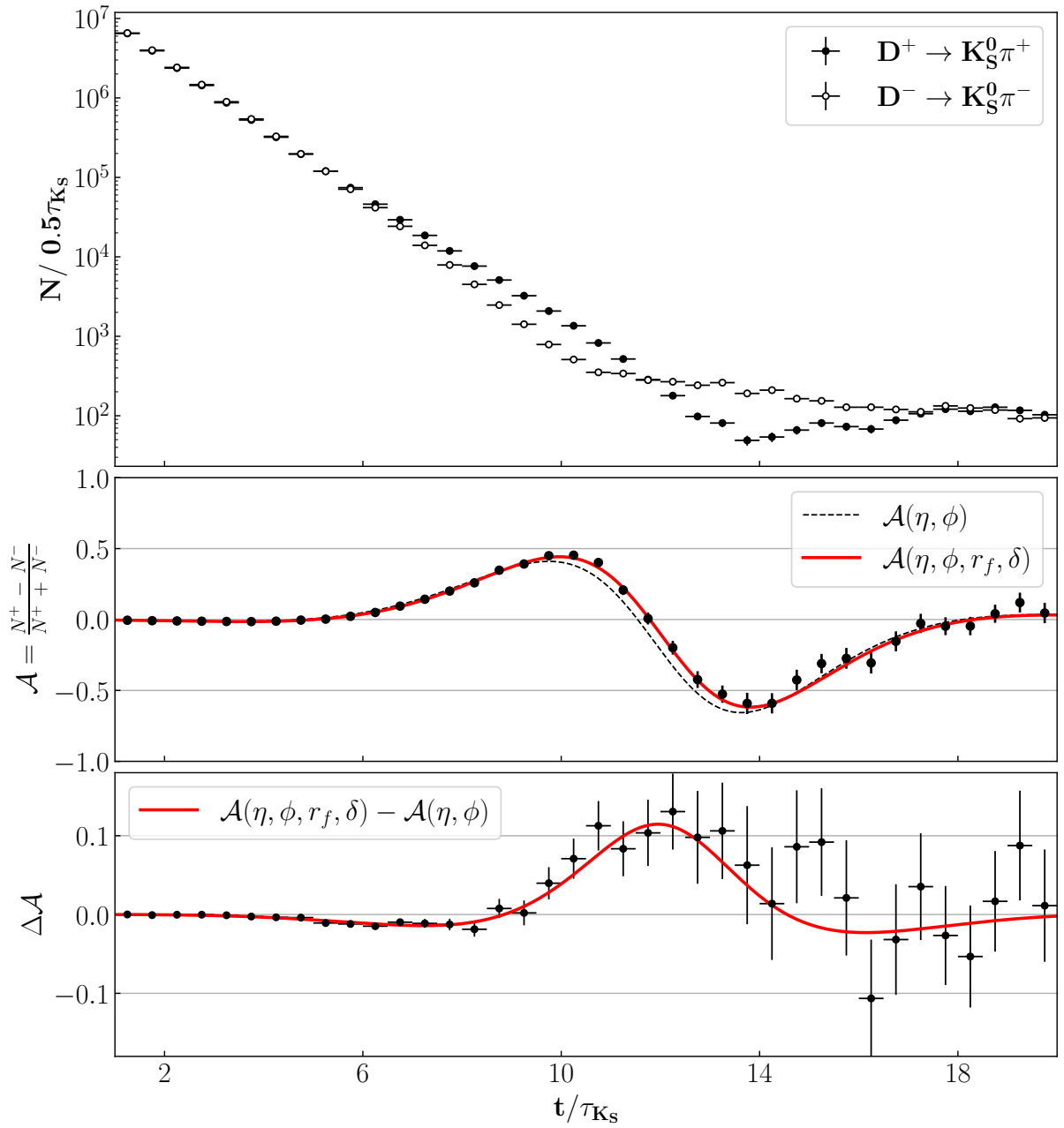


Рис. 3: На верхнем рисунке представлены, полученные с помощью моделирования, распределения по времени жизни K^0 -, $\bar{K}^0$ -мезонов, рожденных в распаде D^+ -мезонов. Черными и белыми точками обозначены распределения для D^+ - и D^- -мезонов соответственно. На среднем рисунке приведена асимметрия распадов $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Красной и черной пунктирной линиями показаны асимметрии с учетом вклада DCS распадов и без них соответственно. На нижнем рисунке показана разность асимметрий с учетом вклада DCS распадов и без него.

параметрам DCS распадов при больших временах жизни K_S -мезона, обуславливает необходимость большого трекового детектора и/или каонов с низкой энергией. Некоторые процессы различаются заряженным адроном в конеч-

ном состоянии, например, распады $D^+ \rightarrow K_S \pi^+$ и $D_s^+ \rightarrow K_S K^+$. Поскольку за счет неправильной идентификации эти каналы распада являются потенциальным фоном друг для друга, способность эффективно идентифицировать заряженные треки является необходимым условием.

К экспериментам, удовлетворяющим перечисленным требованиям, в которых будет набран беспрецедентный объем данных, относятся Belle II [28] (запущенный в 2018 году) и будущая Супер- c - τ -фабрика [29, 30]. Тяжелые адроны здесь рождаются в e^+e^- столкновениях, что обеспечивает низкий уровень фона по сравнению с адронными машинами. Оба эксперимента обладают большими трековыми детекторами ~ 1 м с необходимым вершинным и импульсным разрешением, а также системами идентификации, позволяющими идентифицировать частицы с высокой эффективностью в широком диапазоне импульсов. Для этих экспериментов выполнена оценка потенциальной точности с помощью моделирования методом Монте-Карло.

Как было указано ранее, ни для одного из рассматриваемых процессов отношение $\sqrt{r_f}$ фактически измерено не было. Поэтому в рамках исследования выполнено сканирование по различным значениям $\sqrt{r_f}$ в интервале $[0.01, 0.11]$. Для данной процедуры было выполнено моделирование методом Монте-Карло и подгонка полученных распределений методом наибольшего правдоподобия. Полученная статистическая неопределенность измерения проиллюстрирована на рисунке 4. Как ожидалось, неопределенность в измерении разности сильных фаз уменьшается с ростом $\sqrt{r_f}$. Отметим, что для всех рассматриваемых распадов очарованных адронов в ожидаемом интервале значений отношения DCS/CF амплитуд статистическая ошибка не превышает 10° , а для канала распада $D^+ \rightarrow K_S \pi^+$, где ожидается наибольший образец данных составляет 4° .

Потенциальными источником систематической неопределенности в измерении разности сильных фаз является регенерация нейтральных каонов на веществе детектора. Оценка этой неопределенности для конфигурации детектора Belle II показала, что неопределенность, обусловленная регенерацией, не превышает статистической ошибки измерения. Для распада $D^0 \rightarrow K_S \pi^0$ потенциальным источником неопределенности также является смешивание в системе D^0 - $\bar{D}^0$. Но поскольку для системы очарованных адронов параметры смешивания малы – $\mathcal{O}(10^{-3})$, неопределенность в измерении разности сильных фаз не превышает 1%.

В четвертой главе приводится описание экспериментальных установок Belle и Belle II. Детектор Belle [31] был разработан для прецизионных измерений параметров CP -нарушения в распадах B -мезонов, а также для поиска

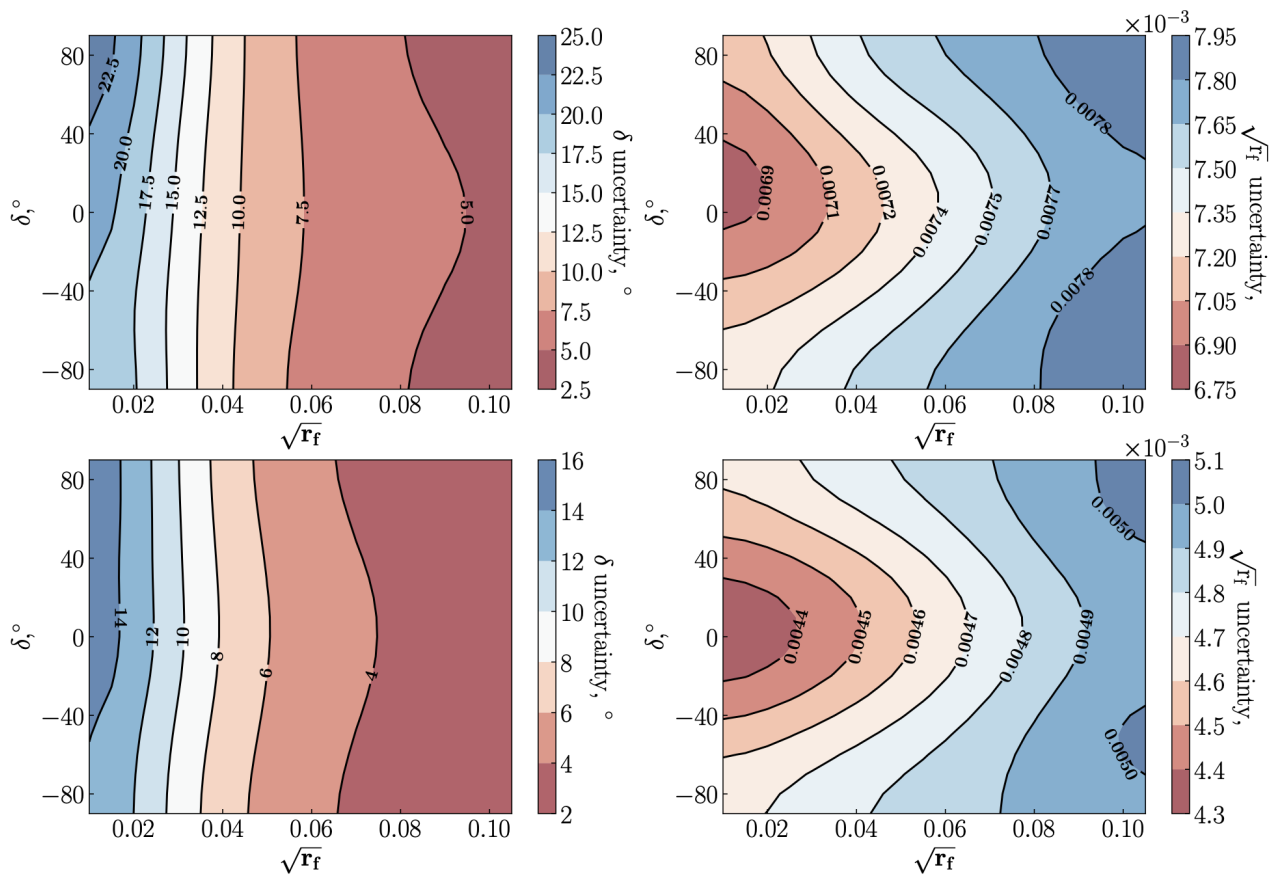


Рис. 4: Полученные значения для статистической неопределенности разности сильных фаз и модуля отношения амплитуд в эксперименте Belle II. На верхней паре рисунков представлены результаты для ожидаемого числа восстановленных распадов $D^0 \rightarrow K_S \pi^0$, равного 20×10^6 ; на нижней паре рисунков результат для 45×10^6 восстановленных распадов $D^+ \rightarrow K_S \pi^+$.

Новой физики за рамками Стандартной модели. За время работы в период 1999–2009 гг. эксперимент Belle набрал интегральную светимость $\sim 1 \text{ аб}^{-1}$.

Ускоритель КЕКВ состоит из двух накопительных колец, в которые инжектируются электроны и позитроны при проектных энергиях 8 ГэВ и 3.5 ГэВ соответственно. Асимметрия энергий e^+ и e^- пучков позволяет достичь хорошего разрешения по времени жизни B -мезонов. Подсистемы детектора (рисунок 5) расположены сферически симметрично вокруг точки взаимодействия и перекрывают 92% от полного телесного угла 4π в системе центра масс электронного и позитронного пучков. Элементы детектора находятся в магнитном поле напряженностью 1.5 Т. Основные компоненты детектора: кремниевый вершинный детектор (SVD); дрейфовая камера (CDC); аэрогелевые черенковские счетчики (ACC); система измерения времени пролета частиц (TOF); электромагнитный калориметр на основе кристаллов CsI (ECL); сверхпроводящий магнит и мюонные камеры (KLM); триггер и система сбора и записи

данных (DAQ).

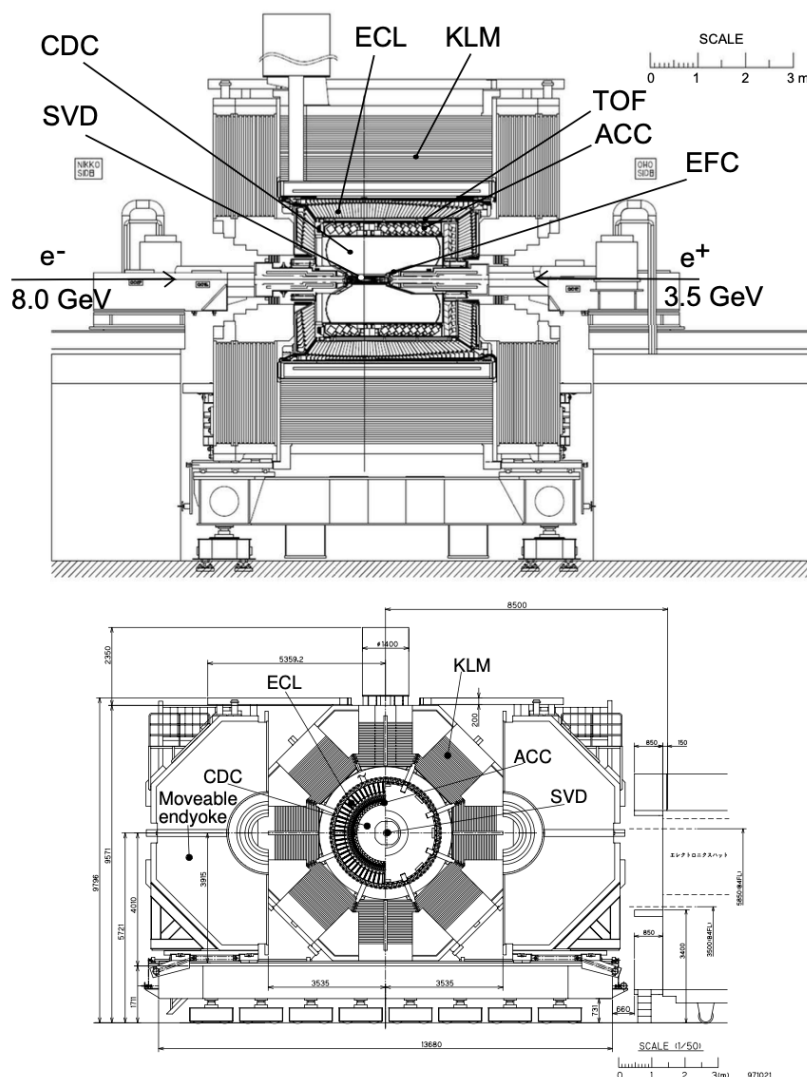


Рис. 5: Схематический вид детектора Belle.

В рамках участия в эксперименте Belle II, начавшего набор данных в 2018 году, были выполнены работы по обслуживанию и поддержанию эффективной работы системы регистрации мюонов и долгоживущих нейтральных каонов (KLM). Основным элементом мюонной системы являются сцинтилляционные стрипы, считывание с которых осуществляется с помощью кремниевых фотоумножителей [32].

Для оценки ускорительных фонов в KLM проанализированы специальные заходы набора данных с различными конфигурациями работы накопительных колец. Наибольшая частота фоновых событий наблюдалась в самом внешнем слое передней части KLM. Несмотря на то, что частота фоновых событий в этом слое не превышает проектной загрузки, была выполнена опти-

Таблица 1: Результаты восстановления распадов очарованных адронов.

Мода распада	$N_{\text{sig}}^+, \times 10^3$	Чистота сигнала, %	$N_{\text{sig}}^-, \times 10^3$	Чистота сигнала, %
$D^+ \rightarrow K_S \pi^+$	893 ± 4	88	906 ± 4	88
$D_s^+ \rightarrow K_S K^+$	191 ± 1	78	192 ± 1	78
$D^0 \rightarrow K_S \pi^0$	302 ± 2	90	301 ± 2	90

мизация временного окна записи данных для снижения уровня фона. Кроме того было принято решение об установке дополнительной защиты с внешней стороны детектора. Для поддержания высокой эффективности работы KLM была разработана процедура калибровки подстроечного напряжения на кремниевых фотоумножителях. Такая процедура выполнялась регулярно и позволила поддерживать эффективность работы мюонной системы на уровне (95...98)% [A4].

Пятая глава посвящена анализу данных эксперимента Belle. На данных эксперимента Belle (951 фб^{-1}) были восстановлены распады $D_s^+ \rightarrow K_S K^+$, $D^+ \rightarrow K_S \pi^+$, $D^{*+} \rightarrow (K_S \pi^0)_D \pi^+$ и соответствующие зарядово-сопряженные моды. В данной главе подробно описана процедура оптимизации критериев отбора, в том числе с помощью методов машинного обучения. На событиях моделирования методом Монте-Карло выполнен анализ фоновых процессов и показано, что вклад фона в сигнальной области может быть хорошо описан из контрольных областей, соседних с сигнальной. Число сигнальных событий, полученных в результате отбора, для всех рассматриваемых процессов и чистота сигнала приведены в таблице 1.

Для подгонки полученные выражения для зависящей от времени вероятности распадов поправлены на эффективности реконструкции и отбора событий, которые были получены из анализа моделирования. Кроме того, с помощью моделирования сделана оценка временного разрешения для нейтральных каонов в эксперименте Belle. Временное разрешение для большинства событий находится на уровне $\sim 1...2\%$, а в общем случае не превышает 5%. Такой результат позволяет без ущерба точности измерения не рассматривать эффекты разрешения по времени жизни нейтральных каонов.

Поскольку для измерения параметров распадов очарованных адронов особенно важны большие времена жизни, где статистика распадов невелика, подгонку распределений по времени жизни нейтральных каонов осуществляли методом наибольшего правдоподобия. Подгонка выполнена одновременно для двух распределений по времени жизни нейтральных каонов, соот-

ветствующих распадам очарованных адронов обоих знаков. Параметры CP -нарушения и время жизни нейтрального каона зафиксированы на среднемировых значениях, известных с хорошей точностью. На рисунках 6, 7, 8 представлена асимметрия распадов $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ и результаты подгонки для двухчастичных мод распада D_s^- , D_s^+ , D^0 -мезонов соответственно. Полученные численные результаты для отношения DCS/CF амплитуд распада и разностей сильных фаз представлены в таблице 2.

Таблица 2: Результаты измерения разности сильных фаз и отношения DCS/CF амплитуд в эксперименте Belle.

Мода распада	$\sqrt{r_f}$	$\delta, ^\circ$
$D^+ \rightarrow K_S \pi^+$	0.07 ± 0.10	-56 ± 61
$D_s^+ \rightarrow K_S K^+$	0.09 ± 0.12	-132 ± 103
$D^0 \rightarrow K_S \pi^0$	0.20 ± 0.15	-7 ± 40

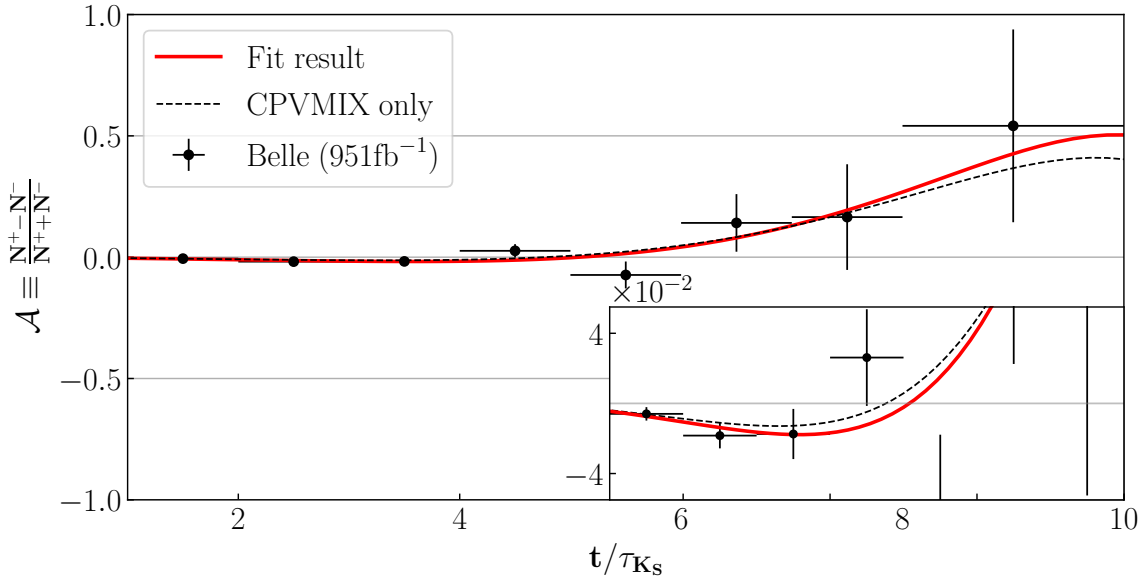


Рис. 6: Асимметрия распадов $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ для $D_s^+ \rightarrow \bar{K}^0 K^+$ и $D_s^- \rightarrow K^0 K^-$. Точки с ошибками – данные эксперимента Belle, красная линия – асимметрия распадов, полученная в результате подгонки параметров $\sqrt{r_f}$, δ , пунктирная линия – асимметрия распадов без учета DCS распадов.

Впервые наблюдалось нарушение CP -инвариантности в распадах нейтральных каонов из распадов очарованных адронов, причем впервые в эксперименте Belle. Эффект CP нарушения измерен для трех типов мезонов (D^0 , D^+ , D^0) на уровне значимости, превышающем 5 стандартных отклонений.

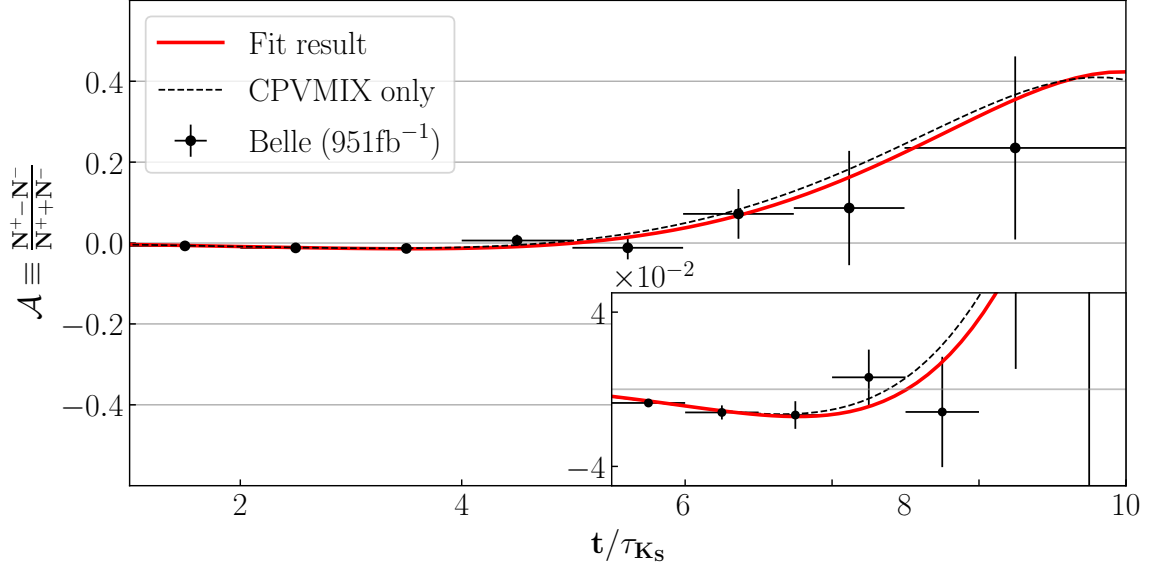


Рис. 7: Асимметрия распадов $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ для $D^+ \rightarrow \bar{K}^0\pi^+$ и $D^- \rightarrow K^0\pi^-$. Точки с ошибками – данные эксперимента Belle, красная линия – асимметрия распадов, полученная в результате подгонки параметров $\sqrt{r_f}$, δ , пунктирная линия – асимметрия распадов без учета DCS распадов.

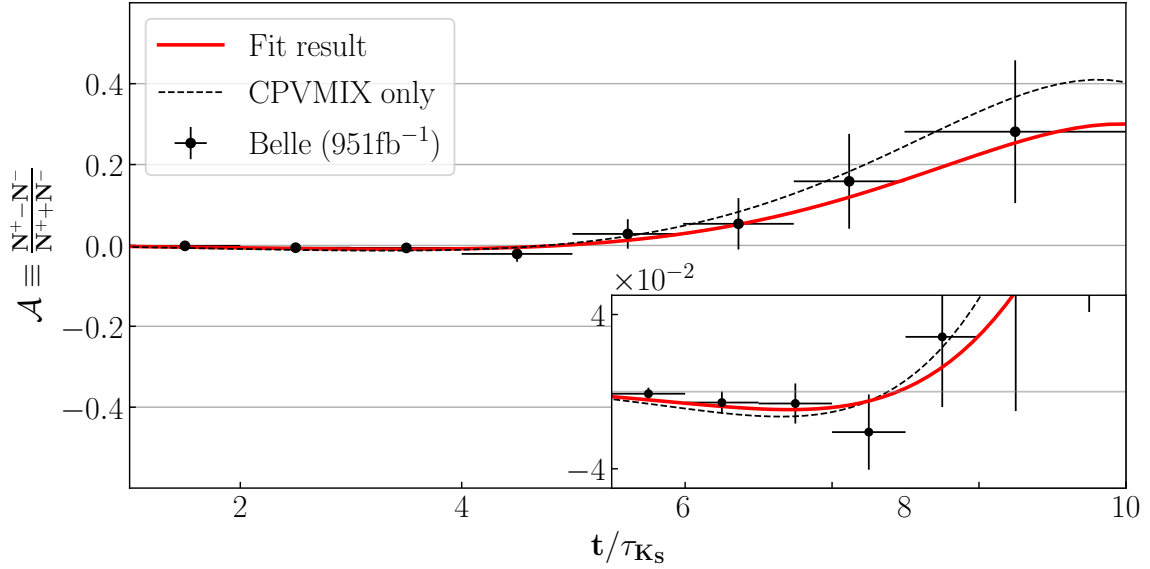


Рис. 8: Асимметрия распадов $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ для $D^0 \rightarrow \bar{K}^0\pi^0$ и $D^- \rightarrow K^0\pi^-$. Точки с ошибками – данные эксперимента Belle, красная линия – асимметрия распадов, полученная в результате подгонки параметров $\sqrt{r_f}$, δ , пунктирная линия – асимметрия распадов без учета DCS распадов.

В заклучении приведены основные результаты работы, которые заклю-

чаются в следующем:

1. Разработан новый метод измерения разности сильных фаз в распадах очарованных адронов с использованием полулептонных распадов каонов. Для суперпозиции нейтральных каонов, рожденной в распаде очарованного адрона, выполнен феноменологический анализ эволюции в собственные состояния аромата. Показано, что зависящая от времени вероятность полулептонного распада каонов чувствительна к параметрам начальной суперпозиции.
2. Разработан метод экспериментального восстановления полулептонных распадов в условиях современных экспериментов и определены способы подавления фона. На данных моделирования показано, что в условиях современных экспериментов, обладающих хорошим пространственным и импульсным разрешением, предложенный метод позволяет достичь требуемого разрешения по времени жизни нейтральных каонов. Поскольку малые времена жизни K^0 -мезонов не чувствительны к измеряемым параметрам, фон из первичной вершины можно эффективно подавить, а вклад от фоновых распадов долгоживущих частиц можно уменьшить требованиями идентификации лептона из распада каона и вето на процесс $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$.
3. Предложен новый метод измерения разности сильных фаз в распадах очарованных адронов с использованием распада $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Феноменологический анализ показал, что наличие CP -нарушения в системе нейтральных каонов позволяет эффективно разделить вклады $K^0(\bar{K}^0)$ в зависящую от времени вероятность распада $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, и, следовательно, извлечь параметры, рожденной в распаде тяжёлых адронов суперпозиции нейтральных каонов;
4. На основании $SU(3)_f$ -симметрии ароматов сделаны теоретические предсказания для разностей сильных фаз в распадах. Для распада $D_s^\pm \rightarrow K_S K^\pm$ получено значение $\delta_s^{0+} = (108 \pm 4)^\circ$, для канала распада $D^+ \rightarrow K_S \pi^\pm$ – значение $\delta^{0+} = (-76 \pm 4)^\circ$ и $\delta^{00} = (-3 \pm 6)^\circ$ – для распада $D^0 \rightarrow K_S \pi^0$;
5. Выполнена оценка потенциальной точности предложенных методов для эксперимента Belle II и эксперимента на будущей Супер c - τ -фабрике. Для эксперимента Belle II получены значения потенциальной точности – 7° , 4° , 6° для распадов D_s^- , D^+ - и D^0 -мезонов соответственно. Для

эксперимента на будущей c - τ -фабрике – 5° , 3° , 7° для распадов D_s^- , D^+ - и D^0 -мезонов соответственно;

6. Выполнены оценки систематических погрешностей для предложенных измерений, связанные с эффектами регенерации каонов на веществе детектора и смешиванием в системе очарованных адронов. Оценка неопределенности, вызванной регенерацией каонов показала, что систематическая погрешность, связанная с данным эффектом не превышает статистической погрешности измерения. В работе показано, что интегрирование по времени жизни D^0 -мезона приводит к незначительной неопределенности в измерении сильных фаз, не превышающей 1° , и вкладом смешивания для очарованных адронов можно пренебречь;
7. В рамках участия в эксперименте Belle II, в котором будет выполнено предложенное измерение разности сильных фаз, разработан метод калибровки кремниевых фотоумножителей мюонной системы детектора и автоматизирована процедура калибровки. Проанализирован ускорительный фон и предложены способы его подавления, когда светимость ускорителя Super KEKB достигнет проектных значений;
8. Сформулированы требования, предъявляемые к экспериментальным установкам для реализации предложенных методов измерения комплексных фаз в распадах тяжёлых адронов. Сформулированные требования актуальны для планируемого проекта Супер c - τ -фабрики.

Публикации автора по теме диссертации

- [A1] P. Pakhlov and V. Popov, “Measurement of $D^0 - \bar{D}^0$ mixing parameters using semileptonic decays of neutral kaon”, JHEP **02**, 160 (2020).
- [A2] V. Popov, “Strong-Phase Measurement in Charmed-Hadron Decays in Belle II Experiment and $c\text{--}\tau$ Factory”, Phys. Atom. Nucl. **83**, no.6, 980-983 (2020).
- [A3] P. Pakhlov and V. Popov, “Time-dependent study of $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ decays for flavour physics measurements”, JHEP **09**, 092 (2021).
- [A4] E. Kou, ..., V. Popov, *et al.* [Belle-II], “The Belle II Physics Book”, PTEP **2019**, no.12, 123C01 (2019) [erratum: PTEP **2020**, no.2, 029201 (2020)].

Список литературы

- [1] G. D. Rochester and C. C. Butler, “Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles”, Nature **160**, 855-857 (1947).
- [2] R. Brown, U. Camerini, P. H. Fowler, H. Muirhead, C. F. Powell and D. M. Ritson, “Observations With Electron Sensitive Plates Exposed to Cosmic Radiation”, Nature **163**, 82 (1949).
- [3] R. H. Dalitz, “Decay of tau mesons of known charge”, Phys. Rev. **94**, 1046-1051 (1954).
- [4] H. Albrecht *et al.* (Argus Collaboration), “Observation of B^0 - anti- B^0 Mixing”, Phys. Lett. B **192**, 245-252 (1987).
- [5] B. Aubert *et al.* (BaBar Collaboration), “Evidence for $D^0\text{--}\bar{D}^0$ mixing”, Phys. Rev. Lett. **98**, 211802 (2007).
- [6] M. Staric *et al.* (Belle Collaboration), “Evidence for $D^0\text{--}\bar{D}^0$ mixing”, Phys. Rev. Lett. **98**, 211803 (2007).
- [7] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), “Measurement of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates”, Phys. Rev. Lett. **122**, no. 23, 231802 (2019).
- [8] M. Kobayashi and T. Maskawa, “CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction”, Prog. Theor. Phys. **49**, 652-657 (1973).

- [9] S. L. Glashow, J. Iliopoulos and L. Maiani, “Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry”, Phys. Rev. D **2**, 1285-1292 (1970).
- [10] G. Blaylock, A. Seiden and Y. Nir, “The Role of CP violation in D0 anti-D0 mixing”, Phys. Lett. B **355**, 555-560 (1995).
- [11] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), “Observation of CP Violation in Charm Decays”, Phys. Rev. Lett. **122**, no.21, 211803 (2019).
- [12] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), “Search for time-dependent CP violation in $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays”, arXiv:2105.09889 [hep-ex].
- [13] W. Altmannshofer, R. Primulando, C. T. Yu and F. Yu, “New Physics Models of Direct CP Violation in Charm Decays”, JHEP **04**, 049 (2012).
- [14] K. Wang and G. Zhu, “Can Up FCNC solve the ΔA_{CP} puzzle?”, Phys. Lett. B **709**, 362-365 (2012).
- [15] C. H. Chen, C. Q. Geng and W. Wang, “CP violation in $D^0 \rightarrow (K^- K^+, \pi^- \pi^+)$ from diquarks”, Phys. Rev. D **85**, 077702 (2012).
- [16] G. F. Giudice, G. Isidori and P. Paradisi, “Direct CP violation in charm and flavor mixing beyond the SM”, JHEP **04**, 060 (2012).
- [17] X. Chang, M. K. Du, C. Liu, J. S. Lu and S. Yang, “LHCb ΔA_{CP} of D Meson and R-Parity Violation”, arXiv:1201.2565 [hep-ph].
- [18] Y. Grossman, A. L. Kagan and Y. Nir, “New physics and CP violation in singly Cabibbo suppressed D decays”, Phys. Rev. D **75**, 036008 (2007).
- [19] M. Golden and B. Grinstein, “Enhanced CP Violations in Hadronic Charm Decays”, Phys. Lett. B **222**, 501-506 (1989).
- [20] E. Franco, S. Mishima and L. Silvestrini, “The Standard Model confronts CP violation in $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ and $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ ”, JHEP **05**, 140 (2012).
- [21] M. B. Voloshin and M. A. Shifman, “On the annihilation constants of mesons consisting of a heavy and a light quark, and $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^{-0}$ oscillations”, Sov. J. Nucl. Phys. **45**, 292 (1987) ITEP-54-1986.
- [22] M. A. Shifman and M. B. Voloshin, “On Production of d and D* Mesons in B Meson Decays”, Sov. J. Nucl. Phys. **47**, 511 (1988) ITEP-87-64.

- [23] J. Brod, A. L. Kagan, and J. Zupan, “Size of direct CP violation in singly Cabibbo-suppressed D decays”, Phys. Rev. D **86**, 014023 (2012).
- [24] G. Hiller, M. Jung, and S. Schacht, “SU(3)-flavor anatomy of nonleptonic charm decays”, Phys. Rev. D **87**, no.1, 014024 (2013).
- [25] J. Brod, Y. Grossman, A. L. Kagan, and J. Zupan, “A Consistent Picture for Large Penguins in $D \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $K^+ K^-$ ”, JHEP **10**, 161 (2012).
- [26] Y. Grossman and D. J. Robinson, “SU(3) Sum Rules for Charm Decay”, JHEP **1304**, 067 (2013).
- [27] F. Buccella, A. Paul, and P. Santorelli, “ $SU(3)_F$ breaking through final state interactions and CP asymmetries in $D \rightarrow PP$ decays”, Phys. Rev. D **99**, no.11, 113001 (2019).
- [28] T. Abe *et al.* (Belle-II Collaboration), “Belle II Technical Design Report”, [arXiv:1011.0352](https://arxiv.org/abs/1011.0352) (2010).
- [29] A. E. Bondar *et al.* (Charm-Tau Factory Collaboration), “Project of a Super Charm-Tau factory at the Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk”, Phys. Atom. Nucl. **76**, 1072 (2013).
- [30] H. S. Chen, “Tau charm factory project at Beijing”, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **59**, 316 (1997).
- [31] A. Abashian, *et al.*, “The Belle Detector”, Nucl. Instrum. Meth. A **479** (2002), 117-232
- [32] T. Aushev, *et al.*, “A scintillator based endcap K_L and muon detector for the Belle II experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A **789**, 134-142 (2015).