

## ФИЗИКА ОЧАРОВАННОГО КВАРКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ LHCb

*А. А. Дзюба*<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, 199034, Россия

<sup>2</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина,  
188300, Россия

Эксперимент LHCb, проводящийся на Большом адронном коллайдере (БАК, ЦЕРН), направлен на изучение процессов рождения и свойств адронов, содержащих в своем составе тяжелые кварки ( $c$  и  $b$ ). Уникальные возможности LHCb (высокое сечение рождения очарованных и прелестных адронов, точное выделение вершин их рождения и распада, надежная идентификация типа зарегистрированной частицы и др.) позволяют исследовать адронный спектр, наблюдать новые (в том числе подавленные) моды распадов адронов, проводить поиск и исследование CP-нарушающих процессов, осуществлять поиск новой физики путем исследования редких распадов  $c$ - и  $b$ -адронов. В статье представлен обзор результатов LHCb в области физики очарованного кварка.

The LHCb experiment at the Large Hadron Collider (LHC, CERN) is designed to study the production mechanisms and properties of hadrons containing heavy quarks (charm and beauty). The unique capabilities of LHCb, such as the high production cross section of charm and beauty hadrons, precise reconstruction of their production and decay vertices, and reliable particle identification, enable a broad research programme. This includes investigations of the hadron spectrum, observation of new (including suppressed) decay modes, studies of CP-violating processes, and searches for New Physics through the analysis of rare decays of  $c$  and  $b$  hadrons. This paper presents a review of LHCb results in the field of charm quark physics.

PACS: 14.65.Dw

### ВВЕДЕНИЕ

Очарованные кварки ( $c$ ) занимают уникальное положение в Стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц. Это самый тяжелый ( $m_c \approx 1,5$  ГэВ) кварк верхнего типа ( $Q_c = +2/3|e|$ ), образующий связанные адронные состояния. Таким образом, прецизионное измерение их свойств дает возможности поиска эффектов новой физики (НФ), связанных с верхними кварками СМ. Малость CP-нарушающих эффектов СМ для очарованных адронов открывает широкие перспективы поиска

---

\* E-mail: dzyuba\_aa@npni.nrcki.ru

НФ-эффектов такого рода. Наконец, тот факт, что масса  $c$  сопоставима с энергетической шкалой непертурбативной квантовой хромодинамики ( $\Lambda_{\text{КХД}}$ ), делает очарованный кварк идеальным полигоном для тестирования методов КХД в таком режиме, осуществляя спектроскопические измерения для  $c$ -адронов.

В настоящее время физика очарованного кварка изучается на  $e^+e^-$ - и адронных коллайдерах в широком диапазоне энергий пучков. Первые обеспечивают низкофоновые измерения (в том числе для квантово-запутанных пар очарованных мезонов) и незаменимы для исследований распадов  $c$ -адронов с нейтральными частицами в конечном состоянии. К достоинствам адронных коллайдеров относится возможность накопить большой экспериментальный набор данных, что необходимо для поиска новых очарованных адронных состояний, поиска эффектов СР-нарушения и исследования редких распадов  $c$ -адронов. Именно эти направления исследований физики очарованного кварка являются одной из задач эксперимента ЛНСб, располагающегося на Большом адронном коллайдере в Европейском центре ядерных исследований.

В данной статье описываются достижения ЛНСб в области физики очарованного кварка. Описанные результаты получены на основе набора экспериментальных данных, накопленных ЛНСб в ходе первых двух сеансов работы БАК в 2010–2018 гг., соответствующих интегральной светимости  $9 \text{ фб}^{-1}$ . Согласно политике экспериментов БАК, все их публикации находятся в открытом доступе, поэтому в данном обзоре приведены ссылки лишь на избранные публикации ЛНСб, содержащие более обширный библиографический раздел по соответствующим темам исследований.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ ЛНСб

ЛНСб — это международное сотрудничество, в состав которого входят более 1700 ученых, инженеров и техников из 100 университетов и лабораторий, представляющих 22 страны. Участники сотрудничества спроектировали, построили и эксплуатируют детектор, установленный на БАК в ЦЕРН. Эксперимент ЛНСб на БАК — это спектрометр, регистрирующий частицы, вылетающие близко к оси пучков БАК. Он перекрывает угловой диапазон от 10 до 250 мрад. В силу того, что сечение доминирующего канала рождения тяжелых кварков, глюон-глюонный синтез (рис. 1, *a*), велико в этой области ( $1,4 \cdot 10^{13} \text{ сб-пар}$  при интегральной светимости  $9 \text{ фб}^{-1}$ ), ЛНСб накопил *наибольшее* в мировой практике число событий, содержащих очарованные адроны. Уникальными составляющими ЛНСб являются (рис. 1, *б*) [1]:

— вершинный детектор (VELO), обеспечивающий надежную регистрацию топологии цепочек распадов, что позволяет надежно выделять вершины, соответствующие событиям слабых распадов очарованных адронов. Так как лоренцевский  $\gamma$ -фактор для таких адронов велик, это

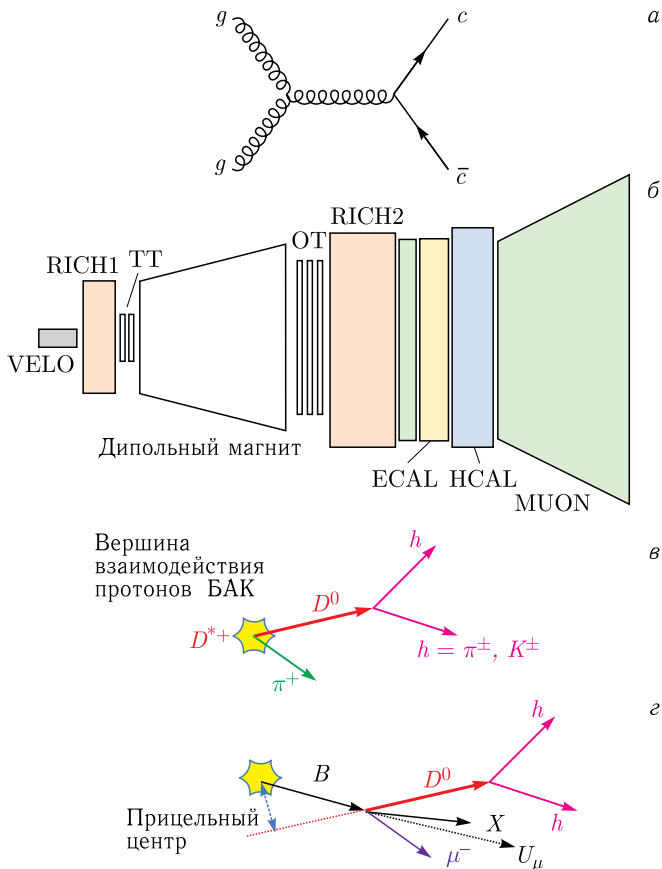


Рис. 1. а) Диаграмма, описывающая процесс глюон-глюонного синтеза. б) Схема детекторных систем ЛHCб. Методы определения аромата  $D^0$ -мезона: прямой (в) и лептонный (г)

также открывает широкие возможности прецизионного измерения их времен жизни;

— системы трекинга заряженных частиц (ТТ, ОТ) в поле дипольного магнита, обеспечивающие разрешение по массе в диапазоне 0,5–5 МэВ;

— два детектора излучения Вавилова–Черенкова (RICH1,2), позволяющие надежно разделить треки электронов, мюонов, пионов, каонов и протонов, обеспечивая тем самым возможность исследования большого спектра конечных состояний очарованных адронов;

— система электромагнитного (ECAL) и адронного (HCAL) калориметров, обеспечивающая эффективный аппаратный триггер;

— высокоэффективный мюонный детектор (MUON).

В измерениях, направленных на изучение процессов смешивания и эффектов нарушения CP-инвариантности, необходимо определять аромат наблюдаемой частицы. В ЛНСб используется два подхода. Первый (прямой, рис. 1, *в*) основан на определении заряда  $\pi$ -мезона в распадах  $D^*$ -мезонов, образующихся в точке взаимодействия протонов, а второй (лептонный, рис. 1, *з*) определяет аромат  $D^0$ -мезонов, образовавшихся в распадах  $b$ -адронов, путем определения заряда мюона из конечного состояния этого же распада.

## 2. СПЕКТРОСКОПИЯ ОЧАРОВАННЫХ АДРОНОВ

Уникальные возможности идентификации типа частицы, доступные на ЛНСб, открывают широкие перспективы поиска новых частиц в адронном спектре. По состоянию на лето 2025 г. ЛНСб открыл 25 новых адронных состояний [2–5], названия и параметры которых приведены в табл. 1 (все неопределенности сложены квадратично). Следует особо отметить открытие частиц с двойным очарованием ( $C = 2$ ), в том числе тетракварка  $T_{cc}(3875)^+$ .

Для очарованных барионов, включая  $\Xi_{cc}^{++}$ , были проведены прецизионные измерения времен жизни [6]. Для барионов с  $C = 1$  эти измерения проводили двумя способами: используя барионы, появившиеся непосредственно в точке взаимодействия протонов (аналогично рис. 1, *в*), а также из распада  $b$ -барионов (по аналогии с рис. 1, *з*). Измерения позволили уточнить иерархию времен жизни очарованных адронов.

Таблица 1. Адроны с открытым очарованием, открытые ЛНСб

Адрон	Масса, МэВ	Ширина, МэВ	Адрон	Масса, МэВ	Ширина, МэВ
Мезоны			Барионы ( $C = 1$ )		
$D_{s_2}^*(2573)^+$	$2568,39 \pm 0,39$	$16,9 \pm 0,8$	$\Lambda_c(2860)^+$	$2881,75 \pm 0,29$	$5,43 \pm 0,77$
$D_{s0}(2590)^0$	$2591 \pm 9$	$89 \pm 20$	$\Xi_c(2923)^0$	$2923,04 \pm 0,34$	$7,1 \pm 2,0$
$D_J^*(2740)^0$	$2737,0 \pm 11,7$	$73,2 \pm 28,3$	$\Xi_c(2923)^+$	$2922,8 \pm 0,6$	$5,3 \pm 1,7$
$D_3^*(2760)^0$	$2760,1 \pm 3,9$	$74,4 \pm 19,4$	$\Xi_c(2939)^0$	$2938,55 \pm 0,30$	$10,2 \pm 1,4$
$D_{s_1}^*(2860)^+$	$2859 \pm 0,33$	$159 \pm 80$	$\Xi_c(2965)^0$	$2964,88 \pm 0,33$	$14,1 \pm 1,6$
$D_{s_3}^*(2860)^+$	$2860,5 \pm 7,0$	$188,1 \pm 44,8$	$\Omega_c(3000)^0$	$3000,44 \pm 0,27$	$3,83 \pm 1,6$
$D_J^*(3000)^0$	$2971,8 \pm 8,7$	$110,5 \pm 11,5$	$\Omega_c(3050)^0$	$3050,18 \pm 0,24$	$< 1,8$ (95 % CL)
$D_J^*(3000)^{+,0}$	$3008,1 \pm 4,0$	$110,5 \pm 11,5$	$\Omega_c(3066)^0$	$3065,63 \pm 0,25$	$3,79 \pm 0,51$
Тетракварки			$\Omega_c(3090)^0$	$3090,16 \pm 0,27$	$8,48 \pm 1,68$
$T_{cs0}^*(2870)^0$	$2866 \pm 7$	$57 \pm 13$	$\Omega_c(3119)^0$	$3118,98 \pm 0,35$	$< 2,5$ (95 % CL)
$T_{cs1}^*(2900)^0$	$2904 \pm 5$	$110 \pm 12$	$\Omega_c(3185)^0$	$3185,1 \pm 7,5$	$50 \pm 22$
$T_{cs0}^*(2900)^{++}$	$2921 \pm 26$	$137 \pm 36$	$\Omega_c(3327)^0$	$3327,1 \pm 1,8$	$20 \pm 14$
$T_{cs0}^*(2900)^0$	$2892 \pm 21$	$119 \pm 29$	Барионы ( $C = 2$ )		
$T_{cc}(3875)^+$	$3874,83 \pm 0,09$	$0,41 \pm 0,17$	$\Xi_{cc}^{++}$	$3621,55 \pm 0,38$	Слабый распад

### 3. СМЕШИВАНИЕ В СИСТЕМЕ $D^0$ -МЕЗОНОВ

Структура и параметры лагранжиана СМ, описывающего слабые заряженные токи, т. е. переходы, вызванные действием  $W^\pm$ -бозонов, допускают осцилляции электрически нейтральных мезонов, в которых аромат адрона изменяется на две единицы, т. е. частица превращается в античастицу. На языке фейнмановских диаграмм эти процессы описываются петлевыми диаграммами типа «ящик».

Смешивание означает, что для электрически нейтральных мезонов, обладающих тем или иным открытым ароматом, массовые состояния системы являются линейной комбинацией состояний по аромату. Например, по очарованию:  $|D_{1,2}\rangle \equiv p|D^0\rangle \pm q|\bar{D}^0\rangle$ . В этом выражении  $p$  и  $q$  — комплексные параметры ( $p^2 + q^2 = 1$ ). Если СР-симметрия не нарушается, то массовые состояния  $|D_{1,2}\rangle$  являются одновременно СР-четным и СР-нечетным собственными состояниями соответственно. Смешивание состояний по аромату описывается двумя безразмерными параметрами  $x \equiv (m_1 - m_2)/\Gamma$  и  $y \equiv (\Gamma_1 - \Gamma_2)/(2\Gamma)$ , где  $m_{1,2}$  и  $\Gamma_{1,2}$  — массы и ширины  $D_{1,2}$ -состояний, а  $\Gamma$  — средняя ширина распада. Если  $D^0$  и  $\bar{D}^0$  распадаются в одно и то же конечное состояние, то нарушение СР-инвариантности в процессах смешивания проявляется как  $|q/p| \neq 1$ , а в интерференции процессов смешивания и распада как отличие от нуля фазового параметра  $\varphi_f \equiv \arg(qA_f/pA_f)$ , где  $A$  — амплитуда распада.

До начала работы LHCb другими экспериментами были надежно установлены осцилляции в системах  $K^0 - \bar{K}^0$ ,  $B^0 - \bar{B}^0$  и  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ . Для системы, содержащей кварки верхнего типа  $u$  и  $c$ , существовали лишь указания на осцилляции ( $D^0 - \bar{D}^0$ ), полученные экспериментами Belle и BaBar на электрон-позитронных коллайдерах. Таким образом, перед коллаборацией LHCb стояла задача обнаружения осцилляций, прецизионного измерения их параметров ( $x$  и  $y$ ) и поиска СР-нарушения для этих процессов (измерение  $|q/p|$  и  $\varphi$ ).

Одним из методов поиска осцилляций является измерение отношения вероятностей дважды-кабиббо-подавленного ( $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ ) и кабиббо-разрешенного ( $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ ) каналов распада  $D^0$ -мезона в зависимости от времени его жизни. Процессы смешивания приводят к тому, что это отношение растет с ростом времени жизни, так как для  $\bar{D}^0$ -мезона заряды в системе каонов и пионов конечного состояния для дважды-кабиббо-подавленного и кабиббо-разрешенного каналов противоположны случаю распада  $D^0$ . Начальный аромат очарованного адрона фиксируется при помощи процедуры, описанной в разд. 1. Используя данный метод, в эксперименте LHCb *впервые* измерили  $D^0 - \bar{D}^0$ -осцилляции со статистической значимостью более чем 5 стандартных отклонений [7].

Также процессы смешивания исследовались при помощи изучения трехчастичных распадов  $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$  [8]. В этих исследованиях было *впервые* со значимостью более чем  $7\sigma$  установлено отличие от нуля

Таблица 2. Измеренные значения параметров  $D^0-\bar{D}^0$ -смешивания и CP-нарушения [8]

$x$	$y$	$ q/p $	$\varphi$
$3,98^{+0,56}_{-0,54} \cdot 10^3$	$4,6^{+1,5}_{-1,4} \cdot 10^3$	$0,996 \pm 0,052$	$-0,056^{+0,047}_{-0,051}$

параметра  $x$ , т. е. измерена разность масс состояний  $D_1$  и  $D_2$ . Она составила  $6,4 \cdot 10^{-6}$  эВ или  $10^{-38}$  г, что является рекордной точностью измерения разностей масс. Измеренные значения параметров смешивания приведены в табл. 2.

#### 4. ПОИСК И ОБНАРУЖЕНИЕ CP-НАРУШАЮЩИХ ЭФФЕКТОВ

Поиск новых источников нарушения CP-инвариантности чрезвычайно важен для понимания процесса эволюции Вселенной в первые секунды после так называемого Большого взрыва. Отличие свойств частиц и античастиц проявляет себя в неинвариантности фундаментальных взаимодействий относительно совместного применения операций зарядового сопряжения ( $C$ ) и зеркального отражения ( $P$ ), что является одним из трех необходимых условий, предложенных А. Д. Сахаровым, для описания процесса динамической генерации барионной асимметрии Вселенной. CP-нарушение обнаружено в кварковом секторе SM. Этот эффект объясняется существованием неустранимой комплексной фазы в матрице кваркового смешивания. До 2019 г. эффекты CP-нарушения были обнаружены только для адронов, содержащих в своем составе нижние кварки ( $d, s, b$ ). Очарованный кварк относится к кваркам верхнего типа ( $u, c, t$ ). SM предсказывает очень малые (порядка  $10^{-3}-10^{-4}$ ) эффекты CP-нарушения для очарованных адронов.

Для адронов возможны три типа проявления CP-нарушения: прямое CP-нарушение в распадах адронов (измеряется через CP-асимметрию распадов), косвенное CP-нарушение в процессах смешивания электрически нейтральных мезонов, а также CP-нарушение в интерференции процессов распада и смешивания.

В 2019 г. экспериментаторы ЛНСб объявили об обнаружении CP-нарушения в распадах  $D^0$ -мезонов. Для того чтобы обнаружить эффект нарушения CP-четности, необходимо установить отличие вероятностей распадов  $D^0$ - и  $\bar{D}^0$ -мезонов для какого-то из каналов распада. Для подсчета изначального количества частиц и античастиц применялись оба метода определения аромата адрона, описанные в разд. 1. Использовались распады в CP-четные конечные состояния:  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  и  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ , что позволило сократить эффекты, связанные с асимметрией детектирования продуктов распада. Исследование разности асимметрий распадов для каналов  $K^- K^+$  и  $\pi^- \pi^+$  (наблюдаемая  $\Delta A_{CP}$ ) позволяет сократить асимметрии сечений рождения  $D^0$ , а также асимметрии определения

аромата очарованного мезона. Ненулевое значение наблюдаемой  $\Delta A_{CP}$  свидетельствует о CP-нарушении [9]. Измеренное LHCb значение  $\Delta A_{CP}$  составило  $(-15,4 \pm 2,9) \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, эффект CP-нарушения был *впервые* обнаружен на уровне статистической значимости  $5,3\sigma$ , что является первым наблюдением CP-нарушения для очарованных адронов.

В дальнейшем эти исследования были продолжены измерением усредненной по времени CP-асимметрии для распада  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  [10]. В этих исследованиях использовалась только прямая техника определения начального аромата очарованного мезона. Измеренное значение CP-асимметрии составило  $A_{CP}(K^- K^+) = (6,8 \pm 5,4(\text{стат.}) \pm 1,6(\text{сист.})) \cdot 10^{-4}$ .

Используя полученные значения  $\Delta A_{CP}$  и  $A_{CP}(K^- K^+)$ , можно определить асимметрии, соответствующие прямой CP-нарушению для каналов распада  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  и  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ . Они составили  $a^d(K^- K^+) = (7,7 \pm 5,7) \cdot 10^{-4}$  и  $a^d(\pi^- \pi^+) = (23,2 \pm 6,1) \cdot 10^{-4}$ . Коэффициент корреляции между  $a^d(K^- K^+)$  и  $a^d(\pi^- \pi^+)$  составил 0,88. Статистическая значимость эффектов CP-нарушения для этих каналов равна  $1,4\sigma$  и  $3,8\sigma$  соответственно. Таким образом, получено *первое* указание на прямое нарушение комбинированной четности для конкретного канала распада очарованного адрона:  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ .

Проявление прямого CP-нарушения также исследовалось в двухчастичных распадах  $D^0$  в конечное состояние  $K_S^0 K_S^0$ , а также распадов  $D_{(s)}^+$  по каналам:  $\pi^+ \pi^0$ ,  $K^+ \pi^0$ ,  $\pi^+ \eta^{(\prime)}$  и  $K^+ \eta$ . Измерены значения соответствующих CP-асимметрий совместно с нулем для всех исследованных каналов распада [11]. Также эксперимент LHCb выполнил модельно-независимый поиск эффектов CP-нарушения для очарованного барiona в трехчастичном канале распада  $\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ . Полученные результаты согласуются с гипотезой об отсутствии проявления эффектов CP-нарушения для данного канала распада  $\Xi_c^+$  [12].

Экспериментальное исследование процессов смешивания для  $D^0$ -мезонов позволило получить ограничения на величины  $|q/p|$  и  $\varphi$ . Эти измерения не выявили CP-нарушающих эффектов (см. табл. 2). Таким образом, были установлены наиболее строгие экспериментальные ограничения на проявление нарушения CP-инвариантности при смешивании  $D^0$ -мезонов.

## 5. ИЗУЧЕНИЕ РЕДКИХ РАСПАДОВ ОЧАРОВАННЫХ АДРОНОВ

В SM распады  $D^0$ -мезонов с испусканием лептонной пары (содержащие или не содержащие дополнительный адрон в конечном состоянии) описываются  $c \rightarrow u$  меняющимися аромат нейтральными токами. Такие процессы запрещены на древесном уровне SM, однако возможны на петлевом уровне. Для очарованных кварков такие токи очень сильно подавлены, и их обнаружение находится за пределами эксперименталь-

ных возможностей современного эксперимента физики частиц. Новые фундаментальные поля и частицы могут давать дополнительные вклады в диаграммы, описывающие эти распады, что может существенно увеличить их интенсивность. Так, например, обнаружение распада  $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  с вероятностью на уровне  $10^{-9}$  будет являться однозначным свидетельством существования НФ.

С использованием всего набора Run 1 и Run 2 соответствующей интегральной светимости  $9 \text{ фб}^{-1}$  эксперимента ЛНСб удалось поставить ограничения на вероятность распада  $D^0$  в мюонную пару:  $B(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3,1 \pm 10^{-9}$  (90% CL) [13].

Другими интересными редкими распадами являются процессы с CP-четными конечными состояниями:  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$  и  $D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$ . В СМ такие процессы могут возникать при распадах с промежуточным мезоном (например,  $\rho$  или  $\omega$ ), далее распадающимся на мюонную пару. Вероятности таких процессов:  $10^{-7} - 10^{-6}$ . На статистике, набранной в ходе первых двух этапов работы БАК, в эксперименте ЛНСб *впервые* наблюдаются эти каналы распада, а затем проведена серия измерений наблюдаемых, чувствительных к проявлению эффектов CP-нарушения в этих распадах (предполагается, что НФ может включать в себя такие эффекты). Нарушения CP-инвариантности не обнаружено [14].

Следует отметить, что исследования редких распадов с образованием мюонов стали возможны во многом благодаря стабильной работе мюонной системы эксперимента ЛНСб, которая была разработана, создана, введена в эксплуатацию и эксплуатировалась благодаря усилиям сотрудников Отделения физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безупречная работа детектора ЛНСб в течение первых двух сеансов набора данных БАК в условиях высокой светимости позволила получить множество фундаментальных результатов по физике очарованных кварков. Эксперимент позволил подтвердить статус «мегафабрики» очарованных адронов. Внесен неоценимый вклад в спектроскопию очарованных адронов, занято доминирующее положение в исследованиях процессов смешивания и CP-нарушения для них, а также значительно расширены границы поиска редких распадов этих частиц, в том числе в мюонном канале. Наиболее значимыми открытиями ЛНСб в области физики очарованного кварка являются: открытие более двух десятков новых адронных состояний, содержащих в своем составе  $c$ -кварк; открытие бариона с двойным очарованием и исследование его свойств; открытие экзотического тетракваркового состояния с двойным очарованием; экспериментальное обнаружение осцилляций нейтральных  $D$ -мезонов и прецизионное измерение параметров, описывающих этот феномен; откры-

тие эффекта нарушения CP-четности в распадах очарованных адронов. В настоящее время, пройдя процесс модернизации детекторных систем (LHCb Upgrade I), экспериментаторы набирают данные при показателях мгновенной светимости  $\sim 2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Запланированная вторая фаза модернизации детектора (LHCb Upgrade II) имеет целью достижение интегральной светимости  $300 \text{ фб}^{-1}$ , что открывает исключительные перспективы для получения новых прорывных результатов в физике очарованного кварка в ближайшем будущем [15].

**Конфликт интересов.** Автор являлся членом сотрудничества LHCb с 2012 по 2024 г., работал в группе анализа данных LHCb «Физика очарованного кварка» (Charm Quark Physics Analysis Working Group) эксперимента и является соавтором работ LHCb, представленных в библиографии [2–15].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *LHCb Collab.* The LHCb Detector at the LHC // J. Instrum. 2008. V.3. P. S08005.
2. *LHCb Collab.* Observation of a New Excited  $D_s^+$  Meson in  $B^0 \rightarrow D^- D^+ K^+ \pi^-$  Decays // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. P. 122002.
3. *LHCb Collab.* Observation of an Exotic Narrow Doubly Charmed Tetraquark // Nature Phys. 2022. V. 18. P. 7.
4. *LHCb Collab.* Observation of a New Charmed Baryon Decaying to  $\Xi_{cc}^+ \pi^+ \pi^-$  // Phys. Rev. Lett. 2025. V. 135. P. 161901; <https://arxiv.org/abs/2502.18987>.
5. *LHCb Collab.* Observation of New  $\Omega_c^0$  States Decaying to the  $\Xi_c^+ K^-$  Final State // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 131902.
6. *LHCb Collab.* Measurement of the  $\Omega_c^0$  and  $\Xi_c^0$  Baryon Lifetimes Using Hadronic  $b$ -Baryon Decays // JHEP. 2025. V. 9. P. 157; <https://arxiv.org/pdf/2506.13334>.
7. *LHCb Collab.* Search for Charge-Parity Violation in Semileptonically Tagged  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  Decays // JHEP. 2025. V. 3. P. 149.
8. *LHCb Collab.* Observation of the Mass Difference between Neutral Charm-Meson Eigenstates // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. P. 111801.
9. *LHCb Collab.* Observation of CP Violation in Charm Decays // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 211803.
10. *LHCb Collab.* Measurement of the Time-Integrated CP Asymmetry in  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  Decays // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 091802.
11. *LHCb Collab.* Measurement of CP Asymmetries in  $D_{(s)}^+ \rightarrow \eta \pi^+$  and  $D_{(s)}^+ \rightarrow \eta' \pi^+$  Decay // JHEP. 2023. V. 4. P. 81.
12. *LHCb Collab.* Search for CP Violation in  $\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$  Decays Using Model-Independent Techniques // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 986.
13. *LHCb Collab.* Search for Rare Decays of  $D^0$  Mesons into Two Muons // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 041804.
14. *LHCb Collab.* Angular Analysis of  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$  and  $D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$  Decays and Search for CP Violation // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 221801.
15. *LHCb Collab.* Physics Case for an LHCb Upgrade II — Opportunities in Flavour Physics, and beyond, in the HL-LHC Era. CERN-LHCC-2018-027, LHCb-PUB-2018-009; <https://arxiv.org/abs/1808.08865>.