



Результаты ЛНСб по измерению эффектов *СР*-нарушения

Алексей Дзюба, ЛБФ ОФВЭ НИЦ «КИ» – ПИЯФ

Семинар ОФВЭ, 2026-02-17

Аннотация

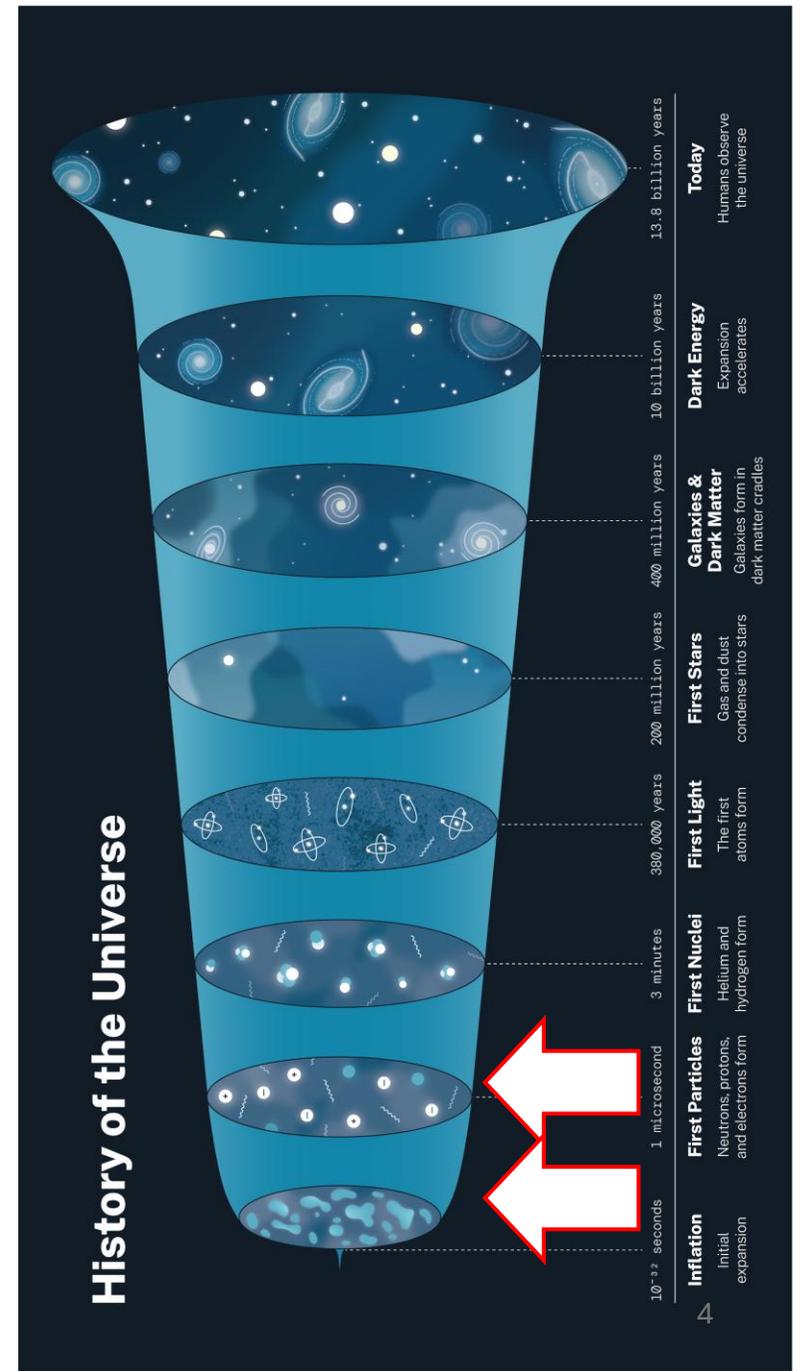
- Нарушение комбинированной четности (CP -симметрии) является необходимым условием для объяснения наблюдаемой барионной асимметрии Вселенной, что делает изучение известных и поиск новых CP -нарушающих эффектов одной из основных задач эксперимента LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК).
- Данный обзор представляет наиболее значимые результаты LHCb в этой области.

План доклада

- Прямое CP -нарушение в адронном секторе Стандартной Модели (СМ)
 - Небольшой обзор
 - Проявления CP -нарушения
 - P - и CP -нарушения и барионный сектор СМ
- Эксперимент LHCb:
 - Критерии отбора полезных событий
 - Выделение сигнала от распадов прелестных адронов
 - Эффективности, разрешение по времени жизни и таггинг
- Измерения **параметров треугольников унитарности**
- Важнейшие открытия LHCb:
 - 2012: Обнаружение прямого CP -нарушения в распадах B^+
 - 2013: Обнаружение прямого CP -нарушения в распадах B_s^0
 - 2019: Обнаружение прямого CP -нарушения в распадах **очарованных мезонов**
 - 2020: Обнаружение зависящего от времени CP -нарушения в распадах B_s^0 ;
 - 2020: Обнаружение **CP -нарушения в интерференции** между спин-1 $\rho(770)$ резонансов и спин-0 S -волновым вкладом в распаде $B^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$
 - 2025: Обнаружение прямого CP -нарушения в распадах **барионов**.

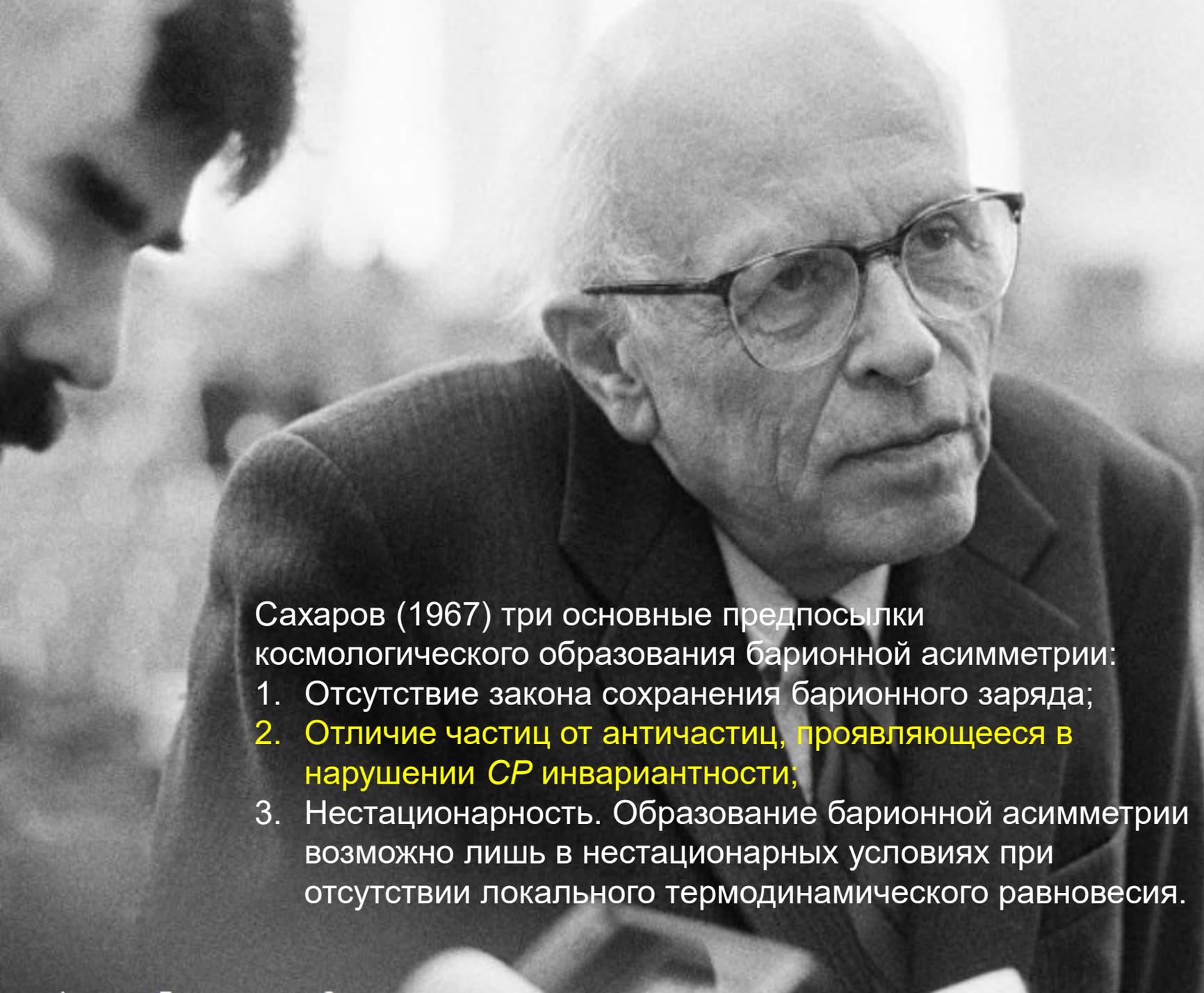
Почему видимая Вселенная состоит из материи?

- Наблюдения не показывают присутствия интенсивных аннигиляционных процессов
- Отношения числа реликтовых фотонов к числу барионов
 - $\eta = n_B / n_\gamma \sim 10^{-10}$
- Модель первичного нуклеосинтеза также свидетельствует о малости отношения η
- **Каков механизм генерации барионной асимметрии Вселенной?**
 - Большинство моделей исходят из **предположения**, что барионная асимметрия возникла после инфляционной стадии развития Вселенной



P , C и T , и CPT -теорема

- **Пространственная инверсия (P)** – преобразование, которое переводит $\{x, y, z\} \rightarrow \{-x, -y, -z\}$
 - Координаты и импульсы – P -нечетные величины
 - Спин – P -четная.
- **Зарядовое сопряжение (C)** изменяет заряд частиц, т.е. переводит частицу в античастицу.
 - Частицу и античастицу отличают знаки зарядов - электрического заряда Q , барионного числа B , лептонных чисел L_e, L_μ, L_τ , странности s , очарования c , прелести b , истинности t .
 - Операция зарядового сопряжения переводит частицы в античастицы, изменяет знаки зарядов, оставляя неизменными пространственные переменные x , импульс p и момент импульса J .
- **Операция обращения времени (T)** сводится к замене $t \rightarrow -t$
- **Квантовые системы инвариантны относительно CPT -преобразования в любой последовательности**
 - Следствием CPT -инвариантности является равенство масс и времен жизни частицы и античастицы
 - Так как слабые взаимодействия нарушают CP -четность, то в следствии CPT -теоремы, они нарушают T -инвариантность (**BaBar**: исследовались квантовые корреляции B -мезонов и была открыта ненулевая T -нечетная амплитуда, что является свидетельством нарушения T -инвариантности, см. *Rev Mod Phys* 87 165)



Сахаров (1967) три основные предпосылки космологического образования барионной асимметрии:

1. Отсутствие закона сохранения барионного заряда;
2. **Отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении CP инвариантности;**
3. Нестационарность. Образование барионной асимметрии возможно лишь в нестационарных условиях при отсутствии локального термодинамического равновесия.

Стандартная модель (СМ) демонстрирует CP -нарушение в кварковом секторе (матрица смешивания). Недостаточно для объяснения барионной асимметрии

Новая физика (НФ), то есть физика за пределами СМ предположительно должна содержать новые (дополнительные) эффекты CP нарушения

Одна из стратегий поиска эффектов НФ основана на прецизионных измерениях элементов матрицы смешивания (или их соотношений) и проверке условий её унитарности.

Эксперимент LHCb выполняет данные исследования, изучая характеристики распадов чармных мезонов.

Литература + видео (I/III)

Три возможности нарушения
CP в рамках SM+:

- *CP Violation in the Quark Sector* ([PDG](#))

1) Кварковый сектор
(Слабое взаимодействие)

- *Axions and Other Similar Particles* ([PDG](#))

- Дербин А.В., Экспериментальные поиски солнечных аксионов ([видео](#))
- Левков Д.Г., Легкая бозонная Темная Материя и аксионные звезды ([видео](#))

2) $\theta_{\text{кхд}}$ (Сильное взаимодействие)

- *Neutrino Masses, Mixing, and Oscillations* ([PDG](#))

- Самойлов О.Б., Результаты десятилетней работы эксперимента NOVA ([видео](#))
- Куденко Ю.Г., Нейтринная физика: современное состояние, аномалии, перспективы ([видео](#))

3) CP-нарушение при смешивании нейтрино (Слабое взаимодействие)

Литература + видео (II/III)

- Нейтральные токи с изменением кварковых ароматов и редкие распады K -мезонов, Л.Г. Ландсберг ([УФН 173 \(2003\) 1025](#))
- CP Violation in the Quark Sector, T. Gershon, Y. Nir ([PDG](#))
 - CKM Quark-Mixing Matrix, A. Ceccucci, Z. Ligeti, Y. Saka ([PDG](#))
 - CPT Invariance Tests in Neutral Kaon Decay, M. Antonelli, G. D'Ambrosio, M.S. Sozzi ([PDG](#))
 - CP Violation in K_L Decays, L. Wolfenstein, C.-J. Lin (LBNL), T.G. Trippe ([PDG](#))
 - D^0 - \bar{D}^0 Mixing, D.M. Asner, A.J. Schwartz ([PDG](#))
 - B^0 - \bar{B}^0 Mixing, O. Schneider ([PDG](#))
- Семинары LHC
 - CP violation searches in the **charm** sector at LHCb, Evelina Mihova Gersabeck ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Search for CP violation in **baryon** decays at LHCb, Jinlin Fu ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Precision measurements of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa **angle γ** at LHCb, Donal Hill ([Семинар ЦЕРН](#))
 - CP violation in **charm** decays with the LHCb experiment, Angelo Carbone ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Precision measurement of the CP -violating phase φ_s at LHCb, Francesca Dordei ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Searches for CP violation in multibody **baryon** decays at LHCb, Andrea Merli ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Time-dependent CP violation in B_s^0 decays at LHCb, Manuel Schiller ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Direct CP violation in the decay $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ at LHCb, Will Parker ([Семинар ЦЕРН](#))
 - New results on CP violation in **charm** decays at LHCb, Tommaso Pajero ([Семинар ЦЕРН](#))
 - New precise measurements of CP violation and mixing in **beauty** and **charm** decays at LHCb, Guillaume Pietrzyk Mark Whitehead ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Observation of CP violation in charmless three-body **B meson** decays at LHCb, Diego Machado ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Measurements of **$\sin(2\beta)$** and φ_s with the full LHCb data sample, Peilian Li, Vukan Jevtic ([Семинар ЦЕРН](#))
 - The **angle γ** of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa ansatz: a journey towards precision at LHCb, Martin Tat ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Evidence for CP violation in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ decays at the LHCb experiment, Wenbin Qian ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Measurement of CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ decays with the upgraded LHCb detector, Giulia Tuci ([Семинар ЦЕРН](#))
 - Precision measurements of the **CKM angle γ** , **charm** mixing and CP violation using the LHCb detector, Tim Evans ([Семинар ЦЕРН](#))
 - First measurement of the decay-time-integrated CP asymmetry in $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ decays at LHCb, Jamie Gooding ([Семинар ЦЕРН](#))

Литература + видео (III/III)

- Наблюдение CP -нарушения в распадах очарованных частиц ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- Смешивание электрически нейтральных мезонов. Новые результаты LHCb ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- Прецизионное измерение параметров CP -нарушения в распадах прелестных мезонов в эксперименте LHCb ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- CP -нарушение в распадах прелестных адронов ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))

Матрица кваркового смешивания \ ККМ \ СКМ

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Выбор нижних состояний - соглашение

Собственные состояния по отношению к слабому взаимодействию

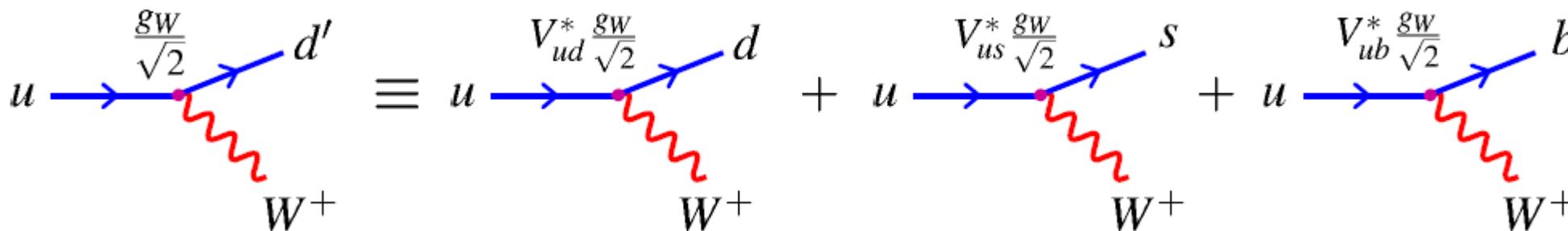
СКМ Matrix

Массовые собственные состояния

(Cabibbo, Kobayashi, Maskawa)

Расширение GIM механизма на третье поколение (Кобаяши, Маскава, 1973)

Фейнмановские вершины



Комплексные элементы \ Унитарная матрица \ Элементы матрицы – константы СМ устанавливаются экспериментально) \ Неустраняемая комплексная фаза \rightarrow CP -нарушение в кварковом секторе СМ

Параметризации ККМ-матрицы $s_{ij} = \sin \phi_{ij}, c_{ij} = \cos \phi_{ij}$

Три угла

смешивания и
комплексная фаза:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Иерархия элементов \(\backslash\) матрица близка к диагональной:

$$V_{\text{CKM}} \sim \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.974 & 0.226 & 0.004 \\ 0.23 & 0.96 & 0.04 \\ 0.01 & 0.04 & 0.999 \end{pmatrix}$$

Пр-я Вольфенштейна:

$$\sin \phi_{12} \equiv \lambda, \quad \sin \phi_{23} \equiv A\lambda^2, \quad \sin \phi_{13}e^{-i\delta} \equiv A\lambda^3(\rho - i\eta)$$

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda = 0.2257^{+0.0009}_{-0.0010}, A = 0.814^{+0.021}_{-0.022}, \rho = 0.135^{+0.031}_{-0.016}, \text{ and } \eta = 0.349^{+0.015}_{-0.017}.$$

Соотношения унитарности

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}|e^{-iy} \\ -|V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & -|V_{ts}|e^{i\beta_s} & |V_{tb}| \end{pmatrix}$$

Сумма по столбцам и строкам

$$\sum_k |V_{ik}|^2 = \sum_i |V_{ik}|^2 = 1$$

Треугольники унитарности (6 штук)

Следствие ненулевой комплексной

фазы

Площади всех треугольников

одинаковы **2J**

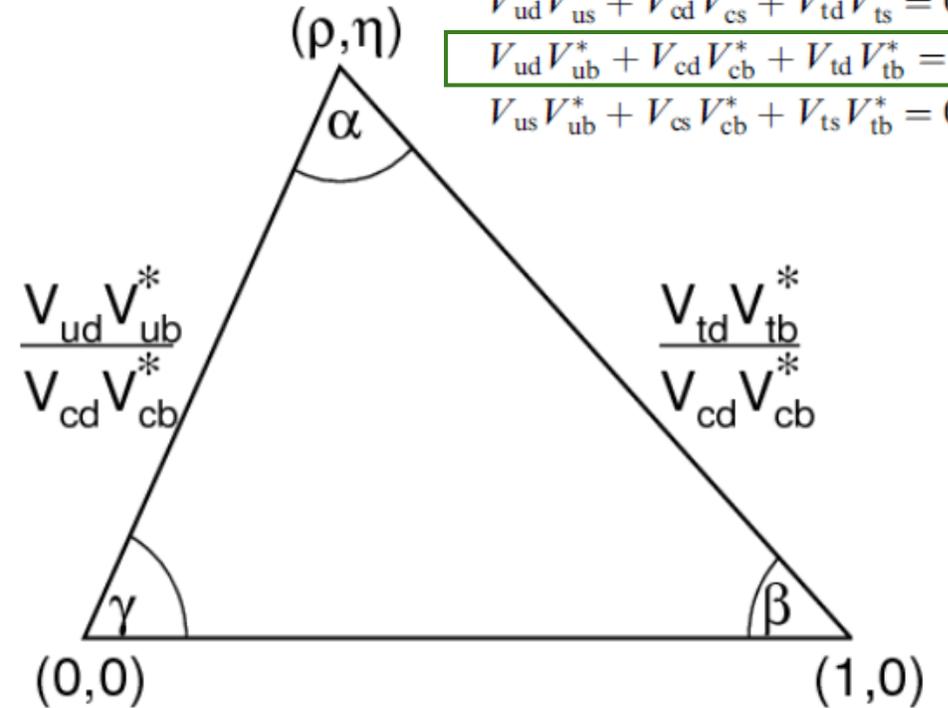
(**Инвариант Ярлског**)

$$J = c_{12}c_{13}^2c_{23}s_{12}s_{13}s_{23}\sin\delta \approx 3 \cdot 10^{-5}$$

Соотношения для недиагональных элементов

$$\sum_k V_{ik}V_{jk}^* = 0.$$

$$\begin{aligned} V_{ud}V_{cd}^* + V_{us}V_{cs}^* + V_{ub}V_{cb}^* &= 0, \\ V_{ud}V_{td}^* + V_{us}V_{ts}^* + V_{ub}V_{tb}^* &= 0, \\ V_{cd}V_{td}^* + V_{cs}V_{ts}^* + V_{cb}V_{tb}^* &= 0, \\ V_{ud}V_{us}^* + V_{cd}V_{cs}^* + V_{td}V_{ts}^* &= 0, \\ \boxed{V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^*} &= 0, \\ V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* &= 0. \end{aligned}$$



Бариогенезис и кварковый сектор СМ

- **Вклад КМ механизма в барионную асимметрию Вселенной** зависит от:

- Иерархии масс кварков
- Интенсивности СР-нарушения в КМ-механизме
- Энергетической шкалы, на которой происходит нарушение
 - Допустим: $M = M_{EW} \sim 100$ ГэВ

$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \sim \frac{n_B}{n_\gamma} \sim \frac{J \times P_u \times P_d}{M^{12}}$$

$$P_u = (m_t^2 - m_c^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_c^2 - m_u^2)$$

$$P_d = (m_b^2 - m_s^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_s^2 - m_d^2)$$

$$J \sim 3 \times 10^{-5}$$

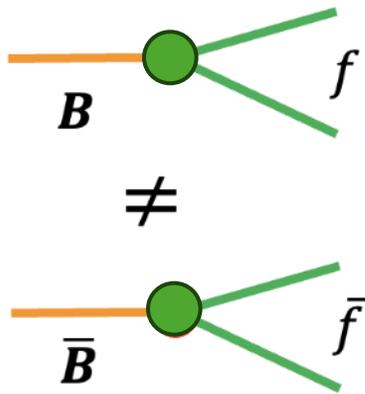


- **Механизм КМ дает четкие предсказания для прелестных и очарованных частиц**

- **Может ли дополнительное нарушение СР в секторе прелестных мезонов породить существенную барионную асимметрию Вселенной?**

$$\eta_{KM} \sim 10^{-17} \ll \eta_{obs} = \sim 10^{-10}$$

Типы CP-нарушения и наблюдаемые

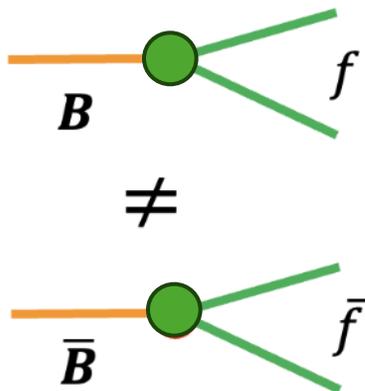


1) Прямое CP-
нарушение (нарушение
в распадах) →
асимметрии распадов

$$\Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}$$

$$A_{\text{CP}}^{\text{dir}} \propto \sin(\phi_{\text{weak}}^i - \phi_{\text{weak}}^j) \sin(\delta_{\text{strong}}^i - \delta_{\text{strong}}^j).$$

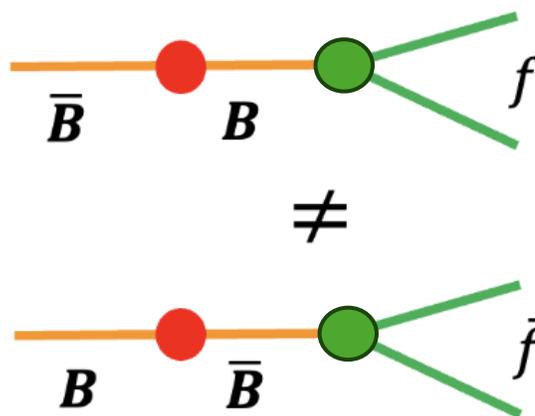
Типы CP-нарушения и наблюдаемые



1) Прямое CP-нарушение (нарушение в распадах) → асимметрии распадов

$$\Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}$$

$$A_{\text{CP}}^{\text{dir}} \propto \sin(\phi_{\text{weak}}^i - \phi_{\text{weak}}^j) \sin(\delta_{\text{strong}}^i - \delta_{\text{strong}}^j).$$



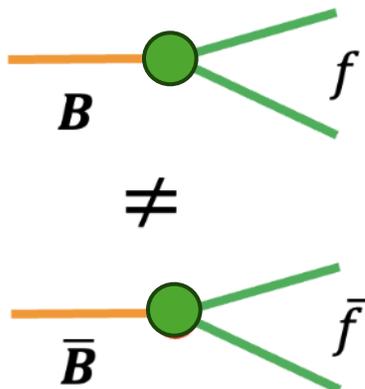
2) Косвенное CP-нарушение (нарушение при смешивании)

→ Несовпадение собственных состояний по массе и по оператору CP

→ Асимметрии распадов нейтральных мезонов, которая не зависит от времени

$$A_{\text{CP}}^{\text{ind}} = \frac{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}$$

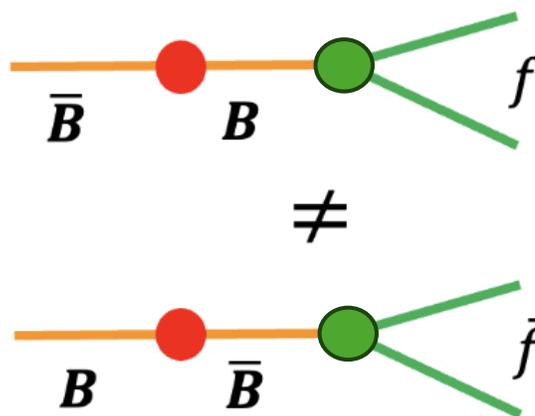
Типы CP-нарушения и наблюдаемые



1) Прямое CP-нарушение (нарушение в распадах) → асимметрии распадов

$$\Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}$$

$$A_{CP}^{dir} \propto \sin(\phi_{weak}^i - \phi_{weak}^j) \sin(\delta_{strong}^i - \delta_{strong}^j).$$



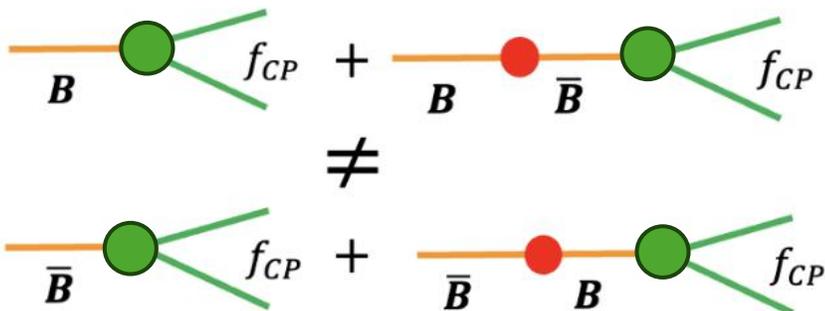
2) Косвенное CP-нарушение (нарушение при смешивании)

→ Несовпадение собственных состояний по массе и по оператору CP

→ Асимметрии распадов нейтральных мезонов, которая не зависит от времени

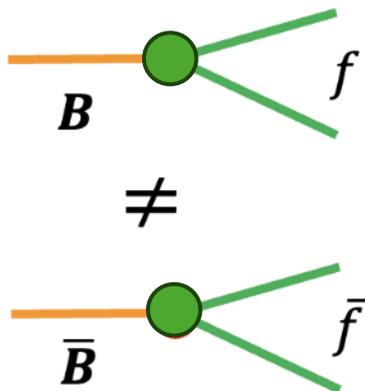
$$A_{CP}^{ind} = \frac{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}$$

3) Интерференция прямого и косвенного CP-нарушения → асимметрии распадов, которая зависит от времени



$$A_{CP}(t) = \frac{S \sin(\Delta mt) - C \cos(\Delta mt)}{\cosh(\frac{\Delta\Gamma t}{2}) - A_{\Delta\Gamma} \sinh(\frac{\Delta\Gamma t}{2})}$$

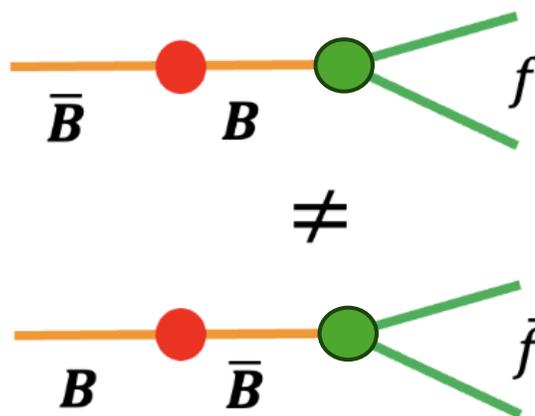
Типы CP-нарушения и наблюдаемые



1) Прямое CP-нарушение (нарушение в распадах) → асимметрии распадов

$$\Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}$$

$$A_{CP}^{dir} \propto \sin(\phi_{weak}^i - \phi_{weak}^j) \sin(\delta_{strong}^i - \delta_{strong}^j).$$



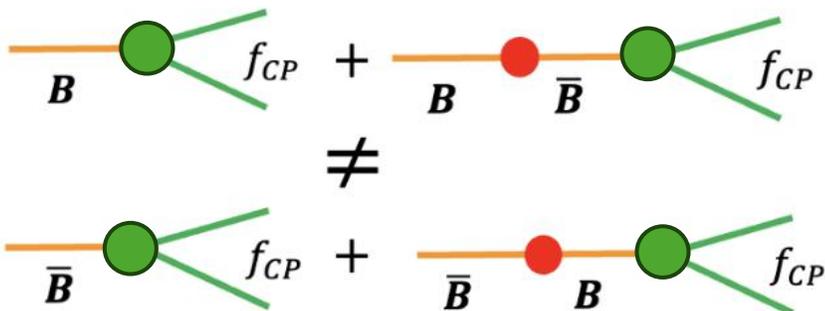
2) Косвенное CP-нарушение (нарушение при смешивании)

→ Несовпадение собственных состояний по массе и по оператору CP

→ Асимметрии распадов нейтральных мезонов, которая не зависит от времени

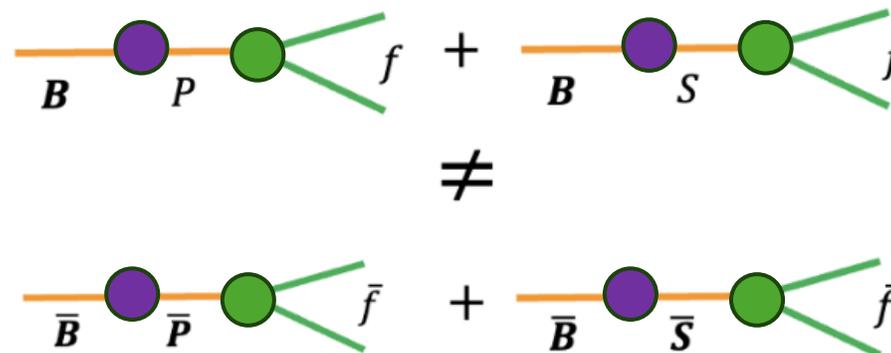
$$A_{CP}^{ind} = \frac{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}$$

3) Интерференция прямого и косвенного CP-нарушения → асимметрии распадов, которая зависит от времени



$$A_{CP}(t) = \frac{S \sin(\Delta mt) - C \cos(\Delta mt)}{\cosh(\frac{\Delta\Gamma t}{2}) - A_{\Delta\Gamma} \sinh(\frac{\Delta\Gamma t}{2})}$$

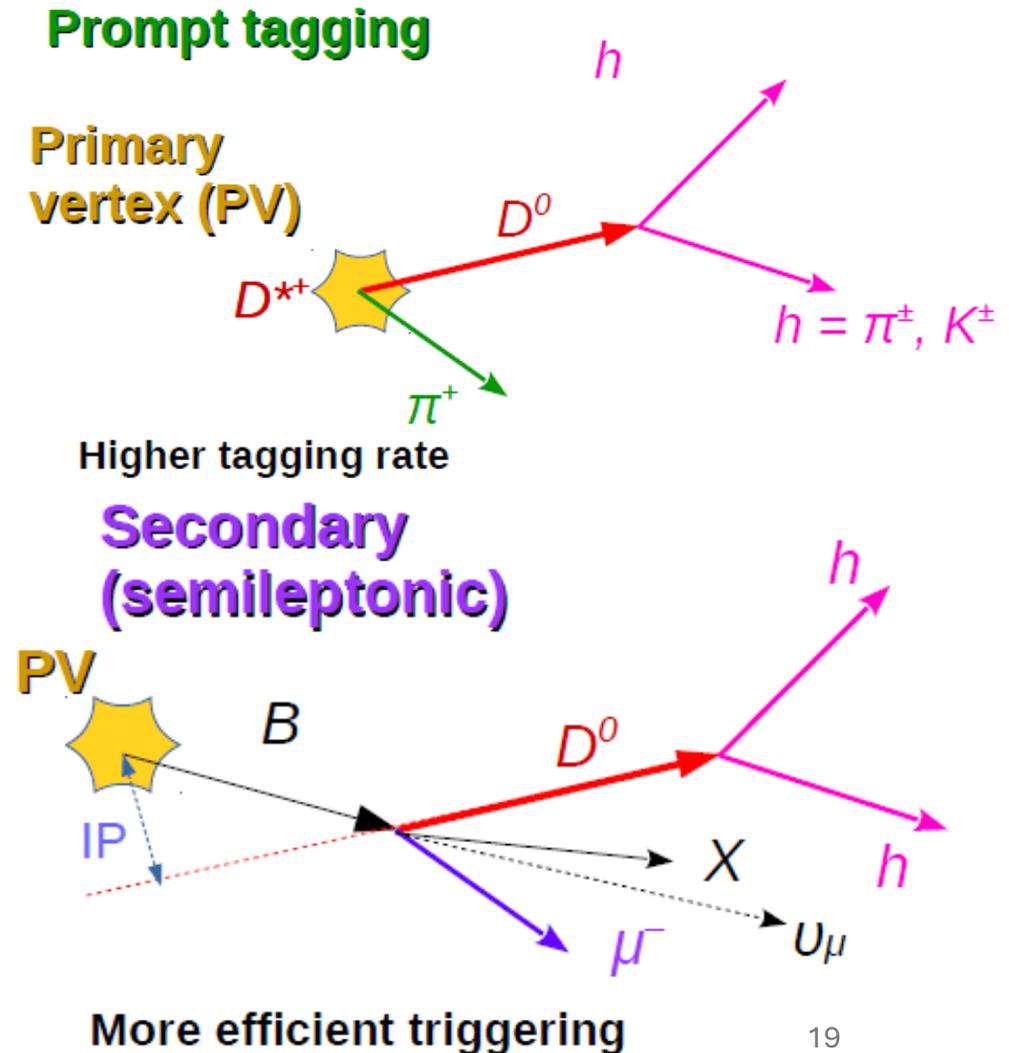
4) Интерференция разных адронных амплитуд (например, S- и P-волновых) → асимметрии распадов, для области фазового объема





Рождение прелестных и очарованных кварков во взаимодействии ультрарелятивистских адронов

- Основным механизмом рождения пар тяжелых (c & b) кварков является *глюонный синтез*
- Адроны вылетят преимущественно вперед (LHCb имеет акспетанс $2 < \eta < 5$)
- СТО (лоренцовский буст) обеспечивает возможность выделения c - & b -адронов
- Помечивание (tagging) аромата адрона (на примере c кварков)



LHCb: Find \ Identify \ Measure

Excellent vertexing allows efficient heavy quark hadrons selection / gives access to decay time distribution / prompt-secondary separation for charm

Protons collision point

Excellent PID allows to suppress background dramatically and explore many decay modes

Excellent tracking

Muon system – nice tagging & great potential to search for rare decays with di-muons

$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95\%$$

$$MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5\%$$

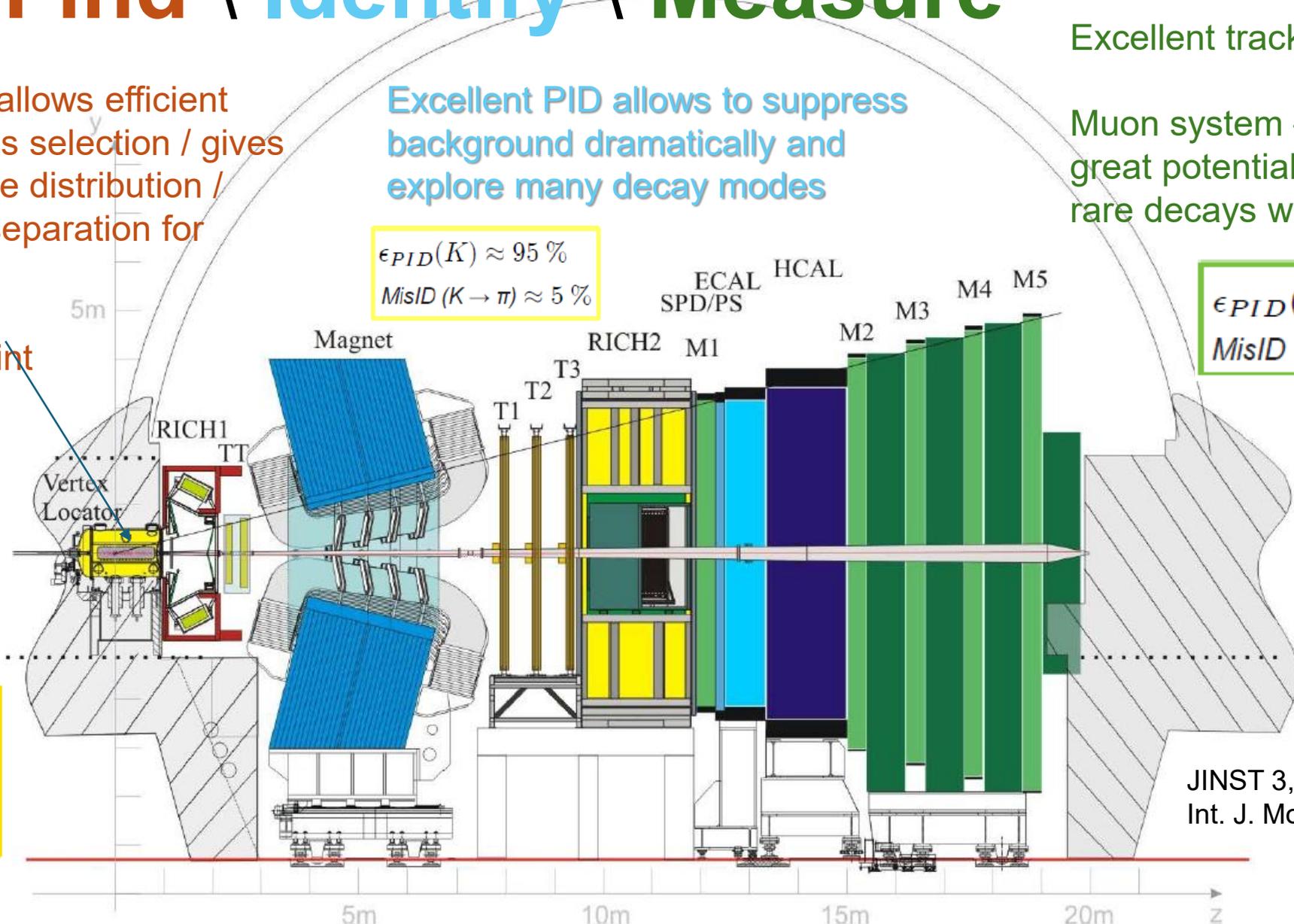
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

$$MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3\%$$

$$\sigma(IP) \approx 20\mu m$$

$$\delta p/p = 0.4 - 0.6\%$$

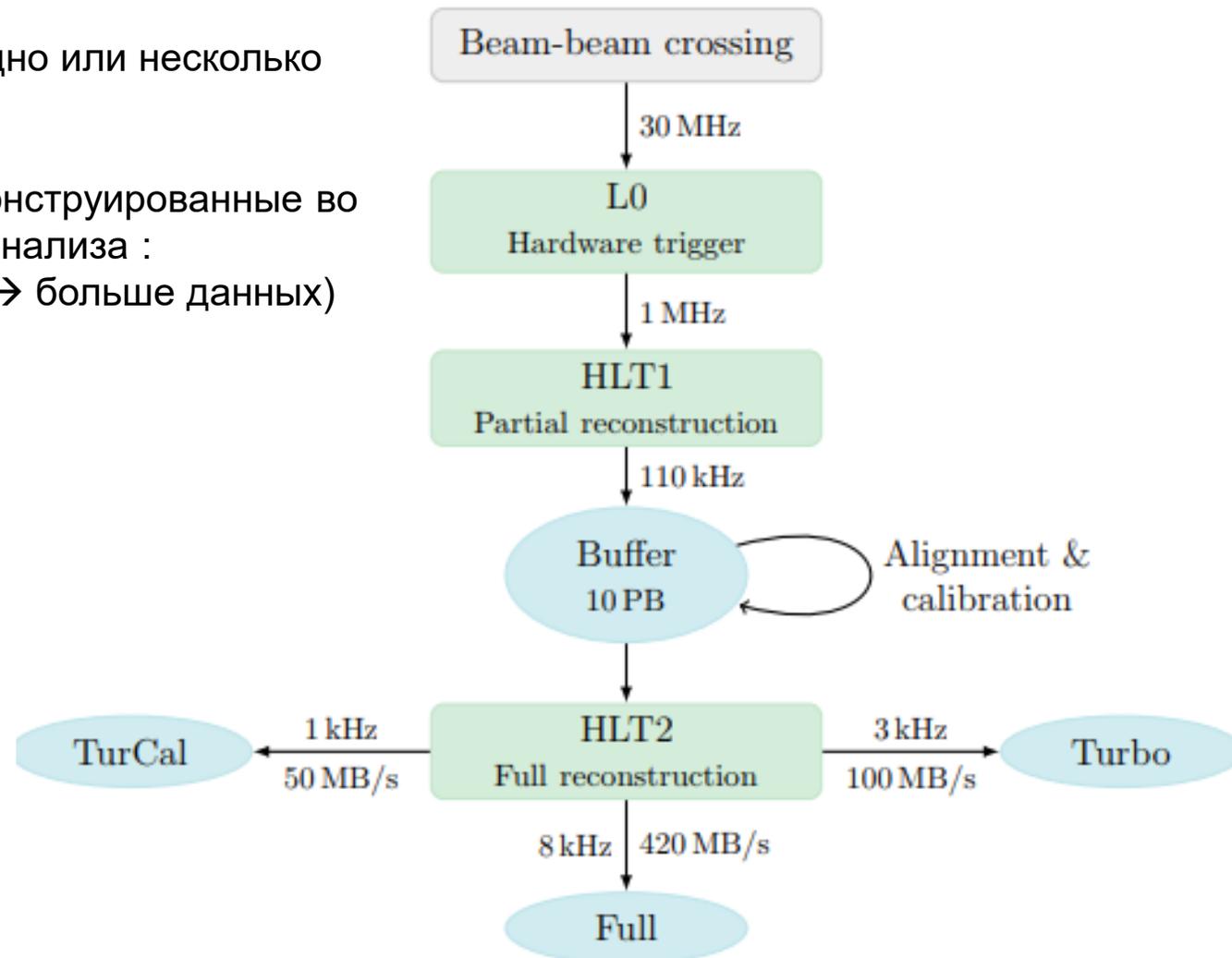
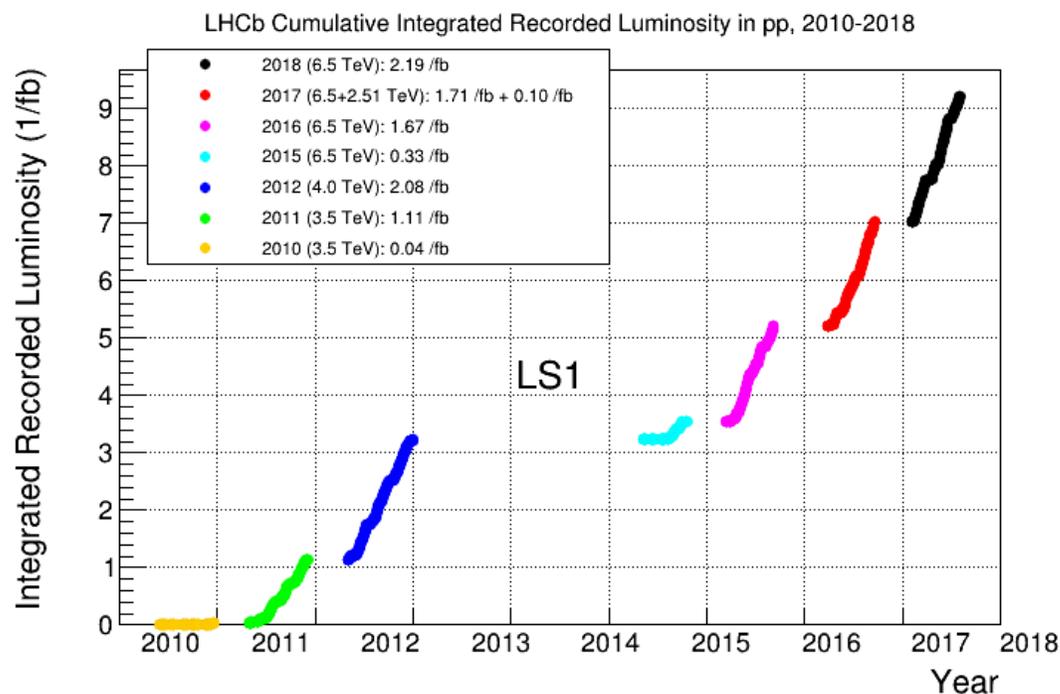
$$\epsilon_{track} > 96\%$$



JINST 3, (2008) S08005;
Int. J. Mod. Phys. A 30,
(2015) 153022

Светимость и онлайн-отбор

- LHCb работает в режиме постоянной светимости (одно или несколько взаимодействий на пересечение пучков БАК)
- Многоступенчатый триггер
- **Turbo-режим для Run-2** – события-кандидаты реконструированные во время онлайн-отбора записываются для оффлайн-анализа :
 - Большая статистика (размер события меньше → больше данных)
 - Использовался в представленных анализах



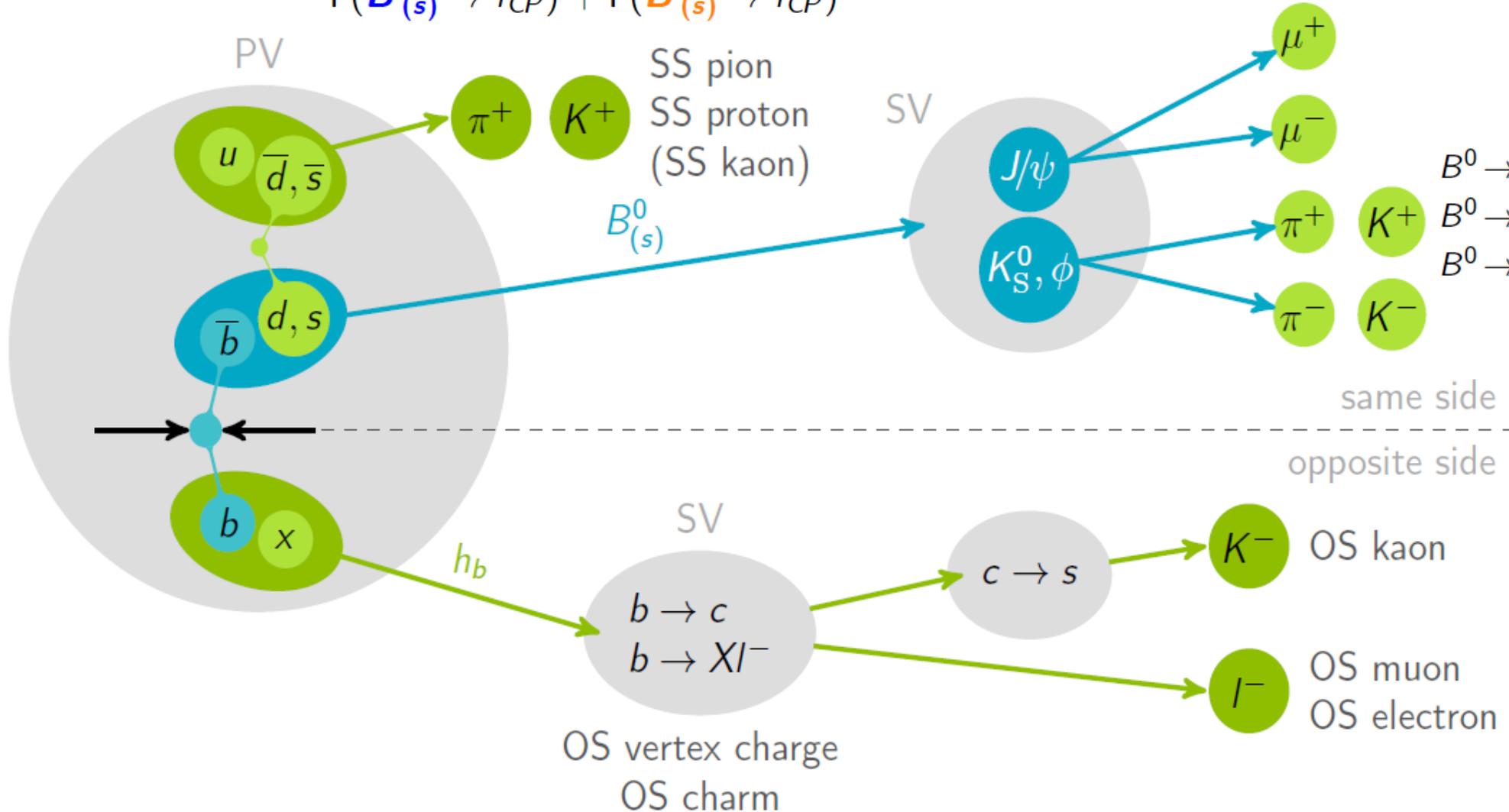
Таггирование аромата

$$\text{tagging power} = \epsilon \times D^2 = \epsilon \times \left(1 - \frac{\#\text{wrong tag}}{\#\text{all tag}}\right)^2$$

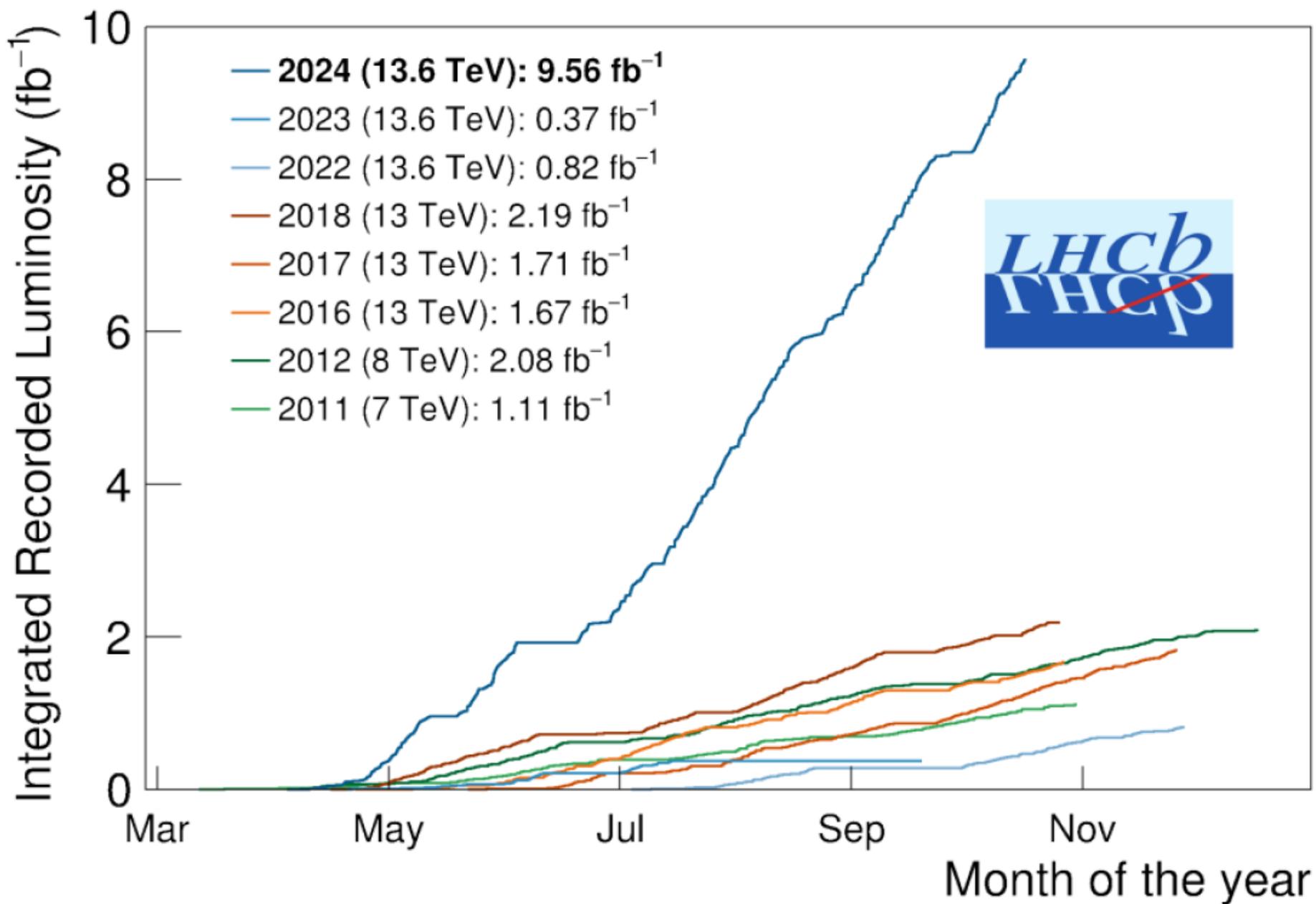
$$\mathcal{A}^{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B}_{(s)}^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B_{(s)}^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}_{(s)}^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B_{(s)}^0 \rightarrow f_{CP})}$$

$$B_S^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$$

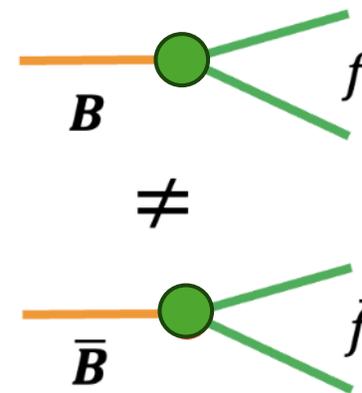
year	2015+2016	2017	2018
$\epsilon_{\text{tag}}(1-\omega)^2$	$(4.18 \pm 0.15)\%$	$(4.22 \pm 0.16)\%$	$(4.36 \pm 0.16)\%$



- $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu\mu) K_S^0 : 4.02\%$
- $B^0 \rightarrow \psi(2S) (\rightarrow \mu\mu) K_S^0 : 3.92\%$
- $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow ee) K_S^0 : 5.98\%$

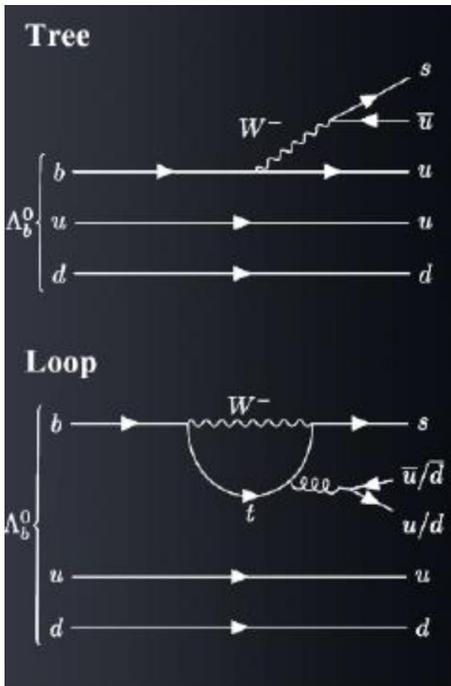


Асимметрии распада



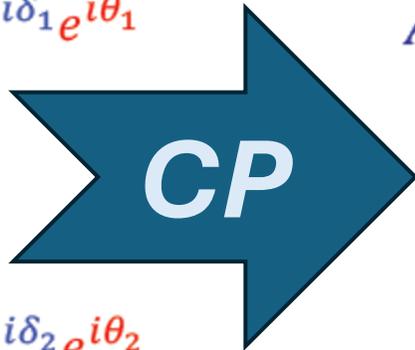
Асимметрии распада

$$\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^+$$



$$A_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{i\theta_1}$$

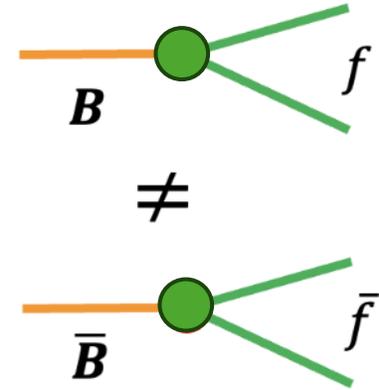
$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$



$$A_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{i\theta_2}$$

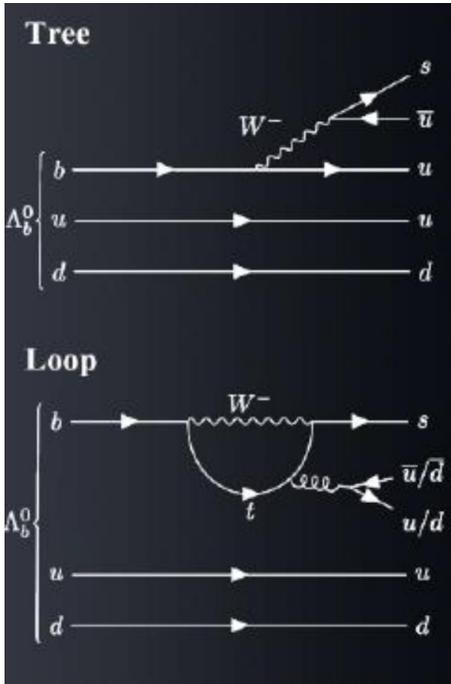
$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

$$|\bar{A}_1 + \bar{A}_2|^2 - |A_1 + A_2|^2 = 4\rho_1\rho_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\delta_1 - \delta_2)$$



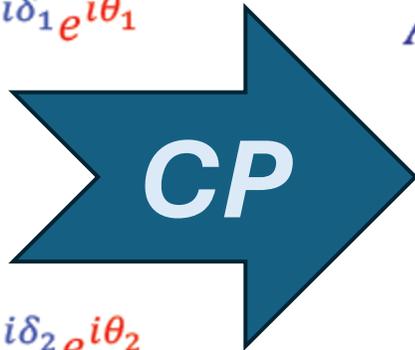
Асимметрии распада

$$\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^+$$



$$A_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{i\theta_1}$$

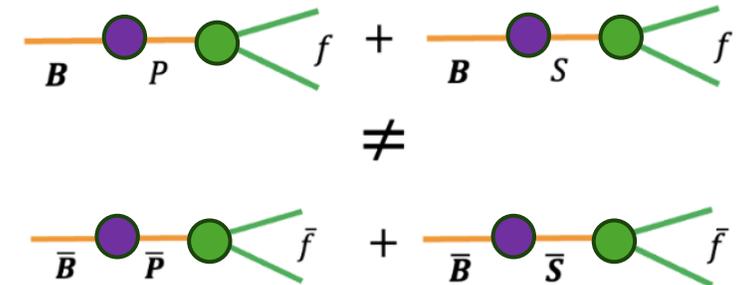
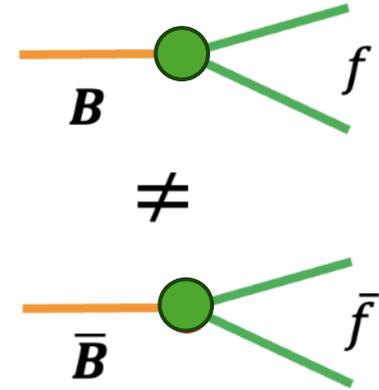
$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$



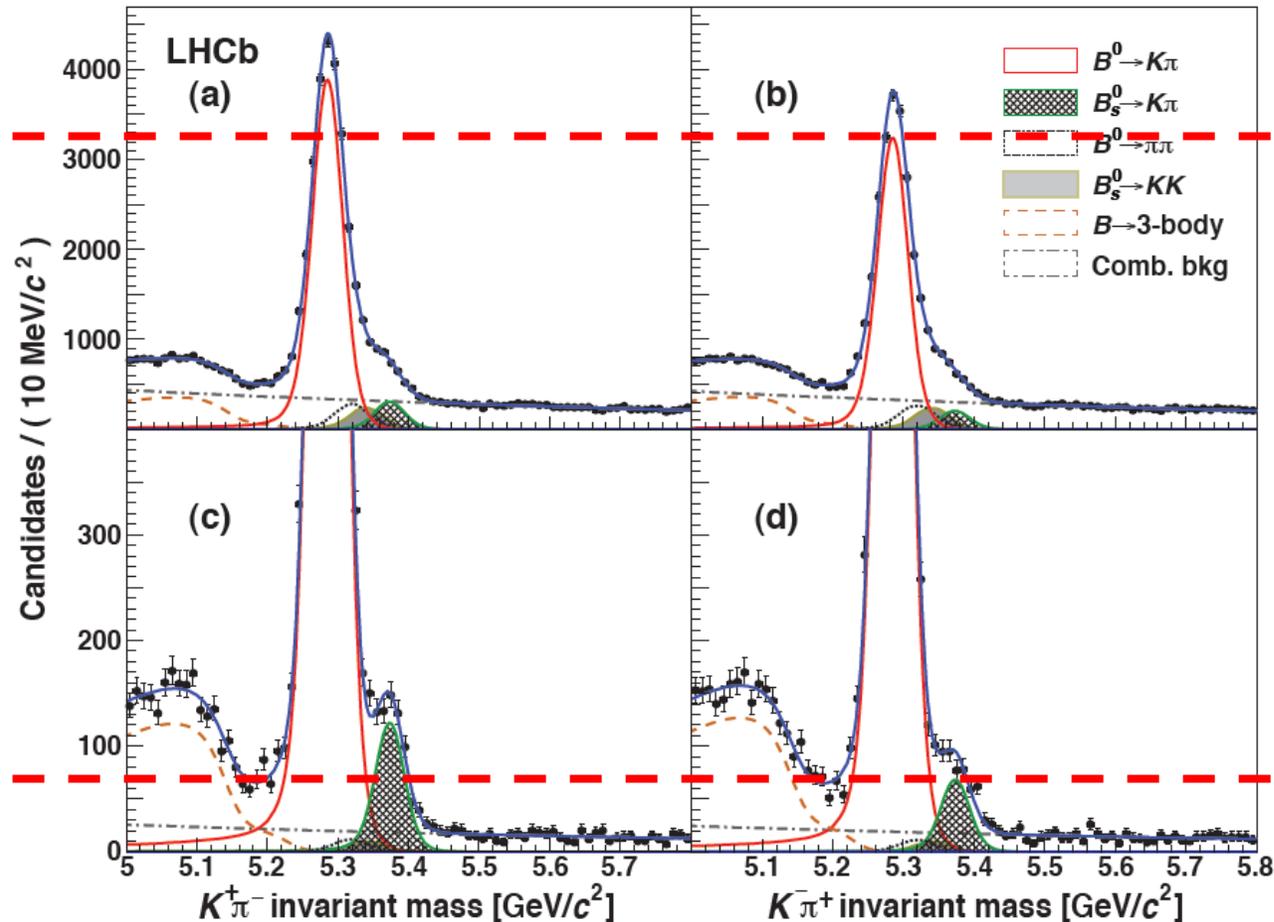
$$A_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{i\theta_2}$$

$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

$$|\bar{A}_1 + \bar{A}_2|^2 - |A_1 + A_2|^2 = 4\rho_1\rho_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\delta_1 - \delta_2)$$



Прямое CP нарушение в распадах $B_{(s)}^0$



- Наблюдался на B-фабриках

$$\mathcal{A}_{CP}(B^0 \rightarrow K^+\pi^-) = -0.082 \pm 0.006.$$

BaBar Phys. Rev. Lett., 93:131801, 2004.
 Belle Phys. Rev. Lett., 93:191802, 2004.



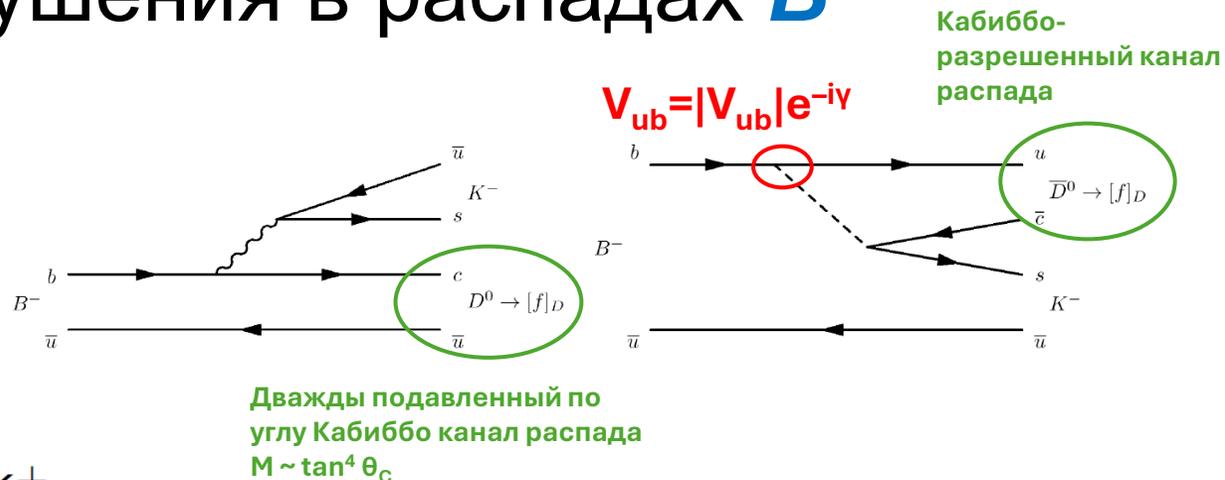
- Впервые наблюдался в LHCb

$$\mathcal{A}_{CP}(B_s^0 \rightarrow K^-\pi^+) = 0.26 \pm 0.04.$$

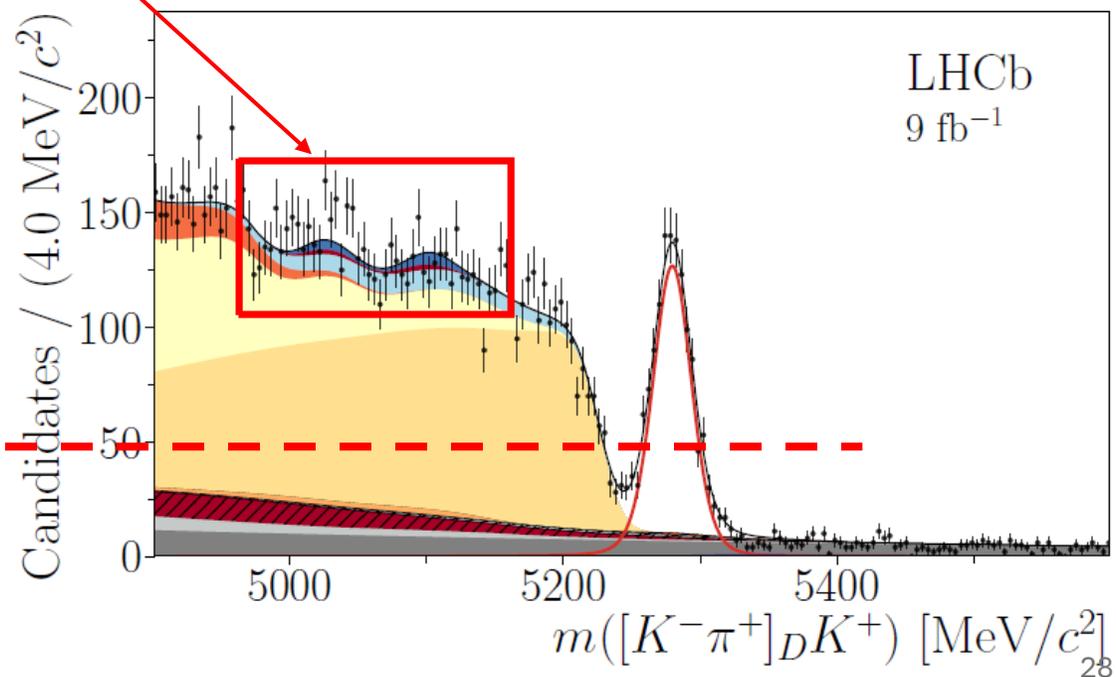
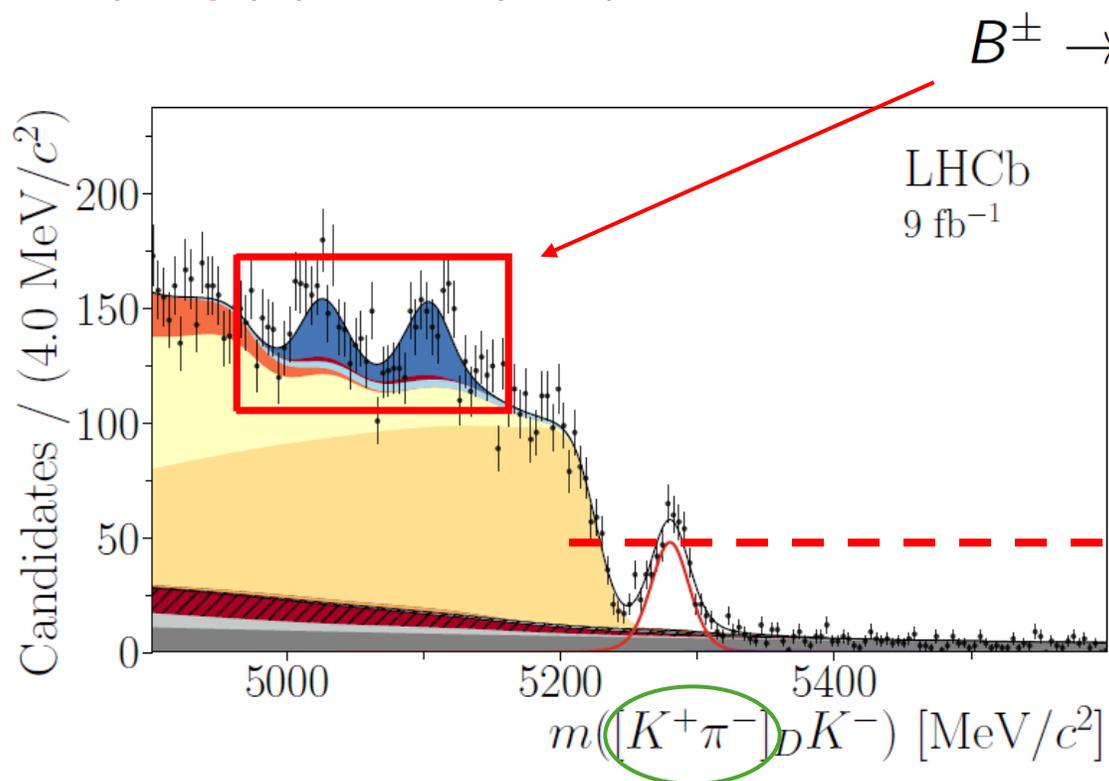
Большая статистика.
 Заметная асимметрия ($V_{ub} = |V_{ub}|e^{-i\gamma}$)

Обнаружение прямого CP-нарушения в распадах B^+

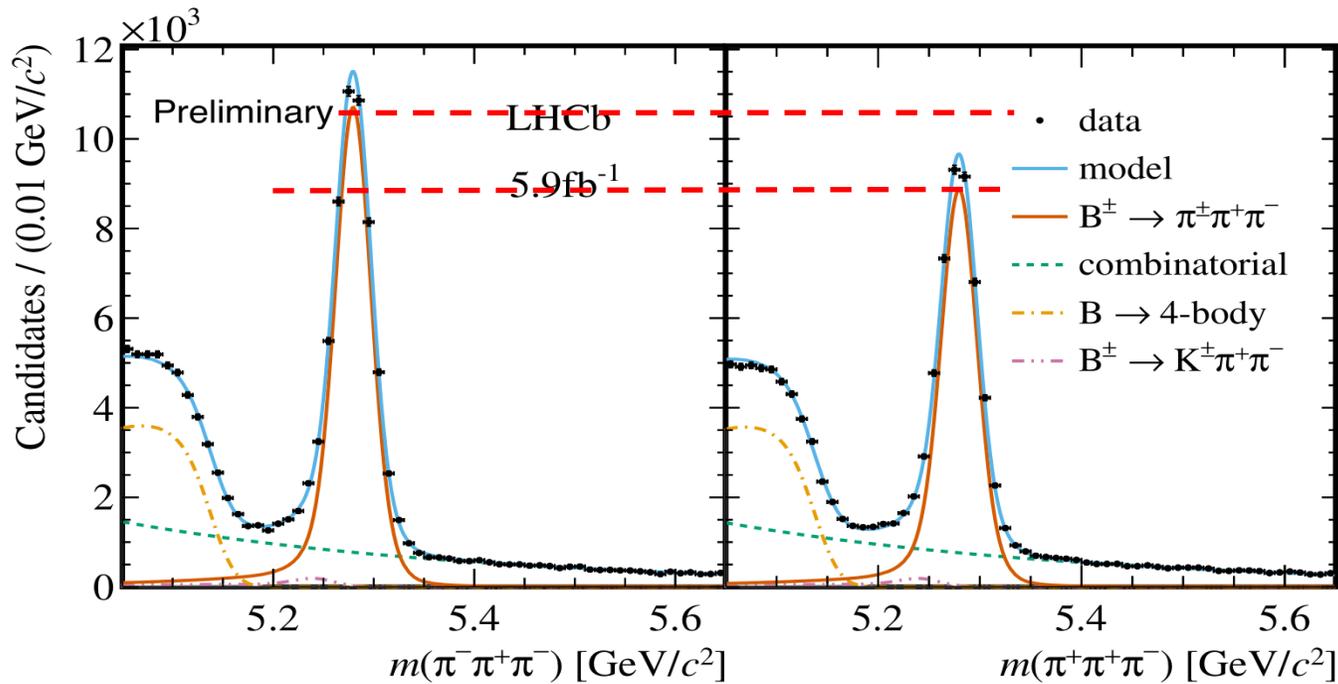
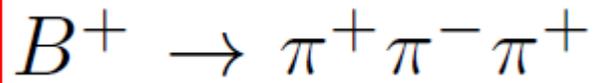
- CP-асимметрии – мощный инструмент для поиска CP нарушений
- Первым большим открытием LHCb в области поиска нарушения CP явилось обнаружение прямого CP нарушения в распада $B^+ \rightarrow DK^+$ в 2012 году
- Сейчас эти распады используются для определения угла γ треугольника унитарности



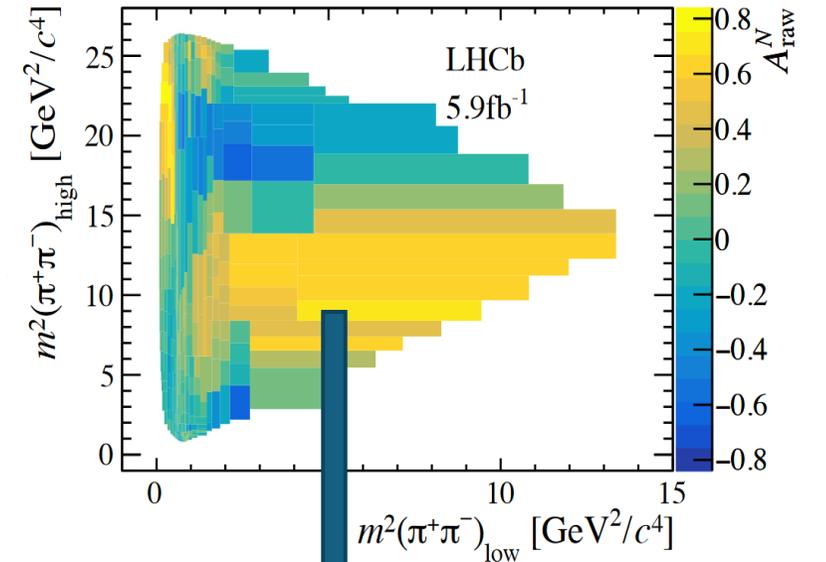
JHEP 04 (2021) 081



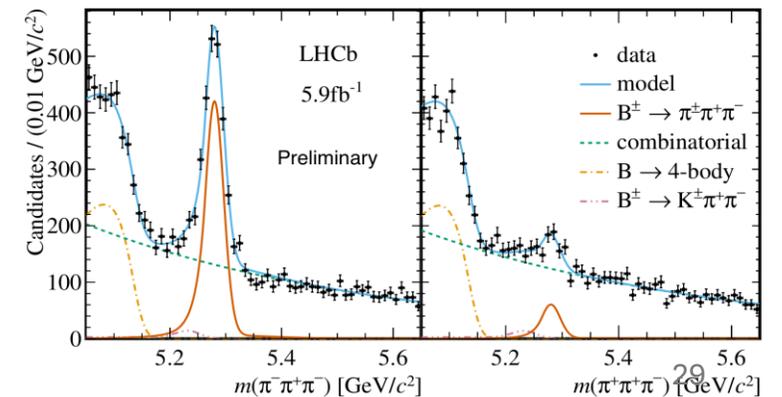
Исследование многочастичных распадов



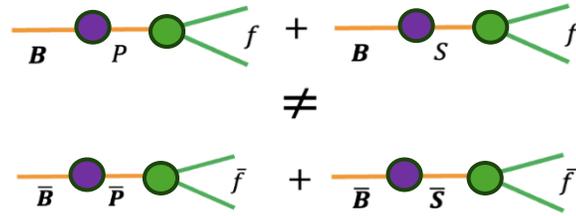
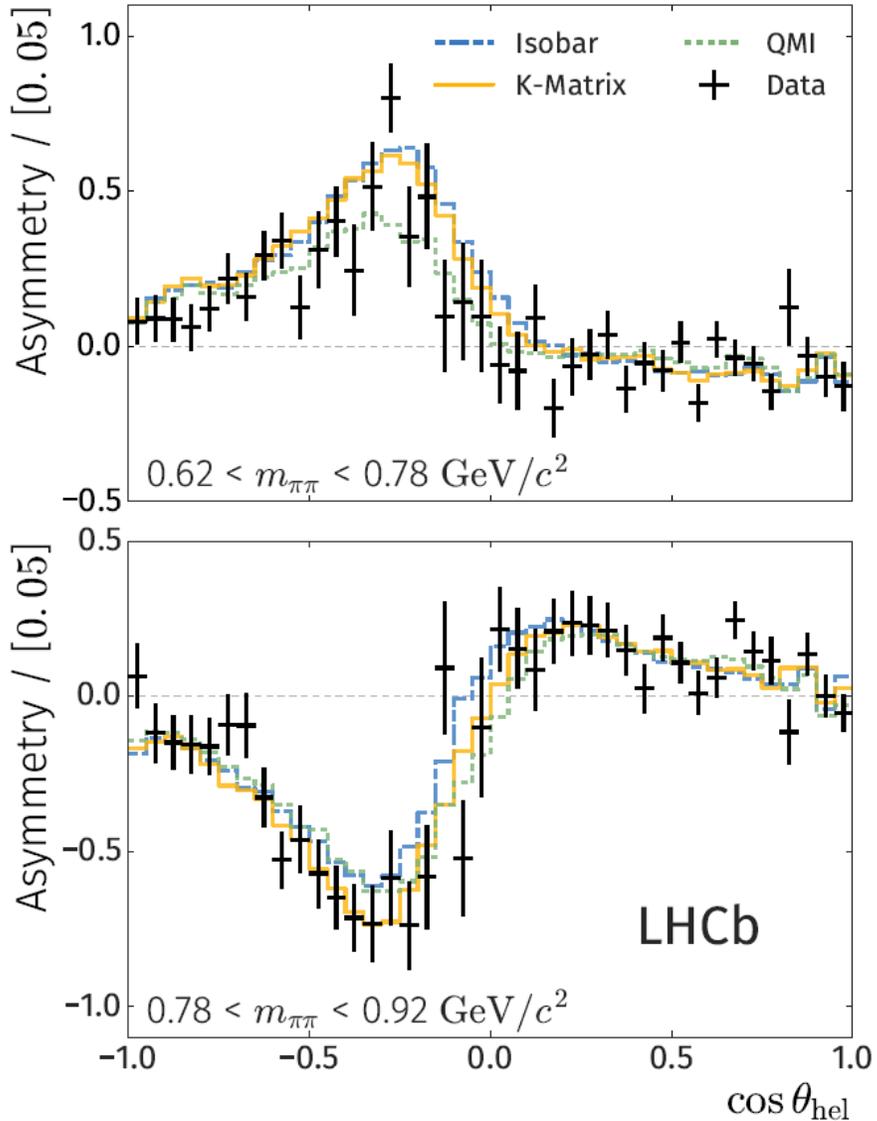
для условий $4 < m^2(\pi^+\pi^-)_{\text{low}} < 15 \text{ ГэВ}^2/c^4$ и $4 < m^2(\pi^+\pi^-)_{\text{high}} < 16 \text{ ГэВ}^2/c^4$ измеренная CP асимметрия составила $74,5 \pm 2,7 \%$.



Ref.

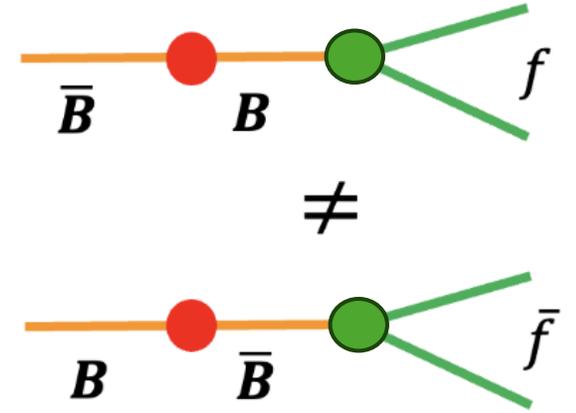


CP-нарушение в интерференции S- и P-волн



Интерференция разных адронных амплитуд (например, S- и P-волновых) → асимметрии распадов, для области фазового объема

- Анализ диаграммы Далица трехпионных распадов B^+ мезонов привел к открытию **нового типа CP-нарушения**
- Было установлено CP-нарушение, возникающее из-за интерференции между S-волновой и P-волновой ($B^+ \rightarrow \rho(770)^0 \pi^+$) амплитудами
- Этот эффект приводит к значительным локальным CP-асимметриям в зависимости от угла спиральности, определяемого в системе покоя $\pi^+ \pi^-$ как угол между пионом, заряд которого противоположен заряду B мезона, и третьим пионом.
- Распределения CP-асимметрии в зависимости от угла спиральности, как ниже, так и выше полюса резонанса $\rho(770)^0$
- **Асимметрия меняет знак при пересечении полюса резонанса и сокращается при интегрировании по всему фазовому объему распада.**



Нарушение при смешивании

Косвенное CP нарушение в рамках СМ

Пример: CPLEAR

$$K \rightarrow \pi \ell \nu$$

$$A_{\ell^- X} = \bar{A}_{\ell^+ X} = 0,$$

$$|\epsilon| = (2.228 \pm 0.011) \times 10^{-3}.$$

CP нарушение при смешивании:

$$|q/p| \neq 1.$$

$$\frac{q}{p} = \left(\frac{M_{12}^* - (i/2)\Gamma_{12}^*}{M_{12} - (i/2)\Gamma_{12}} \right)^{1/2} = \frac{1 - \epsilon}{1 + \epsilon}.$$

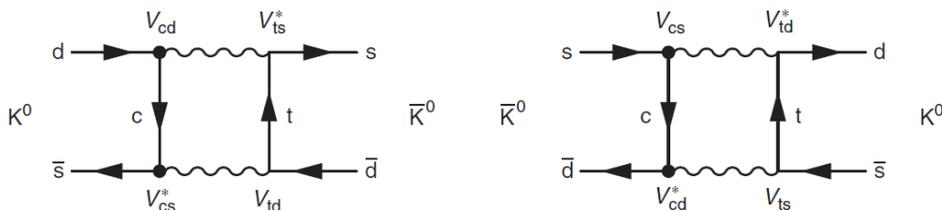
$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\epsilon_K|^2)}} [(1 + \epsilon_K)|K^0\rangle + (1 - \epsilon_K)|\bar{K}^0\rangle] = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon_K|^2}} [|K_1^0\rangle + \epsilon_K |K_2^0\rangle],$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\epsilon_K|^2)}} [(1 + \epsilon_K)|K^0\rangle - (1 - \epsilon_K)|\bar{K}^0\rangle] = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon_K|^2}} [|K_2^0\rangle + \epsilon_K |K_1^0\rangle],$$

$$\mathcal{A}_{\text{SL}}(t) \equiv \frac{d\Gamma/dt[\bar{M}_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow \ell^+ X] - d\Gamma/dt[M_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow \ell^- X]}{d\Gamma/dt[\bar{M}_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow \ell^+ X] + d\Gamma/dt[M_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow \ell^- X]} = \frac{1 - |q/p|^4}{1 + |q/p|^4}.$$

Не зависит от времени!

Интерпретация в рамках СМ:



$$M_{12} \propto V_{cd} V_{cs}^* V_{td} V_{td}^*$$

$$M_{21} \propto V_{cd}^* V_{cs} V_{td}^* V_{td} = M_{12}^*$$

$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}|e^{-i\gamma} \\ -|V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & -|V_{ts}|e^{i\beta_s} & |V_{tb}| \end{pmatrix}$$

$$|\epsilon| \approx \frac{\Im\{\mathcal{M}_{12}\}}{\sqrt{2}\Delta m}, \quad \Im\{\mathcal{M}_{12}\} = \sum_{q,q'} \mathcal{A}_{qq'} \Im(V_{qd} V_{qs}^* V_{q'd} V_{q's}^*),$$

$$|\epsilon| \propto \mathcal{A}_{ut} \Im(V_{ud} V_{us}^* V_{td} V_{ts}^*) + \mathcal{A}_{ct} \Im(V_{cd} V_{cs}^* V_{td} V_{ts}^*) + \mathcal{A}_{tt} \Im(V_{td} V_{ts}^* V_{td} V_{ts}^*).$$

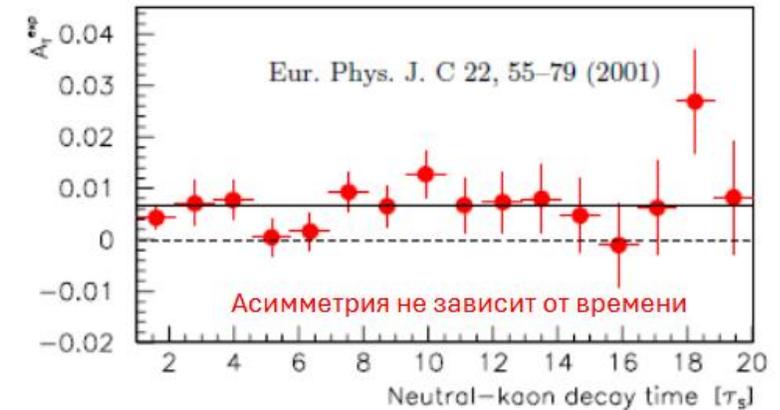
Подставляя параметры параметризации Вольфенштейна

$$|\epsilon| \propto \eta(1 - \rho + \text{constant}).$$

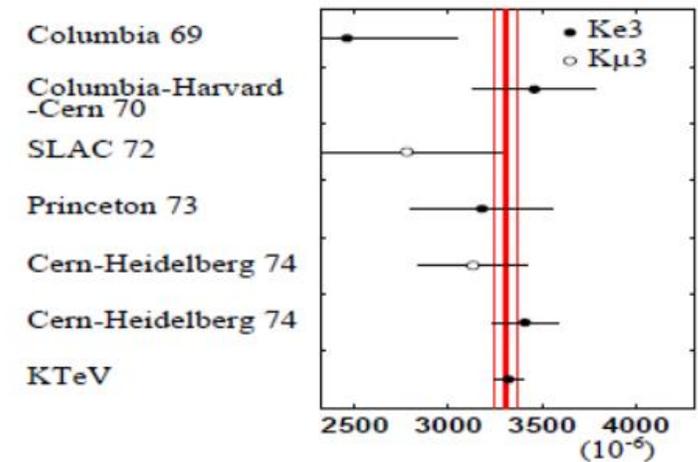
Косвенное CP-нарушение для K^0

- Критическим является измерение CP-нарушение для K^0 -мезонов.
- Общепринято, что природа этого нарушения косвенная
- Оно возникает из-за того, что
 - $|M_L\rangle = p|K^0\rangle + q|K^0\text{bar}\rangle$, $|M^H\rangle = p|K^0\rangle - q|K^0\text{bar}\rangle$,
 - $|q/p| = (1 - \epsilon_K)/(1 + \epsilon_K) \neq 1$
- Это приводит к небольшой CP-четной (K_2^0) примеси в волновую функцию $|K_L^0\rangle$
 - $|K_{0L}\rangle = (|K_1^0\rangle + \epsilon_K |K_2^0\rangle) / \sqrt{1 + |\epsilon_K|^2}$
- С точки зрения флейворного состава $|K_L^0\rangle$
 - $|K_L^0\rangle = [(1 + \epsilon_K)|K^0\rangle + (1 - \epsilon_K)|K^0\text{bar}\rangle] / \sqrt{2 + 2|\epsilon_K|^2}$

- A_T – это не прямая, а косвенная T-нарушающая (или что тоже самое CP-нарушающая) асимметрия.
- Странность каона фиксируется только в момент его рождения ($t=0$), что приводит к $A_T = 4\text{Re}(\epsilon_K)$



- Соотношение $A_T = 2A_L$ естественно для квантово-механического описания осцилляций



$$\delta_L = 2\text{Re} \epsilon_L - 2\text{Re} Y - \text{Re}(x - \bar{x}).$$

The terms Y and $\text{Re}(x - \bar{x})$ parameterize CPT violation

Есть ли прямое CP-нарушение для K^0

- Да! Но оно мало!
- На три порядка меньше косвенного.
- Если ввести дополнительное прямое CP-нарушение, то в CP-четном канале (например, $K^0 \rightarrow \pi\pi^+$), то возникнет интерференция процессов смешивания и распадов
 - Этот эффект известен и наблюдается для прелестных мезонов (B) \rightarrow

Любое соизмеримое дополнительное CP нарушение в процессе распада неизбежно должно интерферировать с CP нарушением в процессах смешивания и давать нетривиальную картину во время зависящей асимметрии распада, чего не наблюдается для K^0

CP violation can also occur in the decay amplitudes

$$A(K^0 \rightarrow \pi\pi(I)) = A_I e^{i\delta_I}, \quad A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi(I)) = A_I^* e^{i\delta_I}, \quad (68.4)$$

where I is the isospin of $\pi\pi$, δ_I is the final-state phase shift, and A_I would be real if CP invariance held. The CP-violating observables are usually expressed in terms of ϵ and ϵ' defined by

$$\eta_{+-} = \epsilon + \epsilon', \quad \eta_{00} = \epsilon - 2\epsilon'. \quad (68.5a)$$

$$|\epsilon| = (2.228 \pm 0.011) \times 10^{-3},$$

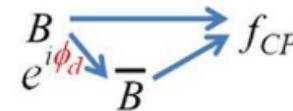
$$\phi_\epsilon = (43.5 \pm 0.5)^\circ,$$

$$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) \approx \epsilon'/\epsilon = (1.66 \pm 0.23) \times 10^{-3},$$

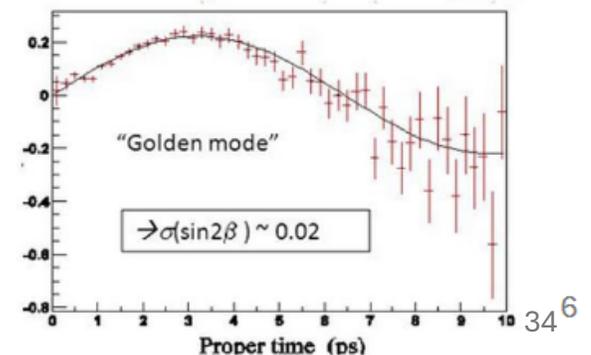
$$\phi_{+-} = (43.4 \pm 0.5)^\circ,$$

$$\phi_{00} - \phi_{+-} = (0.34 \pm 0.32)^\circ,$$

$$A_L = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}.$$

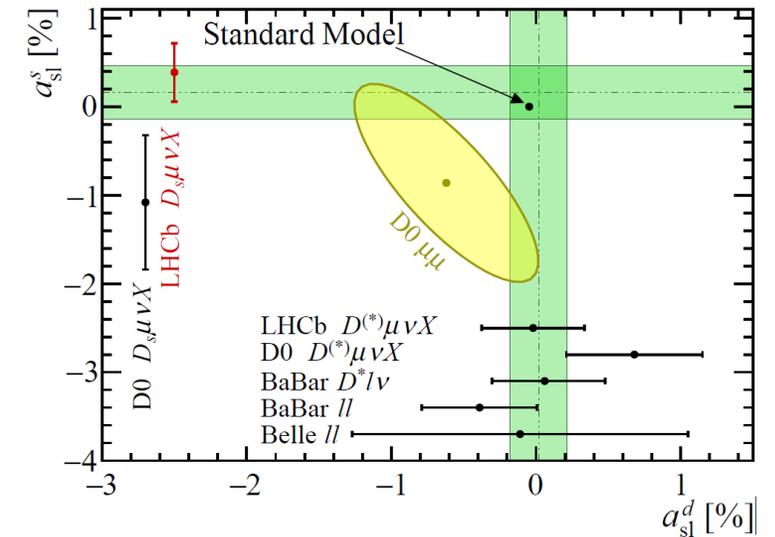


$$B^0: A_{CP}(t) = \eta_f \sin \phi_d \sin(\Delta m_d t)$$

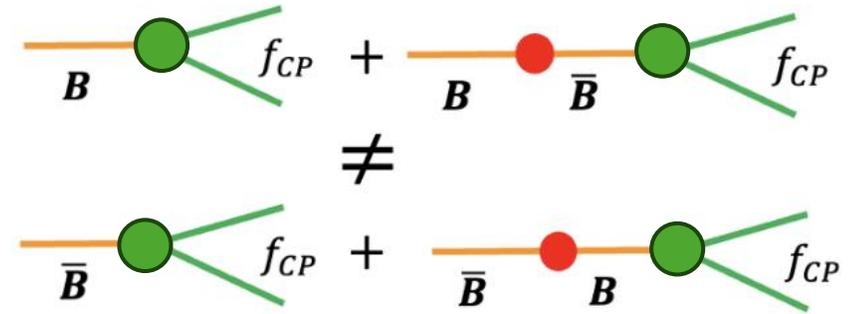


Полулептонные асимметрии для $B_{(s)}^0$

- Асимметрии в полулептонных распадах $B_{(s)}^0 \rightarrow D_{(s)}^- \mu^+ \nu^-$ меченых $B_{(s)}^0$ мезонов были использованы для исследования эффектов косвенного CP-нарушения в осцилляциях.
- В СМ в распад вклад дает только одна амплитуда; следовательно, ожидается, что эти распады сохраняют CP-симметрию и являются флейвор-специфичными.
- **Лептонные асимметрии измерены коллаборацией LHCb с точностью, лучшей в мире.**



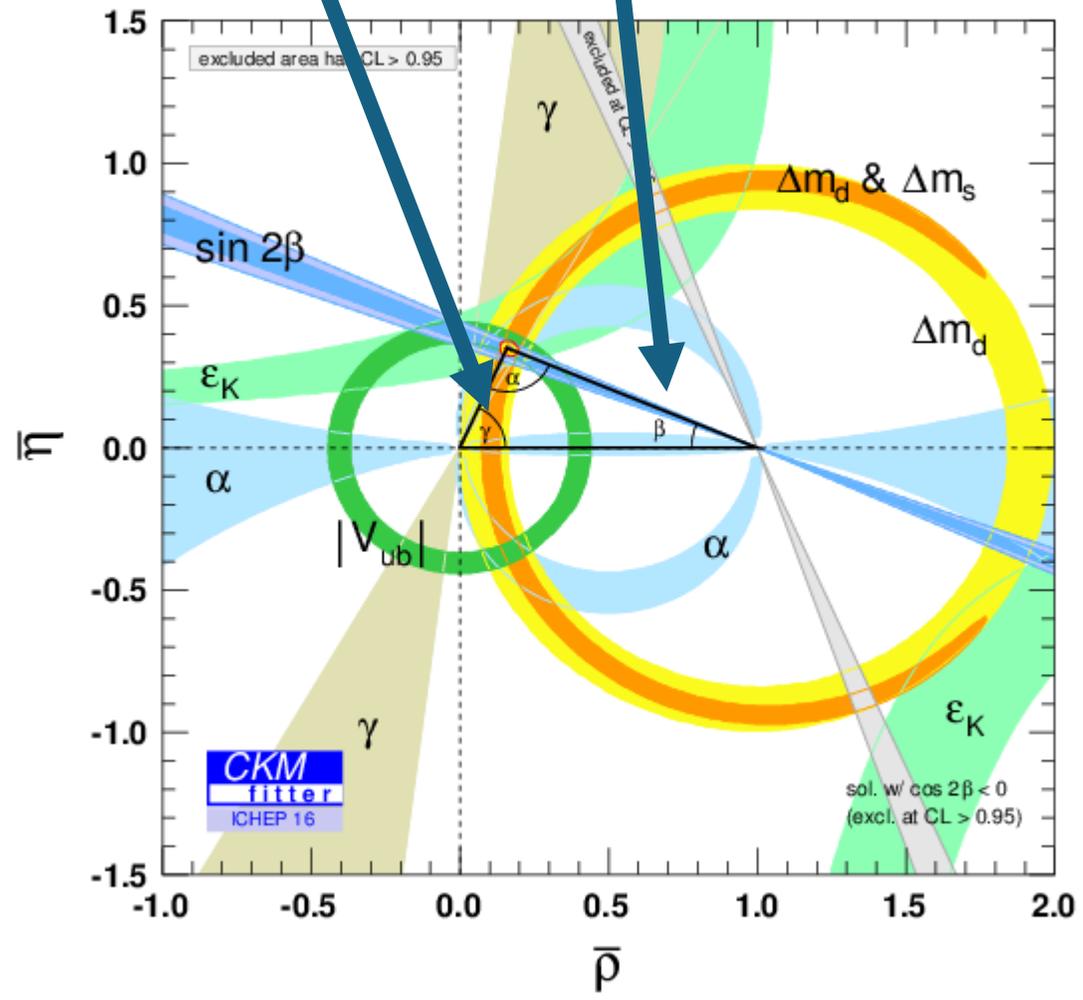
	a_{sl}^d (%)	a_{sl}^s (%)	A_{sl}^b (%)
BaBar K -tag [84, 106]	$0.06 \pm 0.17^{+0.38}_{-0.32}$	—	$A_{sl}^b = C_d a_{sl}^d + C_s a_{sl}^s$, Инклюзивная ди-лептонная асимметрия при больших энергиях
BaBar ll [107]	$-0.39 \pm 0.35 \pm 0.19$	—	
Belle ll [85]	$-0.11 \pm 0.79 \pm 0.70$	—	
LHCb [83, 104]	$-0.02 \pm 0.19 \pm 0.30$	$0.39 \pm 0.26 \pm 0.20$	
D0 [86, 108, 109]	$0.68 \pm 0.45 \pm 0.14$	$-1.12 \pm 0.74 \pm 0.17$	$-0.496 \pm 0.153 \pm 0.072$
World average [12]	-0.15 ± 0.17	-0.75 ± 0.41	2.8σ , from the SM
SM	-0.00047 ± 0.00006	0.0000222 ± 0.0000027	-0.023 ± 0.004



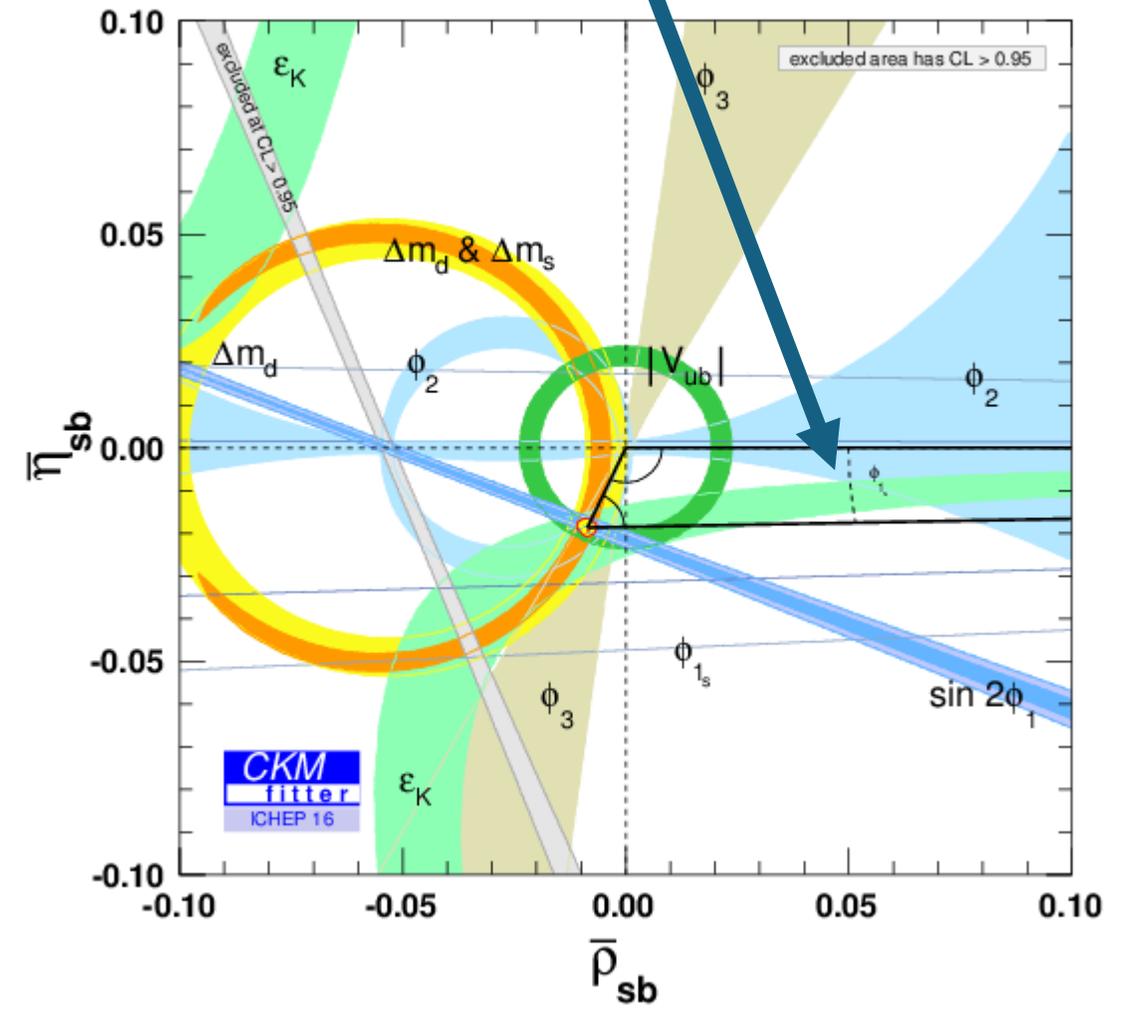
Определение $\sin(2\beta)$, ϕ_s и γ

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}|e^{-i\gamma} \\ -|V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & -|V_{ts}|e^{i\beta_s} & |V_{tb}| \end{pmatrix}$$

$\gamma \sin(2\beta)$



ϕ_s



Измерения $\sin(2\beta)$

$$|\langle f|H|B_{(s)}\rangle|^2 = \frac{1}{2}e^{-\Gamma t}|A_f|^2\left\{\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right) + A_{\Delta\Gamma}\sinh\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}t\right) + C\cos(\Delta mt) - S\sin(\Delta mt)\right\}$$

$$A^{CP}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow \psi K_S^0) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow \psi K_S^0)}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow \psi K_S^0) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow \psi K_S^0)} \approx \underbrace{D_{\Delta t} D_{FT}}_{\text{Experimental dilution factors}} S \sin(\Delta m_d t)$$

Разрешение по времени жизни (LHCb: 42 фс)

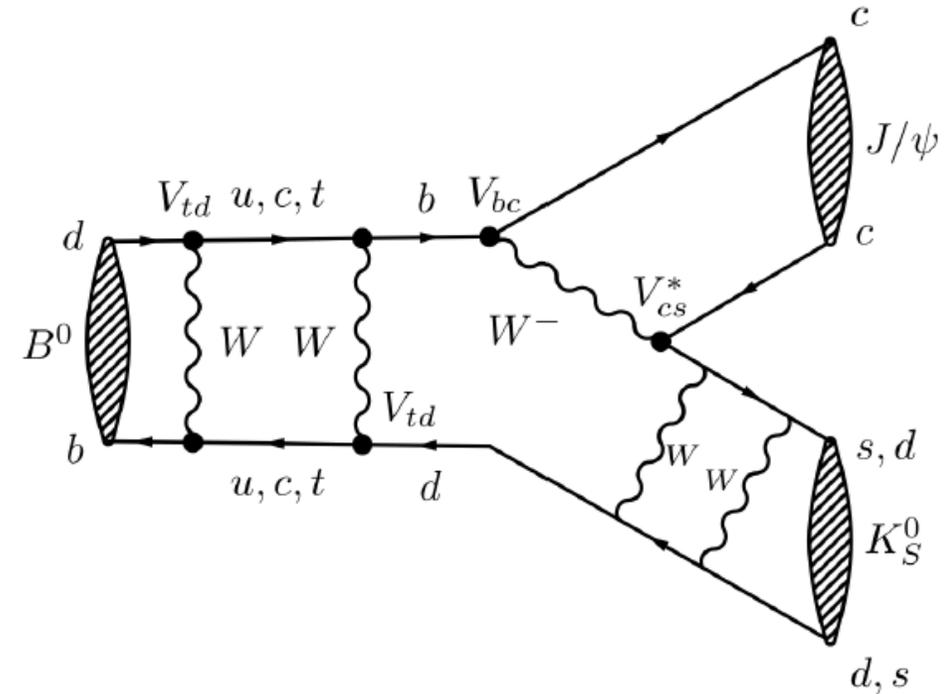
- Наиболее подходящий канал исследования $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$

- Мировые данные $S = 0.699 \pm 0.017$

$$C = -0.005 \pm 0.015$$

- Вклад НФ в наблюдаемую:

$$S = \sin(2\beta + \Delta\phi_d + \Delta\phi_d^{\text{NP}}), \quad \Delta\phi_d \approx 0.5 \text{ deg}^1$$



Качество таггирования аромата

$$\sin(2\beta) = \text{Im} \left(\frac{q \bar{A}_{J/\psi K_S^0}}{p A_{J/\psi K_S^0}} \right)$$

$$\beta = \arg \left(-\frac{V_{cb}^* V_{cd}}{V_{tb}^* V_{td}} \right)$$

Подгонка для определения CP-параметров

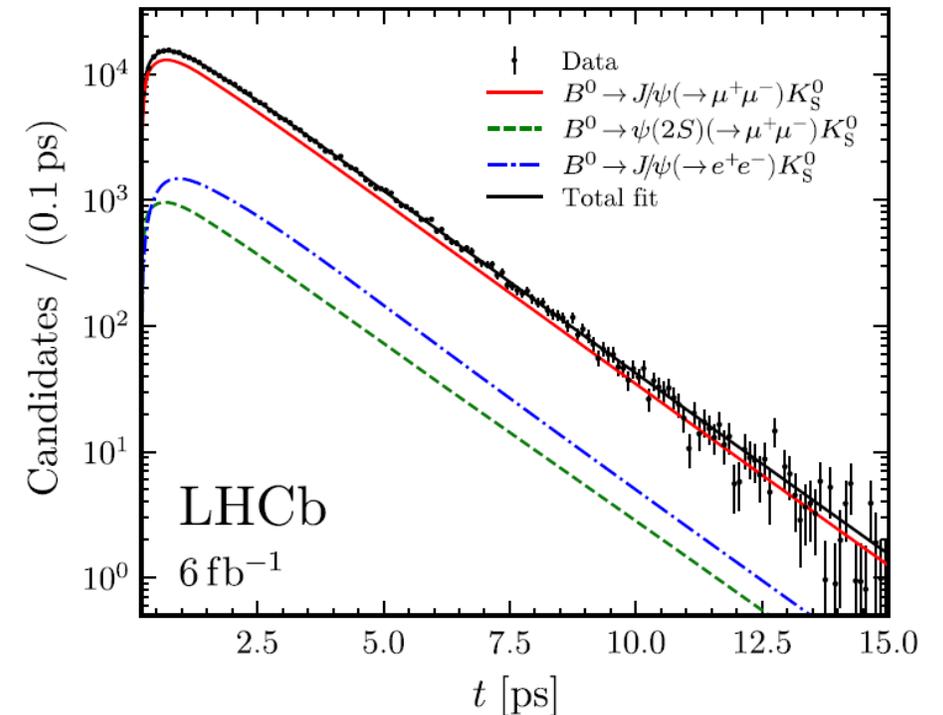
- Упрощенная модель $P_{CP}(t, d, \eta) \propto \left\{ [1 + d(1 - 2\omega)]P_{B^0}(t) + [1 + d(1 - 2\bar{\omega})]P_{\bar{B}^0}(t) \right\} e^{-\Gamma t}$
- Параметризации для учета эффектов, связанных с временем жизни и таггингом $P_{B^0, (\bar{B}^0)}(t) \propto (1 \mp \alpha)(1 \mp \Delta\epsilon)(1 \mp S \sin(\Delta m_d t) \pm C \cos(\Delta m_d t))$

Асимметрия рождения B

Асимметрия таггинга

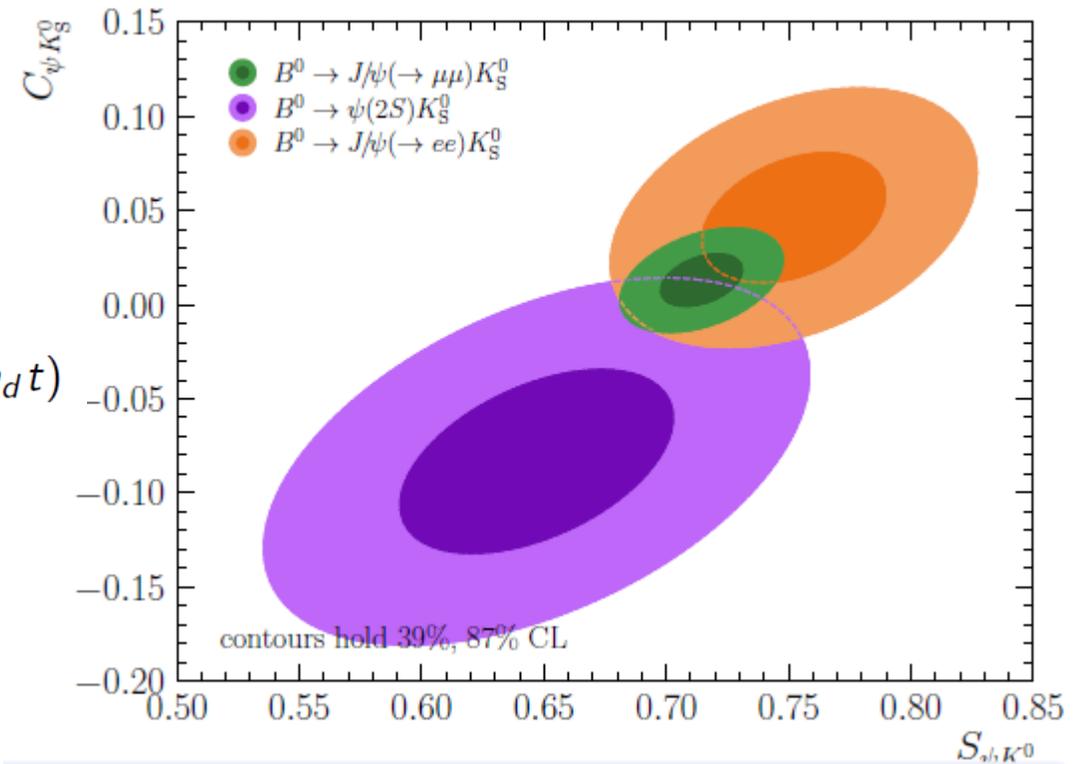
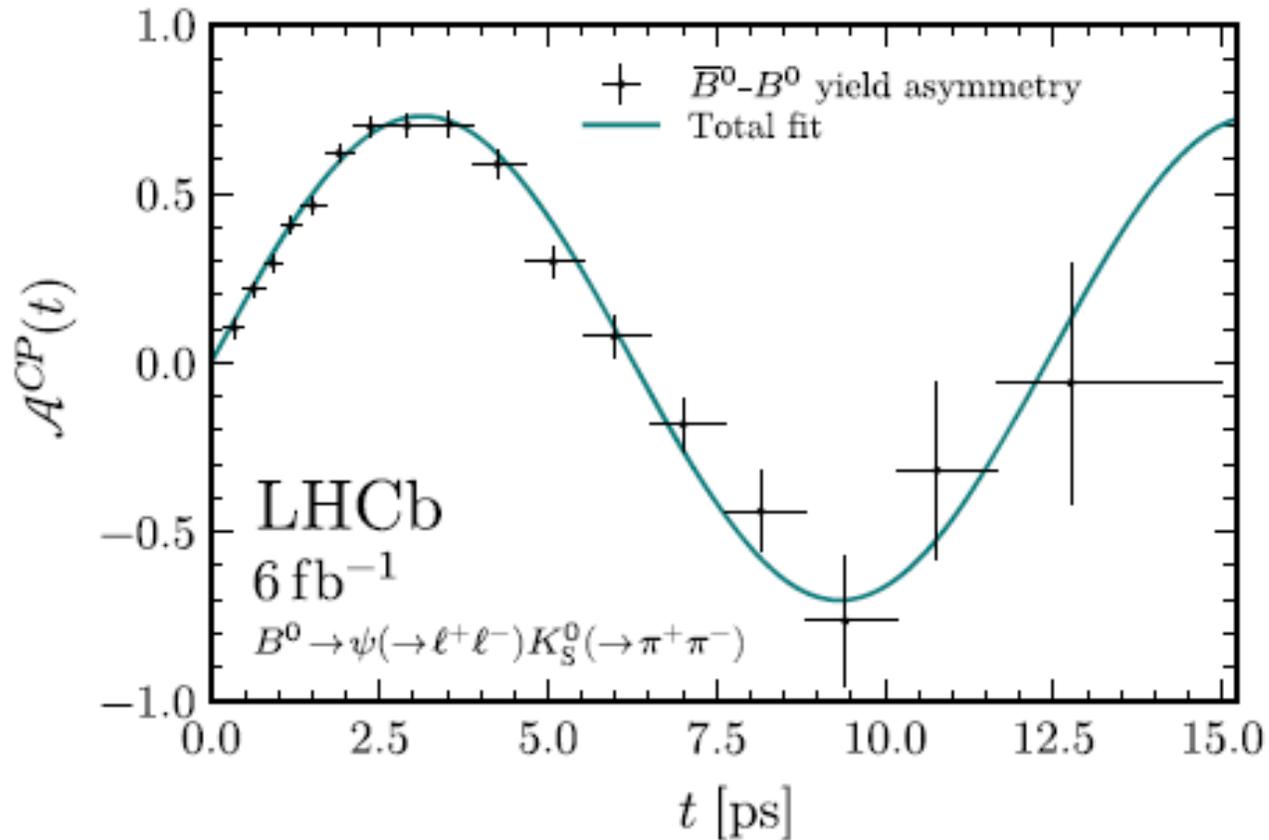
Основные систематические погрешности:

Source	$\sigma(S)$	$\sigma(C)$
Fitter validation	0.0004	0.0006
$\Delta\Gamma_d$ uncertainty	0.0055	0.0017
FT calibration portability	0.0053	0.0001
FT $\Delta\epsilon_{\text{tag}}$ portability	0.0014	0.0017
Decay-time bias model	0.0007	0.0013



Определение $\sin(2\beta)$

$$A^{CP}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow \psi K_S^0) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow \psi K_S^0)}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow \psi K_S^0) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow \psi K_S^0)} \approx \underbrace{D_{\Delta t} D_{FT}}_{\text{Experimental dilution factors}} S \sin(\Delta m_d t)$$



$$S_{J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.714 \pm 0.015 \text{ (stat)} \pm 0.007 \text{ (syst)}$$

$$C_{J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.013 \pm 0.014 \text{ (stat)} \pm 0.003 \text{ (syst)}$$

$$S_{\psi(2S) K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.647 \pm 0.053 \text{ (stat)} \pm 0.018 \text{ (syst)}$$

$$C_{\psi(2S) K_S^0}^{\text{Run 2}} = -0.083 \pm 0.048 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)}$$

$$S_{J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.752 \pm 0.037 \text{ (stat)} \pm 0.084 \text{ (syst)}$$

$$C_{J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.046 \pm 0.034 \text{ (stat)} \pm 0.008 \text{ (syst)}$$

Результат и комбинация

Новый результат

$$S_{\psi K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.716 \pm 0.013 \text{ (stat)} \pm 0.008 \text{ (syst)}$$

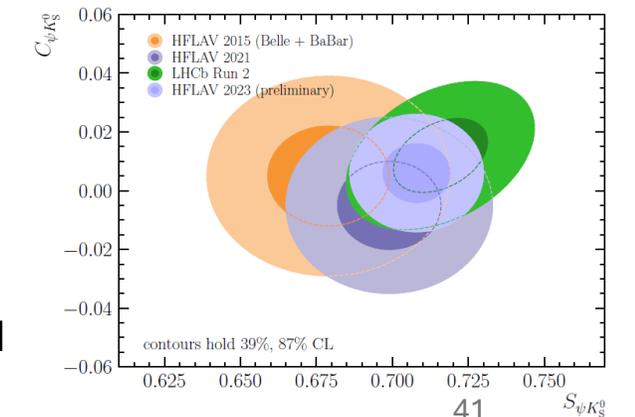
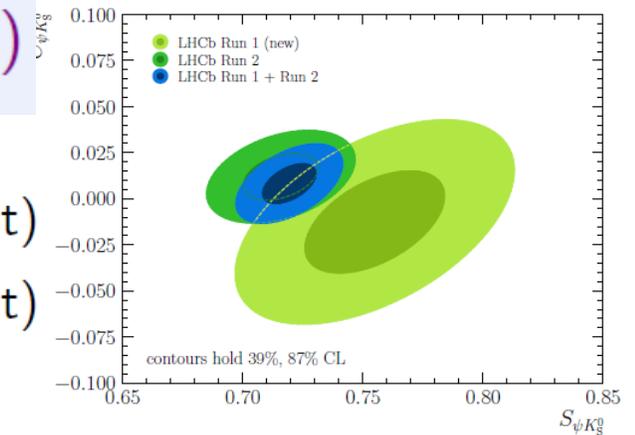
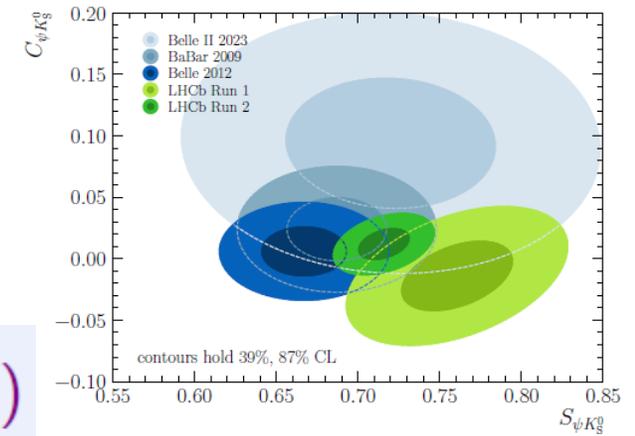
$$C_{\psi K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.012 \pm 0.012 \text{ (stat)} \pm 0.003 \text{ (syst)}$$

Комбинация всех измерений LHC $S_{\psi K_S^0}^{\text{Run 1+2}} = 0.723 \pm 0.014 \text{ (stat+syst)}$
 $C_{\psi K_S^0}^{\text{Run 1+2}} = 0.007 \pm 0.012 \text{ (stat+syst)}$

Это измерение является наиболее точным единичным измерением $\sin(2\beta)$ на сегодняшний день.

Статистическая неопределенность по-прежнему остается ограничивающим фактором.

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801

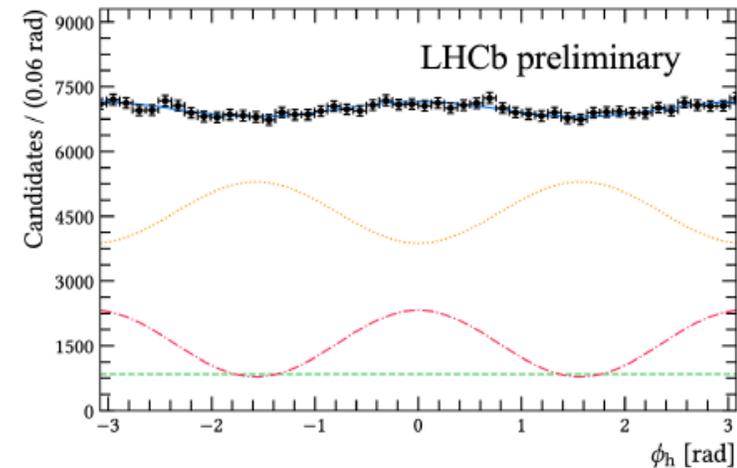
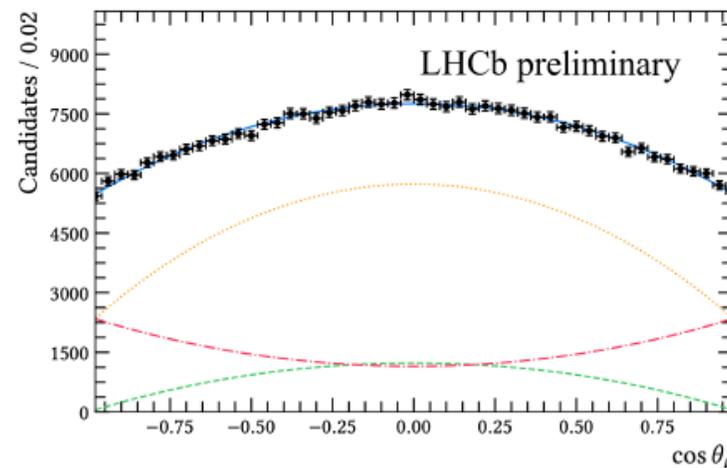
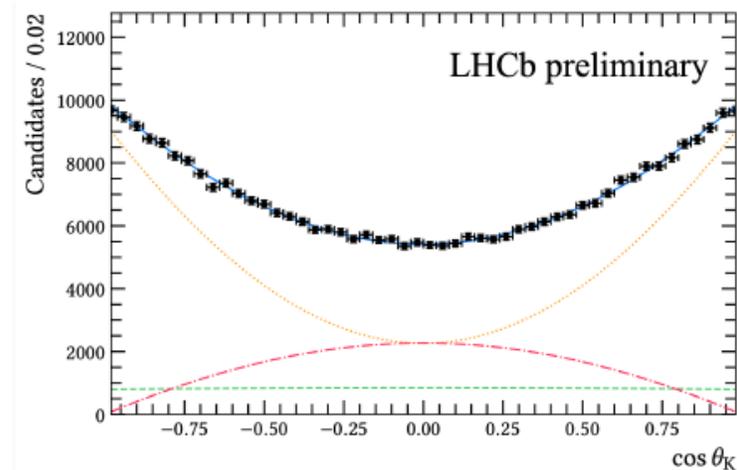
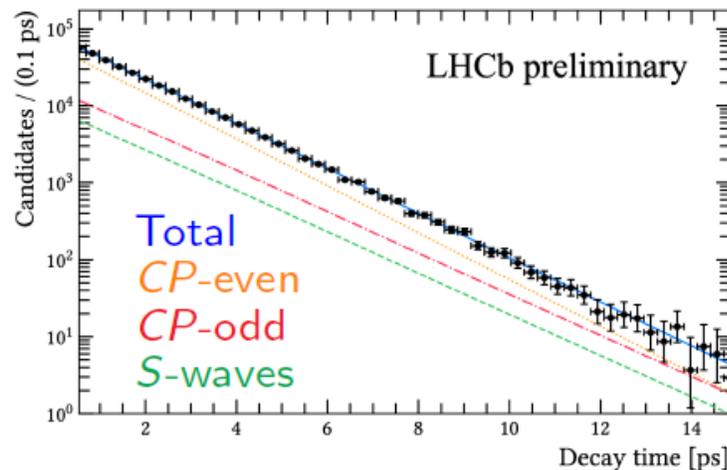


ϕ_s из распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802

- Одновременная подгонка к 4 подвыборкам:
 - 4 года
 - 2 триггерные условия
 - 6 масса пары КК
- Параметры калибровки теггинга и сплайн-коэффициенты учитывались при помощи гауссовскими ограничений.
- Извлеките физические параметры:

$$\phi_s, \lambda, \Delta\Gamma_s, \Gamma_s - \Gamma_d, \Delta m_s$$



Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801

ϕ_s из распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802

- Самое точное измерение ϕ_s на сегодняшний день
 - Статистическая погрешность уменьшена более чем в два раза
- Результат не противоречит СМ (SM Global fits)
- Нарушения CP симметрии не наблюдается

Parameters	Values
ϕ_s [rad]	$-0.039 \pm 0.022 \pm 0.006$
$ \lambda $	$1.001 \pm 0.011 \pm 0.005$
$\Gamma_s - \Gamma_d$ [ps^{-1}]	$-0.0056^{+0.0013}_{-0.0015} \pm 0.0014$
$\Delta\Gamma_s$ [ps^{-1}]	$0.0845 \pm 0.0044 \pm 0.0024$
Δm_s [ps^{-1}]	$17.743 \pm 0.033 \pm 0.009$
$ A_{\perp} ^2$	$0.2463 \pm 0.0023 \pm 0.0024$
$ A_0 ^2$	$0.5179 \pm 0.0017 \pm 0.0032$
$\delta_{\perp} - \delta_0$ [rad]	$2.903^{+0.075}_{-0.074} \pm 0.048$
$\delta_{\parallel} - \delta_0$ [rad]	$3.146 \pm 0.060 \pm 0.052$

Run 1 result: $\phi_s = -0.058 \pm 0.049 \pm 0.006$ rad

Влияние на мировые данные

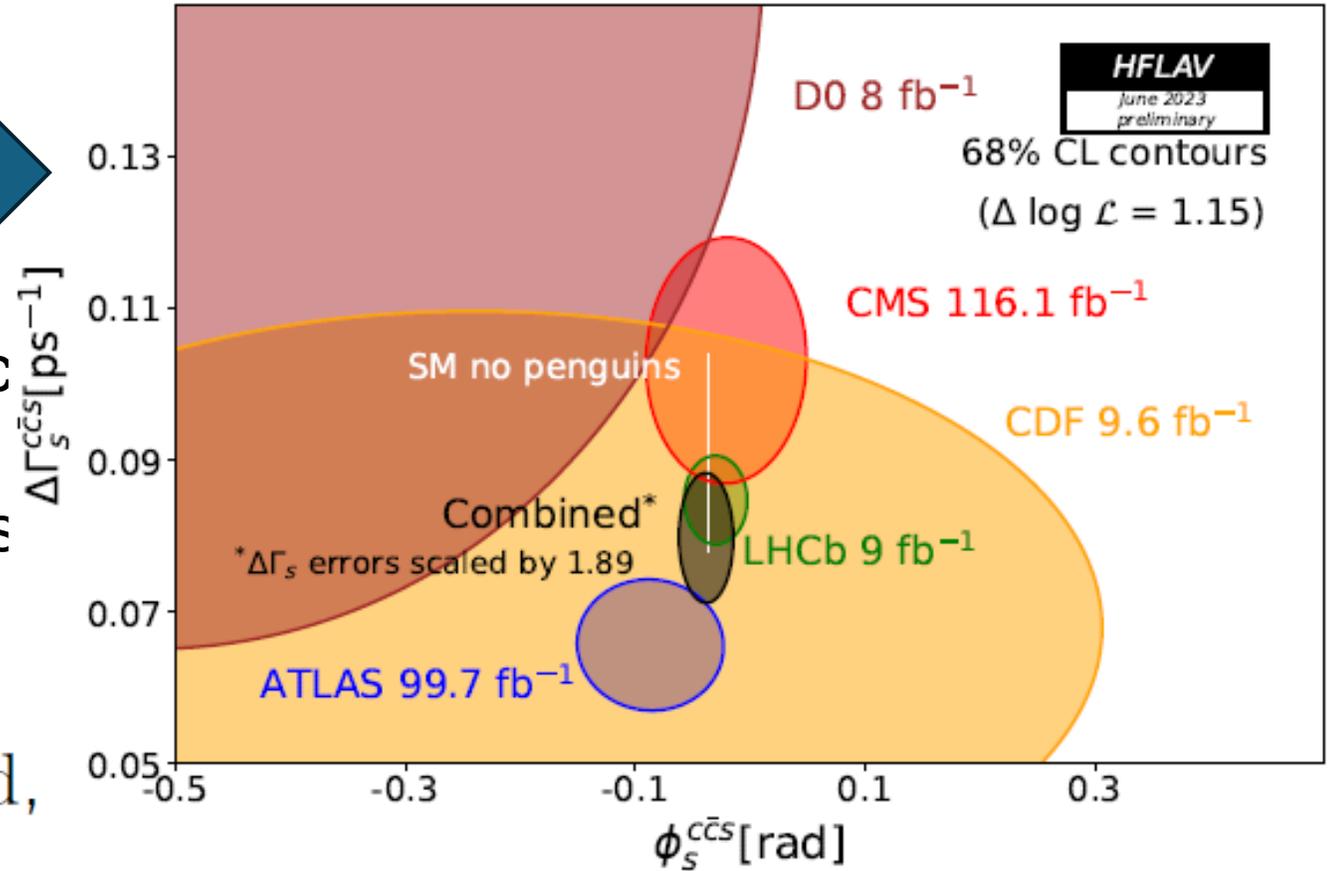
$$\phi_s^{J/\psi KK} = -0.050 \pm 0.017 \text{ rad}$$

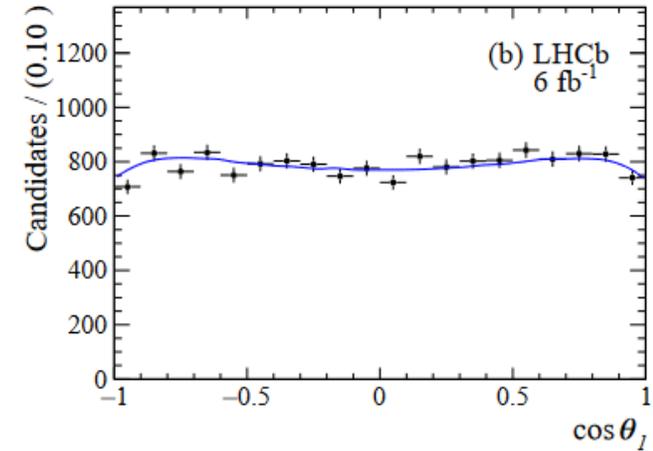
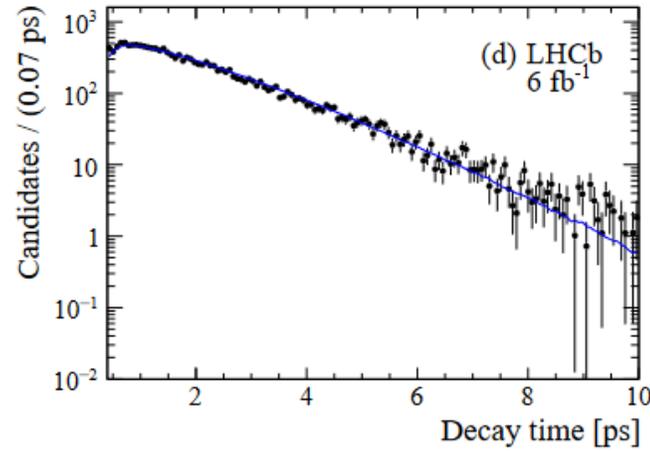
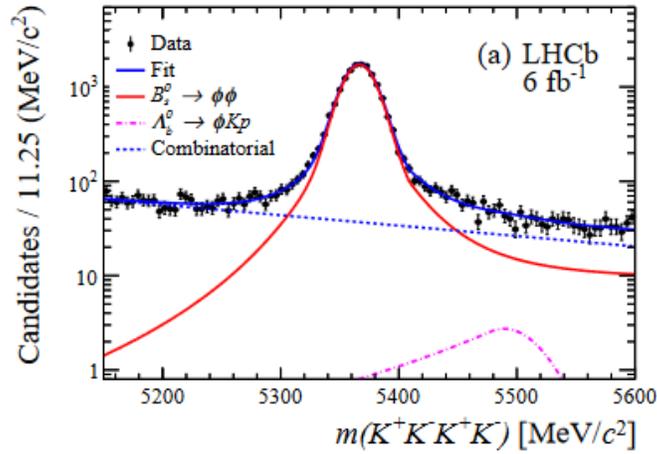
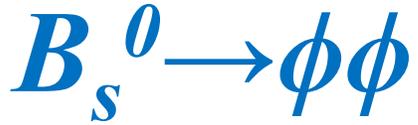
$$\phi_s^{c\bar{c}s} = -0.039 \pm 0.016 \text{ rad} \quad \rightarrow$$

- Полученный результат находится в согласии с общей подгонкой всех мировых данных (Global fits assuming SM)

$$\phi_s^{\text{CKMfitter}} \approx (-0.0368^{+0.0006}_{-0.0009}) \text{ rad},$$

$$\phi_s^{\text{UTfitter}} = -0.0370 \pm 0.0010 \text{ rad}$$

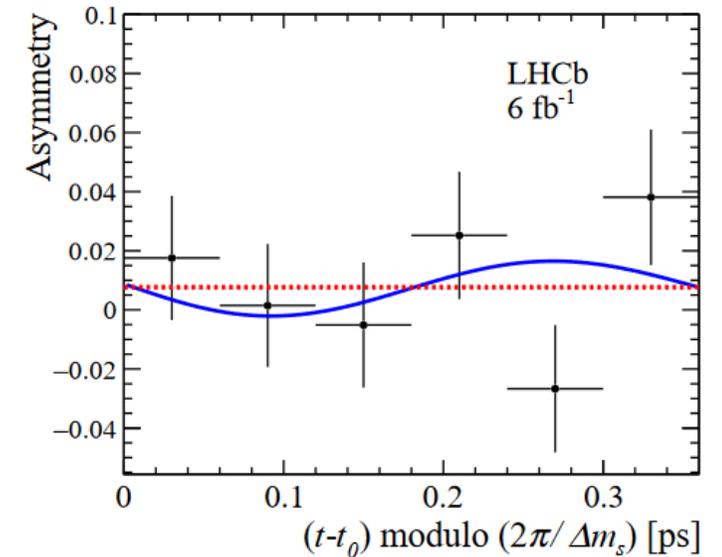
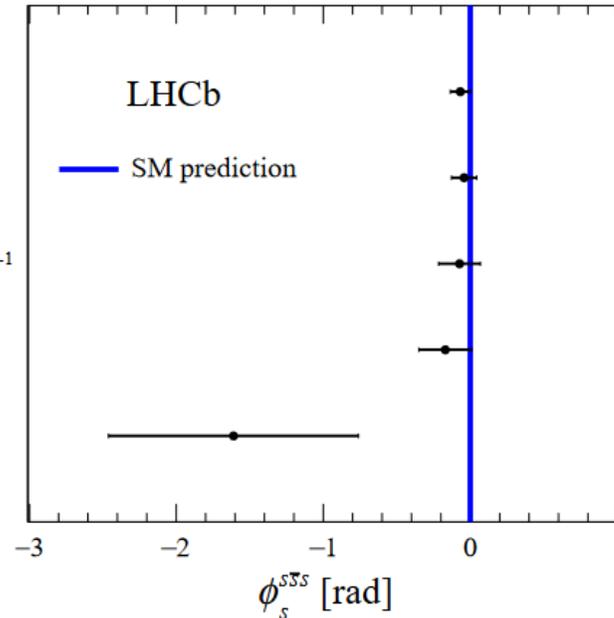




- Наиболее точное измерение ϕ_s в распадах с доминированием диаграмм типа пингвин

- Нарушений CP не наблюдается

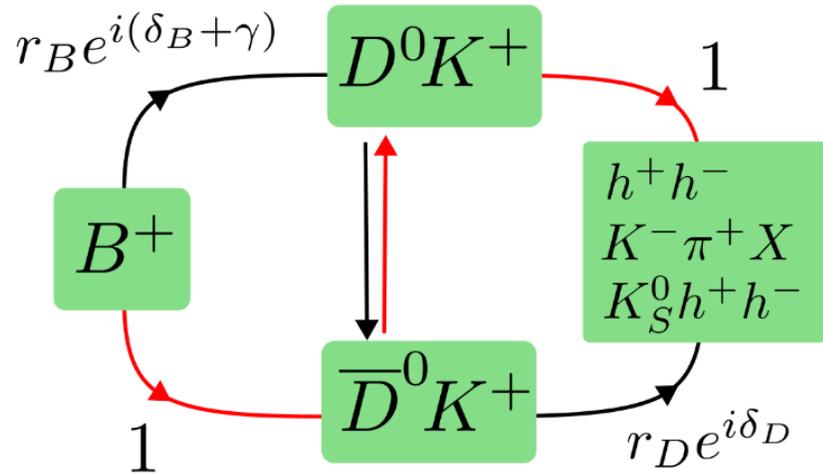
Run 1 + Run 2, 9 fb⁻¹
 Run 2, 6 fb⁻¹
 Run 1 + 2015 + 2016, 5 fb⁻¹
 Run 1, 3 fb⁻¹
 2011, 1 fb⁻¹



$$\phi_s^{S\bar{S}S} = -0.042 \pm 0.075 \pm 0.009 \text{ rad}$$

$$|\lambda| = 1.004 \pm \pm 0.030 \pm 0.009$$

Измерение СКМ γ



B decay	D decay	Dataset	Status since LHCb-CONF-2024-004
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow h^+ h^- \pi^+ \pi^-$	Run 1&2	New
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp \pi^0$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp$ (PR)	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$	$D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$ (PR)	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$	$D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$ (FR)	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow DK^{*\pm}$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow DK^{*\pm}$	$D \rightarrow h^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow DK^{*\pm}$	$D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm \pi^+ \pi^-$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp$	Run 1	<i>As before</i>
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$	$D \rightarrow h^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$	$D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$	$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	Run 1	<i>As before</i>
$B_s^0 \rightarrow D_s^\mp K^\pm$	$D_s^+ \rightarrow h^+ h^- \pi^+$	Run 1&2	<i>As before</i>
$B_s^0 \rightarrow D_s^\mp K^\pm \pi^+ \pi^-$	$D_s^+ \rightarrow h^+ h^- \pi^+$	Run 1&2	<i>As before</i>

- Gronau-London-Wyler (GLW):
 CP eigenstates, *i.e.* $D^0 \rightarrow K^+ K^-, \pi^+ \pi^-, \dots$
- Atwood-Dunietz-Soni (ADS) :
Flavoured final states, *i.e.* $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- (\pi^0, \pi^+ \pi^-)$
- Bondar-Poluektov-Giri-Grossman-Soffer-Zupan (BPGGSZ):
Self-conjugate multibody final states, *i.e.* $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-, D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$

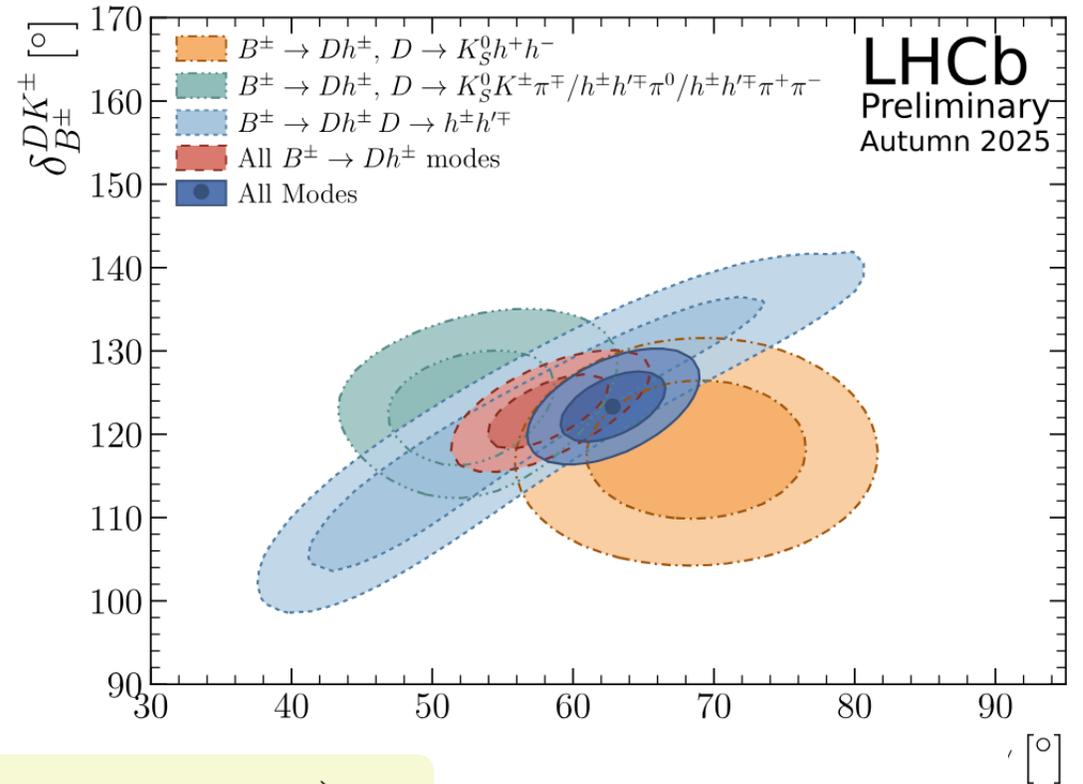
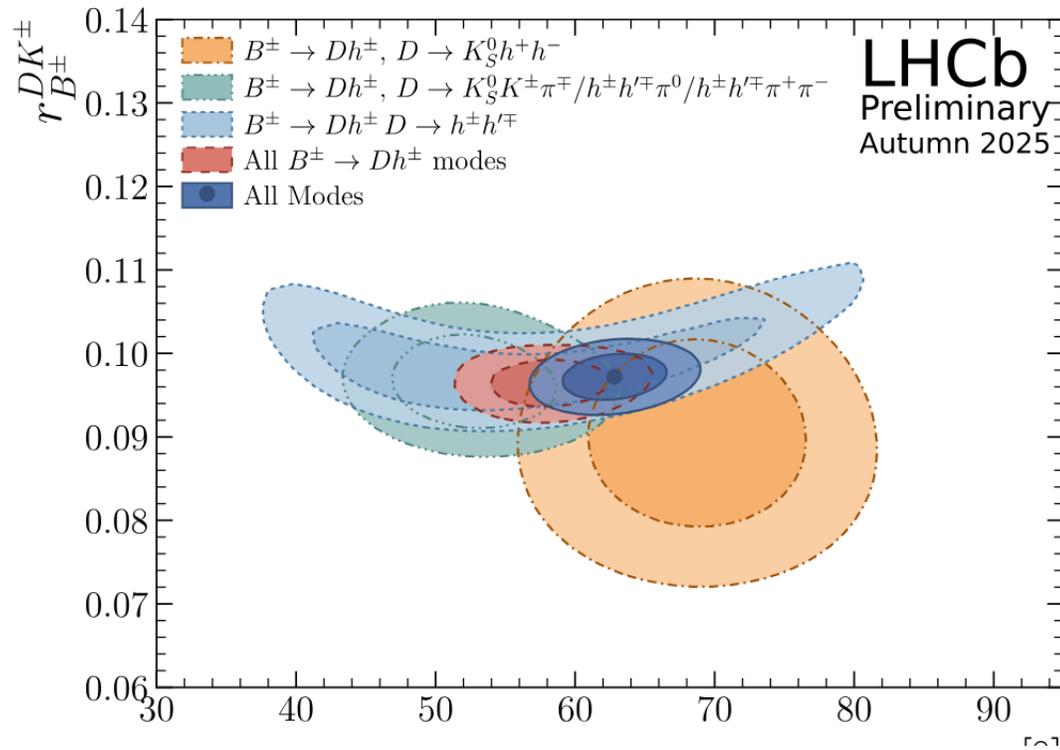
Phys. Lett. B. 253, (1991)

Phys. Rev. Lett. 78, 3257

Phys. Rev. D 68, 054018

For additional history

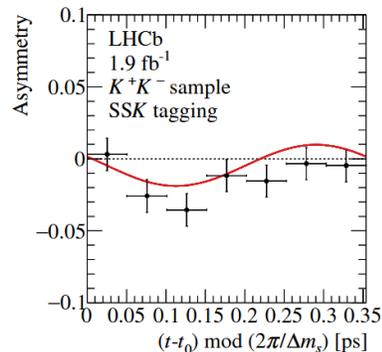
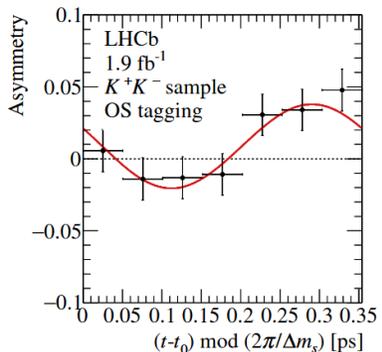
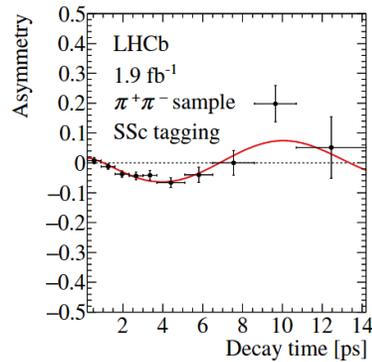
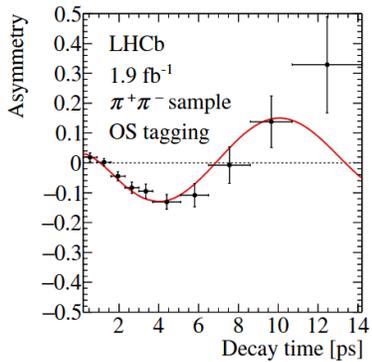
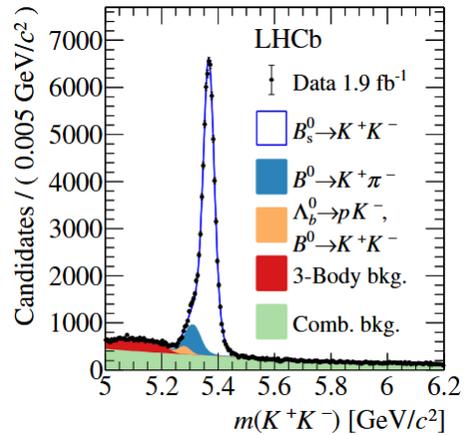
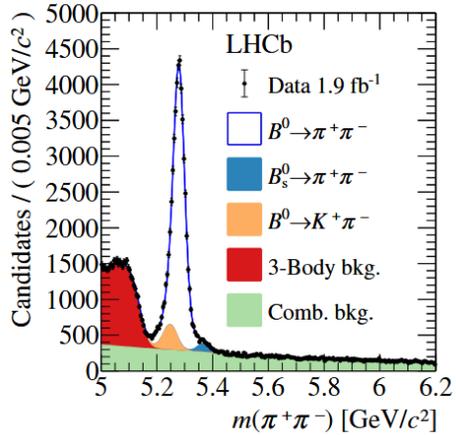
Измерение СКМ γ



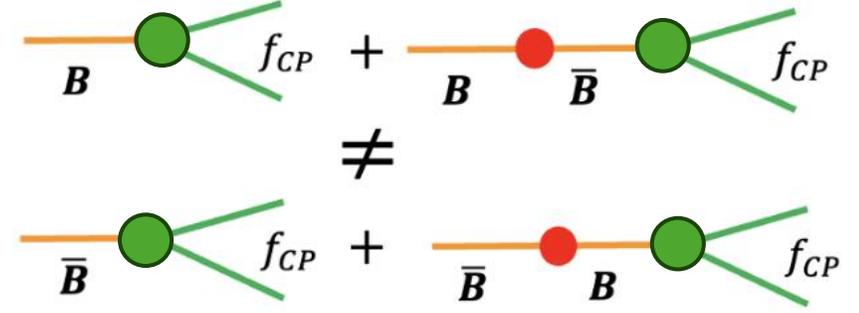
$$\gamma = (62.8 \pm 2.6)^\circ$$

$$\gamma_{\text{indirect}} = (66.3^{+0.7}_{-1.9})^\circ \quad \text{http://ckmfitter.in2p3.fr/} \quad = (65.2 \pm 1.5)^\circ \quad \text{http://utfit.org/UTfit/}$$

Зависящее от времени CP нарушения для B_s^0



JHEP 03 (2021) 075



$$\mathcal{A}_f^{CP}(t) = \frac{d\Gamma_{B_s^0 \rightarrow f}(t)/dt - d\Gamma_{\bar{B}_s^0 \rightarrow f}(t)/dt}{d\Gamma_{B_s^0 \rightarrow f}(t)/dt + d\Gamma_{\bar{B}_s^0 \rightarrow f}(t)/dt} = \frac{-C_f \cos(\Delta m_s t) + S_f \sin(\Delta m_s t)}{\cosh(\Delta\Gamma_s t/2) + A_f^{\Delta\Gamma} \sinh(\Delta\Gamma_s t/2)}$$

$$C_{\pi\pi} = -\frac{2d \sin \theta \sin \gamma}{1 - 2d \cos \theta \cos \gamma + d^2} \quad S_{\pi\pi} = -\frac{\sin(2\beta + 2\gamma) - 2d \cos \theta \sin(2\beta + \gamma) + d^2 \sin 2\beta}{1 - 2d \cos \theta \cos \gamma + d^2}$$

$$C_{KK} = -\frac{2\tilde{d}' \sin \theta' \sin \gamma}{1 - 2\tilde{d}' \cos \theta' \cos \gamma + \tilde{d}'^2} \quad S_{KK} = -\frac{\sin(2\beta_s + 2\gamma) - 2\tilde{d}' \cos \theta \sin(2\beta_s + \gamma) + \tilde{d}'^2 \sin 2\beta_s}{1 - 2\tilde{d}' \cos \theta \cos \gamma + \tilde{d}'^2}$$

$$A_{KK}^{\Delta\Gamma} = -\frac{\cos(2\beta_s + 2\gamma) - 2\tilde{d}' \cos \theta \cos(2\beta_s + \gamma) + \tilde{d}'^2 \cos 2\beta_s}{1 - 2\tilde{d}' \cos \theta \cos \gamma + \tilde{d}'^2}$$

$$\begin{aligned} C_{\pi\pi} &= -0.311 \pm 0.045 \pm 0.015, \\ S_{\pi\pi} &= -0.706 \pm 0.042 \pm 0.013, \\ C_{KK} &= 0.164 \pm 0.034 \pm 0.014, \\ S_{KK} &= 0.123 \pm 0.034 \pm 0.015, \\ A_{KK}^{\Delta\Gamma} &= -0.83 \pm 0.05 \pm 0.09, \end{aligned}$$

Первое
наблюдение для
 B_s^0

Очарованные частицы

Discovery of the direct CP in decays of charmed mesons

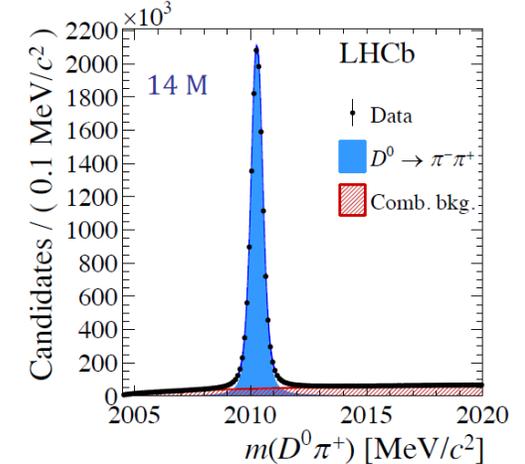
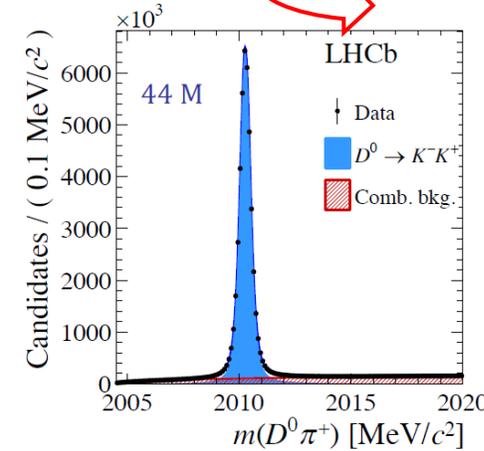
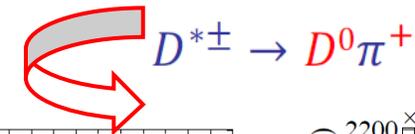
CP асимметрия:

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

$$f = \pi^- \pi^+, K^- K^+$$

Таггинг аромата:

$$B \rightarrow D^0(\rightarrow f)\mu^- X$$



Results for Run 1 + Run 2 :

$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

- SM предсказывает малое CP нарушение для c -кварков.
- LHCb достиг чувствительности уровня SM
- Измеряется разница асимметрий для двух CP -четных каналов распада D^0 мезона. Это позволяет значительно уменьшить асимметрии рождения и детектирования

- Использовались оба метода таггирования аромата D мезона

- **Статистическая значимость $5,3\sigma$ \rightarrow Первое наблюдение CP нарушения в распадах очарованных частиц**

- *Phys. Rev. Lett.* **122 (2019) 211803**

$$\Delta A_{CP} \equiv A_{raw}(KK) - A_{raw}(\pi\pi) = A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi)$$

$\Delta A_{CP} \neq 0 \rightarrow$ Violation of CP

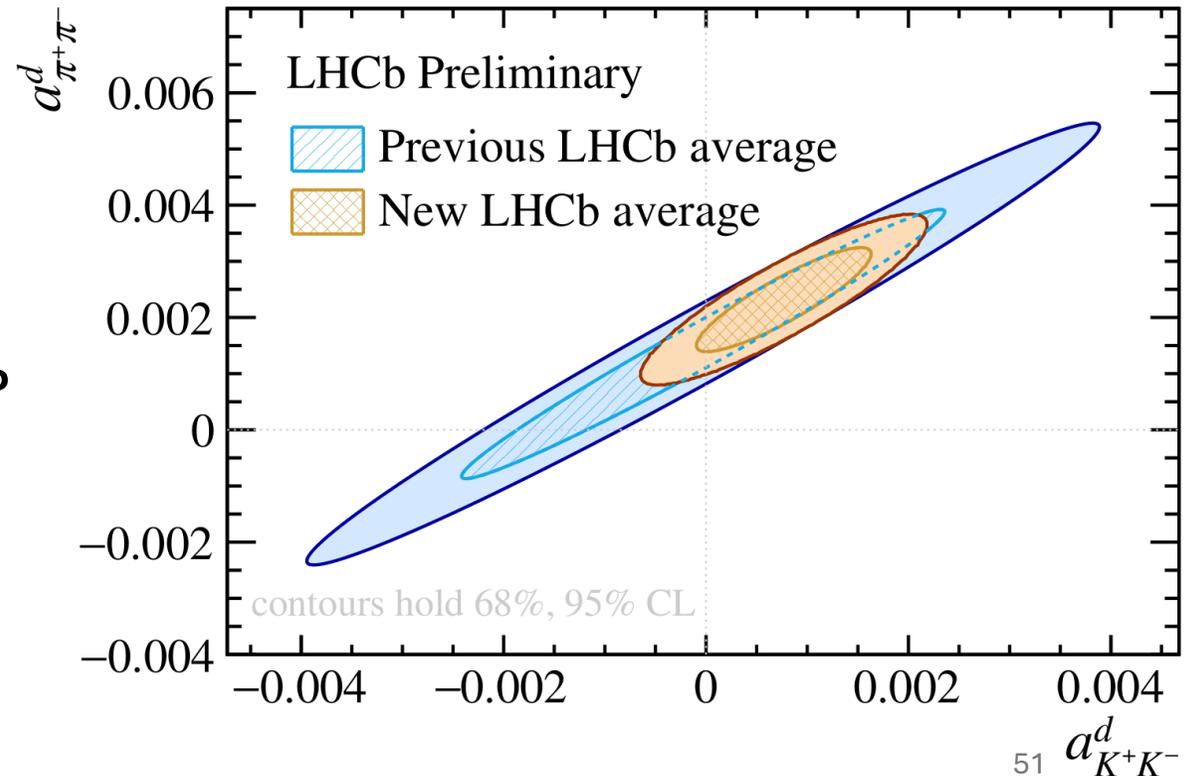
$D^0 \rightarrow K^- K^+$ или $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$?Два метода $A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+)$

- **2019:** $D^0 \rightarrow K^- K^+$ и $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$
- $\Delta A_{CP} = A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi) \neq 0$
- CP симметрия нарушено, но что источник?!

$$A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) = A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- K^+) \pi^+) - A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \pi^+) + A(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) - [A(D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+) - A(K^0)],$$

$$A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) = A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- K^+) \pi^+) - A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \pi^+) + A(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+) - [A(D_s^+ \rightarrow \bar{K}^0 K^+) - A(K^0)].$$

- **2022:** $D^0 \rightarrow K^- K^+$ – измерения $A_{CP}(KK)$
- Два метода коррекции асимметрий
- $A_{CP}(KK) = (6.8 \pm 5.4_{\text{стат.}} \pm 2.0_{\text{сист.}}) \times 10^{-4}$
- Используя ΔA_{CP} , можно определить вклады $D^0 \rightarrow K^- K^+$ и $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ каналов
- $a_{\pi\pi}^d$ не равна нулю на уровне 3.8σ
- Указание на CP нарушение в распадах $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$

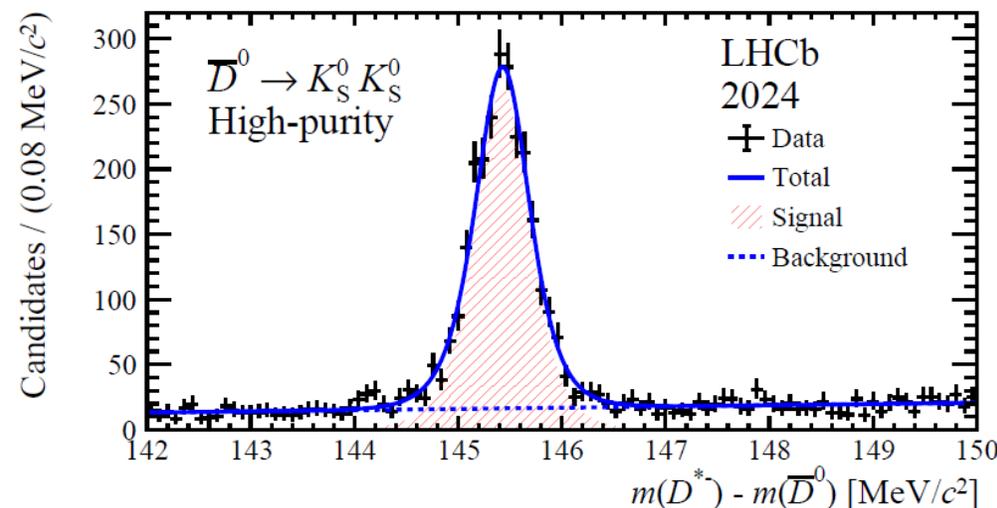
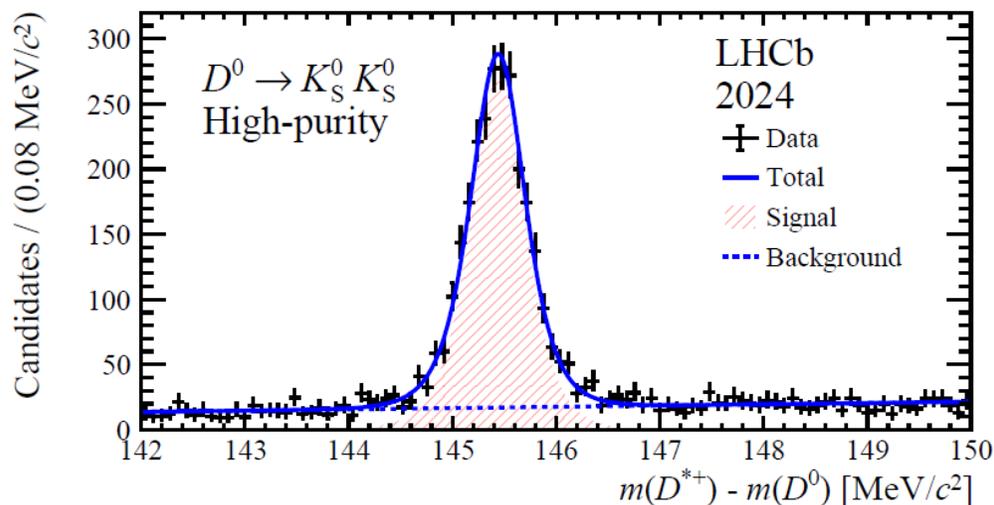


Поиск CP-нарушения в данных Run-3

- Данные 2024 года, при энергии 13.6 TeV, соответствующие интегральной светимости 6.2 fb^{-1}
- За год набрана статистика как за весь Run-2
- Адронный таггинг (prompt) аромата

CP-нарушение не обнаружено

[arXiv:2510.14732](https://arxiv.org/abs/2510.14732)



$$\mathcal{A}^{CP}(K_S^0 K_S^0) \equiv \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0)}$$



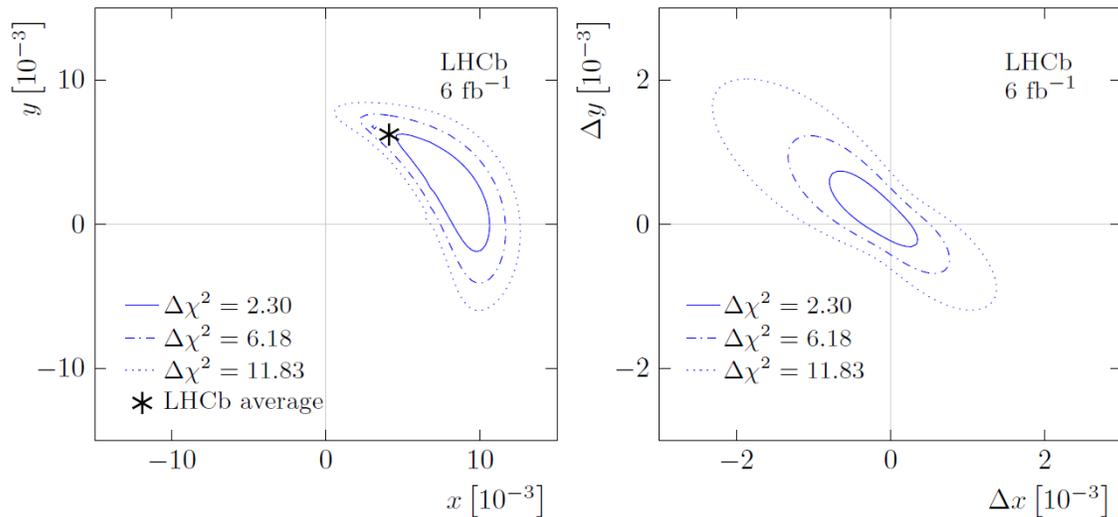
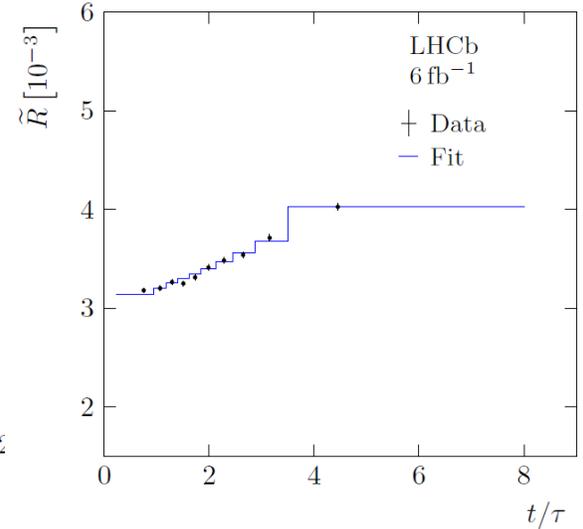
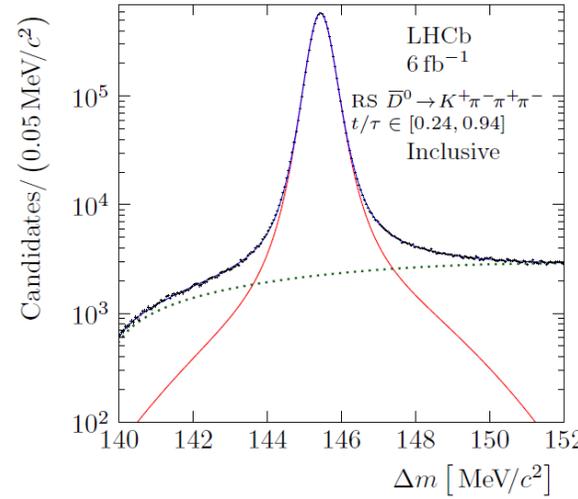
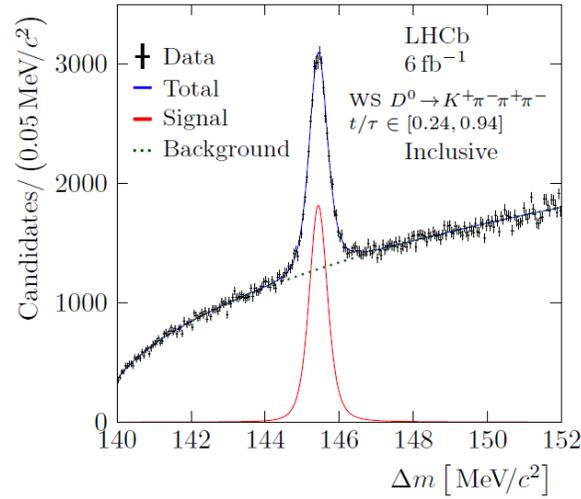
$$\mathcal{A}^{CP}(K_S^0 K_S^0) = (-0.37 \pm 0.78 \pm 0.29)\%$$

Поиск CP-нарушения и измерение параметров смешивания для $D^0 \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm \pi^\mp$

$$R(t) \equiv \frac{\Gamma[D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-](t)}{\Gamma[D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \pi^+](t)} \approx r^2 - r\kappa y' \frac{t}{\tau} + \frac{x^2 + y^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2,$$

$$y' \equiv y \cos \delta - x \sin \delta.$$

- Исследование эволюции во времени отношения Кабиббо-разрешенного и дважды-Кабиббо-подавленного каналов распада позволяет измерить параметры смешивания, определить адронные фазы необходимы для измерения СКМ- γ , а также для поиска эффектов CP-нарушения



$$r = (5.49 \pm 0.02) \times 10^{-2},$$

$$\kappa = 0.430^{+0.043}_{-0.039},$$

$$\delta = (163.3^{+13.8}_{-14.8})^\circ,$$

$$x = (0.85^{+0.15}_{-0.24})\%,$$

$$y = (0.21^{+0.29}_{-0.27})\%,$$

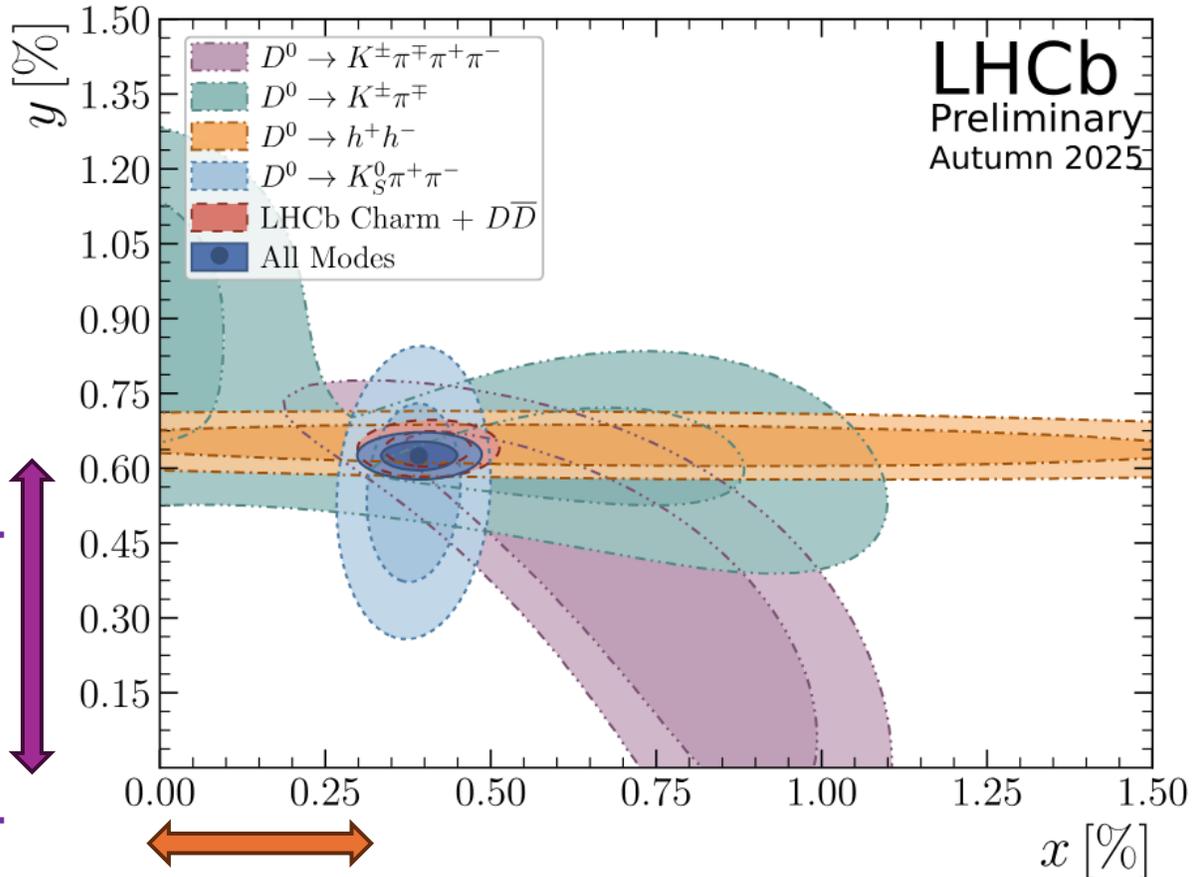
$$\Delta x = (-0.02 \pm 0.04)\%,$$

$$\Delta y = (0.02^{+0.04}_{-0.03})\%.$$

- Улучшена точность измерения адронных параметров и параметров смешивания [arXiv:2510.04963](https://arxiv.org/abs/2510.04963)
- CP-нарушение не обнаружено

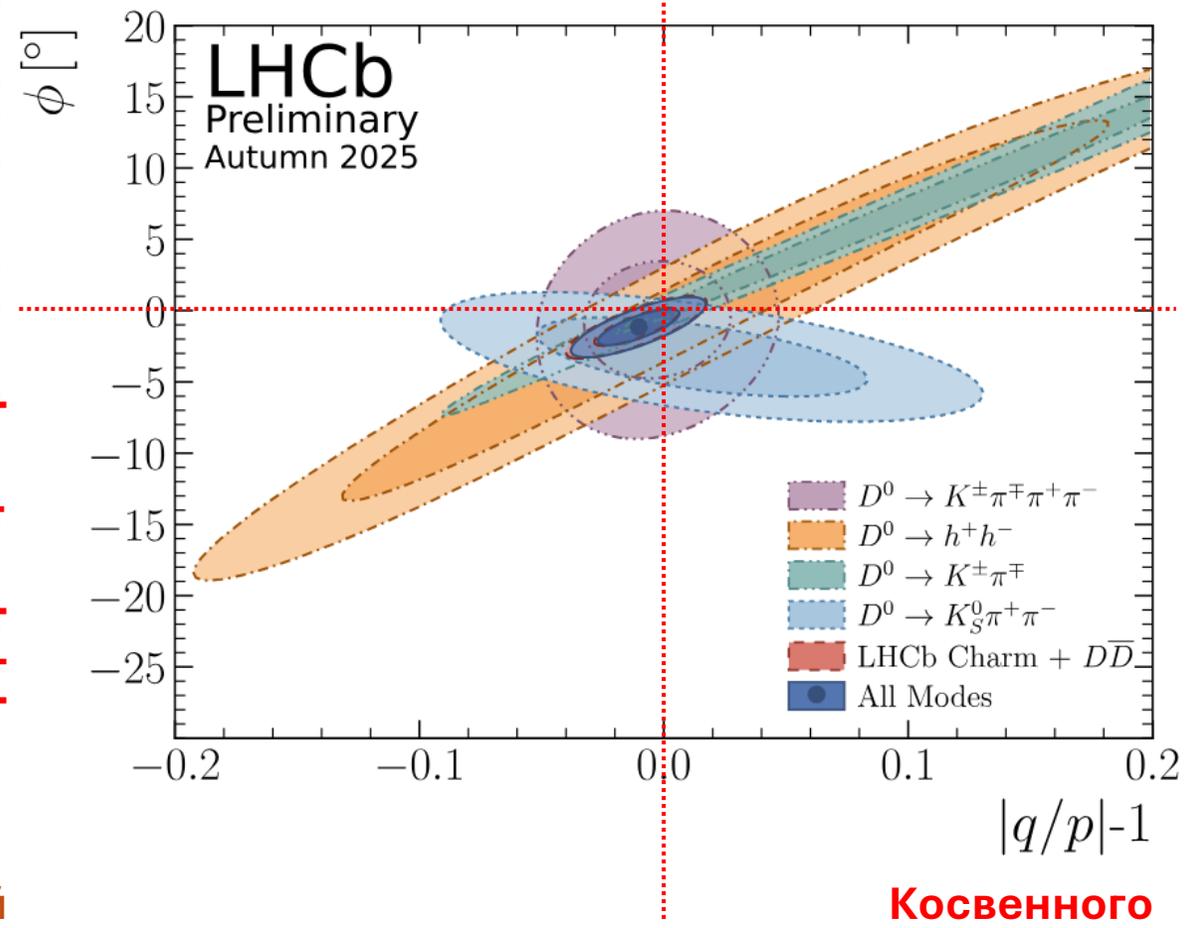
Поиск CP-нарушения и измерение параметров смешивания для осцилляций D^0

Ненулевая разность ширины массовых состояний



Ненулевая разность масс массовых состояний

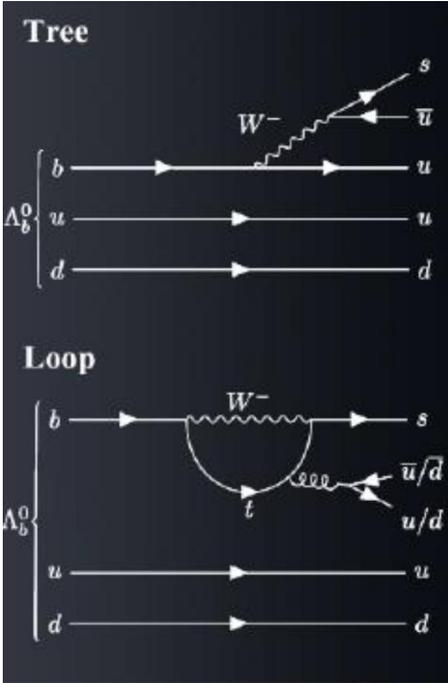
Интерференция прямого и косвенного



Распады барионов

Обнаружение **CP-нарушения** в распадах барионов

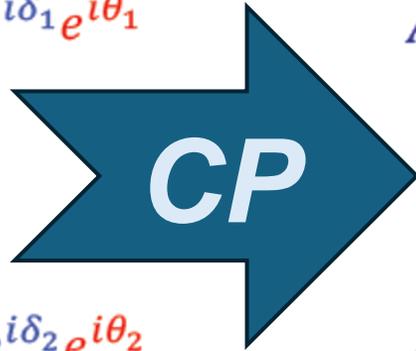
$$\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$$



Для наблюдения CP-нарушения необходима как минимум интерференция двух амплитуд (малость $|V_{ub}|$ дает большие асимметрии)

$$A_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{i\theta_1}$$

$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$



Слабая фаза меняет свой знак при операции CP, а **сильная** не меняет

$$A_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{i\theta_2}$$

$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

$$|\bar{A}_1 + \bar{A}_2|^2 - |A_1 + A_2|^2 = 4\rho_1\rho_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

- Прямое CP-нарушение проявляется в появлении асимметрии распада
- Относительно легко измерить
- Сложности теоретических расчетов из-за наличия сильной фазы

$$\Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}$$

Новые работы LHCb по теме:

- Measurement of CP asymmetries in $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$ decays
[LHCb-PAPER-2024-048](#)
[arXiv:2412.13958](#)

- Observation of charge-parity symmetry breaking in baryon decays
[LHCb-PAPER-2024-054](#)
[arXiv:2503.16954](#)

[Nature 643 \(2025\) 1223-1228](#)

- Study of Λ_b^0 and Ξ_b^0 decays to $\Lambda h^+ h'^-$ and evidence for CP violation in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$

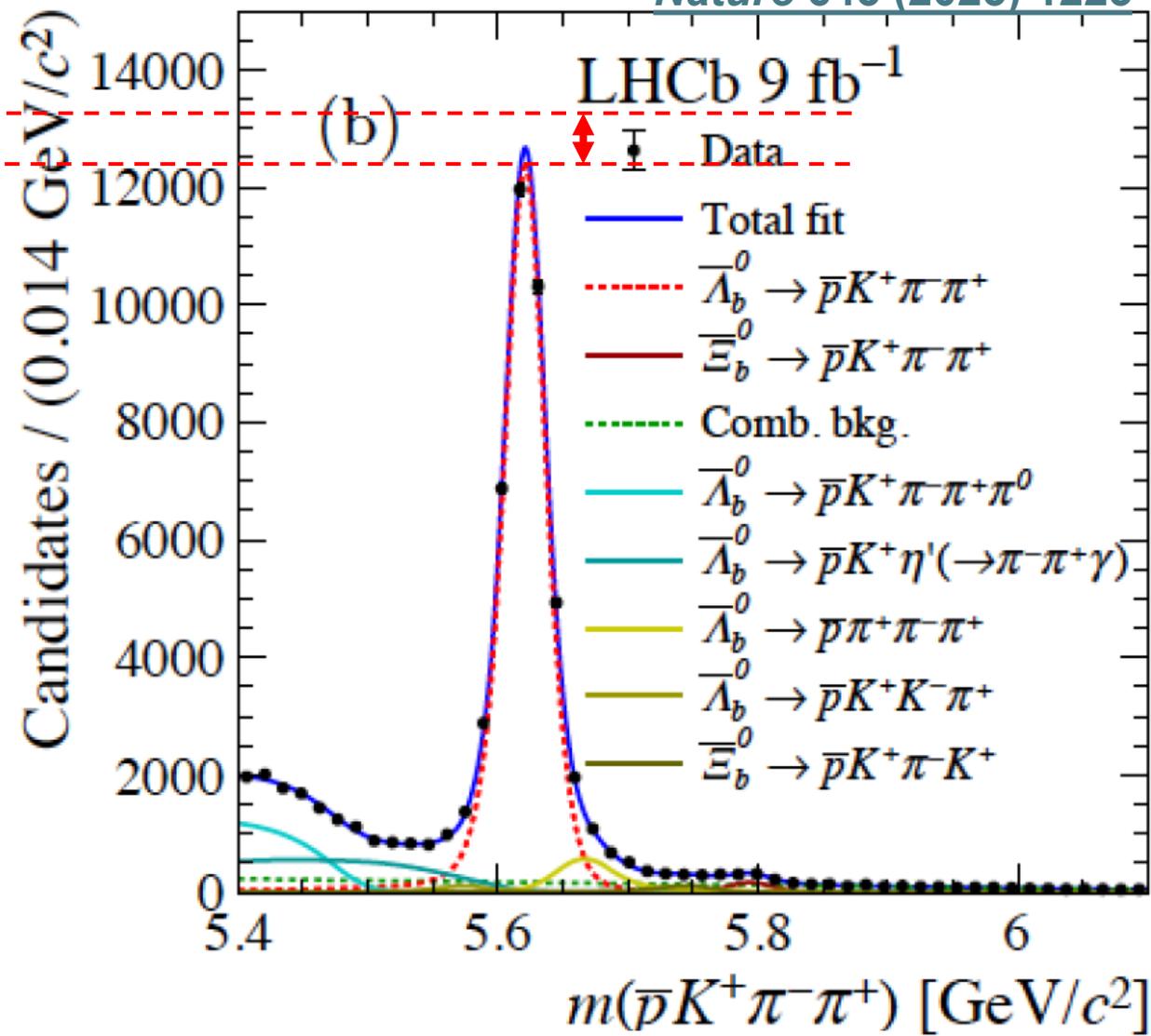
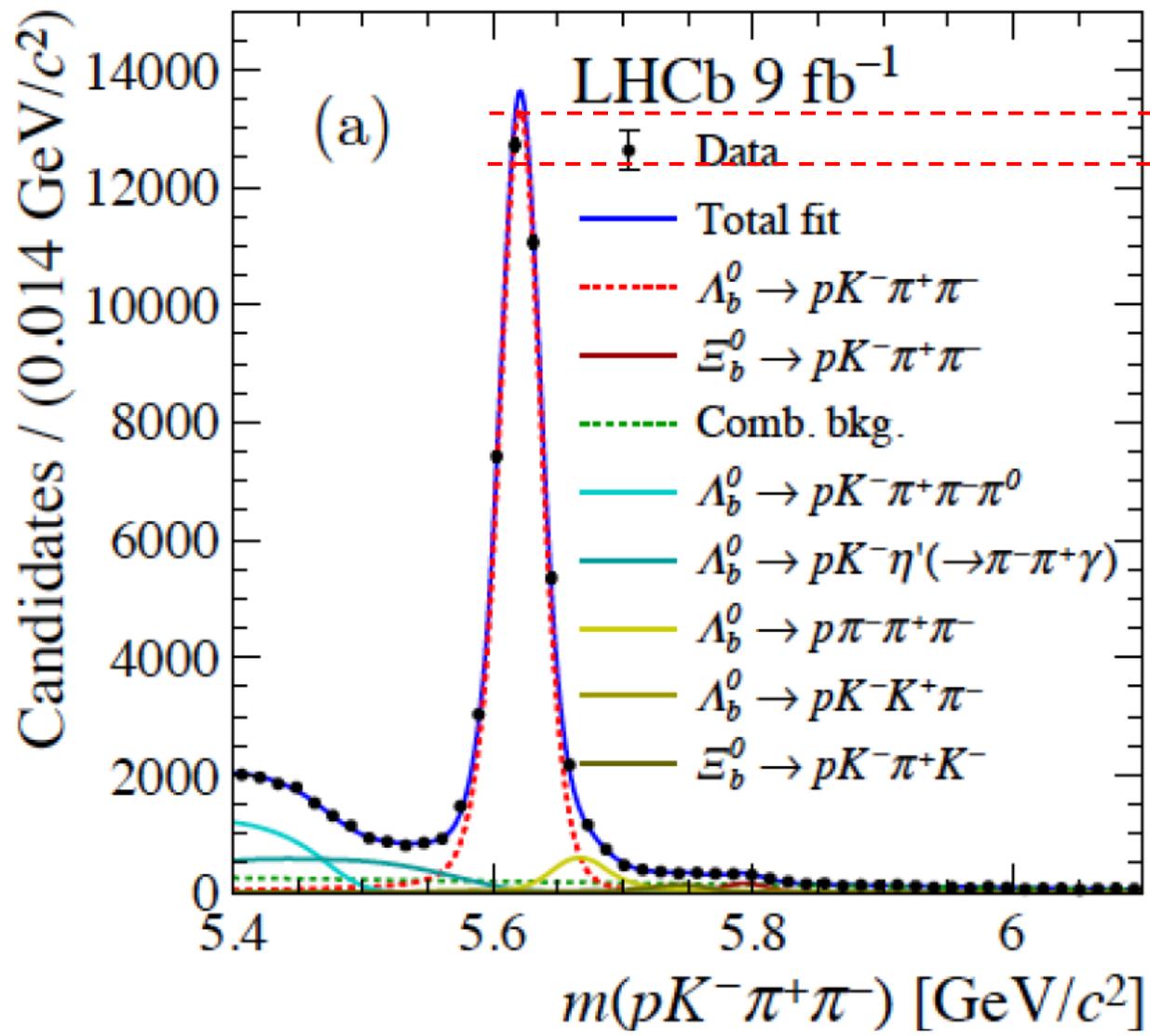
[LHCb-PAPER-2024-043](#)
[Phys. Rev. Lett. 134 \(2025\) 101802](#)

Decay topology	Mass region (GeV/c ²)	\mathcal{A}_{CP}
$\Lambda_b^0 \rightarrow (pK^-)(\pi^+\pi^-)$	$m_{pK^-} < 2.2$	$(5.24 \pm 1.29 \pm 0.21)\%$
	$m_{\pi^+\pi^-} < 1.1$	
$\Lambda_b^0 \rightarrow (p\pi^-)(K^-\pi^+)$	$m_{p\pi^-} < 1.7$	$(2.73 \pm 0.82 \pm 0.14)\%$
	$m_{\pi^+K^-} \in [0.8, 1.0] \cup [1.1, 1.6]$	
$\Lambda_b^0 \rightarrow (p\pi^-\pi^+)K^-$	$m_{p\pi^-\pi^+} < 2.7$	$(5.39 \pm 0.86 \pm 0.10)\%$
$\Lambda_b^0 \rightarrow (K^-\pi^+\pi^-)p$	$m_{K^-\pi^+\pi^-} < 2.0$	$(2.01 \pm 1.16 \pm 0.30)\%$

[Nature 643 \(2025\) 1223](#)

CP-асимметрия для $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-$ измерена: $A_{CP} = 2.45 \pm 0.46 \pm 0.10 \%$

Nature 643 (2025) 1223



Изучение CP-асимметрии в зависимости от на диаграмме Далица позволяет понять

«резонансную»-зависимость эффекта $\Delta A_{CP}(N^{*+}K^-) = 0.165 \pm 0.048 \pm 0.017$

Указание на CP-нарушение в распадах $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p h$ ($h=\pi, K$)

arXiv:2509.16103

$$\Delta\mathcal{A}_{CP} \equiv \mathcal{A}_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-) - \mathcal{A}_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-),$$

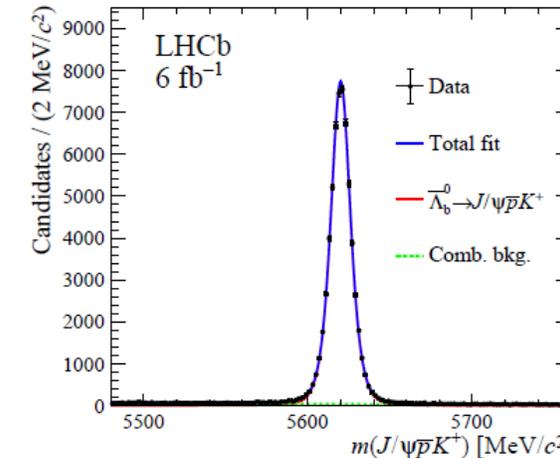
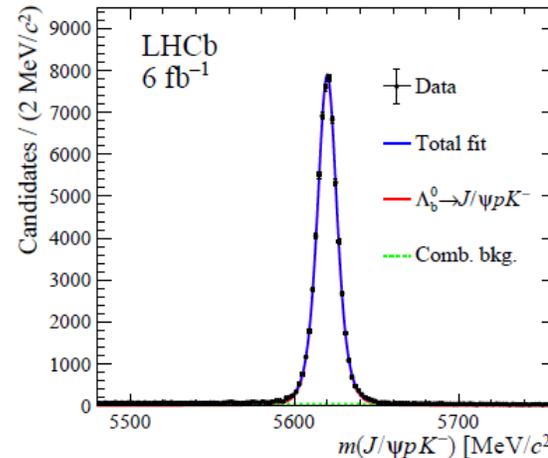
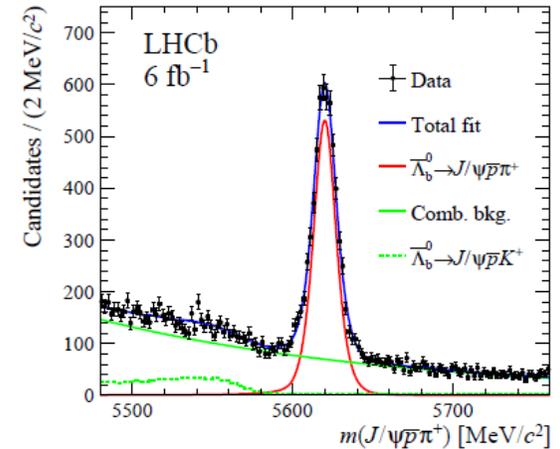
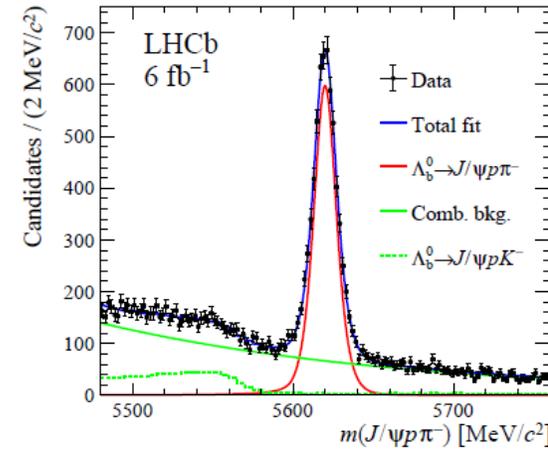
- Метод $\Delta\mathcal{A}_{CP}$ позволяет избавиться от влияния асимметрий связанных с механизмом рождения b -бариона и асимметрией детектирования продуктов распада

$$\mathcal{M} \sim (V_{cd}V_{cb}^*)T + (V_{td}V_{tb}^*)P_t \text{ for } \Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$$

$$\mathcal{M} \sim (V_{cs}V_{cb}^*)T + (V_{us}V_{ub}^*)P_u \text{ for } \Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$$

- Объединённый с данными Run-1 результат

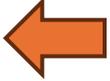
$$\Delta\mathcal{A}_{CP} = (4.31 \pm 1.06 \pm 0.28)\%.$$



- Первое указание на эффект CP-нарушение при таких распадах
- Значимость 3.9σ

Прелестные барионы

- [32] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. 134, 101601 (2025).
- [33] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., J. High Energ. Phys. 8, 39 (2018).
- [34] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., Submitted to Science Bulletin, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.16103>.

- $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^- K^+$, 3.1σ [32];  CP-нарушение в распадах прелестных адронов ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$, up to 3σ [33];  Наблюдается P-нарушение
- $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p h^-$ with $h = \pi, K$, 3.9σ [34] obtained with the ΔA_{CP} technique¹.

Asymmetries in baryon decays have also been explored in other decay channels, including Λ_b^0 decays into $D^0 p K^-$, $p\pi^-$, $pK^- \bar{K}^-$, $pK^- \mu^+ \mu^-$, $K_S^0 p\pi^-$, as well as for the decays $\Lambda_b^0/\Xi_b^0 \rightarrow phh'h''$, where h represents a kaon or pion. No CPV has been observed in

Очарованные барионы

- Поиск CP-нарушения в очарованных барионах на LHCb (Run 1)
 - Изучались два канала распада с использованием данных Run 1.

- Анализ распадов Λ_c^+

- Исследованы моды: $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-K^+$ и $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^-\pi^+$.

- Λ_c^+ отбирались из распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+\mu^-X$.

- Для подавления систематических эффектов применено взвешивание фазового пространства пионной моды (A_{CP}^{wgt}).

- Результат: разница CP-асимметрий составила:

$$\Delta A_{CP}^{\text{wgt}} = (0.30 \pm 0.91_{\text{stat}} \pm 0.61_{\text{syst}})\%$$

Результат совместим с нулем в пределах погрешностей.

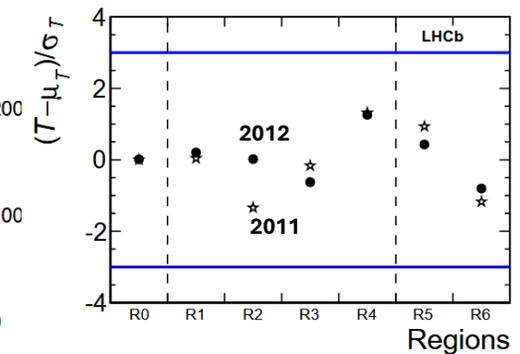
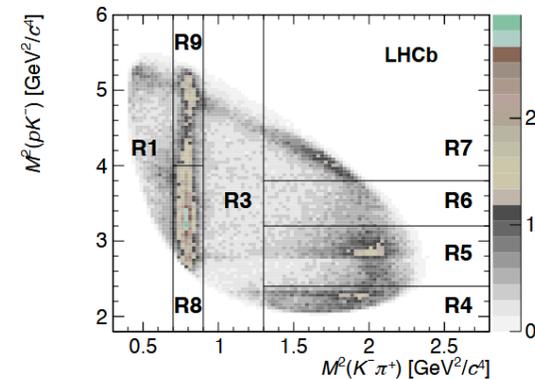
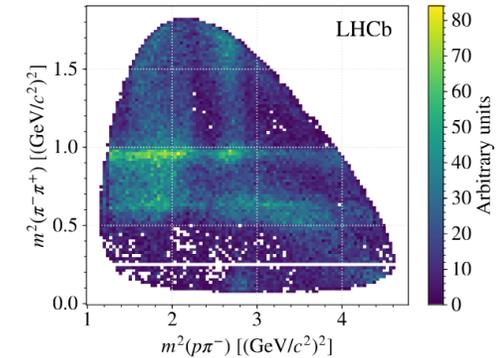
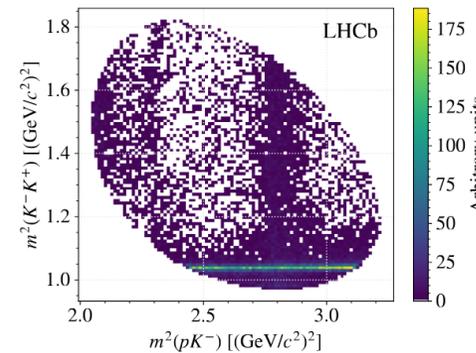
- Поиск CPV в распаде Ξ_c^+

- Выполнен модельно-независимый поиск в канале $\Xi_c^+ \rightarrow pK^-\eta$ [15/1].

- Результат: данных, указывающих на CP-нарушение, не обнаружено.

[36] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., J. High Energ. Phys. 3, 182 (2018).

[37] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., Eur. Phys. J. C80, 86 (2020).



Заключение

- Эксперимент LHCb на сегодняшний день является лидером исследований CP-нарушения для кварков
- Эксперимент полностью подтверждает Стандартную Модель
 - CP нарушение за счет единственной комплексной фазы в матрице смешивания
 - Самосогласованная картина эффектов разных типов
 - Прямое и косвенное CP нарушение, и их интерференция
 - Контрольные каналы с нулевыми асимметриями
- Измерения **параметров треугольников унитарности**
- Важнейшие открытия LHCb:
 - 2012: Обнаружение прямого CP-нарушения в распадах B^+
 - 2013: Обнаружение прямого CP-нарушения в распадах B_s^0
 - 2019: Обнаружение прямого CP-нарушения в распадах **очарованных мезонов**
 - 2020: Обнаружение зависящего от времени CP-нарушения в распадах B_s^0 ;
 - 2020: Обнаружение **CP-нарушения в интерференции** между спин-1 $\rho(770)$ резонансом и спин-0 S-волновым вкладом в распаде $B^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$
 - 2025: Обнаружение прямого CP-нарушения в распадах **барионов**.