

# Результаты ЛНСб по измерению эффектов *СР*-нарушения

Алексей Дзюба, ЛБФ ОФВЭ НИЦ «КИ» – ПИЯФ  
Семинар ОФВЭ, 2026-02-17

# Аннотация

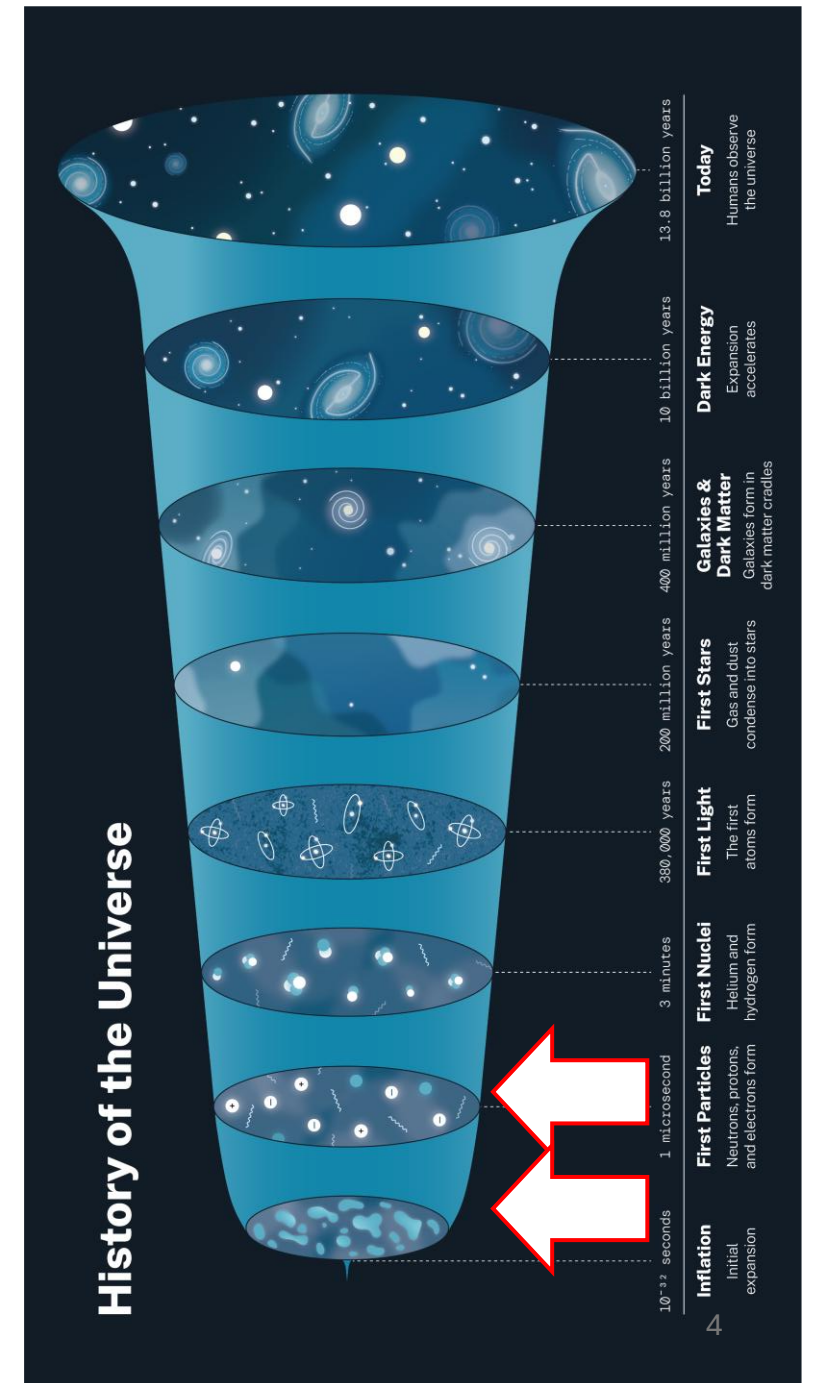
- Нарушение комбинированной четности ( $CP$ -симметрии) является необходимым условием для объяснения наблюдаемой барионной асимметрии Вселенной, что делает изучение известных и поиск новых  $CP$ -нарушающих эффектов одной из основных задач эксперимента LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК).
- Данный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

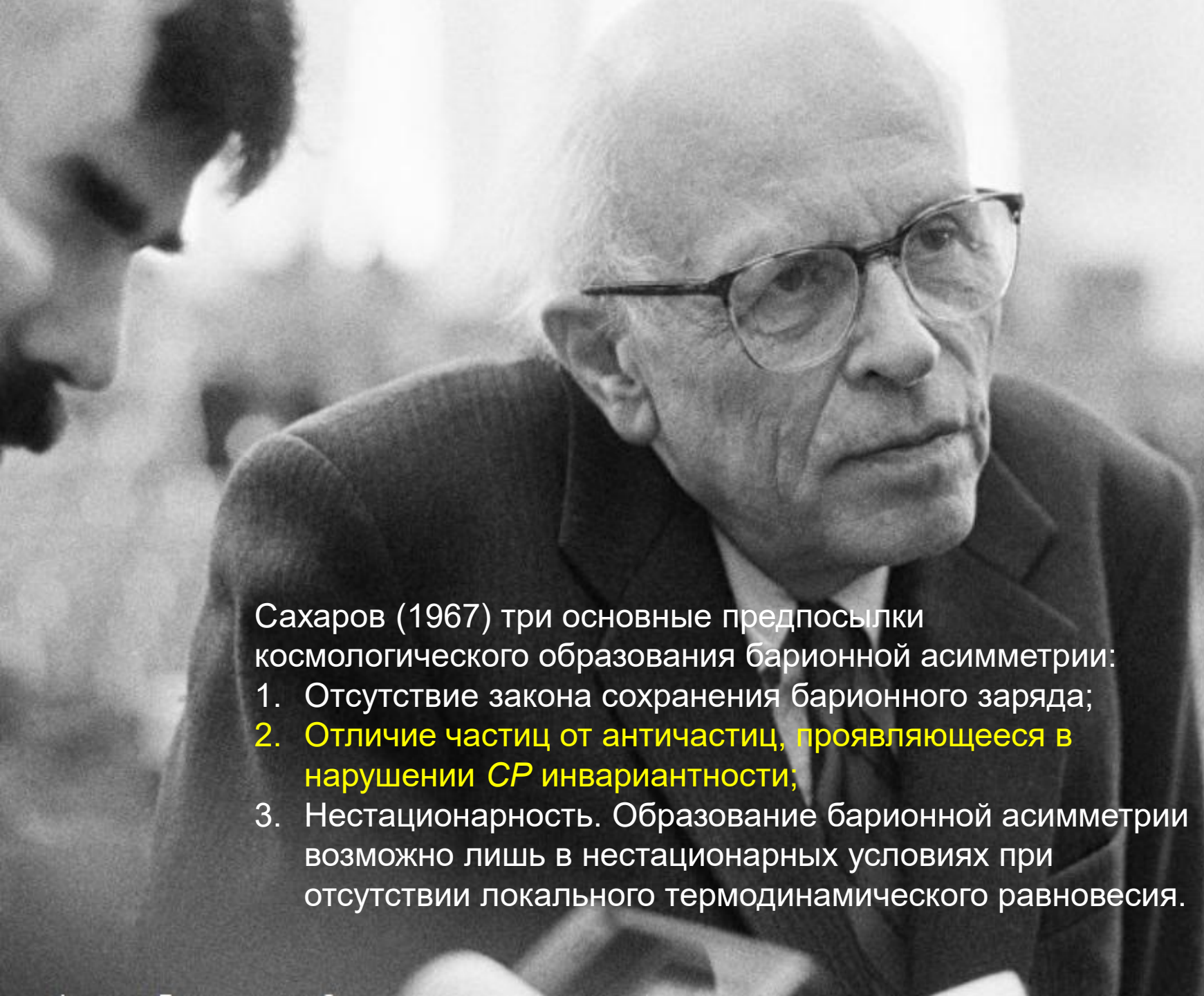
# Почему видимая Вселенная состоит из материи?

- 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  $\eta$
- **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  $L_e, L_\mu, L_\tau$ , 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 прелестных 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  $\gamma$**  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  $\phi_s$  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  $\phi_s$  with the full LHCb data sample, Peilian Li, Vukan Jevtic ([Семинар ЦЕРН](#))
  - The **angle  $\gamma$**  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  $\gamma$** , **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

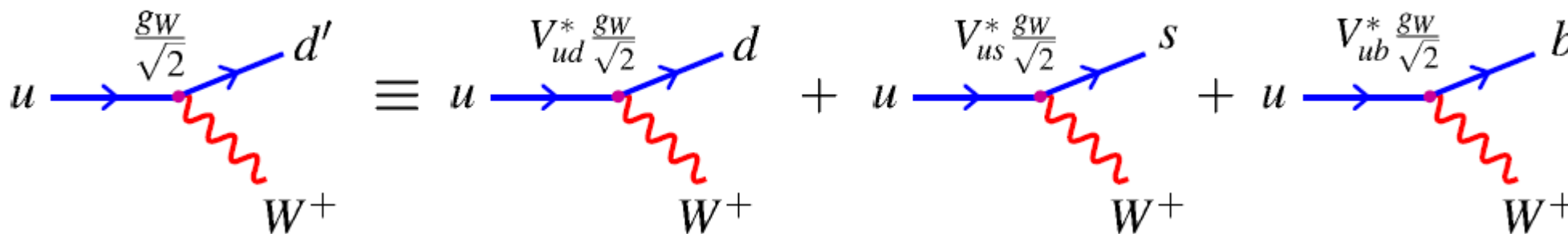
**СКМ Matrix**

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 $s_{ij} = \sin \phi_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \phi_{ij}$

**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 \**  
**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:**

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

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

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

# 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**

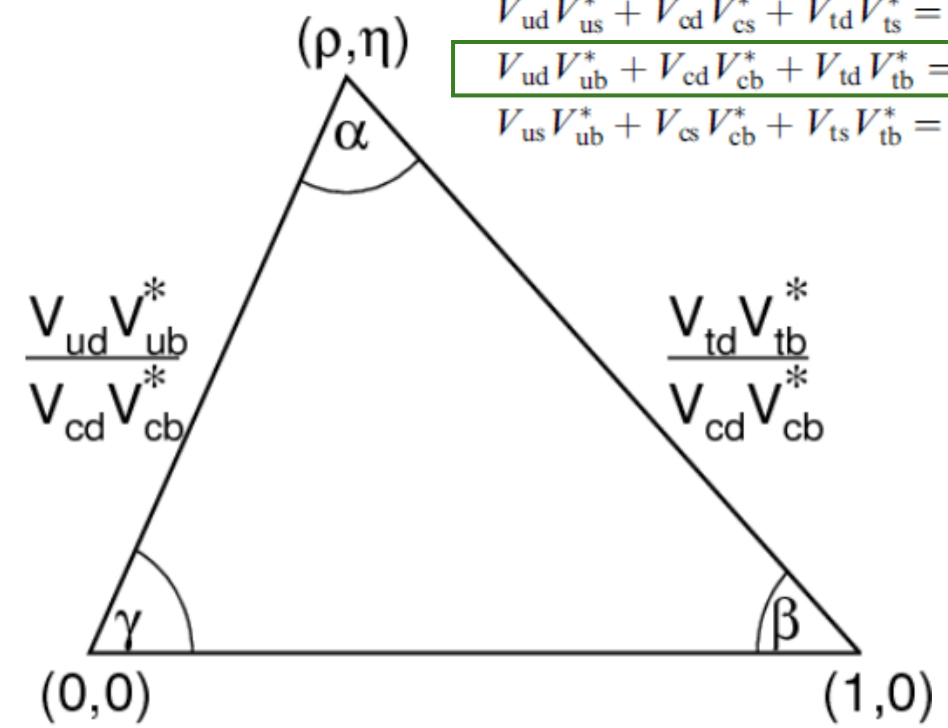
(**Инвариант Ярлског**)

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

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:  $M = M_{EW} \sim 100 \text{ ГэВ}$

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

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

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

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

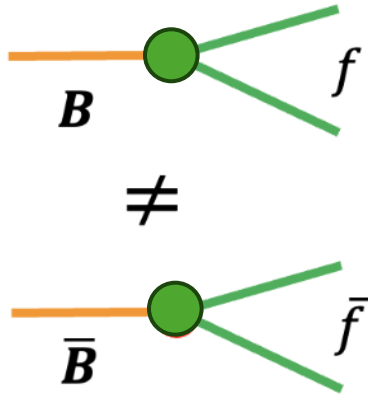


- **Механизм КМ дает четкие предсказания для прелестных и очарованных частиц**

- **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



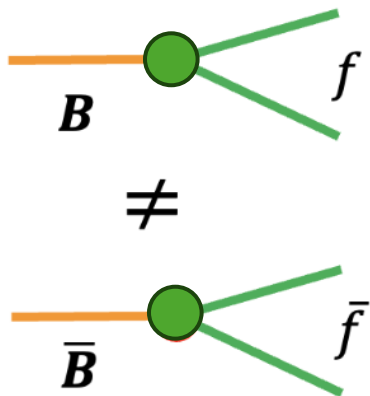
1) Прямое CP-  
нарушение (нарушение  
в распадах)  $\rightarrow$   
асимметрии распадов

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

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



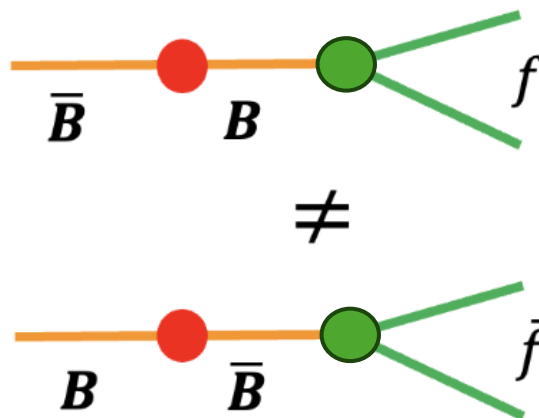
# Типы CP-нарушения и наблюдаемые



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

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

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



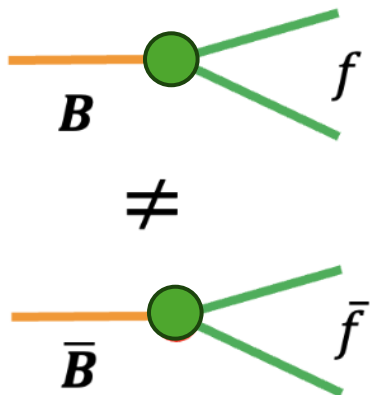
2) Косвенное CP-нарушение (нарушение при смешивании)

→ Несовпадение собственных состояний по массе и по оператору CP

→ Асимметрии распадов нейтральных мезонов, которая не зависит от времени

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

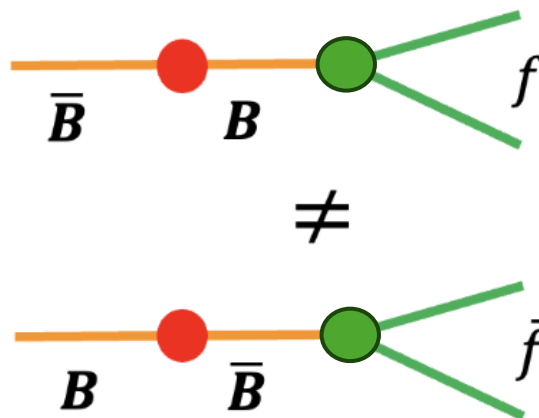
# Типы CP-нарушения и наблюдаемые



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

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

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



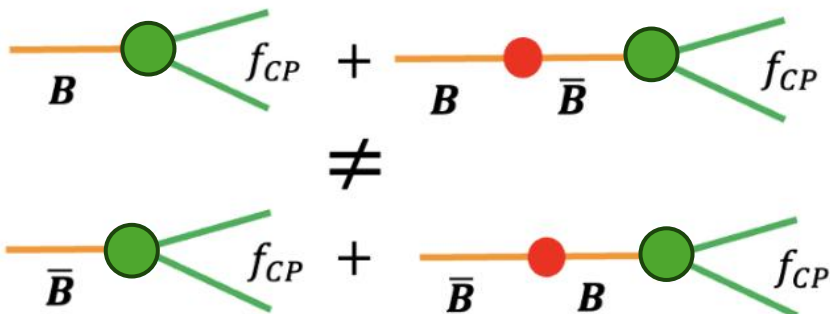
2) Косвенное CP-нарушение (нарушение при смешивании)

→ Несовпадение собственных состояний по массе и по оператору CP

→ Асимметрии распадов нейтральных мезонов, которая не зависит от времени

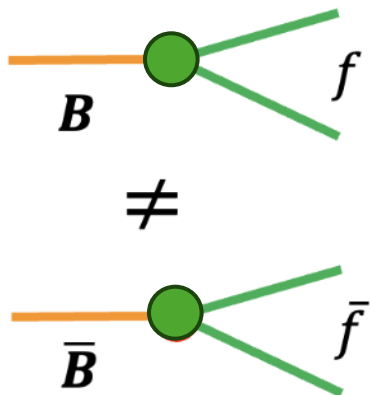
$$A_{CP}^{\text{ind}} = \frac{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})},$$

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



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

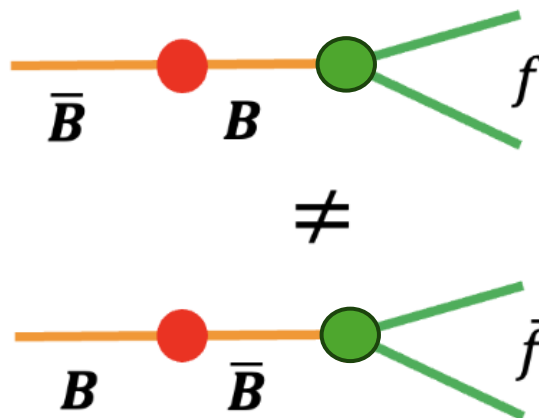
# Типы CP-нарушения и наблюдаемые



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

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

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



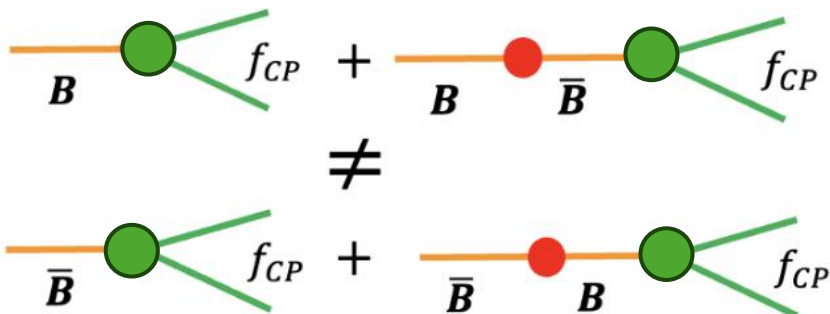
2) Косвенное CP-нарушение (нарушение при смешивании)

→ Несовпадение собственных состояний по массе и по оператору CP

→ Асимметрии распадов нейтральных мезонов, которая не зависит от времени

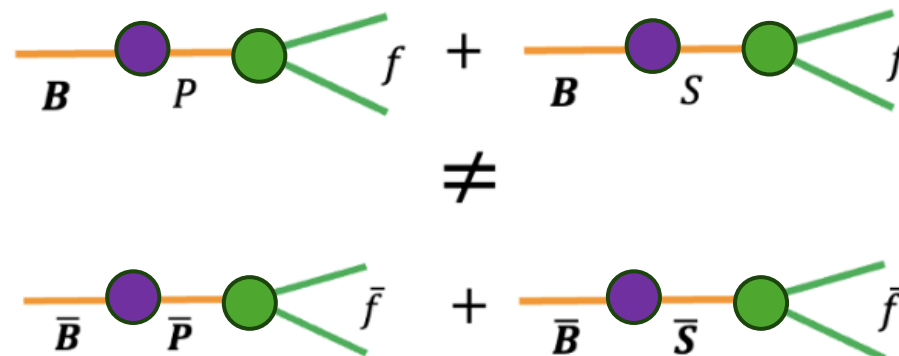
$$A_{\text{CP}}^{\text{ind}} = \frac{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow \bar{f})},$$

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



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

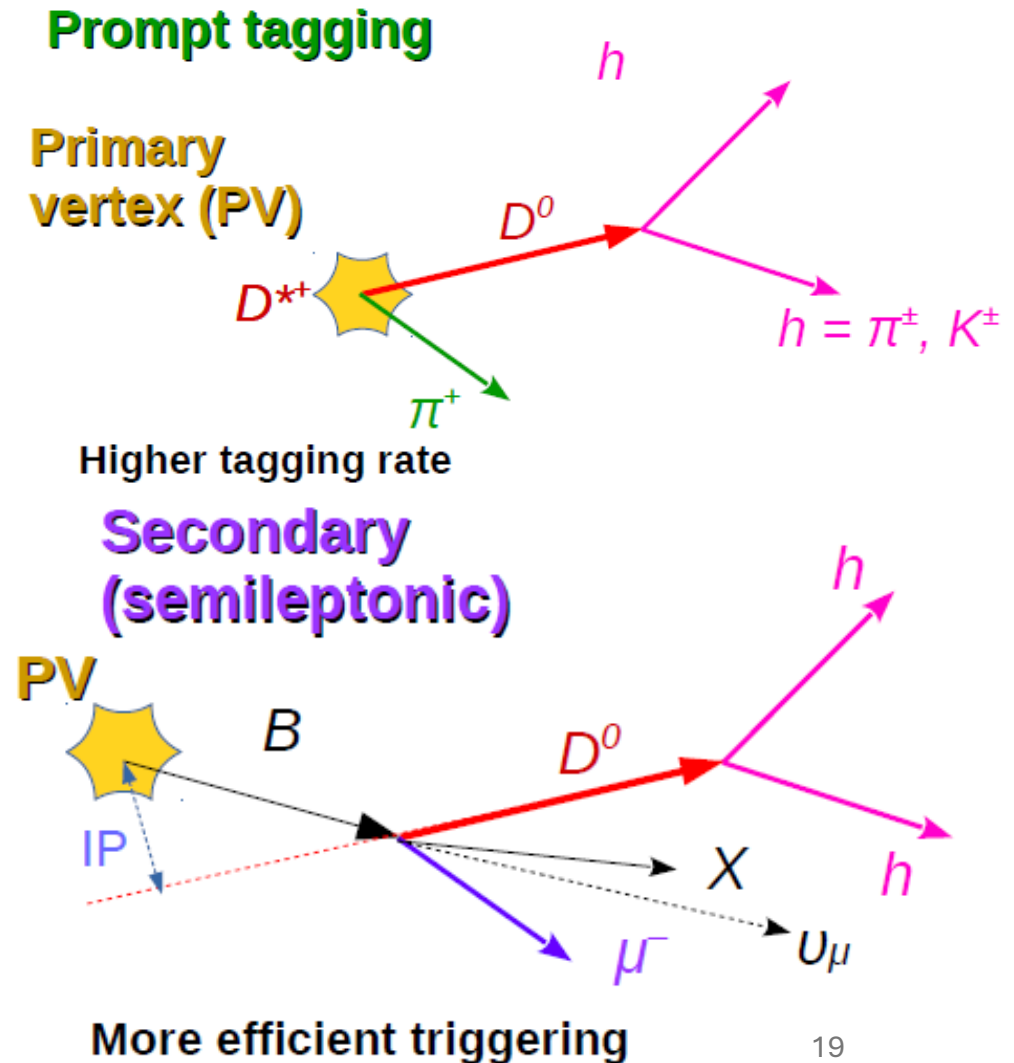
4) Интерференция разных адронных амплитуд (например, S- и P-волновых) → асимметрии распадов, для области фазового объема





# 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

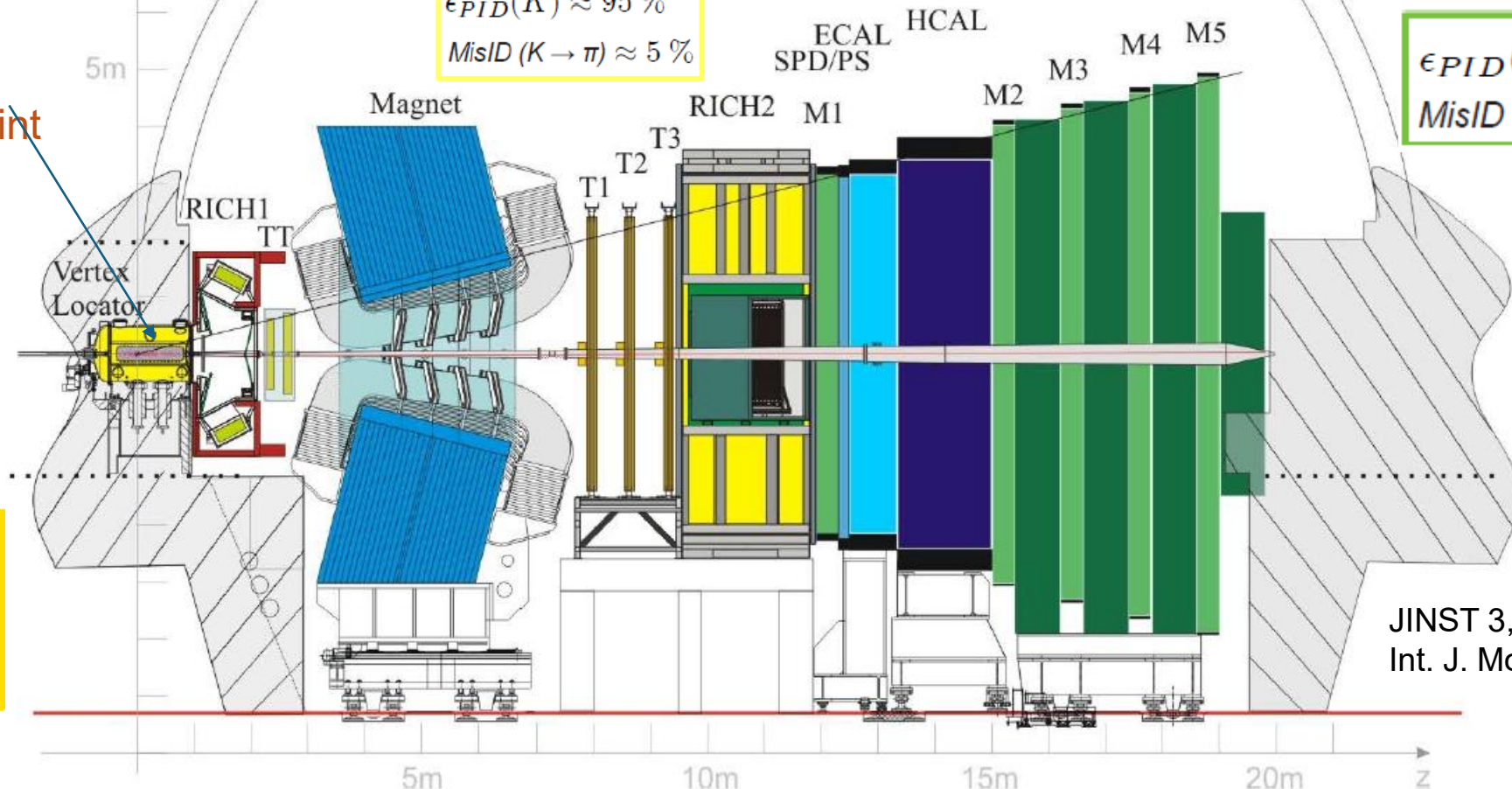
$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95 \%$$

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

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

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

$$\sigma(IP) \approx 20 \mu m$$
$$\delta p/p = 0.4 - 0.6 \%$$
$$\epsilon_{track} > 96 \%$$

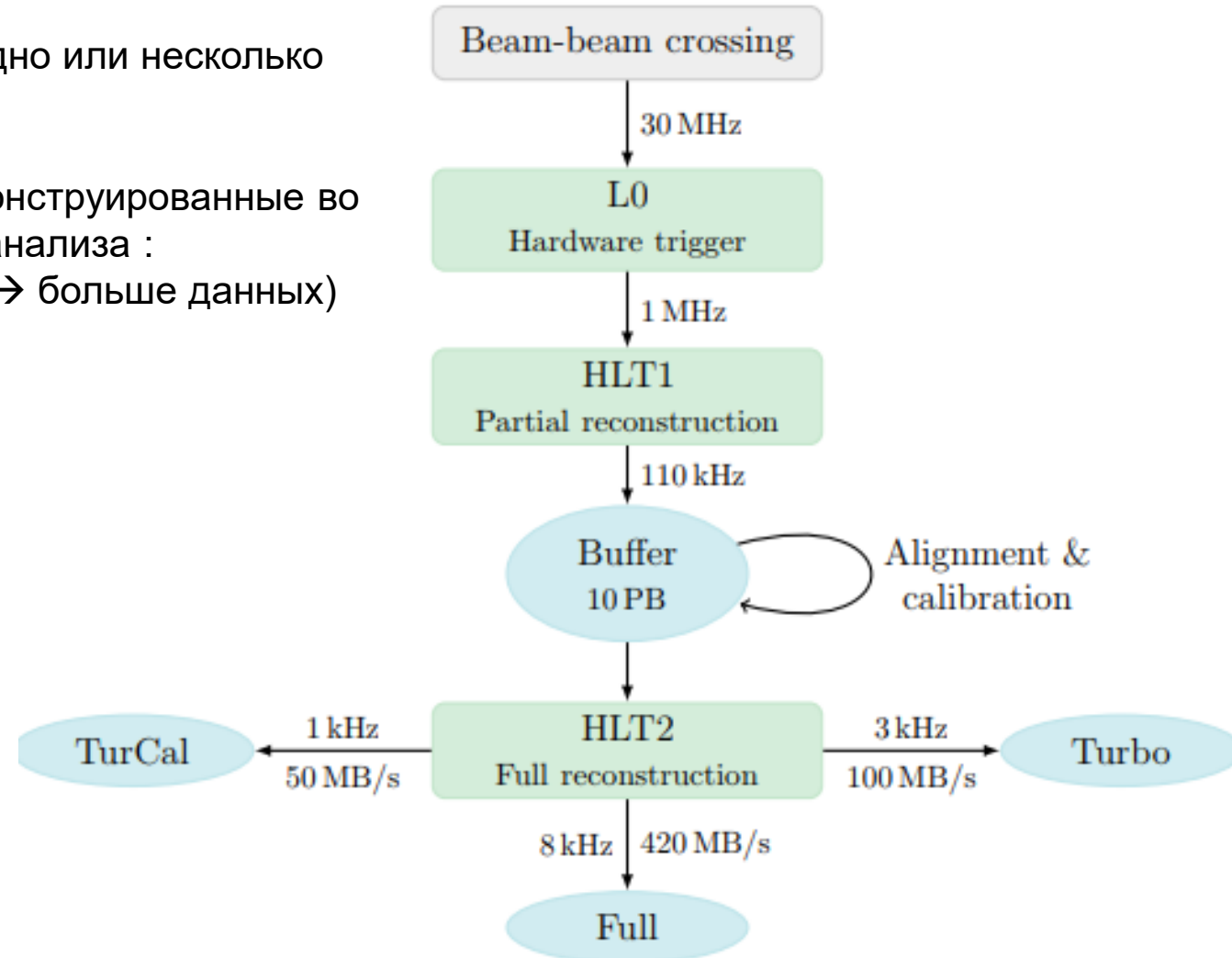
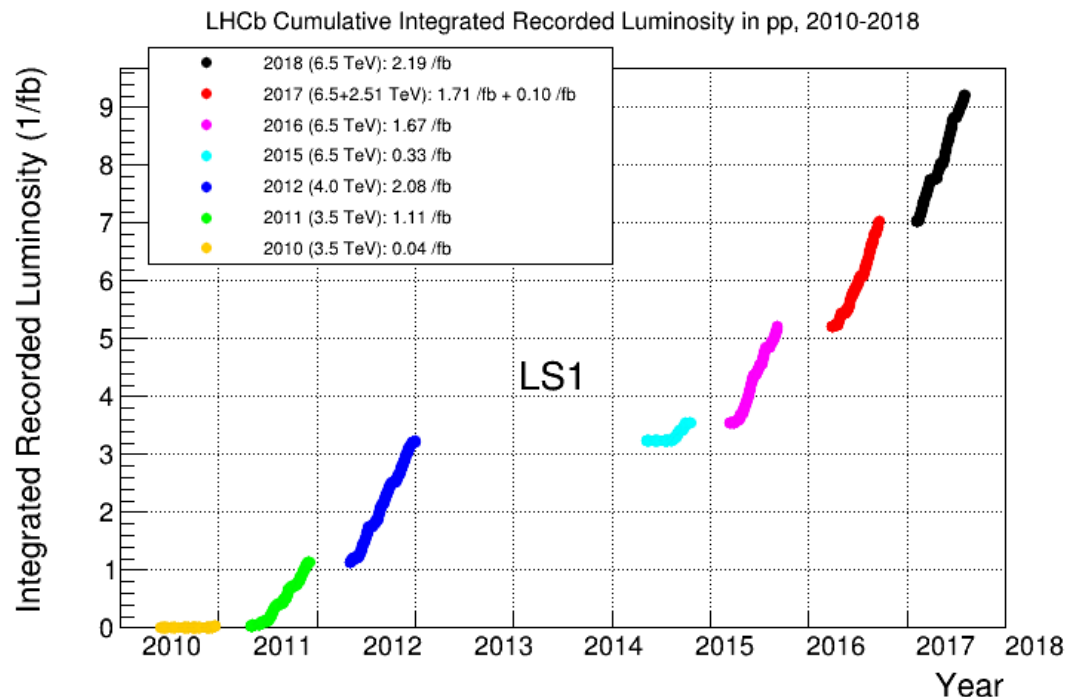


JINST 3, (2008) S08005;  
Int. J. Mod. Phys. A 30,  
(2015) 153022



# 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



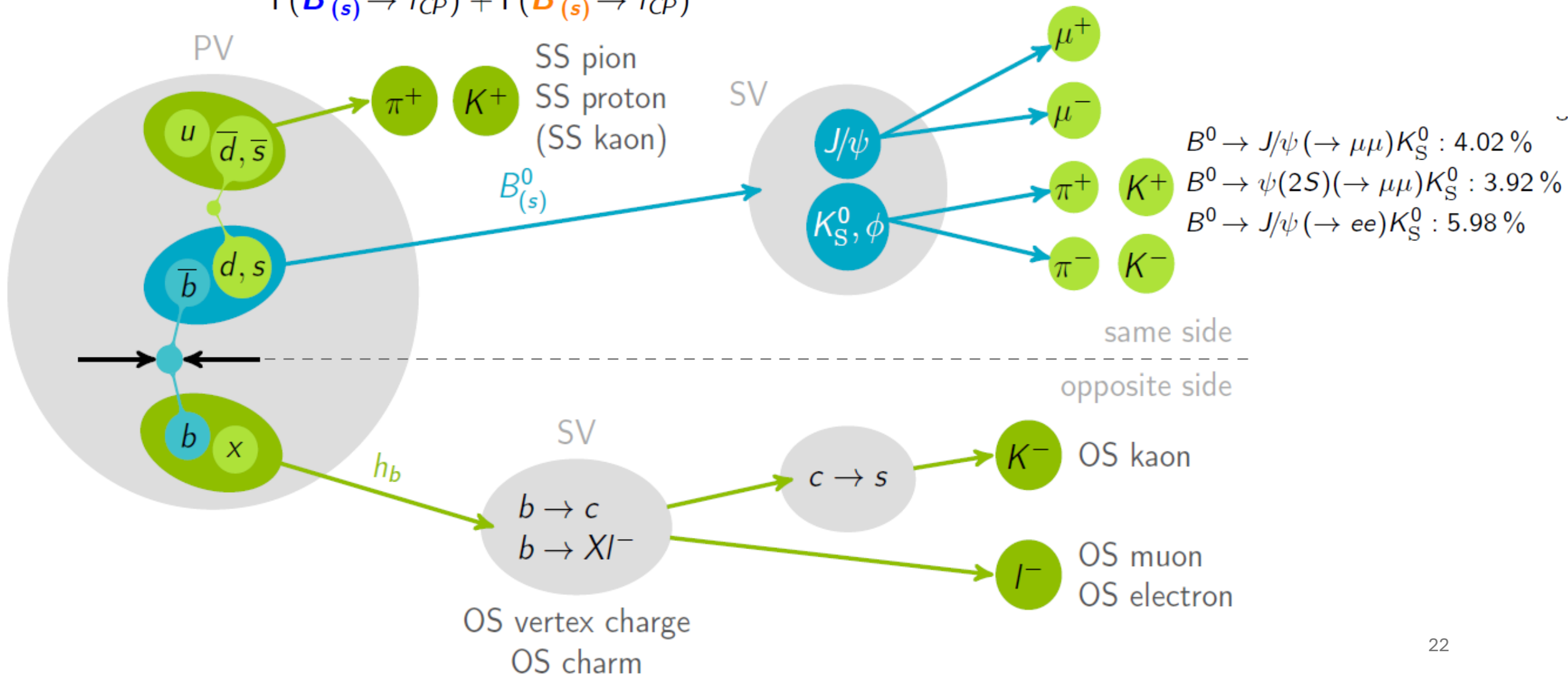
# Таггирование аромата

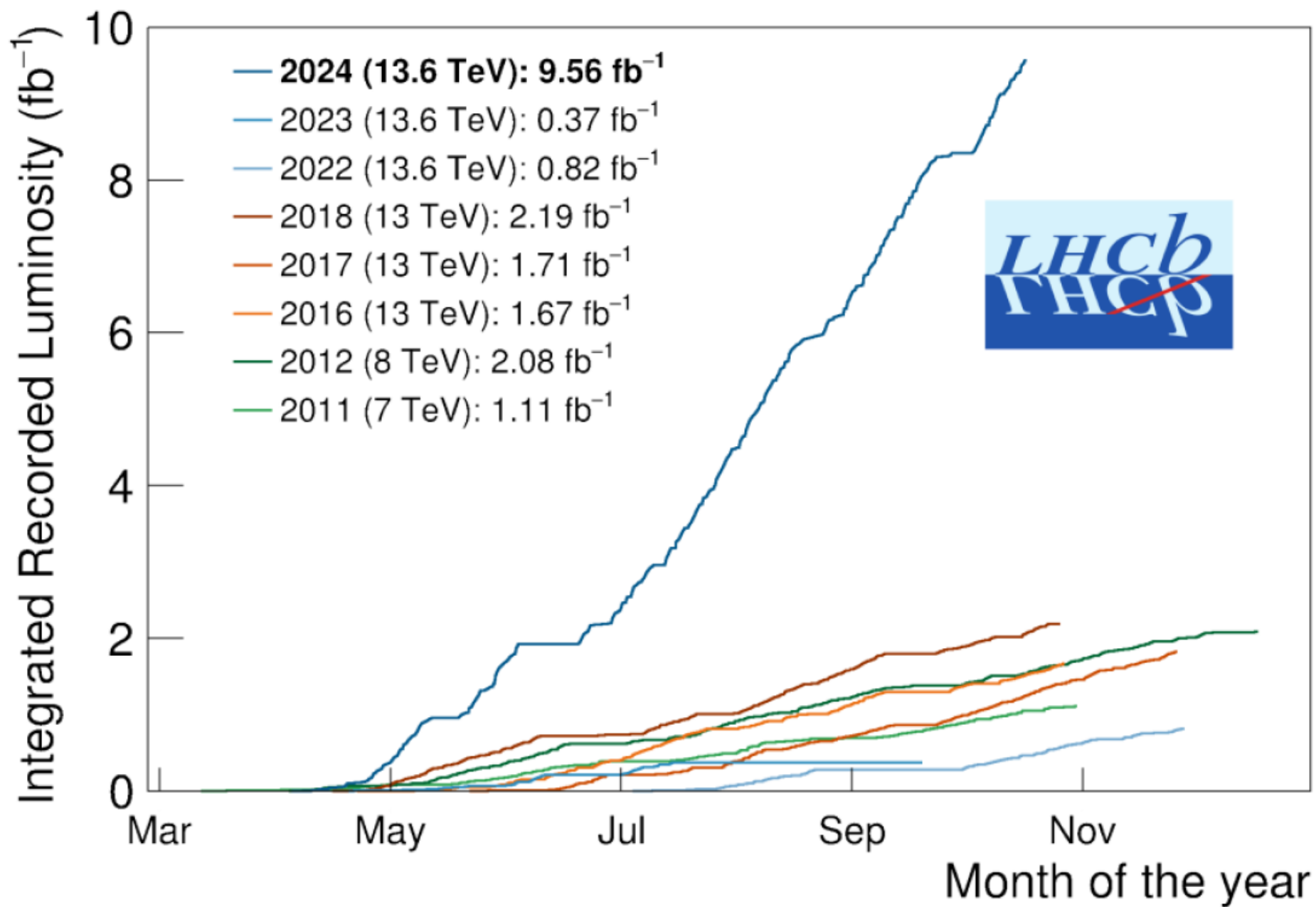
$$\text{tagging power} = \epsilon \times D^2 = \epsilon \times \left(1 - \frac{\# \text{wrong tag}}{\# \text{all tag}}\right)^2$$

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

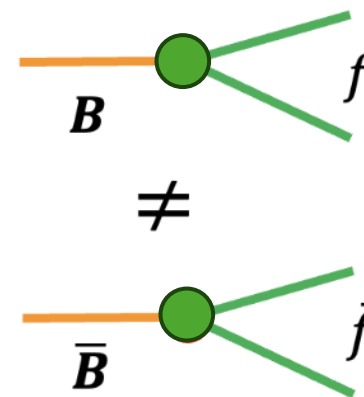
$$B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$$

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



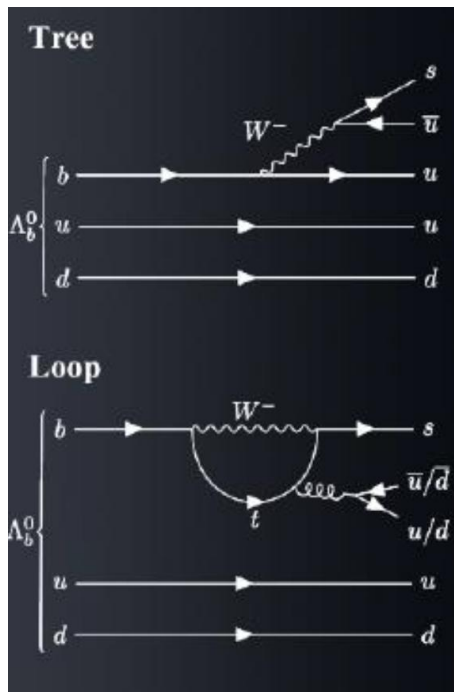


# Асимметрии распада



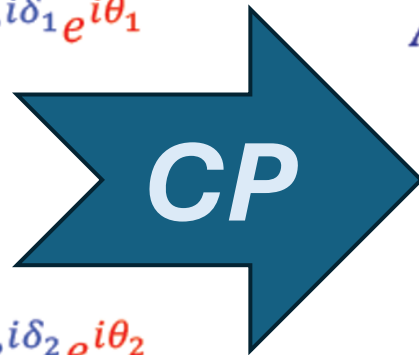
# Асимметрии распада

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



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

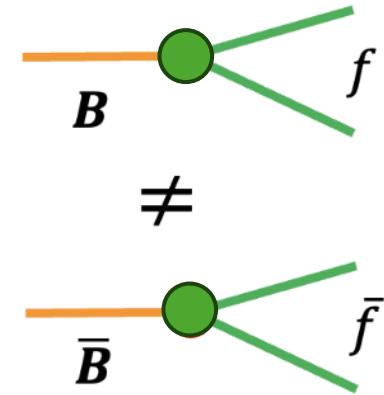
$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$



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

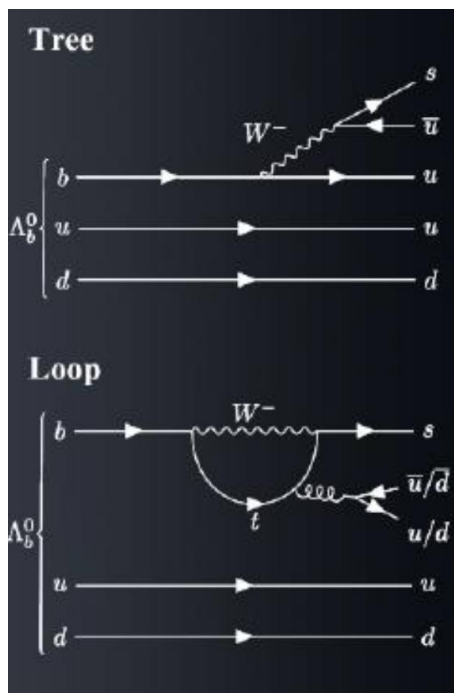
$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

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



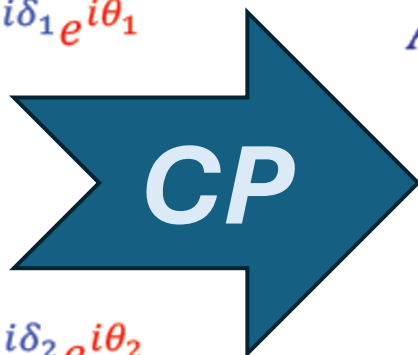
# Асимметрии распада

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



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

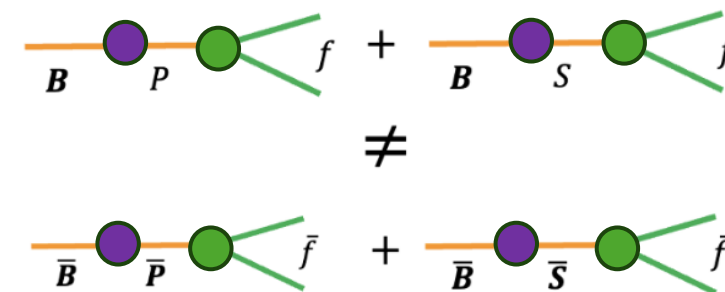
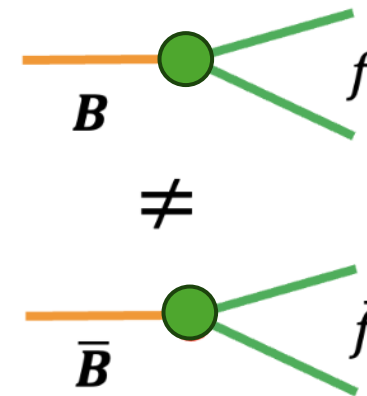
$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$



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

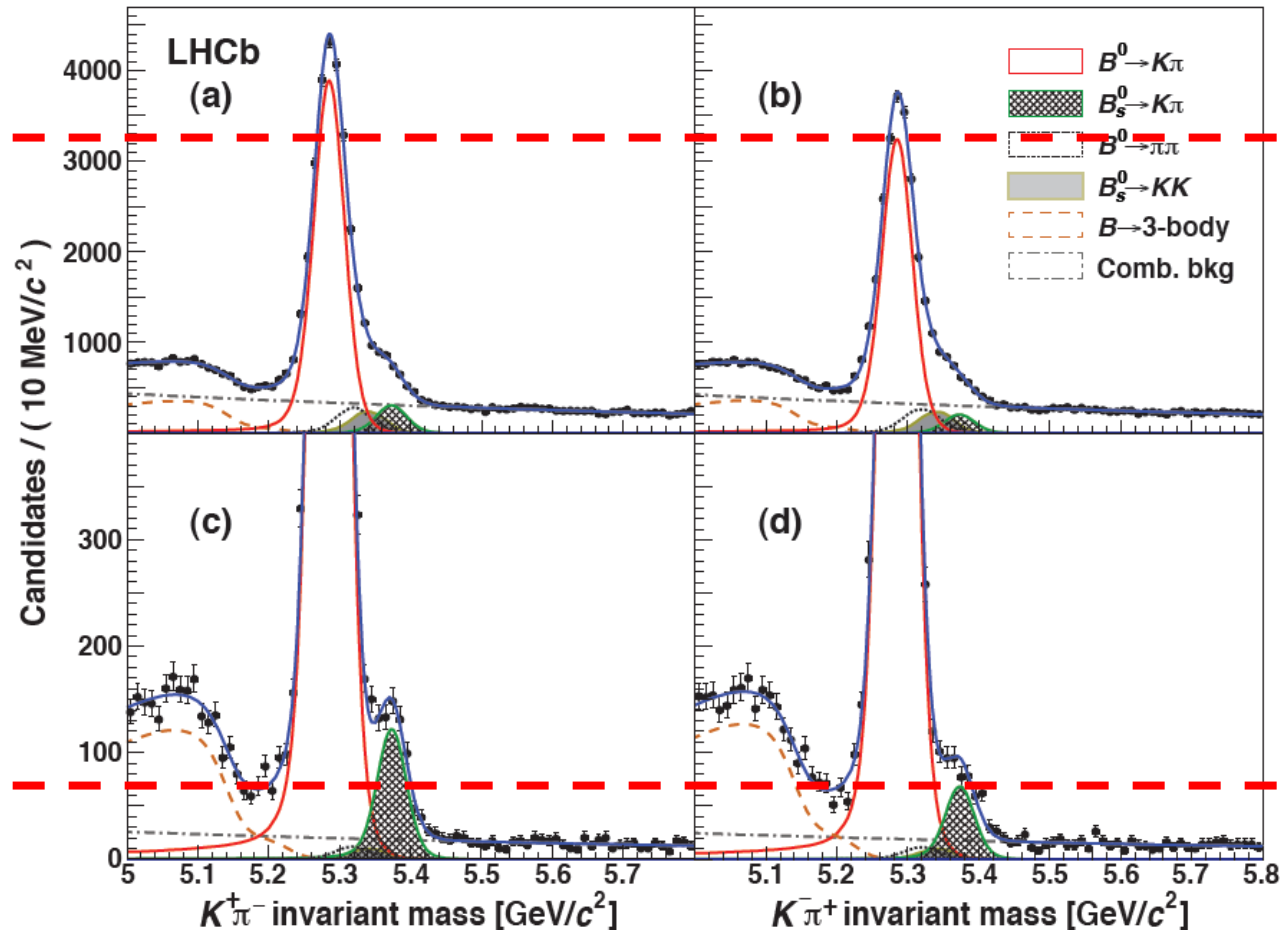
$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

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





# 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.



zoom

- Впервые наблюдался в LHCb

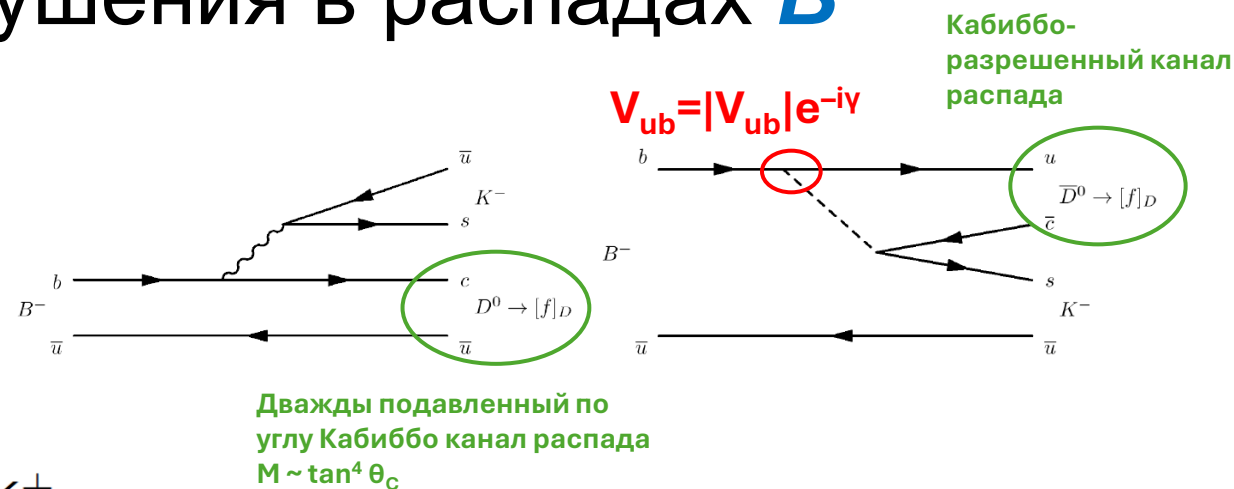
$$\mathcal{A}_{CP}(B_s^0 \rightarrow K^- \pi^+) = 0.26 \pm 0.04.$$

Большая статистика.

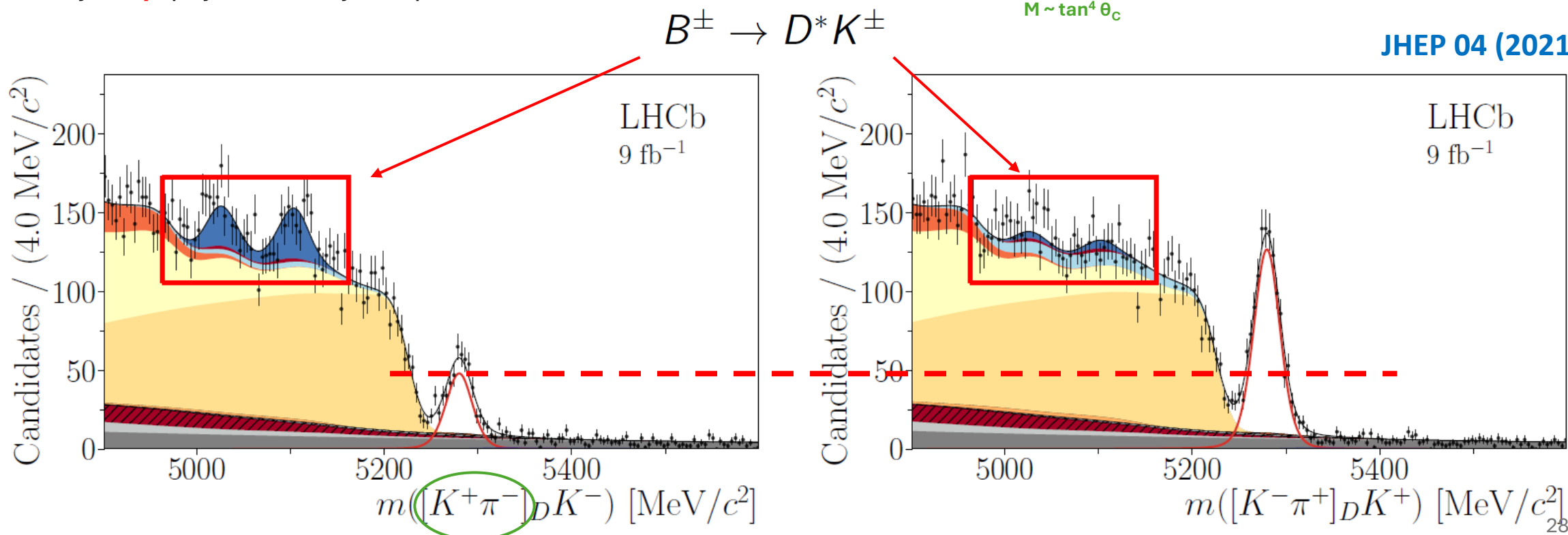
Заметная асимметрия ( $V_{ub} = |V_{ub}|e^{-i\gamma}$ )

# 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  $\gamma$  треугольника унитарности

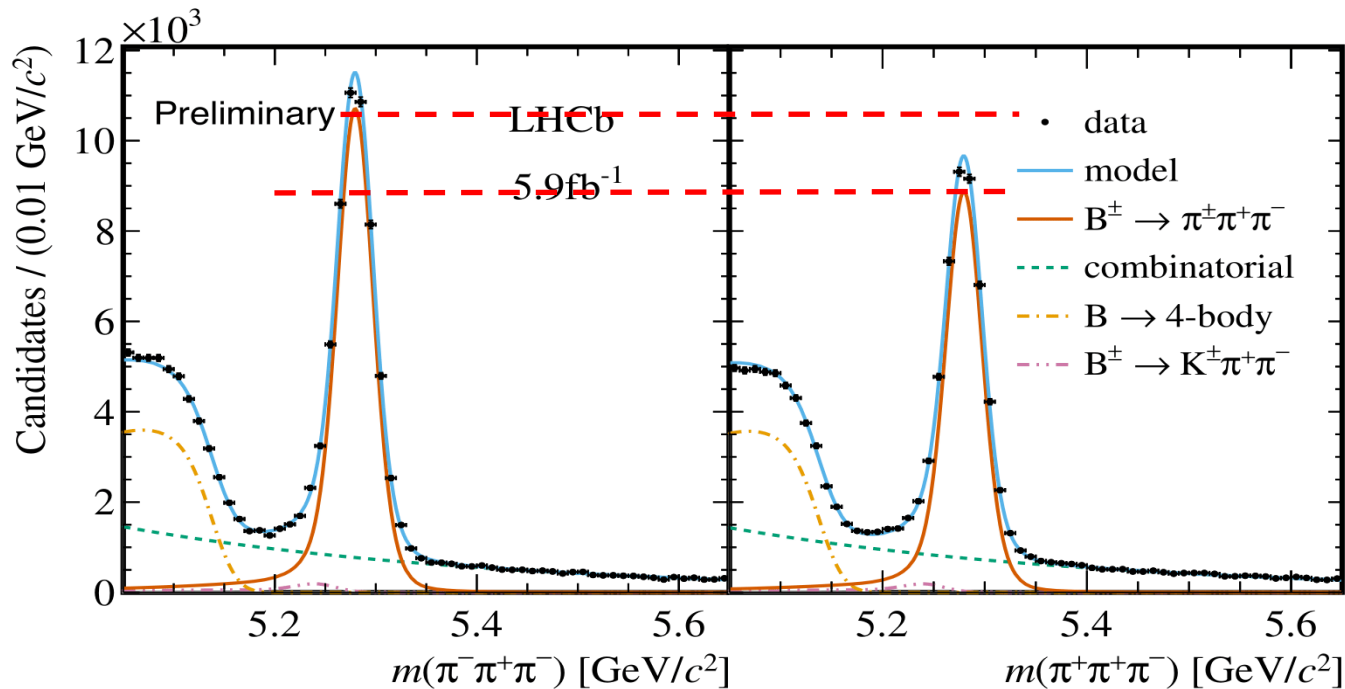


JHEP 04 (2021) 081

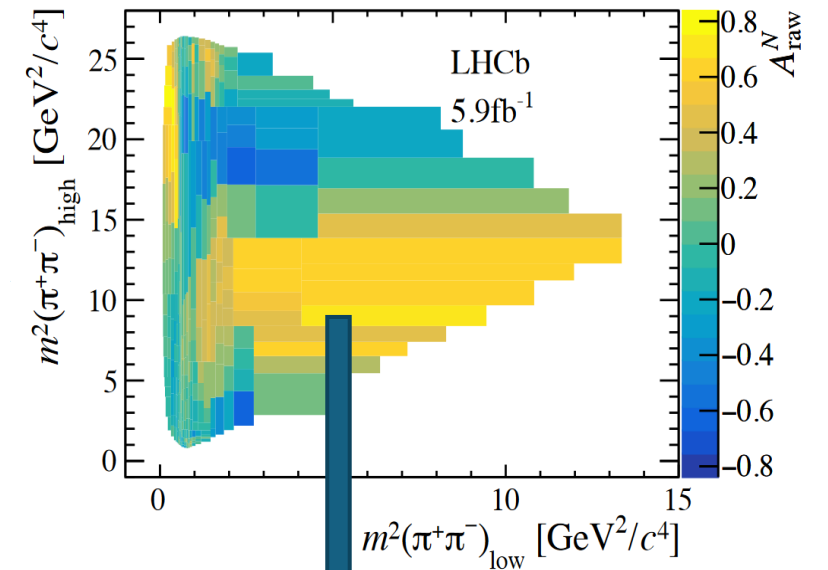


# Исследование многочастичных распадов

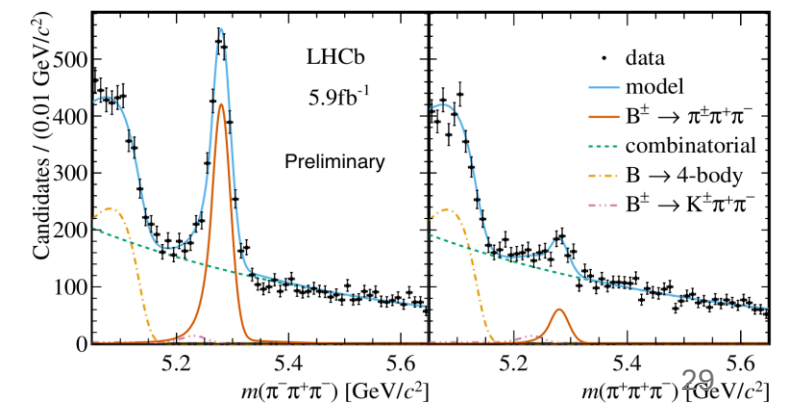
$$B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$$



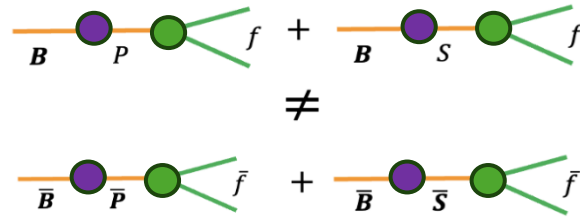
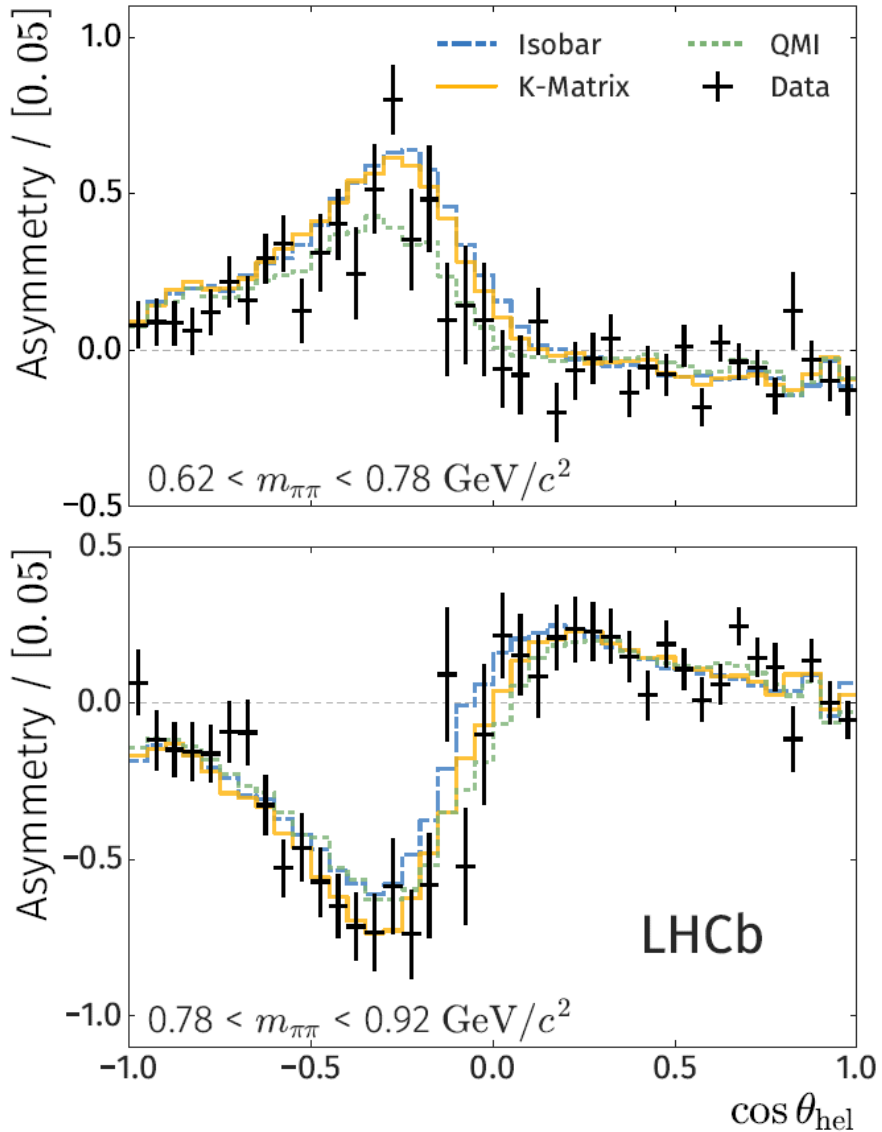
для условий  $4 < m^2(\pi^+ \pi^-)_{\text{low}} < 15 \text{ ГэВ}^2/c^4$  и  $4 < m^2(\pi^+ \pi^-)_{\text{high}} < 16 \text{ ГэВ}^2/c^4$  измеренная CP асимметрия составила  $74,5 \pm 2,7 \%$ .



Ref.

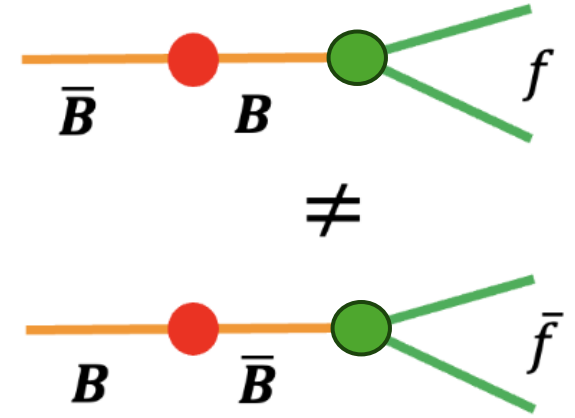


# CP-нарушение в интерференции S- и P-волн



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

$CP$  нарушение при смешивании:

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

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

Пример: CPLEAR

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

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

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

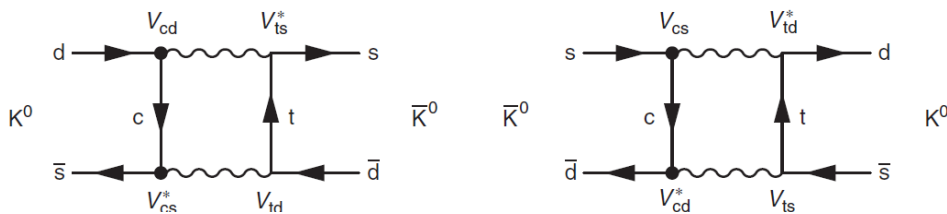
$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1+|\varepsilon_K|^2)}} [(1+\varepsilon_K)|K^0\rangle + (1-\varepsilon_K)|\bar{K}^0\rangle] = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon_K|^2}} [|K_1^0\rangle + \varepsilon_K|K_2^0\rangle],$$

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

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

Интерпретация в рамках СМ:

Не зависит от времени!



$$\mathcal{M}_{12} \propto V_{cd} V_{cs}^* V_{td} V_{ts}^*$$

$$\mathcal{M}_{21} \propto V_{cd}^* V_{cs} V_{td}^* V_{ts} = \mathcal{M}_{12}^*.$$

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

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

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

Подставляя параметры  
параметризации  
Вольфенштейна

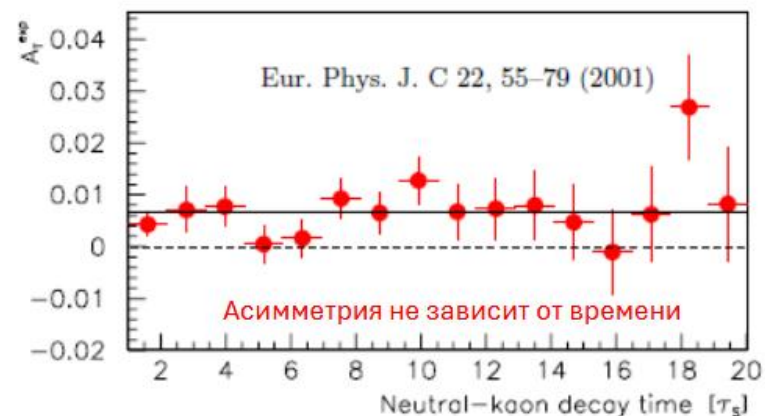
$$|\varepsilon| \propto \eta(1 - \rho + \text{constant}).$$



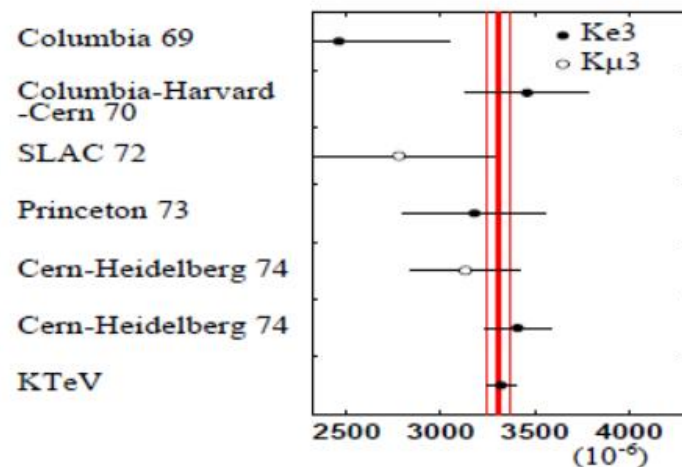
# Косвенное CP-нарушение для $K^0$

- Критическим является из измерение CP-нарушение для  $K^0$ -мезонов.
- Общепринято, что природа этого нарушение 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  $\pi\pi$ ,  $\delta_I$  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  $\epsilon$  and  $\epsilon'$  defined by

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

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

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

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

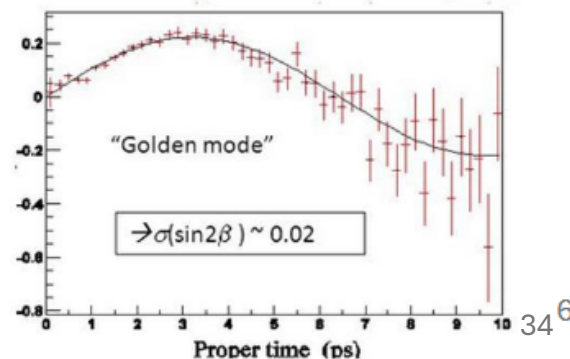
$$\phi_{+-} = (43.4 \pm 0.5)^\circ,$$

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

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

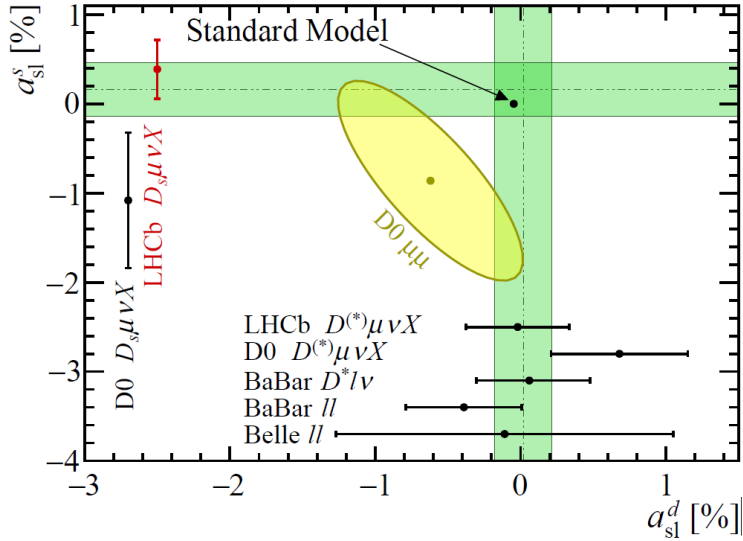
$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{\quad} & f_{CP} \\ e^{i\phi_d} \searrow & & \nearrow \\ \bar{B} & & \end{array}$$

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

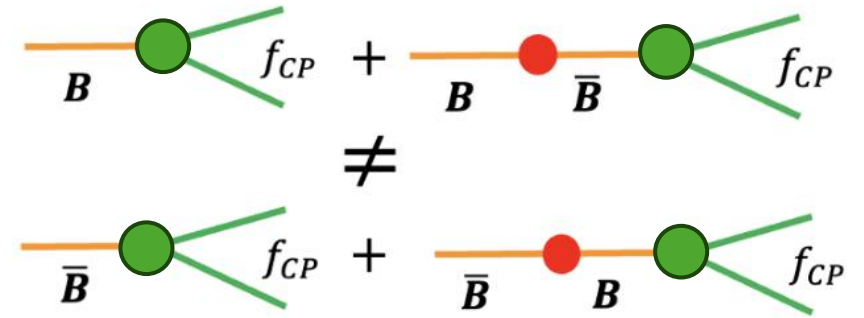


# Полулептонные асимметрии для $B_{(s)}^0$

- 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.**



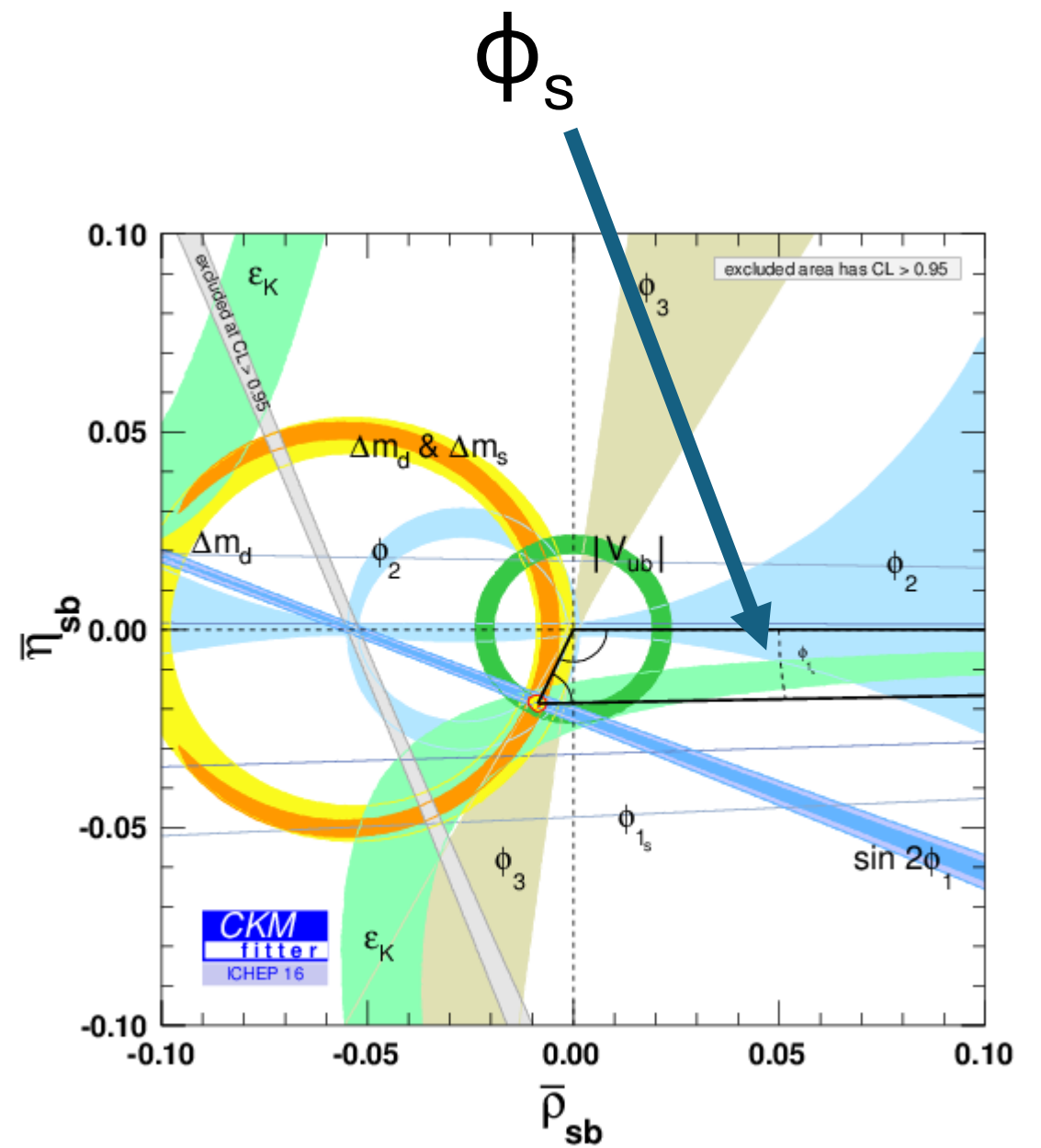
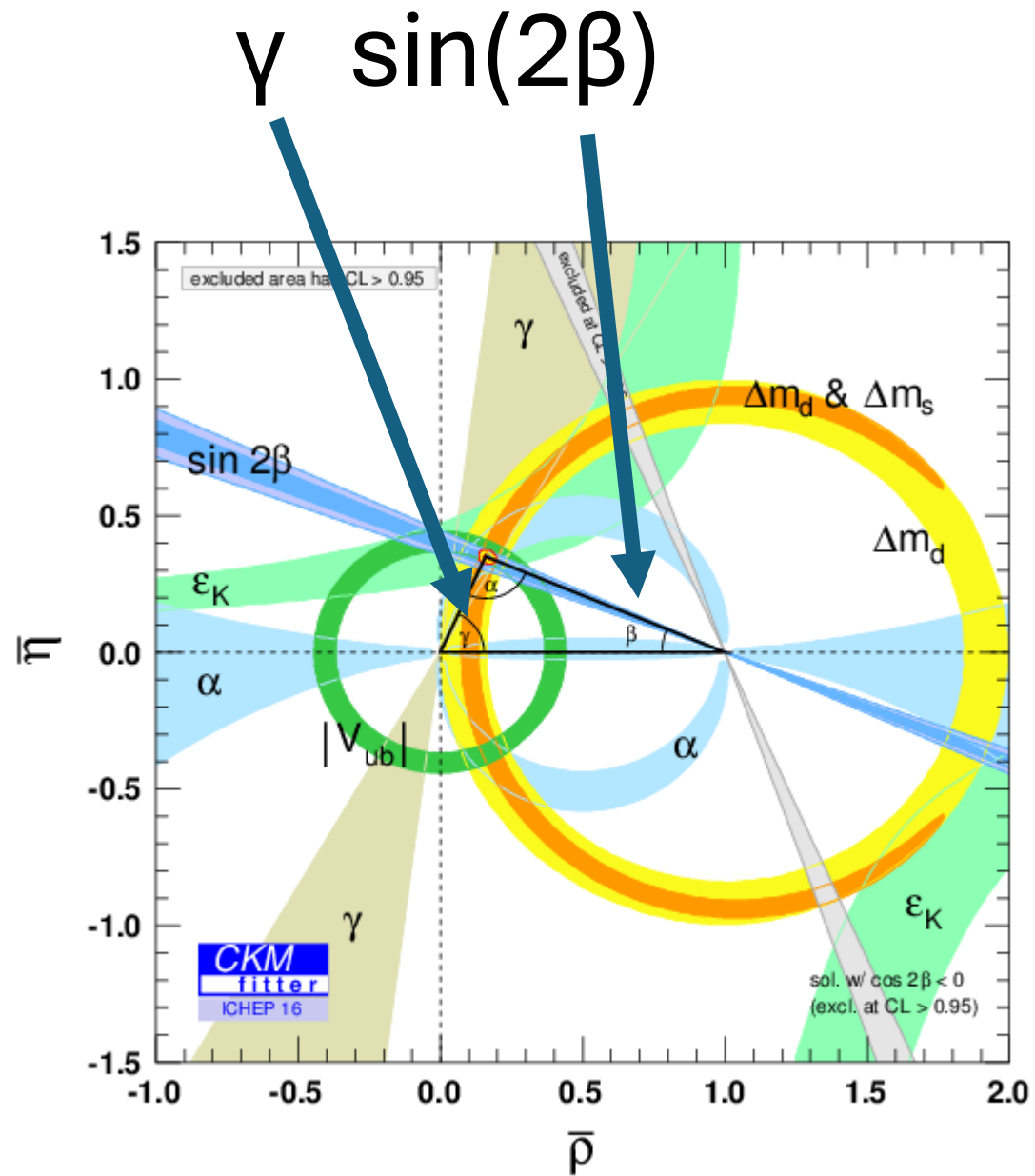
	$a_{sl}^d$ (%)	$a_{sl}^s$ (%)	$A_{sl}^b$ (%)
BaBar $K$ -tag [84, 106]	$0.06 \pm 0.17^{+0.38}_{-0.32}$	—	$A_{sl}^b = C_d a_{sl}^d + C_s a_{sl}^s$ , Инклюзивная ди-лептонная асимметрия при больших энергиях
BaBar $\ell\ell$ [107]	$-0.39 \pm 0.35 \pm 0.19$	—	
Belle $\ell\ell$ [85]	$-0.11 \pm 0.79 \pm 0.70$	—	
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]	$-0.15 \pm 0.17$	$-0.75 \pm 0.41$	$2.8\sigma$ , from the SM
SM	$-0.00047 \pm 0.00006$	$0.0000222 \pm 0.0000027$	$-0.023 \pm 0.004$



Определение  $\sin(2\beta)$ ,  $\phi_s$  и  $\gamma$

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





# Измерения $\sin(2\beta)$

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

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

Разрешение по времени жизни (LHCb: 42 фс)

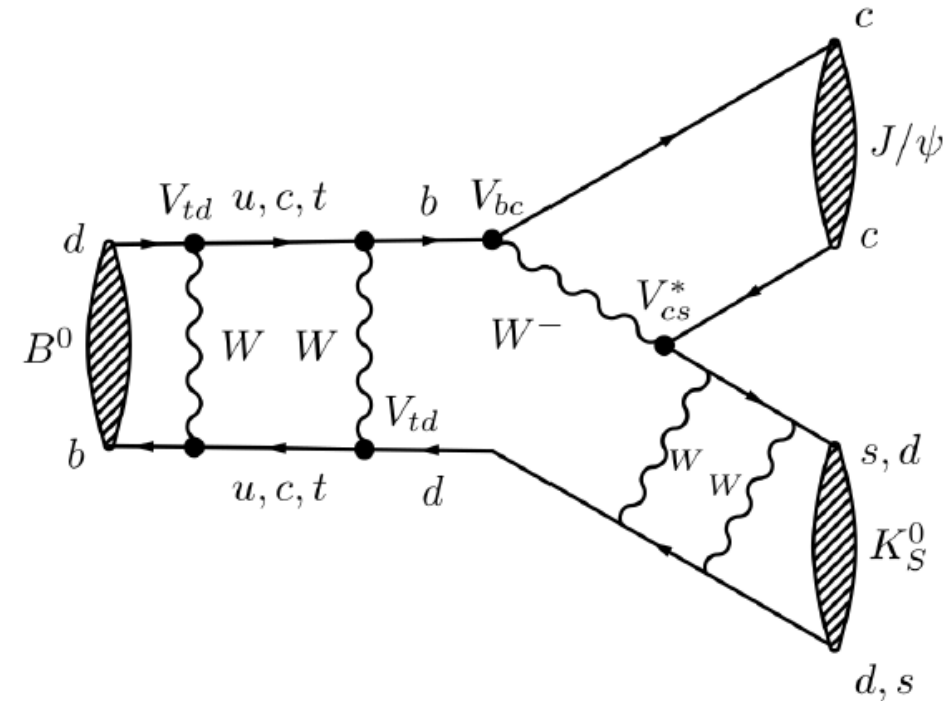
- Наиболее подходящий канал исследования  $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$

- 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

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

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

# 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

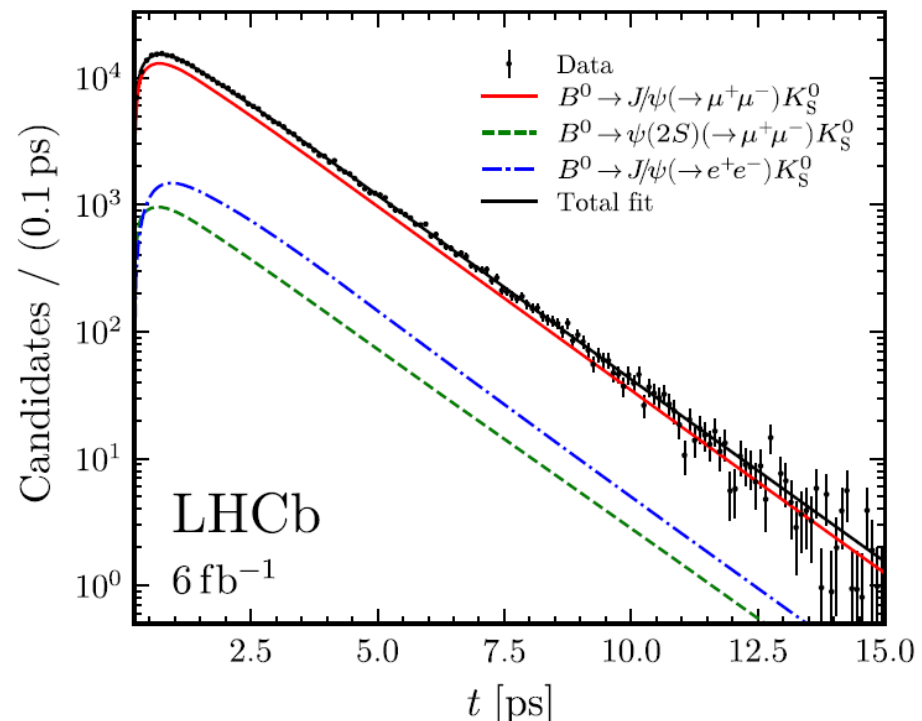
$$P_{B^0, (\bar{B}^0)}(t) \propto (1 \mp \alpha)(1 \mp \Delta\epsilon)(1 \mp S \sin(\Delta m_d t) \pm C \cos(\Delta m_d t))$$

Асимметрия рождения  $B$

Асимметрия таггинга

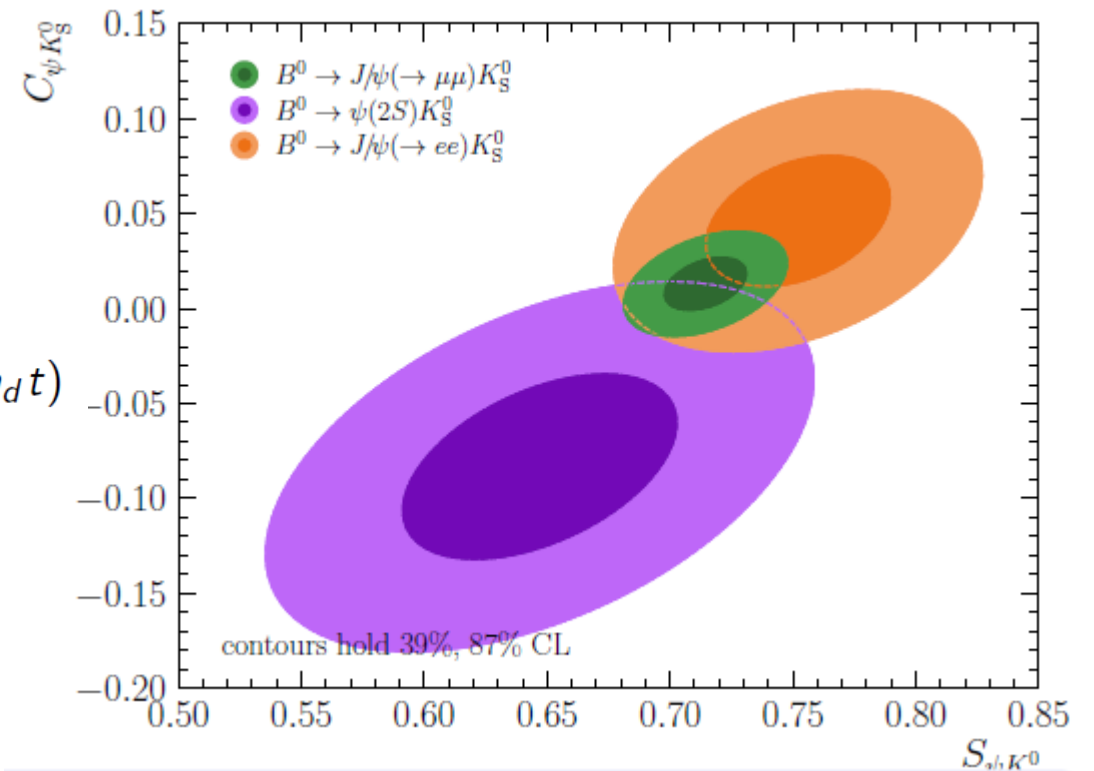
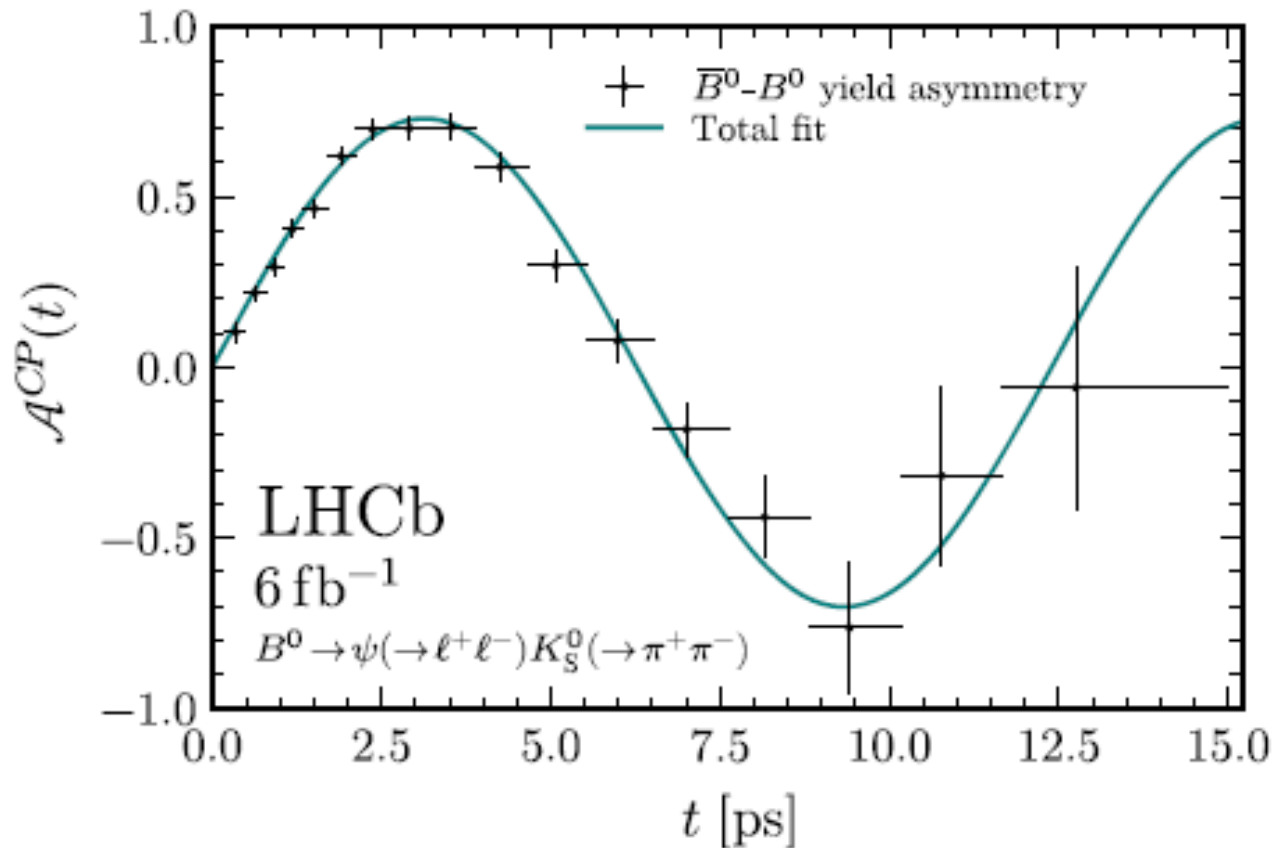
Основные систематические погрешности:

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 $\sin(2\beta)$

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



$$\begin{aligned}
 S_{J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} &= 0.714 \pm 0.015 (\text{stat}) \pm 0.007 (\text{syst}) \\
 C_{J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} &= 0.013 \pm 0.014 (\text{stat}) \pm 0.003 (\text{syst}) \\
 S_{\psi(2S) K_S^0}^{\text{Run 2}} &= 0.647 \pm 0.053 (\text{stat}) \pm 0.018 (\text{syst}) \\
 C_{\psi(2S) K_S^0}^{\text{Run 2}} &= -0.083 \pm 0.048 (\text{stat}) \pm 0.005 (\text{syst}) \\
 S_{J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} &= 0.752 \pm 0.037 (\text{stat}) \pm 0.084 (\text{syst}) \\
 C_{J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K_S^0}^{\text{Run 2}} &= 0.046 \pm 0.034 (\text{stat}) \pm 0.008 (\text{syst})
 \end{aligned}$$



# Результат и комбинация

Новый результат

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

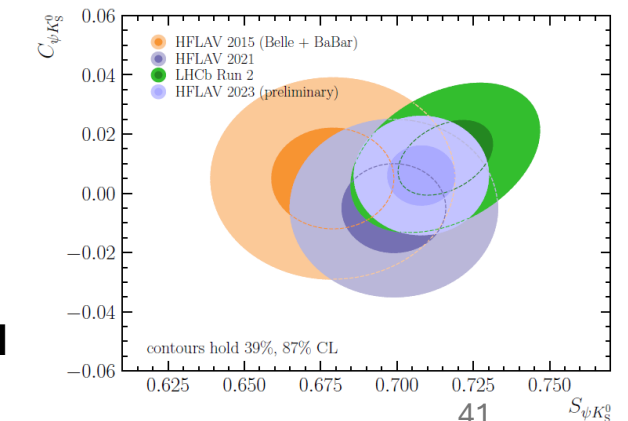
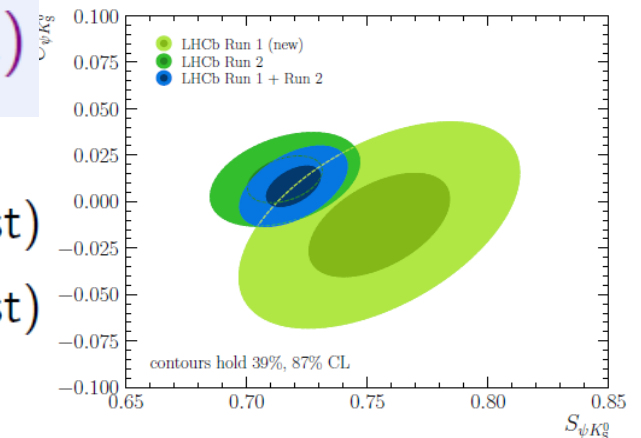
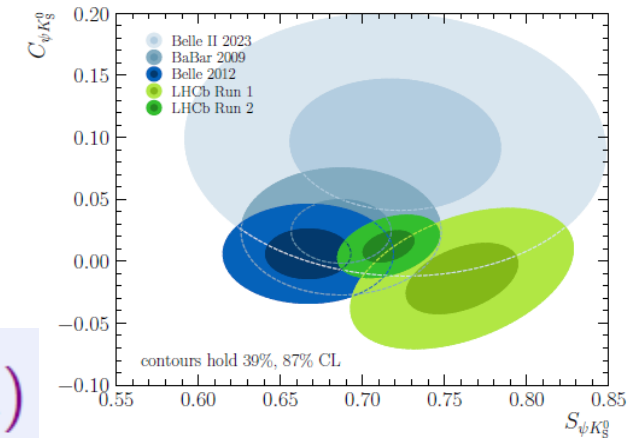
$$C_{\psi K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.012 \pm 0.012 (\text{stat}) \pm 0.003 (\text{syst})$$

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**

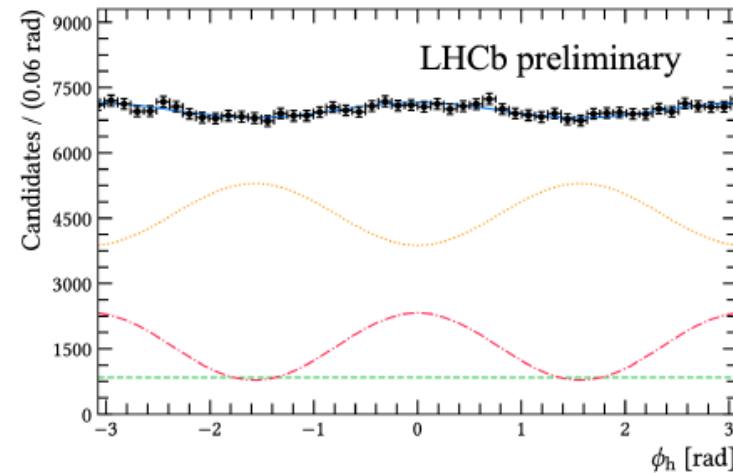
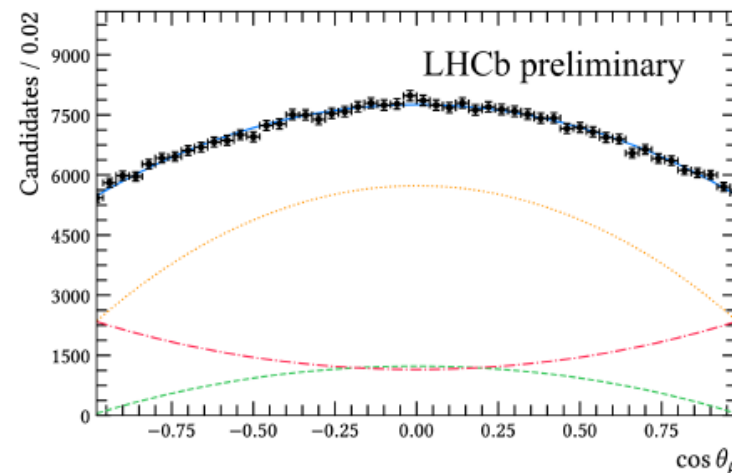
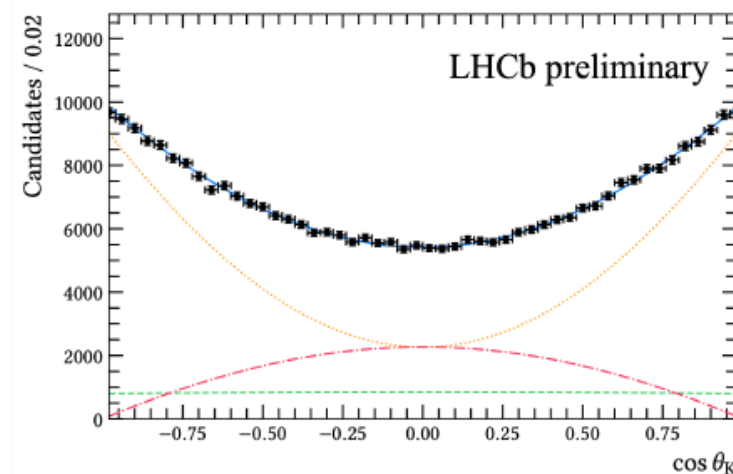
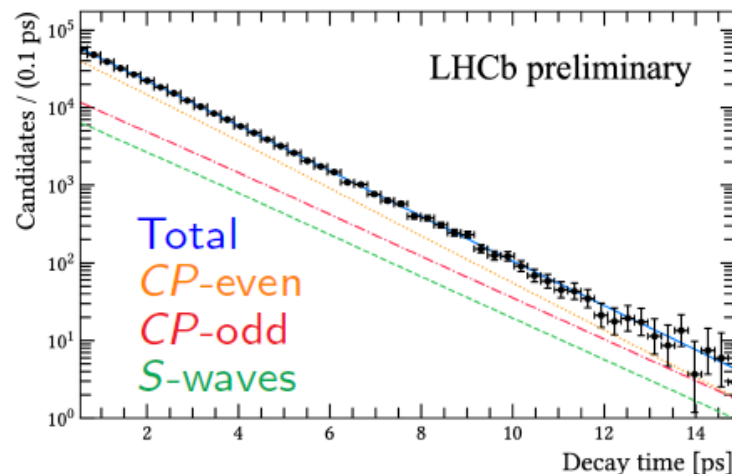


# $\phi_s$ из распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

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

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

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802

- Самое точное измерение  $\phi_s$  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
$\phi_s$ [rad]	$-0.039 \pm 0.022 \pm 0.006$
$ \lambda $	$1.001 \pm 0.011 \pm 0.005$
$\Gamma_s - \Gamma_d$ [ $\text{ps}^{-1}$ ]	$-0.0056^{+0.0013}_{-0.0015} \pm 0.0014$
$\Delta\Gamma_s$ [ $\text{ps}^{-1}$ ]	$0.0845 \pm 0.0044 \pm 0.0024$
$\Delta m_s$ [ $\text{ps}^{-1}$ ]	$17.743 \pm 0.033 \pm 0.009$
$ 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

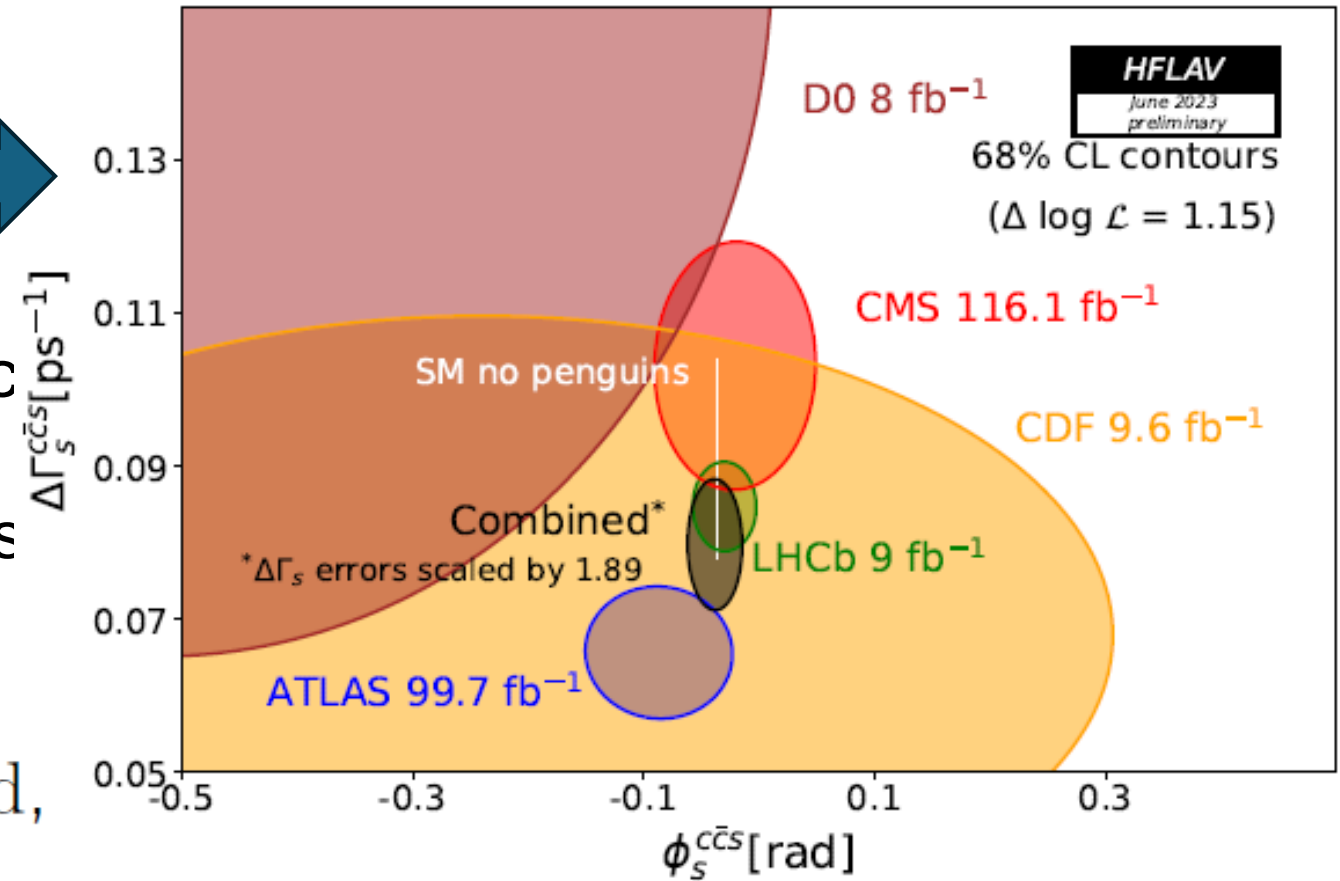
$$\phi_s^{J/\psi KK} = -0.050 \pm 0.017 \text{ rad}$$

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

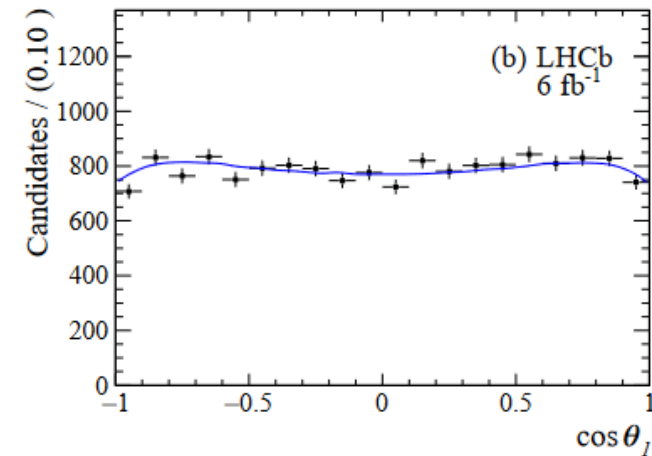
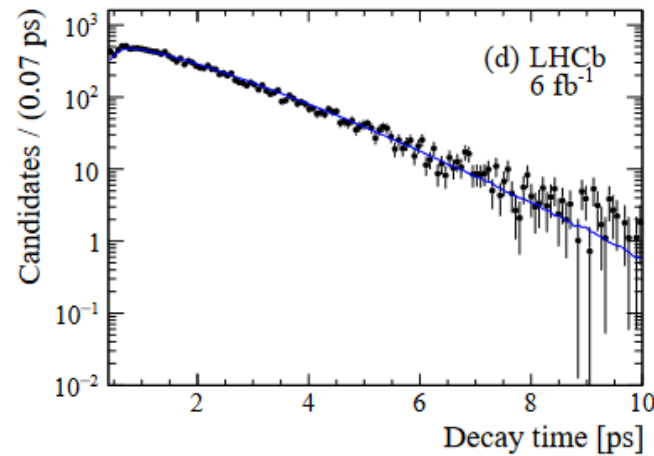
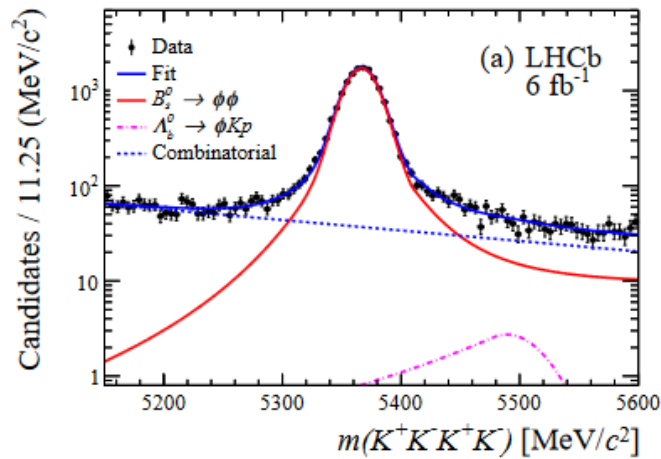
- Полученный результат находится в согласии с общей подгонкой всех мировых данных (Global fits assuming SM)

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

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



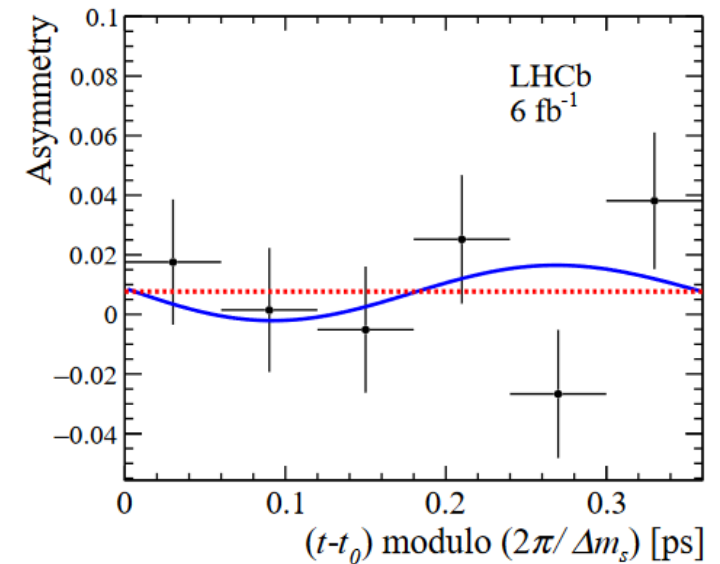
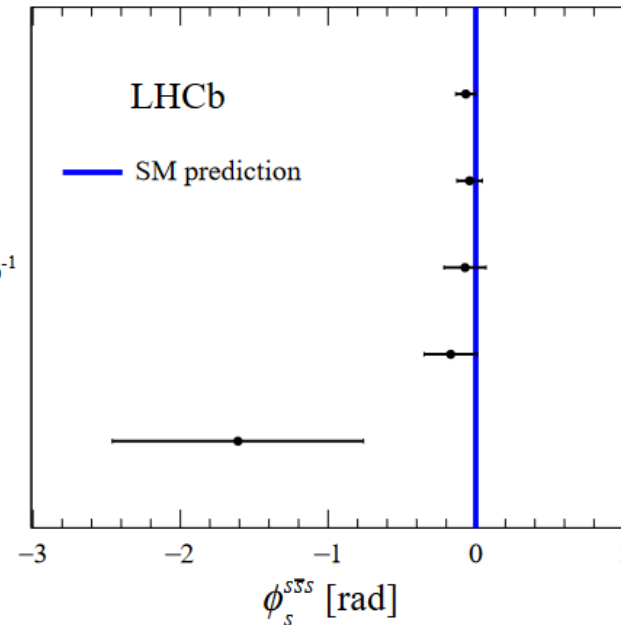
$$B_s^0 \rightarrow \phi\phi$$



- Наиболее точное измерение  $\phi_s$  в распадах с доминированием диаграмм типа пингвин

- Нарушений CP не наблюдается

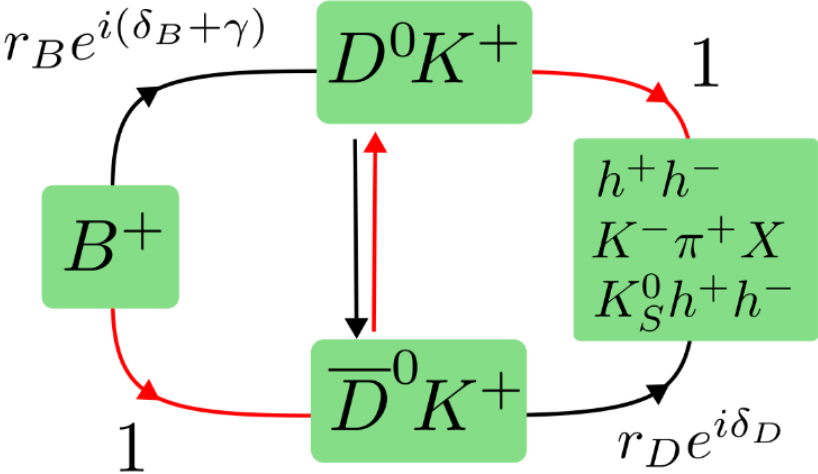
Run 1 + Run 2, 9 fb<sup>-1</sup>  
Run 2, 6 fb<sup>-1</sup>  
Run 1 + 2015 + 2016, 5 fb<sup>-1</sup>  
Run 1, 3 fb<sup>-1</sup>  
2011, 1 fb<sup>-1</sup>



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

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

# Измерение СКМ $\gamma$



$B$ 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	<b>New</b>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm$	$D \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	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>
$B^\pm \rightarrow Dh^\pm \pi^+ \pi^-$	$D \rightarrow h^\pm h'^\mp$	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>

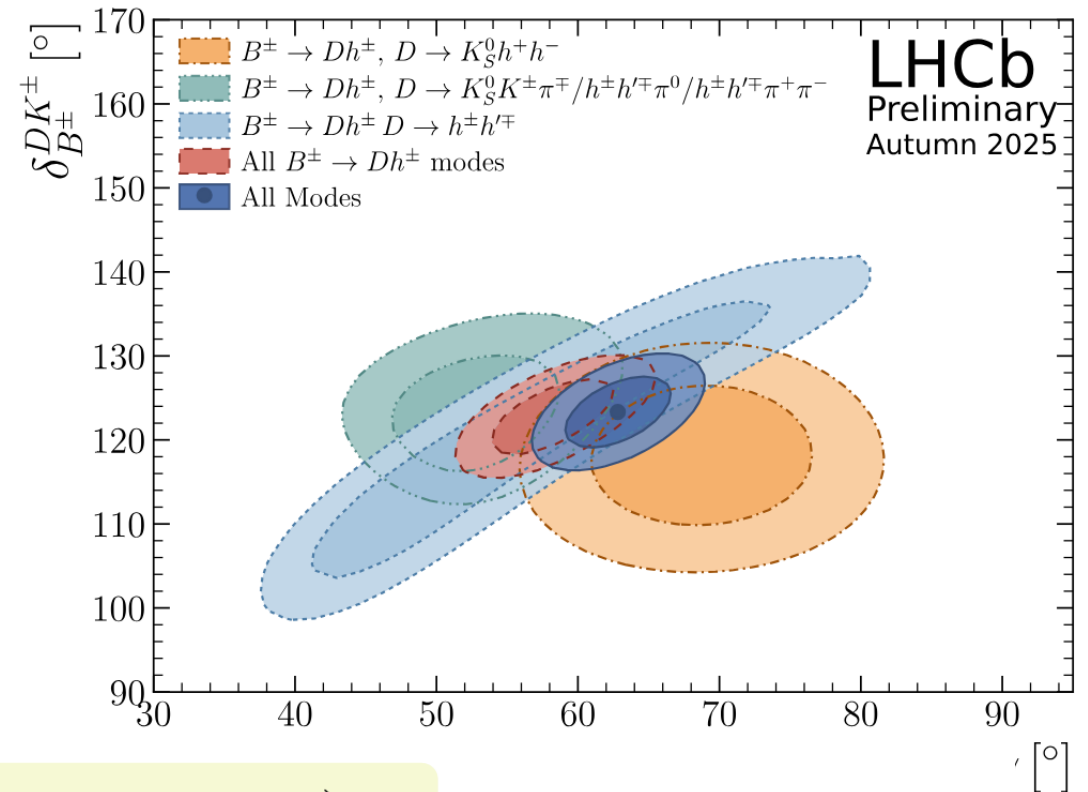
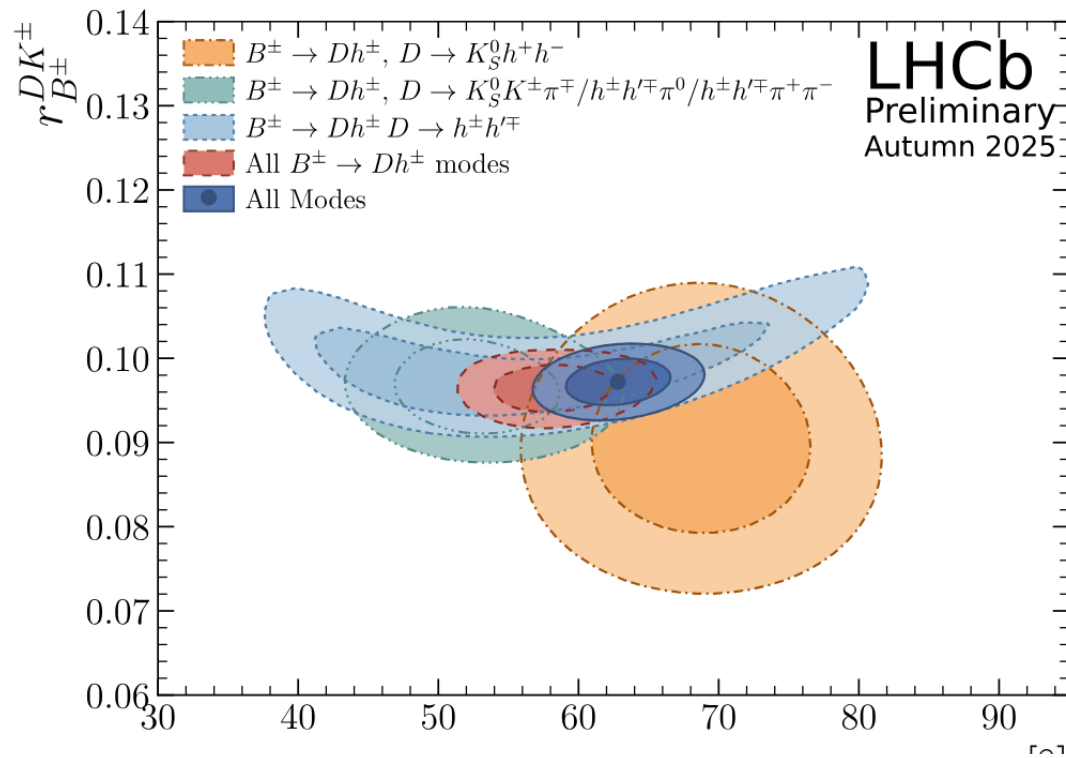
- Gronau-London-Wyler (GLW):  
 $CP$  eigenstates, *i.e.*  $D^0 \rightarrow K^+ K^-, \pi^+ \pi^-, \dots$
- Atwood-Dunietz-Soni (ADS) :  
Flavoured final states, *i.e.*  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- (\pi^0, \pi^+ \pi^-)$
- Bondar-Poluektov-Giri-Grossman-Soffer-Zupan (BPGGSZ):  
Self-conjugate multibody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

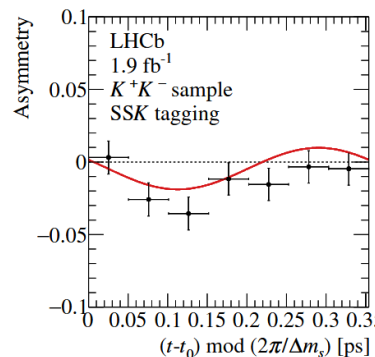
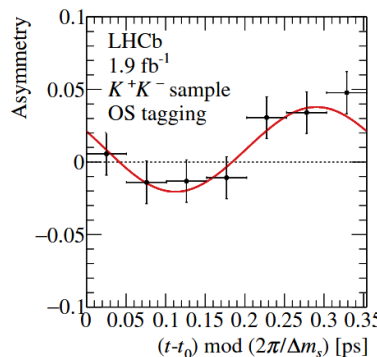
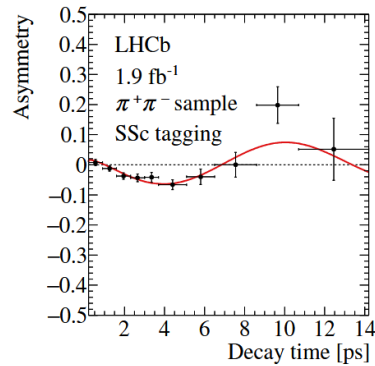
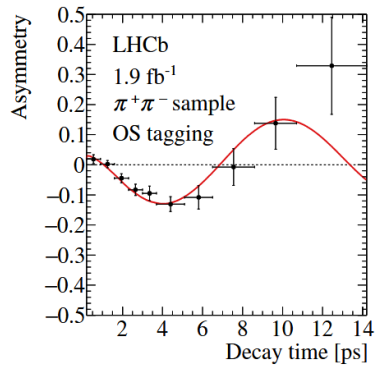
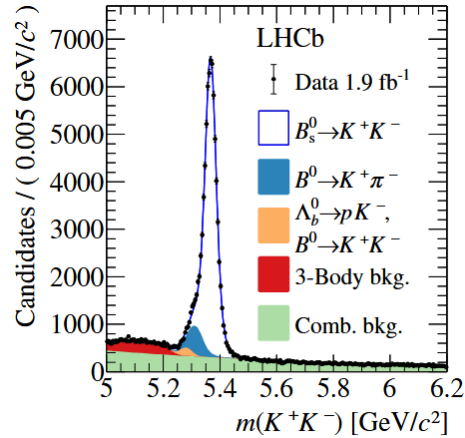
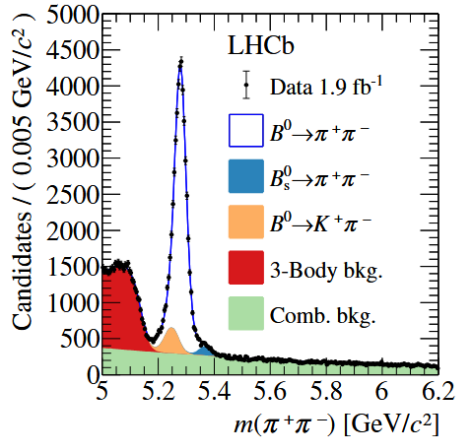


$$\gamma = (62.8 \pm 2.6)^\circ$$

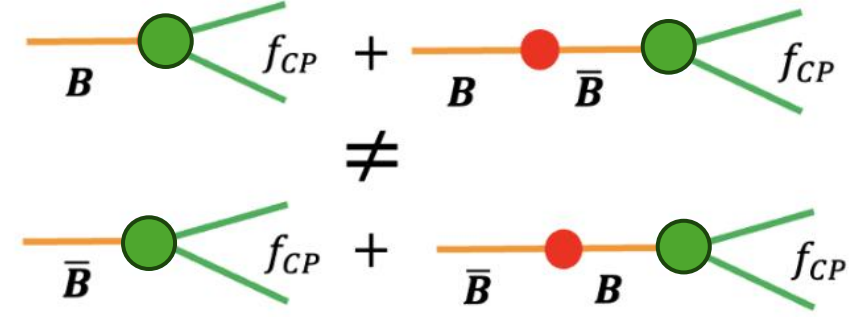
$$\gamma_{\text{indirect}} = (66.3^{+0.7}_{-1.9})^\circ \quad \text{http://ckmfitter.in2p3.fr/} \quad = (65.2 \pm 1.5)^\circ \quad \text{http://utfit.org/UTfit/}$$



# Зависящее от времени СР 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

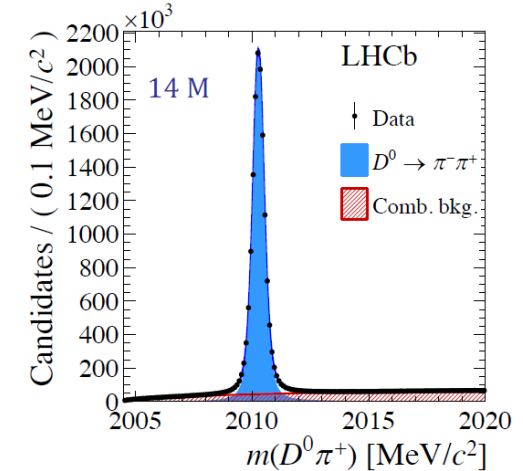
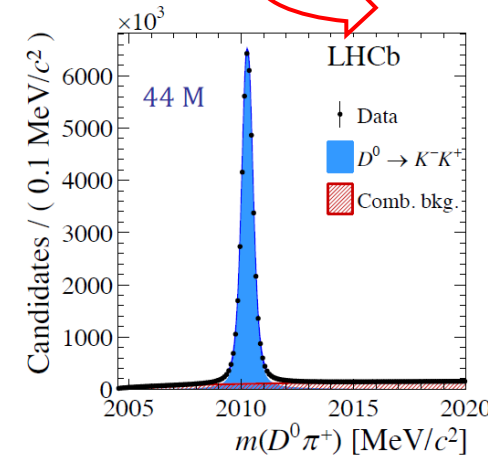
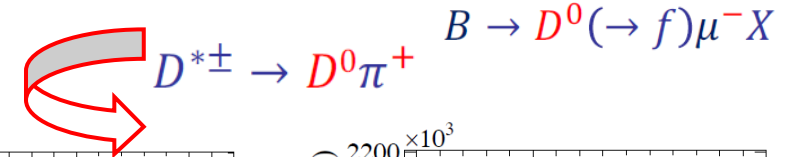
- SM предсказывает малое  $CP$  нарушение для  $c$ -кварков.
- LHCb достиг чувствительности уровня SM
- Измеряется разница асимметрий для двух  $CP$ -четных каналов распада  $D^0$  мезона. Это позволяет значительно уменьшить асимметрии рождения и детектирования
- Использовались оба метода таггирования аромата  $D$  мезона
- **Статистическая значимость  $5,3\sigma \rightarrow$  Первое наблюдение  $CP$  нарушения в распадах очарованных частиц**
- *Phys. Rev. Lett.* **122 (2019) 211803**

**$CP$  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:**



**Results for Run 1 + Run 2 :**

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

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

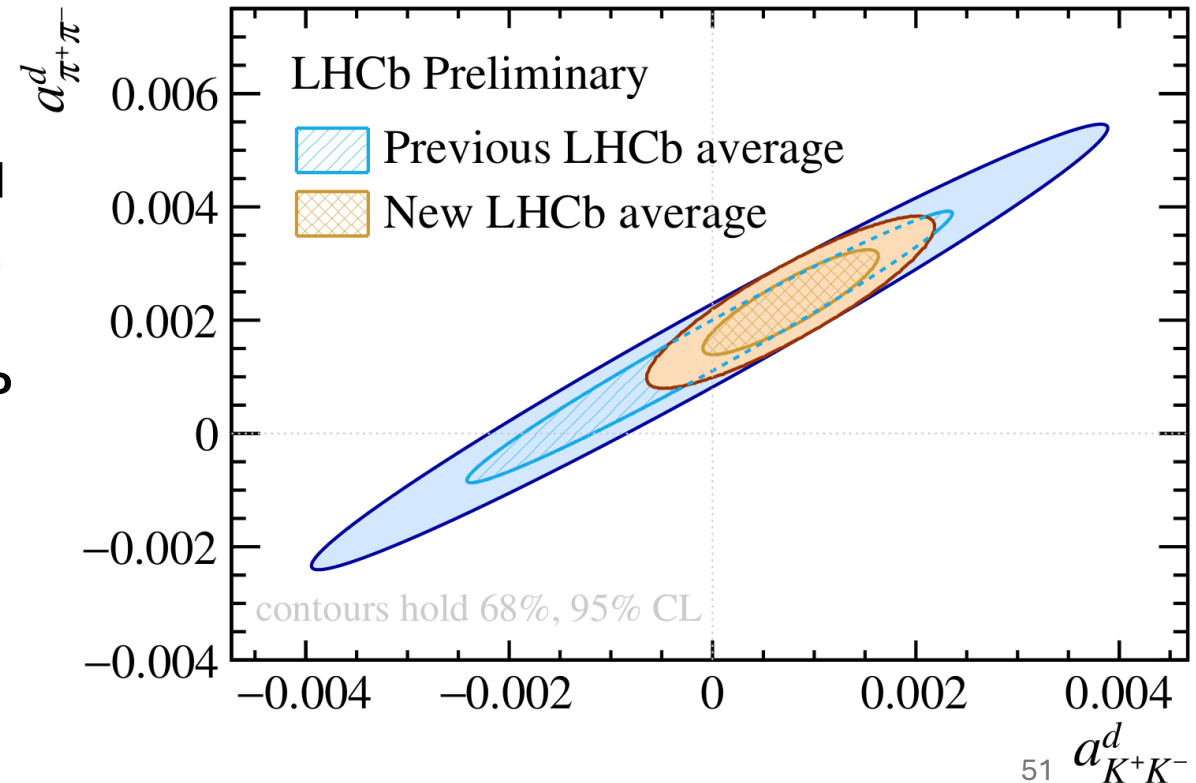
**$\Delta A_{CP} \neq 0 \rightarrow$  Violation of  $CP$**

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

- **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?!
- **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  $\Delta A_{CP}$ , можно определить вклады  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  и  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$  каналов
- $a_{\pi\pi}^d$  не равна нулю на уровне  $3.8\sigma$
- Указание на CP нарушение в распадах  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$

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

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

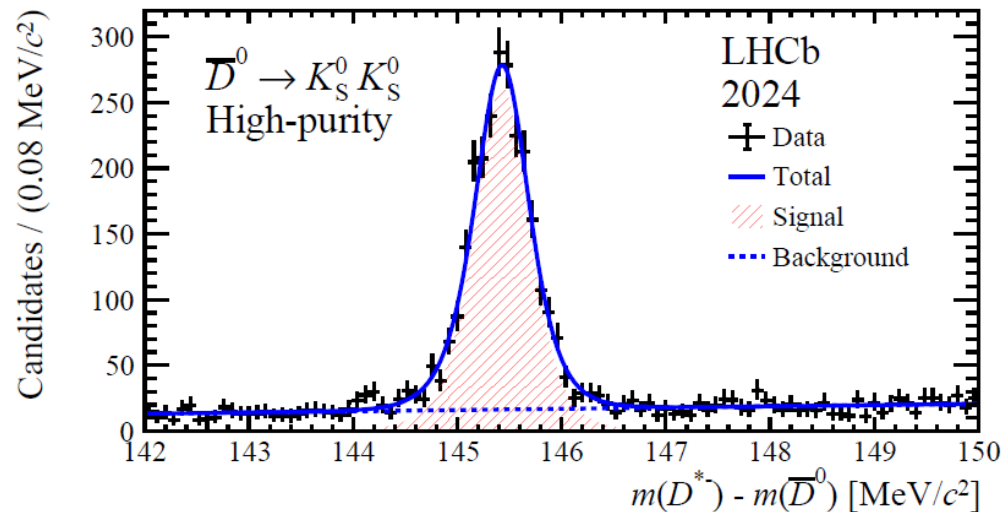
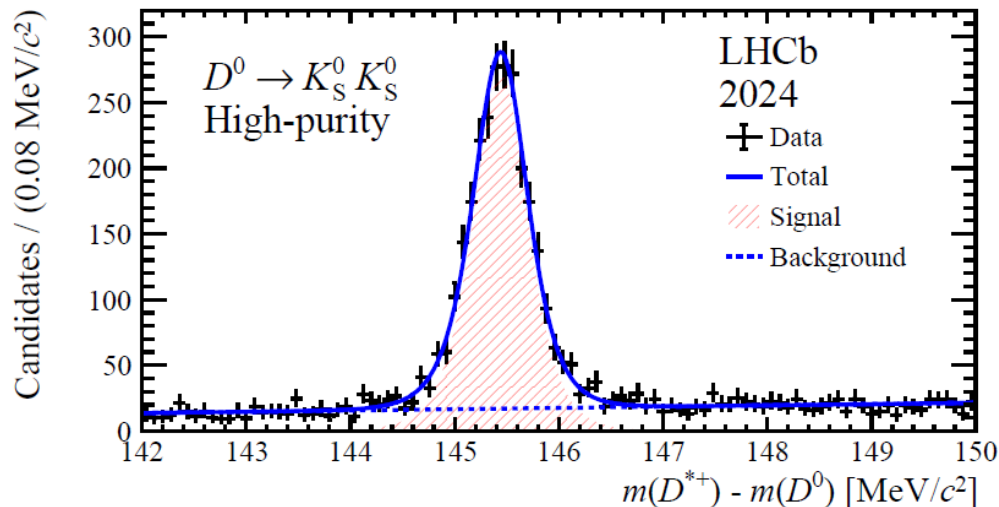


# Поиск CP-нарушения в данных Run-3

- Данные 2024 года, при энергии 13.6 TeV, соответствующие интегральной светимости  $6.2 \text{ fb}^{-1}$
- 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)



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



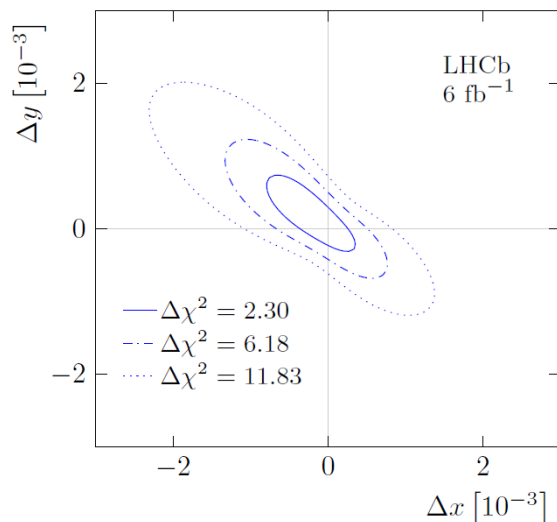
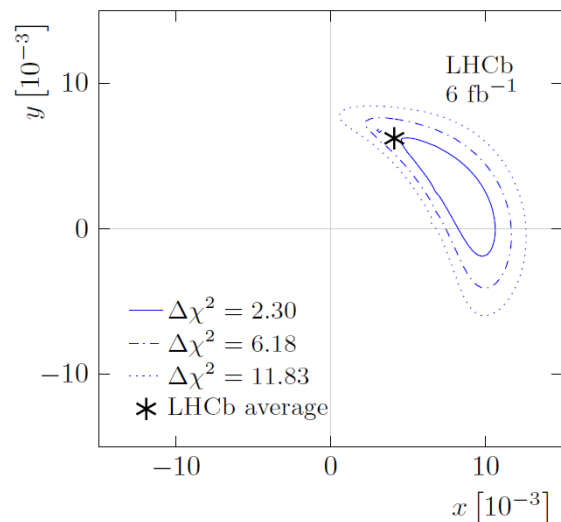
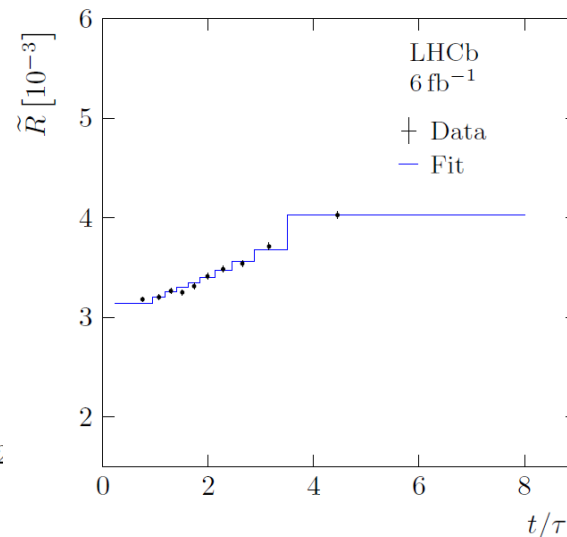
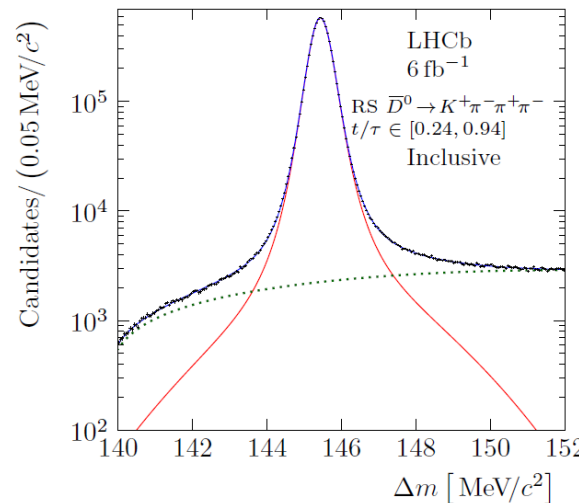
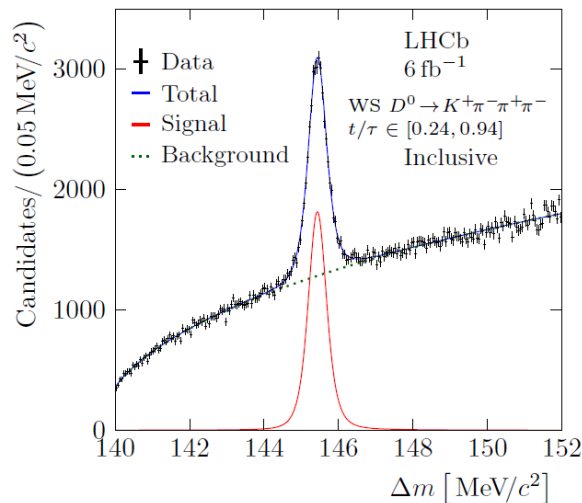
$$\mathcal{A}^{CP}(K_S^0 K_S^0) = (-0.37 \pm 0.78 \pm 0.29)\%.$$

# 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- $\gamma$ , а также для поиска эффектов CP-нарушения



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

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

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

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

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

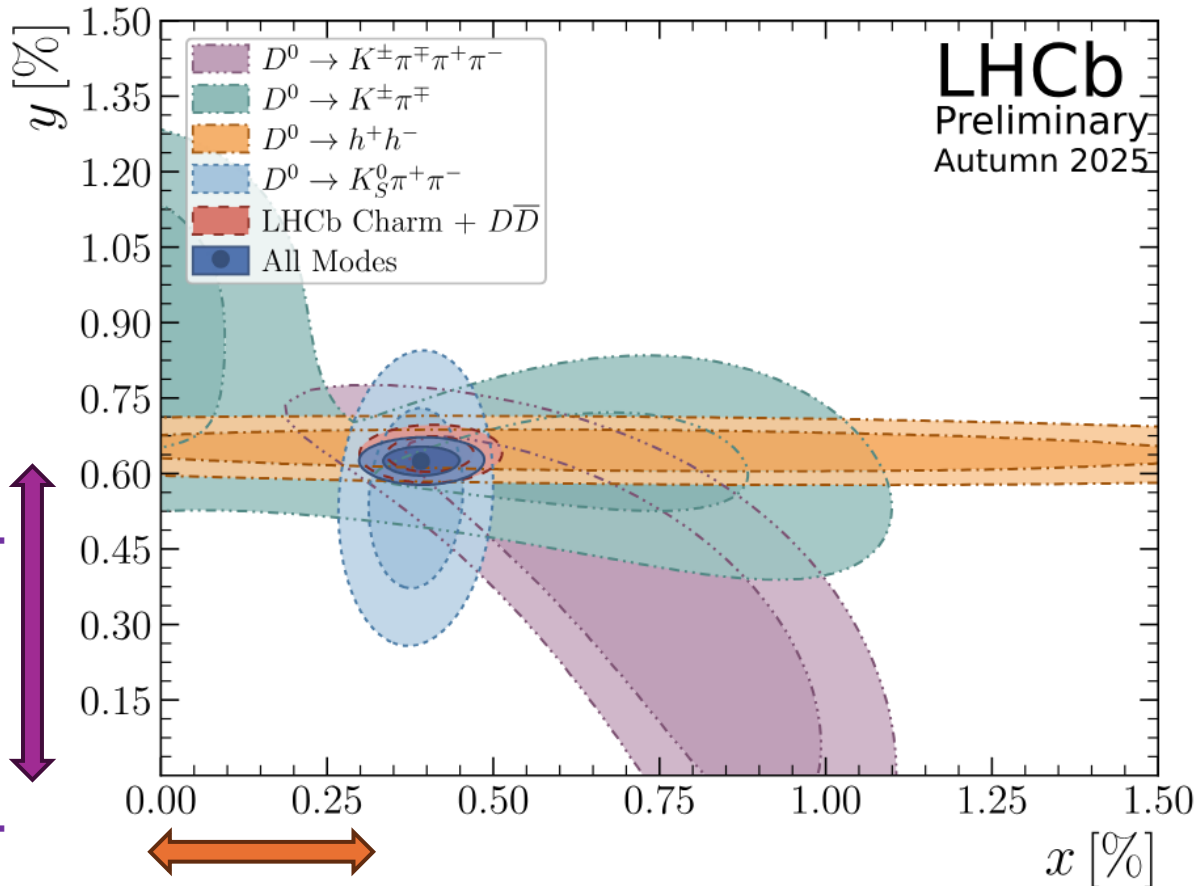
$$\Delta x = (-0.02 \pm 0.04)\%,$$

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

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

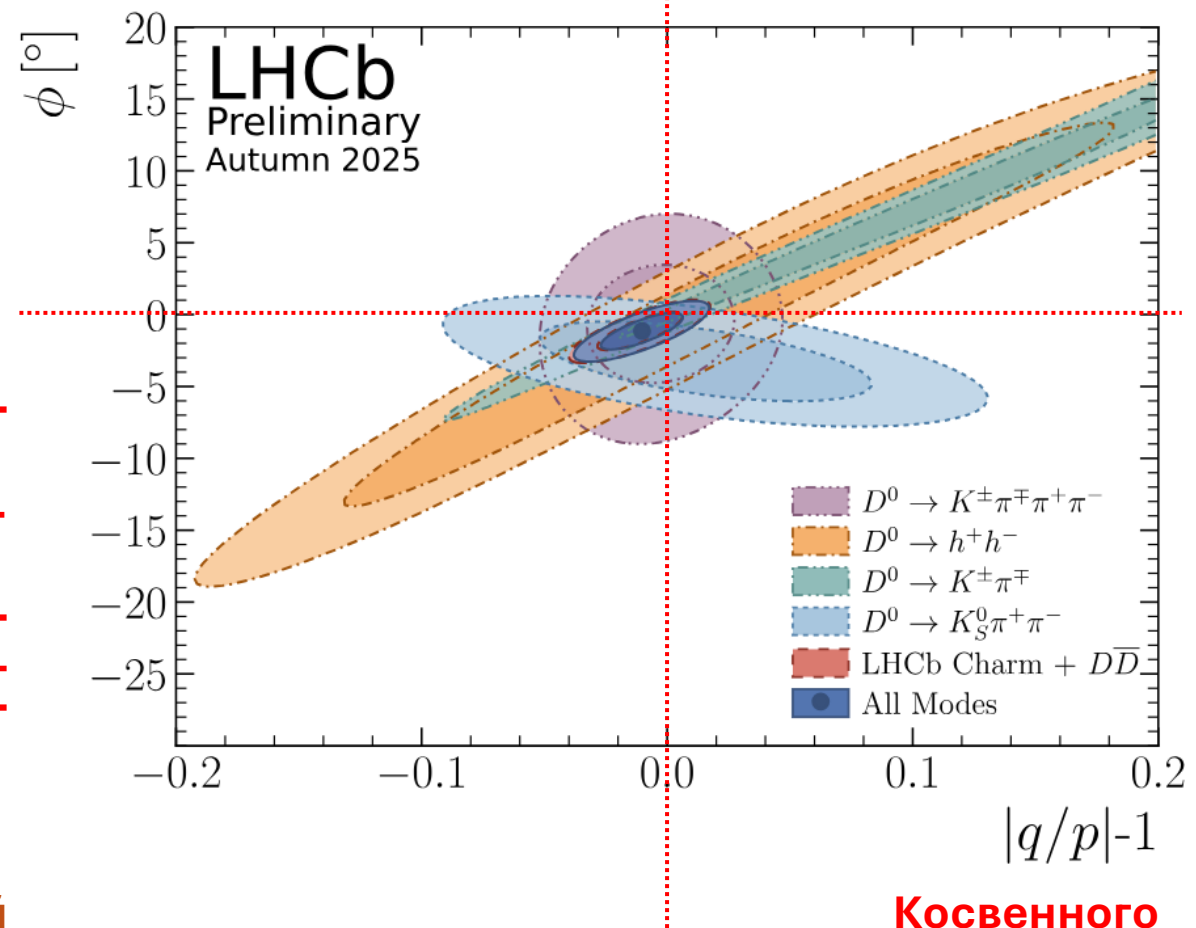
# Поиск CP-нарушения и измерение параметров смешивания для осцилляций $D^0$

Ненулевая разность ширины массовых состояний



Ненулевая разность масс массовых состояний

Интерференция прямого и косвенного

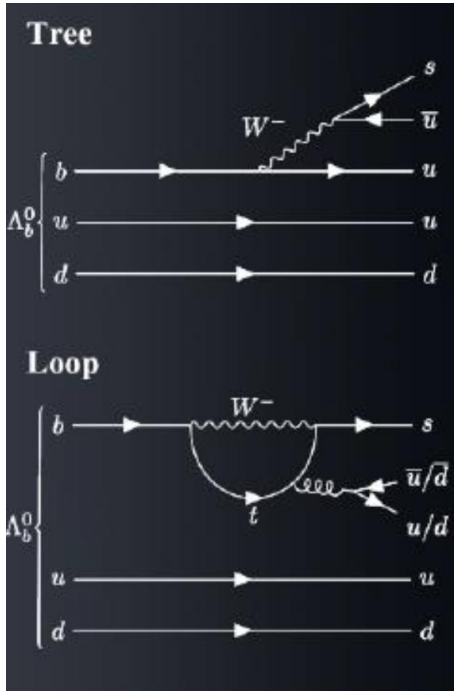


Косвенного

# Распады барионов

# Обнаружение **CP-нарушения** в распадах барионов

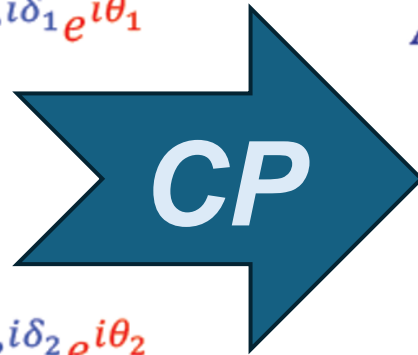
$$\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$$



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-2024-064  
arXiv:2503.16954

*Nature* 643 (2025) 1223-1228

- Study of  $\Lambda_b^0$  and  $\Xi_b^0$  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

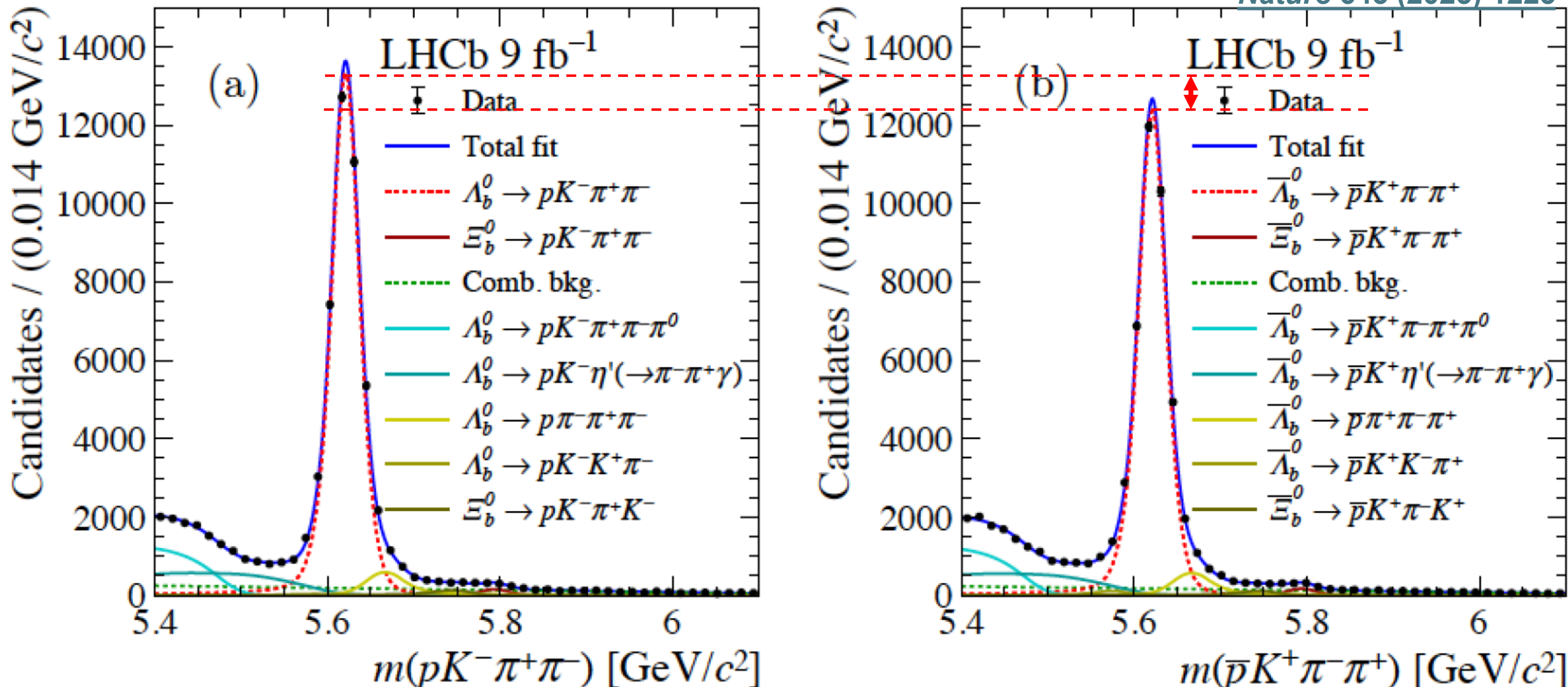
Decay topology	Mass region (GeV/ $c^2$ )	$\mathcal{A}_{CP}$
$\Lambda_b^0 \rightarrow (pK^-)(\pi^+\pi^-)$	$m_{pK^-} < 2.2$ $m_{\pi^+\pi^-} < 1.1$	$(5.24 \pm 1.29 \pm 0.21)\%$
$\Lambda_b^0 \rightarrow (p\pi^-)(K^-\pi^+)$	$m_{p\pi^-} < 1.7$ $m_{\pi^+K^-} \in [0.8, 1.0] \cup [1.1, 1.6]$	$(2.73 \pm 0.82 \pm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

*Nature* 643 (2025) 1223



CP-асимметрия для  $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$  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

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

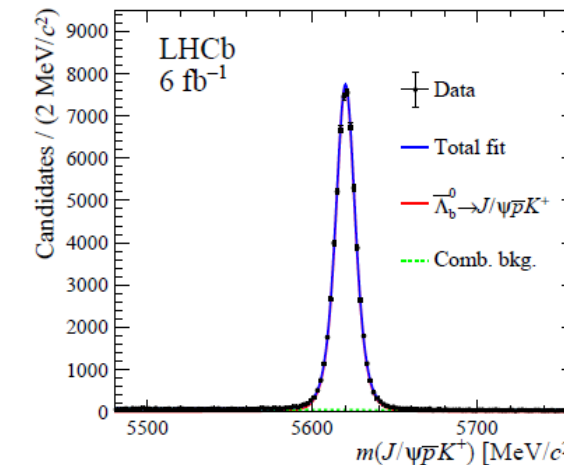
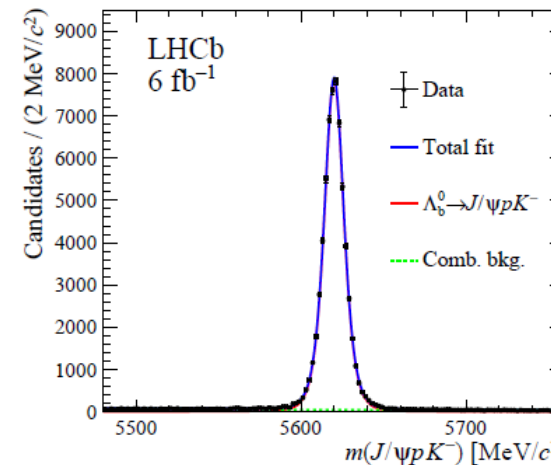
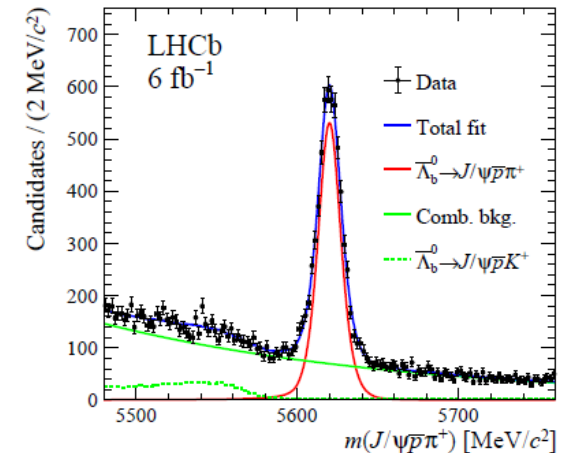
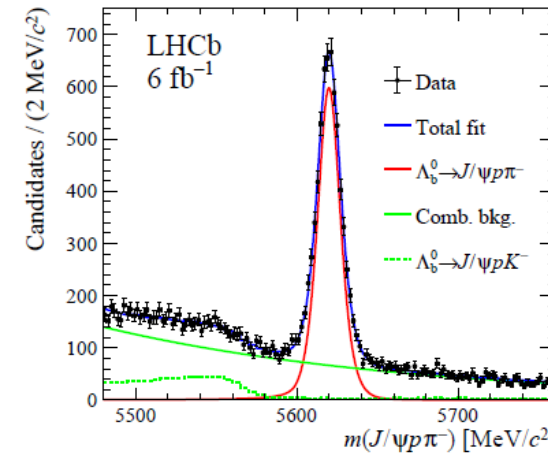
- Метод  $\Delta\mathcal{A}_{CP}$  позволяет избавиться от влияния асимметрий связанных с механизмом рождения  $b$ -бариона и асимметрией детектирования продуктов распада

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

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

- 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  $3.9\sigma$

# 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>.

- $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^- K^+$ ,  $3.1\sigma$  [32];  CP-нарушение в распадах прелестных адронов ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$ , up to  $3\sigma$  [33];  Наблюдается P-нарушение
- $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p h^-$  with  $h = \pi, K$ ,  $3.9\sigma$  [34] obtained with the  $\Delta A_{CP}$  technique<sup>1</sup>.

Asymmetries in baryon decays have also been explored in other decay channels, including  $\Lambda_b^0$  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  $\Lambda_b^0/\Xi_b^0 \rightarrow p h h' h''$ , where  $h$  represents a kaon or pion. No CPV has been observed in

# Очарованные барионы

- [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).

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

- Анализ распадов  $\Lambda_c^+$

- Исследованы моды:  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-K^+$  и  $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^-\pi^+$ .
- $\Lambda_c^+$  отбирались из распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+\mu^-X$ .
- Для подавления систематических эффектов применено взвешивание фазового пространства пионной моды ( $A_{CP}^{\text{wgt}}$ ).

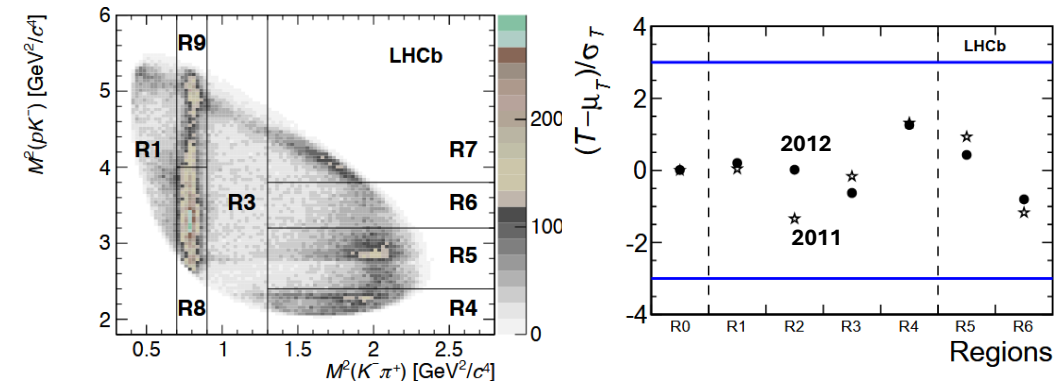
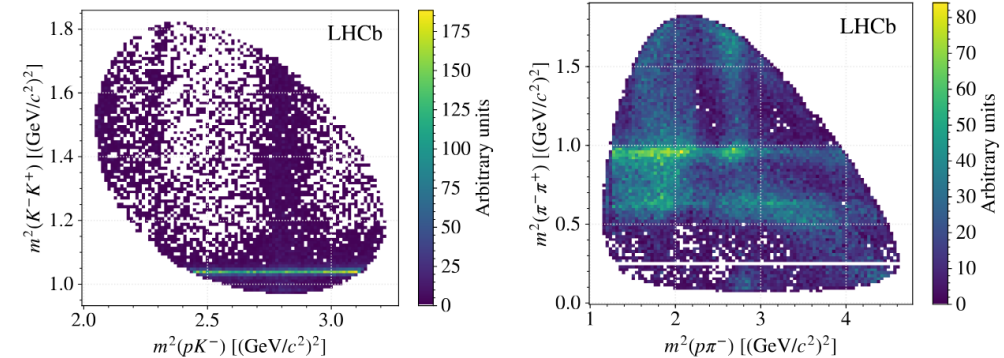
- Результат: разница CP-асимметрий составила:

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

Результат совместим с нулем в пределах погрешностей.

- Поиск CPV в распаде  $\Xi_c^+$

- Выполнен модельно-независимый поиск в канале  $\Xi_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$  [37].
- Результат: данных, указывающих на CP-нарушение, не обнаружено.



# 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**.