



CP-нарушение в распадах чарм-адронов

Алексей Дзюба, ЛБФ ОФВЭ НИЦ «КИ» – ПИЯФ
Семинар ОФВЭ, 2024-12-17

Доклад основан на работах LHCb:

1. [arXiv:2411.15441](https://arxiv.org/abs/2411.15441)
2. [arXiv:2411.12178](https://arxiv.org/abs/2411.12178)

Аннотация

В докладе будут представлены новые (предварительные) результаты эксперимента LHCb по исследованию эффектов CP -нарушения в распадах прелестных мезонов и барионов. Впервые получено указание существования прямого нарушения CP -инвариантности в распадах Λ_b -барионов [1]. Также в докладе будет обсуждаться первое указание на прямое нарушение CP -симметрии в распадах электрически заряженных B -мезонов в конечные состояния, содержащие чармоний [2].

Доклад основан на работах LHCb:

1. arXiv:2411.15441

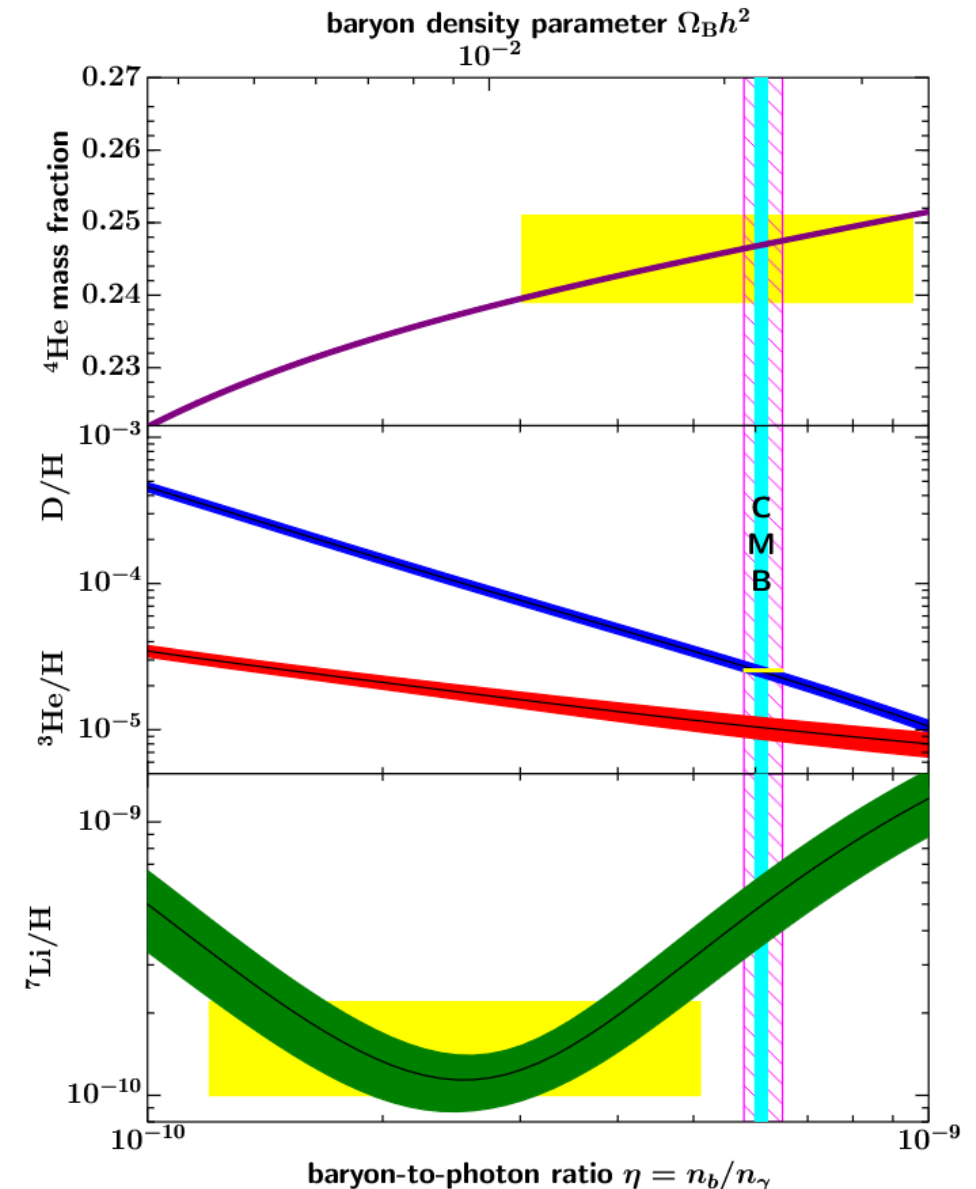
2. arXiv:2411.12178

План доклада

- Прямое CP -нарушение в адронном секторе Стандартной Модели (СМ)
 - Небольшой обзор
 - Экспериментальные сведения о прямом CP -нарушении
 - 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
- Экспериментальные указания, обнаруженные LHCb:
 - Нарушения CP -инвариантности в распадах Λ_b -барионов
 - Нарушения CP -инвариантности в распадах $B^+ \rightarrow J/\psi h^+$

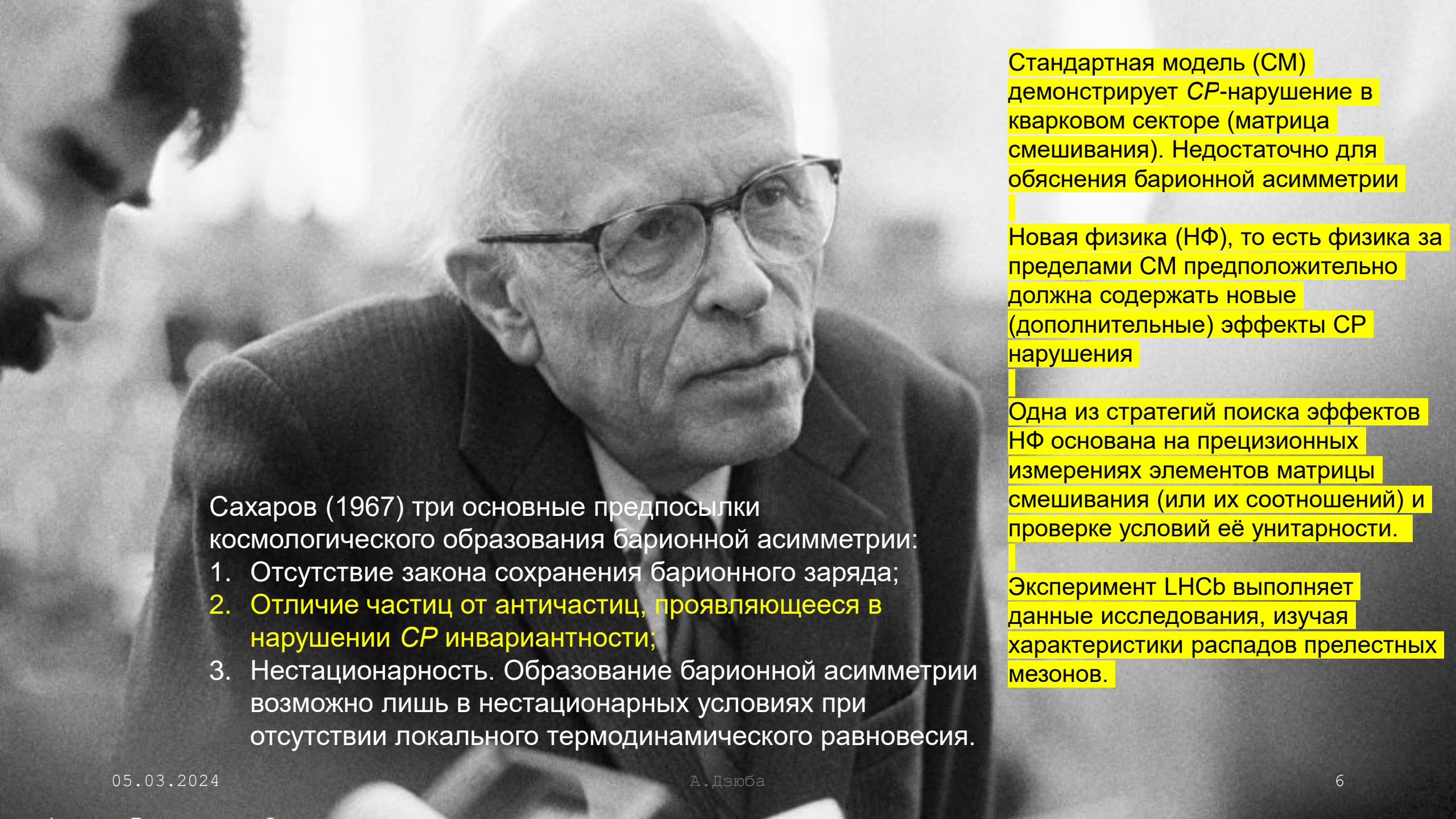
Почему видимая Вселенная состоит из материи?

- 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 прелестных мезонов.

Литература + видео (I/II)

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/II)

- *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](#))
- Нейтральные токи с изменением кварковых ароматов и редкие распады K -мезонов, Л.Г. Ландсберг ([УФН 173 \(2003\) 1025](#))
- Наблюдение *CP*-нарушения в распадах очарованных частиц. А.Д. ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- Смешивание электрически нейтральных мезонов. Новые результаты LHCb, А.Д. ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- Прецизионное измерение параметров *CP*-нарушения в распадах прелестных мезонов в эксперименте LHCb. А.Д. ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- Evidence for *CP* violation in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ decays at the LHCb experiment, Wenbin Qian ([Семинар ЦЕРН](#))

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

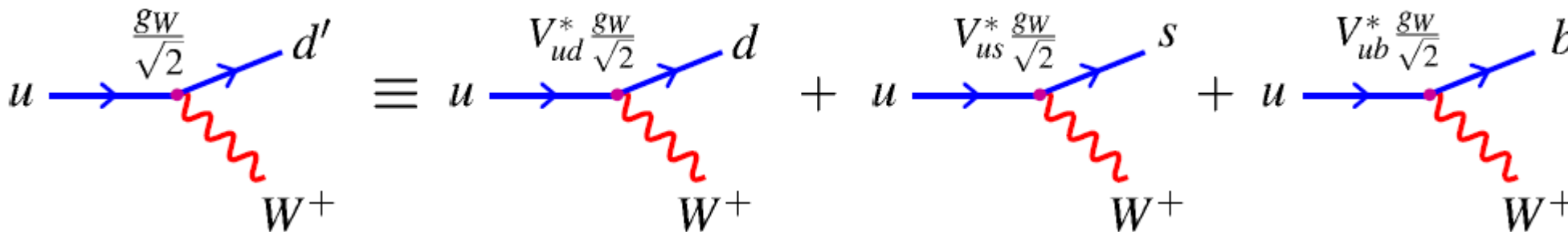
СКМ Matrix

Массовые собственные
состояния

(Cabibbo, Kobayashi, Maskawa)

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

**Фейнмановски
е 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 \(\lambda\) 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:

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

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

Соотношения унитарности

Сумма по столбцам и строкам

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

Соотношения для недиагональных элементов

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

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

Треугольники унитарности (6 штук)

Следствие ненулевой комплексной

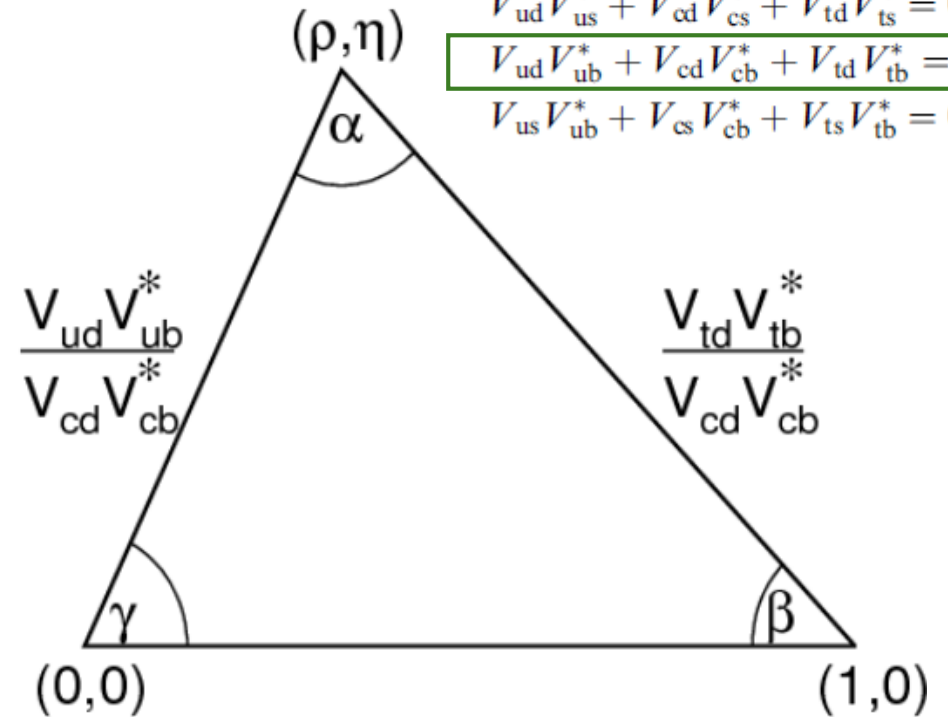
фазы

Площади всех треугольников

одинаковы **2J**

(Инвариант Ярлског)

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



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

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

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

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

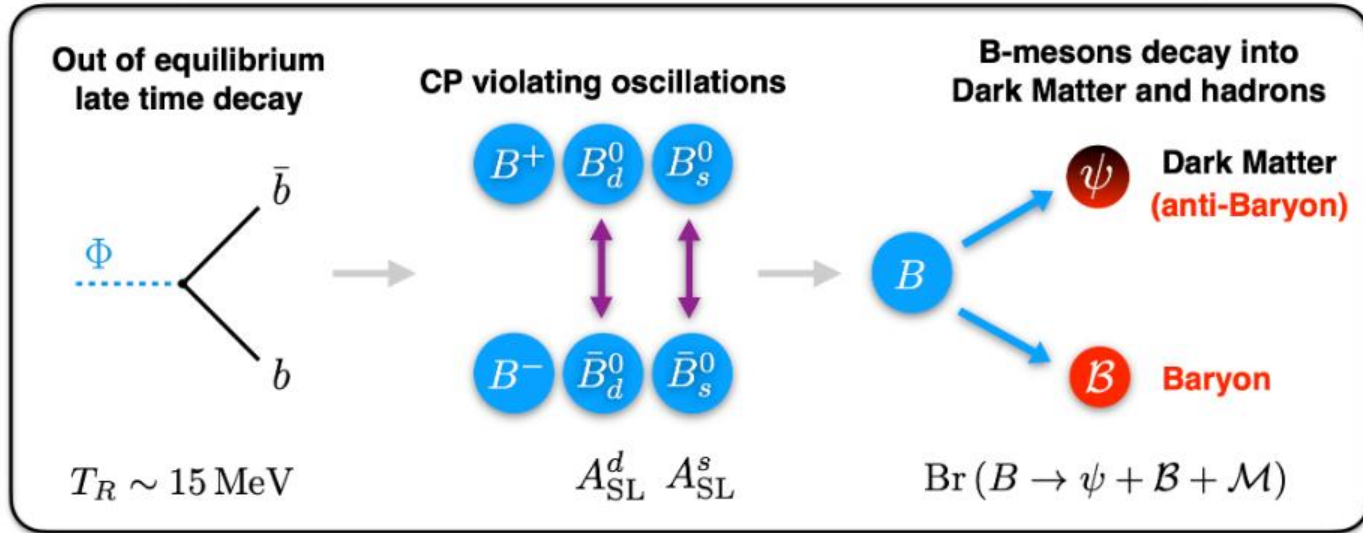
$$J \sim 3 \times 10^{-5}$$



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

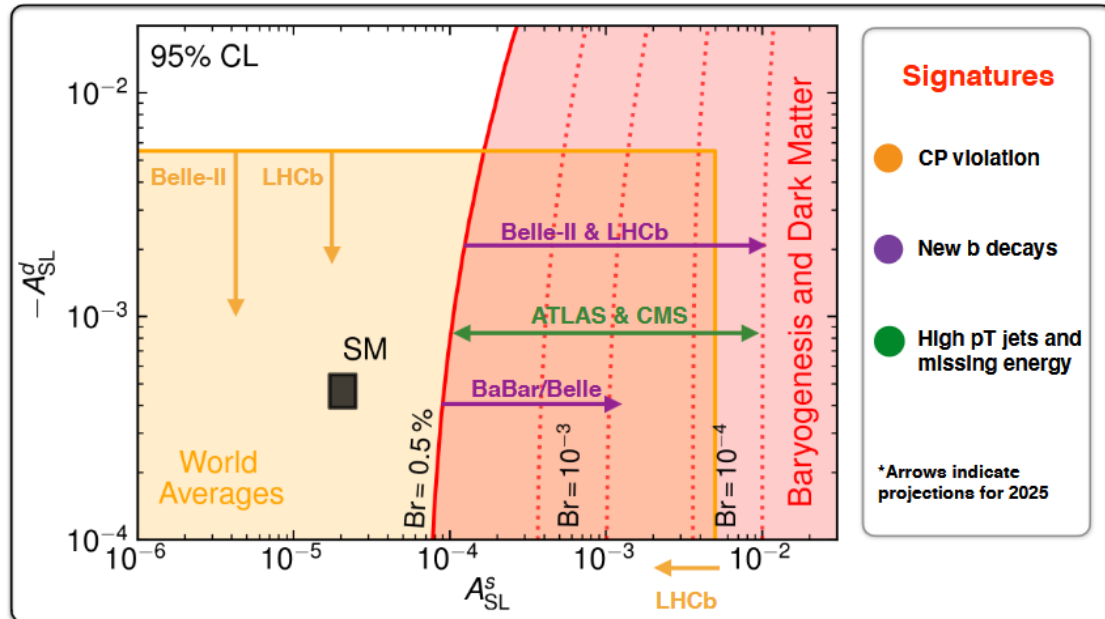
$$\eta_{KM} \sim 10^{-17} \ll \eta_{obs} = \sim 10^{-10}$$

Baryogenesis and Dark Matter from B Mesons: *B-Mesogenesis*



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

The B-Mesogenesis Parameter Space



- Дополнительные (к КМ) механизмы могут приводить к асимметрии!
- Важно исследовать весь *b*-сектор!
- Барионы?!

Пример модели генерации БАВ

Phys. Rev. D **104**, 035028

<https://arxiv.org/pdf/2101.02706>

CP violation

CP-violating nature of weak interaction has multiple manifestations

CP violation in mixing

Unequal transition probabilities
between flavour eigenstates

$$P(B \rightarrow \bar{B}) \neq P(\bar{B} \rightarrow B)$$

CP violation in decay

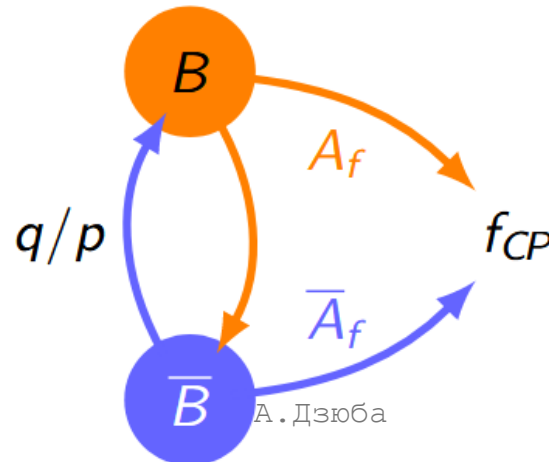
Unequal CP-conjugated decay rates

$$\Gamma(B \rightarrow f) \neq \Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{f})$$

CP violation in interference of decays with/without mixing

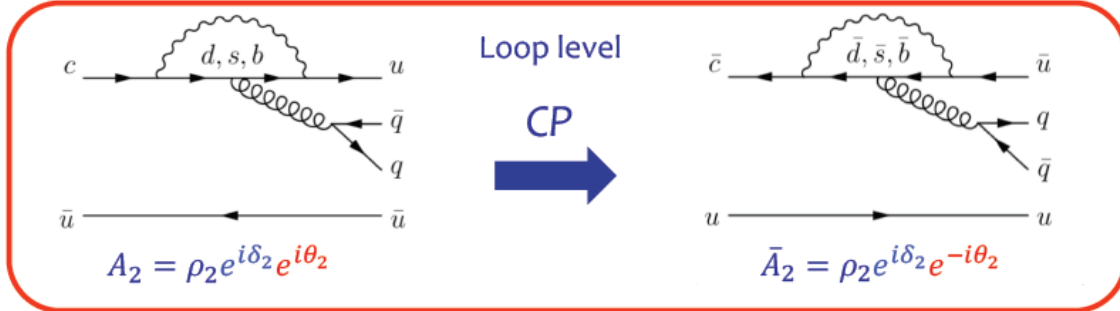
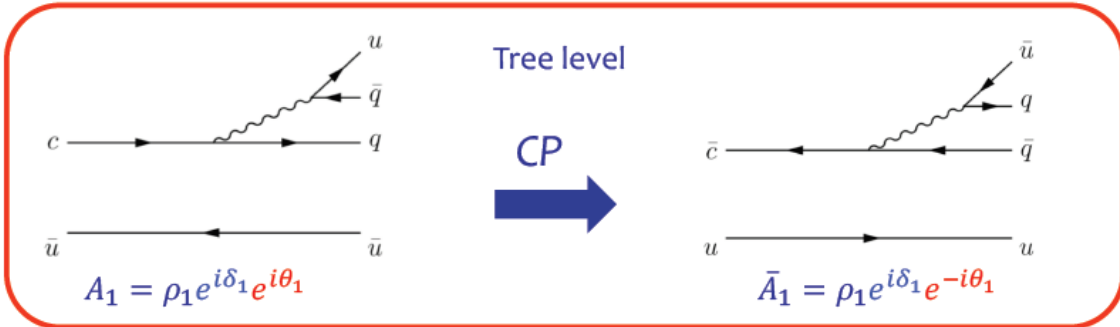
Time-dependent or time-integrated difference of decay rates of initial flavour eigenstates

$$\Gamma(B_{(\rightsquigarrow \bar{B})} \rightarrow f_{CP})(t) \neq \Gamma(\bar{B}_{(\rightsquigarrow B)} \rightarrow f_{CP})(t)$$



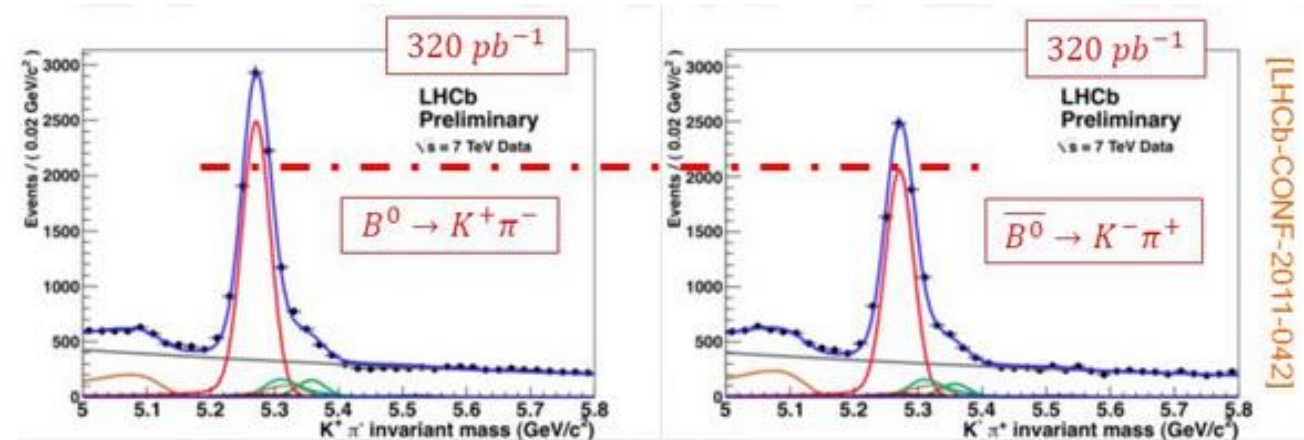
Прямое CP нарушение в распадах адронов

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



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

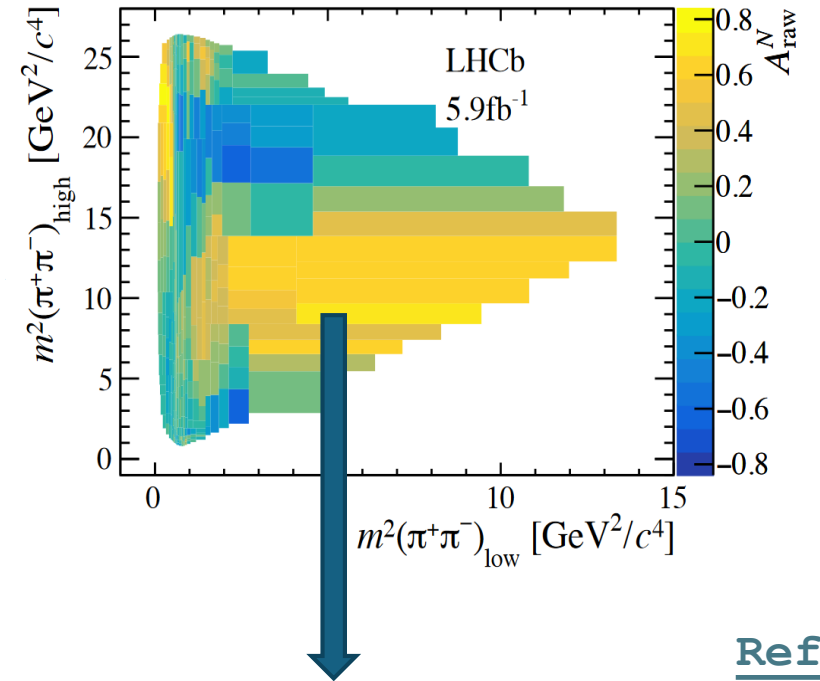
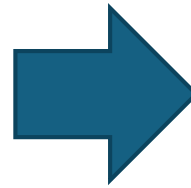
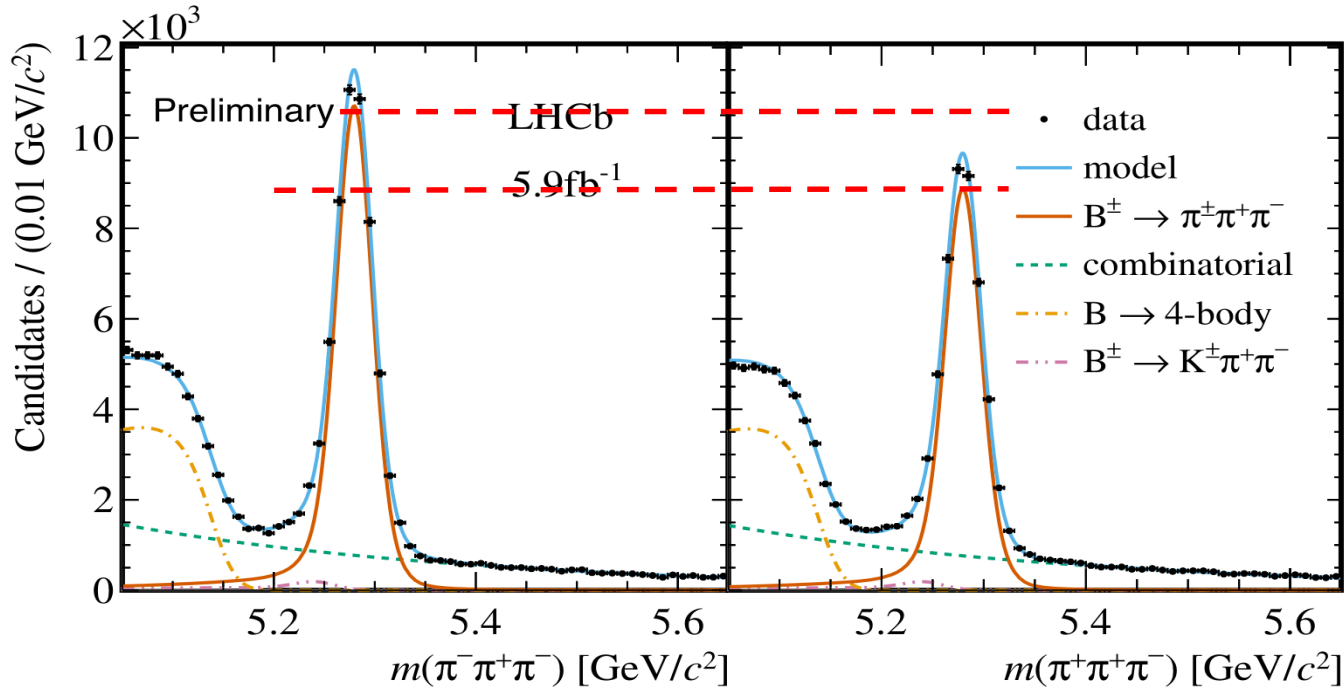
- Прямое нарушение CP проявляется в асимметрии по сопряженным каналам распада
- Для заряженных и нейтральных мезонов
- Необходима интерференция как минимум двух амплитуд



$$\Delta A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+) - \Gamma(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+) + \Gamma(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)} = (-0.088 \pm 0.011 \pm 0.008)\% \rightarrow 5\sigma \text{ evidence}$$

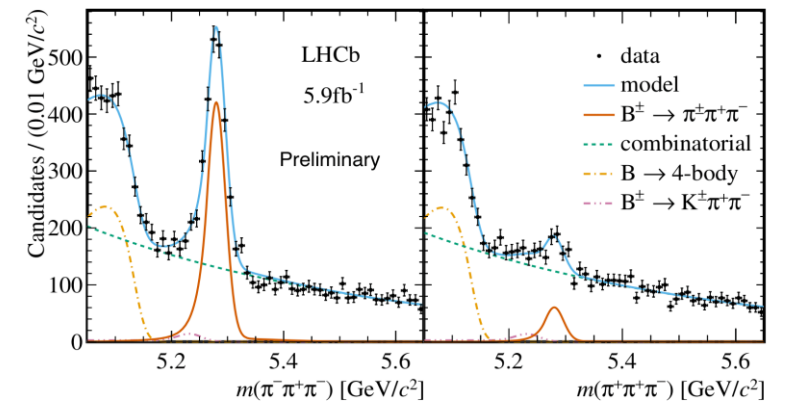
Легко увидеть, но теоретический расчет затруднен из-за наличия адронных эффектов!

Исследование многочастичных распадов



Ref.

для условий $4 < m^2(\pi^+ \pi^-)_{\text{low}} < 15$ ГэВ²/c⁴ и
 $4 < m^2(\pi^+ \pi^-)_{\text{high}} < 16$ ГэВ²/c⁴ измеренная CP асимметрия
 составила $74,5 \pm 2,7$ %.



История исследования CP-нарушения



1964

1999

2001

2004

2012

2013

2018

2019

????

CP violation
(in mixing)
in neutral
Kaon decays

Direct CP
violation in
neutral **Kaon**
decays

CP violation
in mixing
and decay in
B⁰ decays

Direct CP
violation in
B⁰ decays

Direct CP
violation in
B⁺ decays



Direct CP
violation in
B_s⁰ decays



CP violation
in mixing
and decay in
B_s⁰ decays



Direct CP
violation in
D⁰ decays



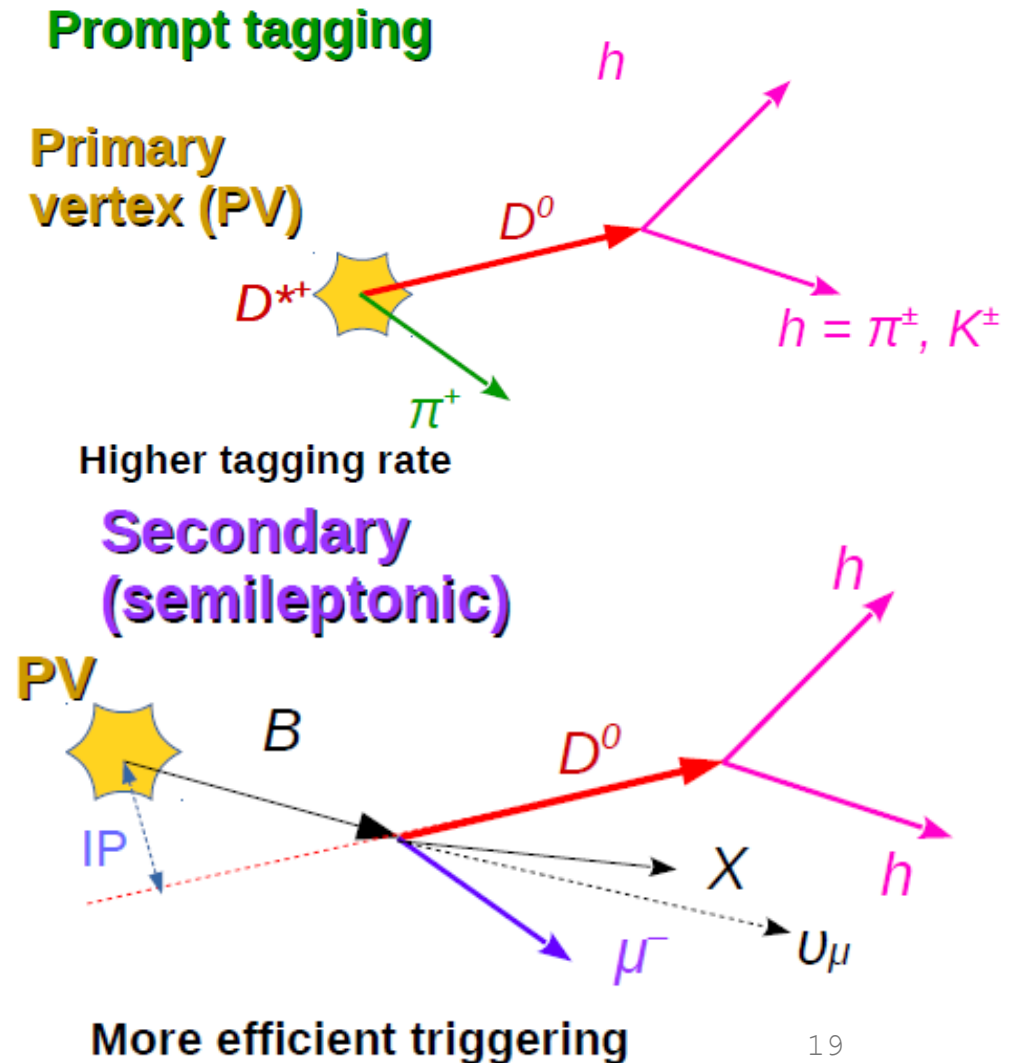
Direct CP
violation
in **baryon**
decays

Direct CPV
in CKM
suppressed
in beauty to
charmionium
B⁺ decays



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

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

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

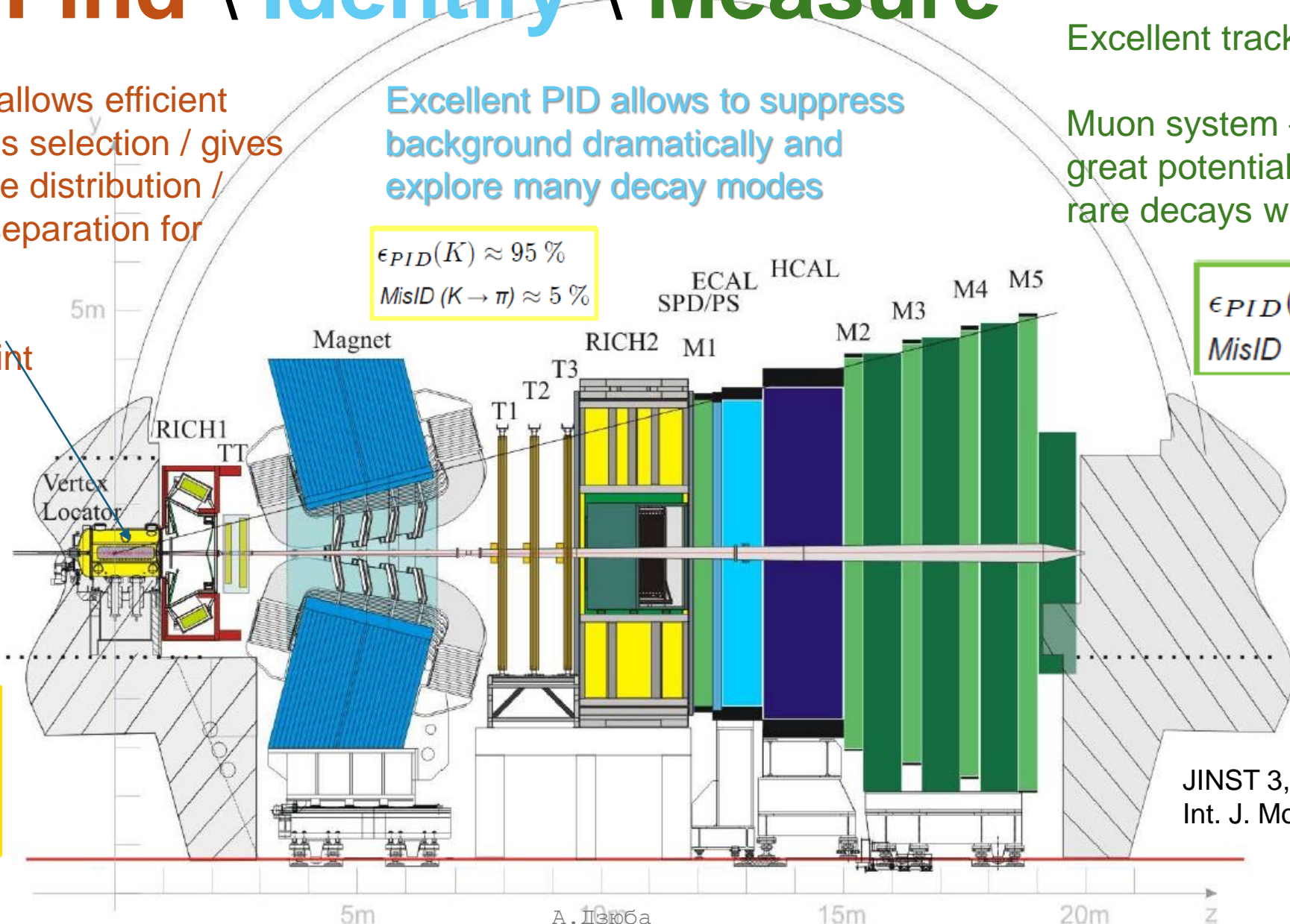
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

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

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

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

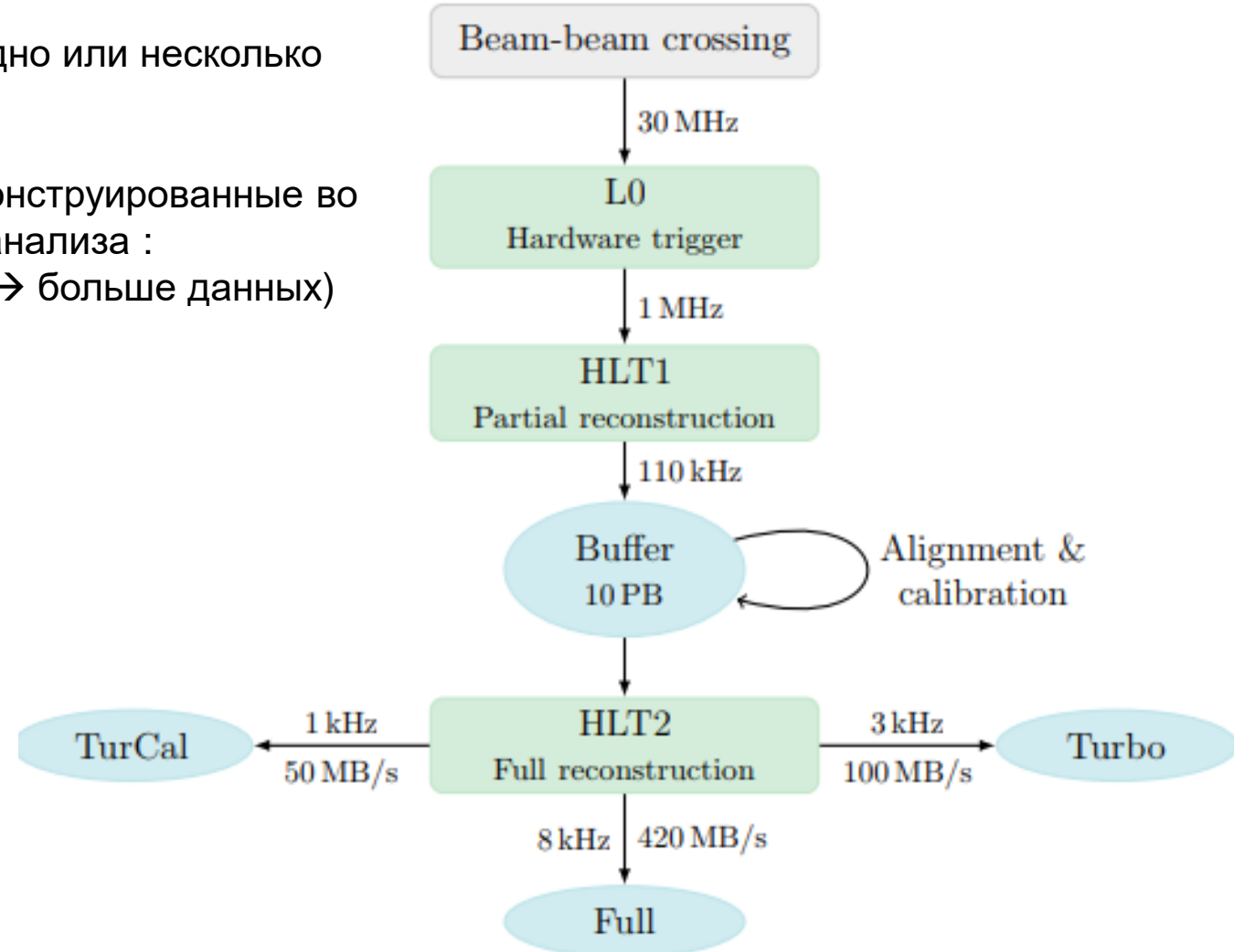
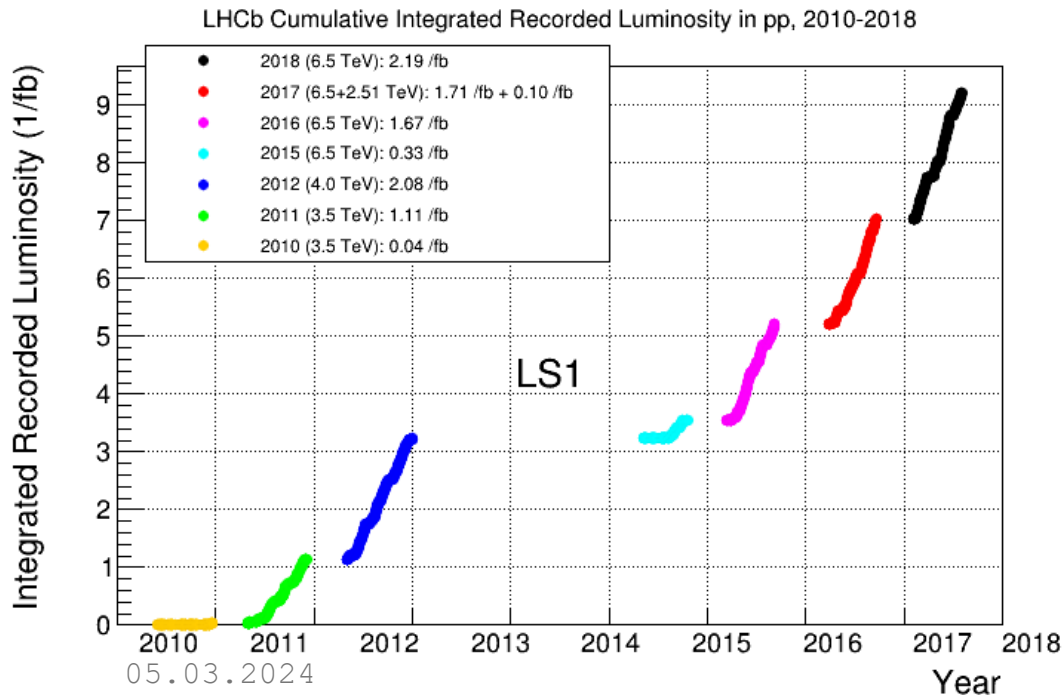
$$\epsilon_{track} > 96\%$$

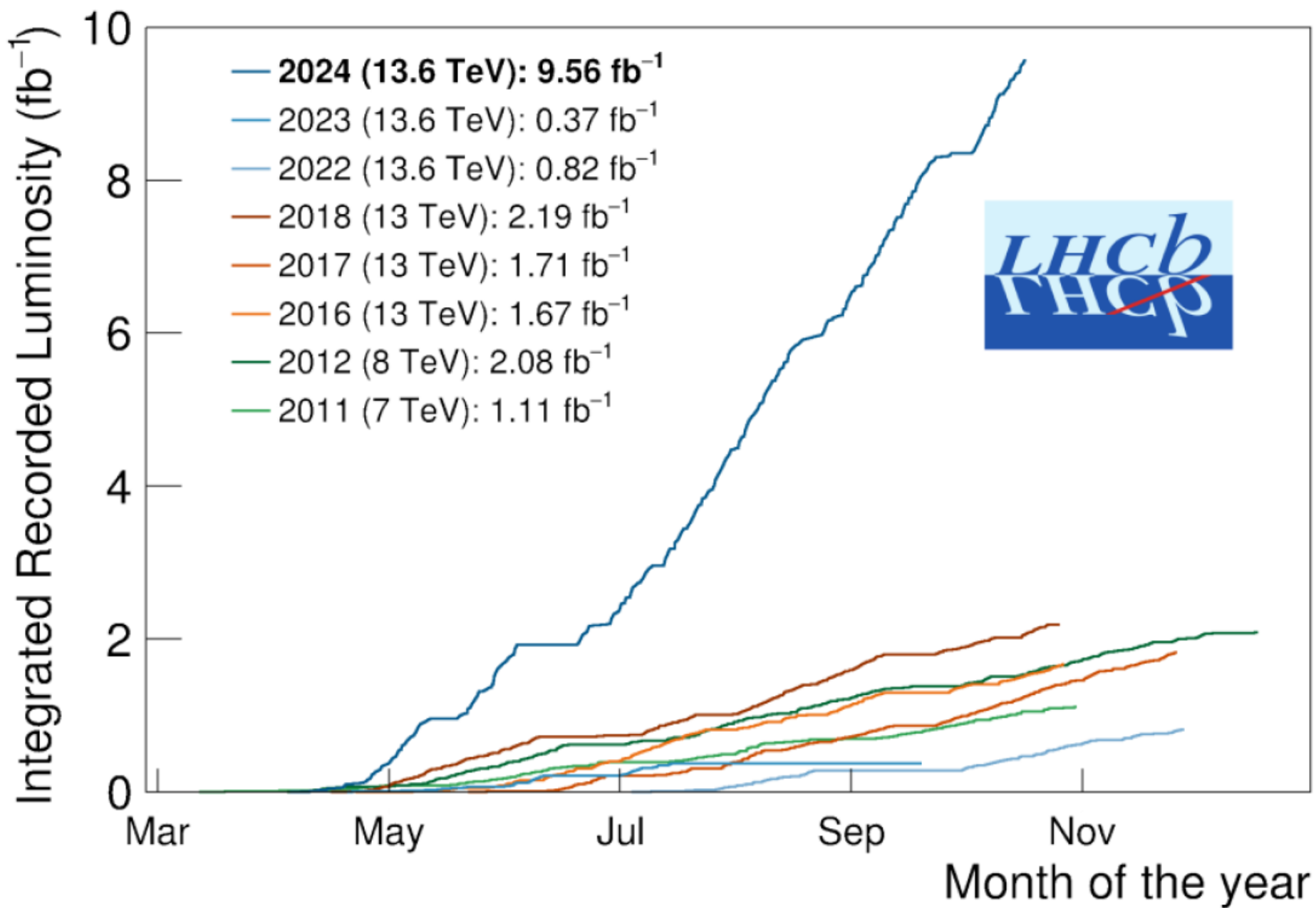


JINST 3, (2008) S08005;
Int. J. Mod. Phys. A 30,
(2015) 153022

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





Исследование CP -нарушения в барионном секторе (LHCb)

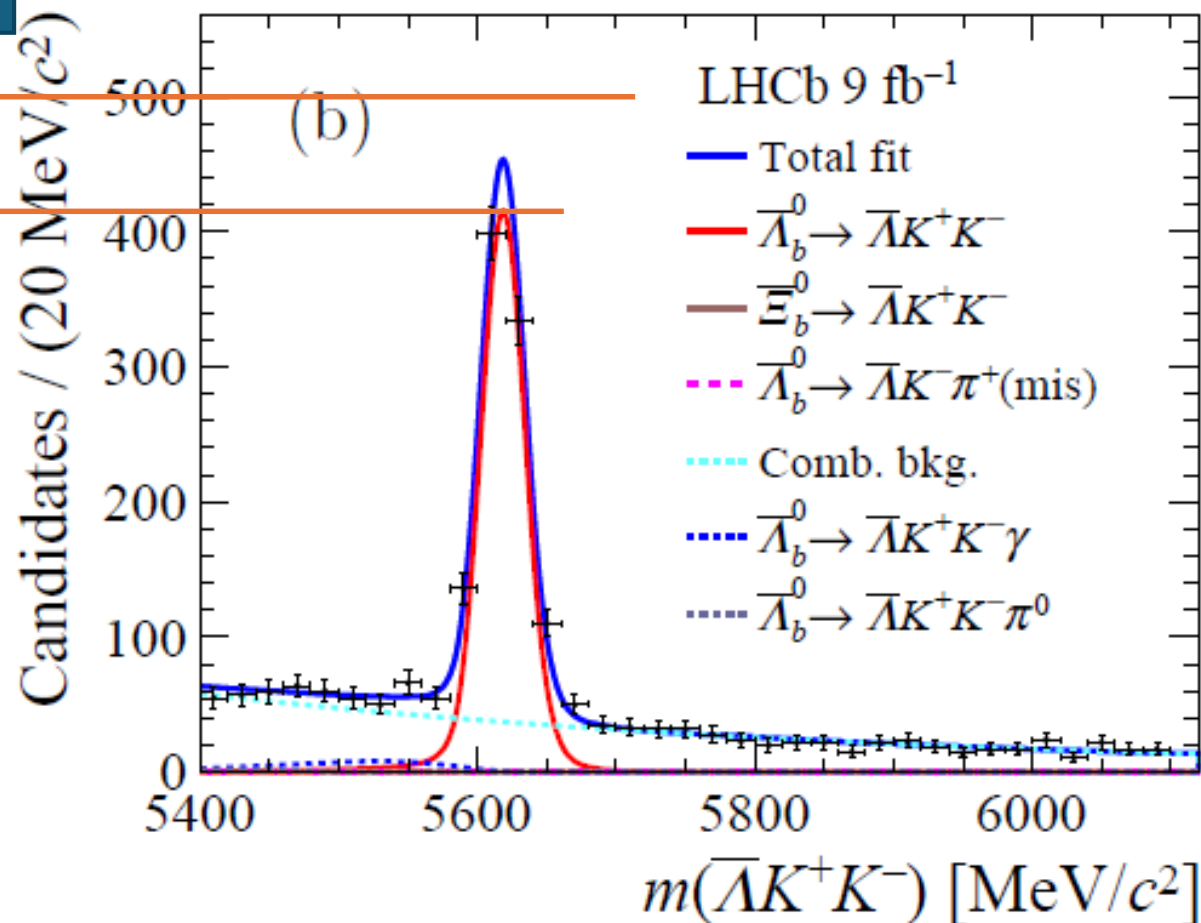
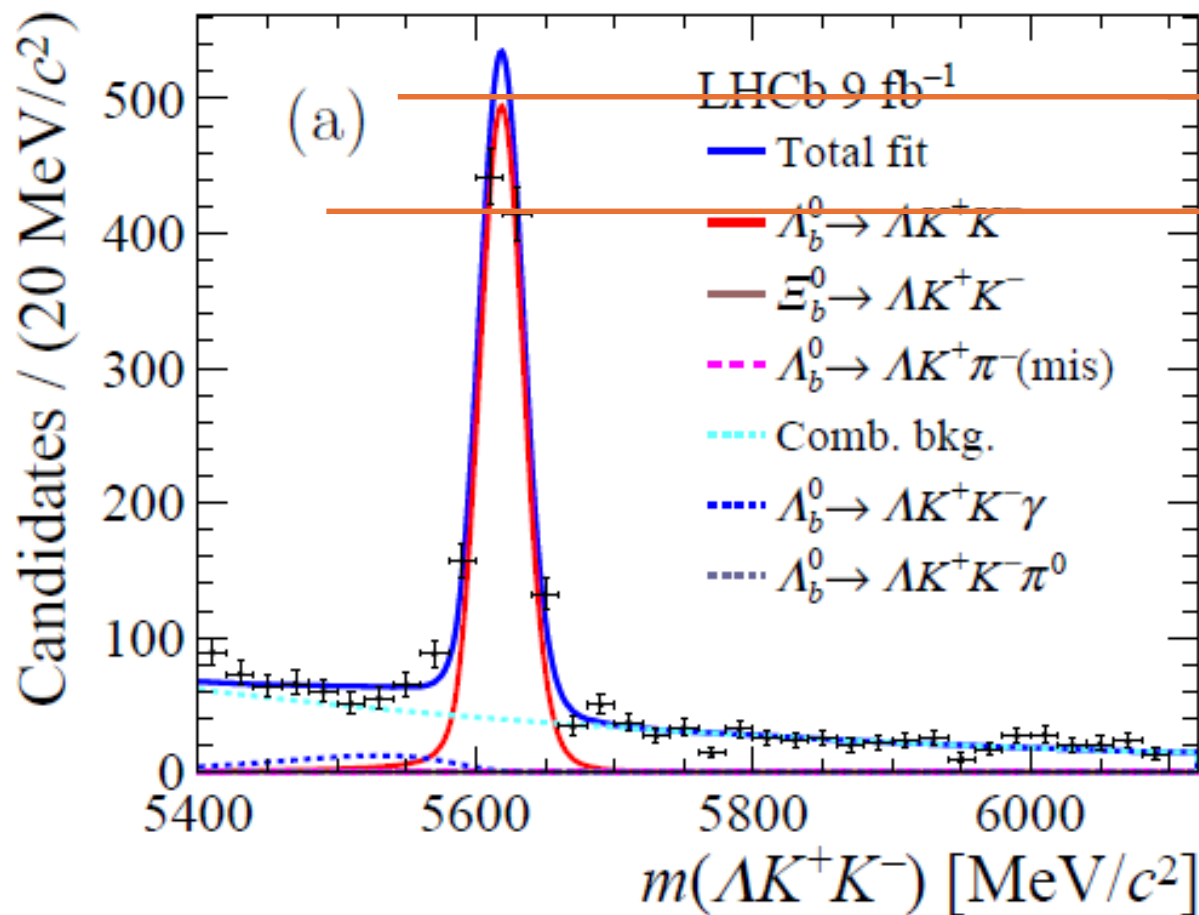
Анализ данных Run-2 в 2024

Decays	Data	Methods	Reference
$\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$	3 fb ⁻¹	A_{CP}	PLB787 (2018) 124
$\Lambda_b^0 \rightarrow pK_S^0\pi^-$	1 fb ⁻¹	A_{CP}	JHEP04 (2014) 087
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+\pi^-, \Lambda K^+K^-$	3 fb ⁻¹	A_{CP}	JHEP05 (2016) 081
$\Xi_b^0 \rightarrow pK^-K^-$	5 fb ⁻¹	Amplitude analysis	PRD104 (2021) 052010
$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p\pi^-, J/\psi pK^-$	3 fb ⁻¹	A_{CP}	JHEP07 (2014) 103
$\Lambda_b^0 \rightarrow DpK^-, ADS$	9 fb ⁻¹	A_{CP}	PRD104 (2021) 112008
$\Lambda_b^0, \Xi_b^0 \rightarrow p3h$	3 fb ⁻¹	A_{CP}	EPJC79 (2019) 745
$\Lambda_b^0, \Xi_b^0 \rightarrow p3h$	3 fb ⁻¹	TPA	Nature Phys. 13 (2017) 391 JHEP08 (2018) 039
$\Lambda_b^0 \rightarrow p3\pi$	6.6 fb ⁻¹	TPA, energy test	PRD102 (2020) 051101

$$A_{\text{Raw}}^f = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}$$

?

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



Определение ΔA_{CP}

Signal channel

$$A_{CP}^S = A_{Raw}^S - A_P^{\Lambda_b^0} - A_D^S$$

$$A_P^{\Lambda_b^0} = \frac{\sigma(\Lambda_b^0) - \sigma(\bar{\Lambda}_b^0)}{\sigma(\Lambda_b^0) + \sigma(\bar{\Lambda}_b^0)} \quad A_D^f = \frac{\epsilon(f) - \epsilon(\bar{f})}{\epsilon(f) + \epsilon(\bar{f})}$$

Control channel

$$A_{CP}^C = A_{Raw}^C - A_P^{\Lambda_b^0} - A_D^C$$

$$\Delta A_{CP} = \Delta A_{Raw} - \Delta A_P^{\Lambda_b^0} - \Delta A_D$$

- Необходимо сделать поправку на **асимметрию рождения** и **асимметрию регистрации продуктов распада**
- Асимметрия рождения 1-2% (LHCb-2021-016)
- Асимметрия детектирования
 - Протоны ~1-2%, Каоны: ~1%
- Контрольный канал распада позволяет уменьшить погрешность ΔA_D до ~1%

$$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ (\rightarrow \Lambda \pi^+) \pi^-$$

$$A_{CP} \sim 0$$

Similar topology

Определение ΔA_{CP}

Signal channel

Control channel

A_{CP}^S



$$\Delta A_{CP} = 0.083 \pm 0.023 \pm 0.016$$

First evidence of CP violation, 3.1σ

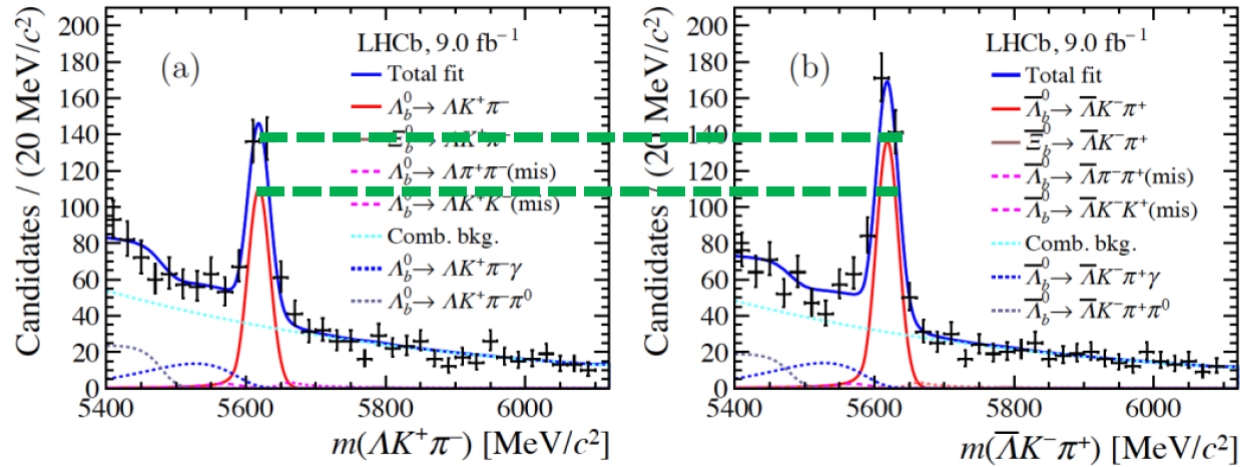
- Необходима регистрация продуктов распада
- Асимметрия рождения 1-2% (LHCb-2021-016)
- Асимметрия детектирования
 - Протоны ~1-2%, Каоны: ~1%
- Контрольный канал распада позволяет уменьшить погрешность ΔA_D до ~1%

$$A_{CP} \sim 0$$

Similar topology

Каналы распада с пионами

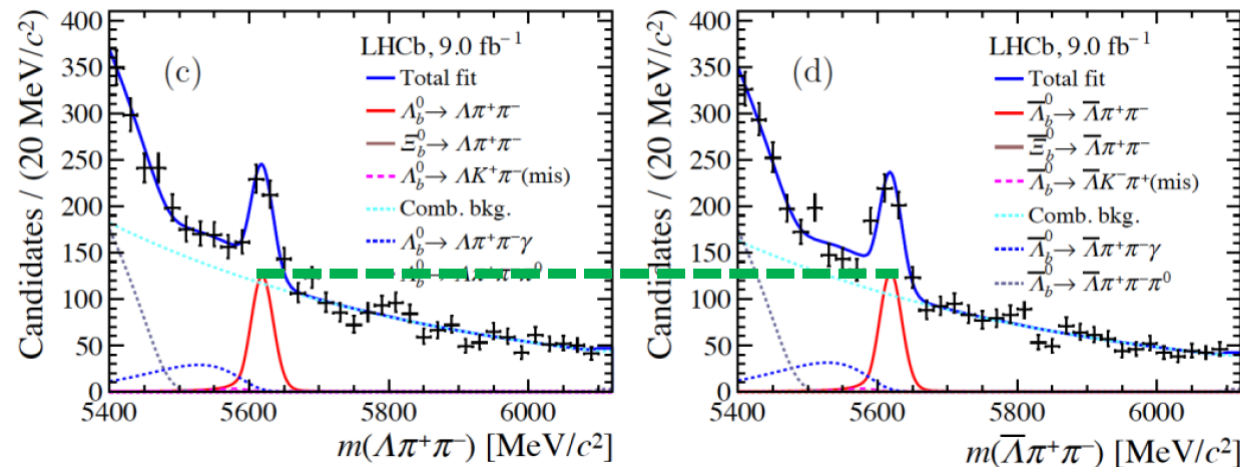
Preliminary



$$\Delta A_{CP} = -0.118 \pm 0.045 \pm 0.021$$

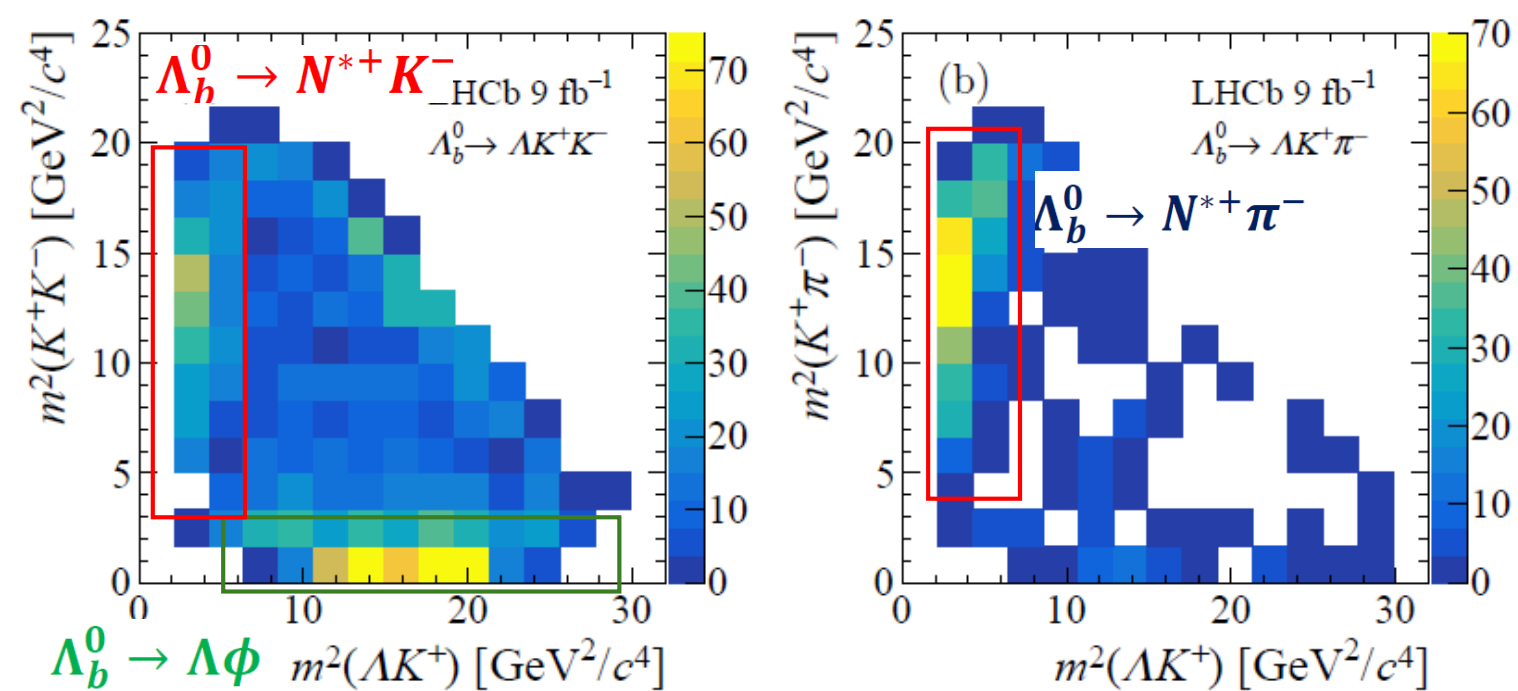
Consistent with 0 within 2.4σ

Preliminary



$$\Delta A_{CP} = -0.013 \pm 0.053 \pm 0.018$$

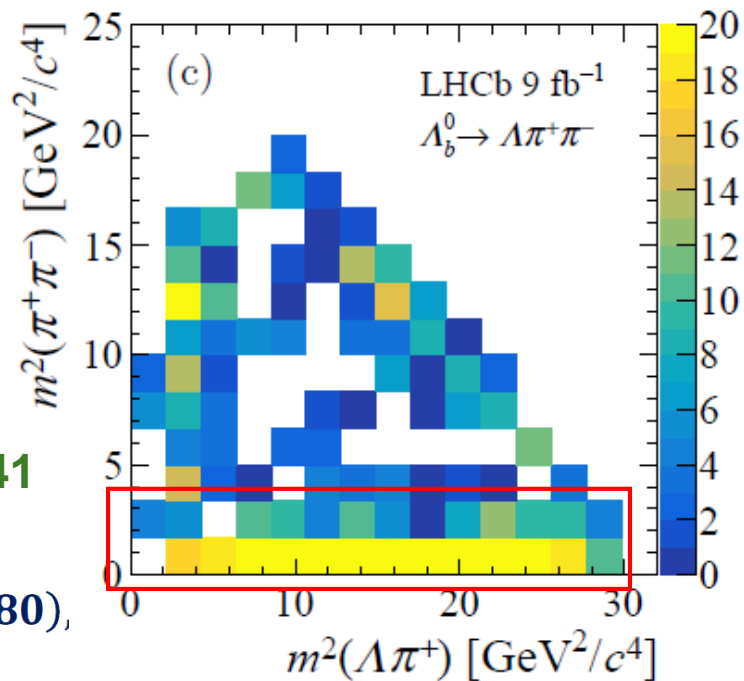
Consistent with 0



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

$$\Delta A_{CP}(N^{*+} \pi^-) = -0.078 \pm 0.051 \pm 0.027$$

$$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$$



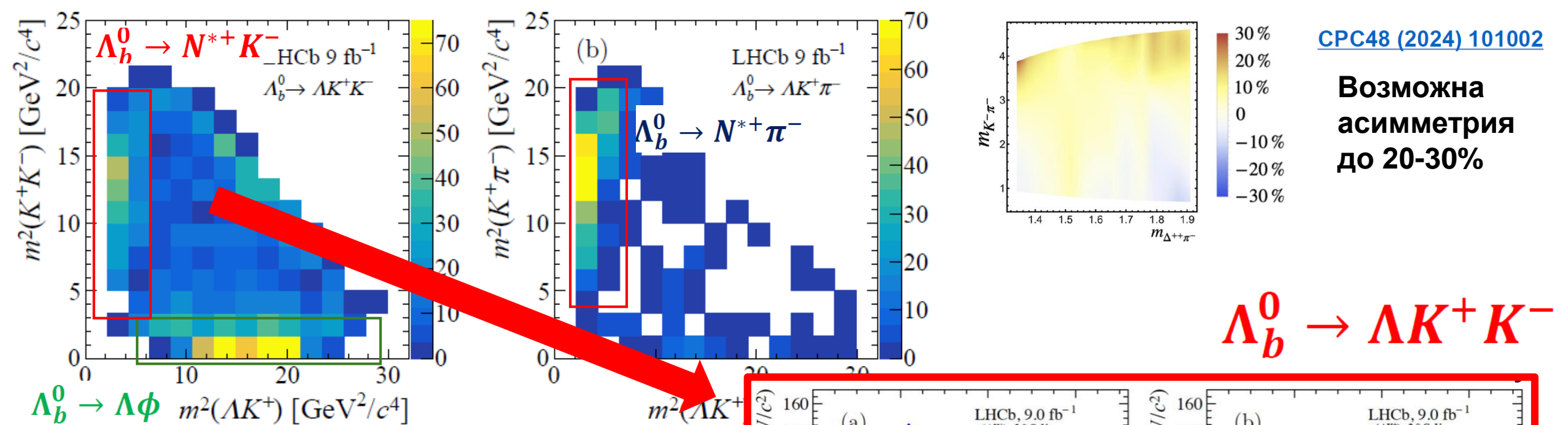
region
 $\Delta A_{CP}(\Lambda \phi) = 0.150 \pm 0.055 \pm 0.021$ Consistent with 0 within 2.5 σ [PRD107 \(2023\) 053009](#)
 Predicted CPV (resonant), ~1.5%

arXiv:2411.15441

$$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda f_0(980),$$

$$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^- \quad \Delta A_{CP}(\Lambda f) = 0.088 \pm 0.069 \pm 0.021$$

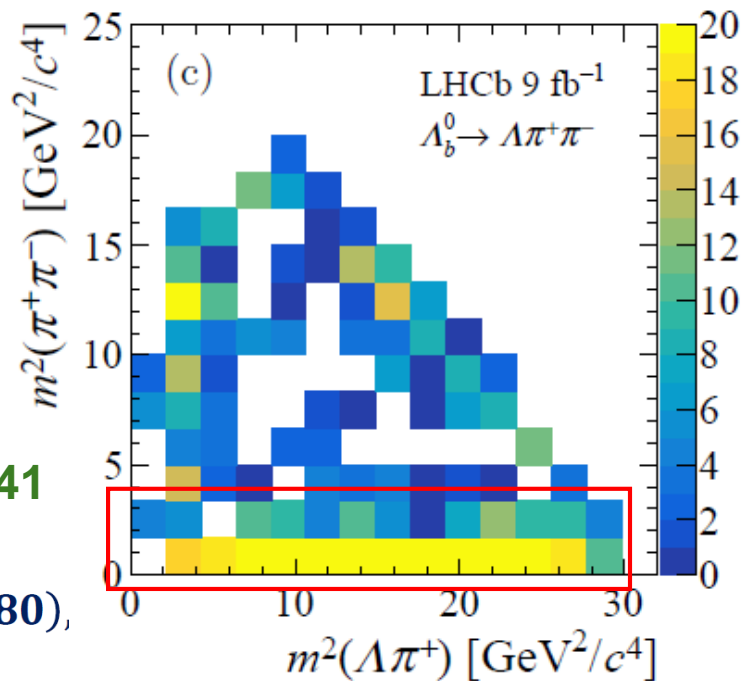
Возможна
асимметрия
до 20-30%



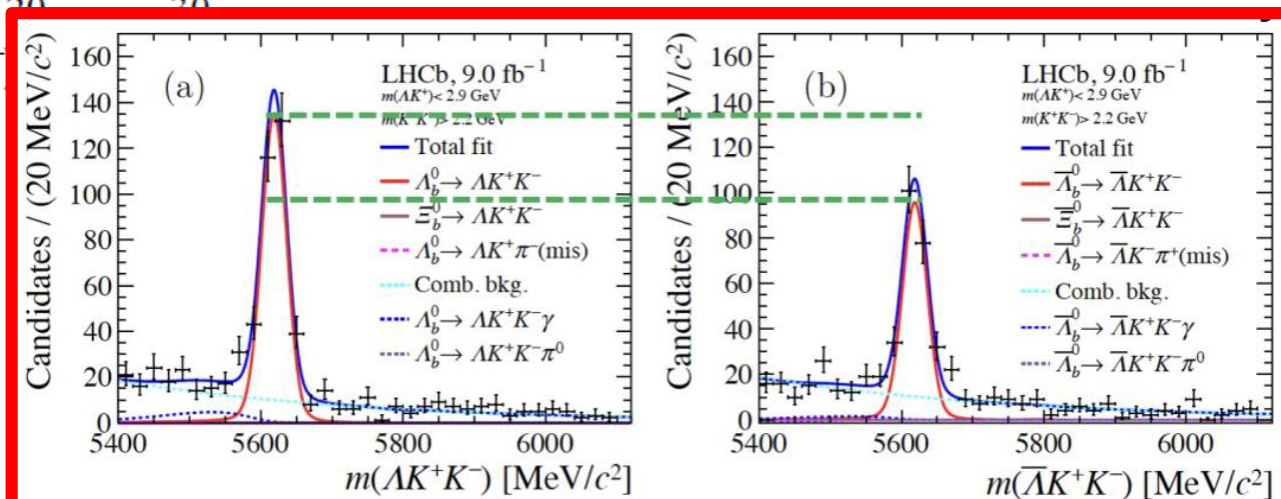
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$

$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \phi$ $m^2(\Lambda K^+)$ [GeV²/c⁴]

$m^2(\Lambda K^+)$ [GeV²/c⁴]



arXiv:2411.15441



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

First evidence of CP violation in
local resonant region, 3.2 σ

CP-нарушение в барионном секторе

- Гипероны (BESIII)

- $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ (3.2M событий)
- Точность 10^{-4} на SCTF!

$$\frac{\alpha_- - \alpha_+}{\alpha_- + \alpha_+} = -(2.5 \pm 4.8) \times 10^{-3}$$

- Очарованные барионы (LHCb)

- $A_{CP}(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^+K^-) - A_{CP}(\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^+\pi^-) = 0.003 \pm 0.011$ (Run-1)
- Run 2-3 точность порядка 10^{-3}

- Прелестные барионы (LHCb)

- $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ $\Delta A_{CP} = 0.083 \pm 0.023 \pm 0.016$ [arXiv:2411.15441](https://arxiv.org/abs/2411.15441)
- Статистическая значимость 3.1 сигма
- Первое указание на существование прямого CP-нарушения для распадов барионов
- Улучшение точности в несколько раз на данных Run-3

История исследования CP-нарушения



1964

1999

2001

2004

2012

2013

2018

2019

????

CP violation
(in mixing)
in neutral
Kaon decays

Direct CP
violation in
neutral **Kaon**
decays

CP violation
in mixing
and decay in
B⁰ decays

Direct CP
violation in
B⁰ decays

Direct CP
violation in
B⁺ decays



Direct CP
violation in
B_s⁰ decays



CP violation
in mixing
and decay in
B_s⁰ decays



Direct CP
violation in
D⁰ decays



Direct CP
violation
in **baryon**
decays

Direct CPV
in CKM
suppressed
in beauty to
charmionium
B⁺ decays

CP-нарушение в распадах $B^+ \rightarrow J/\psi h^+$ ($h=\pi, K$)

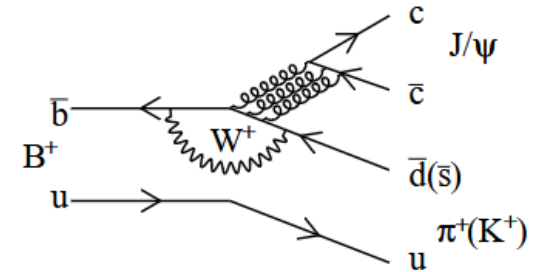
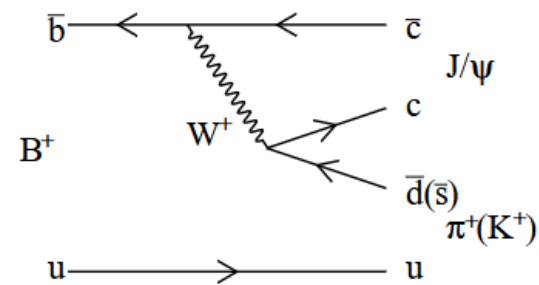
- $b \rightarrow c\bar{c}q$ кварковый переход ($q = s, d$)
- $\Delta A_{CP} \equiv A_{CP}(B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) - A_{CP}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)$
- Отношение вероятностей распада позволяет «контролировать» вклад различных диаграмм
- Критично для измерения $\sin(2\beta)$

$$\mathcal{R}_{\pi/K} \equiv \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)}$$

• LHCb Run-1:

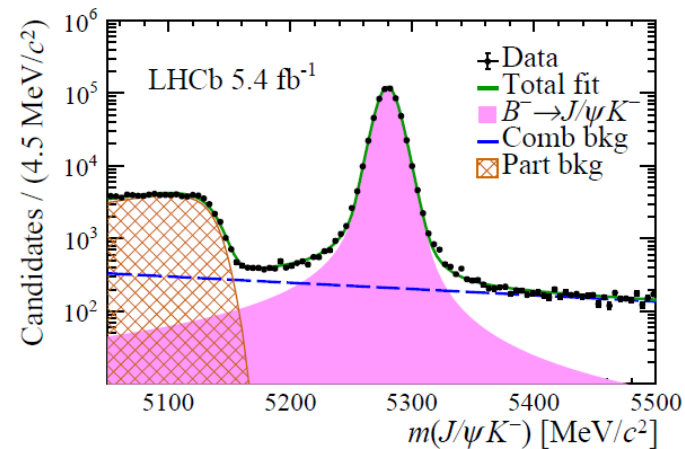
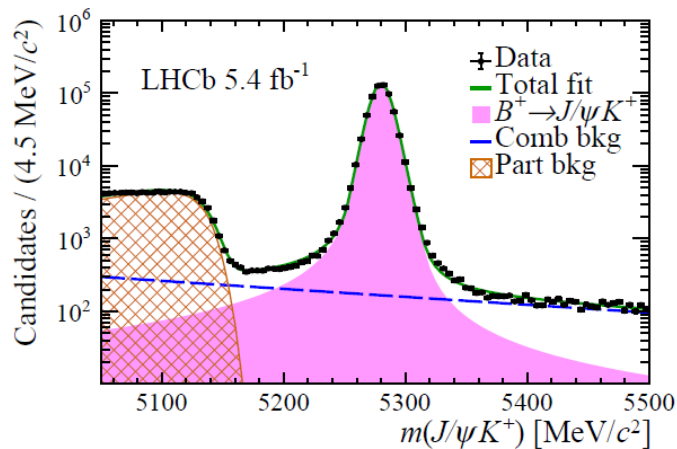
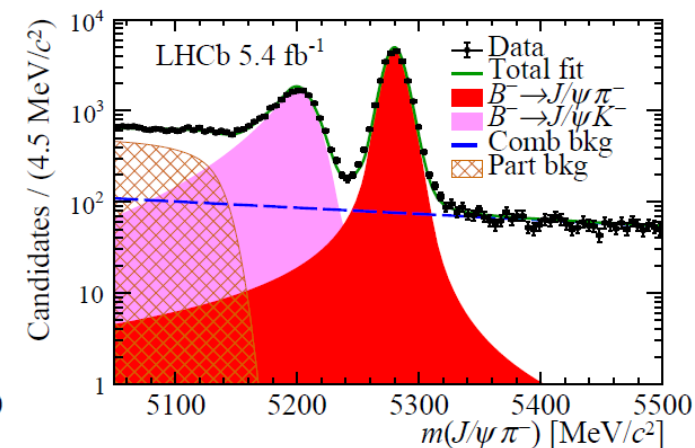
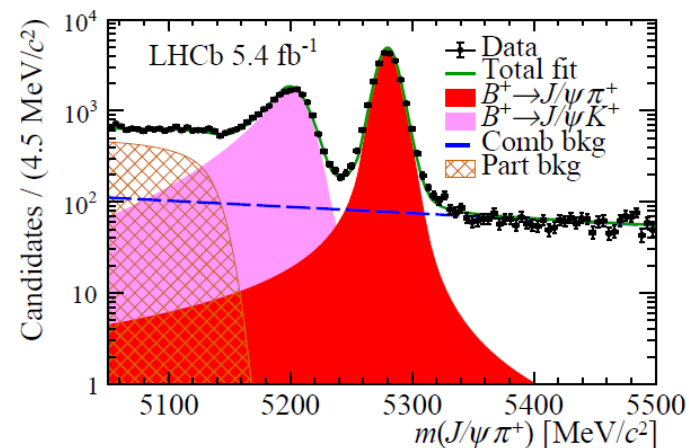
$$\Delta A_{CP} = (1.82 \pm 0.86_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{syst}}) \times 10^{-2}$$

$$\mathcal{R}_{\pi/K} = (3.83 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.03_{\text{syst}}) \times 10^{-2}$$



Отбор событий

- Данные Run-2 (2016-18 гг.)
- Интегральная светимость 6 фб⁻¹
- Мюонный канал регистрации J/ψ
- Мюонный триггер
 - Нет дополнительной асимметрии
- BDT для подавления комбинаторного фона
- Аромат по знаку электрического заряда лёгкого адрона



	2016	2017	2018
$N_{J/\psi\pi}$	$15\,500 \pm 140$	$15\,140 \pm 140$	$18\,130 \pm 150$
$N_{J/\psi K}$	$371\,700 \pm 600$	$367\,300 \pm 600$	$454\,100 \pm 700$
$a_{J/\psi\pi}^{\text{raw}} [10^{-2}]$	0.91 ± 0.85	0.50 ± 0.85	1.42 ± 0.78
$a_{J/\psi K}^{\text{raw}} [10^{-2}]$	-1.35 ± 0.17	-1.12 ± 0.17	-1.07 ± 0.15

Коррекция на эффективности

$$\Delta\mathcal{A}^{CP} = \left(a_{J/\psi\pi}^{\text{raw}} - a_{J/\psi K}^{\text{raw}}\right) - \left(a_{J/\psi\pi}^{\text{det}} - a_{J/\psi K}^{\text{det}}\right) - \left(a_{J/\psi\pi}^{\text{pid}} - a_{J/\psi K}^{\text{pid}}\right).$$

- Асимметрия рождения сокращается
- K^-/K^+ и π^-/π^+ асимметрии из распадов D мезонов

- $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ и $D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$

$$a_{J/\psi\pi}^{\text{det}} - a_{J/\psi K}^{\text{det}} = (0.84 \pm 0.05) \times 10^{-2},$$

- Идентификация дает малый вклад в асимметрию

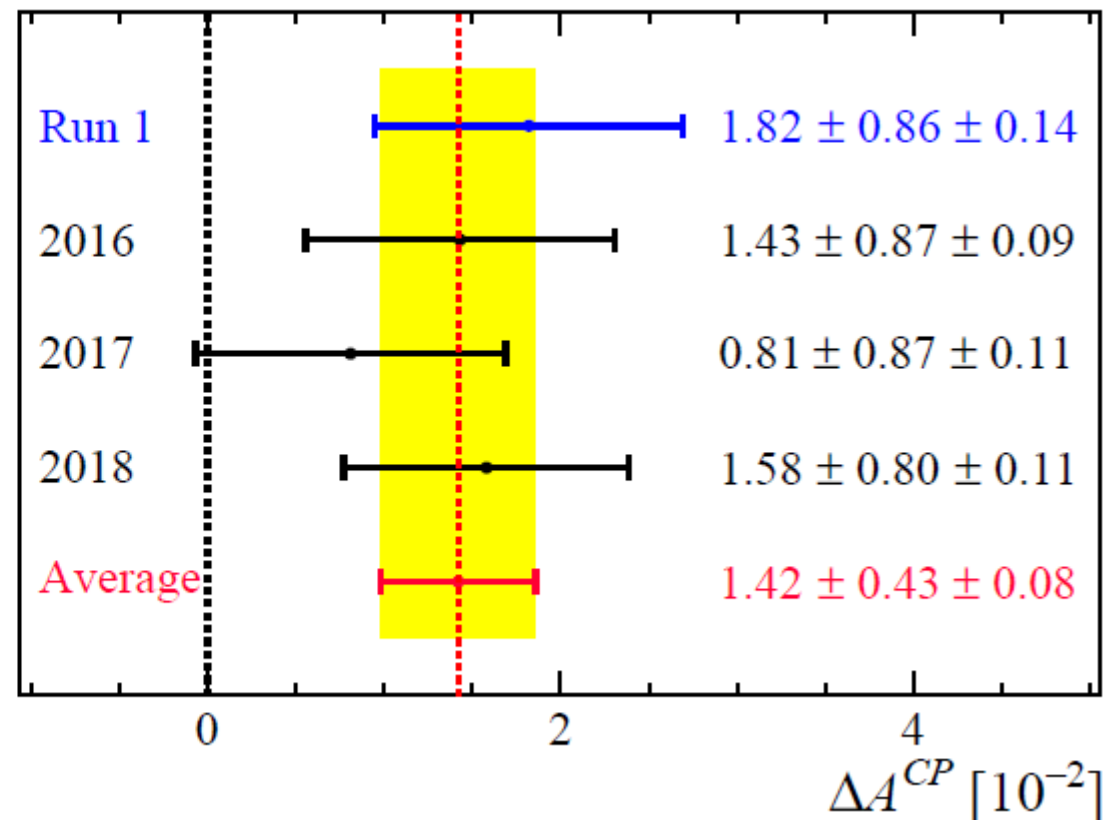
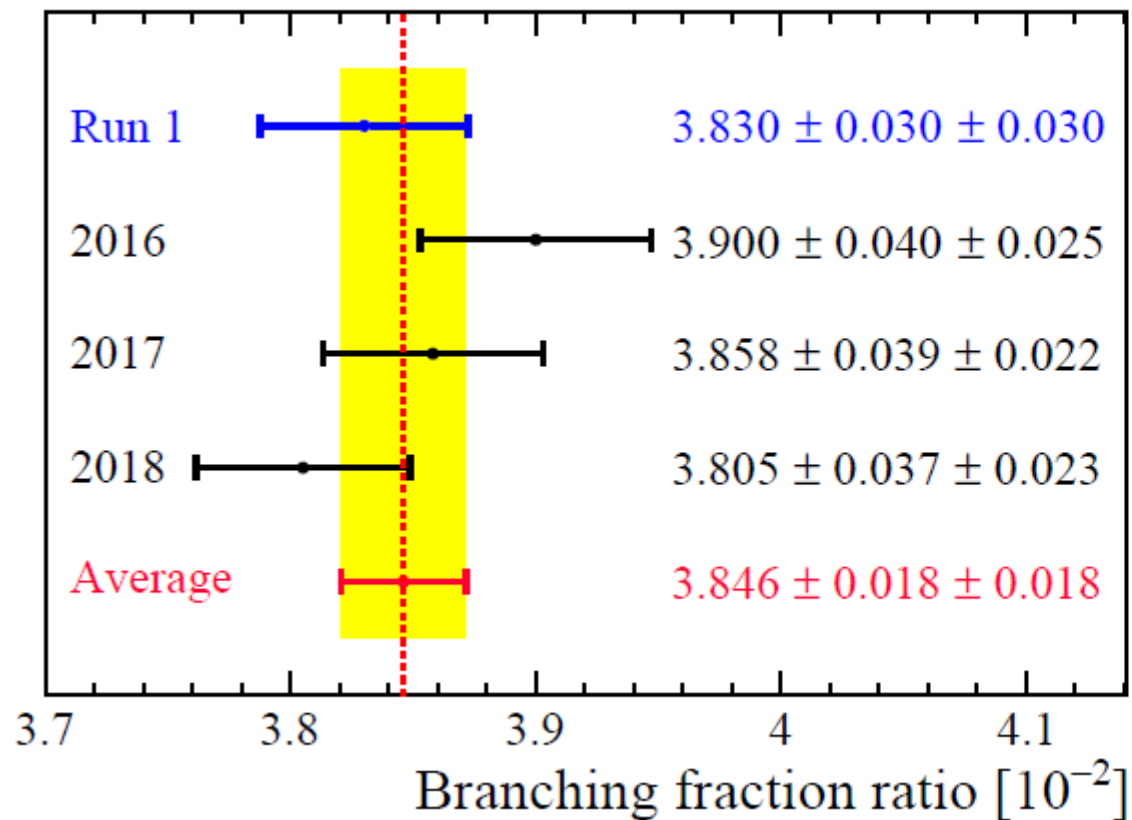
- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$

- Большое сечение рождения прелестных мезонов дает возможность зарегистрировать сигнал без PID-критериев

$$a_{J/\psi\pi}^{\text{pid}} = \begin{cases} (-0.01 \pm 0.02) \times 10^{-2} & (2016), \\ (+0.00 \pm 0.05) \times 10^{-2} & (2017), \\ (+0.02 \pm 0.06) \times 10^{-2} & (2018), \end{cases} \quad a_{J/\psi K}^{\text{pid}} = \begin{cases} (+0.00 \pm 0.06) \times 10^{-2} & (2016), \\ (+0.03 \pm 0.05) \times 10^{-2} & (2017), \\ (-0.05 \pm 0.06) \times 10^{-2} & (2018), \end{cases}$$

Объединение с данными Run-1

arXiv:2411.12178



Run-2 $\mathcal{R}_{\pi/K} = (3.852 \pm 0.022 \pm 0.018) \times 10^{-2}$,
 $\Delta\mathcal{A}^{CP} = (1.29 \pm 0.49 \pm 0.08) \times 10^{-2}$.

Статистическая значимость отклонения от нуля 3.2 стандартных отклонения

Указание на CP-нарушение

Результаты для $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$

$$B^+ \rightarrow \bar{D}^0 \pi^+ \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} \mathcal{A}_{\text{prod}}(B^+, \sqrt{s} = 7 \text{ TeV}) &= (-0.41 \pm 0.49 \pm 0.10) \times 10^{-2}, \\ \mathcal{A}_{\text{prod}}(B^+, \sqrt{s} = 8 \text{ TeV}) &= (-0.53 \pm 0.31 \pm 0.10) \times 10^{-2}, \end{aligned}$$

- Run-1, *Phys. Rev. D* **95**, 052005 (2017)
- $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$: $\mathcal{A}_{CP} = (0.09 \pm 0.27 \pm 0.07) \times 10^{-2}$.
- Объединяя новый результат с данными Run-1 измерена асимметрия для канала $B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$

$$\mathcal{A}^{CP}(B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) = (1.51 \pm 0.50 \pm 0.08) \times 10^{-2}$$

Заключение

- LHCb – лидирующий эксперимент в физике прелестных адронов
- Получены указания на существование эффектов прямого CP-нарушения в распадах:
 - $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ $\Delta A_{CP} = 0.083 \pm 0.023 \pm 0.016$
 - $B^+ \rightarrow J/\psi h^+$ ($h=\pi, K$) $\Delta A_{CP} = (1.42 \pm 0.43 \pm 0.08) \times 10^{-2}$. [arXiv:2411.12178](https://arxiv.org/abs/2411.12178)
 - Значимость чуть больше 3 стандартных отклонения
- Данные Run-3 должны уточнить величину этих эффектов

Запасные слайды

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

Асимметрия распадов и CP-асимметрия

Интересующая нас величина

Асимметрия
детектирования
частицы-таггера

Асимметрия
рождения D^0

$$D^{*\pm} \rightarrow D^0 \pi^+$$

$$A_{\text{raw}}(f) = A_{CP}(f) + \cancel{A_D(f)} + A_D(\pi_s^+) + A_P(D^{*+})$$

ИЛИ

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

$$A_{\text{raw}}(f) = A_{CP}(f) + \cancel{A_D(f)} + A_D(\mu^-) + A_{P,\text{eff}}(D^0)$$

**Используя два CP-четных
канала:**

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

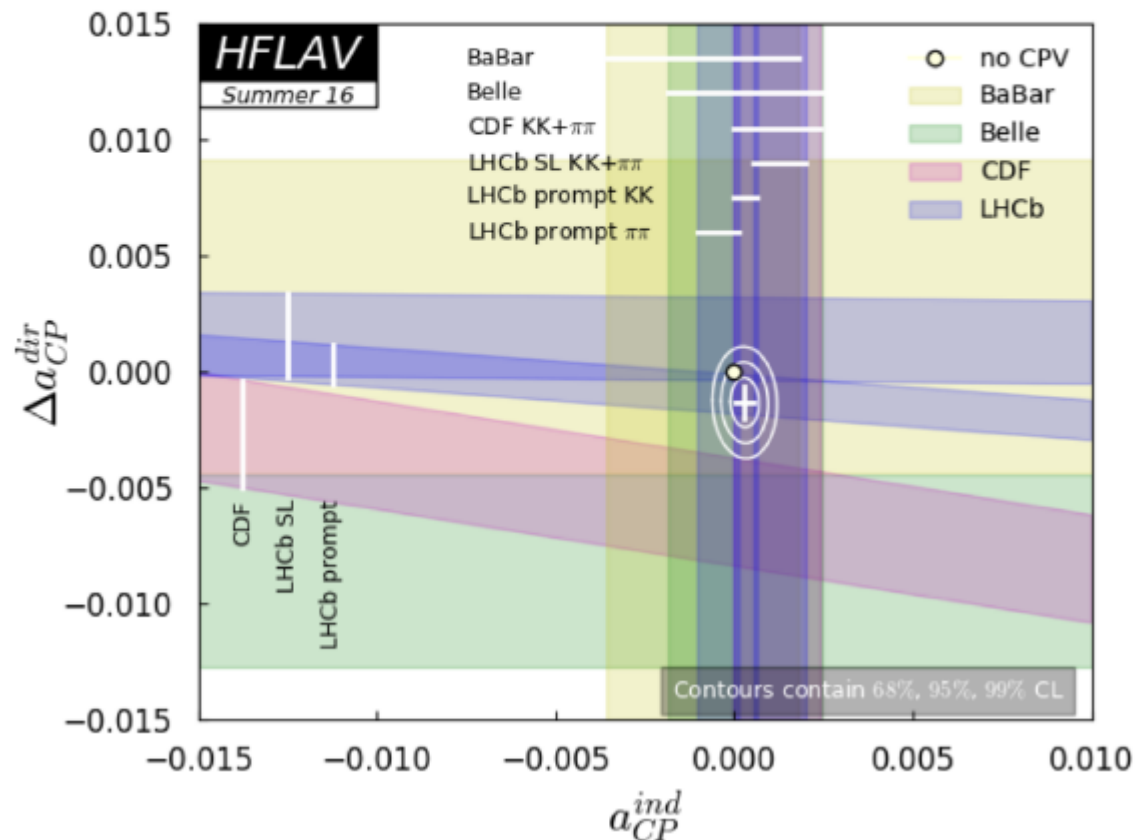
**Если эта величина отлична от нуля \rightarrow Нарушение CP
(если равна нулю то: либо CP сохраняя $A_{CP}(KK) = A_{CP}(\pi\pi)$)**

Экспериментальный статус на март 2019

$$\Delta A_{CP} = [a_{CP}^{dir}(K^- K^+) - a_{CP}^{dir}(\pi^- \pi^+)] + \frac{\Delta \langle t \rangle}{\tau} a_{CP}^{ind}$$

Relative difference of average proper time between $D^0 \rightarrow K^- K^+$ and $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$

In BaBar and Belle this quantity is zero



ΔA_{CP}^{dir}

HFLAV combination

$$a_{CP}^{ind} = (0.030 \pm 0.026)\%$$

$$\Delta A_{CP}^{dir} = (-0.134 \pm 0.070)\%$$

Consistency with NO CPV hypothesis: 9.3%