

Наблюдение CP нарушения в распадах очарованных адронов

Алексей Дзюба \ ЛМФКС ОФВЭ ПИЯФ НИЦ КИ

<https://arxiv.org/abs/1903.08726>

План доклада

- Что мы знаем о CP нарушении и почему необходим поиск источников?
- Обнаружение экспериментом прямого CP нарушения в распадах нейтральных очарованных мезонов
- Что говорит теория?

Барионная асимметрия Вселенной



- Реликтовое изучение
- Космические лучи
- Первичный нуклеосинтез

$$\eta_B \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 6,1 \cdot 10^{-10}$$

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim \eta_B \sim 10^{-10};$$

Условия Сахарова:

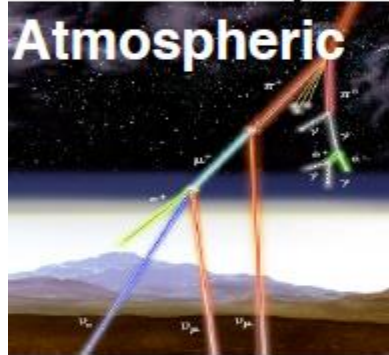
1. Несохранение В числа,
2. **Нарушение C- и CP-симм,**
3. Нарушение термодинам. равновесия

CP нарушение и CM \ Опция №2 (Нейтрино)

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$
 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

Если комплексная фаза отлична от нуля или пи, то будет происходить CP-нарушение в лептонном секторе



$$U_{PMNS} \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.55 & 0.15 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

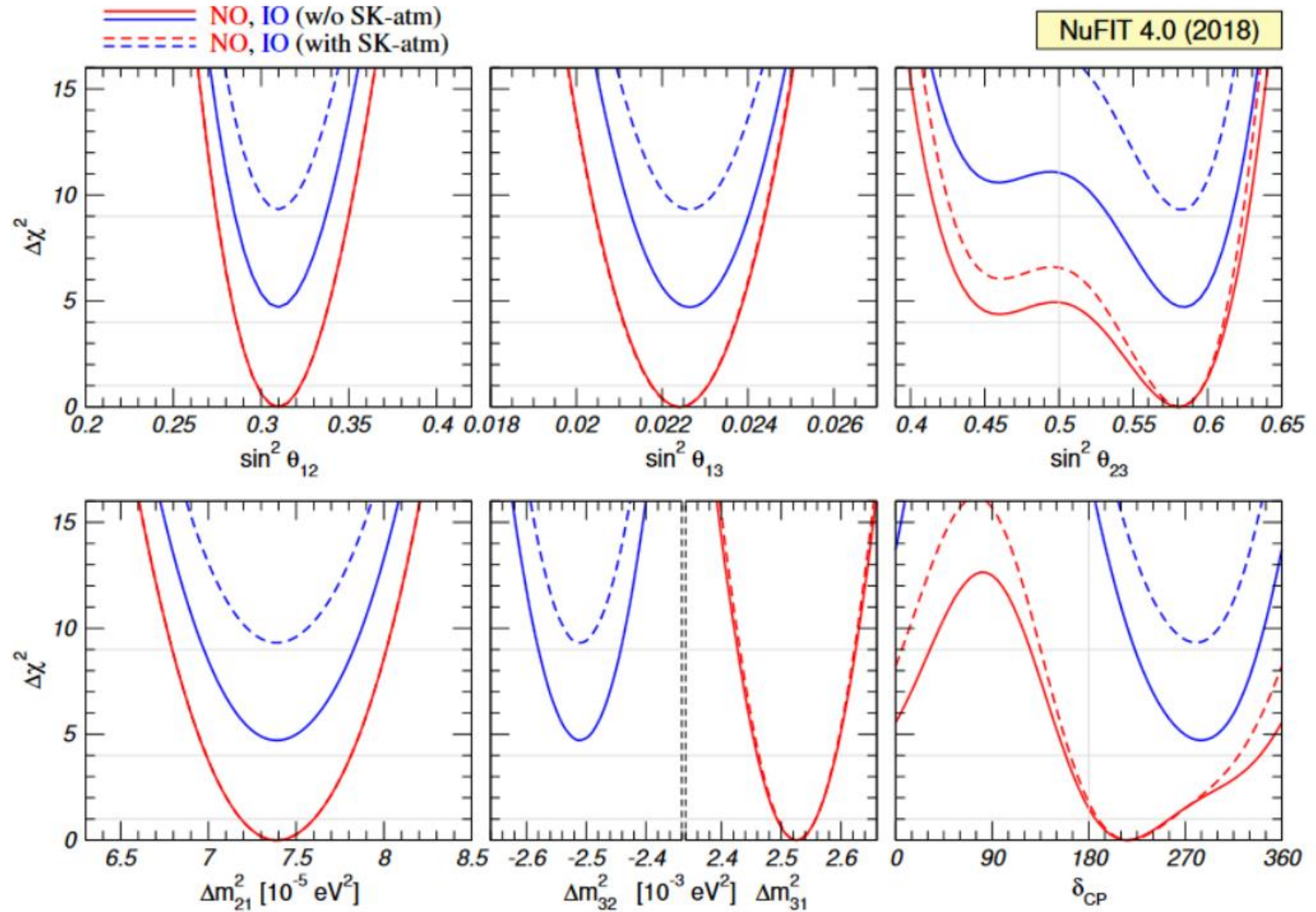
δ_{CP} пока неизвестна

Регистрируются всегда собственные состояния по аромату = собственные состояния по слабому взаимодействию, однако распространяются в пространстве собственные состояния по массе!

Опция №2:

Нормальная

Обратная



CP нарушение и SM \ Опция №3 (КХД)

ЭДМ нуклонов и легких ядер

$$\mathcal{L}_{CP} = \frac{\alpha_s \bar{\theta}}{8\pi} \epsilon^{\alpha\beta\mu\nu} F_{\alpha\beta}^a F_{\mu\nu}^a$$

Из ЭДМ нейтрона

$$\bar{\theta} \ll 1$$

Если Новая физика:

1) Изоскалярна, то $d_p = d_n$, [θ — член]

2) SUSY — изоскалярная / изовекторная, Left-Right Symmetric — изовекторная, 2Higgs — изотензорная.

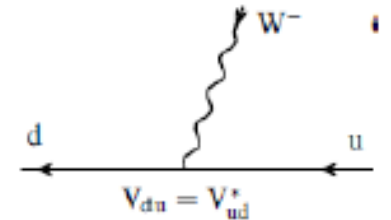
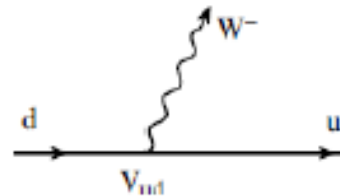
Необходимо измерять ЭДМ $p, n, d, t, {}^3\text{He}$

Опция №1 (слабое взаимодействие кварков)

- Собственные состояния кварков по слабому взаимодействию и по аромату различны
- Матрица смешивания (Кабиббо-Кобаяши-Маскава)
- Два поколения – нет CPV, три поколения – одна CPV-фаза
- Эл-ты КKM-матрицы входят в амплитуды переходов
- **Параметризация Вольфенштейна**

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

$$I(d \rightarrow u) \propto i \frac{g_2}{2\sqrt{2}} \bar{u} V_{ud} \gamma_\mu (1 + \gamma_5) d \quad A(u \rightarrow d) \propto i \frac{g_2}{2\sqrt{2}} \bar{d} V_{ud}^* \gamma_\mu (1 + \gamma_5) u$$



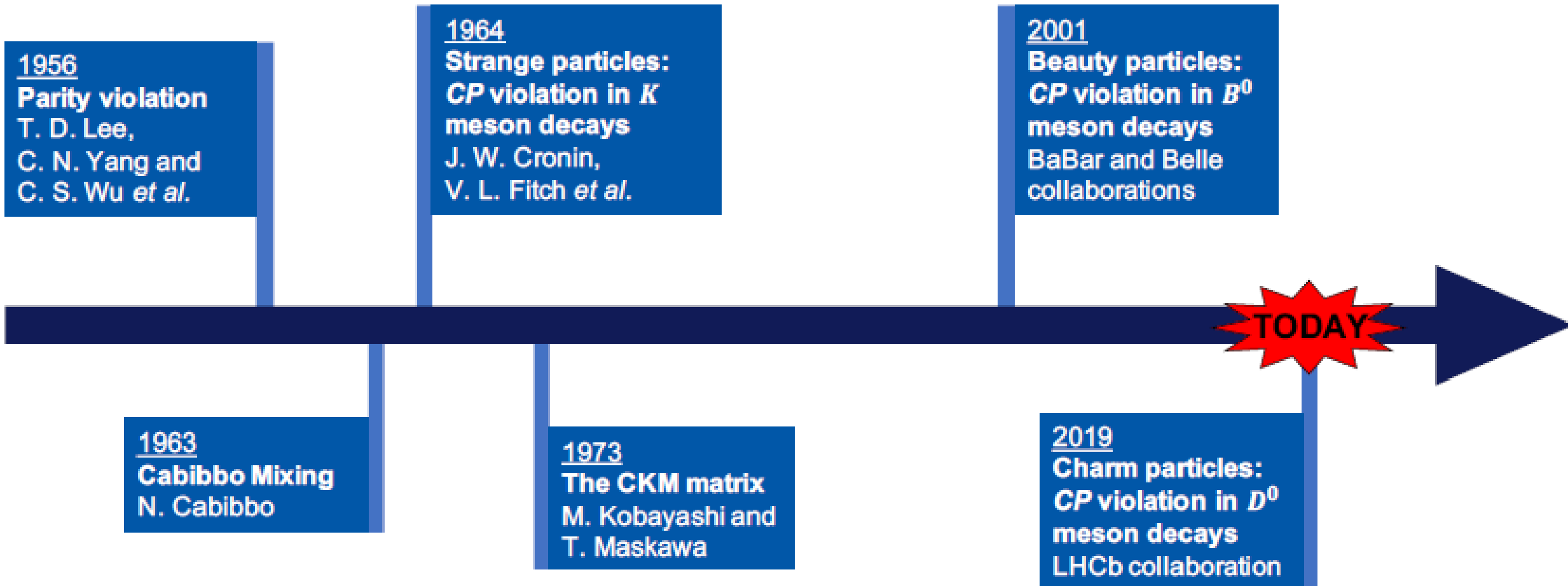
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4).$$

$$s_{ij} = \sin \vartheta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \vartheta_{ij} \quad c_{13} = c_{23} = 1$$

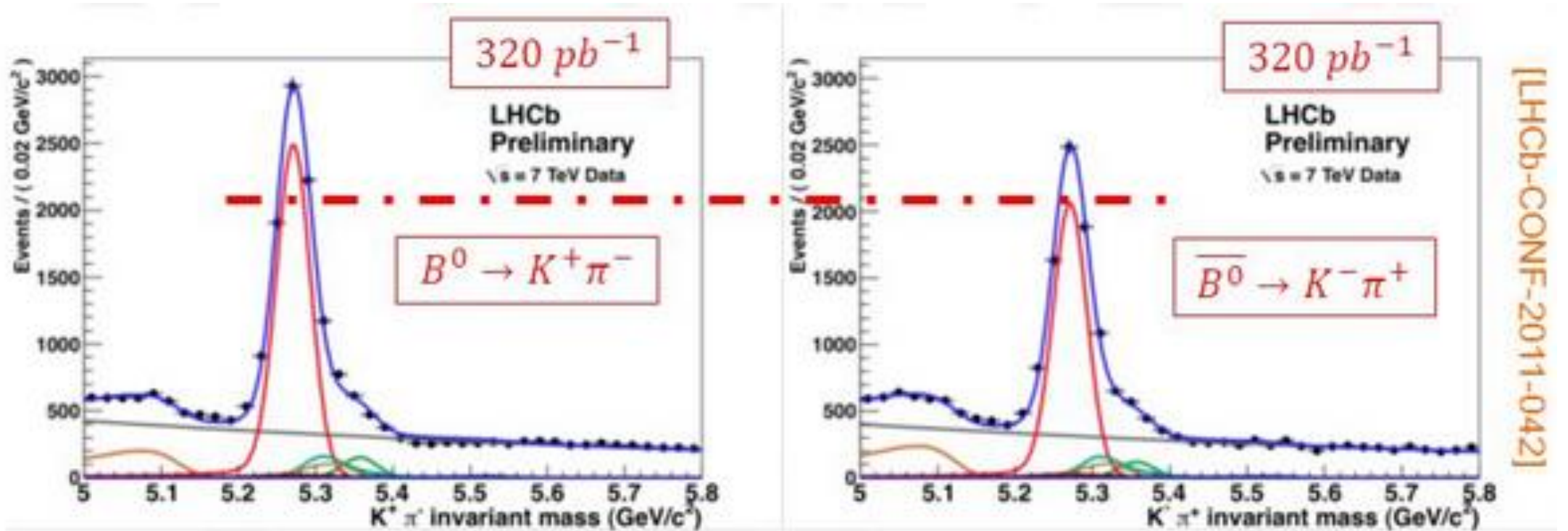
$$s_{12} = \lambda, \quad s_{23} = A\lambda^2, \quad s_{13} \exp(-i\delta) = A\lambda^3(\rho - i\eta)$$

$$s_{12} = \lambda = 0,222 \pm 0,002, \quad s_{23} = O(10^{-2}), \quad s_{13} = O(10^{-3})$$

История вопроса



Проявления CP -нарушения (прямое \ пример!)



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

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

Проявления CP -нарушения (при смешивании)

Состояния $|K_S^0\rangle$ и $|K_L^0\rangle$:

$$\Delta m_K = M_{K_L} - M_{K_S} = (3,489 \pm 0,008) \times 10^{-15} \text{ ГэВ}, \quad \Delta \Gamma_K = \Gamma_{K_L} - \Gamma_{K_S} = (-7,361 \pm 0,010) \times 10^{-15} \text{ ГэВ};$$

$$2\Delta m_K \simeq -\Delta \Gamma_K \text{ (эксперимент)}, \quad 2|M_{12}| = |\Gamma_{12}| \text{ (из (64))}; \quad \text{Im } \Gamma_{12} \ll \text{Re } \Gamma_{12}, \quad \text{Im } M_{12} \ll \text{Re } M_{12} \text{ (из малости } \varepsilon_K \text{)};$$

$$\left| \frac{q}{p} \right|_K \simeq 1 + \frac{2|\Gamma_{12}|^2}{4|M_{12}|^2 + |\Gamma_{12}|^2} \text{Im } \frac{M_{12}}{\Gamma_{12}} \simeq 1 + \text{Im } \frac{M_{12}}{\Gamma_{12}} \simeq 1 - 2 \text{Re } \varepsilon_K;$$

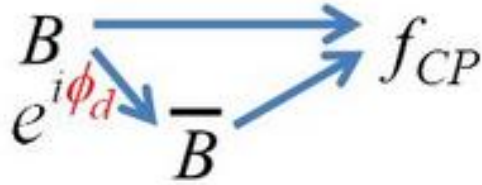
$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\varepsilon_K|^2)}} [(1 + \varepsilon_K)|K^0\rangle + (1 - \varepsilon_K)|\bar{K}^0\rangle] = \frac{1}{\sqrt{1 + |\varepsilon_K|^2}} [|K_1^0\rangle + \varepsilon_K |K_2^0\rangle],$$

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

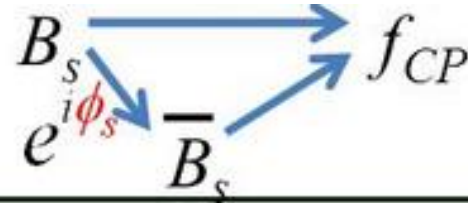
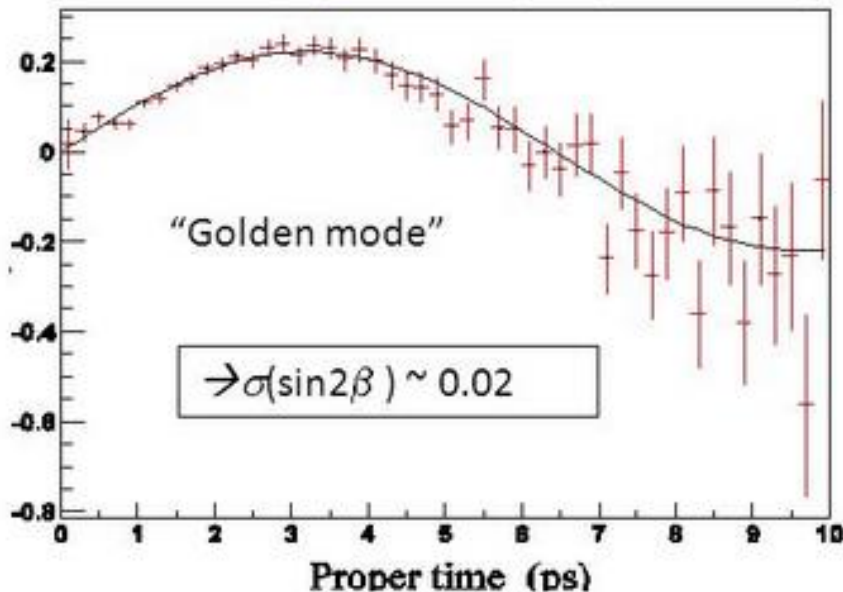
$$|K_0\rangle = \frac{1}{2p} [|K_S^0\rangle + |K_L^0\rangle], \quad |\bar{K}_0\rangle = \frac{1}{2q} [|K_S^0\rangle - |K_L^0\rangle]$$

Фитч и Кронин – обнаружили именно этот тип CP -нарушения

Проявления CP -нарушения (при интерференции прямых распадов и смешивания)



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



$$B_s: A_{CP}(t) = \frac{\eta_f \sin \phi_s \sin(\Delta m_s t)}{\cosh \frac{\Delta \Gamma_s t}{2} - \eta_f \cos \phi_s \sinh \frac{\Delta \Gamma_s t}{s}}$$

Позволяет извлекать CP -нарушающую фазу матрицы кваркового смешивания

Channel	Yield (2 fb^{-1})	B/S
$B_d \rightarrow J/\psi K_s$	216 k	0.8

Измерение параметров треугольника унитарности

Нейтральные токи с изменением кварковых ароматов и редкие распады K -мезонов \ Л.Г. Ландсберг

<https://ufn.ru/ru/articles/2003/10/a/>

Распады очарованных частиц

Древесный уровень

Диаграммы типа ПИНГВИН

$$V_{ud} = c_{12}c_{13} = 1 - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^4}{8} + O(\lambda^6)$$

$$V_{us} = s_{12}c_{13} = \lambda + O(\lambda^7)$$

$$V_{ub} = s_{13} \exp(-i\delta) = A\lambda^3(\rho - i\eta)$$

$$\begin{aligned} V_{cd} &= -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13} \exp(i\delta) = \\ &= -\lambda c_{23} - c_{12}A^2\lambda^5(\rho + i\eta) = \\ &= -\lambda + \frac{A^2\lambda^5}{2} [1 - 2(\rho + i\eta)] + O(\lambda^7) = \\ &= -\lambda + A^2\lambda^5 \left(\frac{1}{2} - \rho \right) - i\eta A^2\lambda^5 + O(\lambda^7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{cs} &= c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13} \exp(i\delta) = \\ &= c_{12}c_{23} - A^2\lambda^6(\rho + i\eta) = \\ &= 1 - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^4}{8}(1 + 4A^2) + \frac{A^2\lambda^6}{4} - \lambda^6 A^2 \rho - i\eta \lambda^6 A^2 \simeq \\ &\simeq 1 - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^4}{8}(1 + 4A^2) + O(\lambda^6) \end{aligned}$$

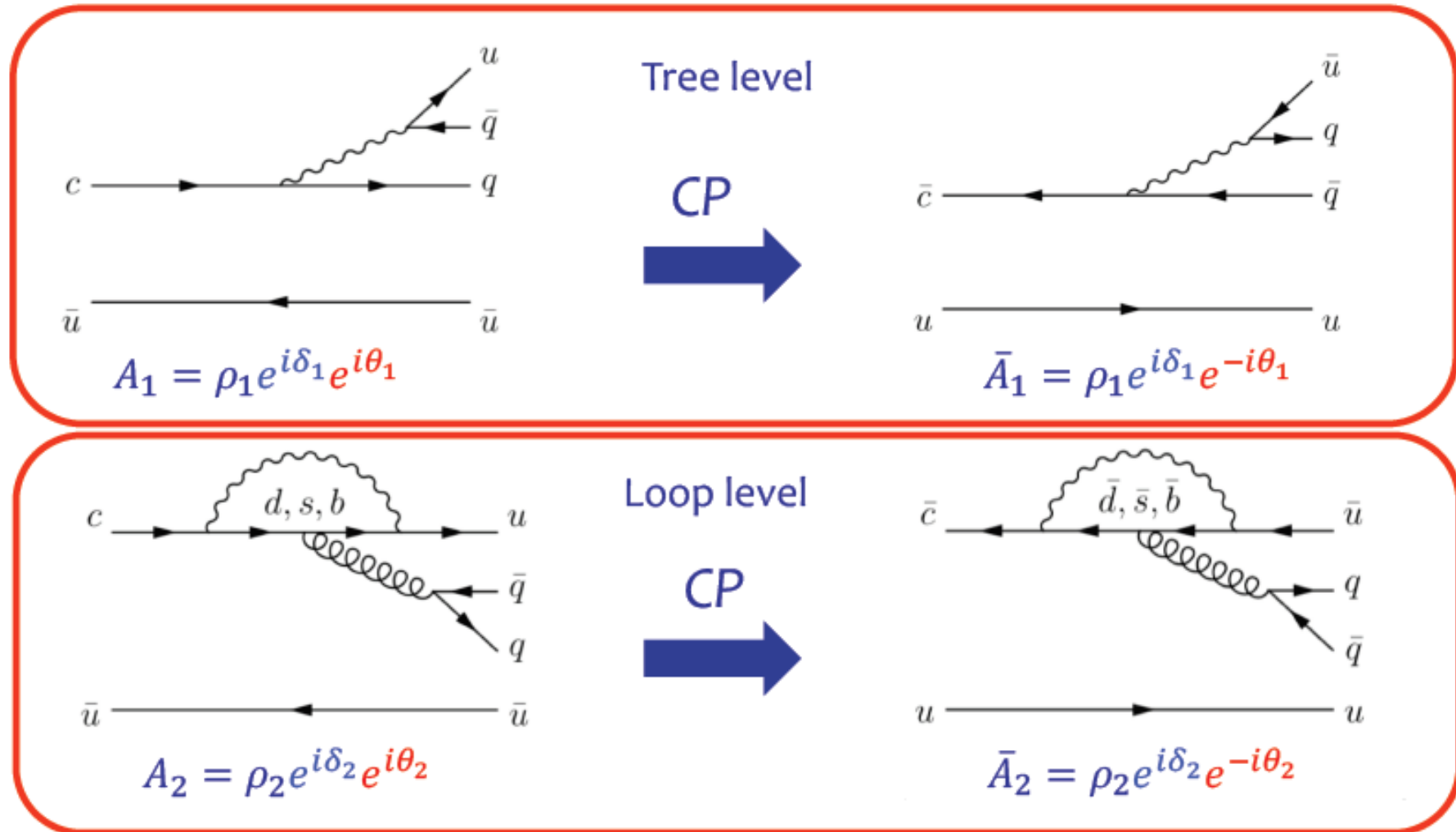
$$\begin{aligned} V_{cb} &= s_{23}c_{13} = A\lambda^2 c_{13} = \\ &= A\lambda^2 [1 + O(\lambda^6)] = A\lambda^2 + O(\lambda^8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{td} &= s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13} \exp(i\delta) = \\ &= A\lambda^3 - c_{12}c_{23}A\lambda^3(\rho + i\eta) = \\ &= A\lambda^3 \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda^2}{2} \right) (\rho + i\eta) \right] + O(\lambda^7) = \\ &= A\lambda^3(1 - \bar{\rho}) - i\bar{\eta}A\lambda^3 + O(\lambda^7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{ts} &= -s_{23}c_{12} - s_{12}c_{23}s_{13} \exp(i\delta) = \\ &= -A\lambda^2 c_{12} - c_{23}A\lambda^4(\rho + i\eta) = \\ &= \left[-A\lambda^2 + \frac{A\lambda^4}{2}(1 - 2\rho) \right] - i\eta A\lambda^4 + O(\lambda^6) \end{aligned}$$

$$V_{tb} = c_{23}c_{13} = 1 - \frac{A^2\lambda^4}{2} + O(\lambda^6)$$

Прямое CP нарушение в распадах c -адронов



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

CP в секторе очарованных частиц

- CP нарушение в секторе очарованных адронов не было обнаружено
- CP нарушение для кварков верхнего типа
- Комплиментарные исследования
- Ожидание SM: 0.0001 – 0.001

Предсказания теории

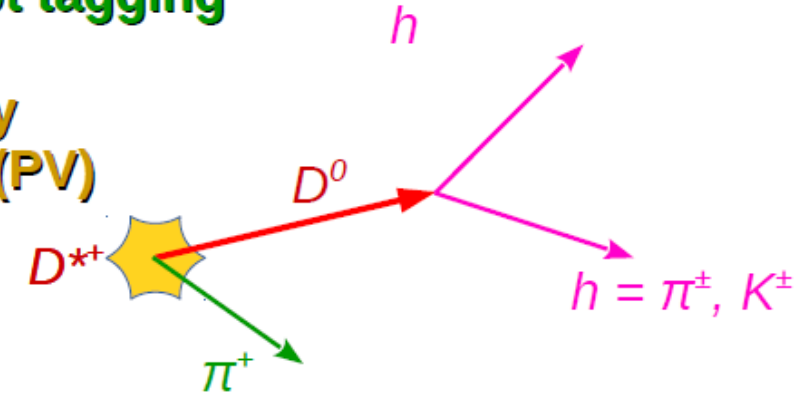
Golden et al., PLB 222 (1989) 501
Buccella et al., PRD 51 (1995) 3478
Bianco et al., Riv. Nuovo Cim . 26N7 (2003) 1
Grossman et al, PRD 75 (2007) 036008
Artuso et al., AR Nucl. Part. Sci. 58 (2008) 249
Khodjamirian et al., PLB 774 (2017) 235
Pirtskhalava et al. , PLB 712 (2012) 81
Cheng et al., PRD 85 (2012) 034036
Feldmann et al., JHEP 06 (2012) 007
Li et al., PRD 86 (2012) 036012
Franco et al., JHEP 05 (2012) 140
Brod et al., JHEP 10 (2012) 161
Atwood et al., PTEP 2013 (2013) 093B05
Hiller et al., PRD 87 (2013) 014024
Grossman et al., JHEP 04 (2013) 067
Müller et al., PRL 115 (2015) 251802
Buccella et al., arXiv:1902.05564 (2019)

Рождение тяжелых кварков вперед

- Глюонный-синтез – основной механизм рождения тяжелых (c & b) кварк-антикварковых пар
- Очарованные адроны вылетают преимущественно в переднем направлении (аксептанс эксперимента LHCb $2 < \eta < 5$)
- СТО обеспечивает сигнатуру выделения распадов c - & b -адронов
- Помечивание (таггирование) первичных- c и c -из- b

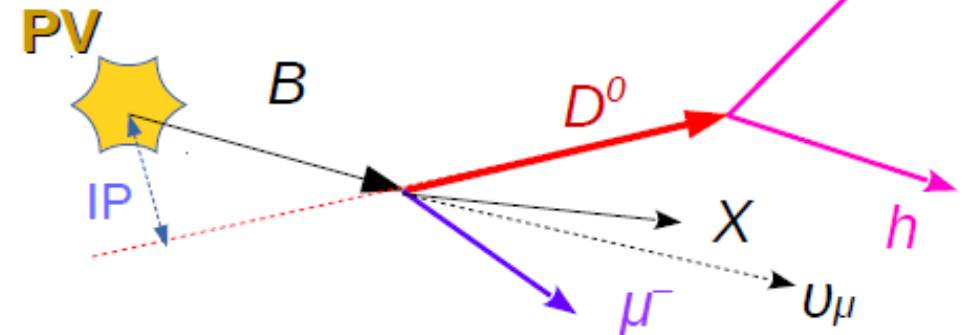
Prompt tagging

Primary vertex (PV)



Higher tagging rate

Secondary (semileptonic)



More efficient triggering

ЛHCb: Найти \ Идентифицировать \ Измерить

Выделение первичных и вторичных вершины / распределение по времени распада / первичные и вторичные очарованные адроны

Точка взаимодействия протонов

Идентификация частиц – отбор каонов

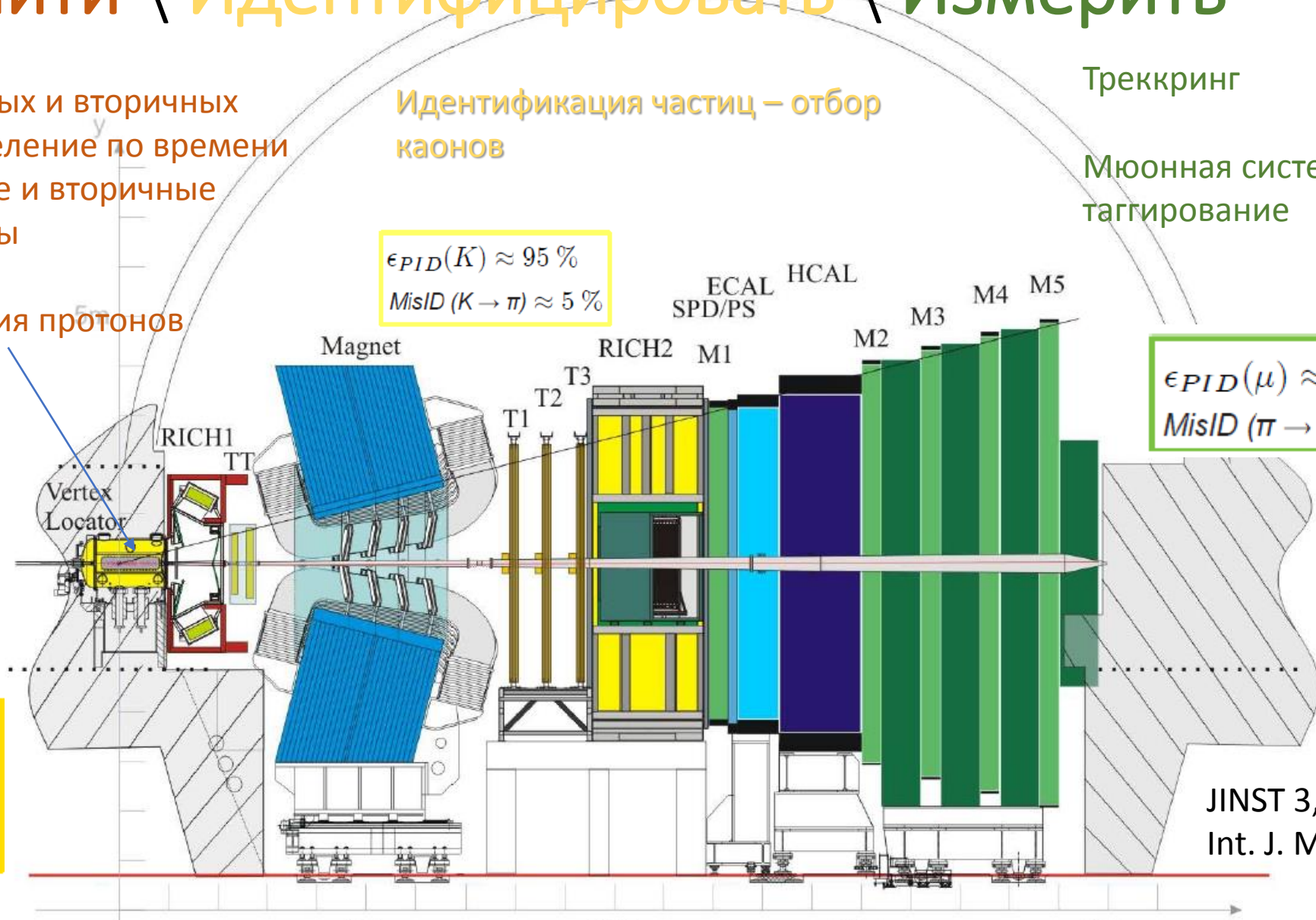
Треккинг

Мюонная система – таггирование

$\epsilon_{PID}(K) \approx 95\%$
 $MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5\%$

$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$
 $MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3\%$

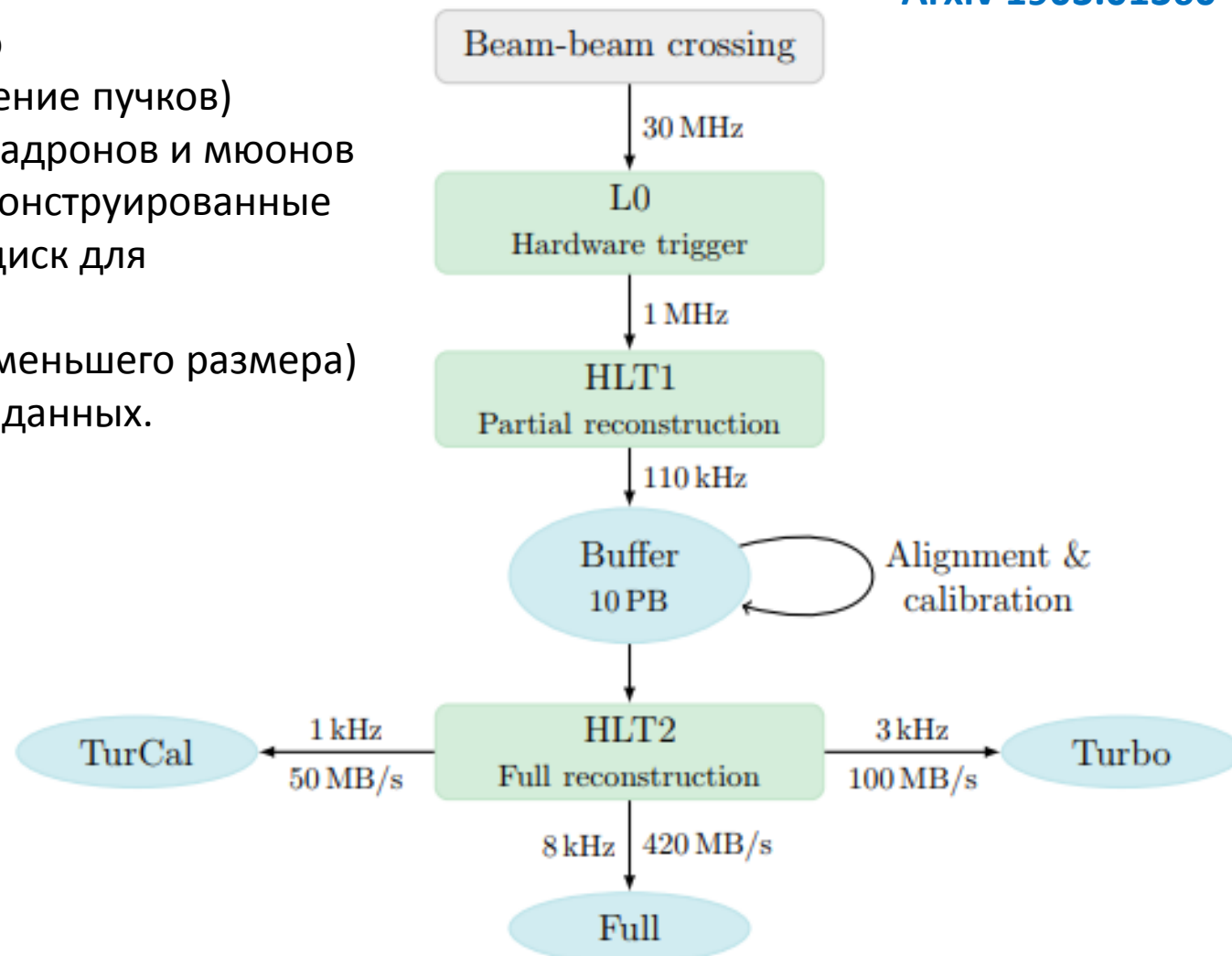
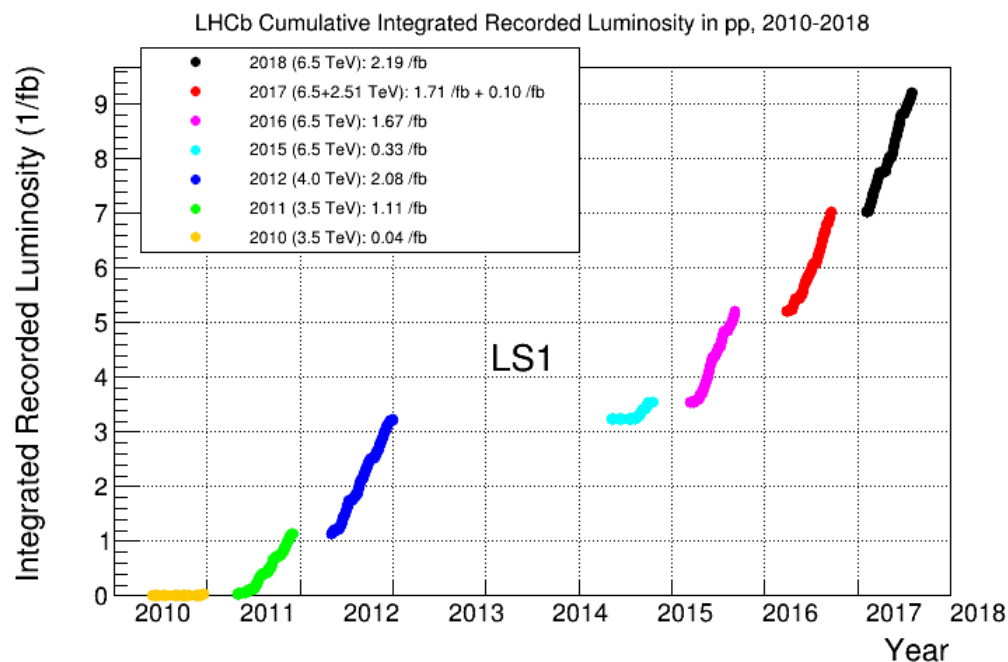
$\sigma(IP) \approx 20\mu m$
 $\delta p/p = 0.4 - 0.6\%$
 $\epsilon_{track} > 96\%$



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

Светимость и онлайн-отбор

- LHCb работает в режиме с постоянной светимостью (1.7 видимых взаимодействий на пересечение пучков)
- Аппаратный и программный триггер для отбора адронов и мюонов
- **Turbo stream for Run-2** – события-кандидаты реконструированные на уровне триггера записываются напрямую на диск для последующего анализа + (онлайн калибровка):
 - Больше событий на диске (так как событие меньшего размера)
 - Использовалось в представленном анализе данных.



Асимметрия распадов и CP-асимметрия

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

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

Аромат начального состояния

измеряется при помощи таггинга:

$$D^{*\pm} \rightarrow D^0 \pi^+ \quad \text{или} \quad B \rightarrow D^0 (\rightarrow f) \mu^- X$$

Экспериментально измеряется асимметрия числа восстановленных распадов (с вычтенным фоновым вкладом):

$$A_{\text{raw}}(f) = \frac{N(D^0 \rightarrow f) - N(\bar{D}^0 \rightarrow f)}{N(D^0 \rightarrow f) + N(\bar{D}^0 \rightarrow f)}$$

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

Асимметрия распадов и CP-асимметрия

Интересующая нас величина

Асимметрия детектирования
частицы-таггера

Асимметрия
рождения D^0

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

$$A_{\text{raw}}(f) = A_{CP}(f) + A_{D^0}(f) + A_D(\pi_s^+) + A_P(D^{*+})$$

или

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

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

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

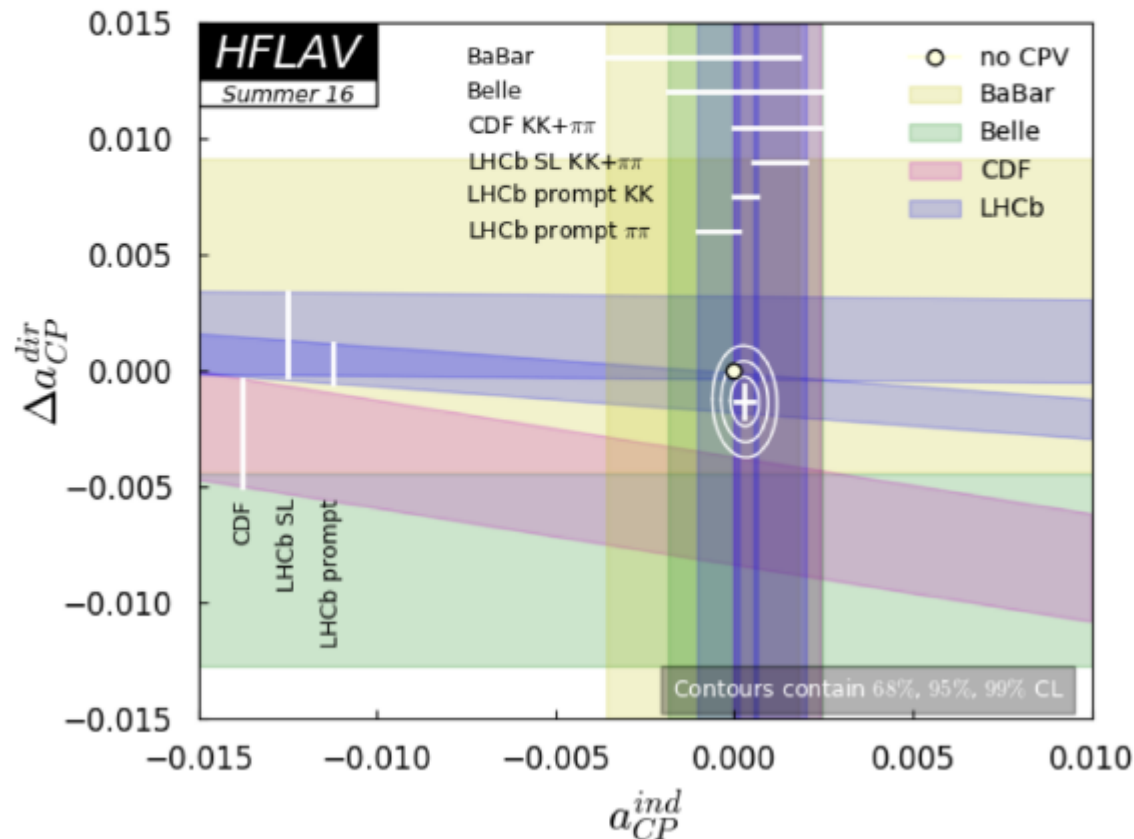
(если равна нулю то: либо CP сохраняется, либо $A_{CP}(KK) = A_{CP}(\pi\pi)$)

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%

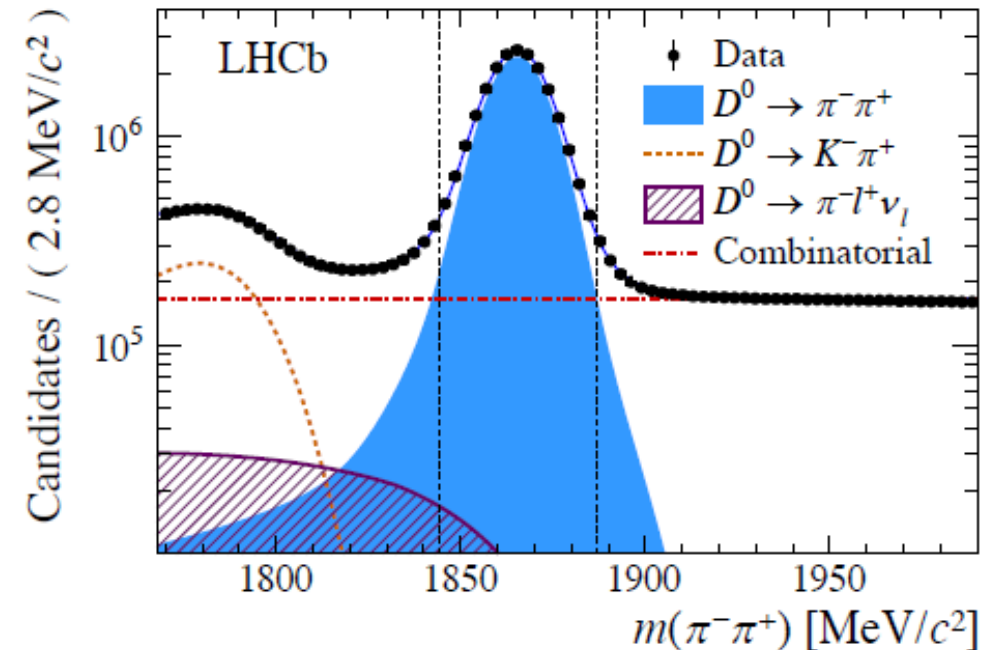
Отбор событий-кандидатов

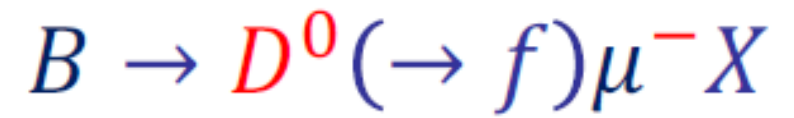


- «Турбо»-режим Comput. Phys. Commun. 208 (2016) 35

- «Качество»-фитирования трека + PID
- Поперечный импульс треков и D^0
- «Качество»-фитирования вершины распада D^0
- Прицельный параметр D^0

$$m(D^0) \in [1844, 1887] \text{ MeV}/c^2$$





Отбор событий-кандидатов

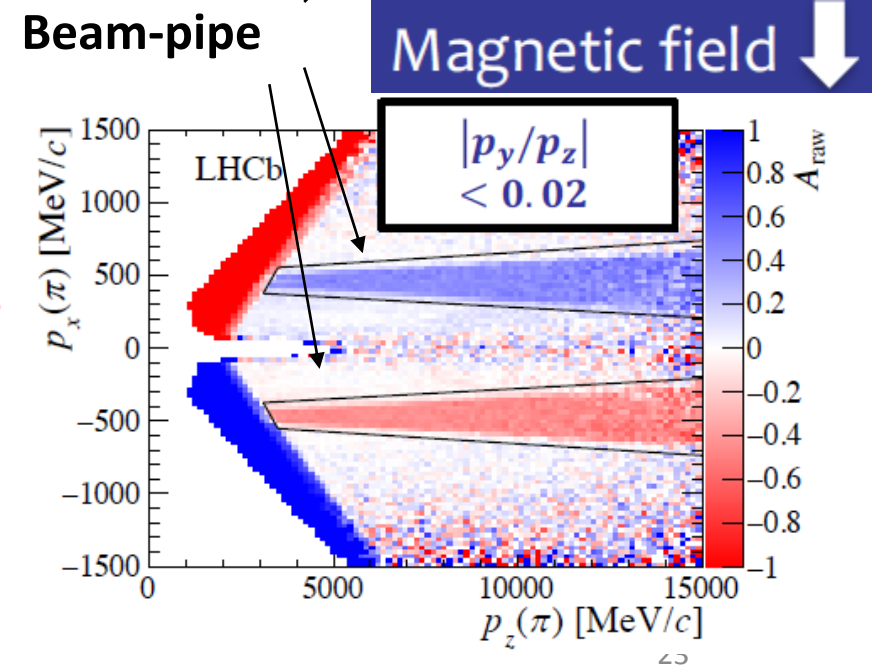
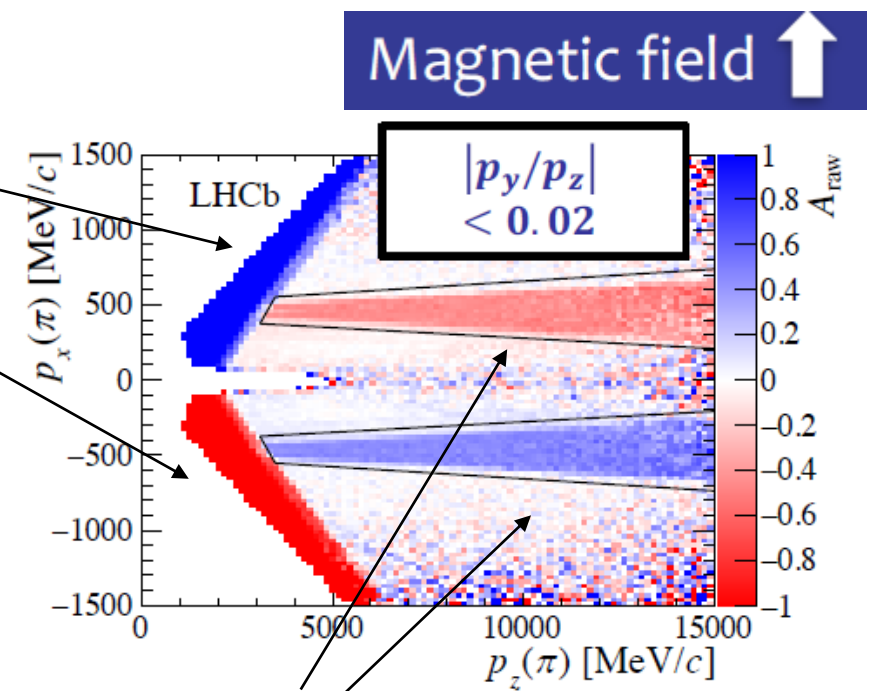
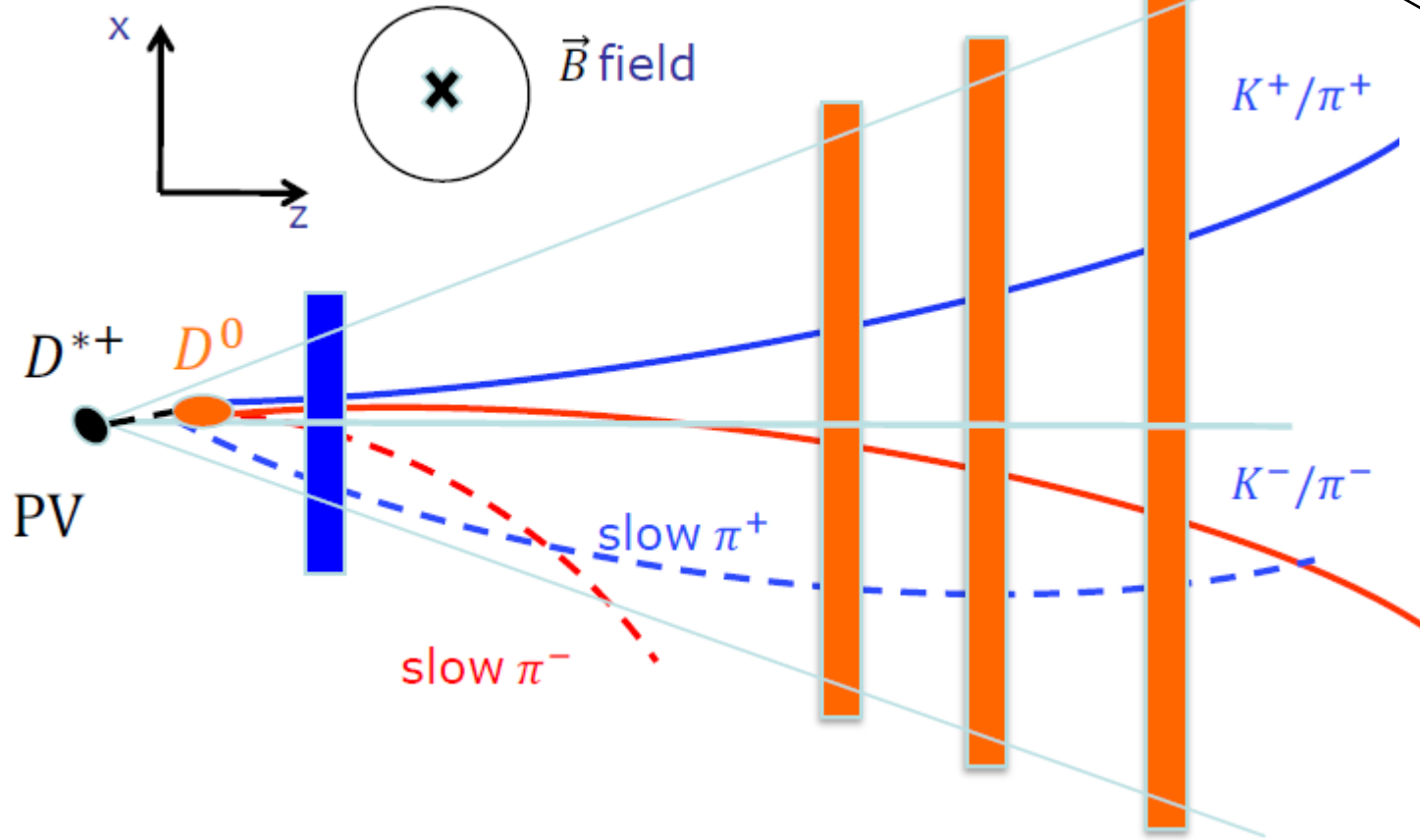
- Дополнительная переменная (скорректированная масса)

$$m_{corr} = \sqrt{m(D^0 \mu) + p'_T(D^0 \mu) + p'_T(D^0 \mu)}$$

- Для лучшего отбора событий-кандидатов с мюонным таггированием использовался мультивариантный классификатор (необходимо для подавления фона)

Учет магнитного поля

ЛHCb (вид сверху)



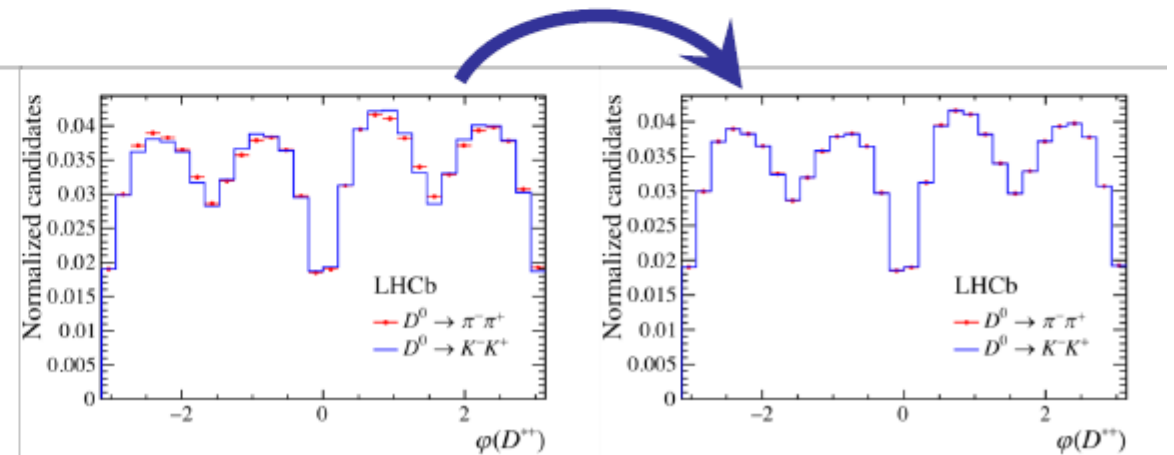
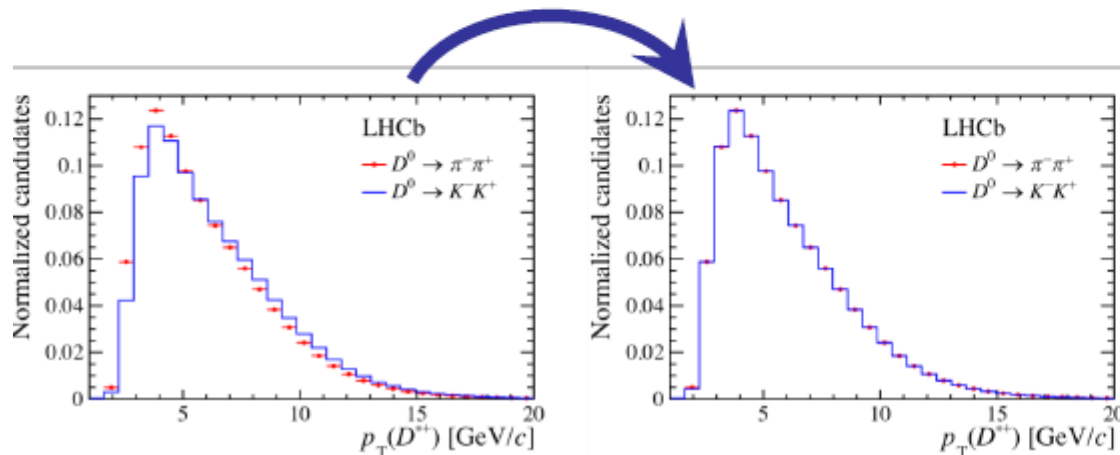
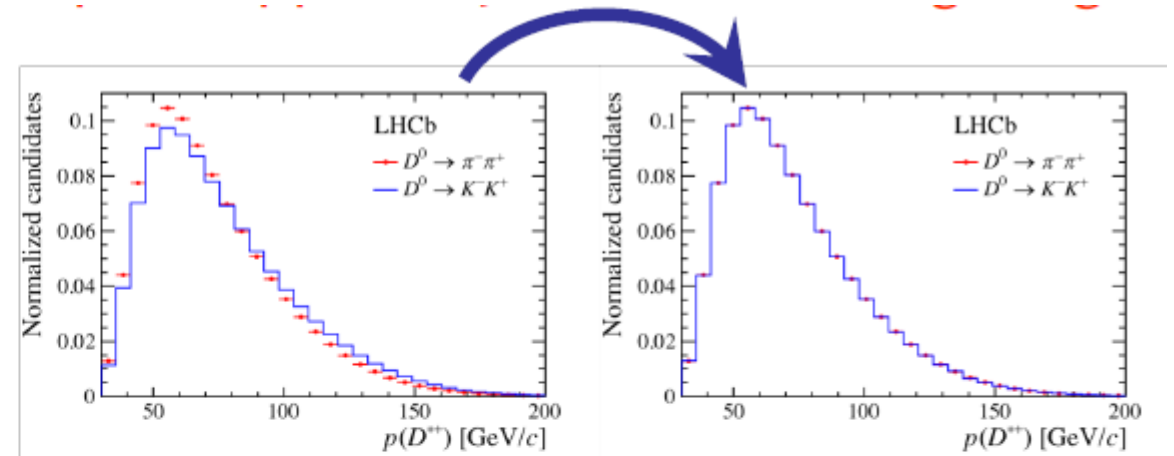
Корректировка кинематики

Асимметрии рождения и детектирования могут слегка зависеть от кинематики распада

Добавление дополнительных весов (для K+K- распадов)

- π -tagged: $p_T(D^*)$, $p(D^*)$, $\phi(D^*)$

Very small effect on ΔA_{CP} below 10^{-4}



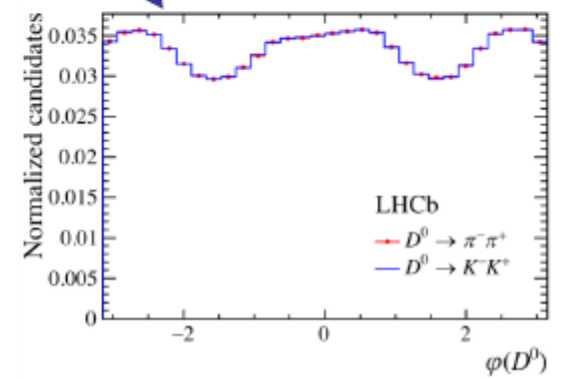
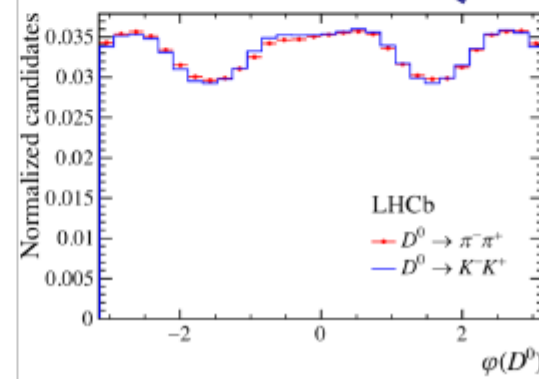
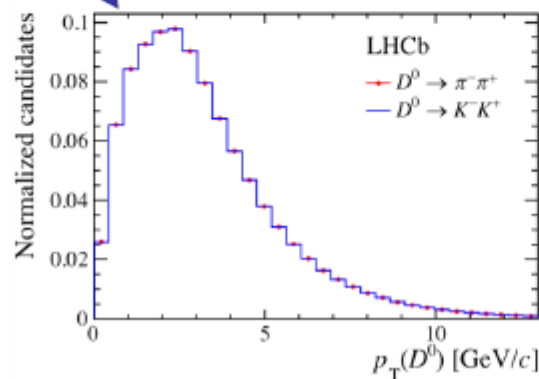
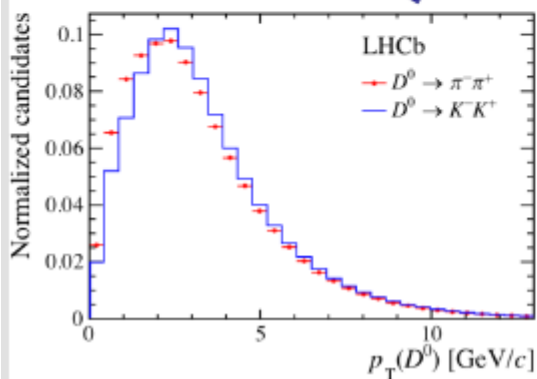
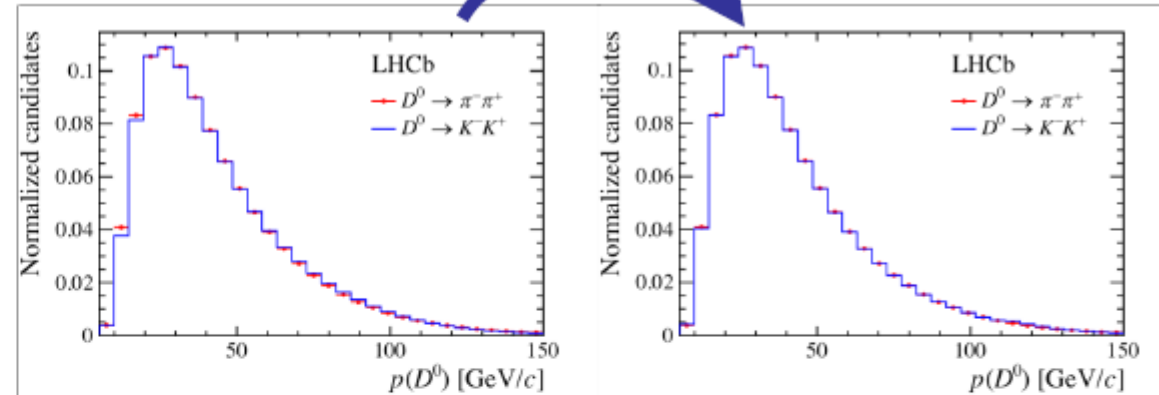
Корректировка кинематики

Асимметрии рождения и детектирования могут слегка зависеть от кинематики распада

Добавление дополнительных весов (для K+K- распадов)

- μ -tagged : $p_T(D^0)$, $p(D^0)$, $\phi(D^0)$

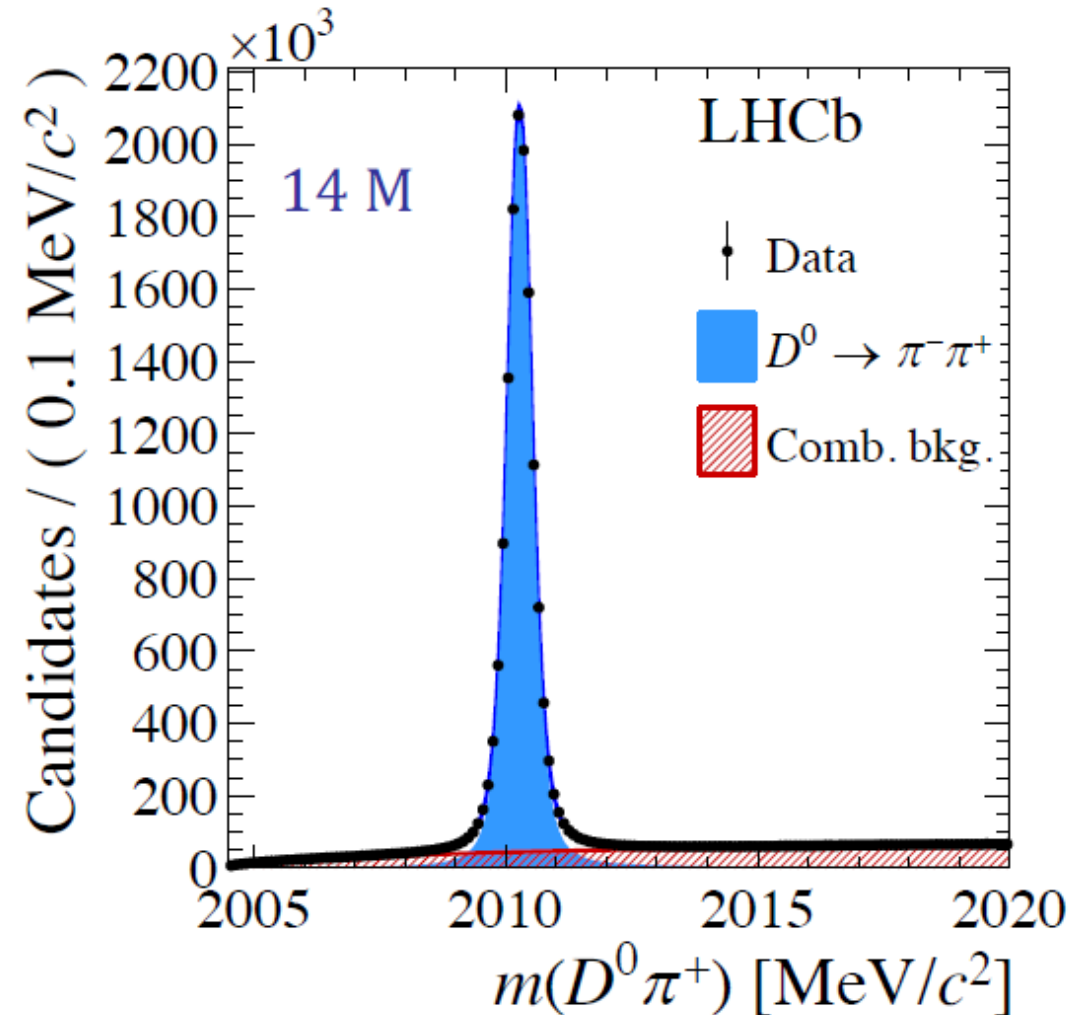
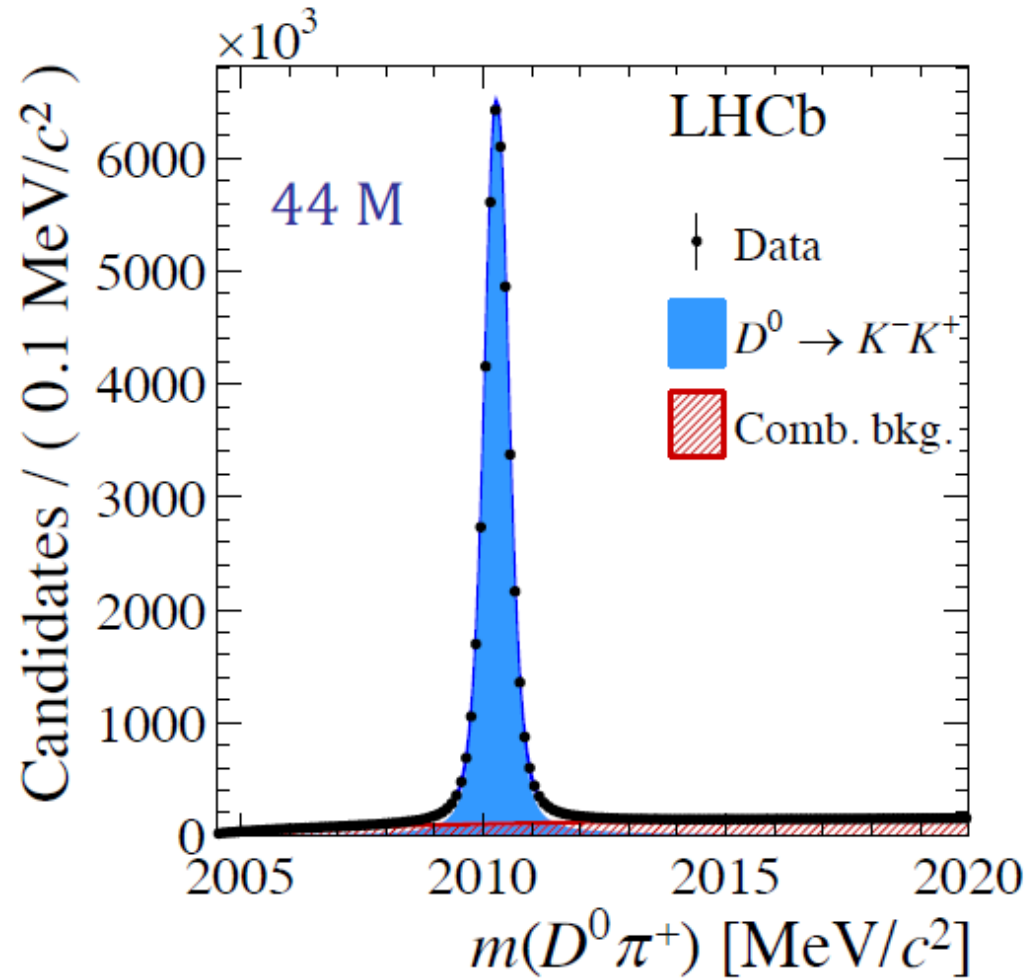
Very small effect on ΔA_{CP} below 10^{-4}



Измерение A_{RAW}



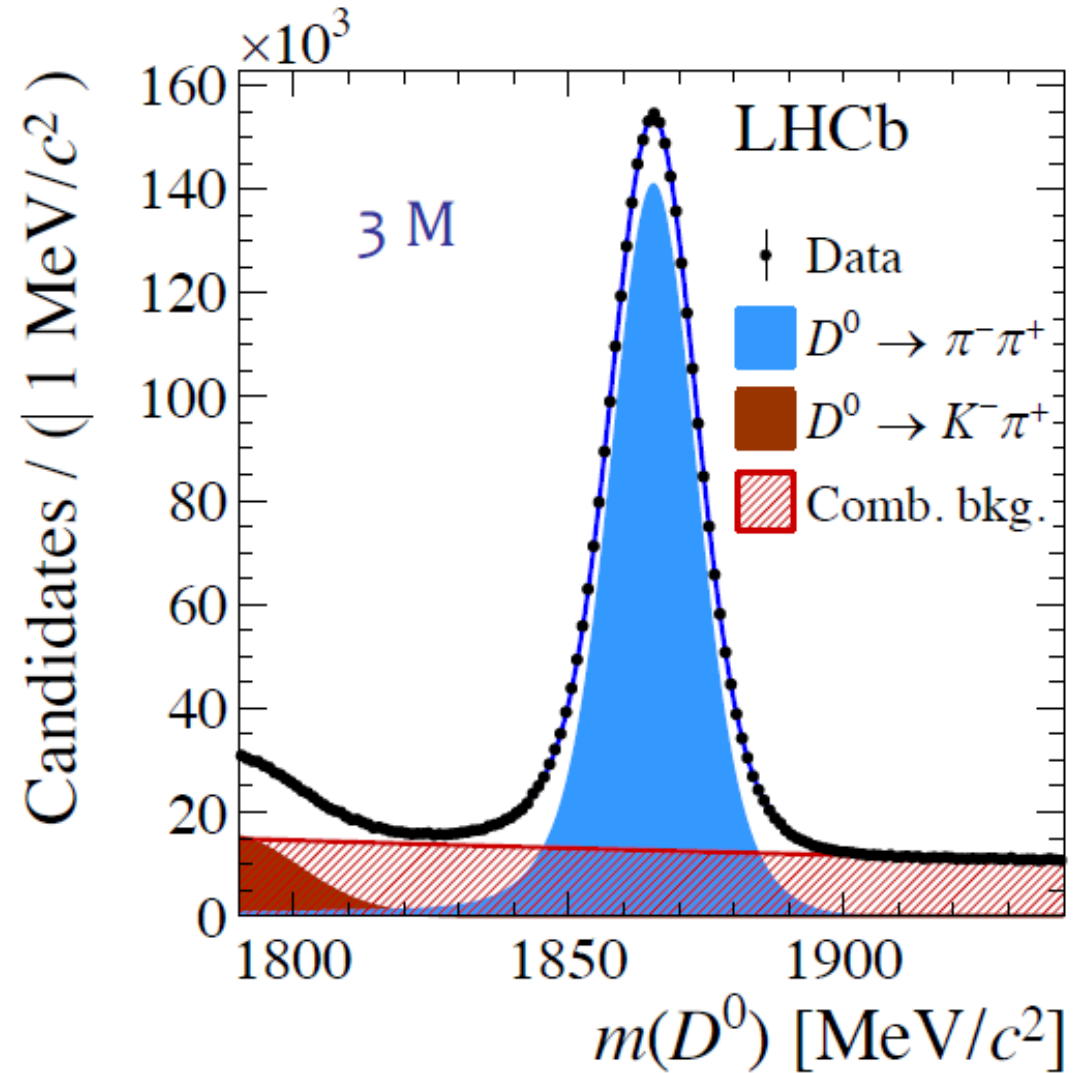
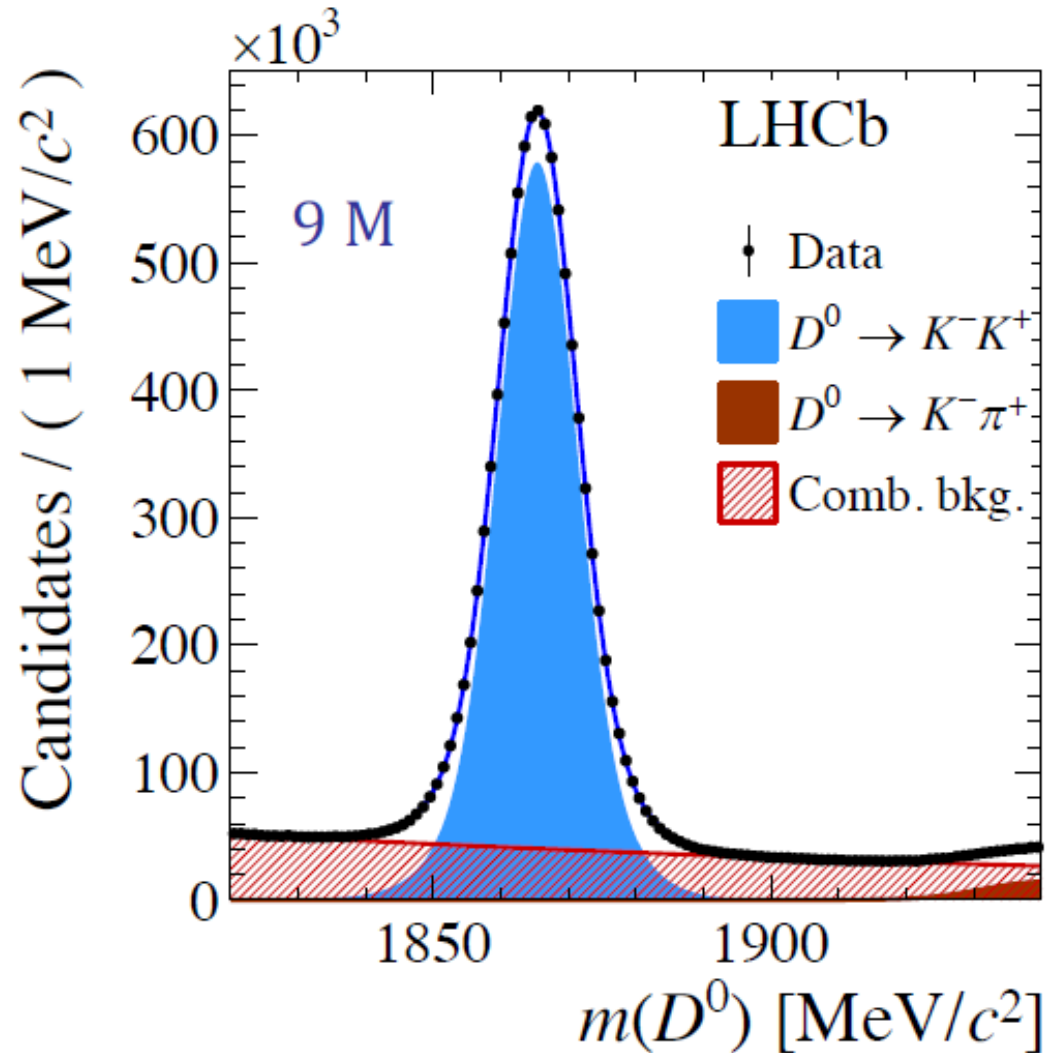
Одинаковые параметры для мезонов и антимезонов



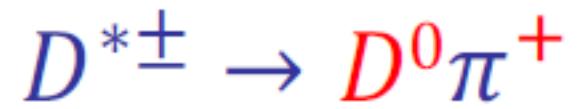
Измерение A_{RAW}

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

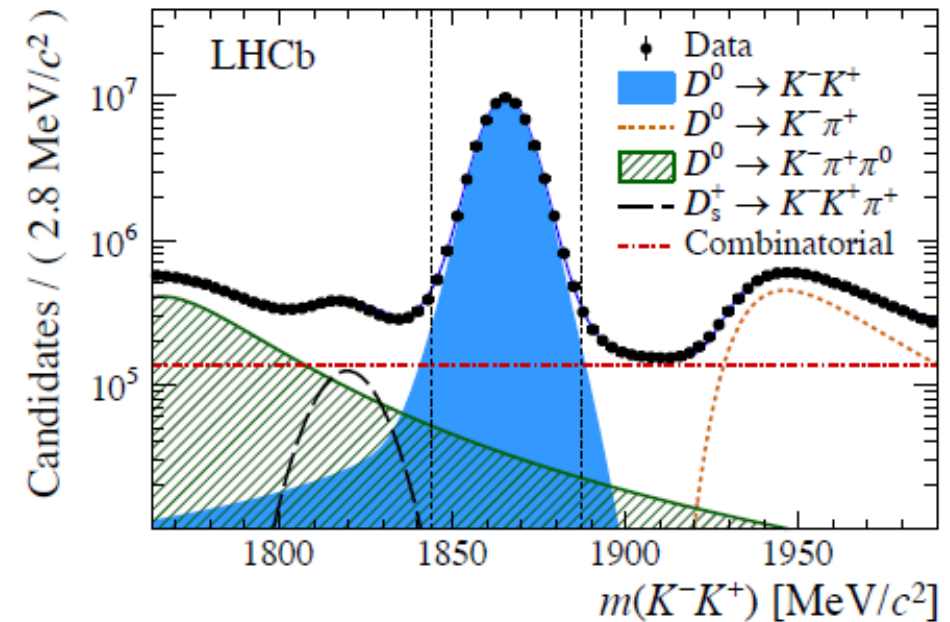
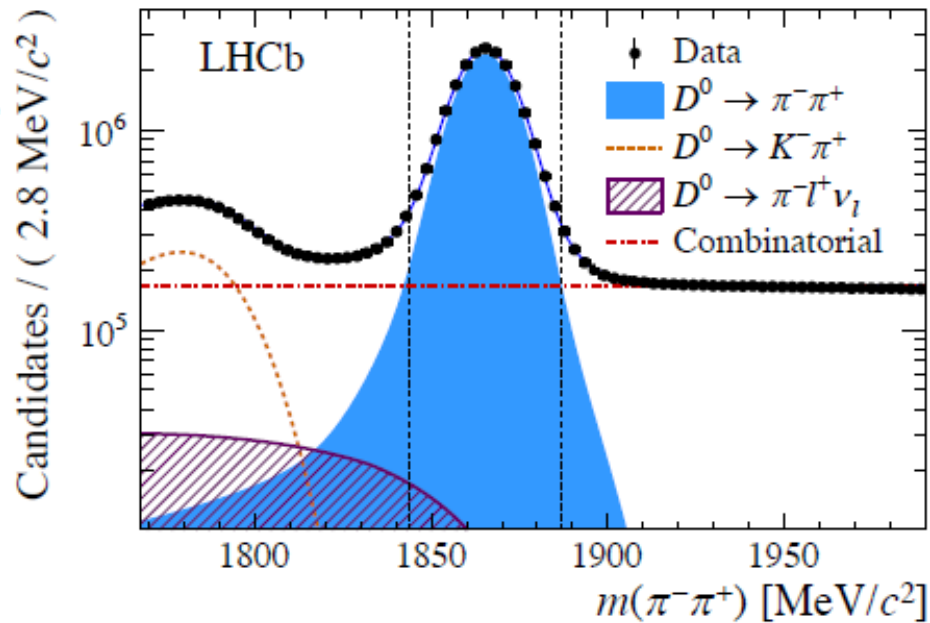
Одинаковые параметры для мезонов и антимезонов



Систематика



- Модель описания массовой кривой (альтернативная модель) $\rightarrow 0.6 \times 10^{-4}$
- Корректировка кинематики (стат.погр. определения весов) $\rightarrow 0.2 \times 10^{-4}$
- Вклад с-из-в (стат.погрешность выделения) $\rightarrow 0.3 \times 10^{-4}$
- Фон $\rightarrow 0.5 \times 10^{-4}$



Систематика

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

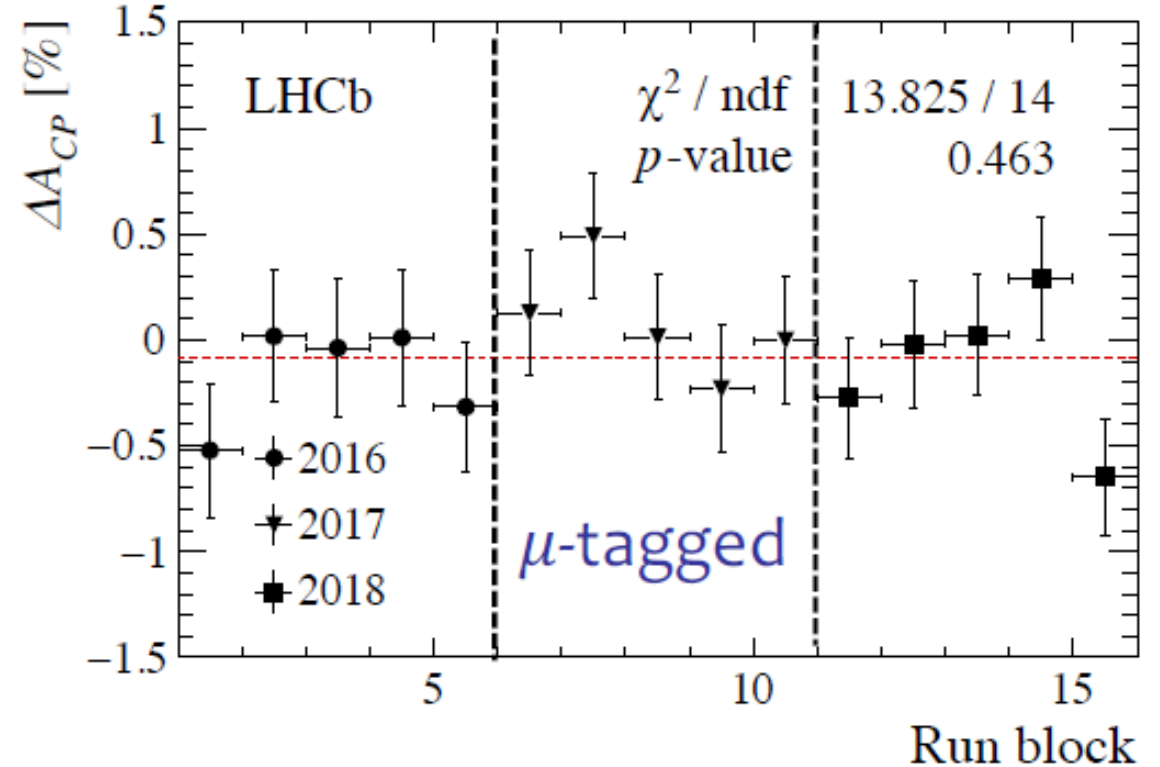
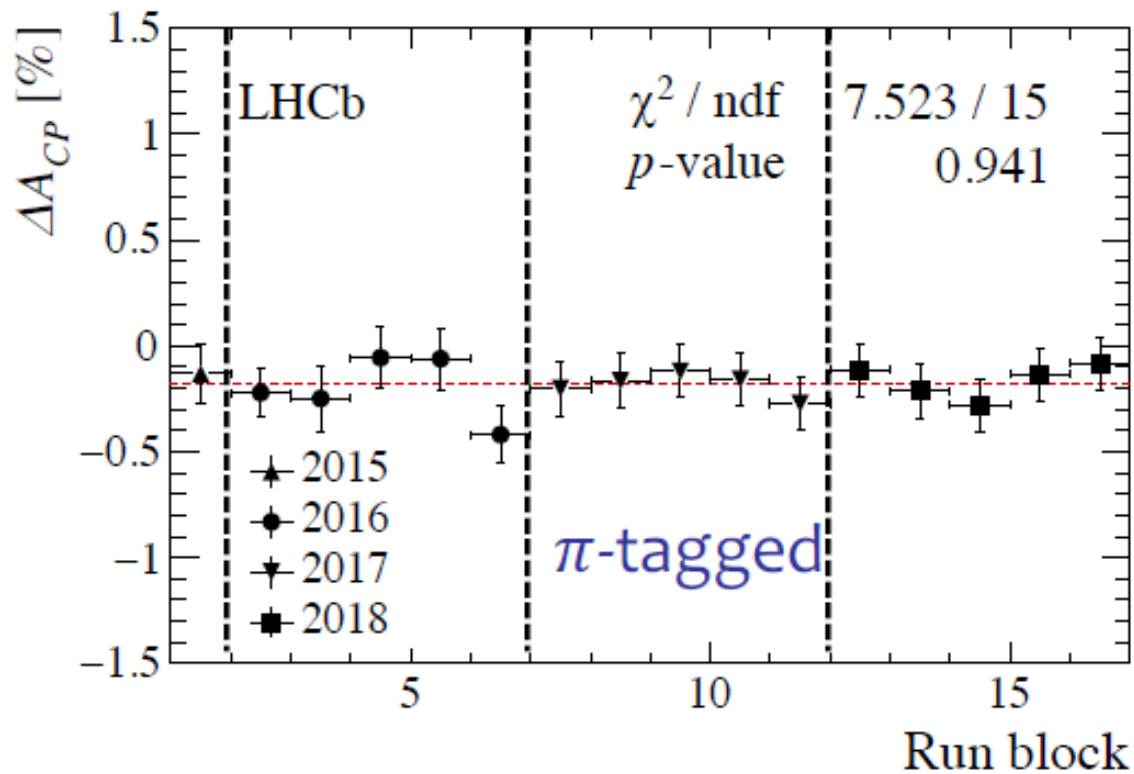
- Модель описания массовой кривой (альтернативная модель) $\rightarrow 2 \times 10^{-4}$
- Привязка к неправильному мюону (CF распад) $\rightarrow 4 \times 10^{-4}$
- Корректировка кинематики (стат. погрешность весов) $\rightarrow 10^{-4}$
- Различная эффективность восстановления b-адрона $\rightarrow 2 \times 10^{-4}$

Систематика (сводная таблица)

Source	π -tagged [10^{-4}]	μ -tagged [10^{-4}]
Fit model	0.6	2
Mistag	–	4
Weighting	0.2	1
Secondary decays	0.3	–
B^0 fraction	–	1
B reco. efficiency	–	2
Peaking background	0.5	–
Total	0.9	5

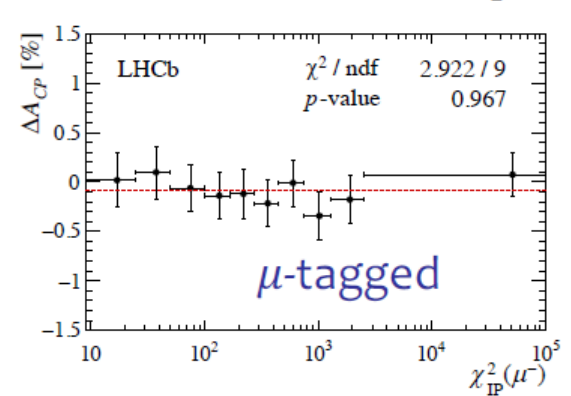
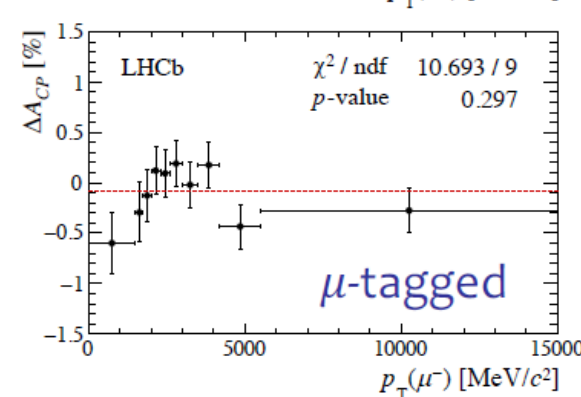
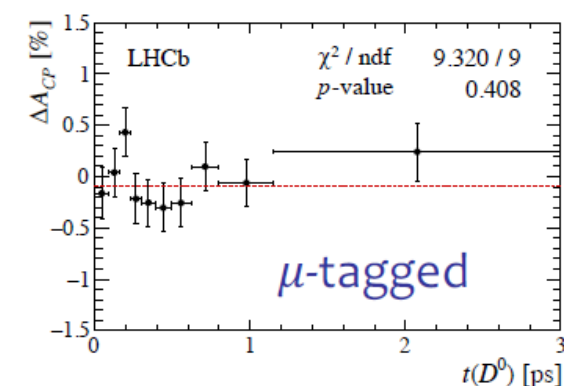
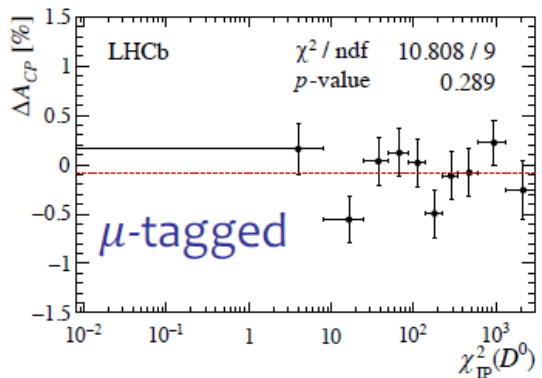
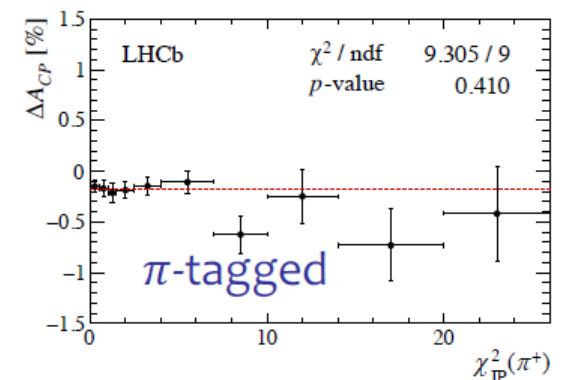
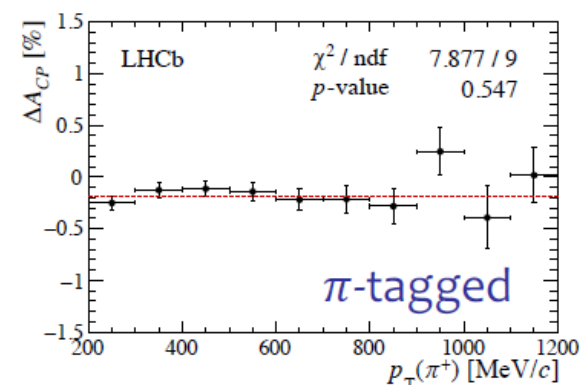
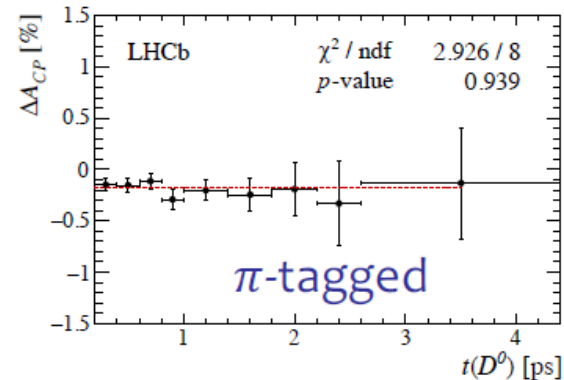
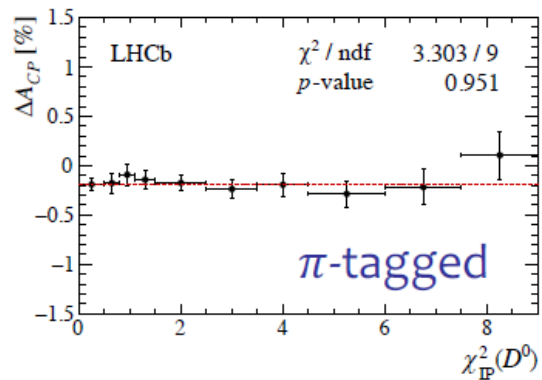
Проверка устойчивости результата

- Набор данных разбивался на поднаборы, для которых проводился полный анализ (деление по: периоду набора данных, направлению магнитного поля, кинематическим переменным, переменным, характеризующим все событие-кандидат)



Проверка устойчивости результата

- Набор данных разбивался на поднаборы, для которых проводился полный анализ (деление по: периоду набора данных, направлению магнитного поля, кинематическим переменным, переменным, характеризующим все событие-кандидат)



Сравнение результатов для Run 1 и Run 2

Run 1

$$\Delta A_{CP} = (+14 \pm 16(\text{stat}) \pm 8(\text{syst})) \times 10^{-4} \quad \mu\text{-tagged Run 1 (3 fb}^{-1}\text{)}$$

Phys. Rev. Lett. 116 (2016)

$$\Delta A_{CP} = (-10 \pm 8(\text{stat}) \pm 3(\text{syst})) \times 10^{-4} \quad \pi\text{-tagged Run 1 (3 fb}^{-1}\text{)}$$

JHEP 07 041 (2014)

Run 2

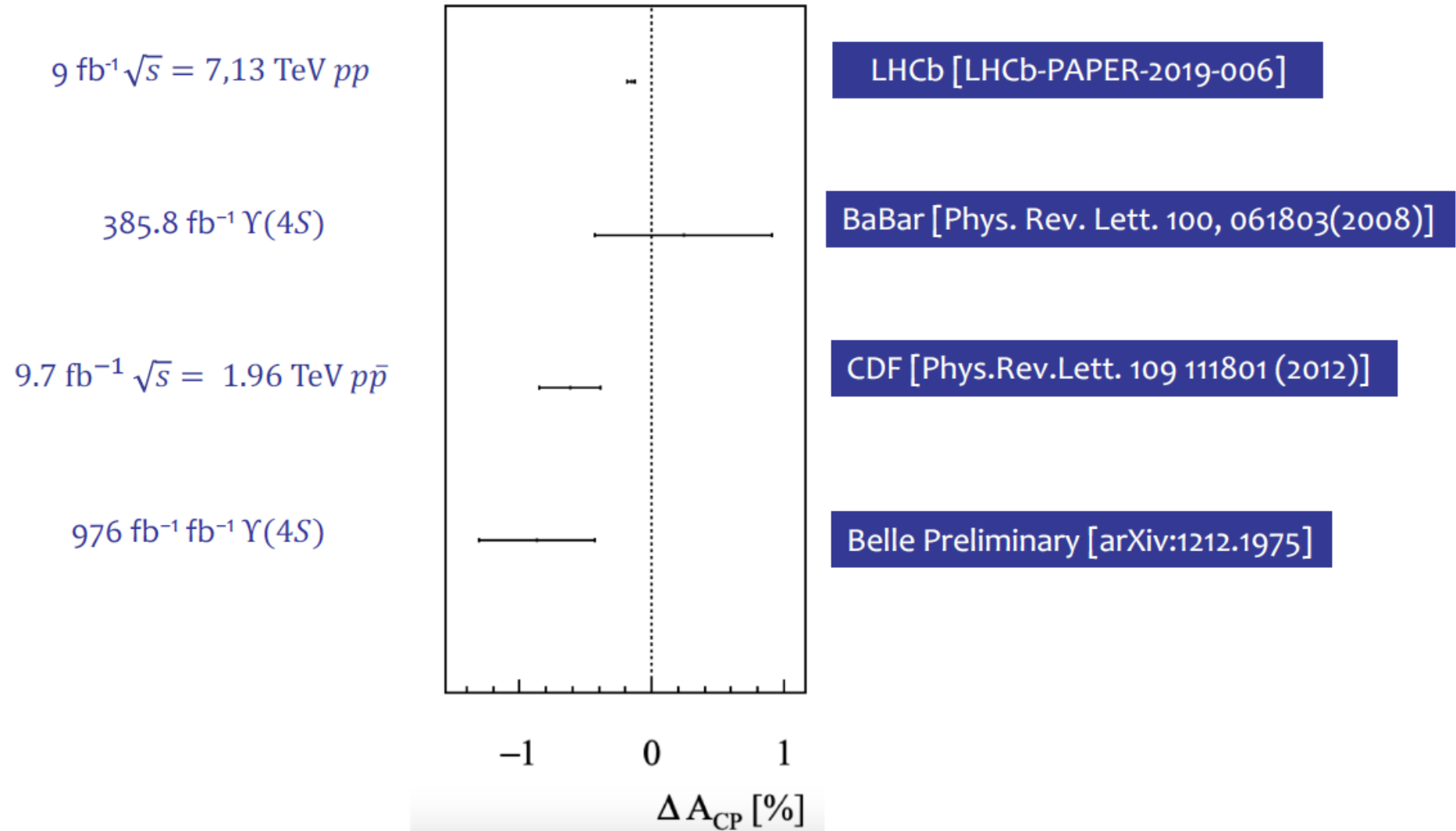
$$\left| \begin{aligned} \Delta A_{CP}^{\pi\text{-tagged}} &= [-18.2 \pm 3.2(\text{stat.}) \pm 0.9(\text{syst.})] \times 10^{-4} \\ \Delta A_{CP}^{\mu\text{-tagged}} &= [-9 \pm 8(\text{stat.}) \pm 5(\text{syst.})] \times 10^{-4} \end{aligned} \right.$$

Результат Run 1 + Run 2

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

- Статистическая значимость отклонения от нуля – **5,3 σ !**
- Первое наблюдение CP нарушения в распадах очарованных адронов

Сравнение с другими экспериментами



Интерпретация

$$\Delta A_{CP} \simeq \Delta a_{CP}^{\text{dir}} \left(1 + \frac{\overline{\langle t \rangle}}{\tau(D^0)} y_{CP} \right) + \frac{\Delta \langle t \rangle}{\tau(D^0)} a_{CP}^{\text{ind}}$$

Монте-Карло моделирование

$$\Delta \langle t \rangle / \tau(D^0) = 0.115 \pm 0.002$$
$$\overline{\langle t \rangle} / \tau(D^0) = 1.71 \pm 0.10$$

Предыдущие измерения:

$$y_{CP} = (5.7 \pm 1.5) \times 10^{-5}$$

$$A_{\Gamma} = (-2.8 \pm 2.8) \times 10^{-4} \simeq -a_{CP}^{\text{ind}}$$

JHEP 04 (2012) 129

Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 011802

JHEP 04 (2015) 043

Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 261803,

$$\Delta a_{CP}^{\text{dir}} = (-15.6 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

- Прямое CP нарушения в распадах очарованных адронов

Теоретическая интерпретация

ΔA_{CP} within the Standard Model and beyond

Mikael Chala, Alexander Lenz, Aleksey V. Rusov and Jakub Scholtz

In light of the recent LHCb observation of CP violation in the charm sector, we review standard model (SM) predictions in the charm sector and in particular for ΔA_{CP} . We get as an upper bound in the SM $|\Delta A_{CP}^{SM}| \leq 3 \times 10^{-4}$, which can be compared to the measurement of $\Delta A_{CP}^{LHCb2019} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$. We discuss resolving this tension within an extension of the SM that includes a flavour violating Z' that couples only to $\bar{s}s$ and $\bar{c}u$. We show that for masses below 80 GeV and flavour violating coupling of the order of 10^{-4} , this model can successfully resolve the tension and avoid constraints from dijet searches, $D^0 - \bar{D}^0$ mixing and measurements of the Z width.

arXiv:1903.10490v1

Теоретическая интерпретация

arXiv:1903.10952v1

The Emergence of the $\Delta U = 0$ Rule in Charm Physics

Yuval Grossman^{*} and Stefan Schacht[†]

$$\Delta a_{CP}^{\text{dir}} = 4 \text{Im} \left(\frac{\lambda_b}{\Sigma} \right) |\tilde{p}_0| \sin(\delta_{\text{strong}}),$$

Соотношение матричных элементов соответствующих операторам переходов с изменением и сохранением U-спина

$$|\tilde{p}_0| \sin(\delta_{\text{strong}}) = 0.65 \pm 0.11.$$

Зависит от элементов ККМ-матрицы

In principle two options are possible in order to explain this result: In the perturbative picture beyond the SM (BSM) physics is necessary to explain Eq. (78). On the other hand, in the SM picture, we find that all that is required in order to explain the result is a mild nonperturbative enhancement due to rescattering effects. Therefore, it is hard to argue that BSM physics is required.

Теоретическая интерпретация

Implications on the first observation of charm CPV at LHCb

Hsiang-nan Li^{1*}, Cai-Dian Lü^{2†}, Fu-Sheng Yu^{3‡}

Very recently, the LHCb Collaboration observed the CP violation (CPV) in the charm sector for the first time, with $\Delta A_{CP}^{\text{dir}} \equiv A_{CP}(D^0 \rightarrow K^+K^-) - A_{CP}(D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-) = (-1.54 \pm 0.29) \times 10^{-3}$. This result is consistent with our prediction of $\Delta A_{CP}^{\text{SM}} = (-0.57 \sim -1.87) \times 10^{-3}$ obtained in the factorization-assisted topological-amplitude (FAT) approach in [PRD86,036012(2012)]. It implies that the current understanding of the penguin dynamics in charm decays in the Standard Model is reasonable. Motivated by the success of the FAT approach, we further suggest to measure the $D^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+$ decay, which is the next potential mode to reveal the CPV of the same order as 10^{-3} .

arXiv:1903.10638v1

Что дальше?

- Ближайшее будущее: индивидуальные асимметрии + A_{Γ}
- Run-3: Проверка результатов:
 - мюонный vs. пионный таггинг
 - пионный (Run1+2) vs. пионный (Run-3)
- Belle-2 увеличит (свою) статистику в 50 раз относительно Belle