

# Смешивание электрически-нейтральных мезонов. Новые результаты LHCb.

Дзюба Алексей / НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Семинар ОФВЭ, 29 июня 2021 г.

# План доклада

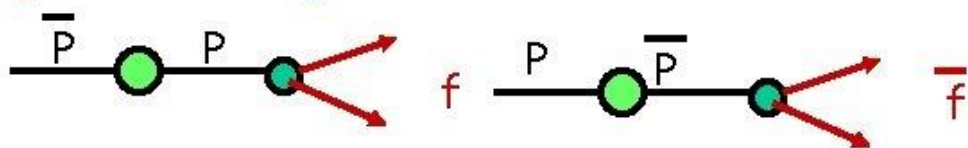
- $CP$  нарушение в адронном секторе Стандартной Модели и смешивание электрически-нейтральных мезонов (небольшой обзор + мотивация)
- Эксперимент LHCb
- Новые измерения LHCb
  - Точное определение  $\Delta m$  из осцилляций  $B_s^0$  мезонов
  - Обнаружение  $\Delta m \neq 0$  для  $D^0$  мезонов

## Types of CP violation

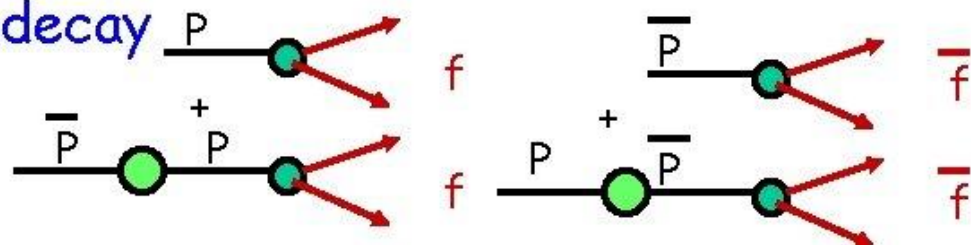
- ~~CP~~ in decay



- ~~CP~~ in mixing



- ~~CP~~ in interference between mixing and decay



CP-нарушение  
и процессы  
смешивания

# Литература + видео

- *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](#))
- The beauty and charm of fast and slow neutral meson oscillations at LHCb, A. Dziurda , Sascha Stahl ([Семинар ЦЕРН](#))

# $P$ , $C$ 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  $t$ .
  - Таким образом, операция зарядового сопряжения  $C$  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 ).

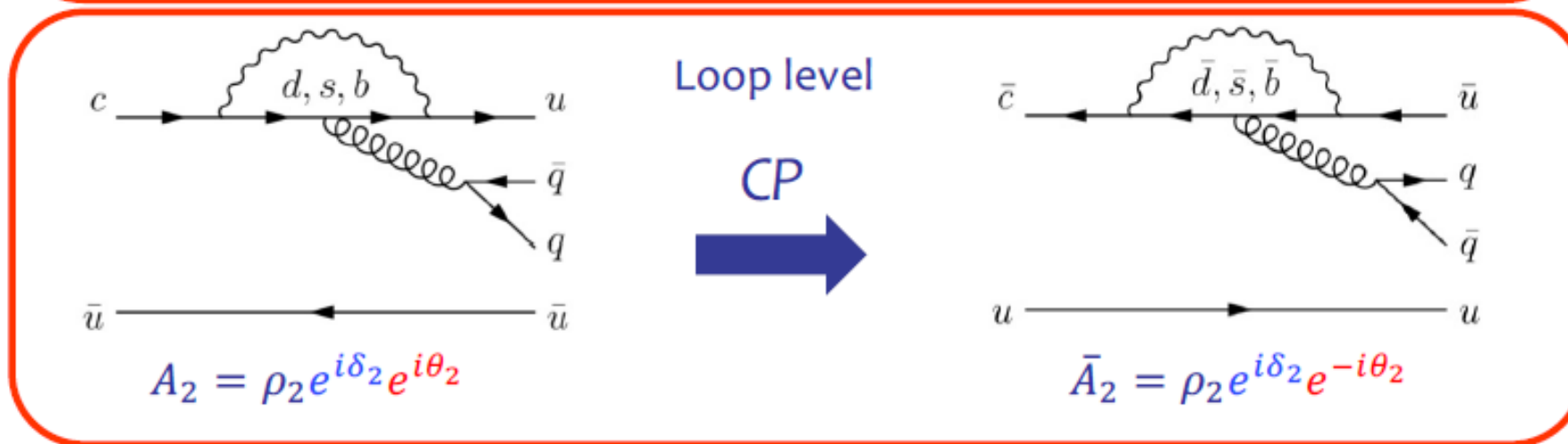
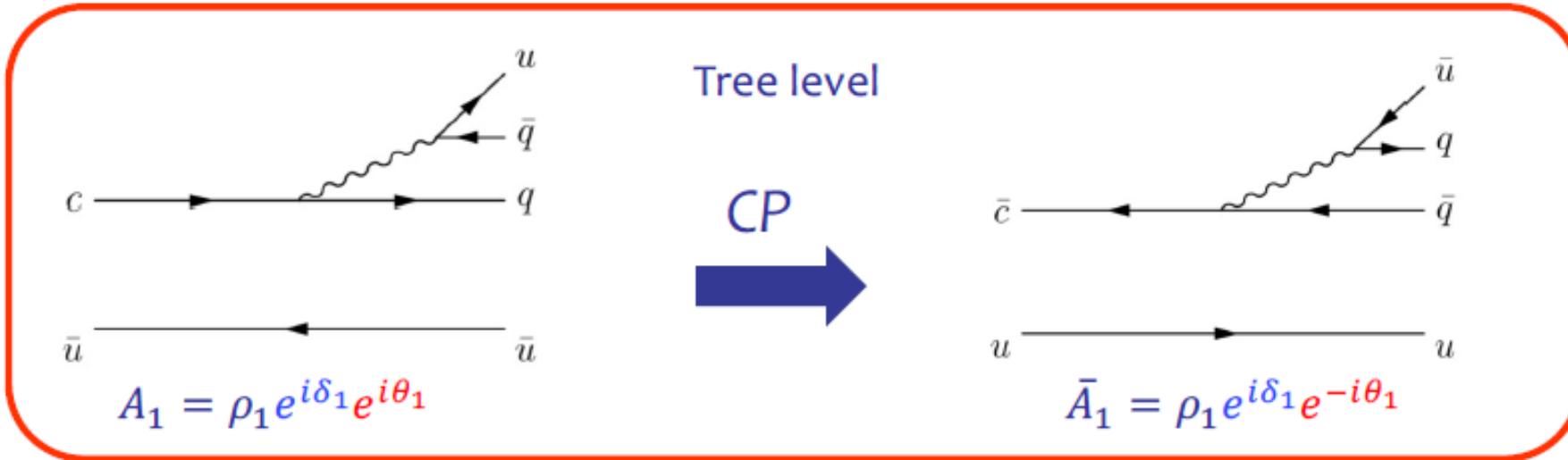
Новая физика, то есть физика за пределами Стандартной Модели (СМ) предположительно должна содержать новые эффекты  $CP$  нарушения

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.



# Прямое CP-нарушение



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

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

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

# Матрица кваркового смешивания \ CKM

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

Выбор нижних состояний - соглашение

Собственные состояния по отношению к слабому взаимодействию

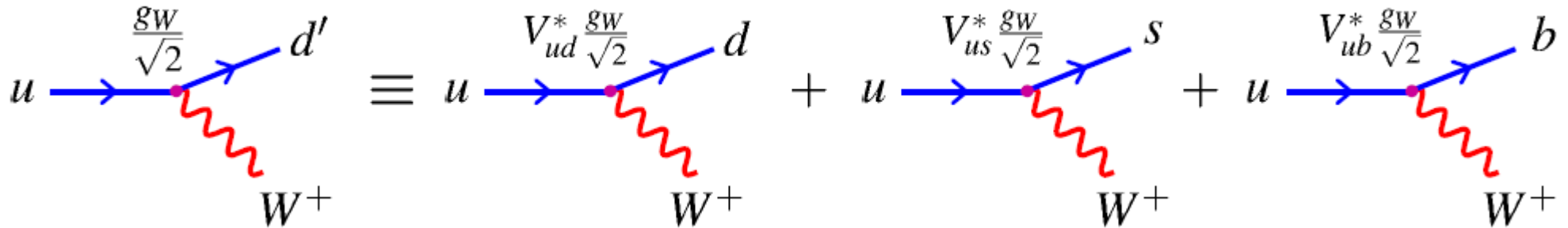
**CKM Matrix**

Массовые собственные состояния

(Cabibbo, Kobayashi, Maskawa)

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

Фейнмановские вершины



Комплексные элементы \ Унитарная матрица \ Элементы матрицы – константы Стандартной Модели (устанавливаются экспериментально) \ Неустраняемая комплексная фаза  $\rightarrow$  CP-нарушение в кварковом секторе SM



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

Три угла смешивания

и комплексная фаза:

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

Иерархия элементов \ матрица  
близка к диагональной:

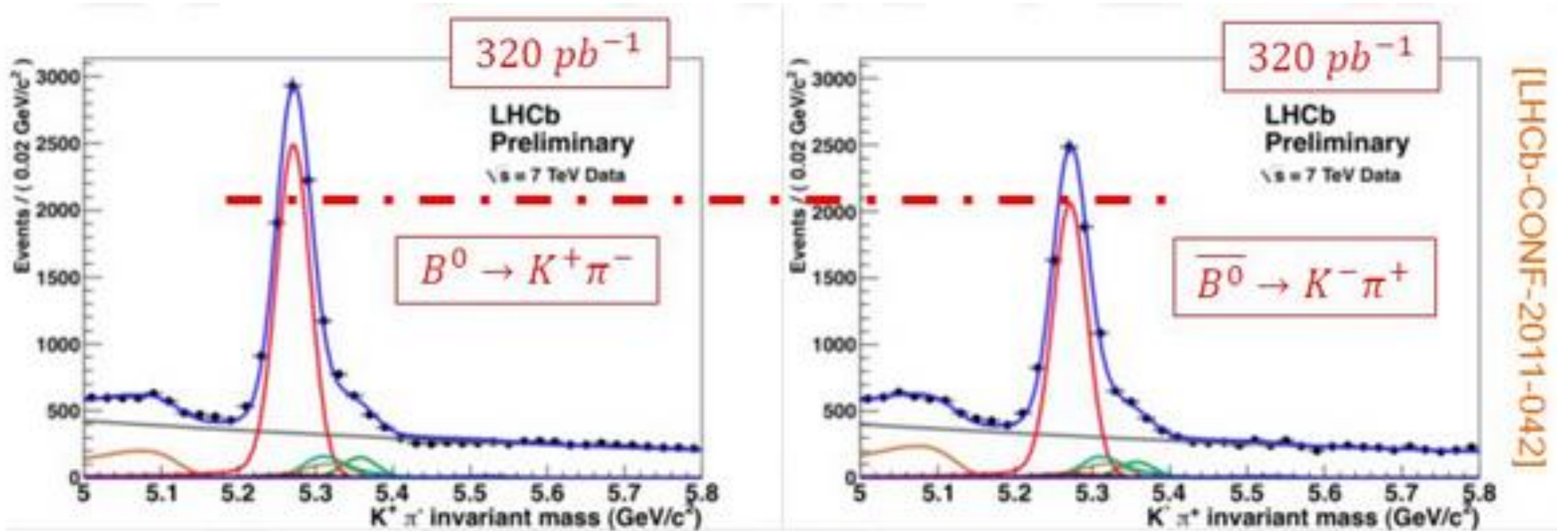
$$V_{\text{CKM}} \sim \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.974 & 0.226 & 0.004 \\ 0.23 & 0.96 & 0.04 \\ 0.01 & 0.04 & 0.999 \end{pmatrix}$$

Пр-я Вольфенштейна:

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

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

# 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  
**Измерить  $CP$ -нарушающую фазу ККМ-матрицы можно, изучая процессы смешивания**

# Смешивание электрически-нейтральных мезонов

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 97, NUMBER 5

MARCH 1, 1955

## Behavior of Neutral Particles under Charge Conjugation

M. GELL-MANN,\* *Department of Physics, Columbia University, New York, New York*

AND

A. PAIS, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received November 1, 1954)

Some properties are discussed of the  $\theta^0$ , a heavy boson that is known to decay by the process  $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ . According to certain schemes proposed for the interpretation of hyperons and  $K$  particles, the  $\theta^0$  possesses an antiparticle  $\bar{\theta}^0$  distinct from itself. Some theoretical implications of this situation are discussed with special reference to charge conjugation invariance. The application of such invariance in familiar instances is surveyed in Sec. I. It is then shown in Sec. II that, within the framework of the tentative schemes under consideration, the  $\theta^0$  must be considered as a "particle mixture" exhibiting two distinct lifetimes, that each lifetime is associated with a different set of decay modes, and that no more than half of all  $\theta^0$ 's undergo the familiar decay into two pions. Some experimental consequences of this picture are mentioned.



Вероятность того, что частица рожденная как  $K^0$ , будет взаимодействовать как  $\bar{K}^0$

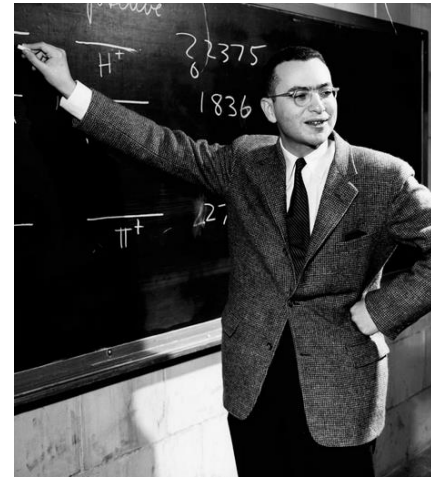
$$|C_-|^2 = \frac{1}{4} (1 + e^{-2\beta t} - 2e^{-\beta t} \cos \alpha t).$$

А. Далеба

Существование амплитуды перехода:

$$K^0(d\bar{s})$$

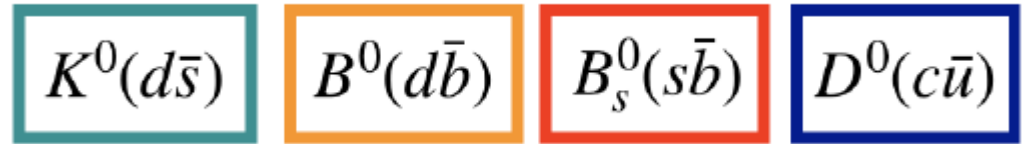
$$K^0 \leftrightarrow \pi^- + \pi^+ \leftrightarrow \bar{K}^0.$$



Вы создаете отдельную частицу, и она не просто распадается, а проделывает нечто совсем иное. Временами она распадается, а порой превращается в частицу другого сорта. Характеристическая вероятность этого эффекта по мере ее движения меняется очень странно. Ничего другого, похожего на это, в природе нет. И это удивительнейшее предсказание было сделано только на основе рассуждений об интерференции амплитуд.

Если и существует какое-то место, где есть шанс проверить главные принципы квантовой механики самым прямым образом — бывает ли суперпозиция амплитуд или не бывает, — то оно именно здесь. Несмотря на то что этот эффект был предсказан уже несколько лет тому назад, до сих пор достаточно ясного опытного определения еще не было.

# Смешивание электрически-нейтральных мезонов



Собственные состояния по массе (времени жизни) являются смесью собственных состояний по аромату (флейвору)

$$|M_L\rangle \propto p\sqrt{1-z}|M^0\rangle + q\sqrt{1+z}|\bar{M}^0\rangle,$$

$$|M_H\rangle \propto p\sqrt{1+z}|M^0\rangle - q\sqrt{1-z}|\bar{M}^0\rangle,$$

В случае CP нарушения при смешивании собственные состояния относительно CP не совпадают с собственными состояниями по массе и по аромату

Параметр:

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

Эффективный гамильтониан в матричной форме

$$H = M - \frac{i}{2}\Gamma.$$

Для случая CPT-нарушения диагональные элементы не равны ( $z=0$ )

$$z \equiv \frac{\delta m - (i/2)\delta\Gamma}{\Delta m - (i/2)\Delta\Gamma},$$

$$\delta m \equiv M_{11} - M_{22}, \quad \delta\Gamma \equiv \Gamma_{11} - \Gamma_{22}$$

Нестационарное уравнение Шрёдингера

$$i\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} D^0(t) \\ \bar{D}^0(t) \end{pmatrix} = \left( M - \frac{i}{2}\Gamma \right) \begin{pmatrix} D^0(t) \\ \bar{D}^0(t) \end{pmatrix}$$

Разница масс и ширин тяжелого и легкого состояний выражается через собственные векторы гамильтониана

$$\Delta m \equiv m_H - m_L = \text{Re}(\omega_H - \omega_L),$$

$$\Delta\Gamma \equiv \Gamma_H - \Gamma_L = -2\text{Im}(\omega_H - \omega_L).$$

Параметры малости для некоторых (!!!) систем

Для  $D^0$ :  $x, y$     для  $B^0$ :  $y$

$$x \equiv \Delta m / \Gamma$$

$$y \equiv \Delta\Gamma / (2\Gamma),$$

$$\Gamma \equiv (\Gamma_H + \Gamma_L) / 2.$$



# Смешивание электрически-нейтральных мезонов

$$K^0(d\bar{s}) \quad B^0(d\bar{b}) \quad B_s^0(s\bar{b}) \quad D^0(c\bar{u})$$

$M^0$  при  $t=0$  :

$$|M_{\text{phys}}^0(t)\rangle = (g_+(t) + \overset{=0}{z} g_-(t)) |M^0\rangle - \sqrt{1 - \overset{=1}{z^2} \frac{q}{p}} g_-(t) |\bar{M}^0\rangle ,$$

$\bar{M}^0$  при  $t=0$  :

$$|\bar{M}_{\text{phys}}^0(t)\rangle = (g_+(t) - \overset{=0}{z} g_-(t)) |\bar{M}^0\rangle - \sqrt{1 - \overset{=1}{z^2} \frac{p}{q}} g_-(t) |M^0\rangle ,$$

Будем рассматривать СРТ в качестве соблюдающейся симметрии

$$g_{\pm}(t) \equiv \frac{1}{2} \left[ \exp\left(-im_H t - \frac{1}{2}\Gamma_H t\right) \pm \exp\left(-im_L t - \frac{1}{2}\Gamma_L t\right) \right]$$

4 амплитуды:

$$A_f = \langle f | \mathcal{H} | M \rangle$$

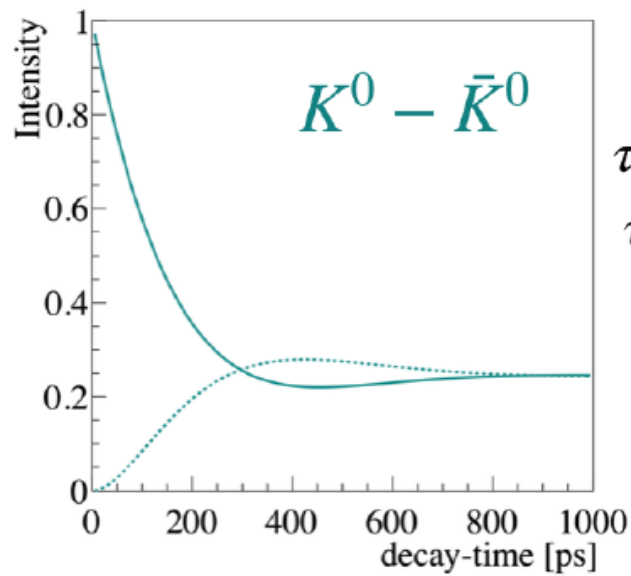
$$A_{\bar{f}} = \langle \bar{f} | \mathcal{H} | M \rangle$$

$$\bar{A}_f = \langle f | \mathcal{H} | \bar{M} \rangle$$

$$\bar{A}_{\bar{f}} = \langle \bar{f} | \mathcal{H} | \bar{M} \rangle$$

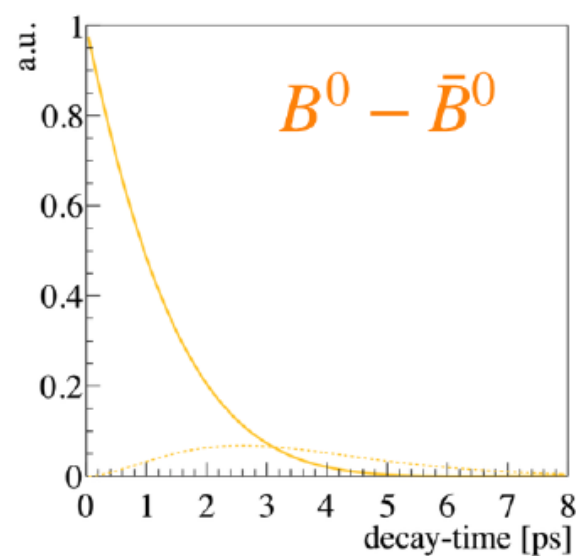
$$\frac{d\Gamma[M_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f]/dt}{e^{-\Gamma t} \mathcal{N}_f} = \left( |A_f|^2 + |(q/p)\bar{A}_f|^2 \right) \cosh(y\Gamma t) + \left( |A_f|^2 - |(q/p)\bar{A}_f|^2 \right) \cos(x\Gamma t) + 2 \operatorname{Re}((q/p)A_f^* \bar{A}_f) \sinh(y\Gamma t) - 2 \operatorname{Im}((q/p)A_f^* \bar{A}_f) \sin(x\Gamma t) ,$$

$$\frac{d\Gamma[\bar{M}_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f]/dt}{e^{-\Gamma t} \mathcal{N}_f} = \left( |(p/q)A_f|^2 + |\bar{A}_f|^2 \right) \cosh(y\Gamma t) - \left( |(p/q)A_f|^2 - |\bar{A}_f|^2 \right) \cos(x\Gamma t) + 2 \operatorname{Re}((p/q)A_f \bar{A}_f^*) \sinh(y\Gamma t) - 2 \operatorname{Im}((p/q)A_f \bar{A}_f^*) \sin(x\Gamma t) ,$$



$$K^0 - \bar{K}^0$$

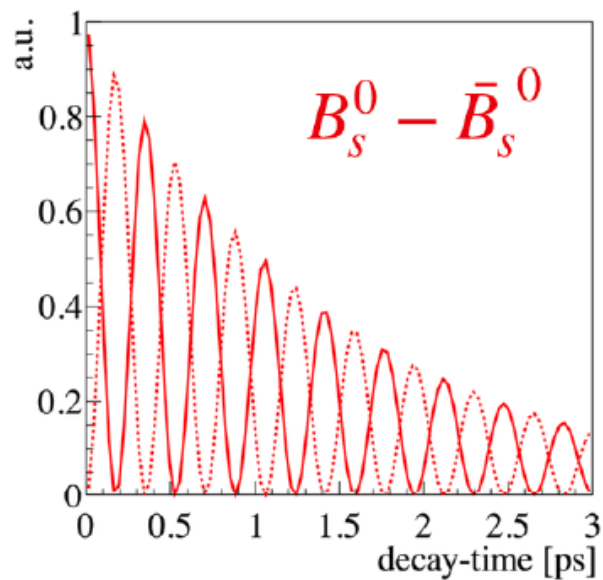
Very different lifetime:  
 $\tau(K_S^0) \sim 0.9 \times 10^{-10}$   
 $\tau(K_L^0) \sim 0.5 \times 10^{-7}$   
 the oscillation period longer than the  $K_S$  lifetime, but  $K_L^0$  exceptionally long



$$B^0 - \bar{B}^0$$

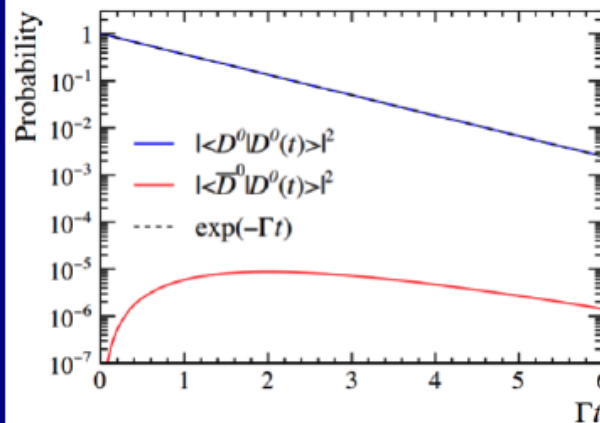
Oscillations  
 $\Delta m \sim 0.5 \text{ ps}^{-1}$   
 Lifetime  
 $\tau(B^0) \sim 1.5 \text{ ps}$   
 The same order of magnitudes

$$\Delta\Gamma = 0$$



$$B_s^0 - \bar{B}_s^0$$

Very fast oscillations  
 $\Delta m_s > 15 \text{ ps}^{-1}$   
 $\tau(B_s^0) \sim 1.5 \text{ ps}$   
 Non-zero  $\Delta\Gamma_s$



$$D^0 - \bar{D}^0$$

Very slow oscillations  
 $\Delta m \sim 10^{-3} \text{ ps}^{-1}$   
 Very short lifetime  
 $\tau(D^0) \sim 0.4 \text{ ps}$   
 $D^0$  decays before has a chance to oscillate

# Косвенное $CP$ нарушение в рамках СМ

$CP$  нарушение при смешивании:

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

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

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

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

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

Пример: CPLEAR

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

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

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

$CP$  нарушение в интерференции распадов и процессов смешивания:

Параметр

$$\lambda_f \equiv \frac{q}{p} \frac{\bar{A}_f}{A_f}.$$

Для  $CP$ -четных конечных состояний

Пример: Belle, BaBar, LHCb  
для  $B^0$  мезонов

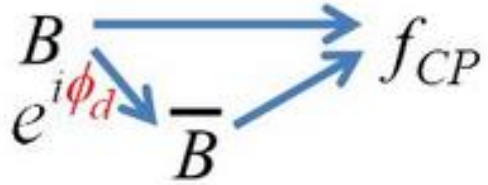
$$|q/p| = 1, \quad |\bar{A}_{fCP}| = |A_{fCP}|$$

$$A_{fCP}(t) \equiv \frac{d\Gamma/dt[\bar{M}_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f_{CP}] - d\Gamma/dt[M_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f_{CP}]}{d\Gamma/dt[\bar{M}_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f_{CP}] + d\Gamma/dt[M_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f_{CP}]}.$$

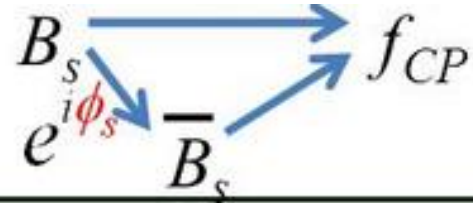
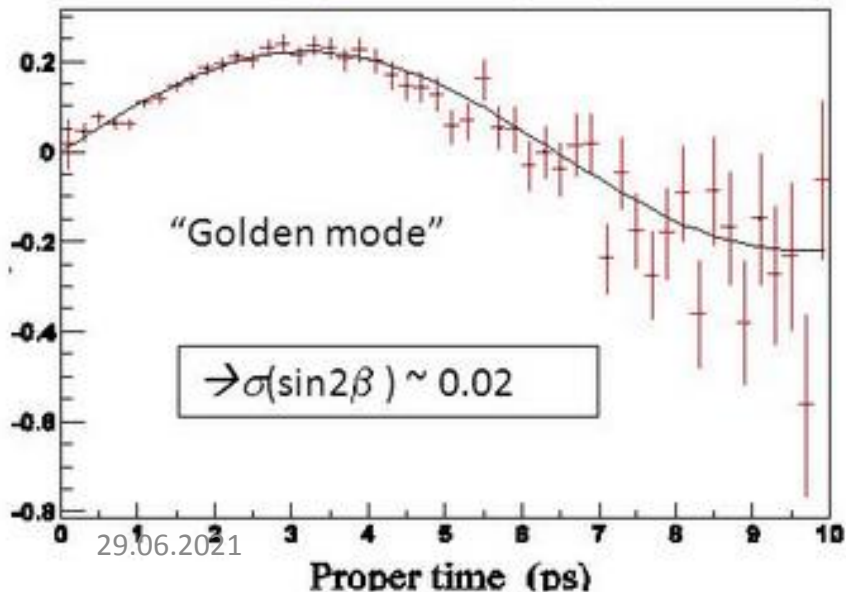
$$A_{fCP}(t) = \mathcal{I}m(\lambda_{fCP}) \sin(x\Gamma t).$$



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



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



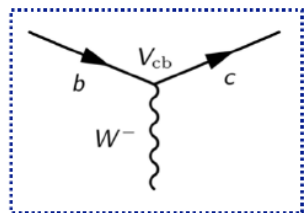
$$B_s: A_{CP}(t) = \frac{\eta_f \sin \phi_s \sin(\Delta m_s t)}{\cosh \frac{\Delta \Gamma_s t}{2} - \eta_f \cos \phi_s \sinh \frac{\Delta \Gamma_s t}{s}}$$

Позволяет извлекать  $CP$ -нарушающую фазу матрицы кваркового смешивания

**Частота осцилляции как nuisance параметр!**

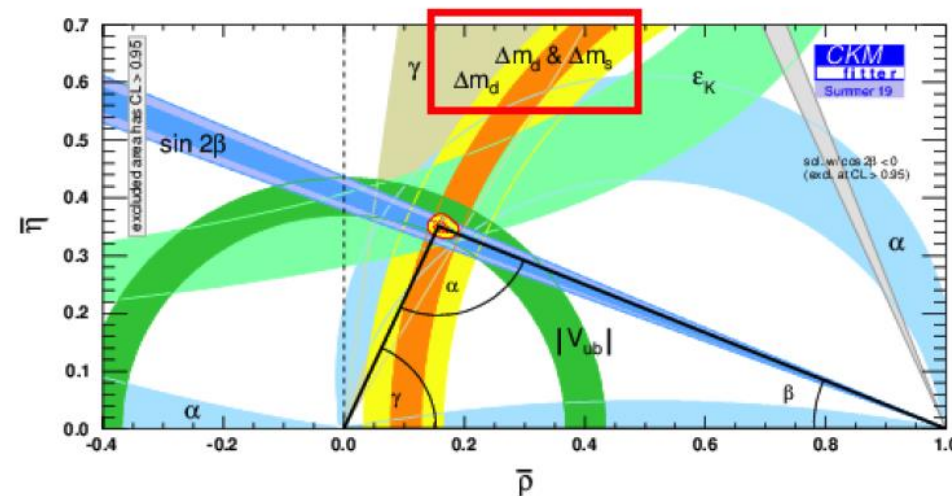
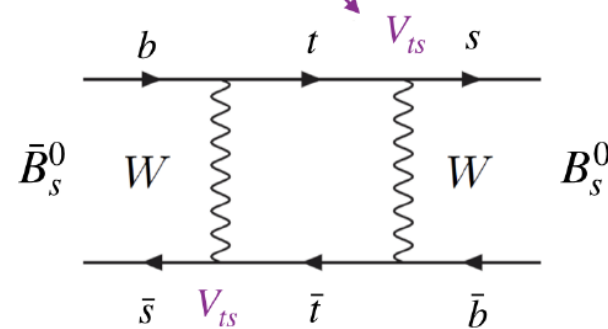
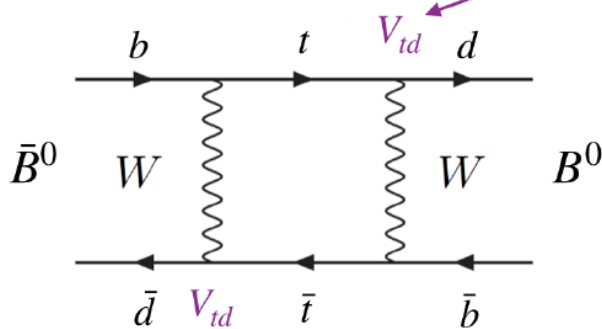
**Чем точнее, тем лучше!**

# Измерение коэффициентов ККМ-матрицы



charged-current weak interaction

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



$$\Delta m_q = \frac{G_f^2}{6\pi^2} m_{B_q} M_W^2 f \left( \frac{m_t^2}{M_W^2} \right) \eta_{QCD} B_{B_q} f_{B_q}^2 |V_{tb}^* V_{tq}|^2 \quad q = d, s$$



Определение параметров ККМ-матрицы

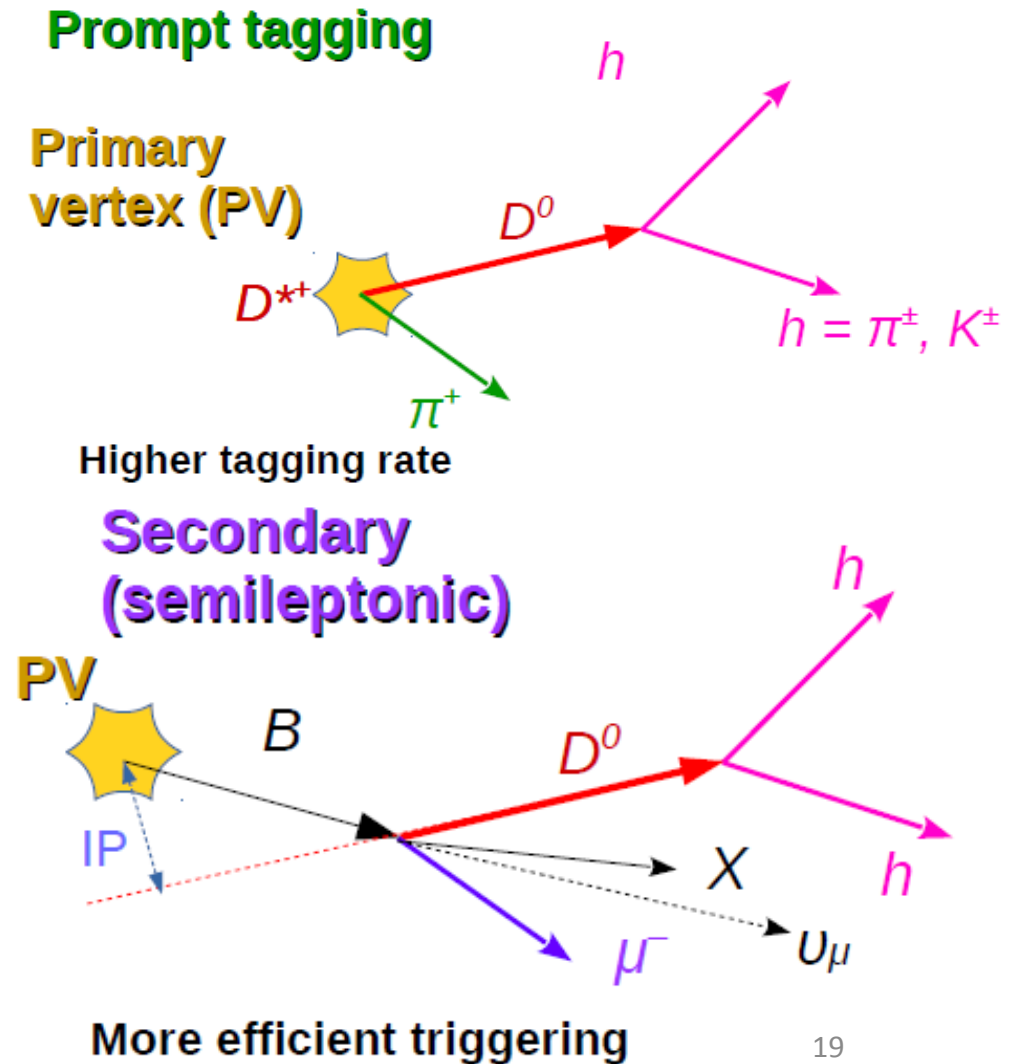
Открытие заметных осцилляций для B0 мезонов (ARGUS, 80-е) явилось указанием на большую массу топ-кварка



# Эксперимент LHCb

# 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

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

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

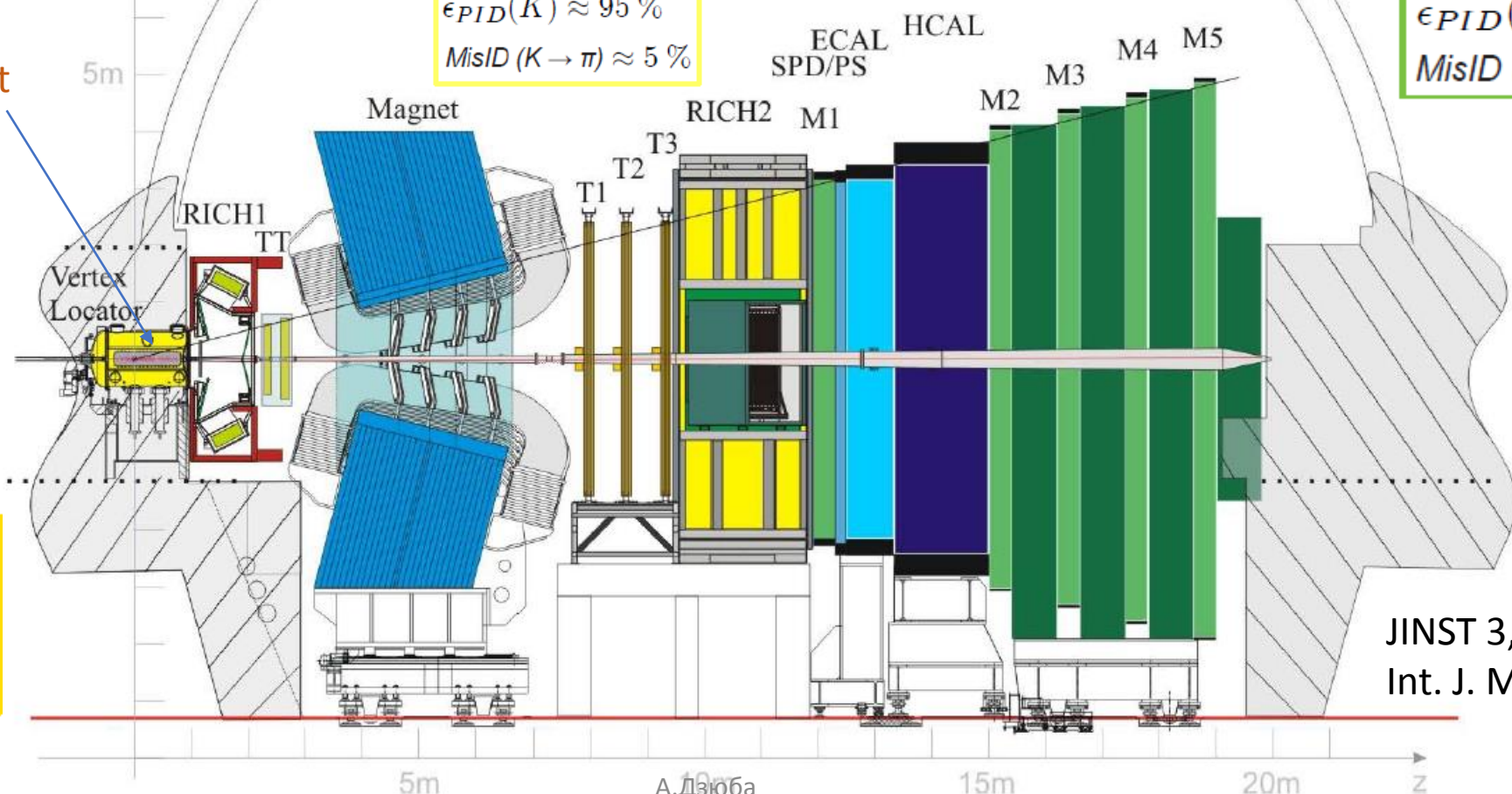
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

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

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

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

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

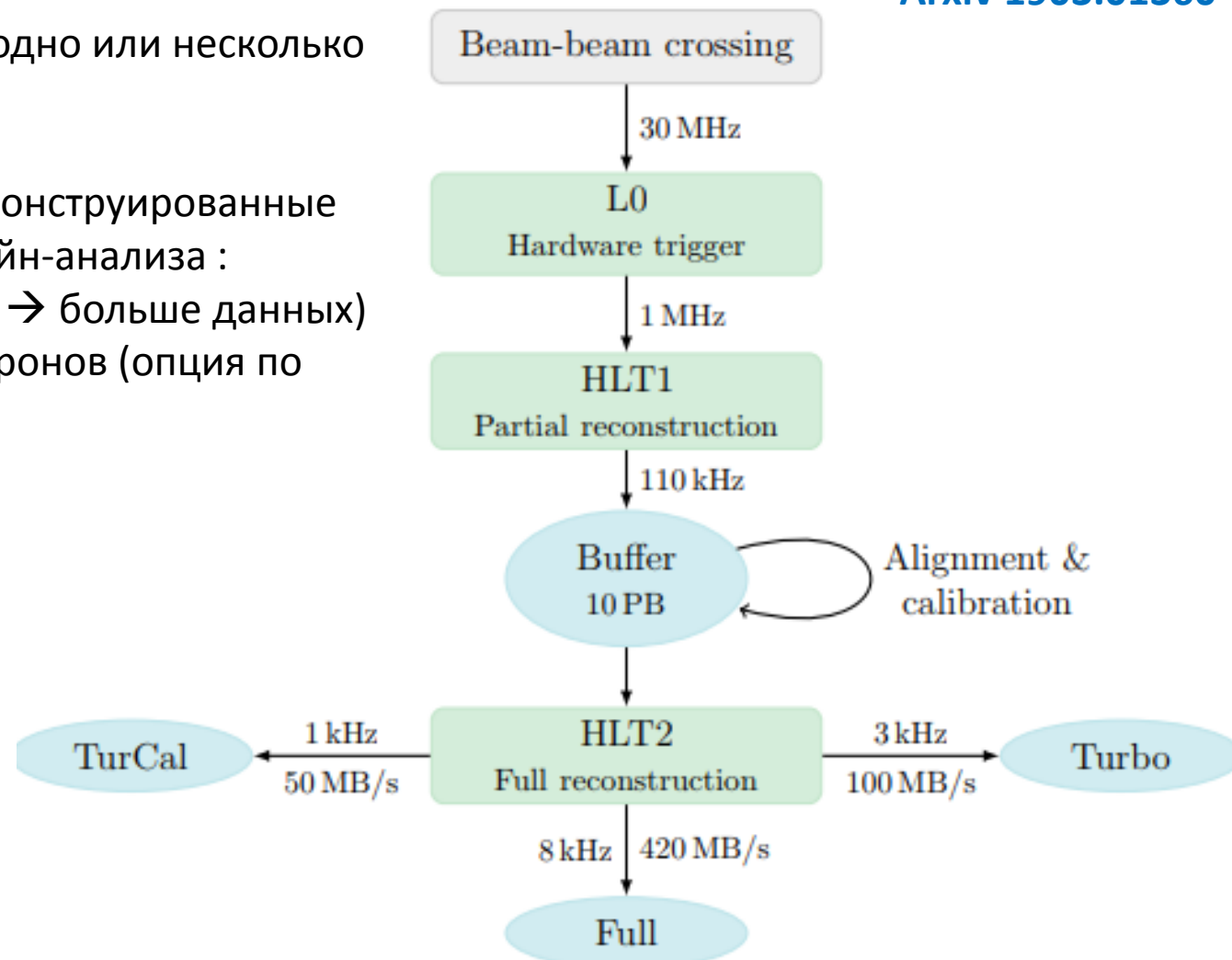
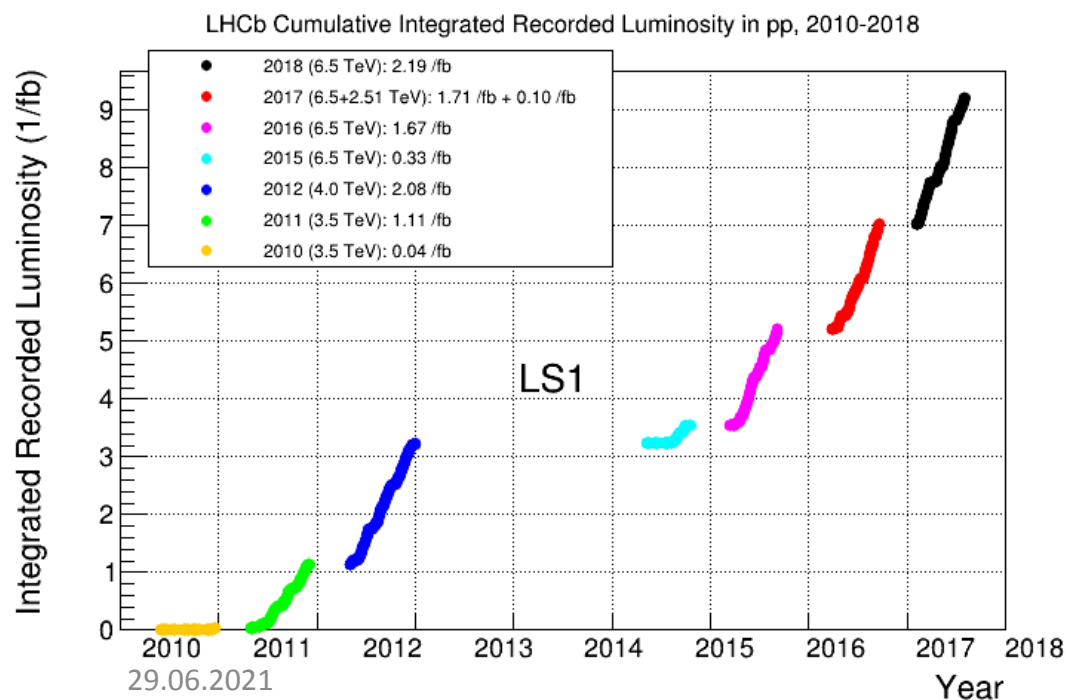


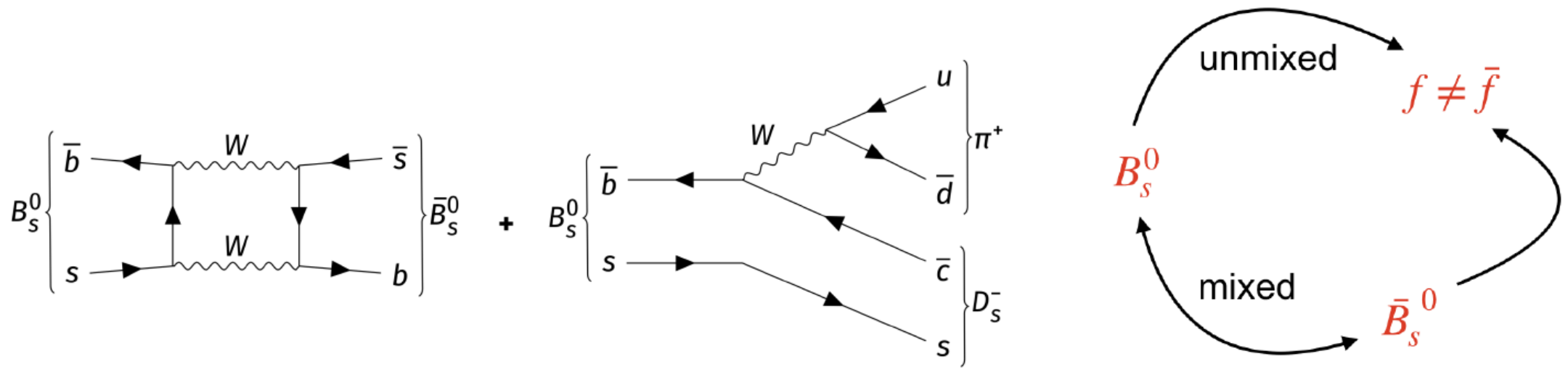
JINST 3, (2008) S08005;  
Int. J. Mod. Phys. A 30,  
(2015) 153022



# 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 офлайн-анализа :
  - Большая статистика (размер события меньше → больше данных)
  - Уже сейчас используется для очарованных адронов (опция по умолчанию в будущем)



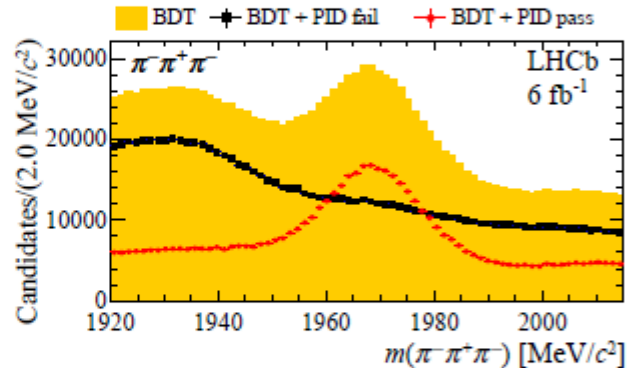
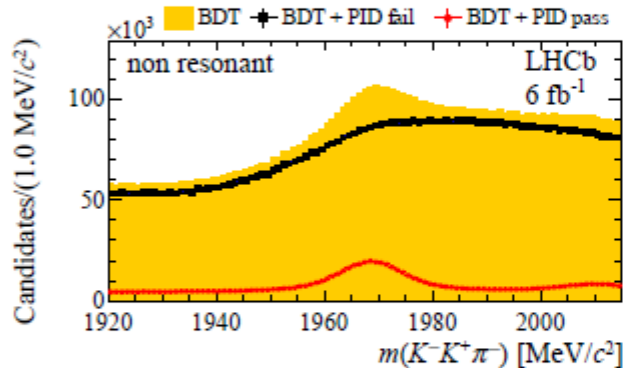
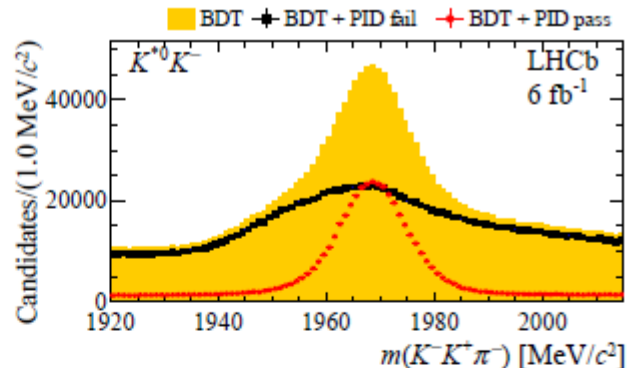
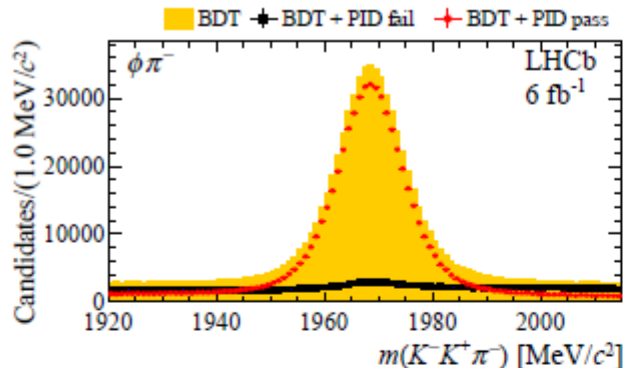


# Точное определение $\Delta m$ из осцилляций $B_s^0$



# Отбор событий

- Data: Run 2 ( $6 \text{ fb}^{-1}$ )
- Decay:  $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$
- Four  $D_s^-$  samples:
  - $D_s^- \rightarrow \phi \pi^-$
  - $D_s^- \rightarrow K^{*0} K^-$
  - $D_s^- \rightarrow (KK\pi)$  - non resonant
  - $D_s^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^-$



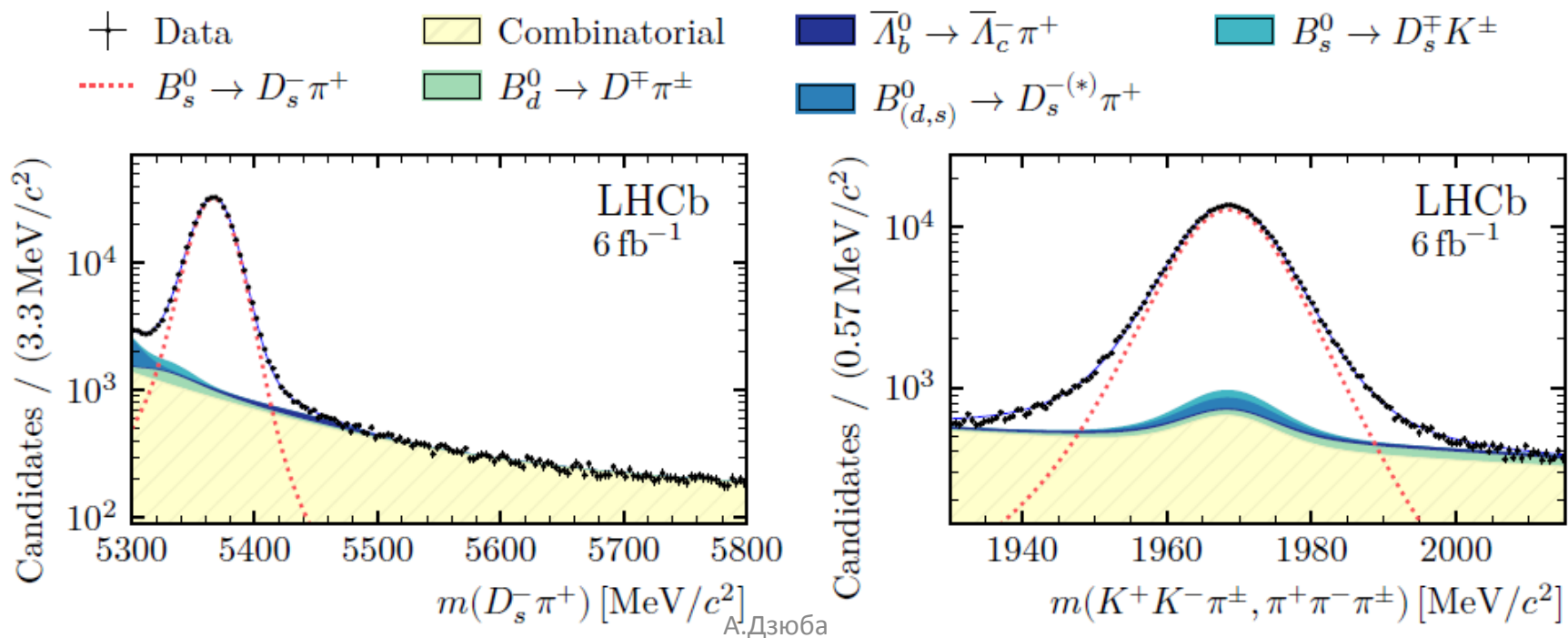
- Selection optimised to minimise any decay-time bias:
  - Cut-based preselection
  - BDT trained to suppress combinatorial background
  - Particle Identification
  - dedicated vetoes  $D^0, D^+, \bar{\Lambda}_c^-, J/\psi$ .

# Отбор событий

- Двумерная аппроксимация
- Высокая чистота сигнала (84%)
- Примерно 380к событий

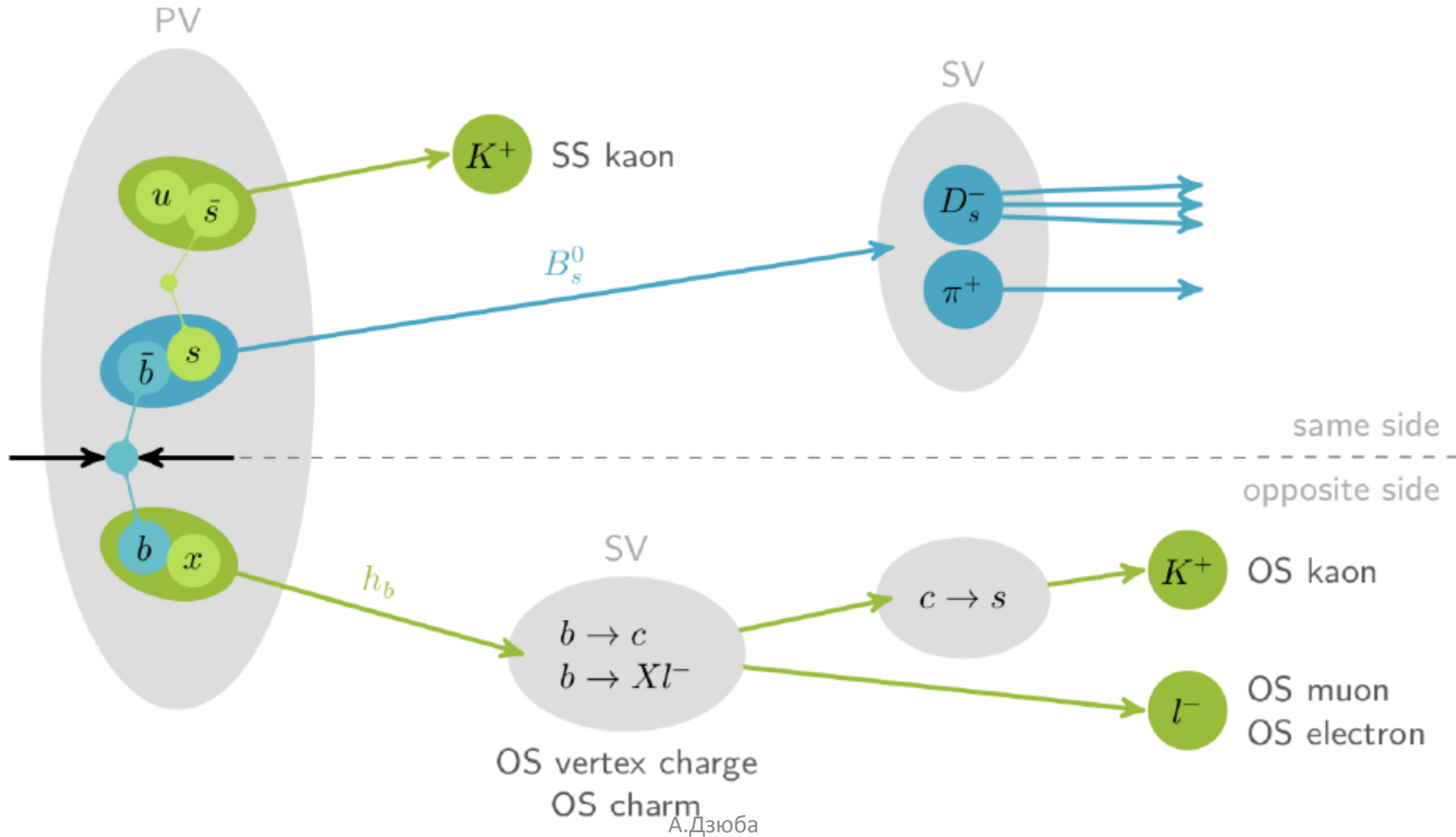
$$m(D_s^- \pi^+) \quad / \quad m(h^- h^+ h^\mp)$$

- 2 times more than in the  $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+ \pi^- \pi^+$  measurement
- 8 times more than in the 2011  $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$  measurement



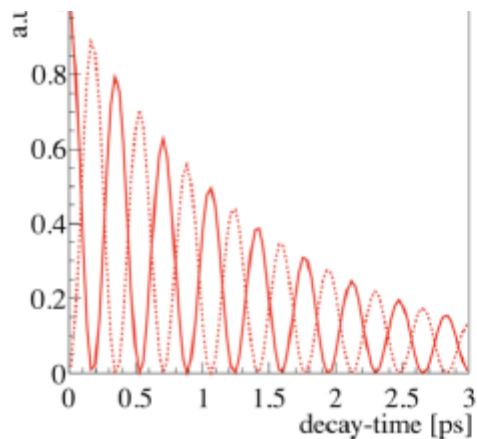
# Таггирование аромата

Tagging power:  $6.10 \pm 0.02 \pm 0.15\%$   
 $\text{tagging power} = \epsilon \times D^2 = \epsilon \times \left(1 - \frac{\#\text{wrong tag}}{\#\text{all tag}}\right)^2$   
 (effectively about 6% of candidates perfectly tagged)

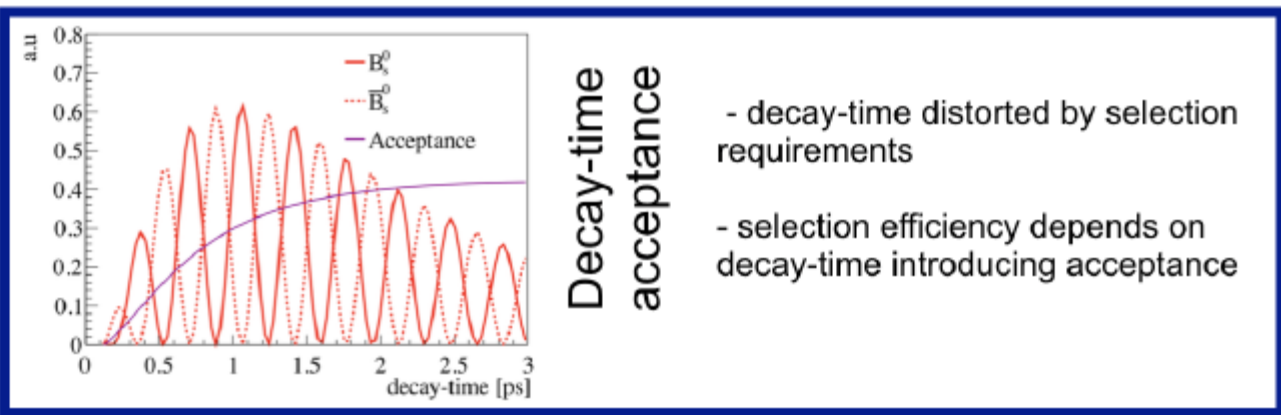


# Детекторные эффекты

### Идеальная картина

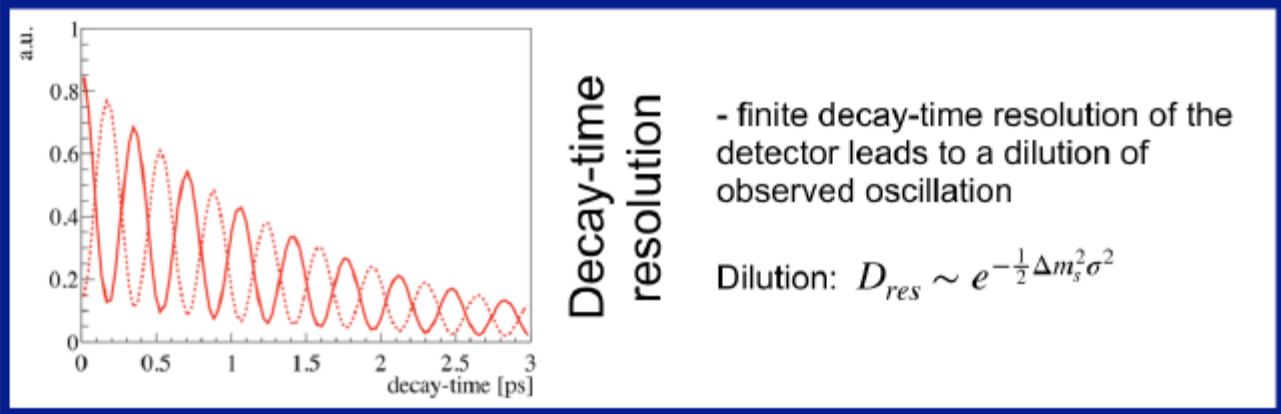


$$P(t) \sim e^{-\Gamma_s t} \left( \cosh\left(\frac{\Delta\Gamma_s t}{2}\right) \pm \cos(\Delta m_s t) \right)$$



**Decay-time acceptance**

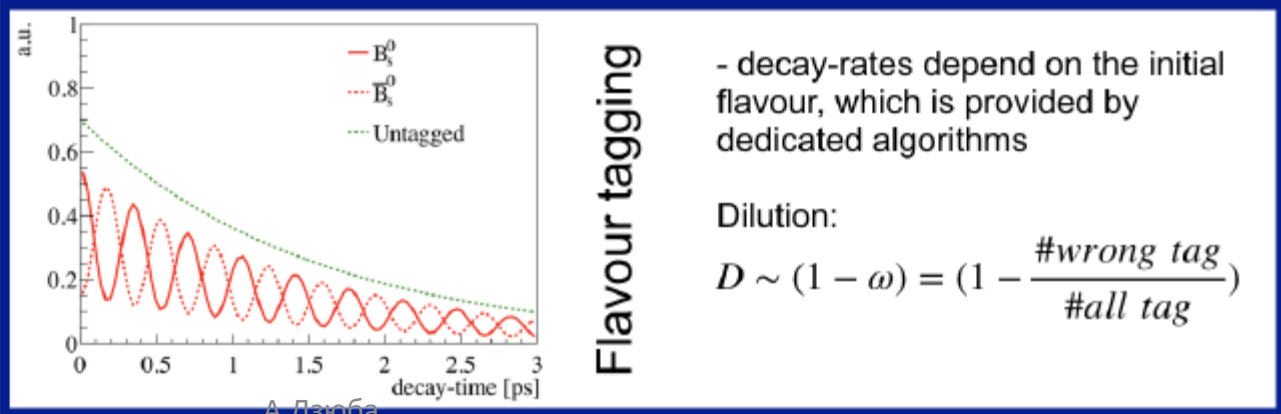
- decay-time distorted by selection requirements
- selection efficiency depends on decay-time introducing acceptance



**Decay-time resolution**

- finite decay-time resolution of the detector leads to a dilution of observed oscillation

$$\text{Dilution: } D_{res} \sim e^{-\frac{1}{2}\Delta m_s^2 \sigma^2}$$



**Flavour tagging**

- decay-rates depend on the initial flavour, which is provided by dedicated algorithms

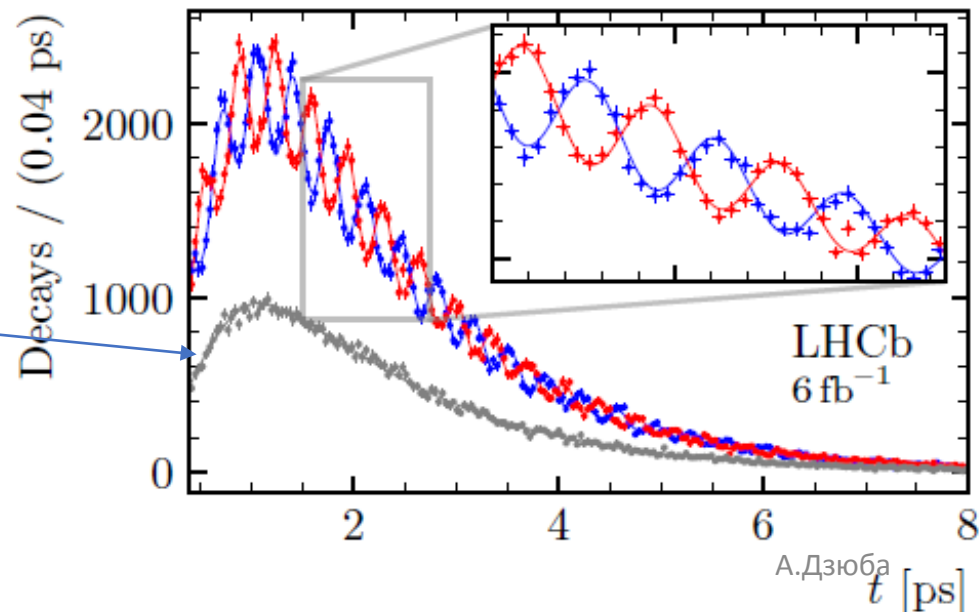
$$\text{Dilution: } D \sim (1 - \omega) = \left(1 - \frac{\#wrong\ tag}{\#all\ tag}\right)$$

Результат:  $\Delta m_s = 17.7683 \pm 0.0051(stat) \pm 0.0032(syst) ps^{-1}$ ,

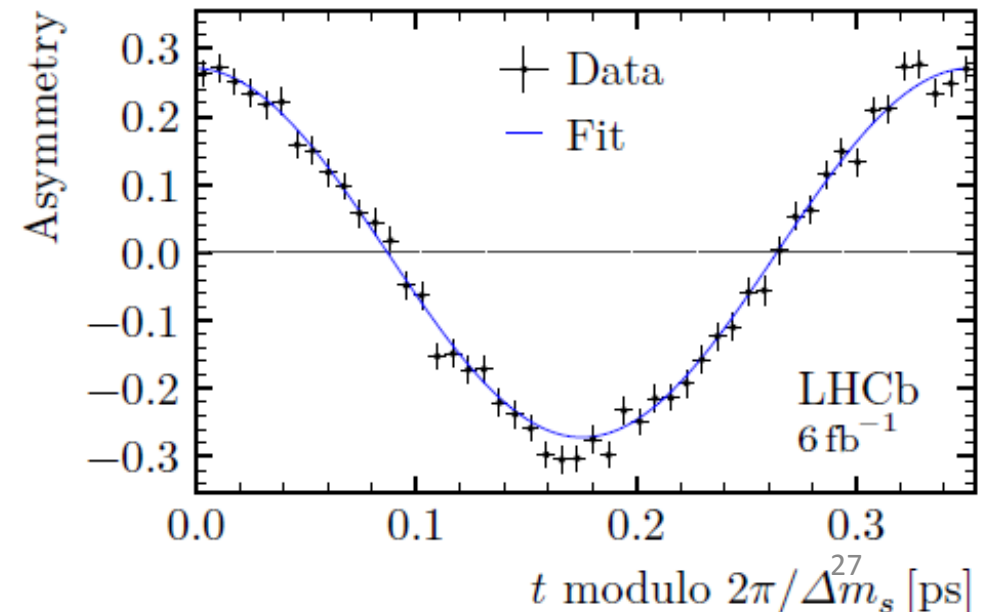
- Время-зависимая асимметрия для данных, для которых есть решение таггера

$$A(t) = \frac{N(B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+, t) - N(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+, t)}{N(B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+, t) + N(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+, t)}$$

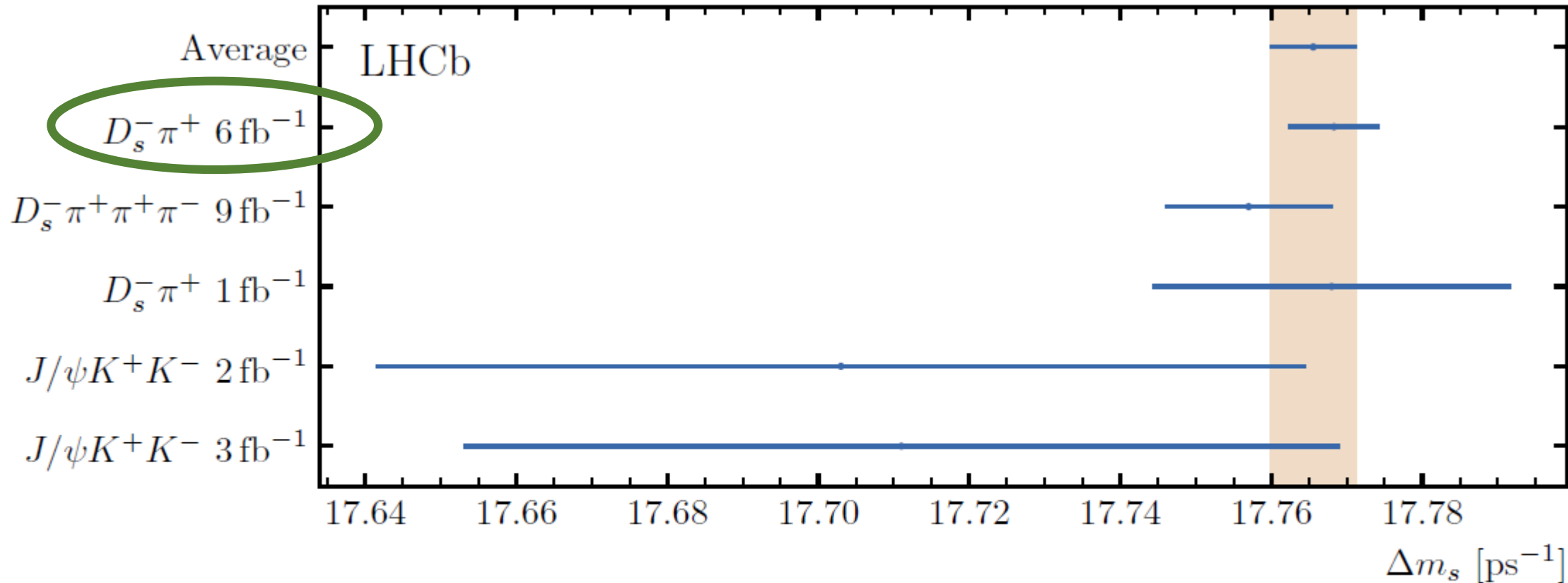
—  $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$  —  $\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$  — Untagged



Данные для которых отсутствует метка не демонстрируют паттерна осцилляции



# Сравнение с предыдущими результатами и **СМ**

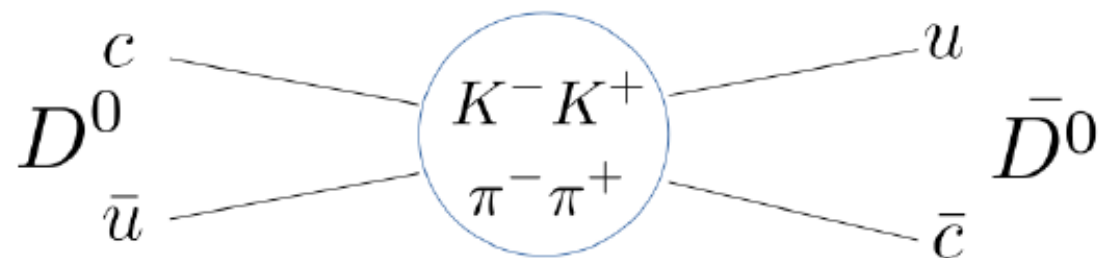
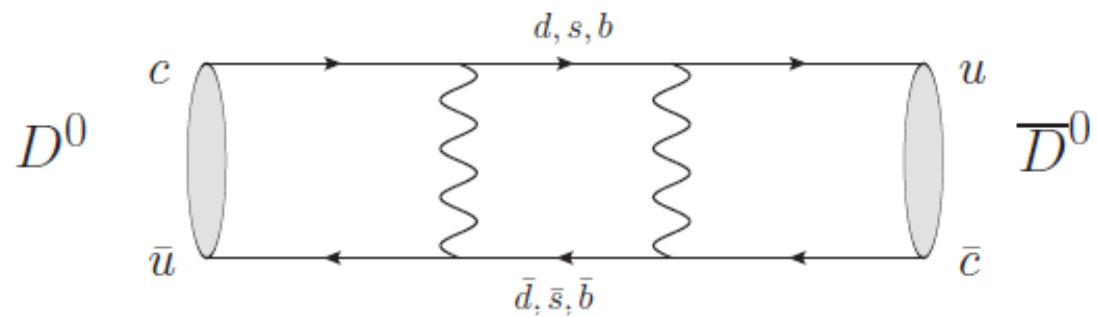


- Комбинация всех измерений LHCb
- Новый результат определяет среднее значение

$$\Delta m_s^{SM} = 18.4_{-1.2}^{+0.7} \text{ ps}^{-1}$$

Согласие с предсказаниями СМ

$$\Delta m_s = 17.7656 \pm 0.0057 \text{ ps}^{-1}$$



Обнаружение  $\Delta m \neq 0$  для  $D^0$  мезонов



# Мотивация

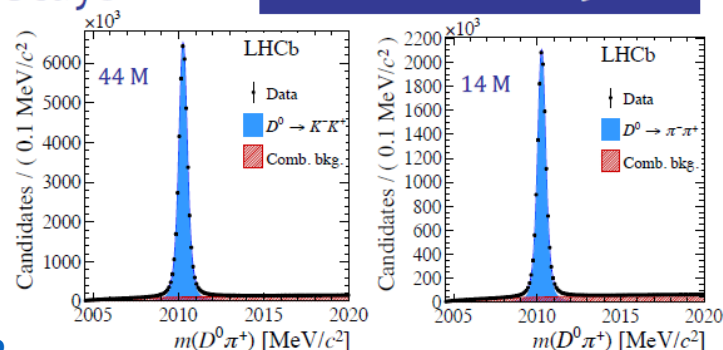
First observation of CPV in charm decays

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

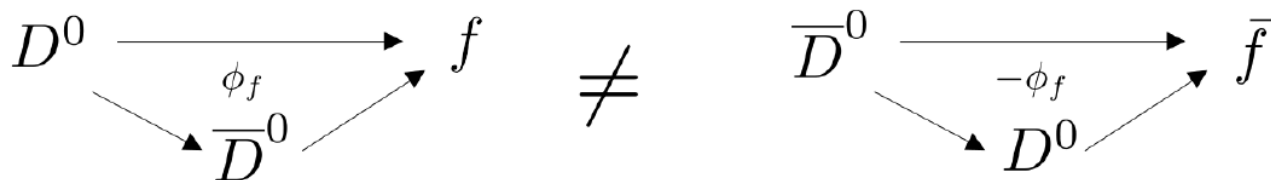
5.3 standard deviations from zero

[Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 211803](#)

LHCb-PAPER-2019-006



Interference of mixing and decay



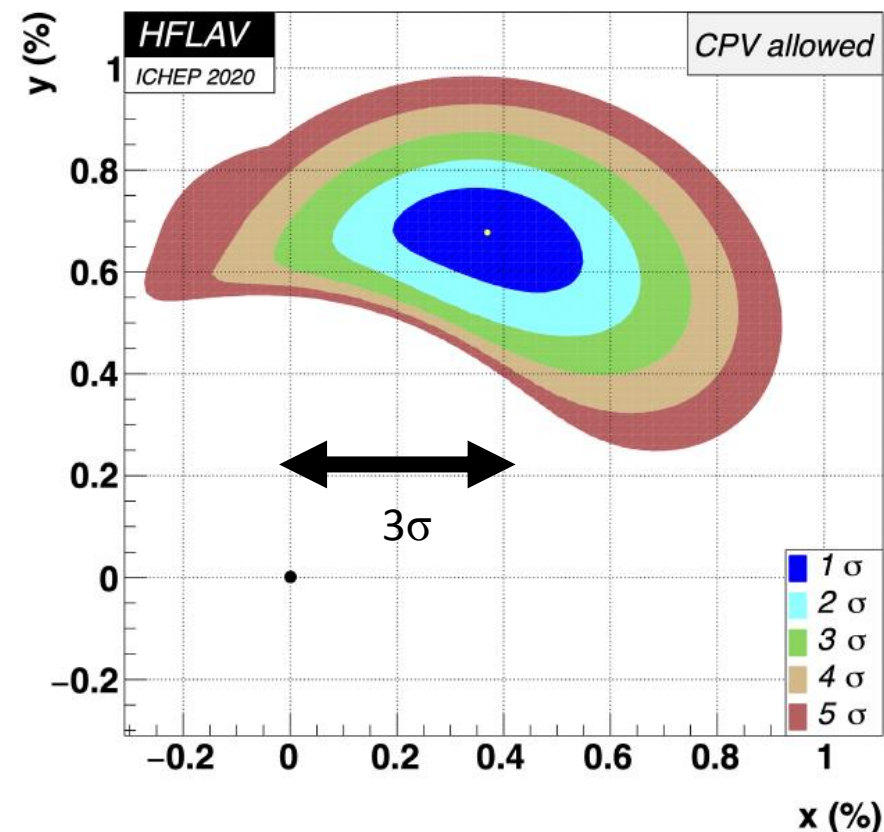
→ CP violation if weak phase  $\phi_f = \arg\left(\frac{q}{p} \frac{\bar{A}_f}{A_f}\right) \neq 0$

( $\phi_f$  to good approximation independent of final state).

CP asymmetry example:  $A \propto x \sin(\phi) (|\frac{q}{p}| - |\frac{p}{q}|) + y \cos \phi (|\frac{q}{p}| + |\frac{p}{q}|)$

→ Precise knowledge of  $x$  and  $y$  important!

А.Дзюба



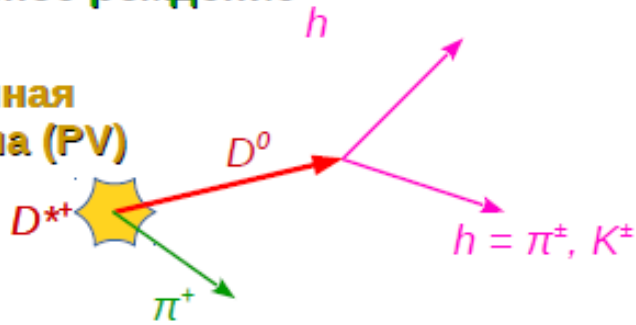
$$x = \frac{\Delta m}{\Gamma} = 0.37 \pm 0.12,$$

$$y = \frac{\Delta \Gamma}{2\Gamma} = 0.68^{+0.06}_{-0.07}.$$

# Таггирование аромата

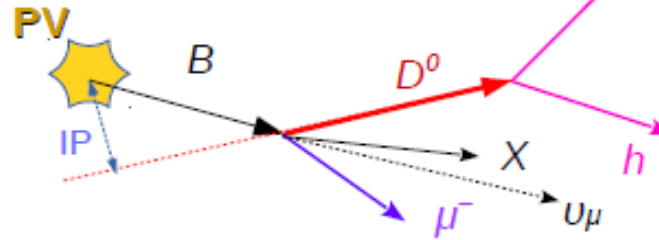
Первичное рождение

Первичная вершина (PV)



Больше скорость

Вторичное рождение (полулептонный)



Выше эффективность

## Смешивание & CP нарушение

Right sign (RS)  $D^* / K\pi^+$ : 1.7M

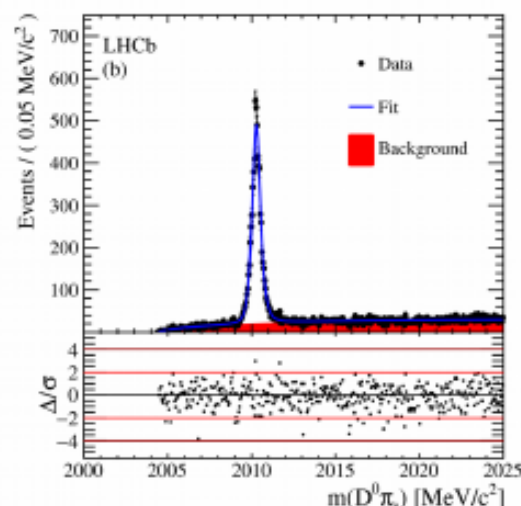
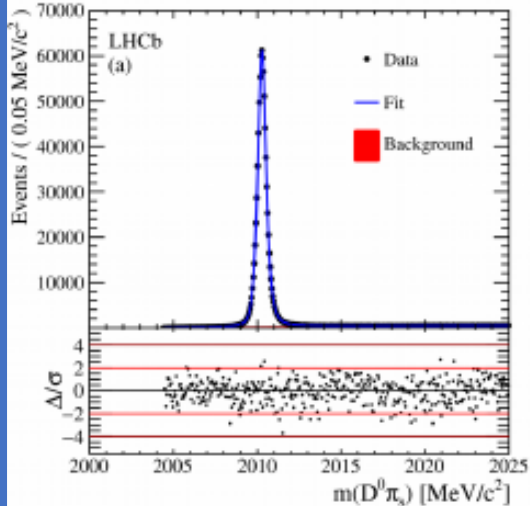
Wrong sign (WS)  $D^* / K\pi^-$ : 6.7k

–  $D^0 \rightarrow K\pi$  с двойным таггированием

– RS когда нет смешивания И Кабиббо-разрешенный (CF) распад

– WS когда [смешивание И CF] ИЛИ [нет смешивания И дважды-Кабиббо-подавленный распад]

– Все 3 типа CPV (прямое, в смешивании, в интерференции)



2017-10-10

PR D95 (2017) 052004

Семинар ОФРЭ

14

Идея метода на примере RS/WS анализа

Идея метода на примере RS/WS анализа

# Смешивание & CPV

– Т.к. параметры смешивания ( $x'$  и  $y'$ ) малы, отношение  $WS / RS$  может быть разложено в ряд по  $(t/\tau)$ :

$$R(t)^\pm = R_D^\pm + \sqrt{R_D^\pm} y'^\pm \left(\frac{t}{\tau}\right) + \frac{(x'^\pm)^2 + (y'^\pm)^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2,$$

$$R_D^+ = |\mathcal{A}_{\bar{f}}/\mathcal{A}_f|^2 \quad R_D^- = |\bar{\mathcal{A}}_f/\bar{\mathcal{A}}_{\bar{f}}|^2 \quad R_D^+ \neq R_D^- \Rightarrow \text{Прямое CP нарушение}$$

$x'^+ \neq x'^-$   
 $y'^+ \neq y'^-$   $\Rightarrow$  CP нарушение при смешивании и в интерференции

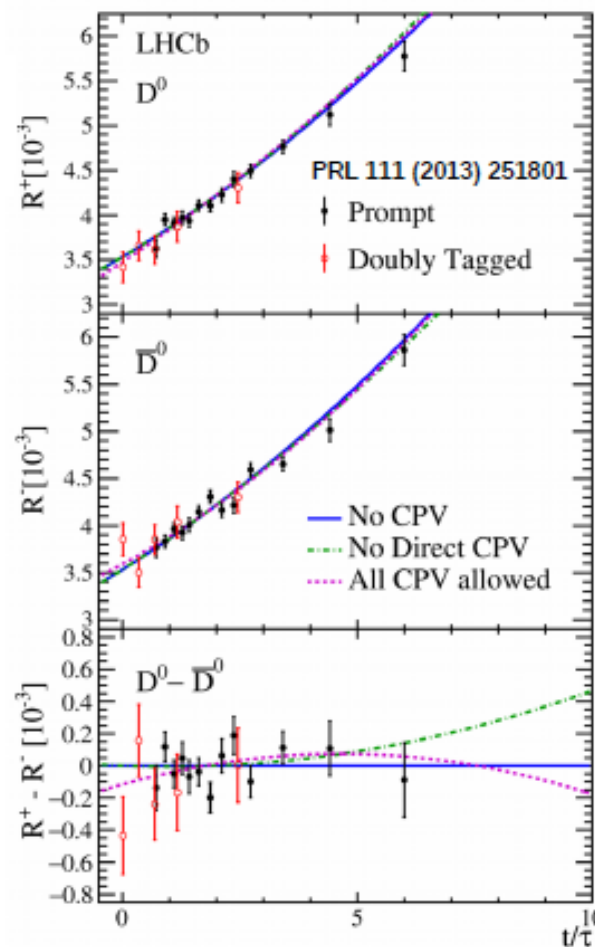
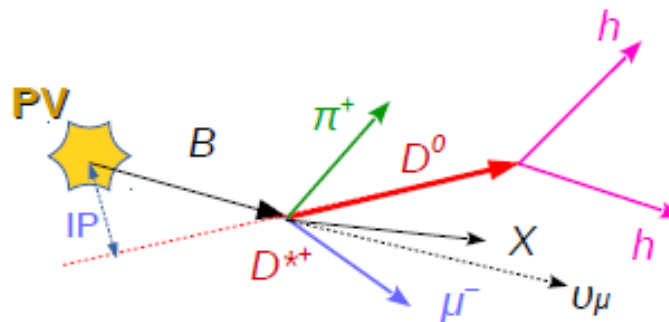
– Результат при включенном CPV вкладе

PR D95 (2017) 052004

Параметр	Двойной+Первичный	Первичный
$R_D^+ [10^{-3}]$	$3.474 \pm 0.081$	$3.545 \pm 0.095$
$(x'^+)^2 [10^{-4}]$	$0.11 \pm 0.65$	$0.49 \pm 0.70$
$y'^+ [10^{-3}]$	$5.97 \pm 1.25$	$5.1 \pm 1.4$
$R_D^- [10^{-3}]$	$3.591 \pm 0.081$	$3.591 \pm 0.090$
$(x'^-)^2 [10^{-4}]$	$0.61 \pm 0.61$	$0.60 \pm 0.68$
$y'^- [10^{-3}]$	$4.50 \pm 1.21$	$4.5 \pm 1.4$

– Высокое соотношение сигнал-шум и «дополняющие» покрытие по времени жизни позволяет улучшить точность на 10-20% процентов, добавив 1-2% данных

– Не обнаружено указаний на CP нарушения



Идея метода на примере RS/WS анализа

Идея метода на примере RS/WS анализа

Strong phase difference  $\delta$  rotates  $x$  and  $y$ .

$$\frac{A(D^0 \rightarrow K^+\pi^-)}{A(\bar{D}^0 \rightarrow K^+\pi^-)} = -\sqrt{R_D} e^{-i\delta}$$

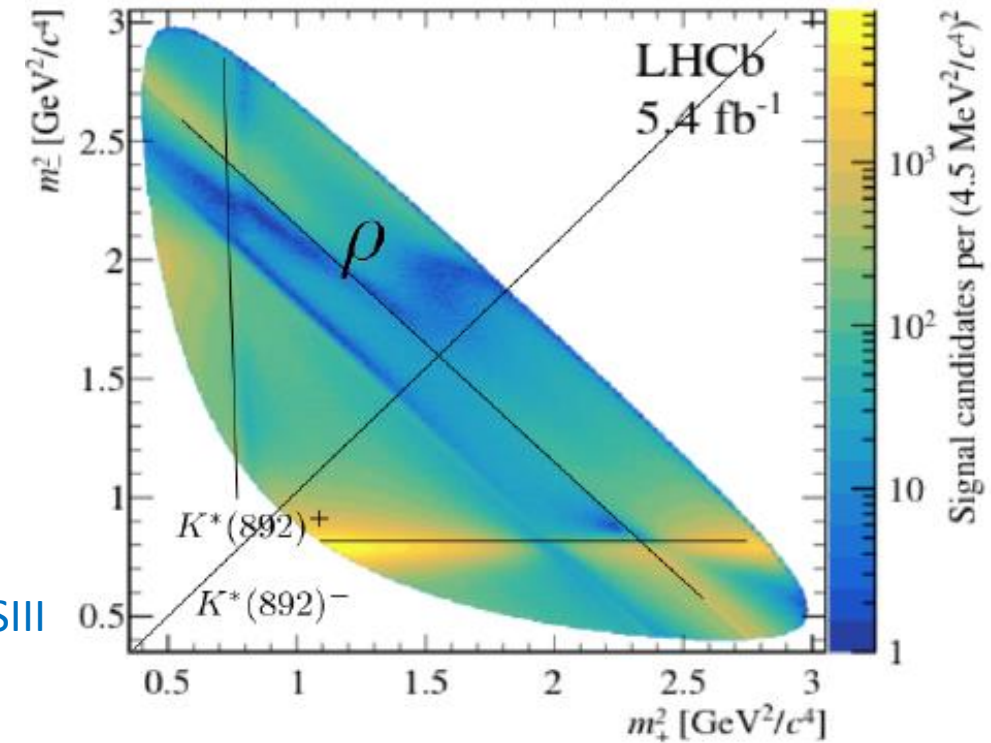
$$y' = y \cos \delta - x \sin \delta$$

$$x' = x \cos \delta + y \sin \delta$$

$$\cos \delta \approx 1$$

# Трехчастичные распады $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$

- Временная эволюция диаграммы Далица
- Богатая резонансная структура
- Интерференция Кабиббо-разрешенных и дважды-Кабиббо-подавленных амплитуд
- Осцилляции «перекидывают событие относительно диагонали»
- Чувствительность к параметрам CP-нарушения



Данные CLEO и BESIII

$$R_b(t) = \frac{N_{-b}(t)}{N_b(t)}, \quad R_b(0) = r_b$$

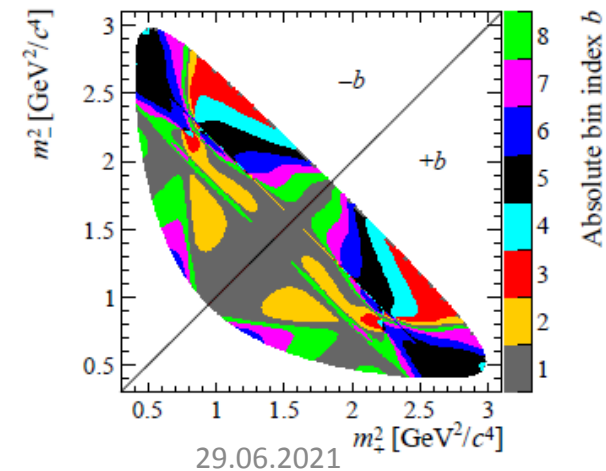
$$R_b(t) \approx r_b - \frac{t}{\tau} \sqrt{r_b} [(1 - r_b)c_b y - (1 + r_b)s_b x] \text{ (no CPV).}$$

Интервалы

Фит при t=0

Свободные параметры

$$D^0 \begin{cases} m_+^2 \equiv m^2(K_S^0 \pi^+) \\ m_-^2 \equiv m^2(K_S^0 \pi^-) \end{cases}$$





# Набор данных и отбор событий

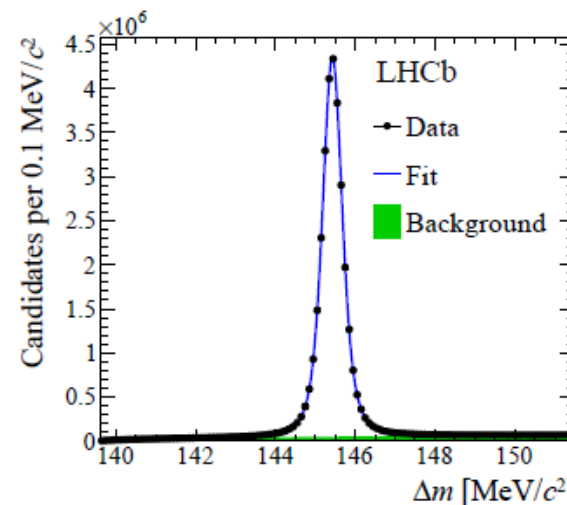
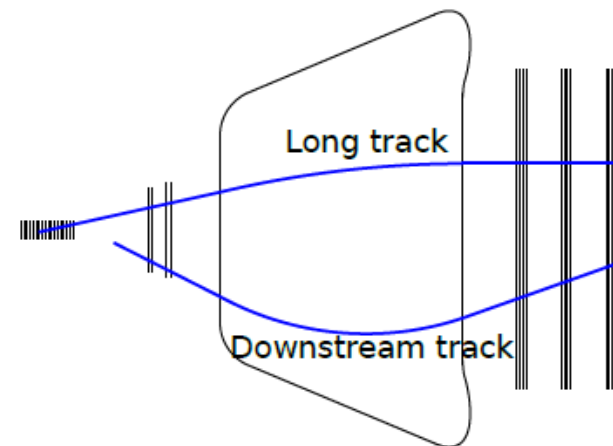
- Данные второго этапа работы БАК
- 2016-2018,  $5.4 \text{ fb}^{-1}$
- Два способа выделения  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- Турбо-режим – отбор и запись частей событий-кандидатов на триггерном этапе
- Отборы на подавление комбинаторного фона и вторичной компоненты
- Малый фон
- Сигнал определяется аппроксимацией

$$\Delta m = m(D^{*+}) - m(D^0).$$

31 Million signal  $D^{*+} \rightarrow D^0(\rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-) \pi^+$ ,  
 $\rightarrow 30$  times more  $D^{*+}$  than in Run 1 ( $3 \text{ fb}^{-1}$ )

29.06.2021

А.Дзюба



Не следует путать эту величину  $\Delta m$  с искомой разницей масс!

Фит для каждого бина по аромату, времени и диаграммы Далица

# Формализм включающий CP-нарушение

$$R_{bj}^{\pm} \approx \frac{r_b + r_b \frac{\langle t^2 \rangle_j}{4} \operatorname{Re}(z_{CP}^2 - \Delta z^2) + \frac{\langle t^2 \rangle_j}{4} |z_{CP} \pm \Delta z|^2 + \sqrt{r_b} \langle t \rangle_j \operatorname{Re}[X_b^*(z_{CP} \pm \Delta z)]}{1 + \frac{\langle t^2 \rangle_j}{4} \operatorname{Re}(z_{CP}^2 - \Delta z^2) + r_b \frac{\langle t^2 \rangle_j}{4} |z_{CP} \pm \Delta z|^2 + \sqrt{r_b} \langle t \rangle_j \operatorname{Re}[X_b(z_{CP} \pm \Delta z)]}$$

Интервалы по времени

Фит при  $t=0$

Данные CLEO и BESIII

«Бин» на диаграмме Далица

$$z_{CP} \pm \Delta z \equiv - (q/p)^{\pm 1} (y + ix)$$

Свободные параметры

$$x_{CP} = \operatorname{Im}(z_{CP})$$

$$y_{CP} = \operatorname{Re}(z_{CP})$$

$$\Delta x = \operatorname{Im}(\Delta z)$$

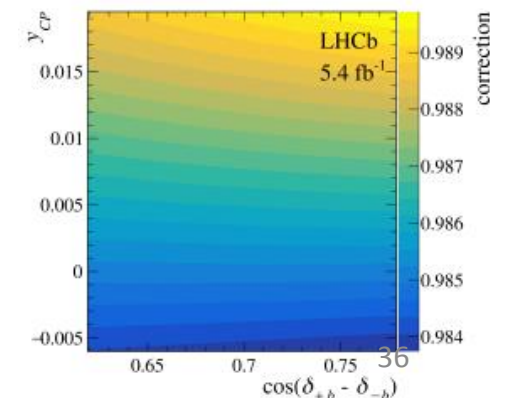
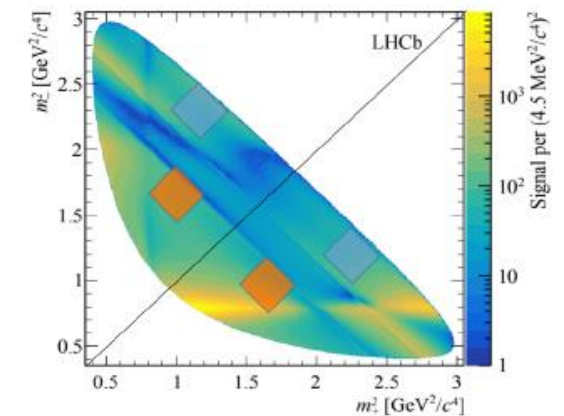
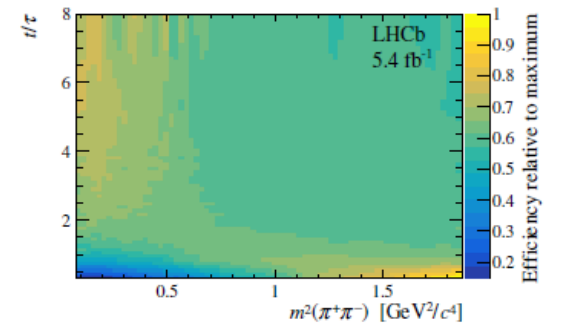
$$\Delta y = \operatorname{Re}(\Delta z)$$

Без CP нарушения

Параметры CP нарушения

# Коррекция на аксептанс по $t$

- Эффект зависимости массы пионной пары от времени жизни очарованного мезона
- Если выбирать квадратные «бины» симметрично относительно биссектрисы, то для таких бинов эффект по  $\chi_{CP}$  будет нивелироваться (смешивание перебрасывает событие между такими «бинами»)
- Асимметрия для таких «бинов» вычисляется из известных  $\gamma_{CP}$  и разницы адронных фаз, а остаточный эффект интерпретируется как эффект аксептанса
- Не требует полного Монте-Карло!
- Аليдация при помощи упрощенных псевдоэкспериментов

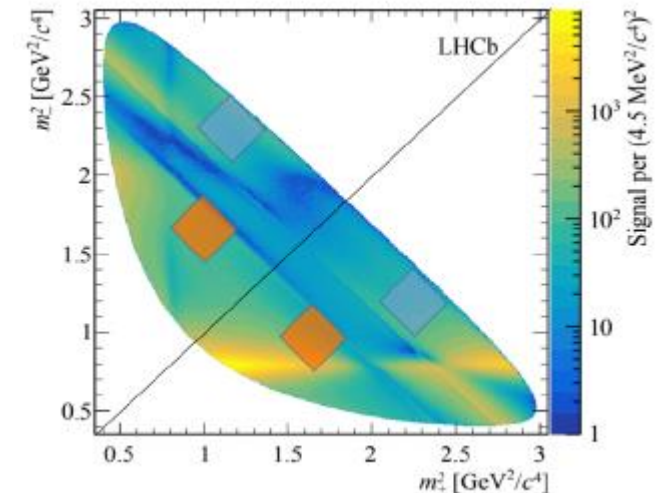




# Асимметрию детектирования $\pi^+\pi^-$ $\epsilon(p, \pi^+) \neq \epsilon(p, \pi^-)$ .

Импульс зависит от координаты на диаграмме  
Далица

Поправка измеряется из Кабиббо-разрешенных  
распадов



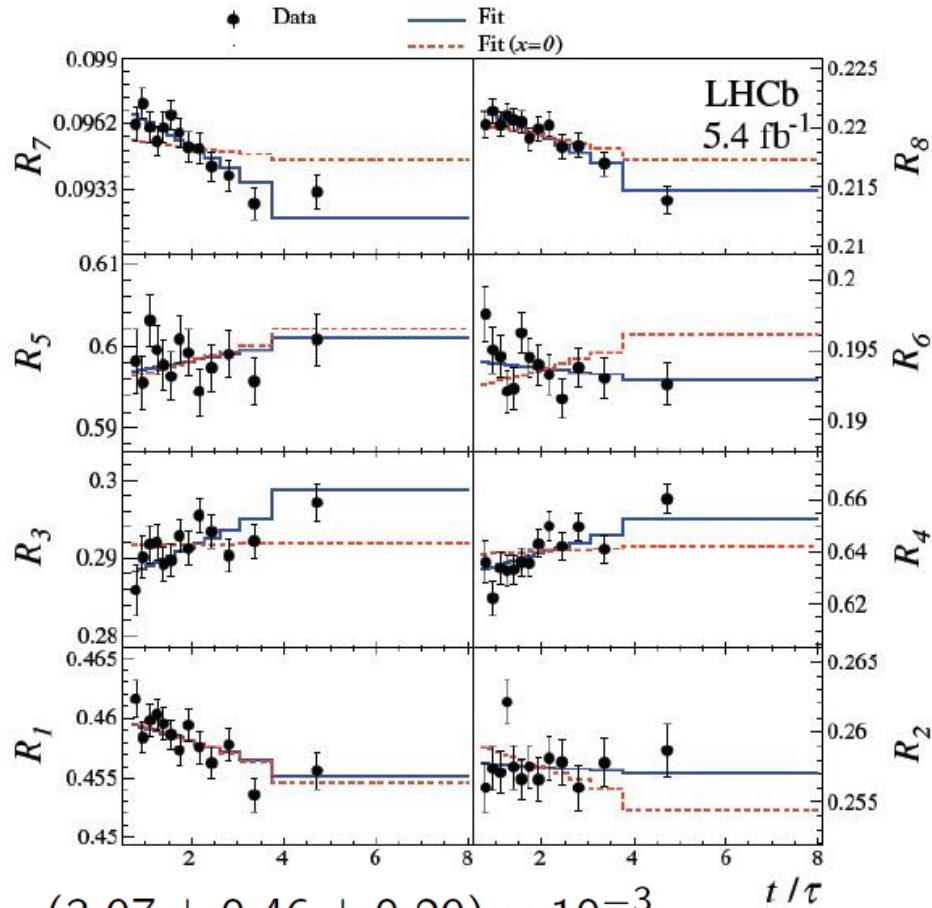
$$A_{\text{meas}}(D_s^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-) = A_{\text{det}}(\pi^+\pi^-) + A_{\text{det}}(\pi^+) + A_{\text{prod}}(D_s^+) + A_{\text{trigger}}(D_s^+),$$

$$A_{\text{meas}}(D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+) = A_{\text{det}}(\pi^+) + A_{\text{prod}}(D_s^+) + A_{\text{trigger}}(D_s^+).$$

Время-зависимая поправка порядка  $2 \cdot 10^{-3}$

# Зависимость от времени для $R_i$ и $R_i^+ - R_i^-$

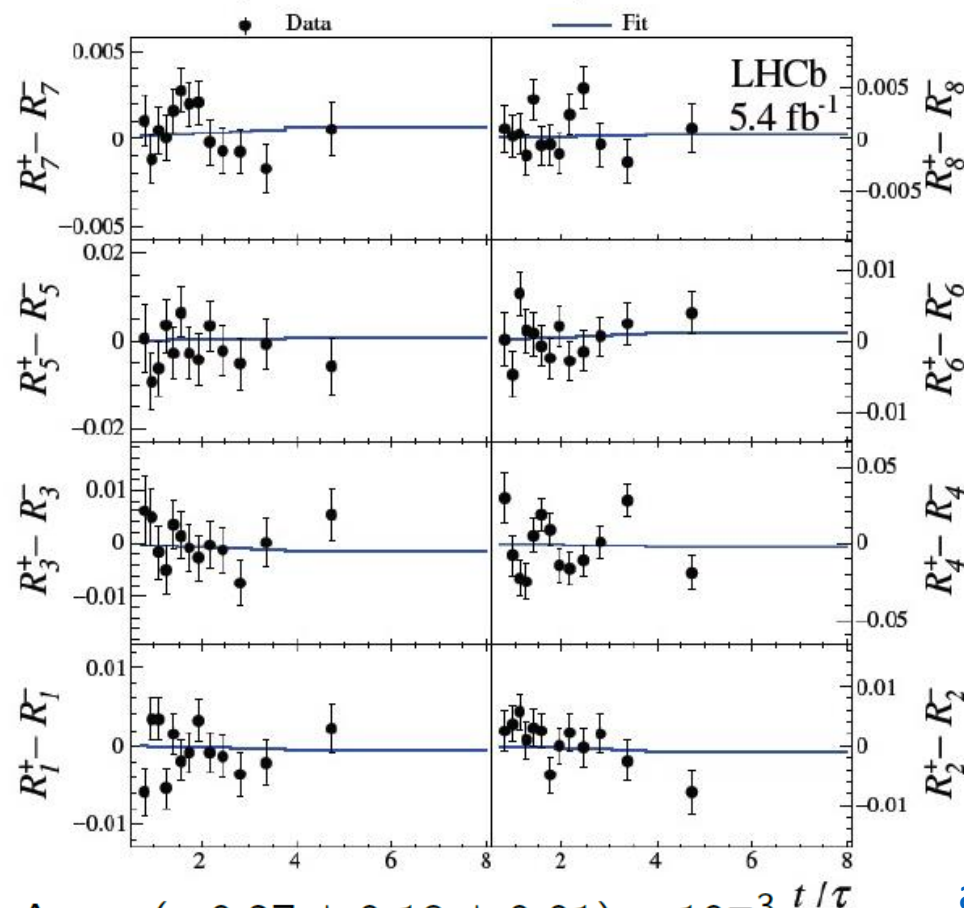
Отклонения от постоянных значений из-за смешивания



$$\chi_{CP} = (3.97 \pm 0.46 \pm 0.29) \times 10^{-3}$$

$$\gamma_{CP} = (4.59 \pm 1.20 \pm 0.85) \times 10^{-3}$$

Отклонения от постоянных значений из-за CP-нарушения

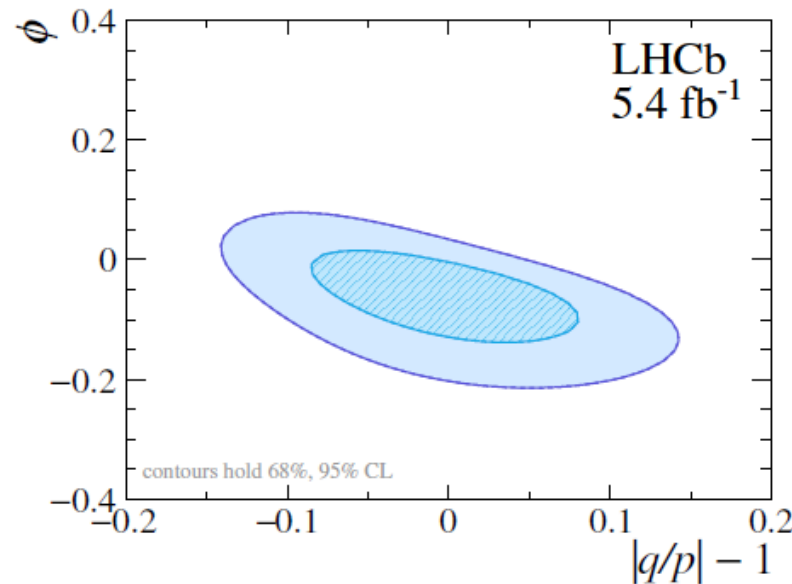
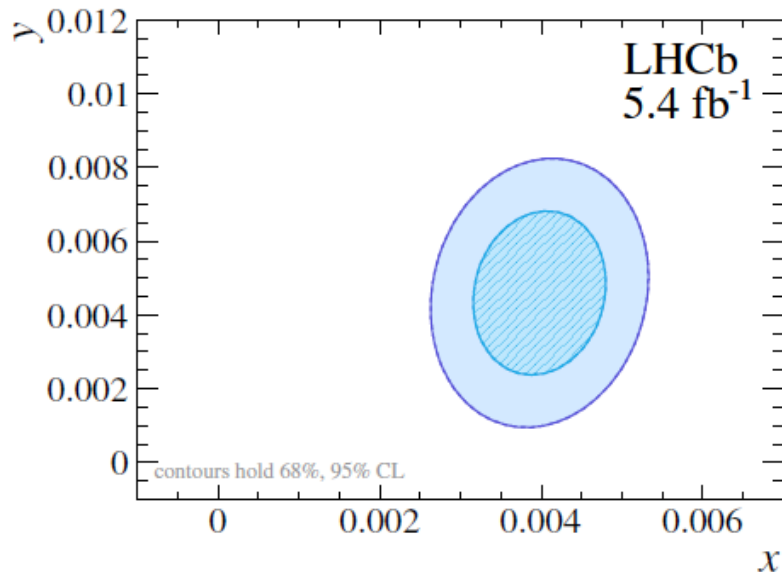


$$\Delta x = (-0.27 \pm 0.18 \pm 0.01) \times 10^{-3}$$

$$\Delta y = (0.20 \pm 0.36 \pm 0.13) \times 10^{-3}$$

[arXiv:2106.03744](https://arxiv.org/abs/2106.03744)

# Корреляция между параметрами



Результаты  
определяют  
мировые значения

Parameter	Value
$x [10^{-3}]$	$3.98^{+0.56}_{-0.54}$
$y [10^{-3}]$	$4.6^{+1.5}_{-1.4}$
$ q/p $	$0.996 \pm 0.052$
$\phi$	$-0.056^{+0.047}_{-0.051}$

- Первое наблюдение ненулевой разницы масс  $D_1$  и  $D_2$
- **Статистическая значимость наблюдения  $\Delta m \neq 0$  7 стандартных отклонений**
- Нет указаний на косвенное CP-нарушение ( $D_1$  и  $D_2$  соответствуют  $D^0$  и  $\bar{D}^0$  с вероятностью 50%)
- Нет указаний на CP-нарушение в интерференции процессов смешивания и распадов

