



# Прецизионное измерение параметров $CP$ -нарушения в распадах прелестных мезонов в эксперименте LHCb

Алексей Дзюба, ЛБФ ОФВЭ НИЦ «КИ» – ПИЯФ

Семинар ОФВЭ, 2024-03-05

**Доклад основан на работах LHCb:**

1. Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801
2. Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802
3. Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 171802

# План доклада

- $CP$  нарушение в адронном секторе Стандартной Модели и смешивание электрически-нейтральных мезонов
  - Небольшой обзор
  - Мотивация  $\sin(2\beta)$  и  $\phi_s$
- Эксперимент LHCb:
  - Критерии отбора полезных событий
  - Выделение сигнала от распадов  $B$  мезонов
  - Эффективности, разрешение по времени жизни и таггинг аромата  $B$  мезона
- Новые измерения LHCb:
  - $\sin(2\beta)$  из распадов  $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$
  - $\phi_s$  из распада  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$
  - $\phi_s$  из распада  $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$

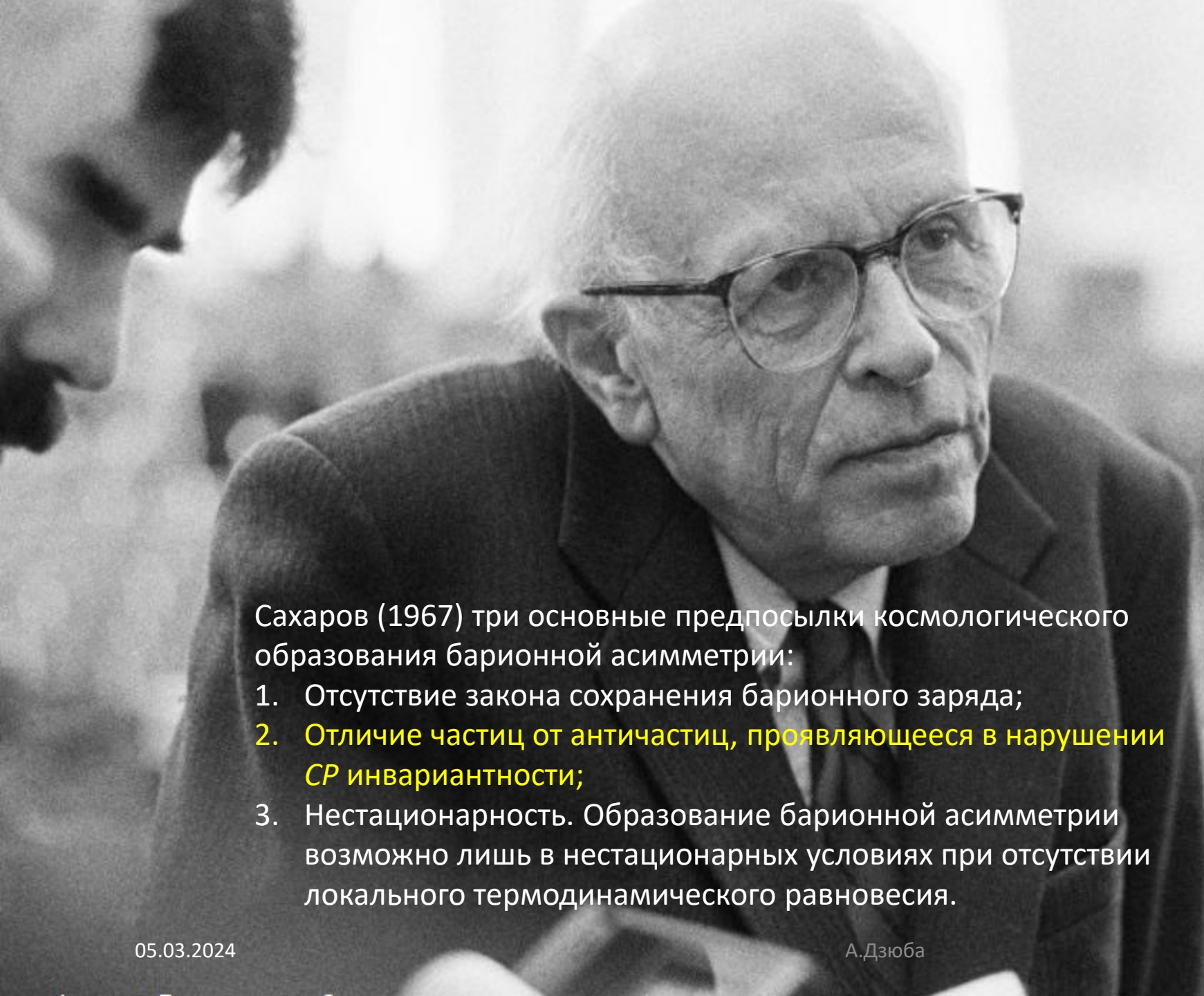
# Литература + видео

- *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, Agnieszka Dziurda , Sascha Stahl ([Семинар ЦЕРН](#))
- Смешивание электрически нейтральных мезонов. Новые результаты LHCb, А.Д. ([Семинар ОФВЭ ПИЯФ](#))
- Measurements of  $\sin(2\beta)$  and  $\phi_s$  with the full LHCb data sample, Peilian Li, Vukan Jevtic ([Семинар ЦЕРН](#))

# $CP$ -нарушение в кварковом секторе СМ

# $P$ , $C$ и $T$ , и $CPT$ -теорема

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



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

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

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

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

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

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

# Матрица кваркового смешивания \ ККМ \ СКМ

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

Выбор нижних состояний - соглашение

Собственные состояния по отношению к слабому взаимодействию

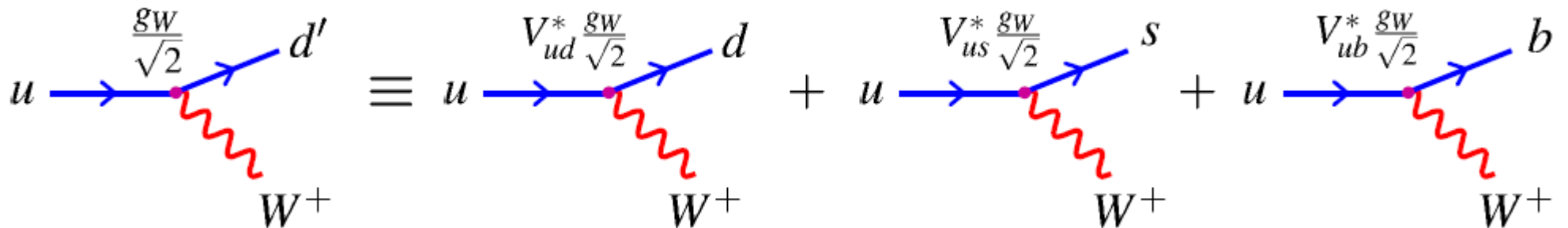
**СКМ Matrix**

Массовые собственные состояния

(Cabibbo, Kobayashi, Maskawa)

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

Фейнмановские вершины



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

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

Три угла смешивания

и комплексная фаза:

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

Иерархия элементов \ 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

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

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

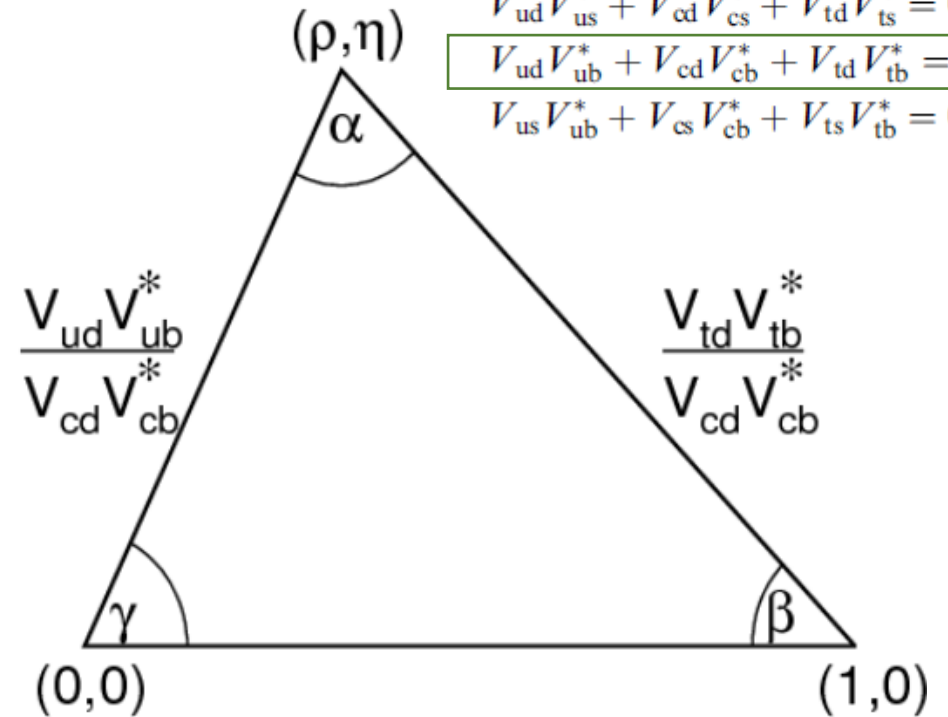
Треугольники унитарности (6 штук)

Следствие ненулевой комплексной фазы

Площади всех треугольников одинаковы **2J**

(Инвариант Ярлског)

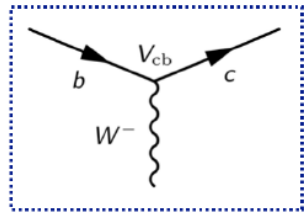
$$J = c_{12} c_{13}^2 c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \approx 3 \cdot 10^{-5}$$



Проверка унитарности – проверка Стандартной Модели ФЭЧ

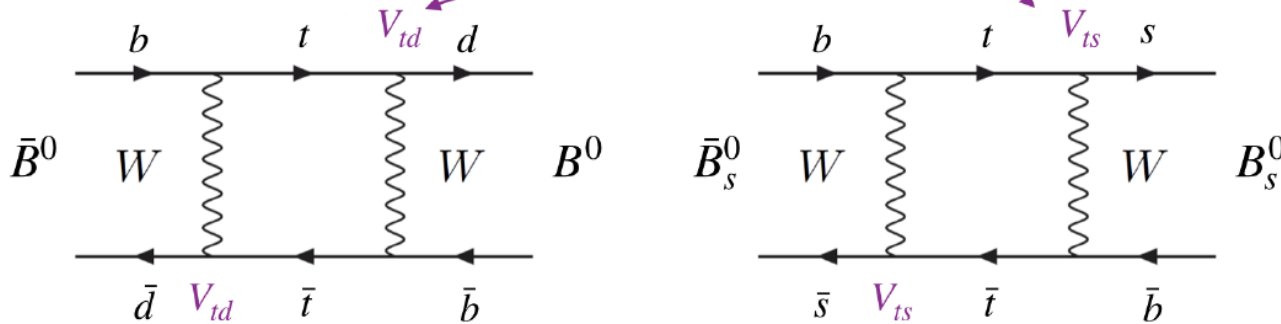
# Измерение коэффициентов ККМ-матрицы

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} n \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} p & K \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} \pi & B \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} \pi \\ D \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} \pi & D \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} K & B \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} D \\ B^0 \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} \bar{B}^0 & B_s^0 \left\{ \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W \\ \nu \end{array} \right\} \bar{B}_s^0 & t \begin{array}{c} \bar{\nu} \\ W^+ \\ b \end{array} \end{pmatrix}$$

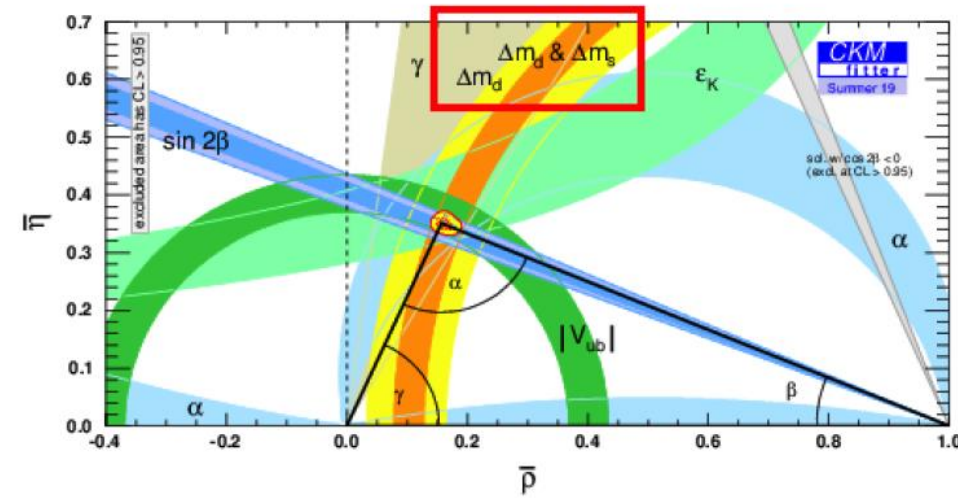


charged-current weak interaction

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



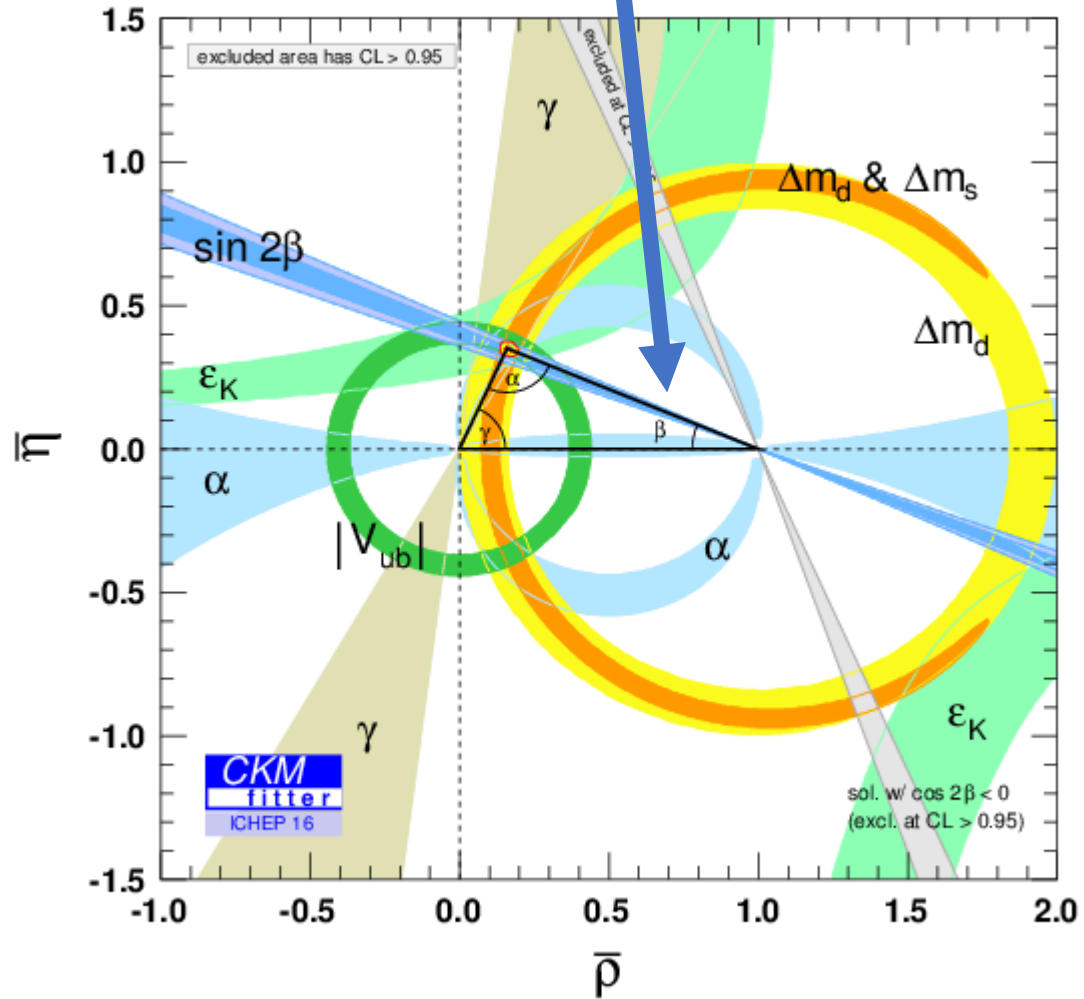
$$\Delta m_q = \frac{G_f^2}{6\pi^2} m_{B_q} M_W^2 f \left( \frac{m_t^2}{M_W^2} \right) \eta_{QCD} B_{B_q} f_{B_q}^2 |V_{tb}^* V_{tq}|^2 \quad q = d, s$$



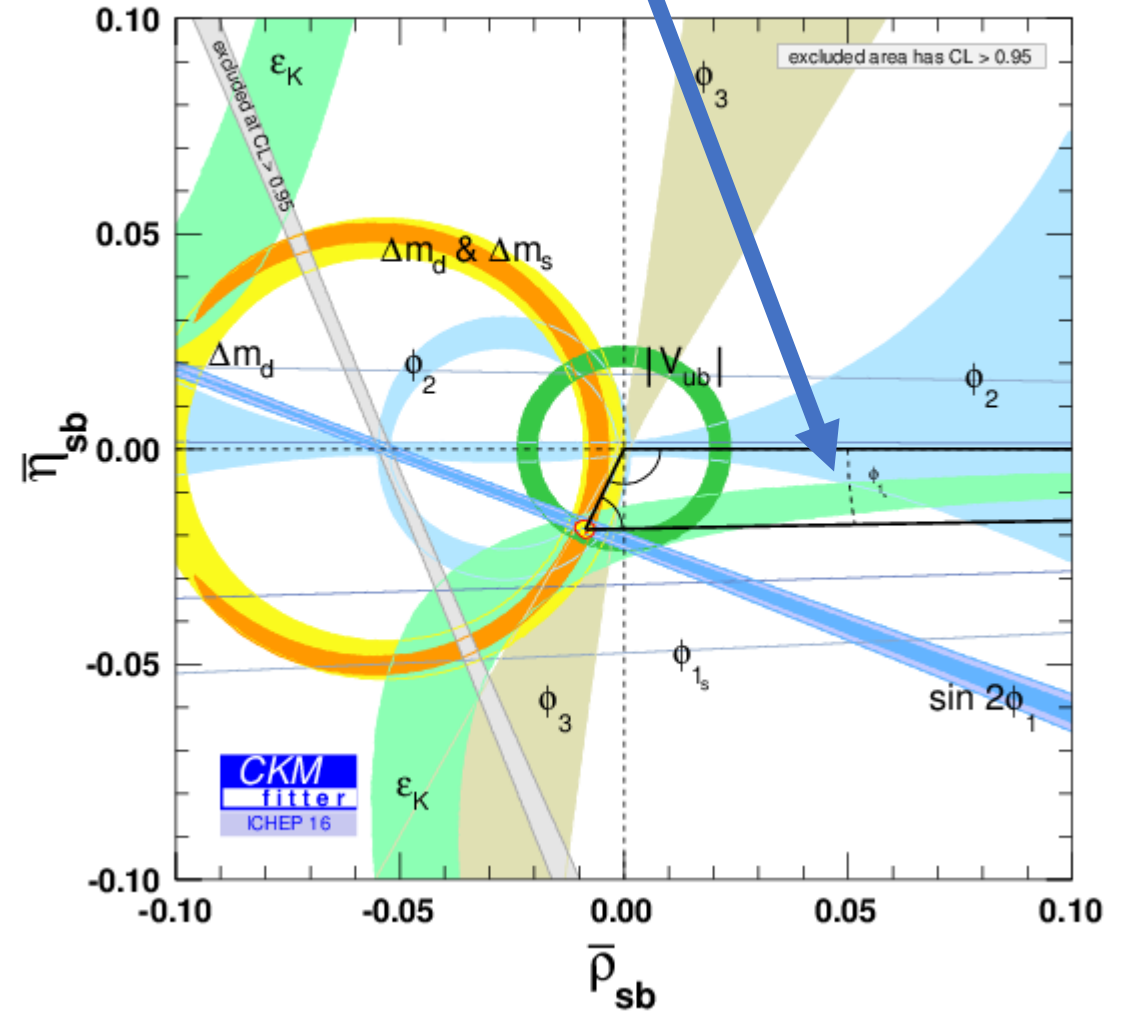
Определение параметров ККМ-матрицы

Открытие заметных осцилляций для  $B^0$  мезонов (ARGUS, 80-е) явилось указанием на большую массу топ-кварка

$\sin(2\beta)$



$\phi_s$



# 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

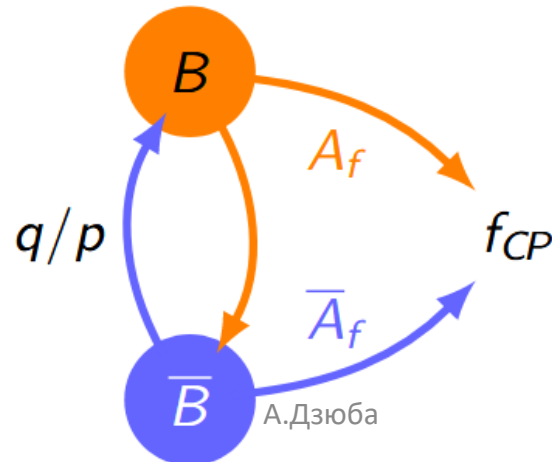
Unequal CP-conjugated decay rates

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

## CP violation in interference of decays with/without mixing

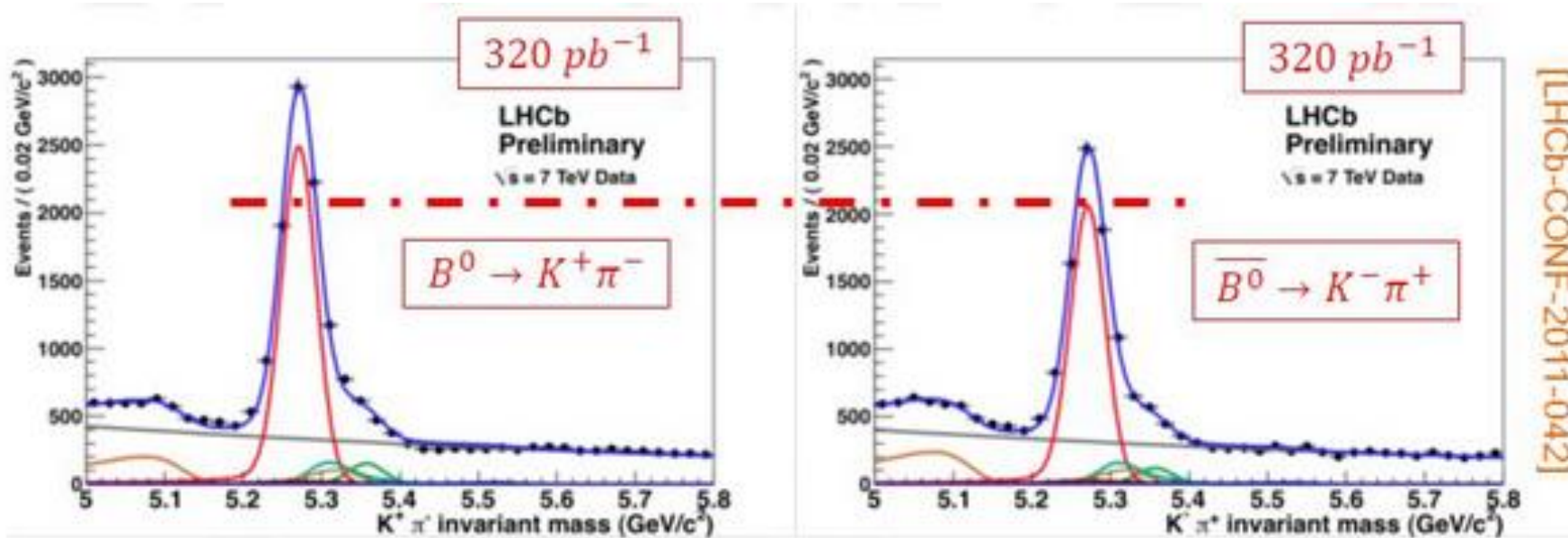
Time-dependent or time-integrated difference of decay rates of initial flavour eigenstates

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



# Прямое CP-нарушение

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

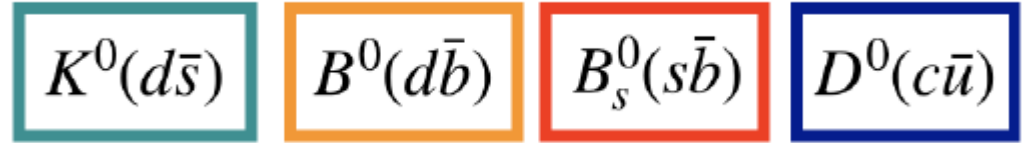


$$\Delta A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+) - \Gamma(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+) + \Gamma(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)} = (-0.088 \pm 0.011 \pm 0.008)\% \rightarrow 5\sigma \text{ evidence}$$

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

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



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 ( $z$  не равен 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

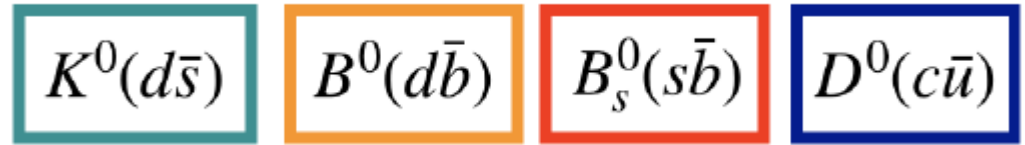
Для  $D^0$ :  $x, y$     для  $B^0$ :  $y$

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

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

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

# Смешивание электрически-нейтральных мезонов



$M^0$  при  $t=0$  :

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

$\bar{M}^0$  при  $t=0$  :

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

Будем рассматривать СРТ в качестве соблюдающейся симметрии

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

В общем случае 4 амплитуды:

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

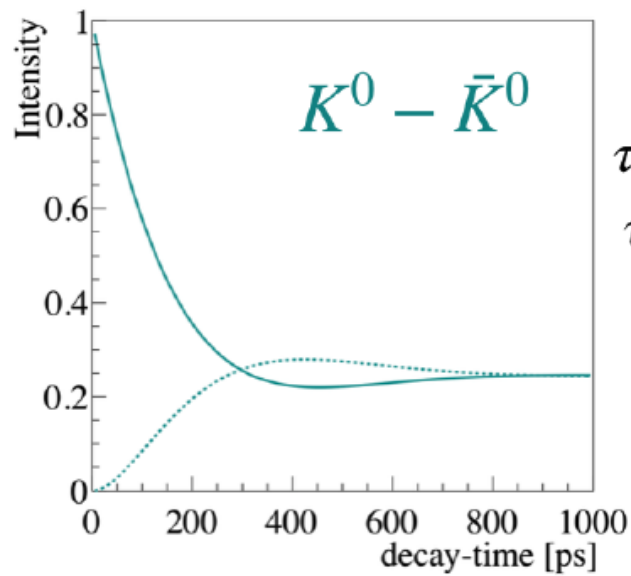
$$A_{\bar{f}} = \langle \bar{f} | \mathcal{H} | M \rangle$$

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

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

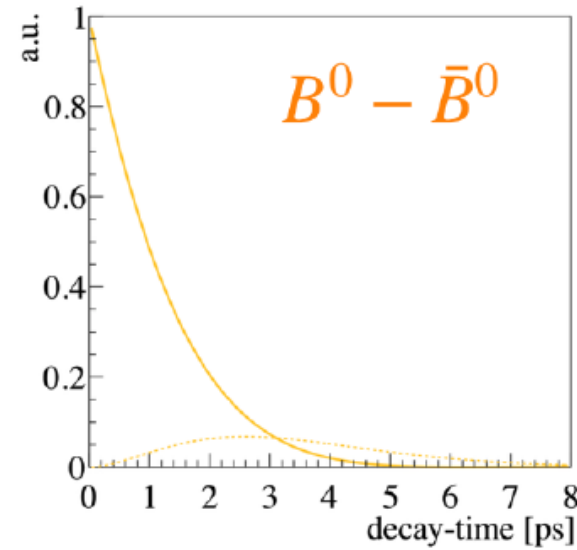
$$\frac{d\Gamma[M_{\text{phys}}^0(t) \rightarrow f]/dt}{e^{-\Gamma t} \mathcal{N}_f} = \left( |A_f|^2 + |(q/p)\bar{A}_f|^2 \right) \cosh(y\Gamma t) + \left( |A_f|^2 - |(q/p)\bar{A}_f|^2 \right) \cos(x\Gamma t) + 2 \operatorname{Re}((q/p)A_f^* \bar{A}_f) \sinh(y\Gamma t) - 2 \operatorname{Im}((q/p)A_f^*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

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



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

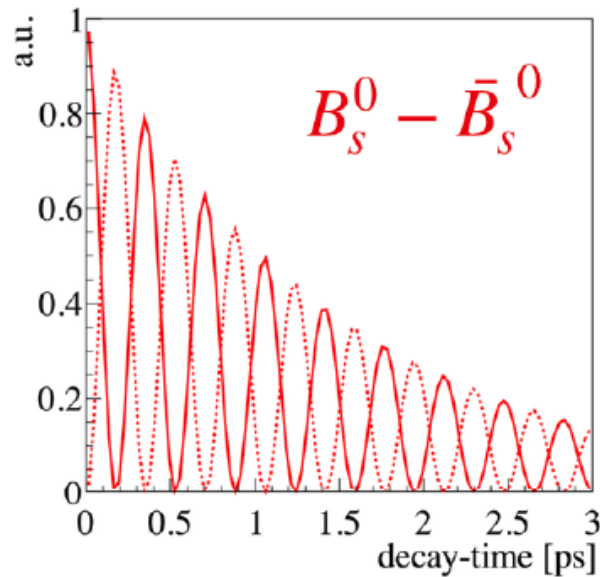
Very different lifetime:  
 $\tau(K_S^0) \sim 0.9 \times 10^{-10}$   
 $\tau(K_L^0) \sim 0.5 \times 10^{-7}$   
 the oscillation period longer than the  $K_S$  lifetime, but  $K_L^0$  exceptionally long



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

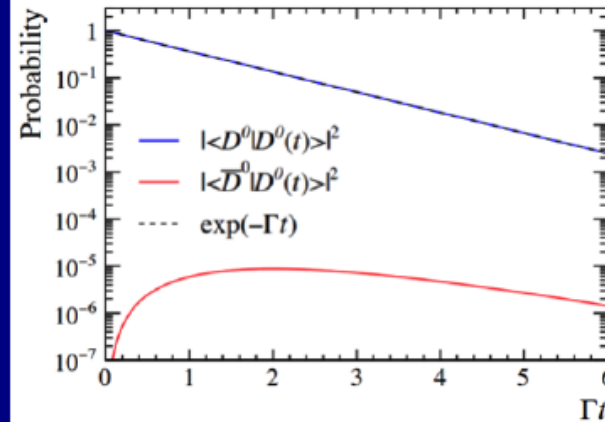
Oscillations  
 $\Delta m \sim 0.5 \text{ ps}^{-1}$   
 Lifetime  
 $\tau(B^0) \sim 1.5 \text{ ps}$   
 The same order of magnitudes

$$\Delta\Gamma = 0$$



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

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

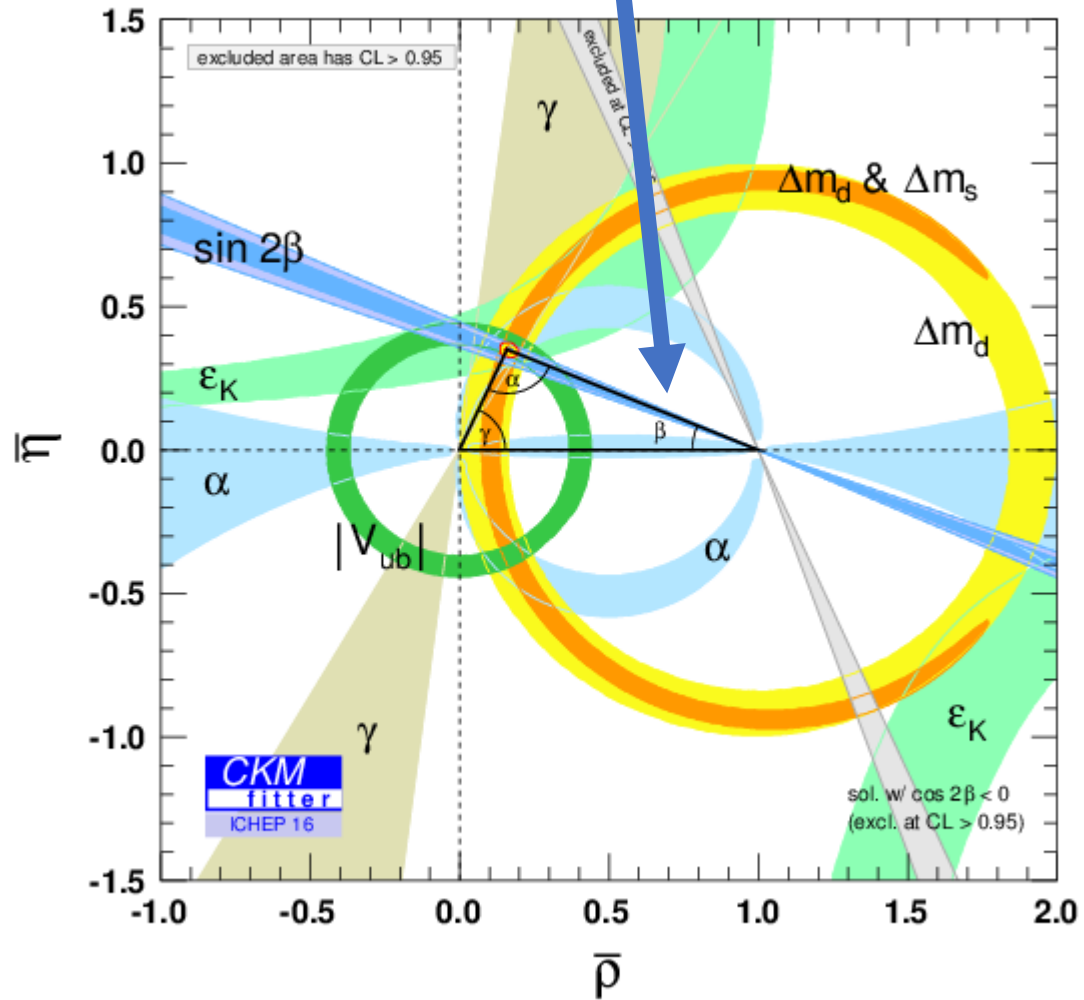
$$|q/p| = 1, \quad |\bar{A}_{fCP}| = |A_{fCP}|$$

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

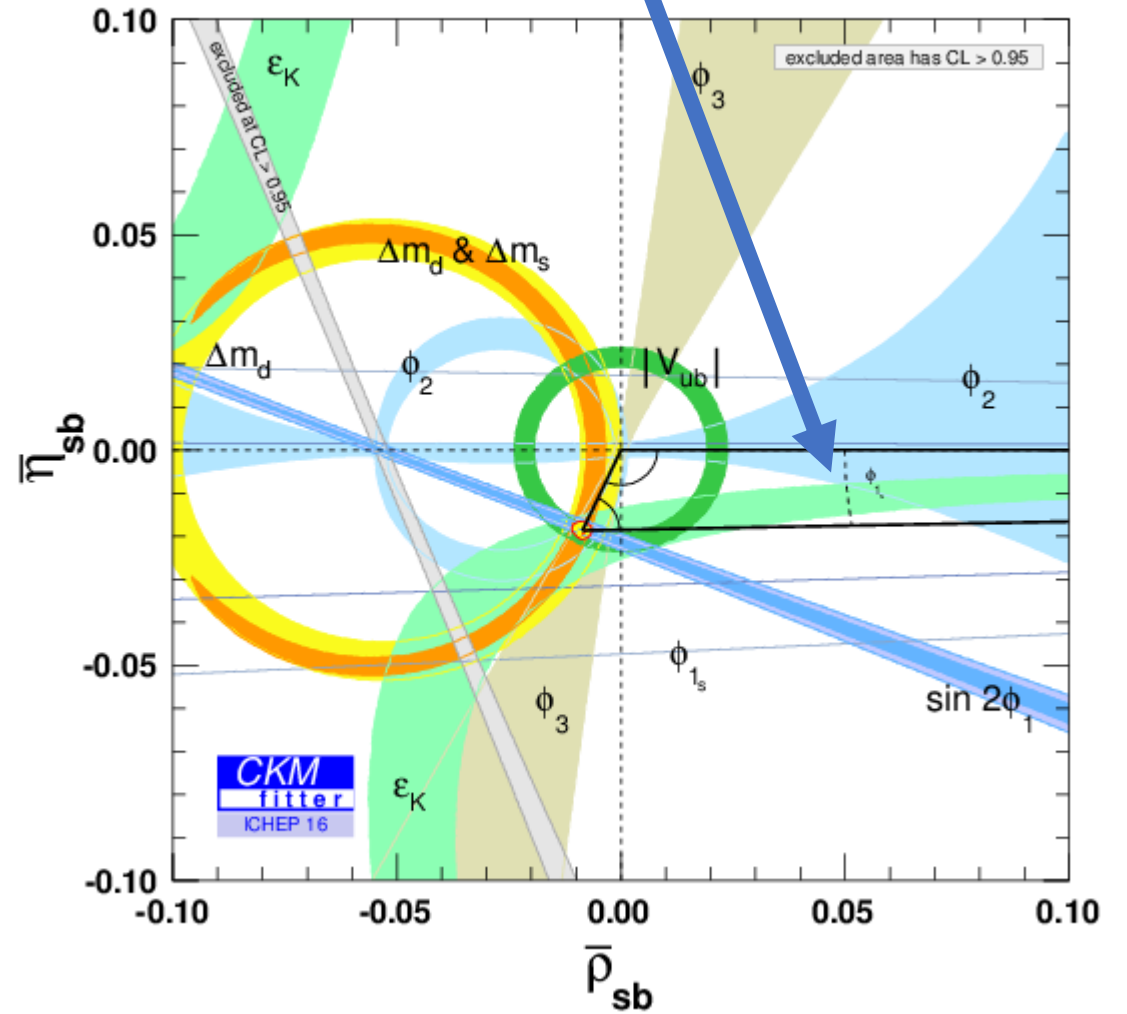
$$A_{fCP}(t) = \mathcal{I}m(\lambda_{fCP}) \sin(x\Gamma t).$$

*sin*(2β) И  $\phi_s$

$\sin(2\beta)$



$\phi_s$



# Измерения $\sin(2\beta)$

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

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

Разрешение по времени жизни (LHCb: 42 фс)

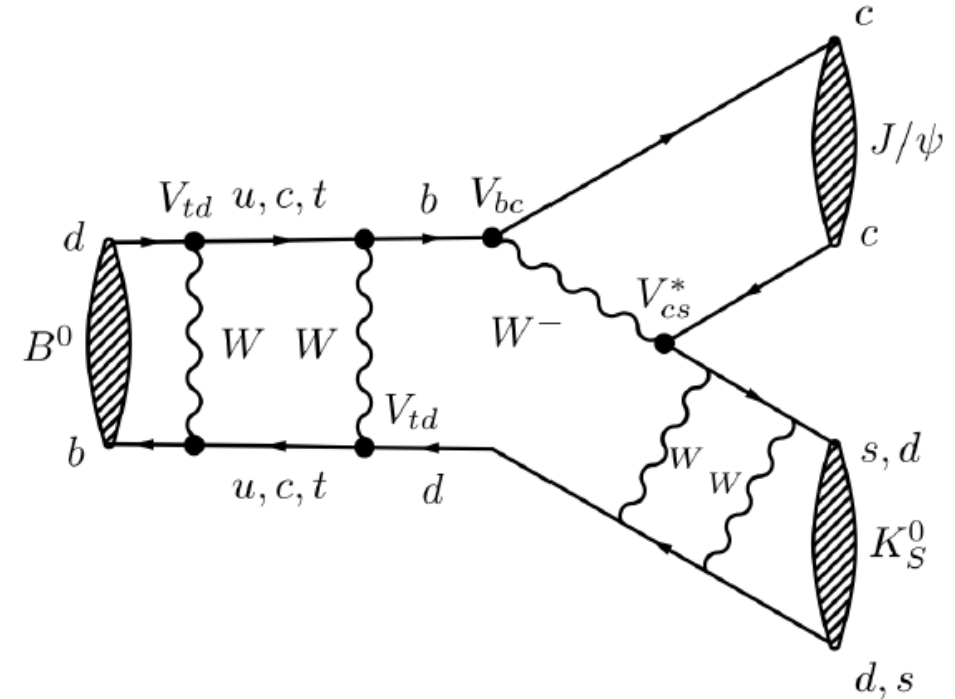
- Наиболее подходящий канал исследования  $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$

- Мировые данные:  $S = 0.699 \pm 0.017$

$$C = -0.005 \pm 0.015$$

- Вклад НФ в наблюдаемую:

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



Качество таггирования аромата

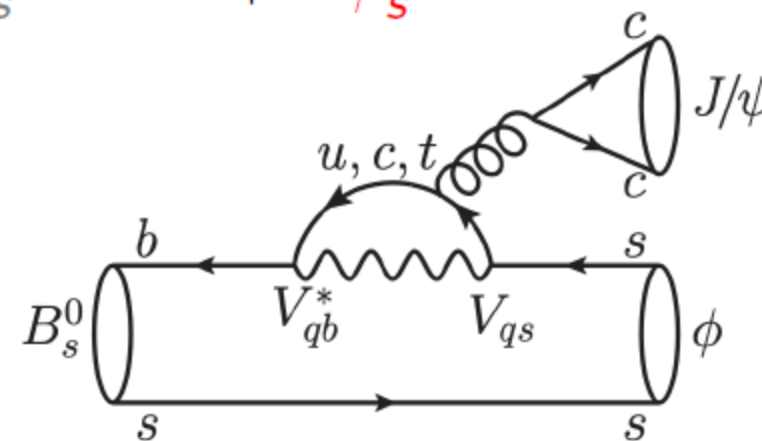
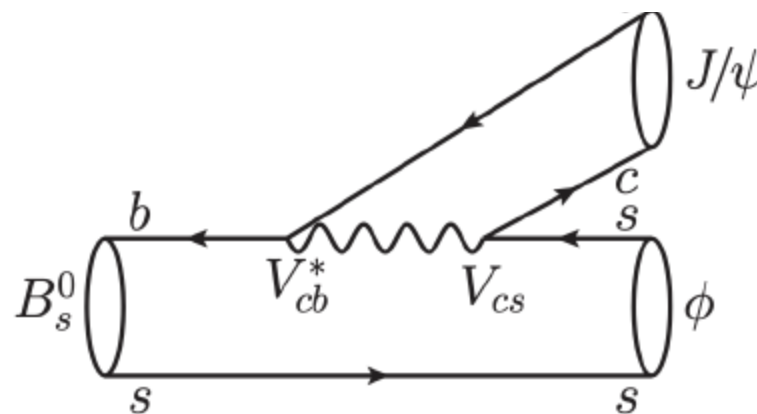
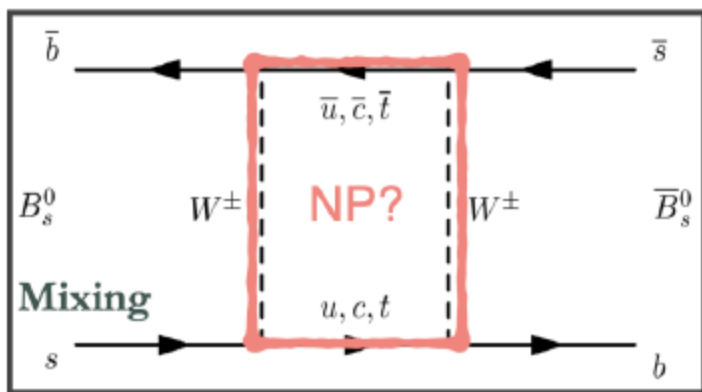
$$\sin(2\beta) = \text{Im} \left( \frac{q \bar{A}_{J/\psi K_S^0}}{p A_{J/\psi K_S^0}} \right)$$

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

# Измерения $\phi_s$

- Чувствителен к вкладу НФ в части амплитуды, связанной с процессами смешивания

$$\phi_s = \phi_s^{\text{tree}} + \delta\phi_s^{\text{penguin}} + \delta\phi_s^{\text{NP}}$$



- Легче всего исследовать в распадах:  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$

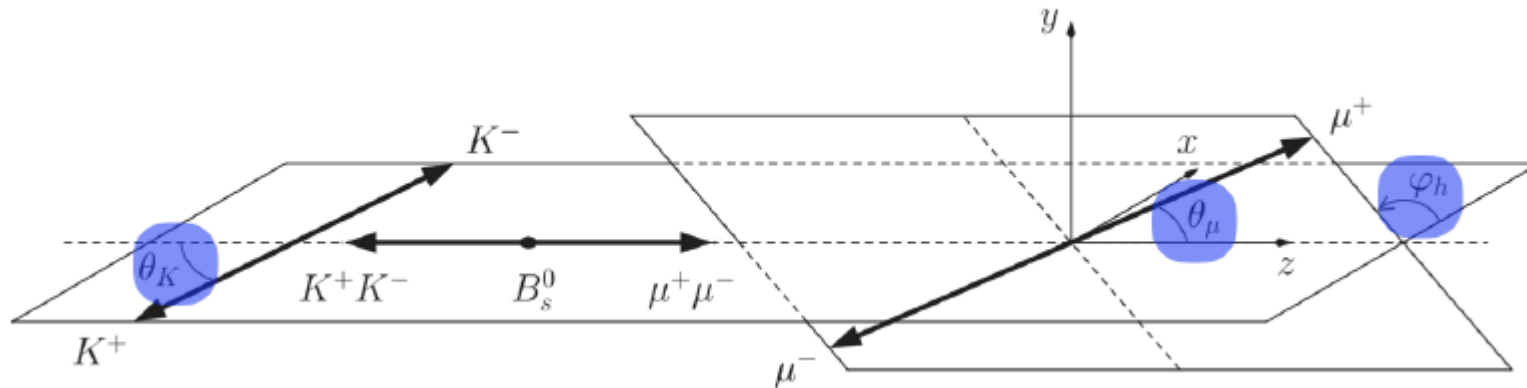
- Другие каналы:  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(e^+e^-)K^+K^-$ ,  $B_s^0 \rightarrow \psi K^+K^-$ ,  $B_s^0 \rightarrow D_s^+D_s^-$   
 $B_s^0 \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$  А.Дзюба

# Принцип измерения $\phi_s$

Собственное значение по оператору CP

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi K K) - \Gamma(B_s^0 \rightarrow J/\psi K K)}{\Gamma(\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi K K) + \Gamma(B_s^0 \rightarrow J/\psi K K)} = \eta_f \cdot \sin \phi_s^{\text{obs}} \cdot \sin(\Delta m_s t)$$

- Смесь CP-четной и CP-нечетной амплитуд
- Для выделения вкладов требуется угловой анализ

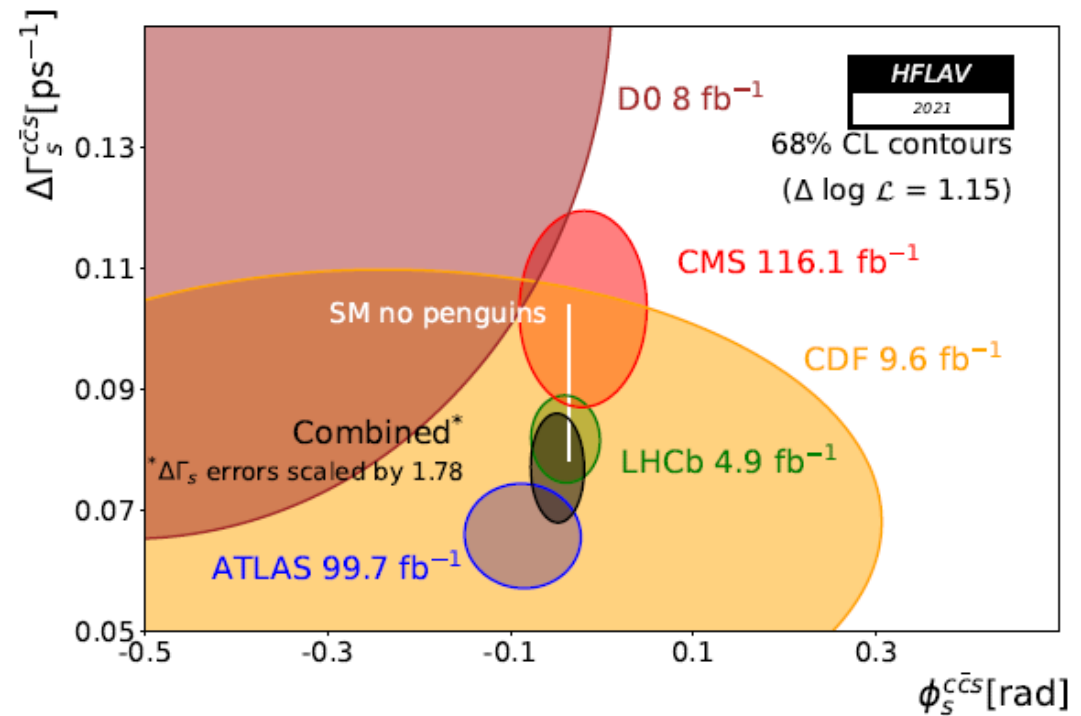
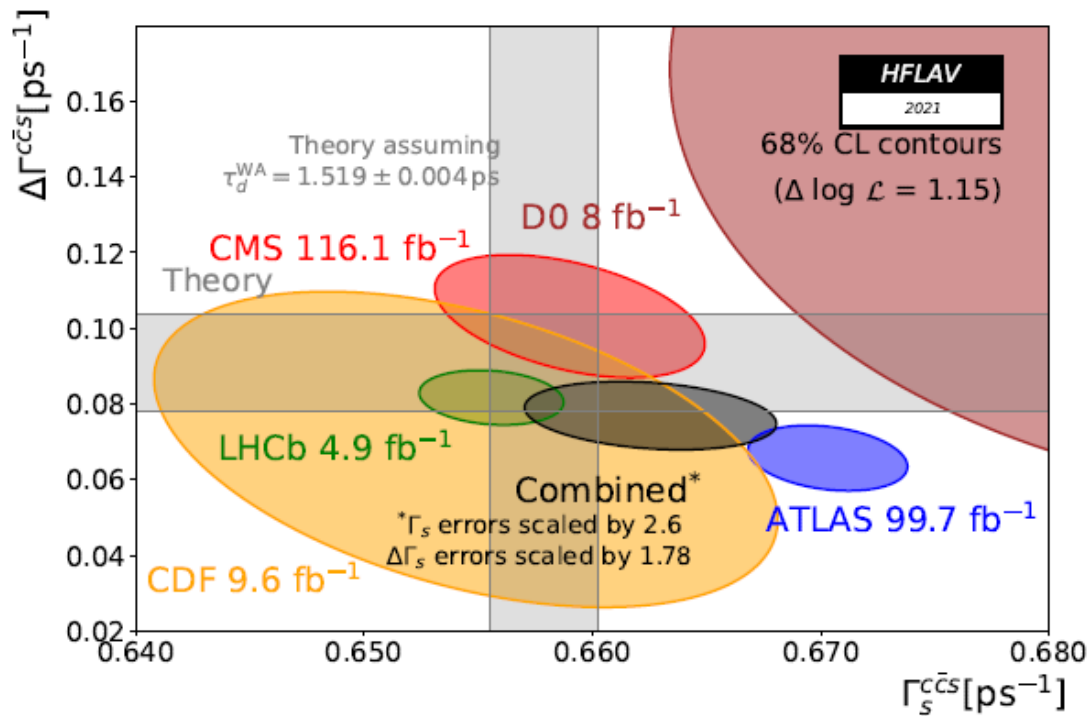


- Экспериментально:  $A_{CP}(t) \propto \eta_f \cdot e^{-\frac{1}{2}\Delta m_s^2 \sigma_t^2} \cdot (1 - 2\omega) \cdot \sin \phi_s^{\text{obs}} \cdot \sin(\Delta m_s t)$

# $\phi_s$ : CDF, D0, ATLAS, CMS & LHCb

$$\Delta\Gamma_s = (0.082 \pm 0.005) \text{ ps}^{-1} \quad [\text{HFLAV}]$$

$$\phi_s^{J/\psi KK} = 0.070 \pm 0.022 \text{ rad}, \quad \phi_s^{c\bar{c}s} = -0.049 \pm 0.019 \text{ rad}$$

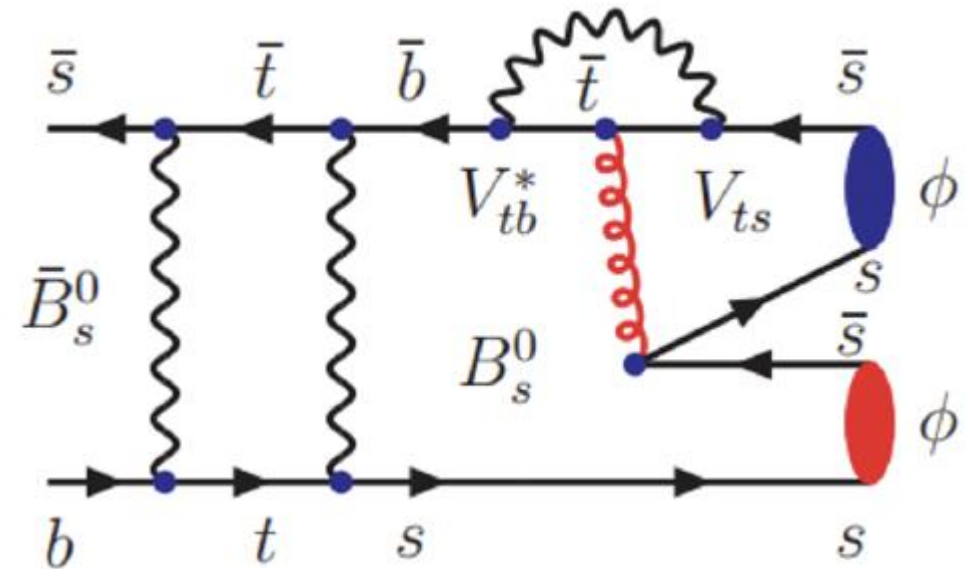


# Еще один способ измерять $\phi_s$

$$B_s^0 \rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\phi(\rightarrow K^+K^-)$$

$\phi_s$  in  $b \rightarrow s\bar{s}s$

- Новая физика может давать вклад как в процесс смешивания так и в распад, описывающийся в СМ диаграммой типа «пингвин»
- В этом докладе будет кратко описан результат исследования



Угловой время-зависимый анализ с определением аромата прелестного мезона

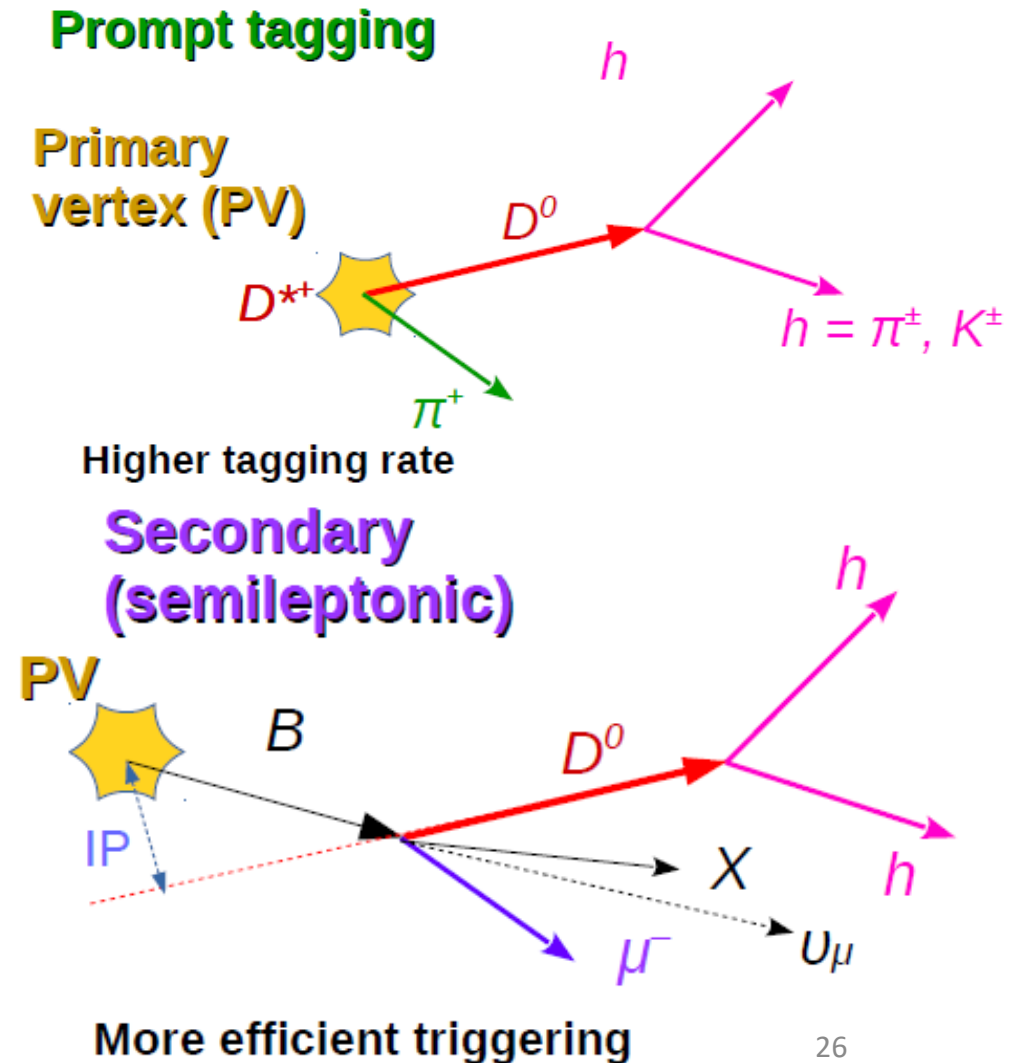
Похож на анализ  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$



ВАСКО  
ВАСКО

# 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

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

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

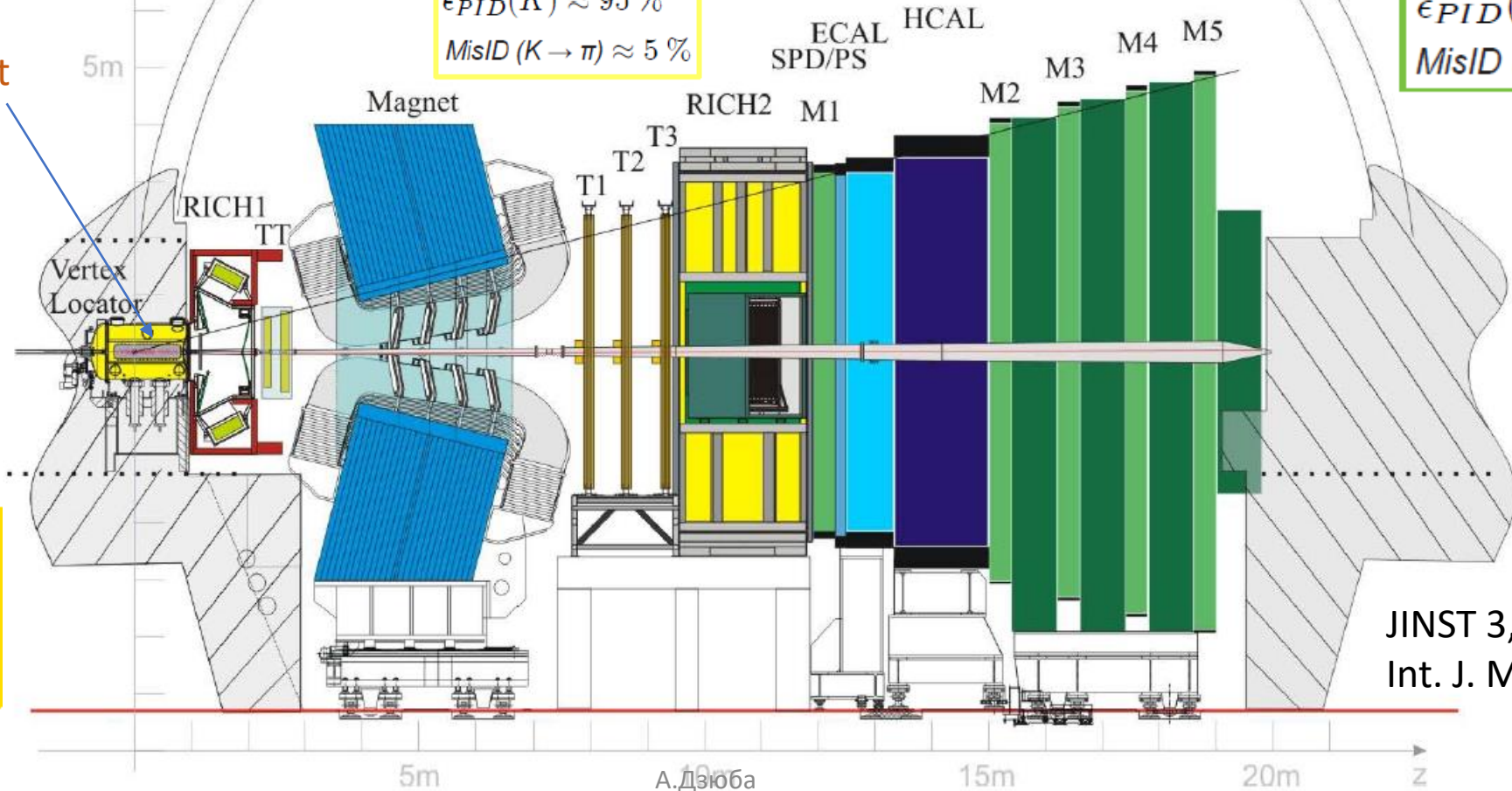
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

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

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

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

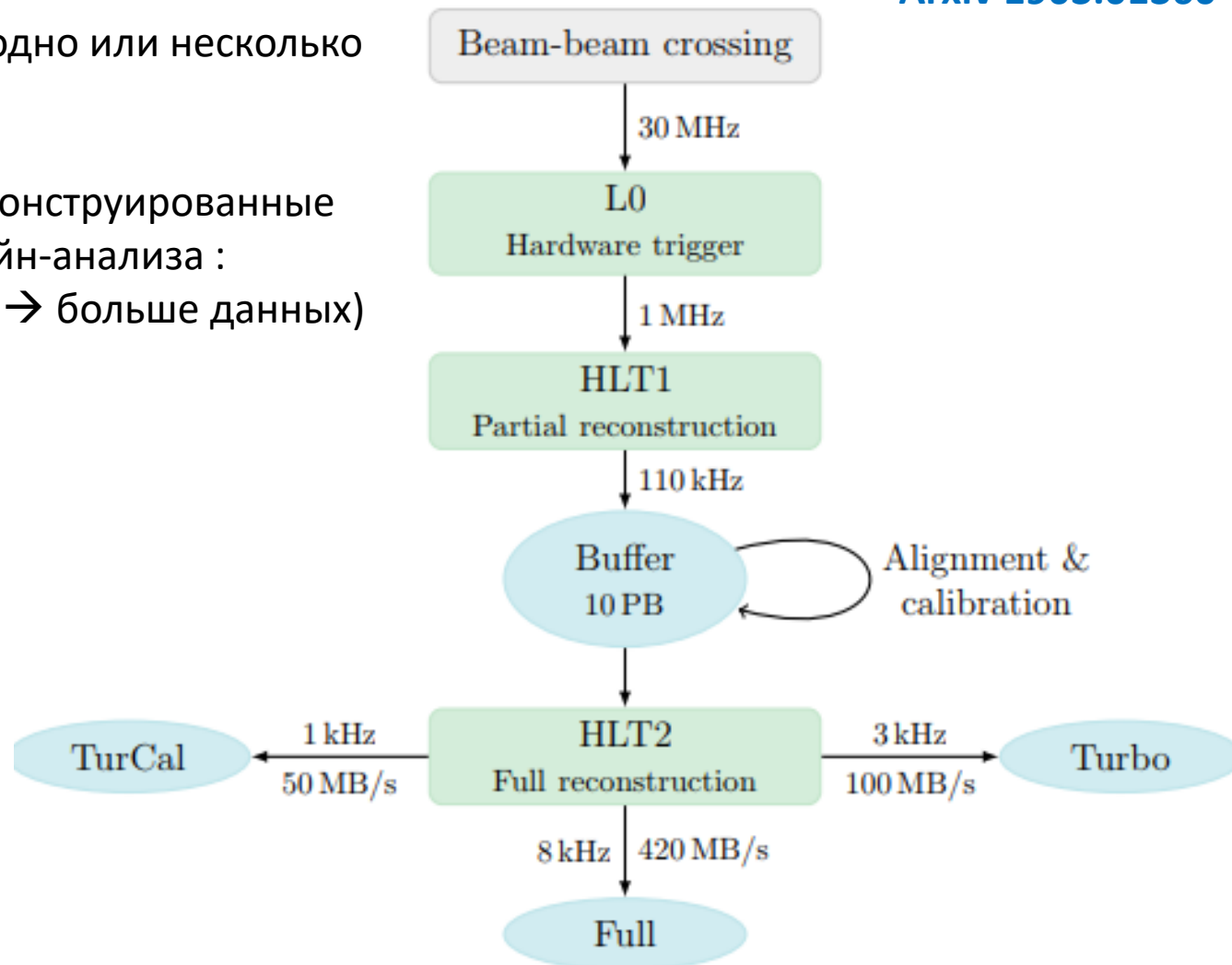
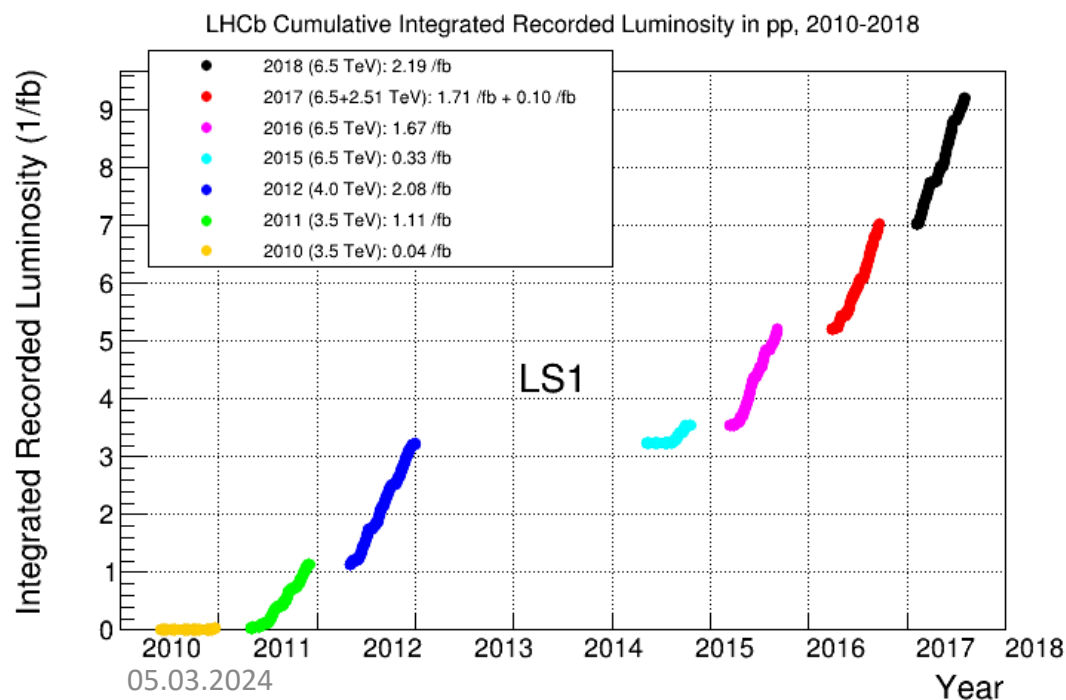
$$\epsilon_{track} > 96\%$$



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



# Выделение сигнала и такггинг аромата

# $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$

- Три моды распада (для Run 2)

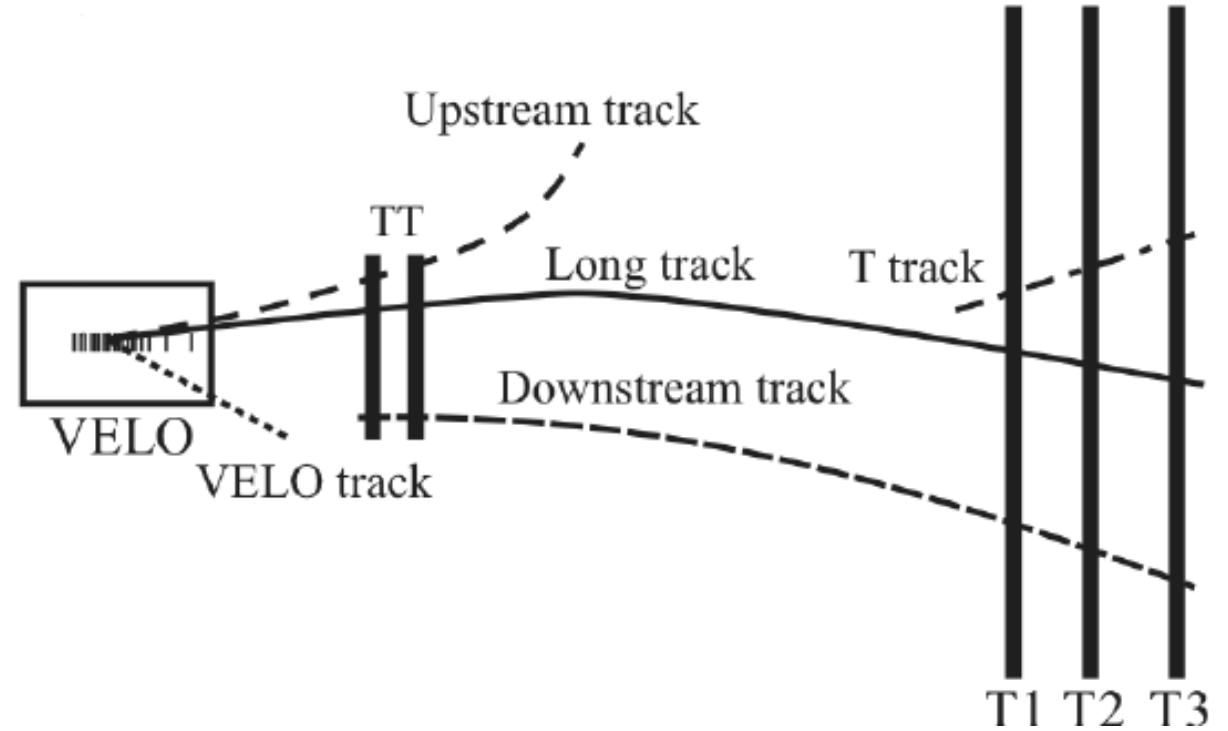
- $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu\mu) K_S^0 (\rightarrow \pi^+ \pi^-)$  (82%)
- $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow ee) K_S^0 (\rightarrow \pi^+ \pi^-)$  (12%)
- $B^0 \rightarrow \psi(2S) (\rightarrow \mu\mu) K_S^0 (\rightarrow \pi^+ \pi^-)$  (6%)

- Триггер:

- Мюон или электронная пара с высоким  $p_T$  с инвариантной массой вблизи резонанса  $J/\psi$  или  $\psi(2S)$
- Пара пионов с высоким  $p_T$  и хорошей общей вершиной вблизи массы  $K_S$

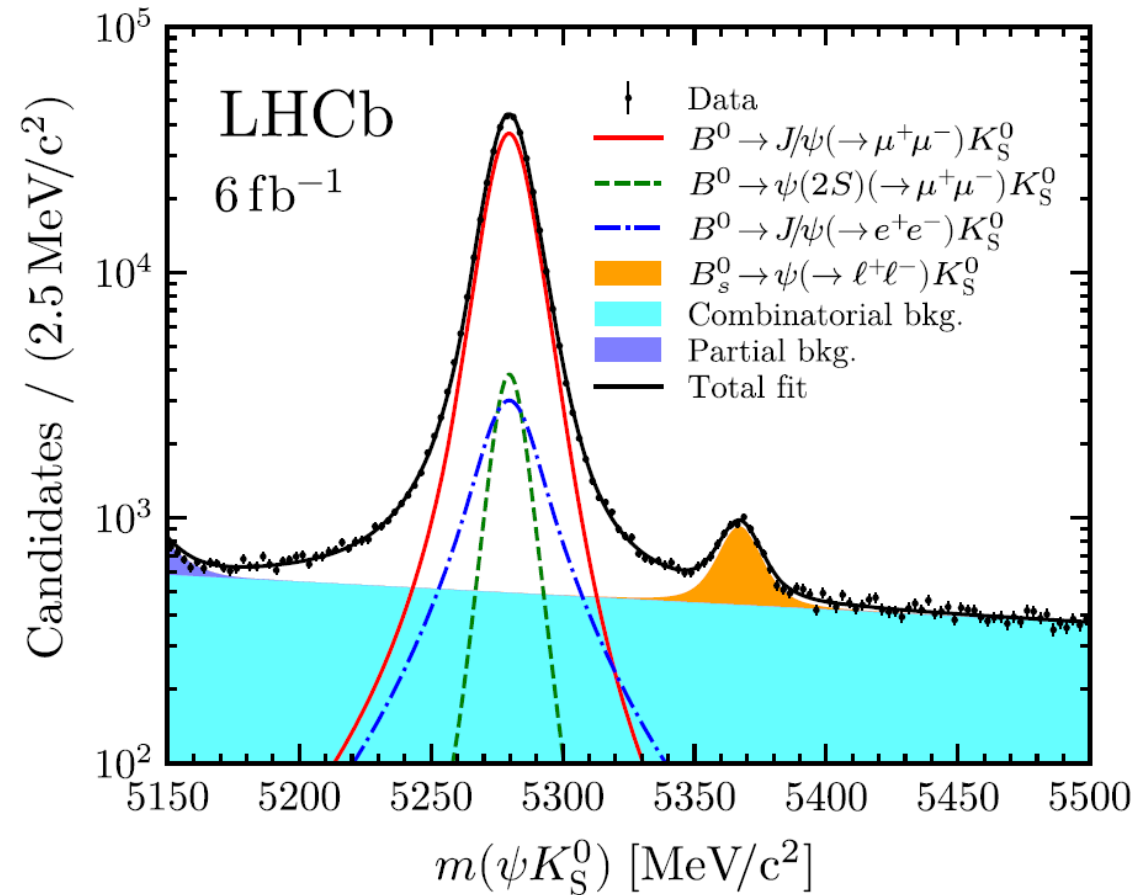
- Критерии отбора для вторичной вершины

- Включение новых категорий треков для пионов (upstream) позволило увеличить статистику на 13%



# $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$

- BDT для подавления комбинаторного фона
- Фон от неверной идентификации подавлялся, соответствующими критериями идентификации
- Подгонка ММП
  - Сигнал моделировался при помощи распределения Double-sided Hypatia (Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B 764 (2014) 150)
- Веса для построения распределений сигнала получены методом sPlot



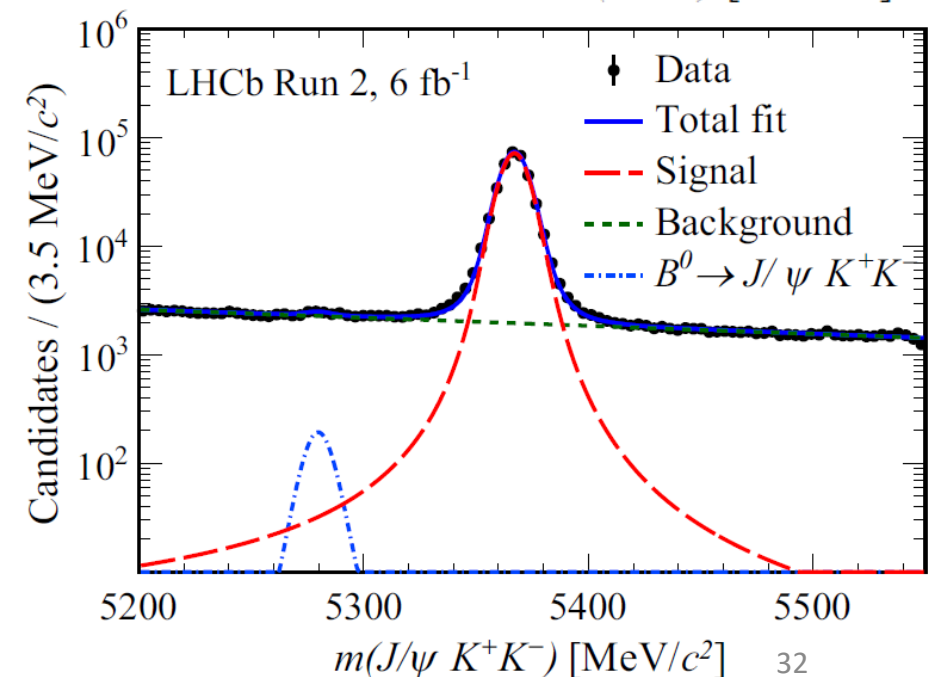
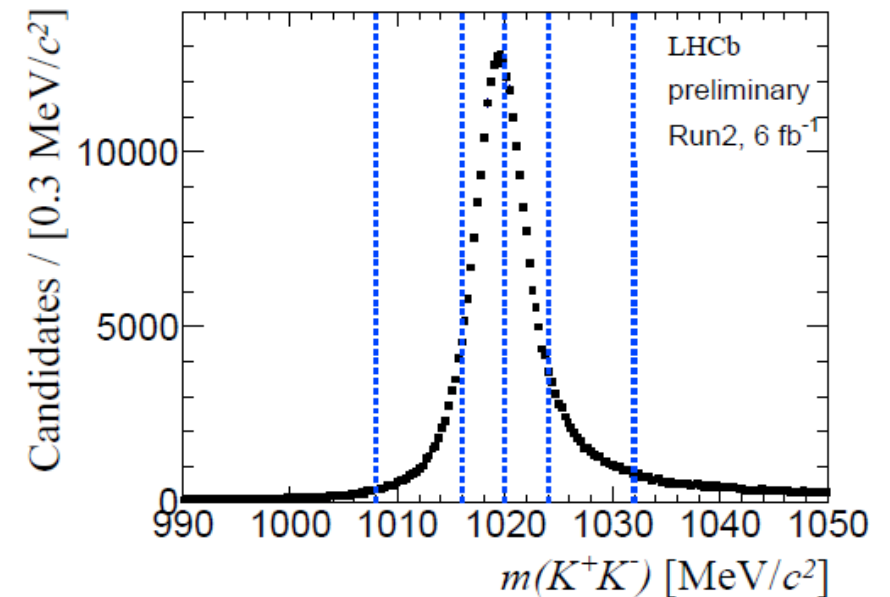
$$N_{J/\psi(\rightarrow\mu\mu)K_S^0} = 306\,322 \pm 619$$

$$N_{J/\psi(\rightarrow ee)K_S^0} = 42\,870 \pm 269$$

$$N_{\psi(2S)(\rightarrow\mu\mu)K_S^0} = 23\,570 \pm 164$$

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

- Аппаратный триггер: адрон или мюон с высоким  $p_T$
- Превый уровень программного триггера:
  - time unbiased:  $m(\mu^+ \mu^-) > 2.7 \text{ GeV}/c^2$
  - time biased: «хорошая» вторичная вершина – либо далекоотстоящая от первичной, либо с хорошим качеством фита
- Полная реконструкция события на втором уровне программного триггера.
- Также BDT для подавления комбинаторного фона и сильные требования критериям идентификации типа адрона
- Сигнал: Double-sided Crystall-ball
- 349000 событий-кандидатов





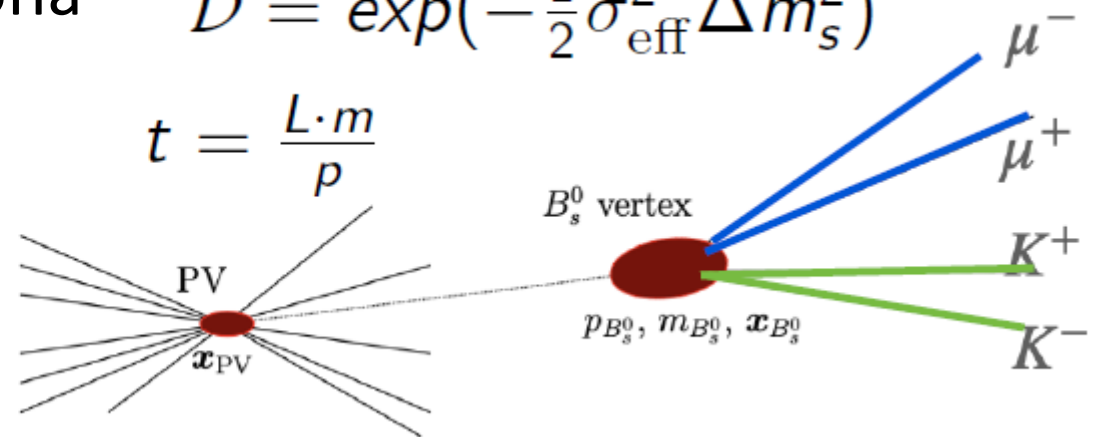
# Разрешение по времени жизни $B$

- Наблюдаемый эффект напрямую зависит от разрешения по времени жизни прелестного мезона

$$\mathcal{D} = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_{\text{eff}}^2 \Delta m_s^2\right)$$

$$\delta_t^2 \approx \left(\frac{m}{p}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{t}{p}\right)^2 \sigma_p^2$$

$$\sigma_L \sim 200 \mu\text{m}, \sigma_p/p \sim 0.5\%$$



- Параметризация, полученная на основе анализа контрольных каналов:

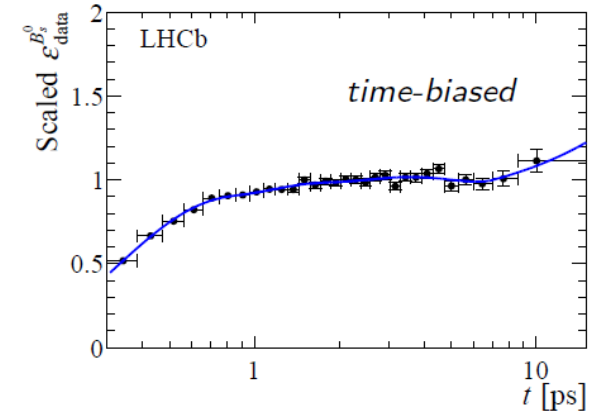
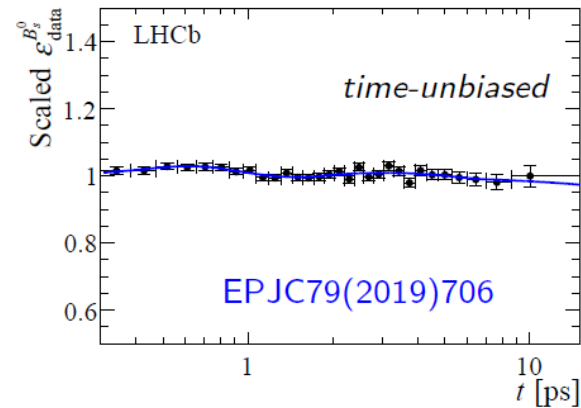
$$\sigma_{\text{eff}} = p_0 + p_1 \delta_t \rightarrow 42 \text{ fs in average, } \mathcal{D} \sim 0.75$$

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

- Время жизни – использовался контрольный канал  $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$

$$\tau_{B^0} = (1.520 \pm 0.004) \text{ ps}, \Delta\Gamma_d = 0 \text{ ps}^{-1}$$

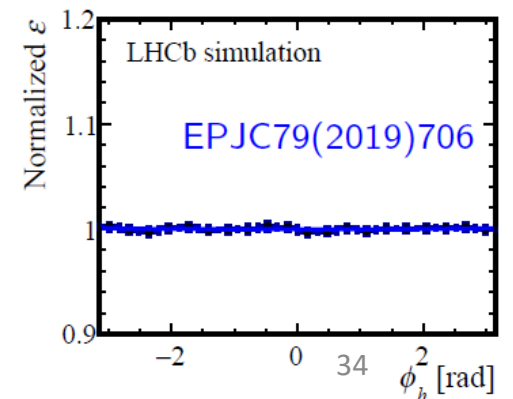
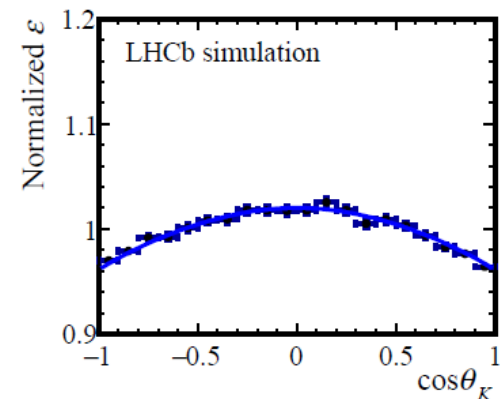
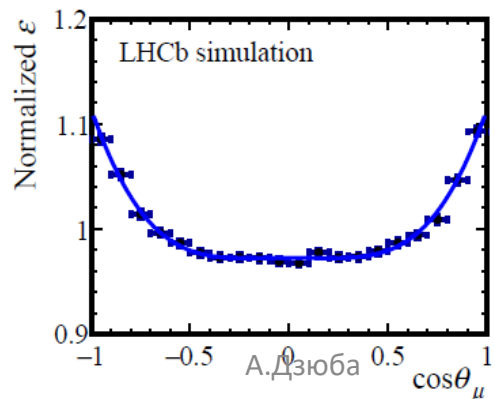
$$\epsilon_{\text{data}}^{B_s^0}(t) = \epsilon_{\text{data}}^{B^0}(t) \times \frac{\epsilon_{\text{sim}}^{B_s^0}(t)}{\epsilon_{\text{sim}}^{B^0}(t)}$$



- Угловые характеристики - моделирование

Параметризовано сплайнами

**Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801**



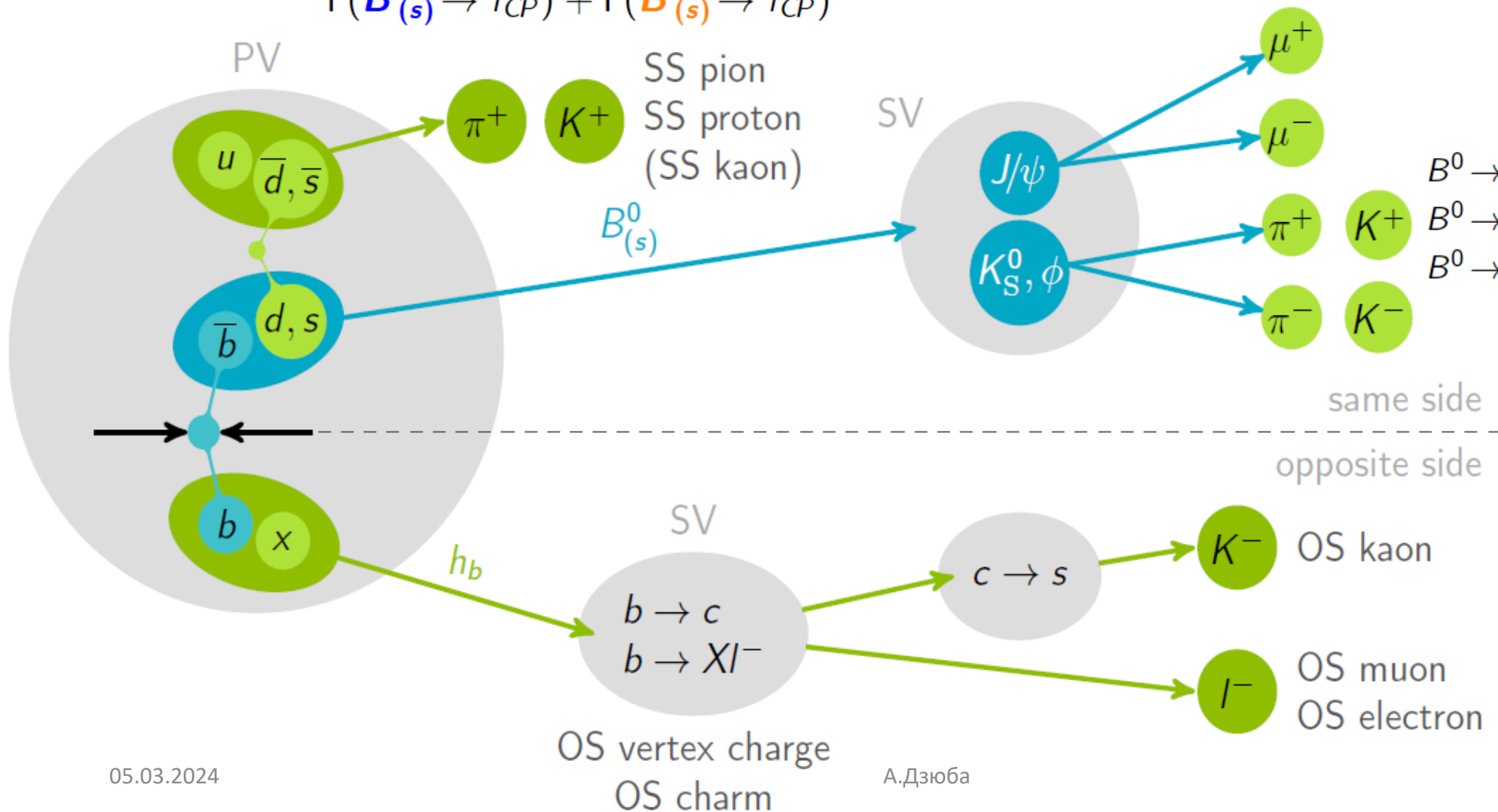
$$\text{tagging power} = \epsilon \times D^2 = \epsilon \times \left(1 - \frac{\#\text{wrong tag}}{\#\text{all tag}}\right)^2$$

# Таггирование аромата

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

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

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



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

# Определение $\sin(2\beta)$ и $\phi_s$

# Подгонка для определения CP-параметров

- Упрощенная модель
- Параметризации для учета эффектов, связанных с временем жизни и таггингом

$$P_{CP}(t, d, \eta) \propto \left\{ [1 + d(1 - 2\omega)]P_{B^0}(t) + [1 + d(1 - 2\bar{\omega})]P_{\bar{B}^0}(t) \right\} e^{-\Gamma t}$$

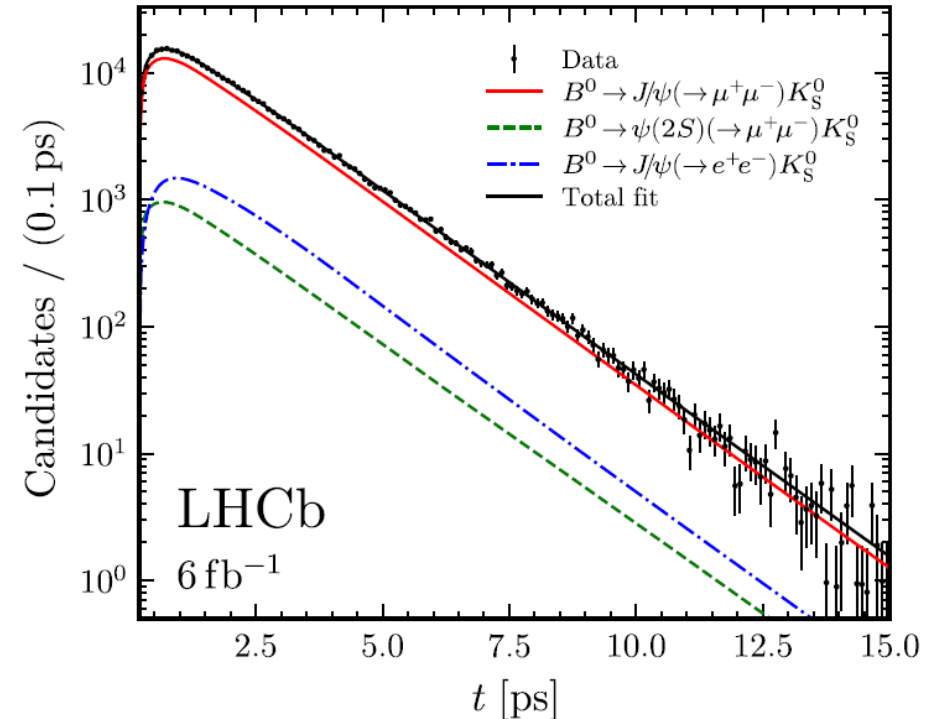
$$P_{B^0,(\bar{B}^0)}(t) \propto (1 \mp \alpha)(1 \mp \Delta\epsilon)(1 \mp S \sin(\Delta m_d t) \pm C \cos(\Delta m_d t))$$

Асимметрия рождения  $B$

Асимметрия таггинга

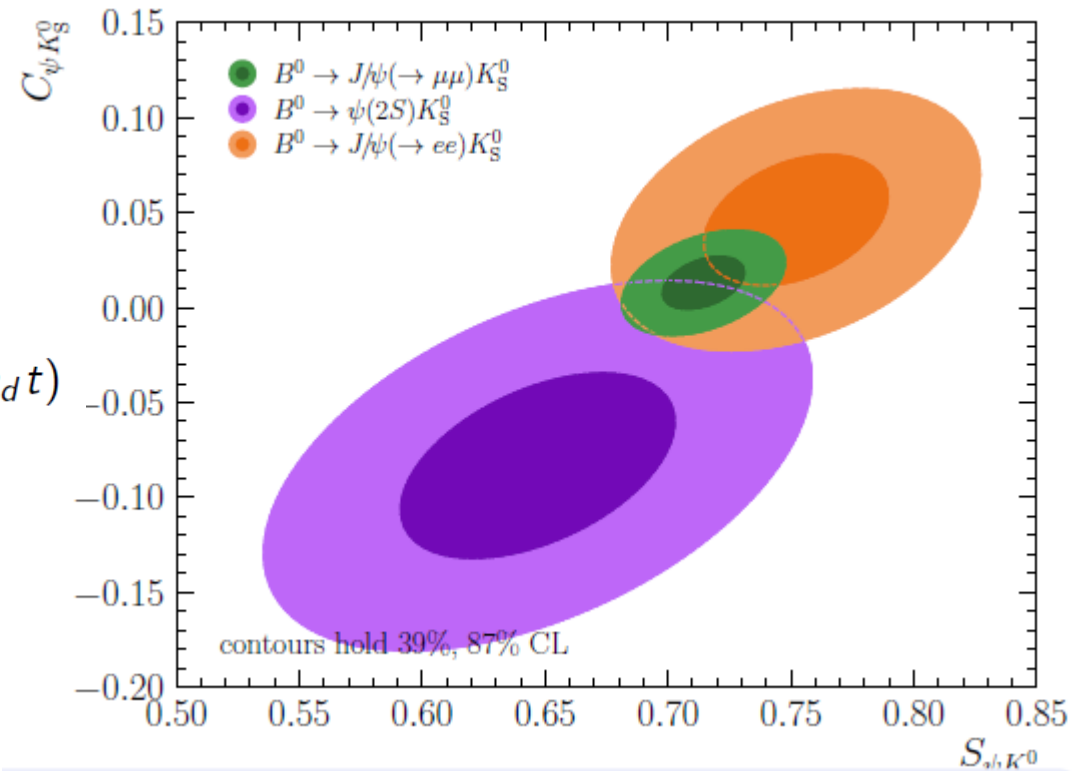
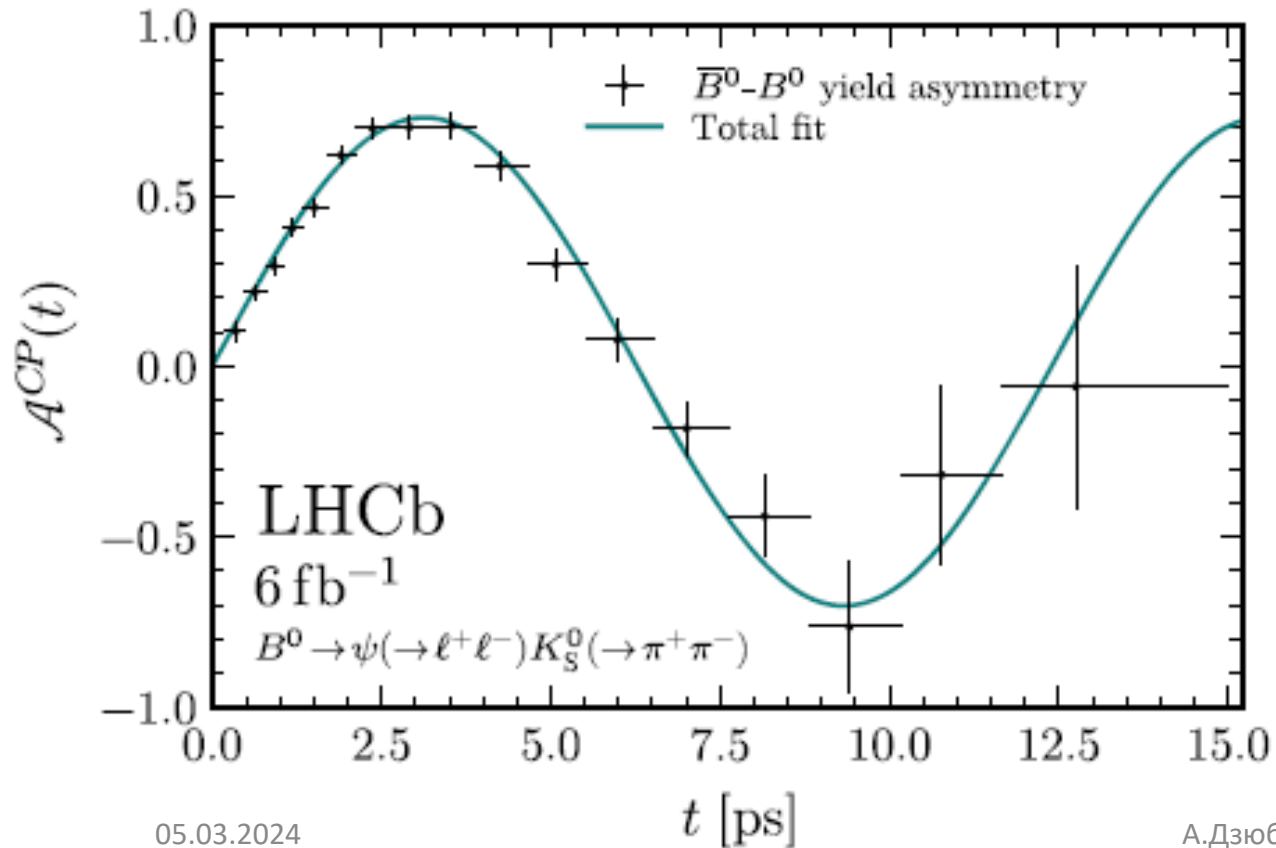
Основные систематические погрешности:

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



# Определение $\sin(2\beta)$

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



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

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

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

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

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

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

# Результат и комбинация

Новый результат

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

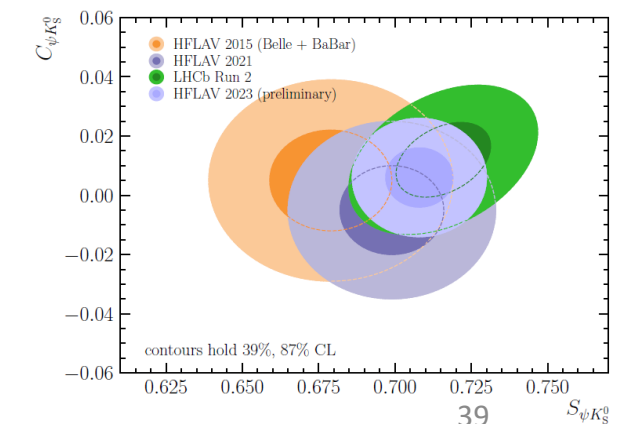
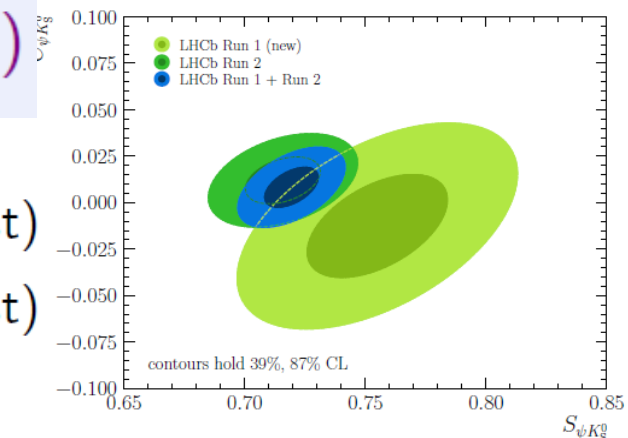
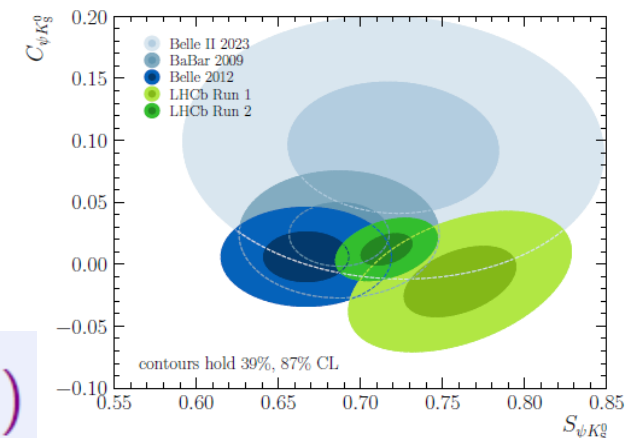
$$C_{\psi K_S^0}^{\text{Run 2}} = 0.012 \pm 0.012 \text{ (stat)} \pm 0.003 \text{ (syst)}$$

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

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

Статистическая неопределенность по-прежнему остается ограничивающим фактором.

**Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801**



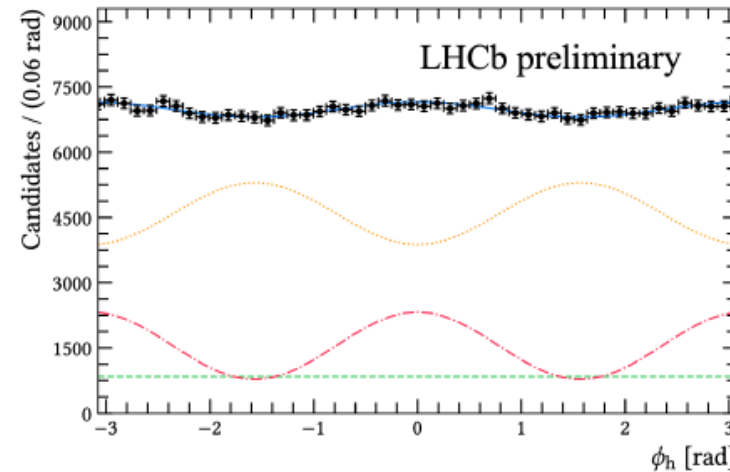
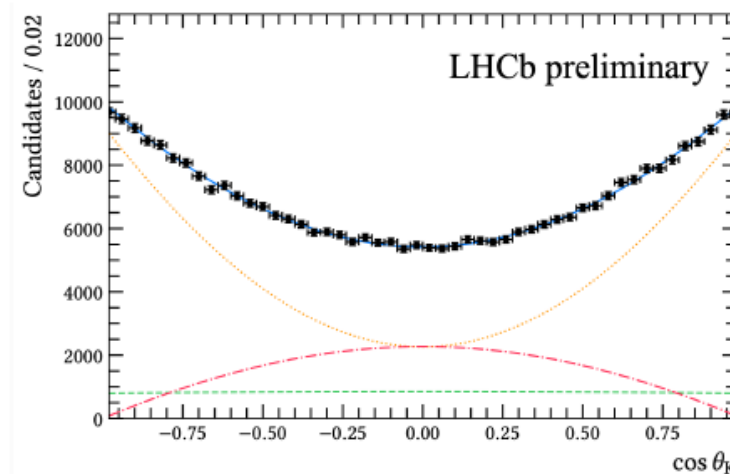
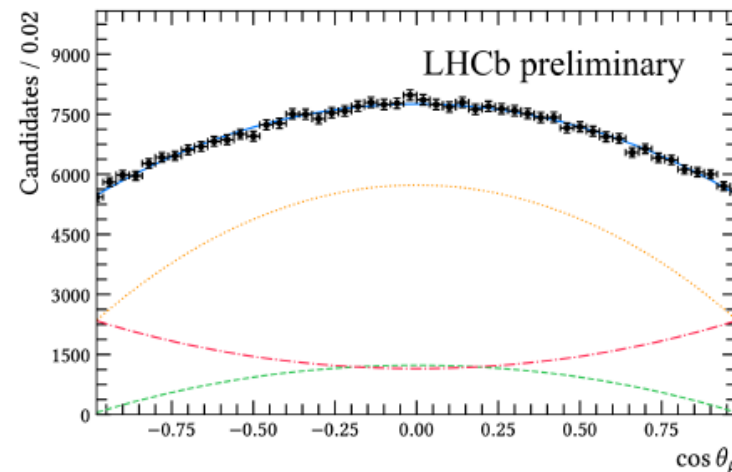
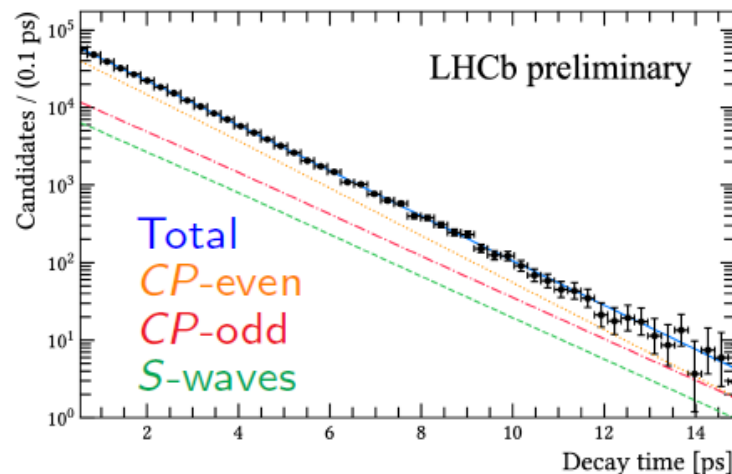
# $\phi_s$ из распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802

- Одновременная подгонка к 48 подвыборкам:
  - 4 года
  - 2 триггерные условия
  - 6 масса пары КК
- Параметры калибровки теггинга и сплайн-коэффициенты учитывались при помощи гауссовскими ограничений.
- Извлеките физические параметры:

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

05.03.2024



А.Дзюба

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801

40



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

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802

\* Uncertainties ( $\times 0.01$ ) Dominant sys. Sub-dominant sys. Stat. limited

Source	$ A_0 ^2$	$ A_\perp ^2$	$\phi_s$ [rad]	$ \lambda $	$\delta_\perp - \delta_0$ [rad]	$\delta_\parallel - \delta_0$ [rad]	$\Gamma_s - \Gamma_d$ [ps $^{-1}$ ]	$\Delta\Gamma_s$ [ps $^{-1}$ ]	$\Delta m_s$ [ps $^{-1}$ ]
Mass parametrization	0.04	0.03	0.03	0.02	0.15	0.12	0.02	0.04	0.03
Mass: shape statistical	0.04	0.04	0.05	0.09	0.62	0.33	0.02	0.01	0.11
Mass factorization	0.11	0.10	0.42	0.19	0.54	0.60	0.12	0.16	0.18
$B_c^+$ contamination *	0.04	0.05	—	0.02	—	0.17	(0.07)	(0.03)	—
D-wave component	0.04	0.04	0.02	—	0.07	0.13	0.01	0.03	0.02
Ghost tracks	0.07	0.04	0.02	0.10	0.18	0.18	0.02	—	0.01
Multiple candidates	0.01	—	0.27	0.22	0.90	0.41	0.01	0.01	0.24
Particle identification	0.06	0.09	0.27	0.27	1.31	0.51	0.05	0.15	0.46
$C_{SP}$ factors	—	0.01	0.01	0.03	0.73	0.41	—	0.01	0.04
DTR model portability	—	—	0.08	0.03	0.26	0.09	—	—	0.09
DTR calibration	—	—	0.03	0.02	0.11	0.07	—	—	0.05
Time bias correction	0.04	0.05	0.06	0.05	0.77	0.11	0.03	0.05	0.44
Angular efficiency	0.05	0.14	0.25	0.32	0.42	0.44	0.01	0.02	0.13
Angular resolution	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.08	—	0.01	0.02
Kinematic weighting	0.24	0.09	0.01	0.01	0.98	0.86	0.02	0.03	0.31
Momentum uncertainty	0.08	0.04	0.04	—	0.07	0.11	0.01	—	0.13
Longitudinal scale	0.07	0.04	0.04	—	0.10	0.09	0.02	—	0.31
Neglected correlations	—	—	—	—	4.20	4.96	—	—	—
Total sys. unc.	0.32	0.24	0.6	0.5	4.8	5.2	0.14	0.24	0.9
Stat. unc.	0.17	0.23	2.2	1.1	7.5	6.0	0.14	0.44	3.3

\*The uncertainty of the  $B_c^+$  contamination for  $\Delta\Gamma_d^s$  and  $\Delta\Gamma_s$  is included in the fit to data and does not contribute to the quoted total systematic uncertainty.

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

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802

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

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

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

# Влияние на мировые данные

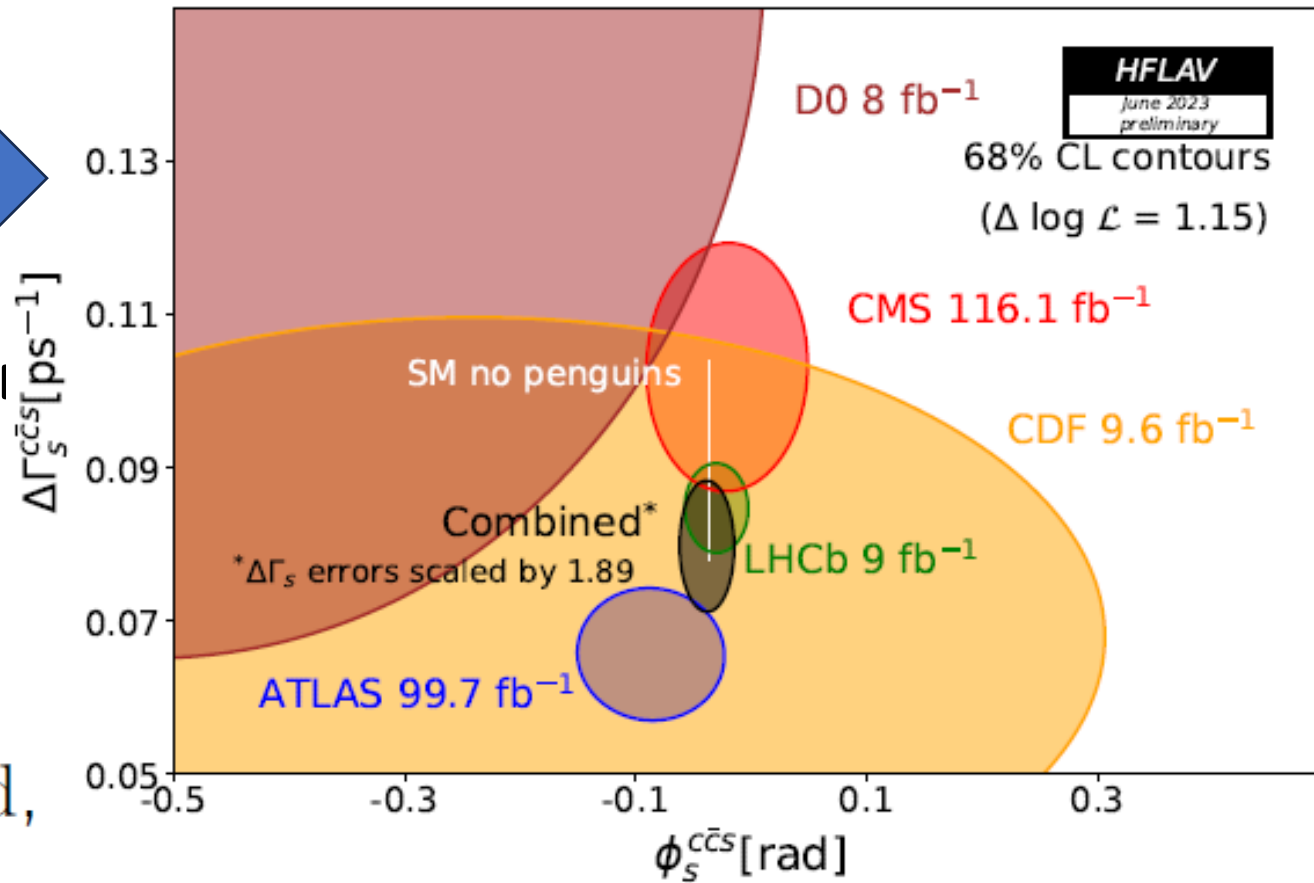
$$\phi_s^{J/\psi KK} = -0.050 \pm 0.017 \text{ rad}$$

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

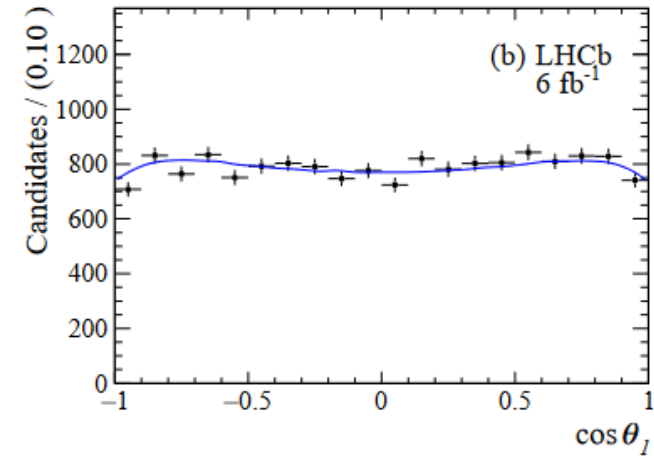
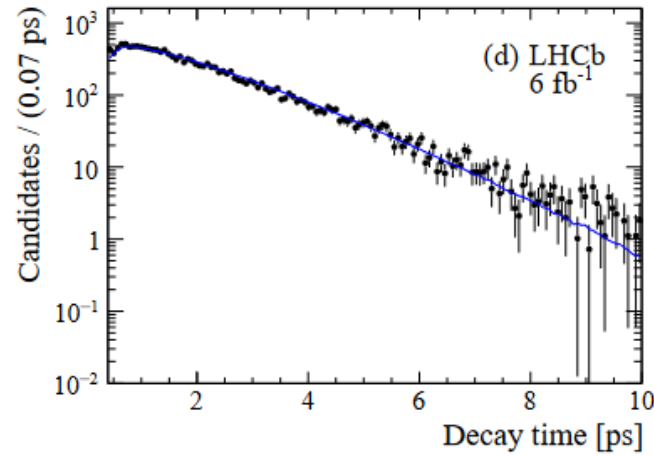
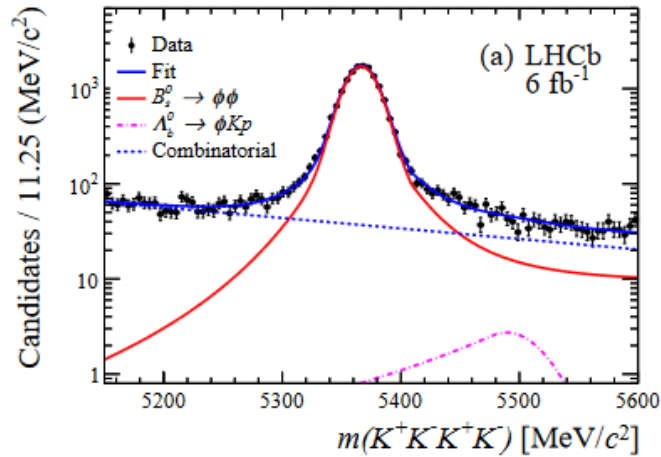
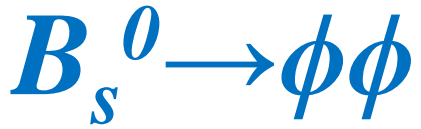
- Полученный результат находится в согласии с общей подгонкой всех мировых данных (Global fits assuming SM)

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

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

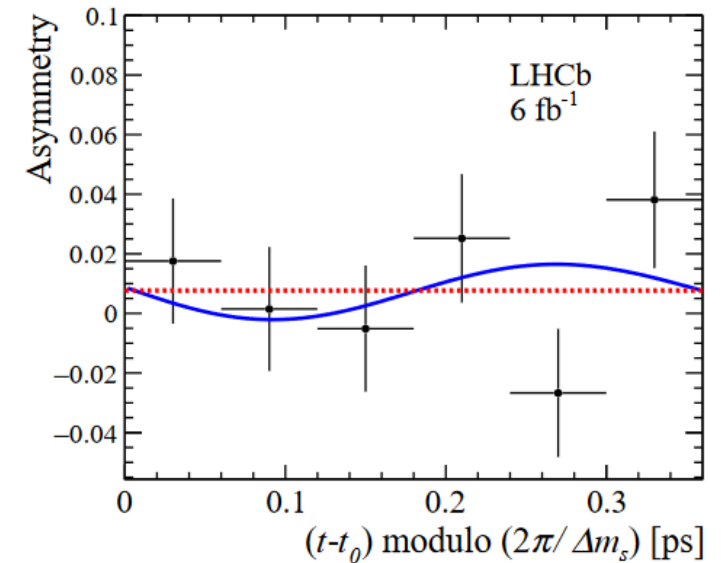
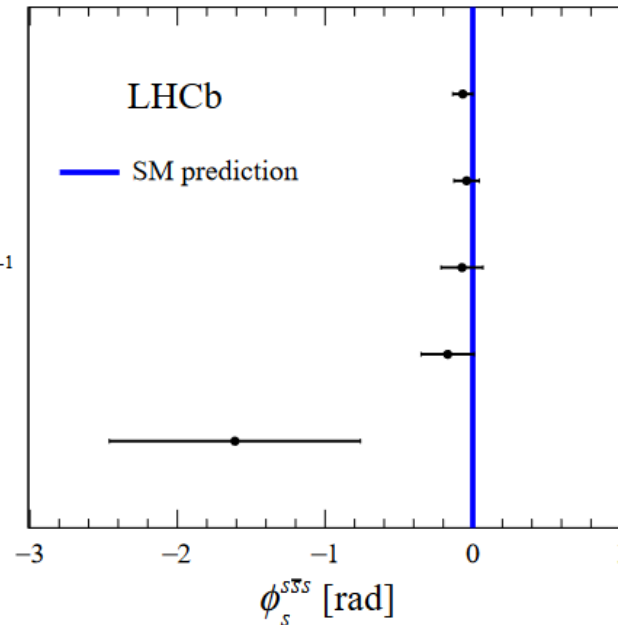


Зависящий от времени амплитудный анализ с тактированием аромата  $B$



- Наиболее точное измерение  $\phi_s$  в распадах с доминированием диаграмм типа пингвин
- Нарушений CP не наблюдается

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



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

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

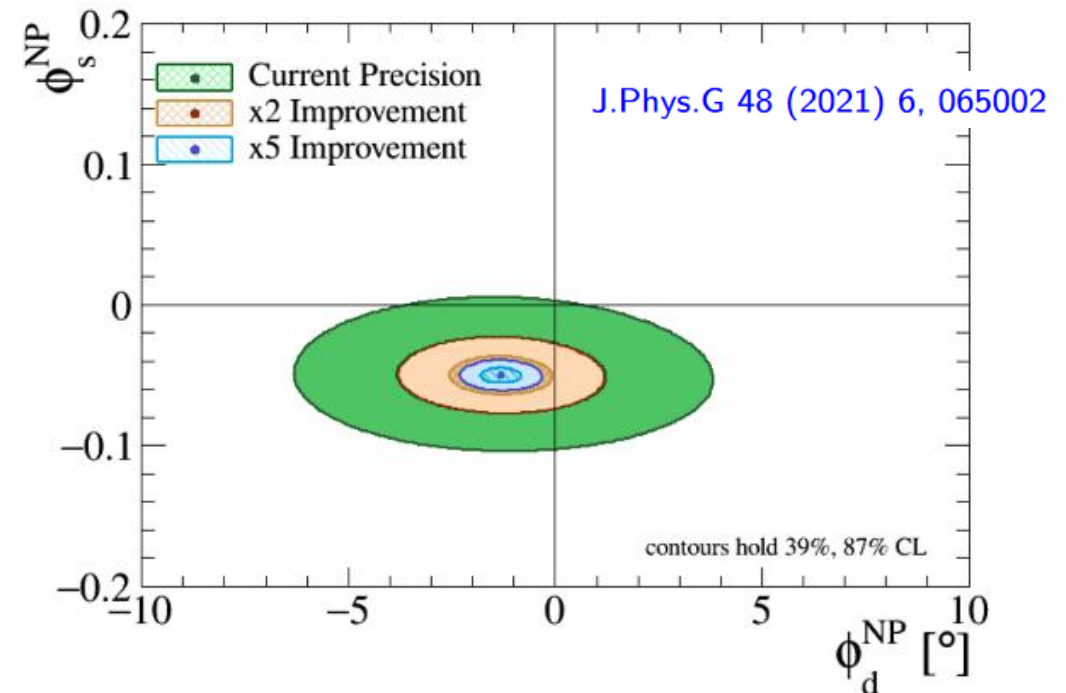
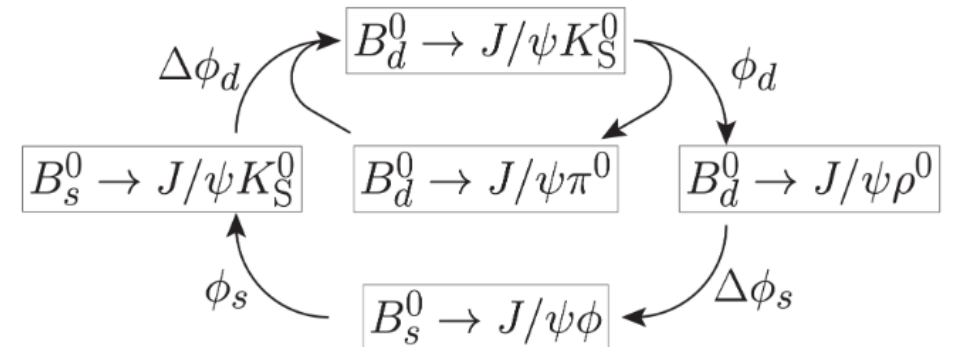
05.03.2024

# Задачи на будущее

- Текущая погрешность определения  $\phi_s$  сопоставима с  $\Delta\phi_{\text{penguins}}$ 
  - $\sigma(\phi_s) \sim 0.016$
  - $\Delta\phi_{\text{penguins}} \sim 0,5^\circ \approx 0.008$
  - Необходимо держать  $\Delta\phi_{\text{penguins}}$  под контролем
  - Одновременное измерение нескольких каналов распада
- Комбинированный анализ вклада диаграмм типа пингвин в  $\phi_s$  и  $\phi_d$  с использованием SU(3)-симметрии по аромату

$$\phi_d = \sin(2\beta^{\text{tree}}) + \Delta\phi_d^{\text{penguin}} + \phi_d^{\text{NP}}$$

$$\phi_s = \phi_s^{\text{tree}} + \Delta\phi_s^{\text{penguin}} + \phi_s^{\text{NP}}$$



1. Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 021801
2. Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 051802
3. Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 171802

# Заключение

- LHCb проанализировал все данные протон-протонных взаимодействий, набранные в ходе первого и второго сеансов работы БАК при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ
- Проведены измерения время-зависимого  $CP$ -нарушения в секторе прелестных мезонов и определены параметры треугольников унитарности:
- $\sin(2\beta)$  из распадов  $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$ 
  - $\sin(2\beta) = 0.716 \pm 0.013 \pm 0.008 \rightarrow$  улучшение мирового среднего на 35%
- $\phi_s$  из распада  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ 
  - $\phi_s = -0.039 \pm 0.022 \pm 0.006 \text{ rad} \rightarrow$  улучшение мирового среднего на 15%
- $\phi_s$  из распада  $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$ 
  - $\phi_s = -0.042 \pm 0.075 \pm 0.009 \text{ rad}$
- Все полученные результаты находятся в согласии с результатами предыдущих измерений, а также с оценками, проведенными на основе СМ