

Нарушение CP -инвариантности

(статус измерений CPV на конец 2013г.)

24 декабря 2013

Алексей Дзюба / Petersburg Nuclear Physics Institute, Russia

Кварковый сектор

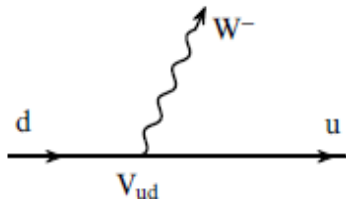
- Ароматовые с.с. \neq “слабые” с.с.

- Матрица смешивания V_{CKM}

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

- CPV фаза \Rightarrow 3 поколения

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



Унитарность V_{CKM}

$$VV^+ = \sum_l V_{al} V_{bl}^* = \delta_{ab}, \quad a, b = u, c, t$$

$$V^+V = \sum_a V_{al}^* V_{am} = \delta_{lm}, \quad l, m = d, s, b$$

Параметризация Вольфенштейна (иерархия элементов V_{CKM})

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

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

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

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

Три типа проявлений CPV

1: Прямые CPV в распадах мезонов

Как минимум 2 независимых процесса с разными слабыми и сильными фазами!

$$A_f = \langle f|H|P\rangle, \quad \bar{A}_{\bar{f}} = \langle \bar{f}|H|\bar{P}\rangle, \quad \boxed{A_f \neq \bar{A}_{\bar{f}}.} \quad \Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2} = \frac{-2|a||b| \sin(\varphi_a - \varphi_b) \sin(\delta_a - \delta_b)}{|a|^2 + |b|^2 + 2|a||b| \cos(\varphi_a - \varphi_b) \cos(\delta_a - \delta_b)}$$

2: Косвенные CPV при смешивании нейтральных мезонов

$$|P_{\lambda}^0\rangle = p|P^0\rangle + q|\bar{P}^0\rangle, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1, \quad \boxed{\frac{q}{p} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \neq 1} \quad |P_{S,L}^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\varepsilon|^2)}} [(1 + \varepsilon)|P^0\rangle \pm (1 - \varepsilon)|\bar{P}^0\rangle] \\ = \frac{1}{\sqrt{1 + |\varepsilon|^2}} [|P_{1,2}^0\rangle + \varepsilon|P_{2,1}^0\rangle]$$

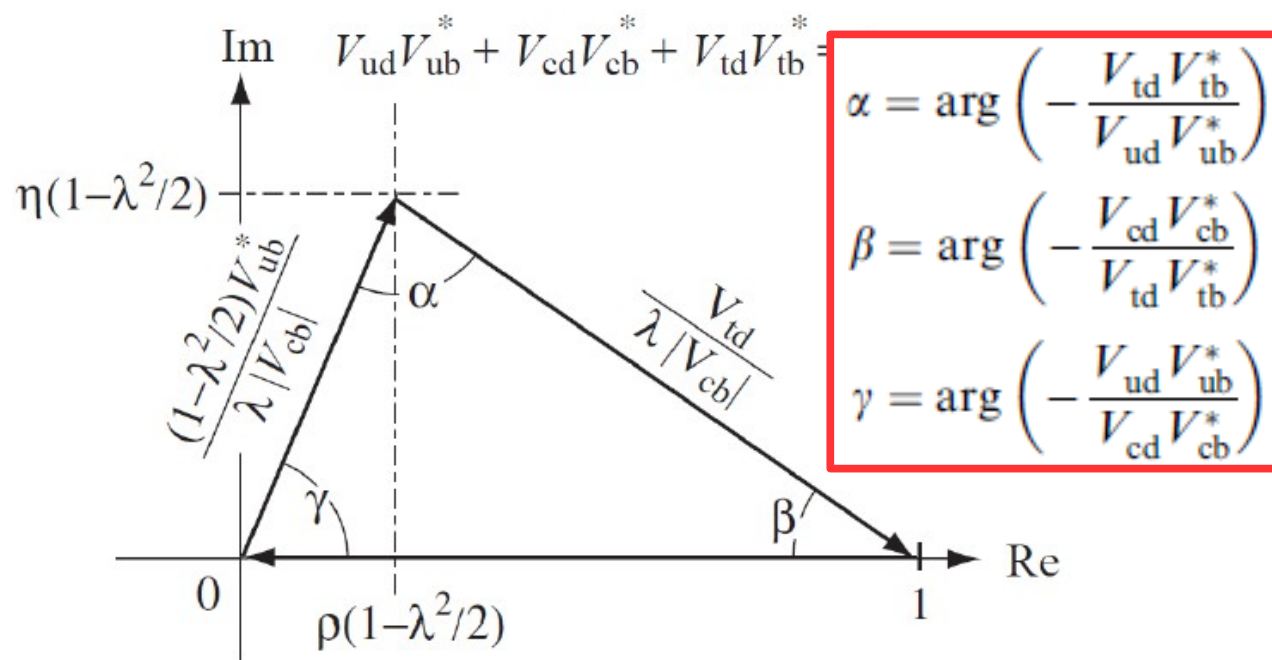
3: Интерференция #1 и #2

$$\boxed{\lambda_{f_{CP}} = \frac{q}{p} \frac{\bar{A}}{A}}$$

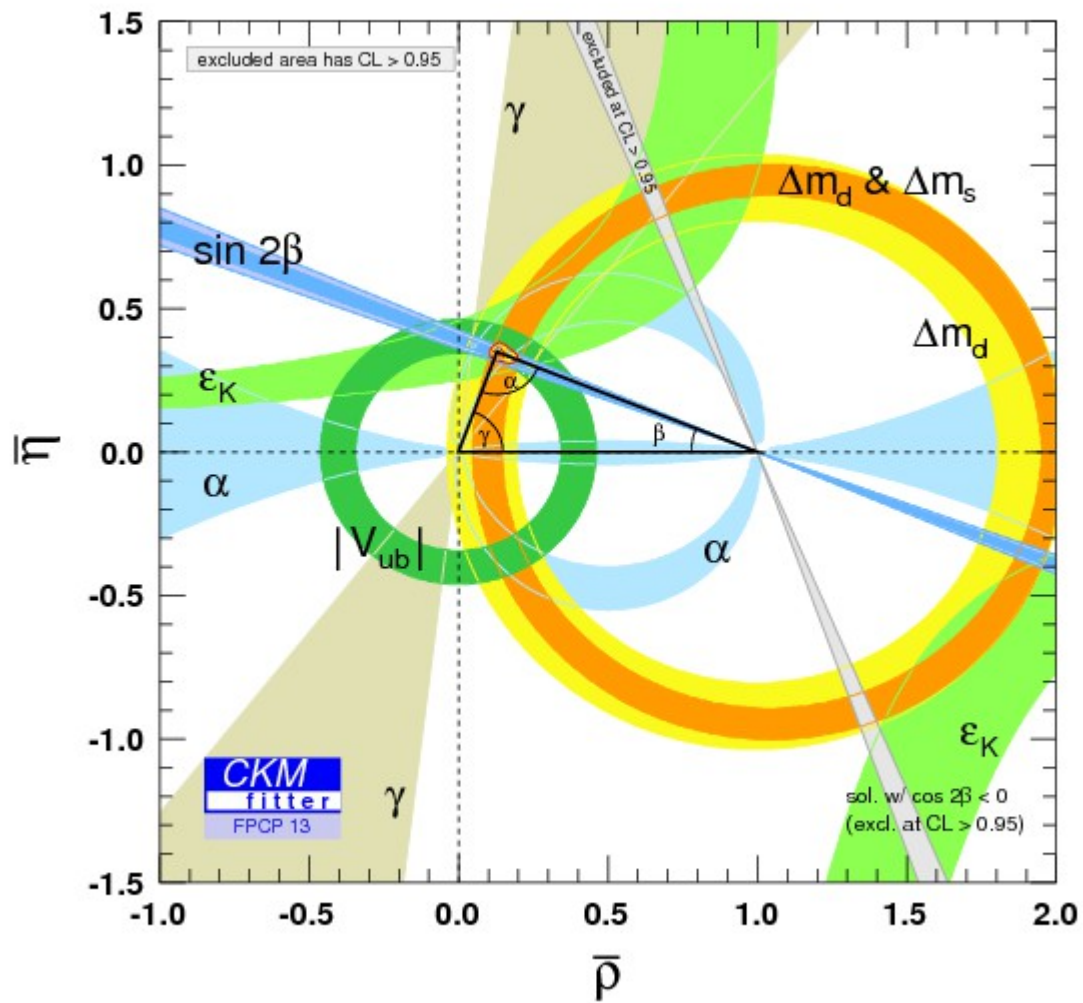
$$|q/p| \simeq 1 \quad \text{и} \quad |\bar{A}/A| \simeq 1$$

$$|\lambda_{f_{CP}}| = 1, \quad \text{но при этом} \quad \text{Im} \lambda_{f_{CP}} \neq 0$$

Унитарный треугольник

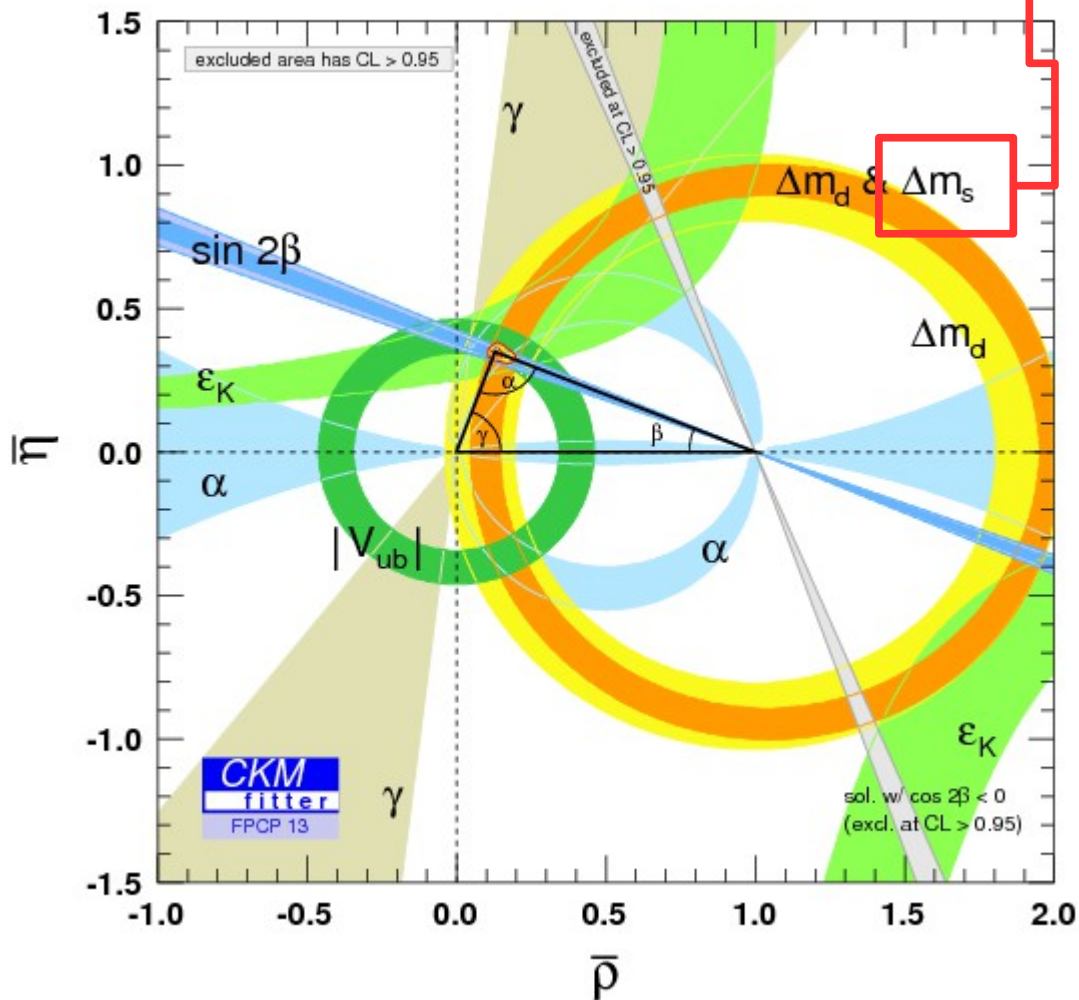


Унитарный треугольник

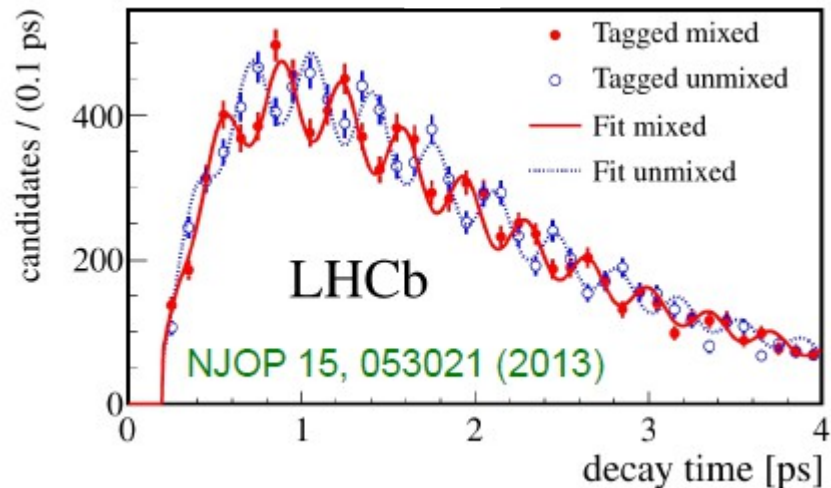


Унитарный треугольник (данные 2013)

LHCb: частота осцилляций B_s



Временная зависимость распадов:



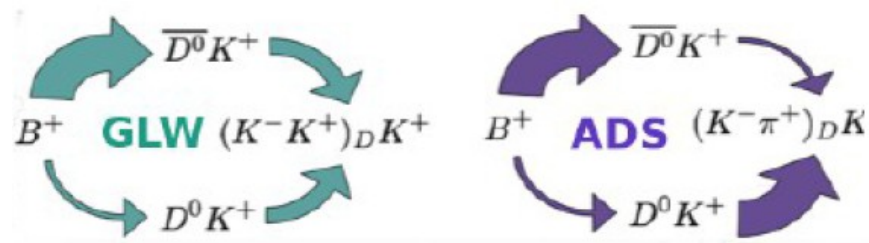
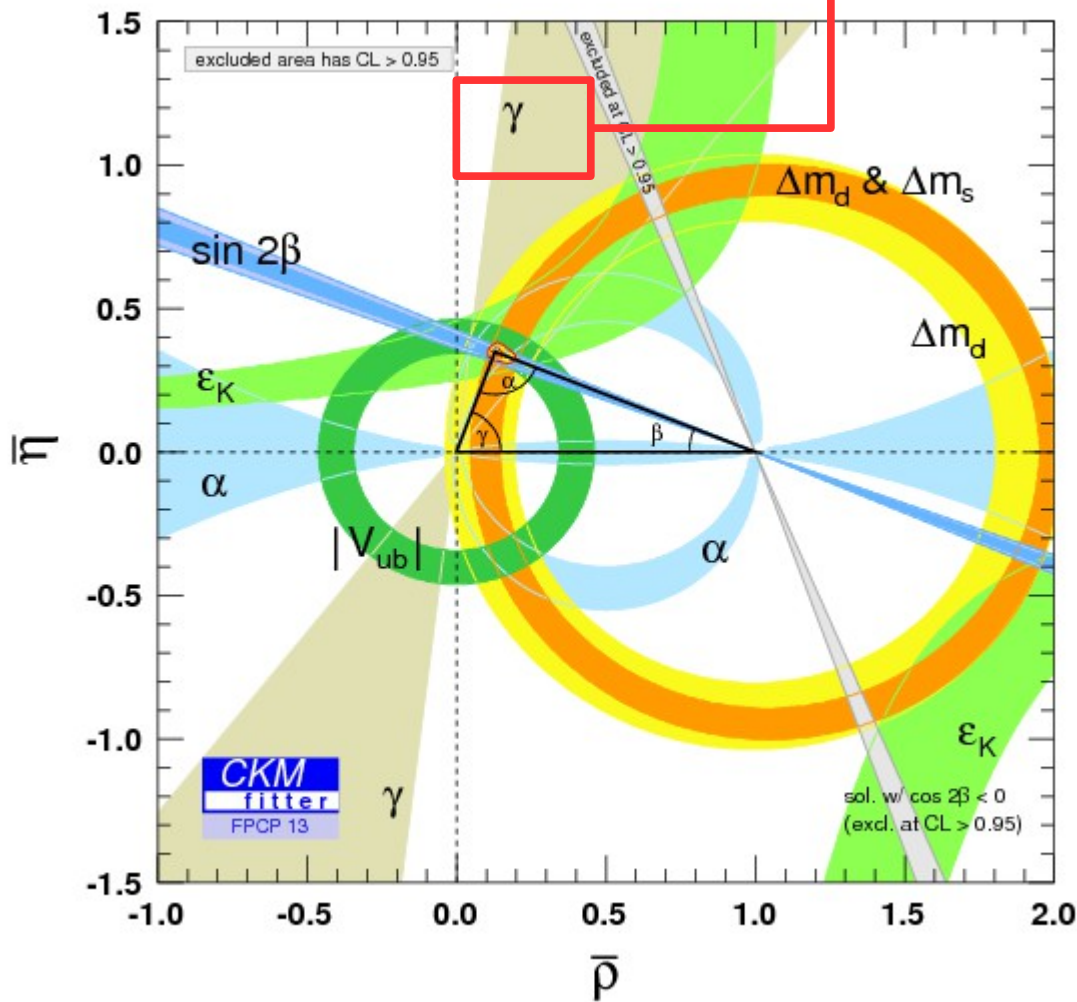
$\Delta m_s = 17.768 \pm 0.023 (stat) \pm 0.006 (syst) ps^{-1}$

Самое точное измерение на сегодняшний день.
Согласуется с СМ и другими измерениями

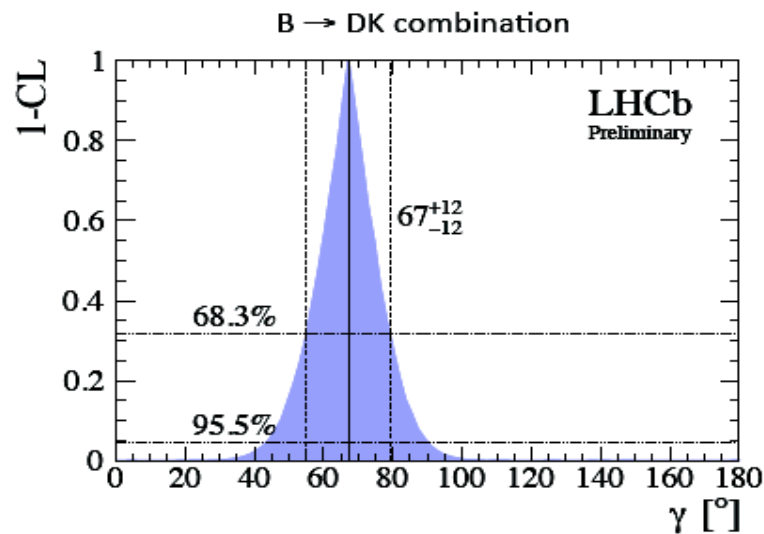
Также измерена в полулептонных распадах [arXiv:1308.1302] !

Унитарный треугольник (данные 2013)

LHCb: измерение угла γ



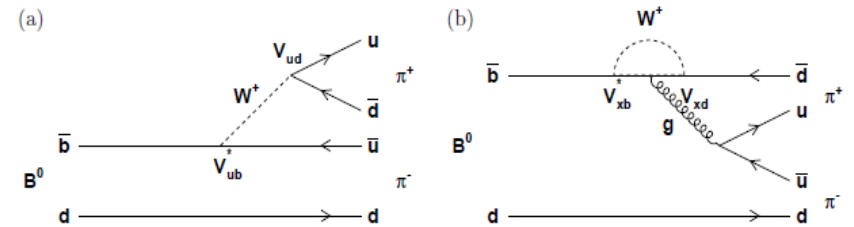
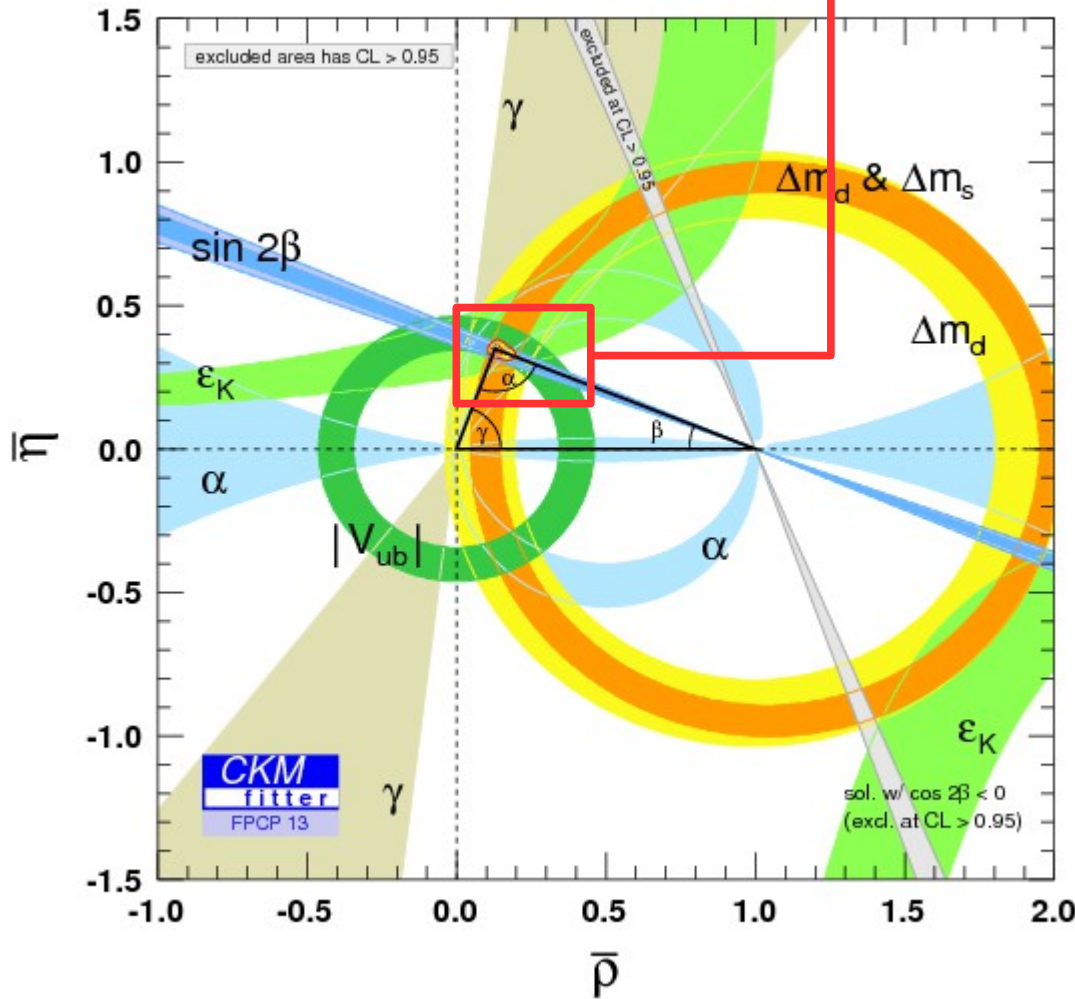
- (Two-body GLW/ADS) : $B \rightarrow Dh, D \rightarrow hh$ [Phys. Lett. B712 (2012) 203]
- (Four-body ADS) : $B \rightarrow Dh, D \rightarrow K\pi\pi\pi$ [LHCb-PAPER-2012-055; arxiv:1303.4646]
- (GGSZ) : $B \rightarrow DK, D \rightarrow K_s hh$ [Phys. Lett. B718 (2012) 43]



$\gamma = (67 \pm 12)^\circ$ at 68% CL

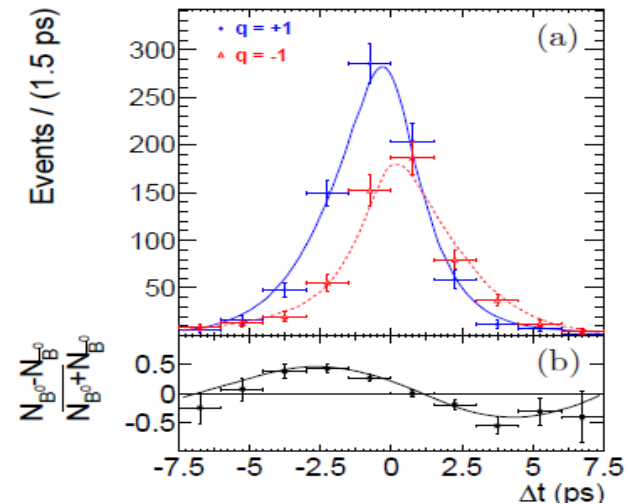
Унитарный треугольник (данные 2013)

Belle: измерение угла α



$$\mathcal{P}(\Delta t, q) = \frac{e^{-|\Delta t|/\tau_{B^0}}}{4\tau_{B^0}} \left\{ 1 + q \left[\mathcal{A}_{CP} \cos \Delta m_d \Delta t + \mathcal{S}_{CP} \sin \Delta m_d \Delta t \right] \right\}$$

$$\mathcal{S}_{CP} = \sqrt{1 - \mathcal{A}_{CP}^2} \sin(2\phi_2 + 2\Delta\phi_2)$$



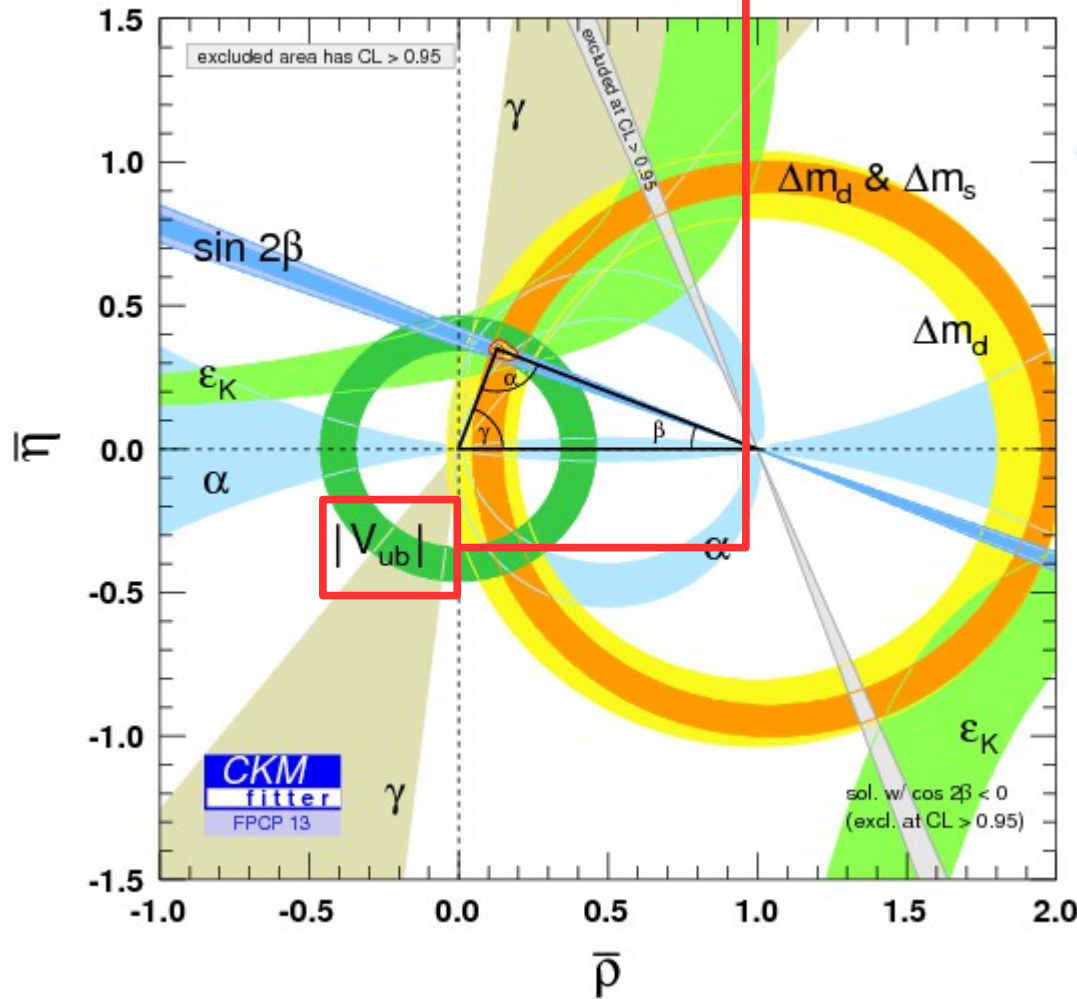
$$\mathcal{A}_{CP}(B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) = +0.33 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)},$$

$$\mathcal{S}_{CP}(B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) = -0.64 \pm 0.08 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)},$$

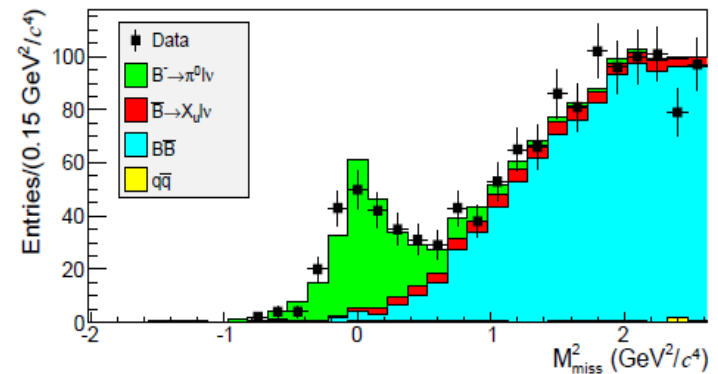
$$23.8^\circ < \phi_2 < 66.8^\circ$$

Унитарный треугольник (данные 2013)

Belle: измерение $|V_{ub}|$



$B^- \rightarrow \pi^0 \ell^- \bar{\nu}_\ell$, $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \ell^- \bar{\nu}_\ell$, $B^- \rightarrow \rho^0 \ell^- \bar{\nu}_\ell$,
 $\bar{B}^0 \rightarrow \rho^+ \ell^- \bar{\nu}_\ell$ and $B^- \rightarrow \omega \ell^- \bar{\nu}_\ell$

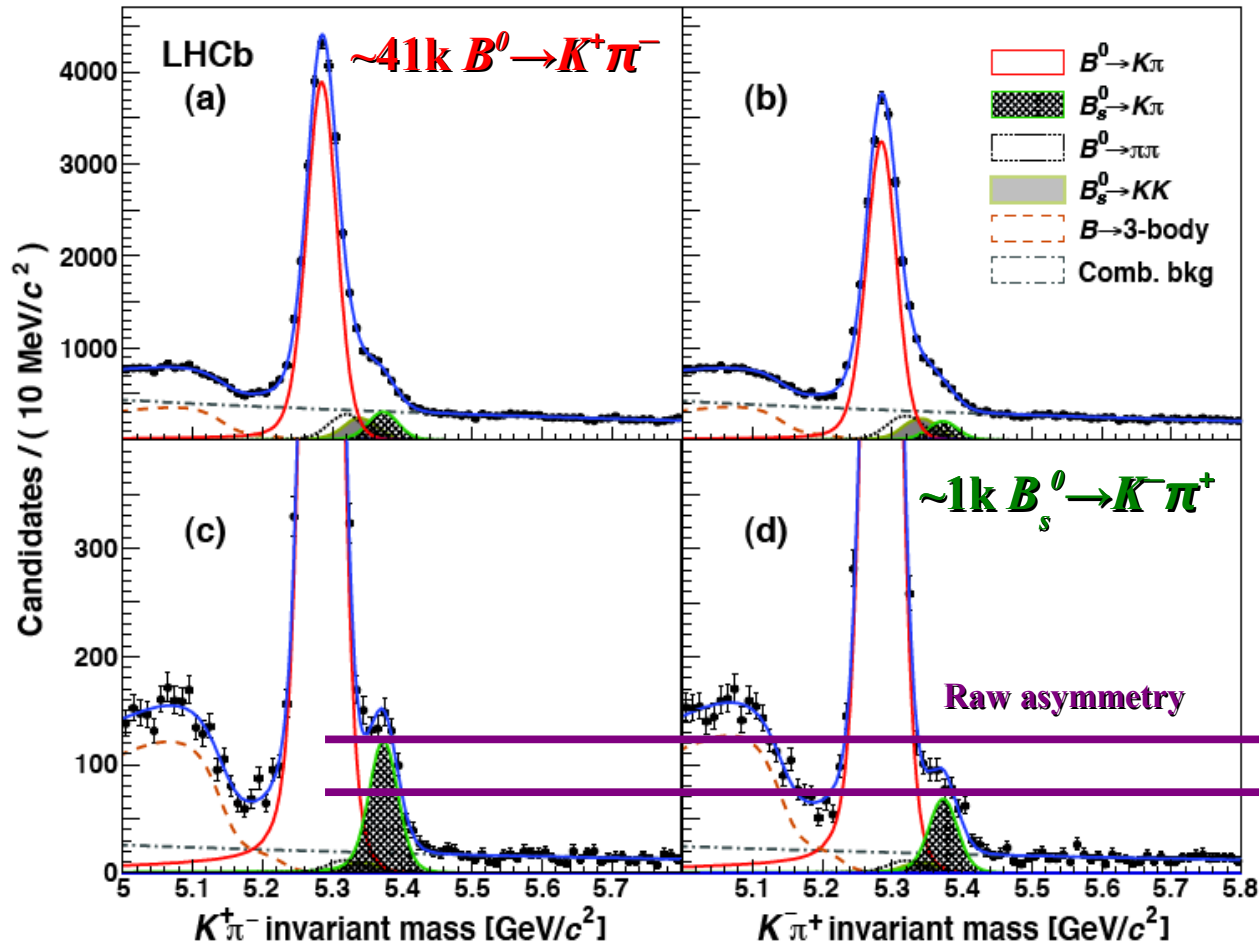


$$|V_{ub}| = (3.52 \pm 0.29) \times 10^{-3}$$

Прямое CPV в распадах B(s)

PRL 110, 221601

$$A_{CP} = A_{\text{raw}} - A_{\Delta} \quad A_{\Delta}(B_{(s)}^0 \rightarrow K\pi) = \zeta_{d(s)} A_D(K\pi) + \kappa_{d(s)} A_P(B_{(s)}^0)$$



$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-) =$$

$$= -0.080 \pm 0.007_{\text{stat}} \pm 0.003_{\text{syst}}$$

Самое точное измерение

$$A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K^- \pi^+) =$$

$$= 0.27 \pm 0.04_{\text{stat}} \pm 0.01_{\text{syst}}$$

1st измерение (6.5 σ) прямой CP

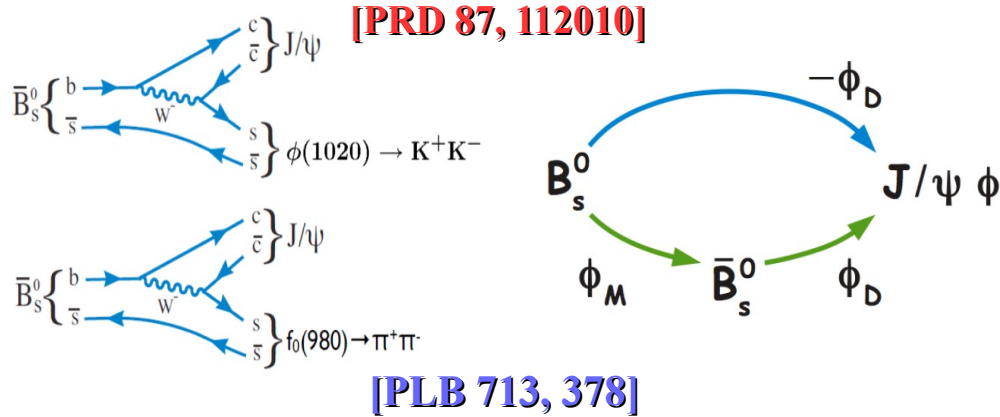
асимметрии в B_s^0 системе

Предсказание SM:

$$\Delta = \frac{A_{CP}(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K^- \pi^+)} + \frac{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow K^- \pi^+) \tau_d}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-) \tau_s} = 0,$$

$$\Delta = -0.02 \pm 0.05 \pm 0.04$$

Измерение ϕ_s (LHCb 2013)

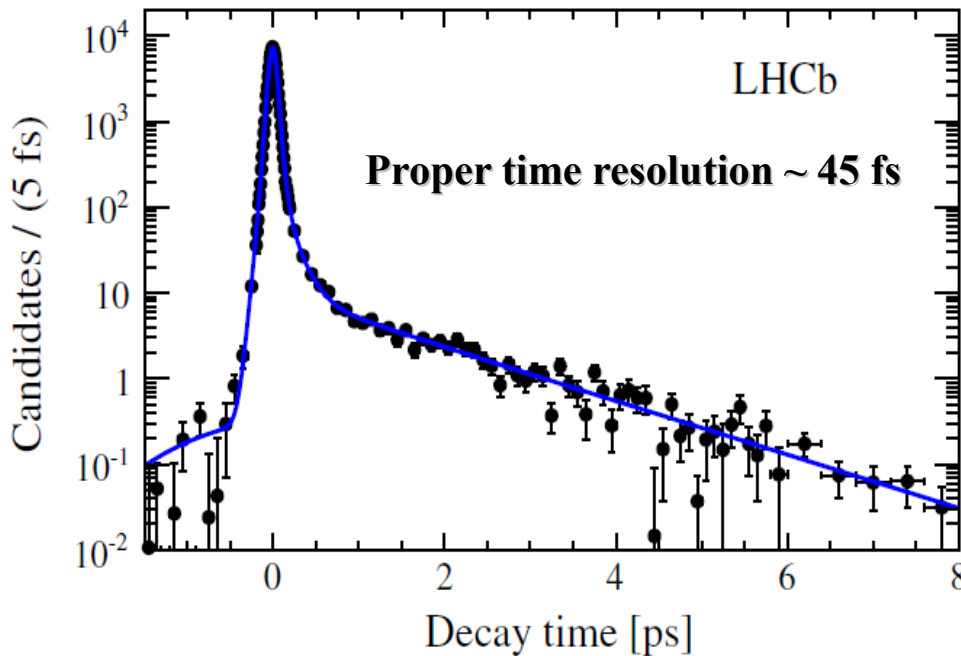


- **CPV фаза** очень мала в СМ **very small in SM**
CKMfitter group [PRD 84, 033005]

$$\phi_s^{SM} = -2\beta_s = (-0.0363 \pm 0.0016) \text{ rad}$$

- LHCb (1 fb^{-1}) [PRD 87,112010]
- Зависимость CP асимметрии от времени

$$A_{CP}(t) \sim (1 - 2\omega_{\text{tag}}) D(\sigma_t) \sin(\Delta m_s(t)) \sin(\phi_s)$$



Combined fit of $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ and $J/\psi\pi^+\pi^-$

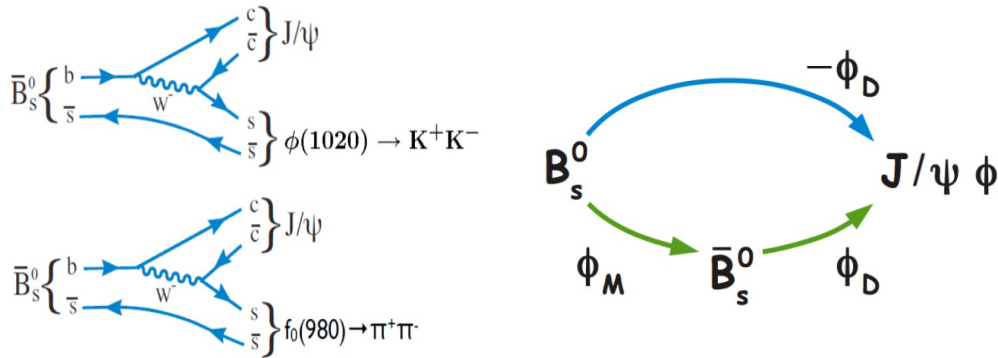
$$\phi_s = 0.01 \pm 0.07(\text{stat}) \pm 0.01(\text{syst}) \text{ rad,}$$

$$\Gamma_s = 0.661 \pm 0.004(\text{stat}) \pm 0.006(\text{syst}) \text{ ps}^{-1}$$

$$\Delta\Gamma_s = 0.106 \pm 0.011(\text{stat}) \pm 0.007(\text{syst}) \text{ ps}^{-1}$$

[PRD 87, 112010]

Измерение ϕ_s (LHCb 2013)



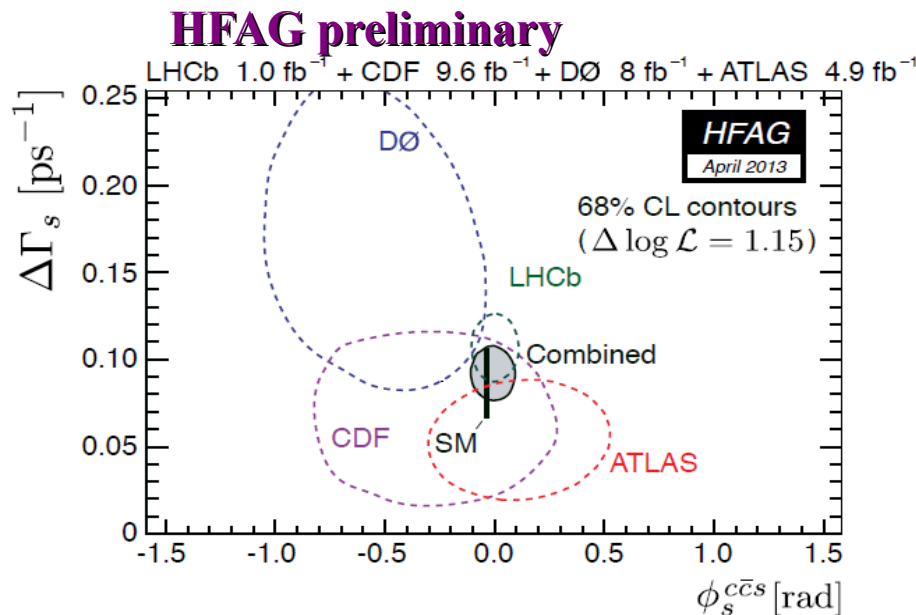
- **CPV фаза** очень мала в CM **very small in SM**
CKMfitter group [PRD 84, 033005]

$$\phi_s^{SM} = -2\beta_s = (-0.0363 \pm 0.0016) \text{ rad}$$

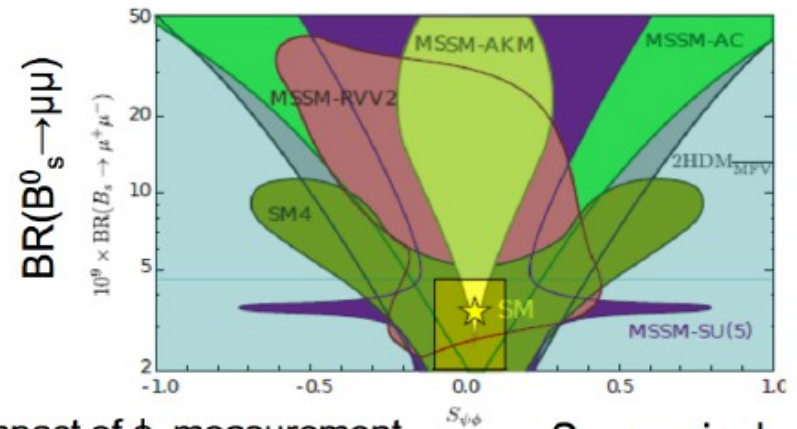
- LHCb (1 fb⁻¹) [PRD 87,112010]
- Зависимость CP асимметрии от времени

$$A_{CP}(t) \sim (1 - 2\omega_{\text{tag}}) D(\sigma_t) \sin(\Delta m_s(t)) \sin(\phi_s)$$

Данные согласуются с CM



based on [arXiv:1107.0266]



Impact of ϕ_s measurement
(together with $BR(B_s^0 \rightarrow \mu\mu)$)

$$S_{\psi\phi} = -\sin \phi_s$$

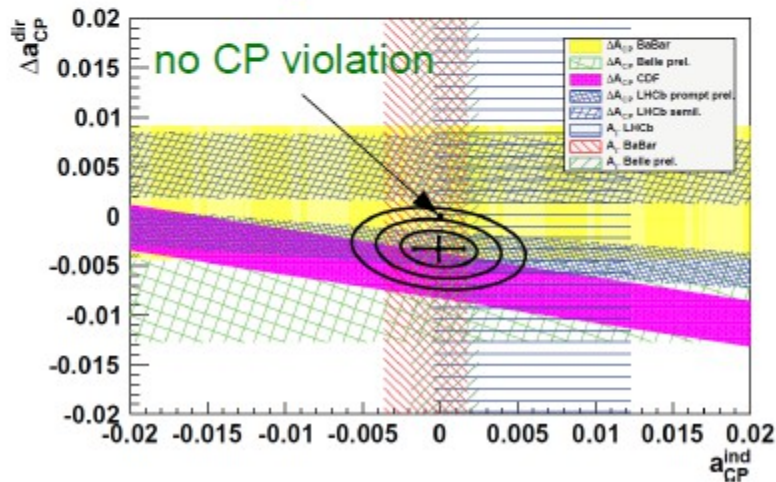
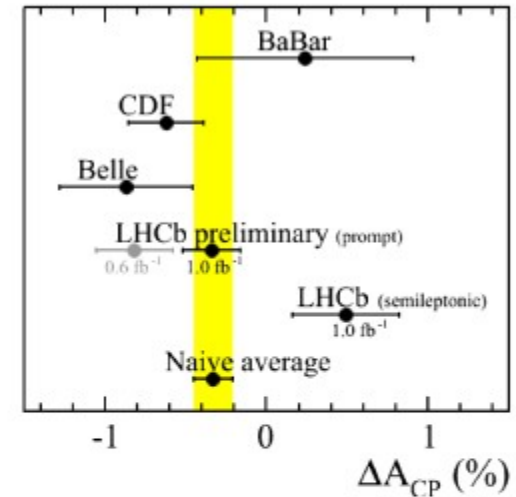
“Закрyтия”-2013 (CPV в распадах D^0)

Результаты LHCb:

[LHCb-CONF-2013-004]

- D^* tagged sample (preliminary)
 $\Delta A_{CP} = (-0.34 \pm 0.15 (stat) \pm 0.10 (sys)) \%$
- μ tagged sample [PLB 723,33]
 $\Delta A_{CP} = (+0.49 \pm 0.30 (stat) \pm 0.14 (sys)) \%$

Новые данные согласуются с отсутствием CPV



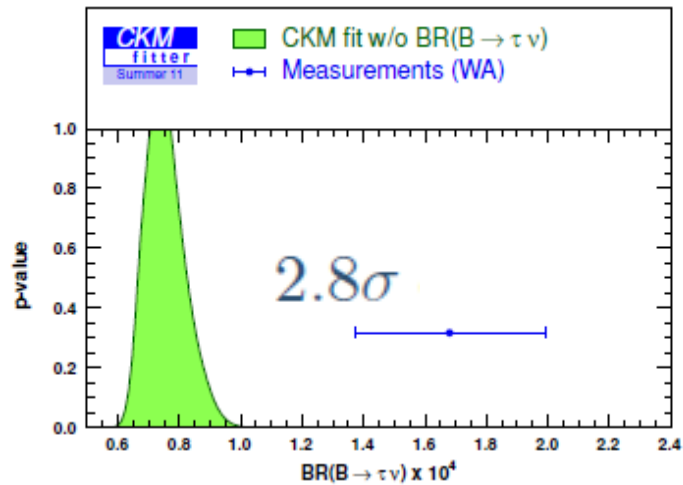
HFAG средние:

$$a_{CP}^{ind} = (-0.010 \pm 0.162) \%$$

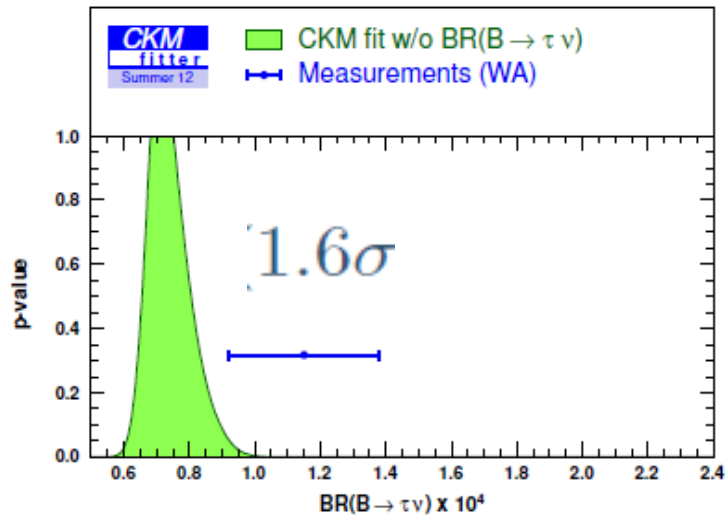
$$\Delta a_{CP}^{dir} = (-0.329 \pm 0.121) \%$$

“Закрyтия”-2013 (новые результаты по $B \rightarrow \tau \nu$)

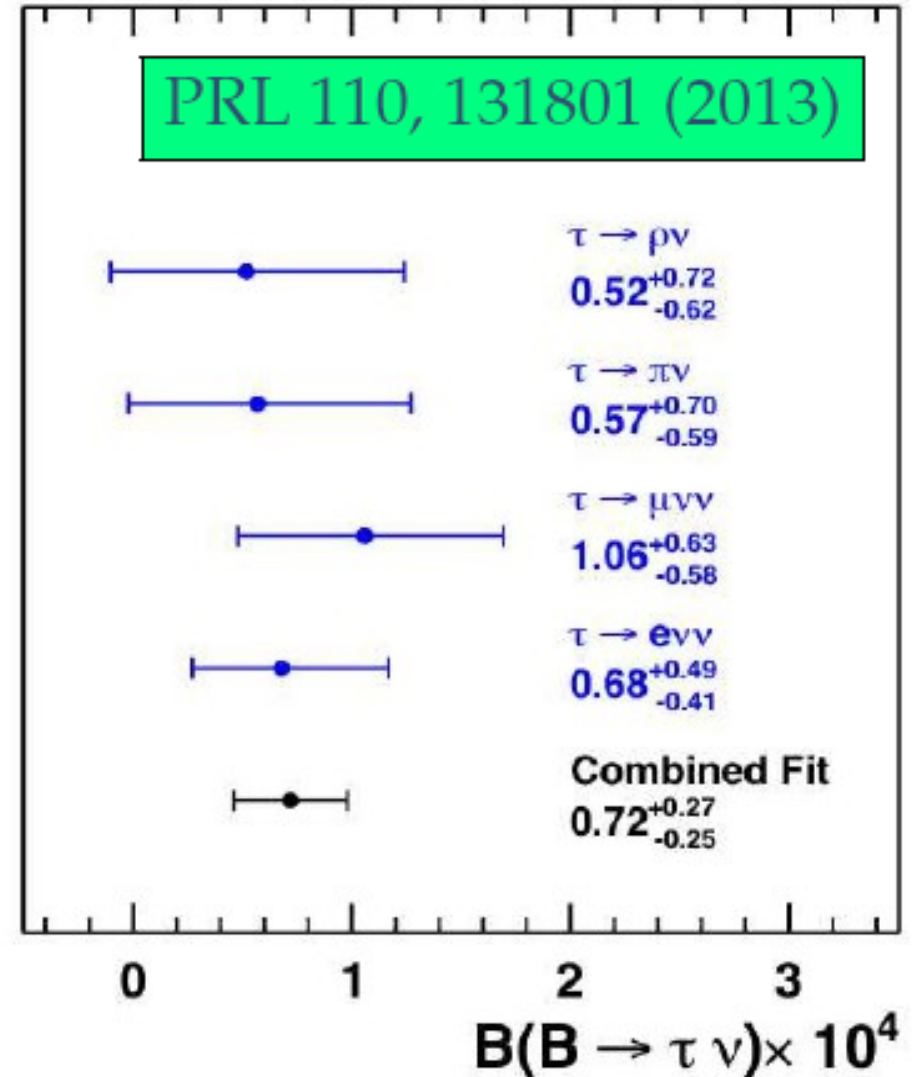
Октябрь 2012г.



Новые измерения Belle



Адронное тагирование B



Лептонный сектор (нейтрино)

- Феномен осцилляций нейтрино достоверно установлен.
- Матрица смешивания (Понтекорво-Маки-Накагава-Саката) – 3 угла + CPV фаза
- 2011-12 T2K, MINOS, Double Chooz, Daya Bay, RENO – точное измерение θ_{13}
- Нормальная или инверсная иерархия масс?

$$\begin{array}{lll} \Delta m_{12}^2 = 7.58_{-0.26}^{+0.22} \times 10^{-5} eV^2 & \sin^2 \theta_{12} = 0.306_{-0.015}^{+0.018} & \sin^2 \theta_{13} = 0.021_{-0.08}^{+0.07} \\ |\Delta m_{23}^2| = 2.35_{-0.09}^{+0.12} \times 10^{-3} eV^2 & \sin^2 \theta_{23} = 0.42_{-0.03}^{+0.08} & \delta_{CP} \in [0^\circ, 360^\circ] \end{array}$$

- Сила CPV – инвариант Ярлскога

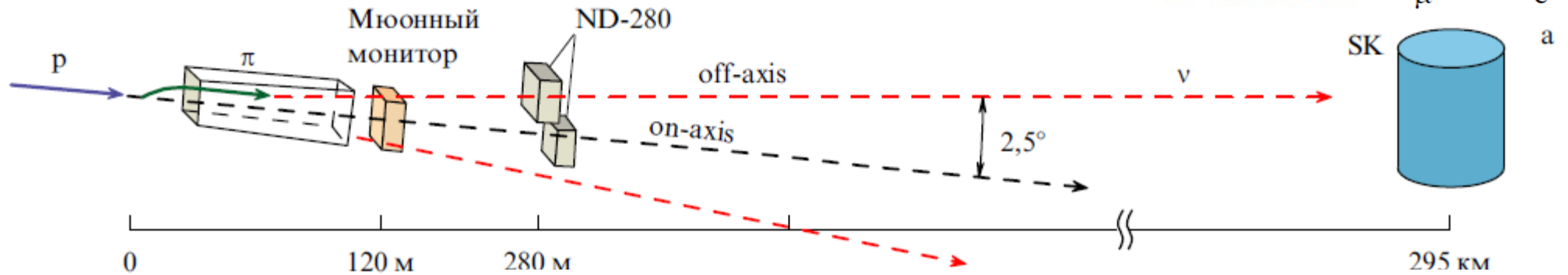
$$J_{CP}^{PMNS} = \cos \theta_{12} \sin \theta_{12} \cos^2 \theta_{13} \sin \theta_{13} \cos \theta_{23} \sin \theta_{23} \sin \delta$$

- CPV-эффекты в лептонном секторе могут быть почти 1000 раз усилены по отношению CPV при смешивании кварков

$$J_{CP}^{CKM} \sim 3 \times 10^{-5} \quad J_{CP}^{PMNS} \sim 0,035 \sin \delta$$

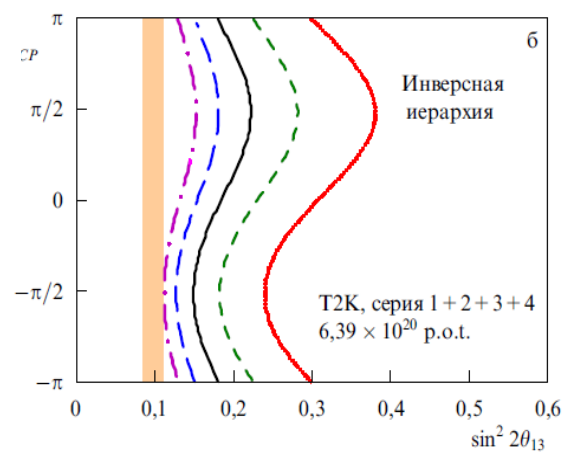
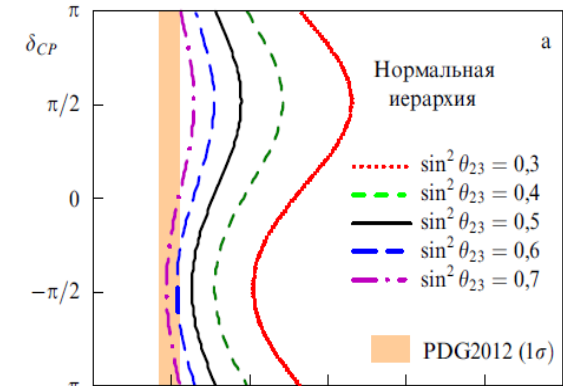
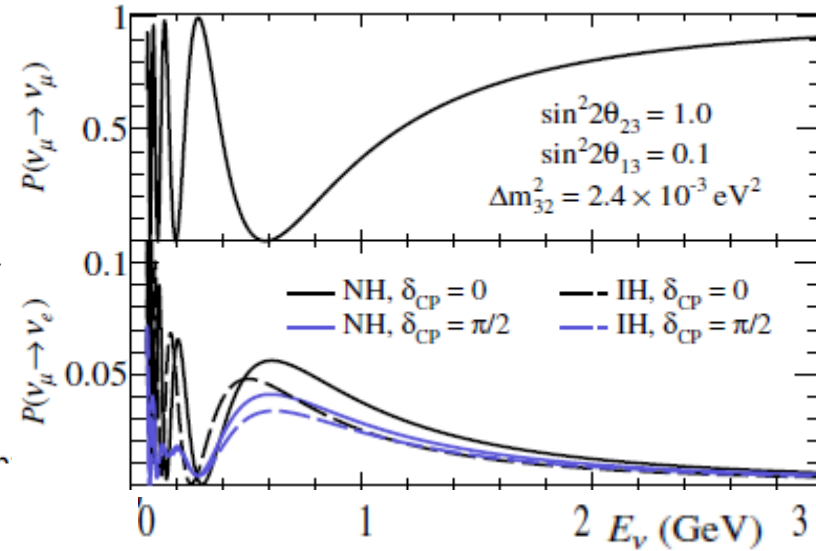
CPV в лептонном секторе

Эксперимент T2K



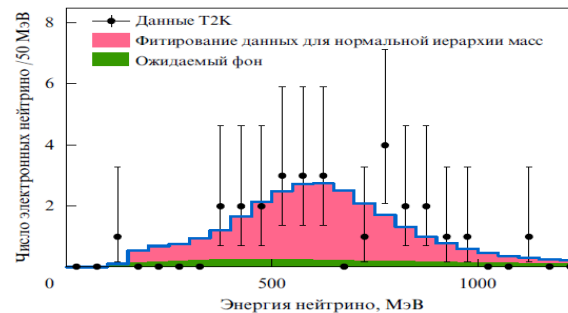
28 событий $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = \frac{1}{(A-1)^2} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2[(A-1)\Delta] - (+) \frac{\alpha}{A(1-A)} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \times \sin \delta_{CP} \sin \Delta \sin A \Delta \sin[(1-A)\Delta] + \frac{\alpha}{A(1-A)} \times \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \times \cos \delta_{CP} \cos \Delta \sin A \Delta \sin[(1-A)\Delta] + \frac{\alpha^2}{A^2} \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 A \Delta.$$



$$\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{32}^2} \ll 1, \quad \Delta = \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu} \quad \text{and} \quad A = 2\sqrt{2}G_F N_e \frac{E_\nu}{\Delta m_{32}^2}$$

PhysRevD.88.032002



CPV и Стандартная Модель

#1: CP-нарушения в кварковом секторе

Уже довольно хорошо изученная область.

Много новых точных измерений в 2013 году.

Есть ли надежда на Новую физику?

#2: CP-нарушения в лептонном секторе (нейтрино)

Указания на потенциальную возможность сильного CPV

2015-2017 (оптимистический сценарий) первые измерения δ_{CP}

Достаточно ли сценария с максимальным J^{PMNS} для описания барионной асимметрии Вселенной? ЭДМ электрона?

#3: Θ -член КХД и ЭДМ эл.ч. $L_{\Theta} = \frac{\Theta_{\text{QCD}}}{32\pi^2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} F^{\mu\nu} F^{\rho\sigma}$ $d_N \simeq 5 \times 10^{-16} \Theta_{\text{QCD}} e \cdot \text{см.}$ $\Theta_{\text{QCD}} \lesssim 10^{-10}$

Поиски электрического дипольного момента (ЭДМ) нуклонов.

Может ли КХД быть ответственна за генерацию барионной асимметрии?