

Mešanje pri nevtralnih mezonih D

Marko Starič
Institut Jožef Stefan

10. marec 2008
Ponedeljkov fizikalni kolokvij

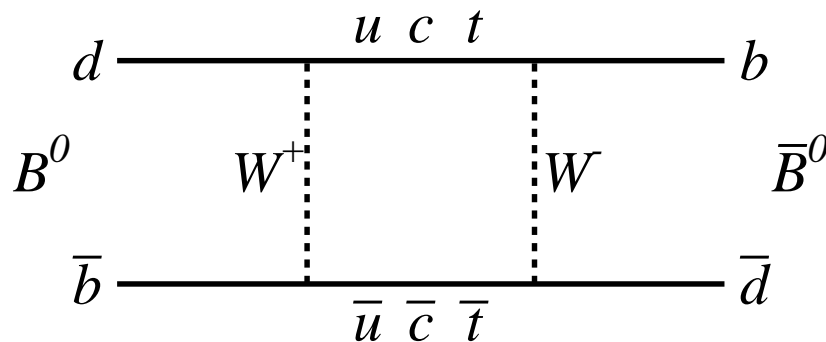
- ❖ Uvod
- ❖ Eksperiment Belle
- ❖ Nekaj teorije
- ❖ Merske metode
- ❖ Opis štirih meritev
- ❖ Interpretacija rezultatov
- ❖ Zaključek

Mešanje mezonov

- ❖ Mešanje = prehajanje delcev v antidelce in obratno
- ❖ Mogoče le pri nevtralnih mezonih

$$K^0, D^0, B_d^0, B_s^0$$

- ❖ V Standardnem modelu (SM): najnižji red = box diagram



Zgodovina

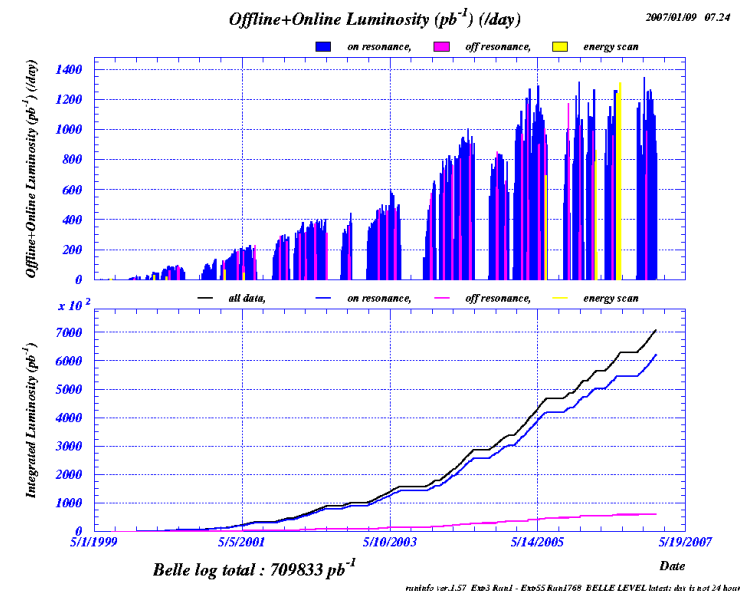
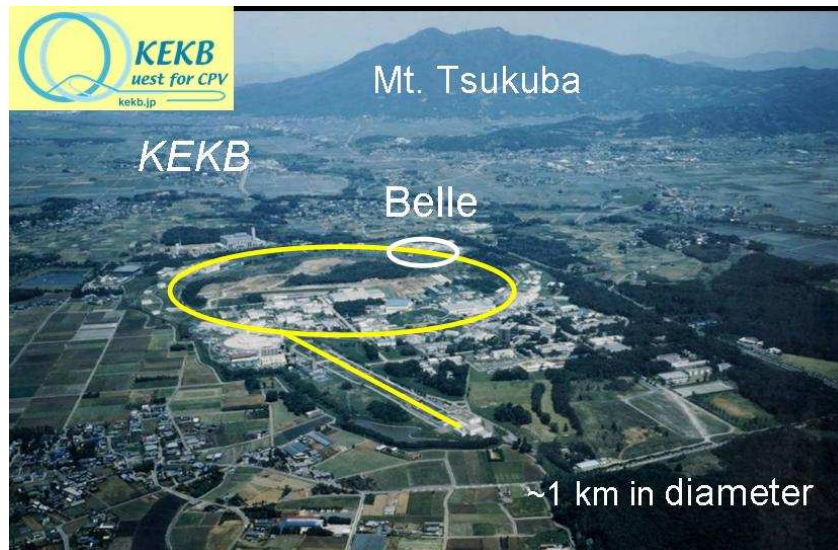
odkritje K^0 :
 1950 (Caletch)
 mešanje pri K^0 : → kvark c
 1956 (Columbia) 6 let

odkritje B_d^0 :
 1983 (CESR)
 mešanje pri B_d^0 : → kvark t
 1987 (Desy) 4 leta

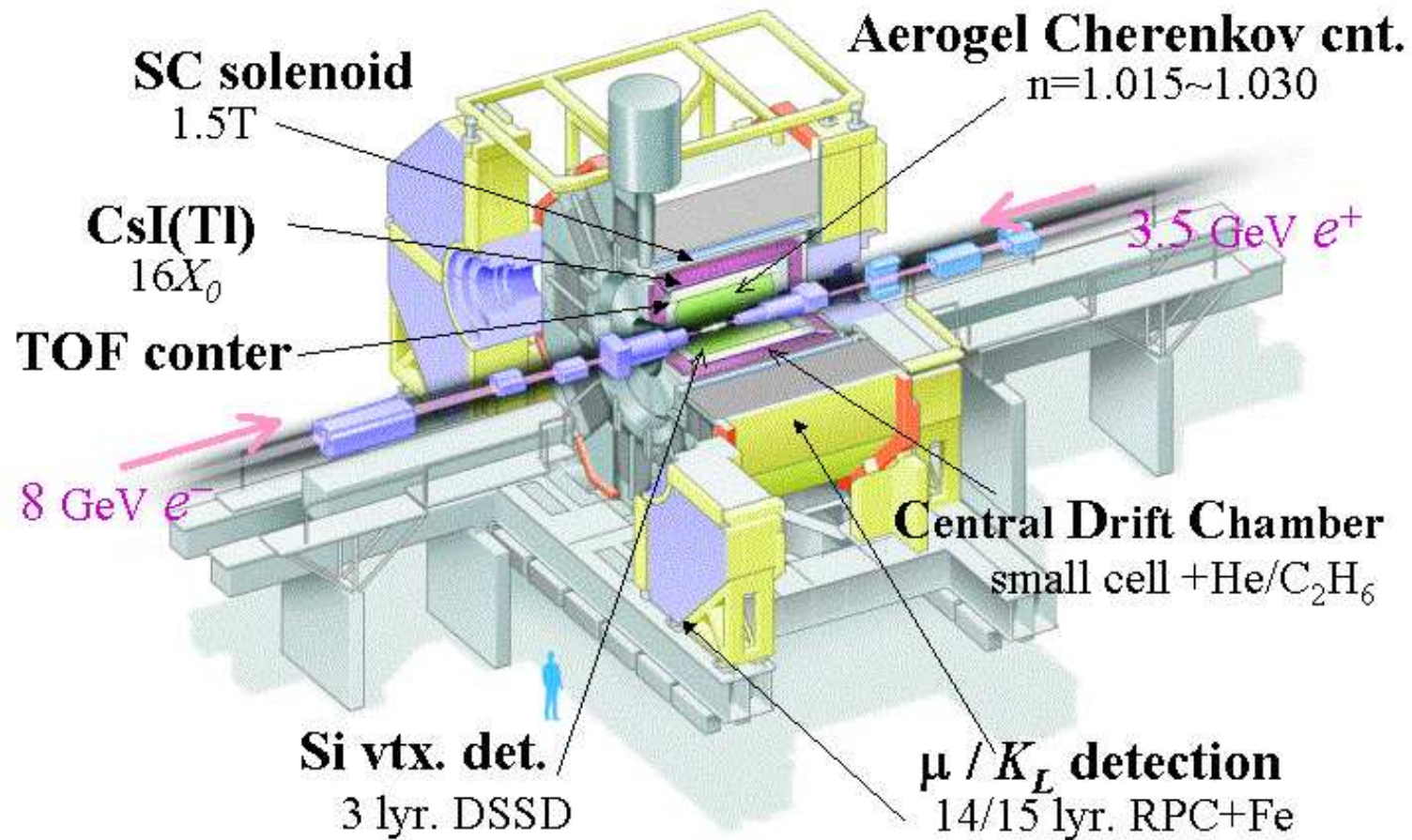
odkritje B_s^0 :
 1992 (LEP)
 mešanje pri B_s^0 : → ??
 2006 (Fermilab) 14 let

odkritje D^0 :
 1976 (SLAC)
 mešanje pri D^0 : → ??
 2007 (KEK, SLAC) 31 let

- ❖ KEK, Tsukuba, Japonska
- ❖ KEKB: asimetrični e^+e^- trkalnik pri energiji $\Upsilon(4s)$ ("B-tovarna")
 $e^+(3.5\text{GeV}) \rightarrow \leftarrow e^-(8\text{GeV})$
- ❖ Kontinuiran vbrizg elektronov in pozitronov
- ❖ Luminoznost: $\mathcal{L} = 1.7 \cdot 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$
- ❖ Integrirana luminoznost: $\int \mathcal{L} dt = 775 \text{fb}^{-1}$

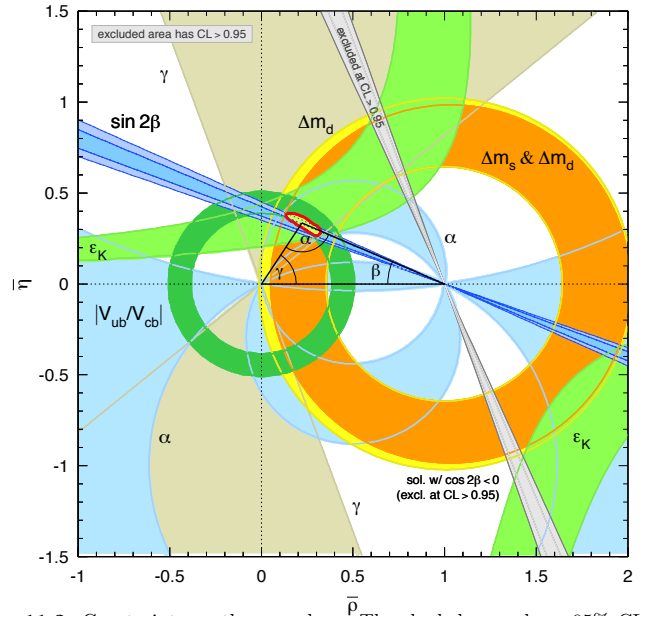


Belle Detector



Fizikalni program pri Belle

- ◆ Poglavitni namen: meritev kršitve simetrije CP pri mezonih B
prvič opazovano leta 2001
od tedaj mnogo preciznih meritev



- ◆ Veliko meritev tudi v fiziki čarobnih delcev (produkcijski presek: $\sigma(c\bar{c}) \approx \sigma(B\bar{B})$)
odkrite nove resonance
prvi očiten znak (*evidence*) za mešanje mezonov D^0

Mešanje mezonov

- ❖ Lastna stanja okusa \neq masna lastna stanja (masi m_1, m_2 , širini Γ_1, Γ_2)

$$|D_{1,2}^0\rangle = p|D^0\rangle \pm q|\bar{D}^0\rangle$$

- ❖ $p/q \neq 1 \Rightarrow$ kršitev simetrije CP
- ❖ Časovni razvoj podan z rešitvijo časovno odvisne Schrodingerjeve enačbe

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

kjer sta \hat{M} in $\hat{\Gamma}$ dve hermitski matriki

- ❖ Rešitev:

$$|D^0(t)\rangle = e^{-(\Gamma/2+im)t} \left[\cosh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |D^0\rangle + \frac{q}{p} \sinh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |\bar{D}^0\rangle \right]$$

$$|\bar{D}^0(t)\rangle = e^{-(\Gamma/2+im)t} \left[\frac{p}{q} \sinh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |D^0\rangle + \cosh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |\bar{D}^0\rangle \right]$$

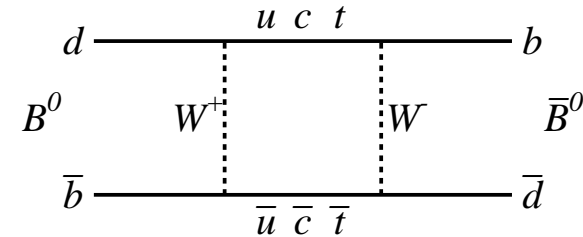
- ❖ Parametra mešanja:

$$x = \frac{\Delta m}{\Gamma} \quad y = \frac{\Delta\Gamma}{2\Gamma}$$

Najnižji red v SM

- ❖ Sklopitve v verteksih podaja CKM matrika

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$



- ❖ Propagatorji vsebujejo mase delcev
- ❖ Matrični element

$$\langle \bar{B}^0 | \mathcal{H} | B^0 \rangle \propto \sum_{i,j=u,c,t} V_{ib}^* V_{id} V_{jd} V_{jb}^* \mathcal{F}(m_W^2, m_i^2, m_j^2)$$

▷ Če so mase kvarkov enake, **mešanja ni**, ker je CKM unitarna

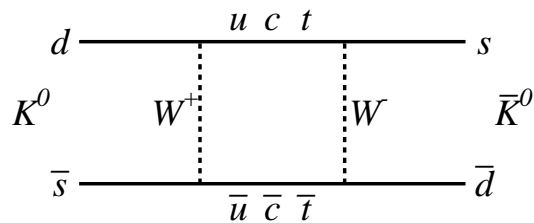
- ❖ Zelo poenostavljeno:

$$\langle \bar{B}^0 | \mathcal{H} | B^0 \rangle \propto \sum_{i,j=u,c,t} V_{ib}^* V_{id} V_{jd} V_{jb}^* m_i m_j$$

▷ Največ prispevajo **težki kvarki** (če sta ustrezni sklopitvi dovolj veliki)

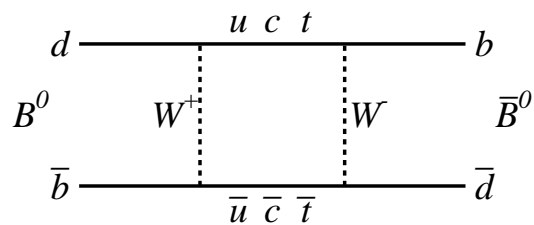
Kateri kvarki prispevajo?

$$\mathcal{M} \propto \sum_{i,j=u,c,t} V_{ib}^* V_{id} V_{jd} V_{jb}^* m_i m_j$$



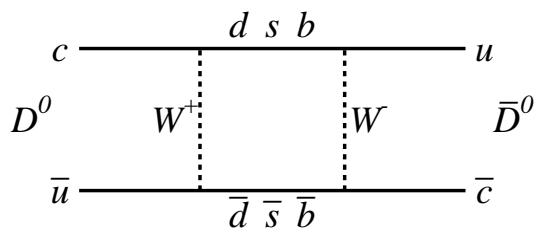
$$K^0 - \bar{K}^0$$

$$\begin{aligned} |V_{us}V_{ud}| \cdot m_u &= 0.2 \cdot 1 \cdot 0.003 &= 0.0006 \\ |V_{cs}V_{cd}| \cdot m_c &= 1 \cdot 0.2 \cdot 1.3 &= \mathbf{0.3} \quad \rightarrow c \\ |V_{ts}V_{td}| \cdot m_t &= 0.04 \cdot 0.008 \cdot 175 &= 0.06 \end{aligned}$$



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

$$\begin{aligned} |V_{ub}V_{ud}| \cdot m_u &= 0.004 \cdot 1 \cdot 0.003 &= 10^{-5} \\ |V_{cb}V_{cd}| \cdot m_c &= 0.04 \cdot 0.2 \cdot 1.3 &= 0.01 \\ |V_{tb}V_{td}| \cdot m_t &= 1 \cdot 0.008 \cdot 175 &= \mathbf{1.4} \quad \rightarrow t \end{aligned}$$



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

$$\begin{aligned} |V_{cd}V_{ud}| \cdot m_d &= 0.2 \cdot 1 \cdot 0.006 &= 0.001 \\ |V_{cs}V_{us}| \cdot m_s &= 1 \cdot 0.2 \cdot 0.1 &= \mathbf{0.02} \quad \rightarrow s \\ |V_{cb}V_{ub}| \cdot m_b &= 0.04 \cdot 0.004 \cdot 4.3 &= 0.0007 \end{aligned}$$

Mešanje pri D^0 veliko manjše, kot pri K^0 , B_d^0 ali B_s^0

Box diagram: $x \sim 10^{-5}$, $y \sim 10^{-7}$ (pri B_d^0 : $x = 0.77$, $y \approx 5 \times 10^{-3}$)

Mešanje pri D^0

$$\begin{aligned}
 |D^0(t)\rangle &= e^{-(\Gamma/2+im)t} \left[\cosh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |D^0\rangle + \frac{q}{p} \sinh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |\bar{D}^0\rangle \right] \\
 |\bar{D}^0(t)\rangle &= e^{-(\Gamma/2+im)t} \left[\frac{p}{q} \sinh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |D^0\rangle + \cosh\left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |\bar{D}^0\rangle \right]
 \end{aligned}$$

- ❖ Ker je mešanje pri D^0 majhno ($|x|, |y| \ll 1$):

$$|D^0(t)\rangle = e^{-(\Gamma/2+im)t} \left[|D^0\rangle + \frac{p}{q} \left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) |\bar{D}^0\rangle \right]$$

- ❖ Časovna odvisnost pogostosti razpadov $D^0 \rightarrow f$:

$$\frac{dN_{D^0 \rightarrow f}}{dt} \propto |\langle f | \mathcal{H} | D^0(t) \rangle|^2 = e^{-\Gamma t} \left| \langle f | \mathcal{H} | D^0 \rangle + \frac{q}{p} \left(\frac{y+ix}{2}\Gamma t\right) \langle f | \mathcal{H} | \bar{D}^0 \rangle \right|^2$$

- ❖ Eksponentno pojemanje, modulirano s parametroma x in y

▷ x in y lahko dobimo iz izmerjene časovne odvisnosti $\frac{dN_{D^0 \rightarrow f}}{dt}$

- ❖ Oblika porazdelitve odvisna tudi od končnega stanja

▷ različna končna stanja imajo različno občutljivost na x in y

Merska metoda

- ❖ Bistvo metode:
 - ▷ vsakemu razpadu označimo okus D^0 pri nastanku
 - ▷ in izmerimo lastni življenjski čas
- ❖ $D^{*+} \rightarrow \pi^+ D^0$
 - ▷ okus D^0 podan z nabojem π_{slow}
 - ▷ zmanjšanje ozadja

- ❖ Meritev lastnega življenjskega časa:

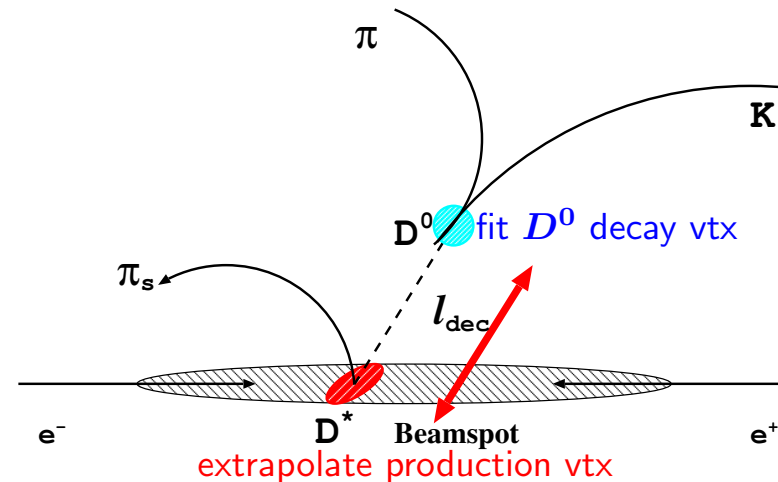
$$t = \frac{l_{dec}}{c\beta\gamma}, \quad \beta\gamma = \frac{p_{D^0}}{M_{D^0}}$$

σ_t ... nenatančnost meritve
(iz kovariančnih matrik)

- ❖ Merimo pri $\Upsilon(4S)$

▷ da zavržemo D^{*+} iz razpadov B :

$$p_{D^{*+}}^{CMS} > 2.5 \text{ GeV}/c$$



Nekaj merskih strategij

$$\frac{dN_{D^0 \rightarrow f}}{dt} \propto e^{-\Gamma t} |\langle f | \mathcal{H} | D^0 \rangle + \frac{q}{p} \left(\frac{y+ix}{2} \Gamma t \right) \langle f | \mathcal{H} | \bar{D}^0 \rangle|^2$$

- ❖ Semileptonski razpadi z napačno nabojno kombinacijo ($D^0 \rightarrow K^+ \ell^- \nu$)
 možni le preko mešanja: $\langle f | \mathcal{H} | D^0 \rangle = 0$
 merimo časovno integrirano pogostost mešanja $R_M = \frac{x^2+y^2}{2} = \frac{N_{WS}}{N_{RS}}$
- ❖ Hadronski razpadi z napačno nabojno kombinacijo ($D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$)
 možni kot dvojno Cabibbo potlačeni razpadi (DCS) ali preko mešanja
 dobimo interferenco med DCS and mešanjem (močna faza δ)
 merimo $x' = x \cos \delta + y \sin \delta$, $y' = y \cos \delta - x \sin \delta$
- ❖ Razpadi v CP stanja ($D^0 \rightarrow K^+ K^-, \pi^+ \pi^-$)
 če ni direktne CPV: $\langle f | \mathcal{H} | \bar{D}^0 \rangle = -\langle f | \mathcal{H} | D^0 \rangle$
 merimo y
- ❖ Razpadi v sebi-konjugirana stanja ($D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$)
 potrebna časovno odvisna analiza Dalitzovega diagrama
 merimo x in y

$D^0 \rightarrow K^+ e^- \nu$ (253 fb^{-1})

Semileptonski razpadi $D^0 \rightarrow K^+ e^- \nu$

U. Bitenc et al., Phys.Rev.D (RC) 72, 071101 (2005)

❖ Napačna nabojna kombinacija le preko mešanja

	okus pri nastanku		okus pri razpadu	
brez mešanja	$D^{*+} \rightarrow \pi^+ D^0$		$D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$	RS
z mešanjem	$D^{*+} \rightarrow \pi^+ D^0$	$D^0 \rightarrow \bar{D}^0$	$\bar{D}^0 \rightarrow K^+ e^- \nu$	WS

❖ časovno integrirana pogostost mešanja

$$R_M = \frac{x^2 + y^2}{2} = \frac{N_{WS} \epsilon_{RS}}{N_{RS} \epsilon_{WS}} \approx \frac{N_{WS}}{N_{RS}}$$

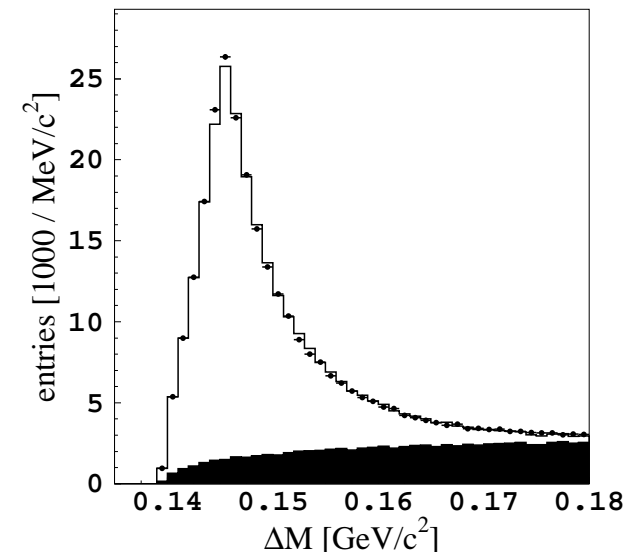
❖ Rekonstrukcija nevtrina

▷ iz ohranitve četverca:

$$P_\nu = P_{CMS} - P_{\pi K e} - P_{rest}$$

▷ ločljivost: $55 \text{ MeV} \rightarrow 7 \text{ MeV}$

RS events

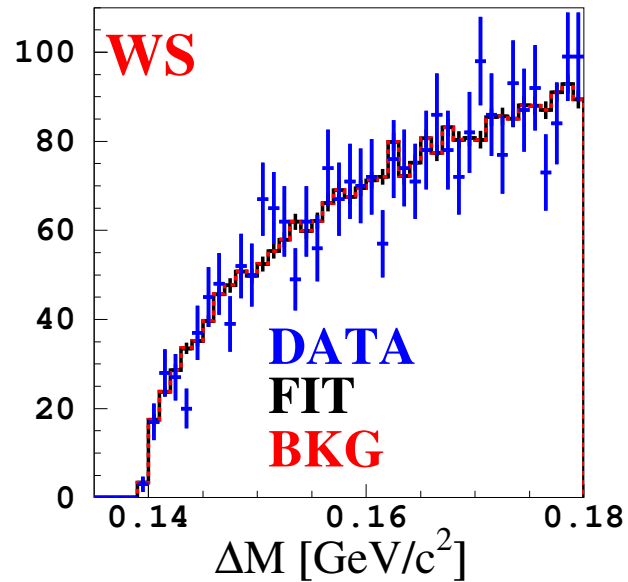


$$\Delta M = M(\pi K e \nu) - M(K e \nu)$$

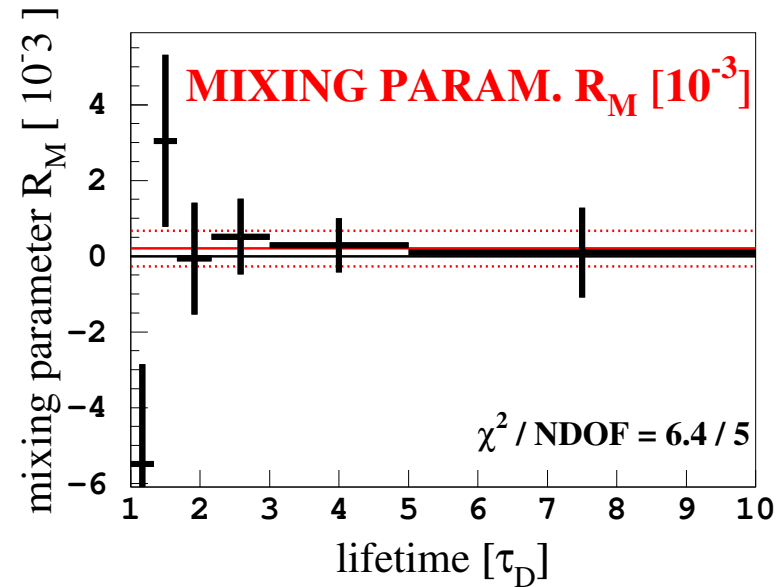
$D^0 \rightarrow K^+ e^- \nu$ (253 fb^{-1})

- ❖ Razpadov z napačno nabojno kombinacijo nismo opazili

example of a fit in one bin



measured R_M in bins of decay time



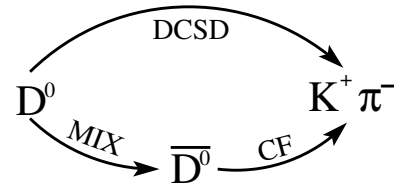
$$R_M < 1.2 \times 10^{-3} \quad @ 95\% \text{ C.L.}$$

$$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \quad (400 \text{ fb}^{-1})$$

Hadronski razpadi $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$

L.M. Zhang et al., Phys.Rev.Lett. 96, 151801 (2006)

- ❖ Napačna nabojna kombinacija: DCS ali mešanje



- ❖ Časovna porazdelitev za napačno nabojno kombinacijo (ob zanemarljivi CPV)

$$\frac{dN}{dt} \propto [R_D + y' \sqrt{R_D} (\Gamma t) + \frac{x'^2 + y'^2}{4} (\Gamma t)^2] e^{-\Gamma t}$$

● DCS ● interferenca ● mešanje

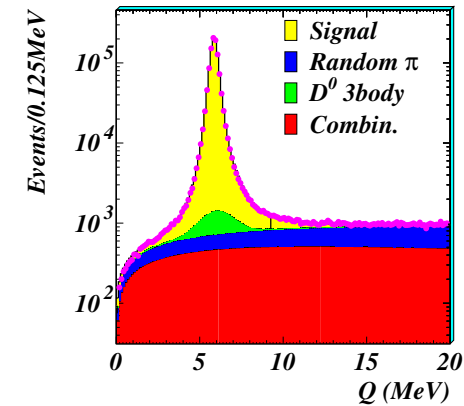
R_D razmerje DCS/CF razpadov

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

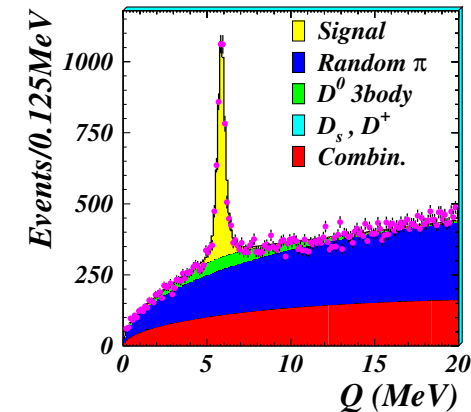
$$y' = y \cos \delta - x \sin \delta$$

δ močna faza med DCS in CF

RS events



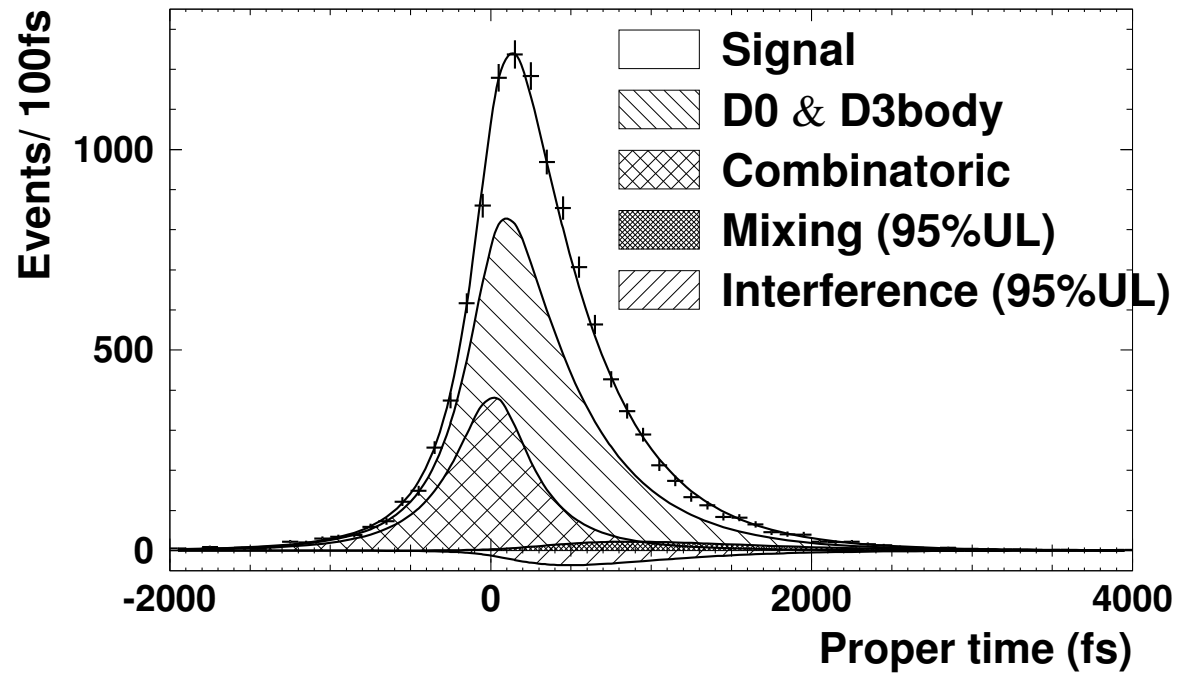
WS events



$$Q = M(K\pi\pi_s) - M(K\pi) - m_\pi$$

$D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ (400 fb^{-1})

- ◆ Časovna porazdelitev dogodkov z napačno nabojno kombinacijo
 - ▷ merske točke so križci



$D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ (400 fb^{-1})

Rezultati

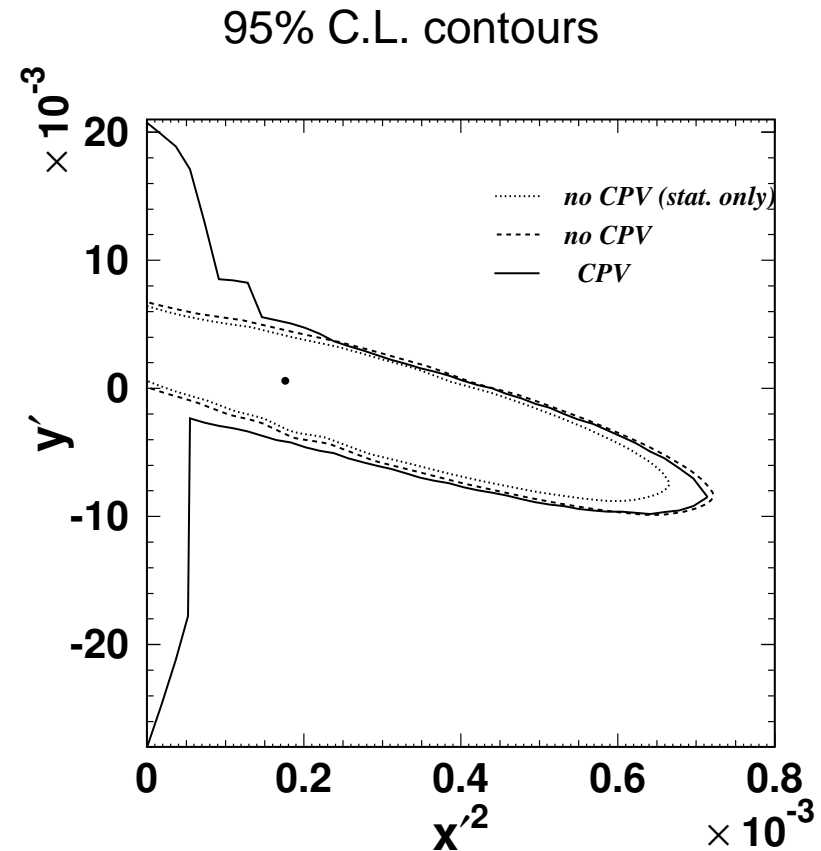
- Ob predpostavki ohranitve CP :

$$R_D = (0.364 \pm 0.017)\%$$

$$x'^2 = (0.18^{+0.21}_{-0.23}) \times 10^{-3}$$

$$y' = (0.6^{+4.0}_{-3.9}) \times 10^{-3}$$

- Točka $x'^2 = y' = 0$ leži na 2σ konturi
- CP asimetrije konsistentne z 0



$$R_M < 0.40 \times 10^{-3} \quad @ \ 95\% \ C.L.$$

$D^0 \rightarrow K^+K^-, \pi^+\pi^- (540 \text{ fb}^{-1})$

Razpadi v CP stanja $K^+K^-, \pi^+\pi^-$

M. Starič et al., Phys.Rev.Lett. 98, 211803 (2007)

- ❖ Meritev razlike v razpadnih časih med $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ in $K^+K^-, \pi^+\pi^-$
- ❖ Časovne porazdelitve so eksponentne (če se CP ohranja)

▷ parameter mešanja:

$$y_{CP} = \frac{\tau(K^-\pi^+)}{\tau(K^+K^-)} - 1$$

▷ če se CP ohranja: $y_{CP} = y = \Delta\Gamma/2\Gamma$

- ❖ Če se CP ne ohranja, pride tudi do razlike v razpadnih časih D^0 in \bar{D}^0

▷ parameter kršitve CP:

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

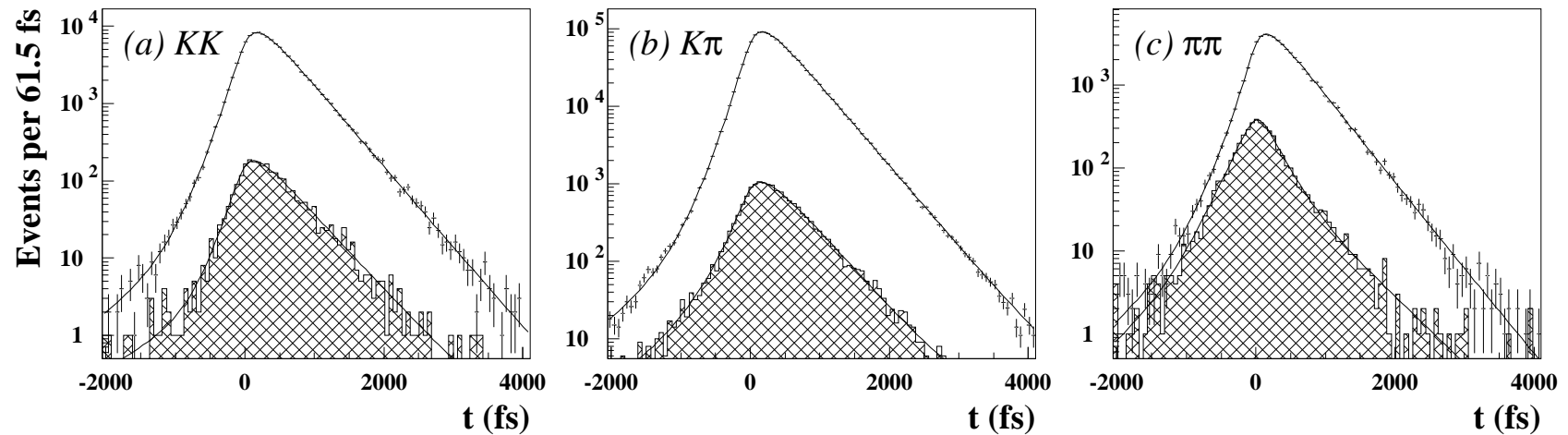
▷ $y_{CP} = y \cos \phi - \frac{1}{2} A_M x \sin \phi$

▷ $A_\Gamma = \frac{1}{2} A_M y \cos \phi - x \sin \phi$

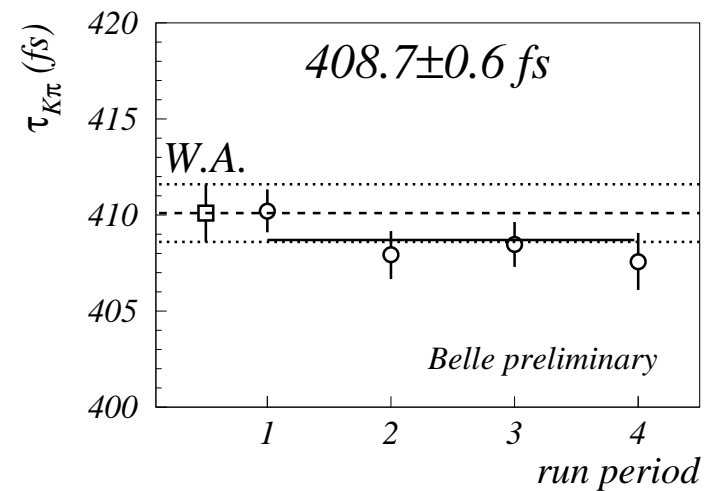
(S. Bergmann et.al., PLB 486, 418 (2000))

$D^0 \rightarrow K^+K^-, \pi^+\pi^-$ (540 fb^{-1})

◆ Simultano prilagajanje $e^{-t/\tau} * R(t)$ z metodo največje zanesljivosti
 kvaliteta: $\chi^2/289 = 1.084$



Izmerjen življenjski čas za $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$
 stabilen v različnih merskih razdobjih ter v
 skladu s svetovnim povprečjem



$D^0 \rightarrow K^+ K^-, \pi^+ \pi^-$ (540 fb^{-1})

Rezultati

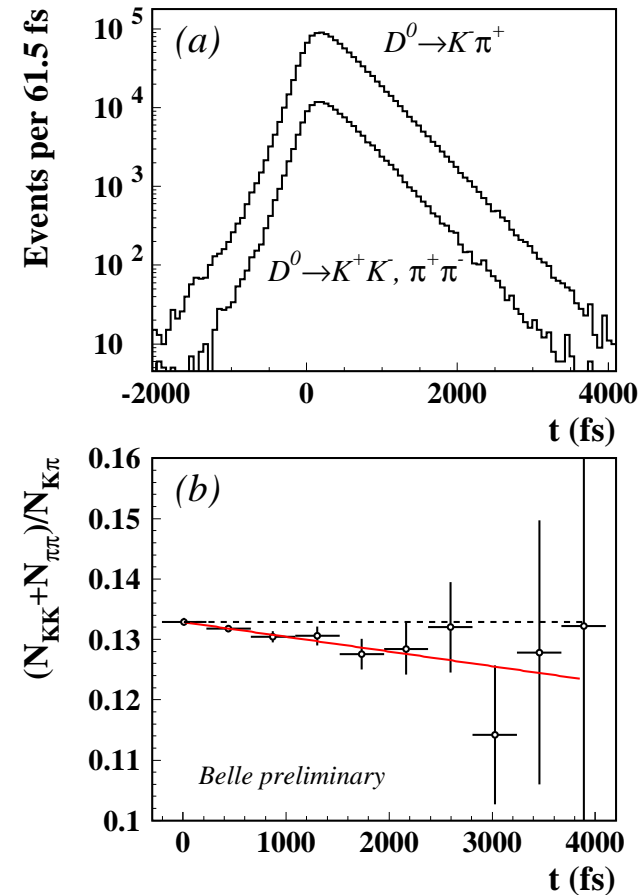
Očiten znak za mešanje D^0 !
(neglede na možno kršitev CP)

$$y_{CP} = (1.31 \pm 0.32 \pm 0.25) \%$$

več kot 3σ ($4.1 \times$ stat. napaka)

$$A_{\Gamma} = (0.01 \pm 0.30 \pm 0.15) \%$$

nobenega znaka za kršitev CP



$D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ Dalitz (540 fb⁻¹)

Razpadi v sebi-konjugirana stanja $K_s^0 \pi^+ \pi^-$

L.M. Zhang, Phys.Rev.Lett. 99, 131803 (2007)

❖ D^0 razpade preko različnih vmesnih resonanc, npr:

$$\text{CF: } D^0 \rightarrow K^{*-} \pi^+$$

$$\text{DCS: } D^0 \rightarrow K^{*+} \pi^-$$

$$\text{CP: } D^0 \rightarrow \rho^0 K_s^0$$

❖ Matrični element se zato spreminja po Dalitzovem prostoru:

$$|\langle f | \mathcal{H} | D^0(t) \rangle|^2 = e^{-\Gamma t} \left| \mathcal{A}(m_-^2, m_+^2) + \frac{q}{p} \left(\frac{y + ix}{2} \Gamma t \right) \overline{\mathcal{A}}(m_-^2, m_+^2) \right|^2$$

❖ Celotno amplitudo \mathcal{A} zapišemo kot vsota dvodelčnih resonanc

$$\mathcal{A}(m_-^2, m_+^2) = \sum_r a_r e^{i\phi} \mathcal{A}_r(m_-^2, m_+^2)$$

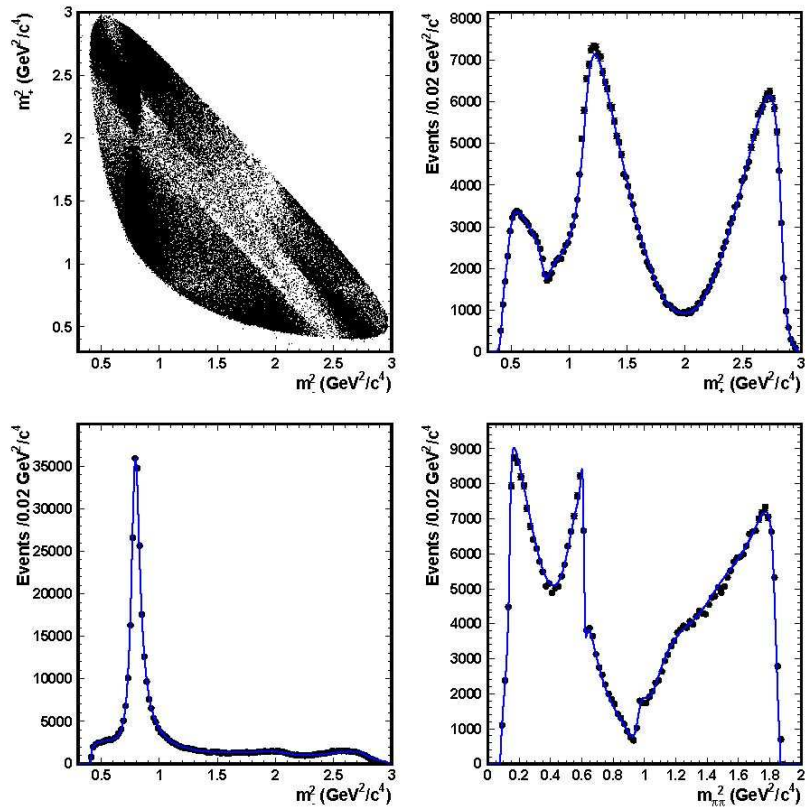
❖ Eno izmed faz CP stanj izpostavimo (fiksiramo), ostale so prosti parametri

❖ Torej lahko izmerimo x in y hkrati

❖ Potrebno prilagajati v treh dimenzijah; mnogo prostih parametrov

$D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ Dalitz (540 fb⁻¹)

Dalitzov diagram (2D projekcija)



Resonance	Amplitude	Phase (deg)	Fit fraction
$K^*(892)^-$	1.629 ± 0.005	134.3 ± 0.3	0.6227
$K_0^*(1430)^-$	2.12 ± 0.02	-0.9 ± 0.5	0.0724
$K_2^*(1430)^-$	0.87 ± 0.01	-47.3 ± 0.7	0.0133
$K^*(1410)^-$	0.65 ± 0.02	111 ± 2	0.0048
$K^*(1680)^-$	0.60 ± 0.05	147 ± 5	0.0002
$K^*(892)^+$	0.152 ± 0.003	-37.5 ± 1.1	0.0054
$K_0^*(1430)^+$	0.541 ± 0.013	91.8 ± 1.5	0.0047
$K_2^*(1430)^+$	0.276 ± 0.010	-106 ± 3	0.0013
$K^*(1410)^+$	0.333 ± 0.016	-102 ± 2	0.0013
$K^*(1680)^+$	0.73 ± 0.10	103 ± 6	0.0004
$\rho(770)$	1 (fixed)	0 (fixed)	0.2111
$\omega(782)$	0.0380 ± 0.0006	115.1 ± 0.9	0.0063
$f_0(980)$	0.380 ± 0.002	-147.1 ± 0.9	0.0452
$f_0(1370)$	1.46 ± 0.04	98.6 ± 1.4	0.0162
$f_2(1270)$	1.43 ± 0.02	-13.6 ± 1.1	0.0180
$\rho(1450)$	0.72 ± 0.02	40.9 ± 1.9	0.0024
σ_1	1.387 ± 0.018	-147 ± 1	0.0914
σ_2	0.267 ± 0.009	-157 ± 3	0.0088
NR	2.36 ± 0.05	155 ± 2	0.0615

$D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ Dalitz (540 fb^{-1})

Rezultati

Ob privzetku ohranitve CP

$$x = 0.80 \pm 0.29^{+0.09+0.10}_{-0.07-0.14} \%$$

$$y = 0.33 \pm 0.24^{+0.08+0.06}_{-0.12-0.08} \%$$

trenutno najbolj natančen rezultat

Cleo, PRD 72, 012001 (2005):

$$x = 1.8 \pm 3.4 \pm 0.6\%$$

$$y = -1.4 \pm 2.5 \pm 0.9\%$$

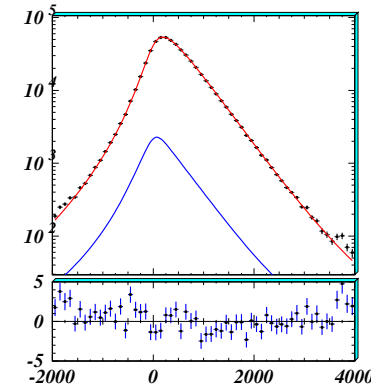
Iskanje kršitve CP

- ❖ Prilagajanje posebej za D^0 in za \bar{D}^0
- ❖ Izmerjeni vrednosti $|q/p|$ in $\phi = \arg(q/p)$ ne kažeta na kršitev CP

$$|q/p| = 0.86^{+0.30+0.10}_{-0.29-0.09}$$

$$\phi = (-14^{+16+5}_{-18-5})^\circ$$

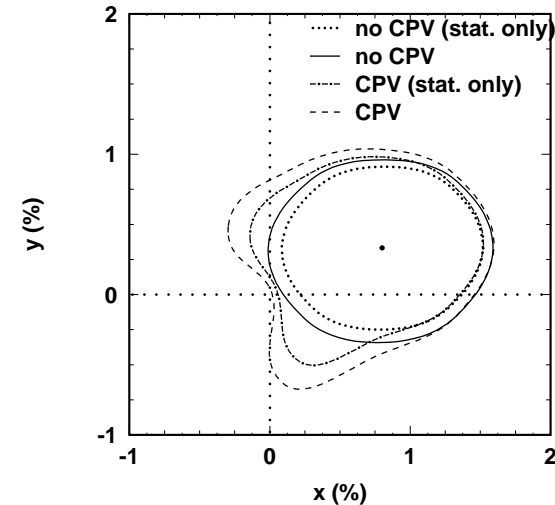
Projekcija na časovno os



$$\tau = 409.9 \pm 0.9 \text{ fs}$$

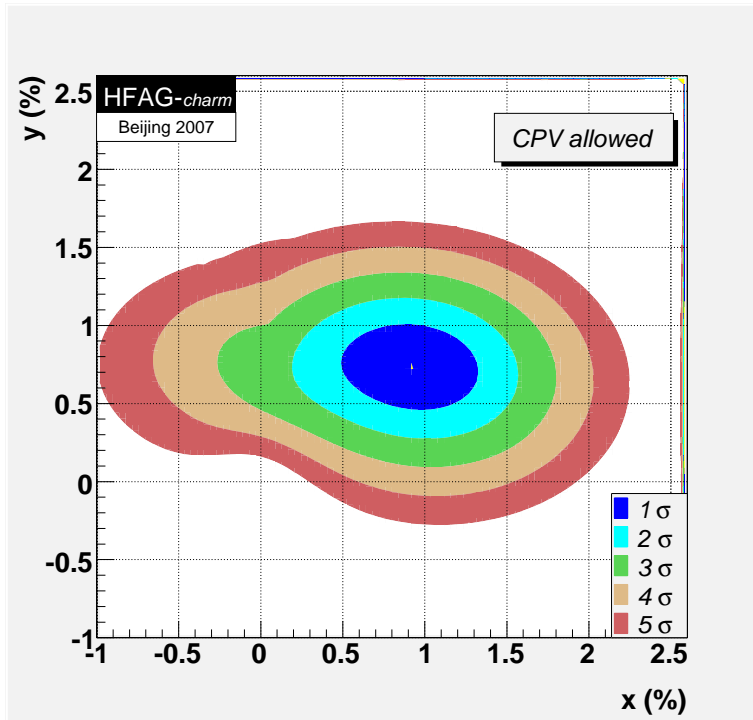
→ konsistentno s PDG

95% C.L. contours



Današnje stanje

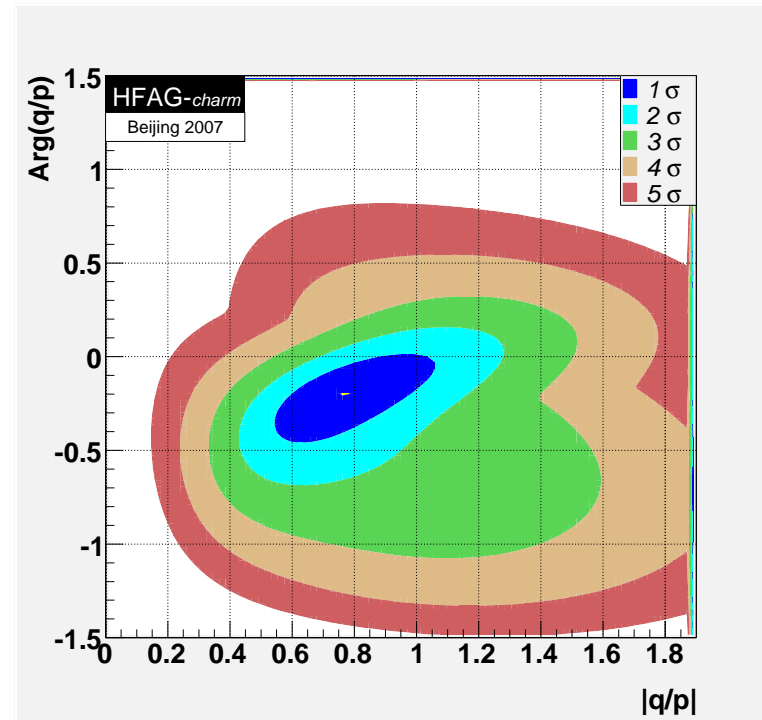
HFAG povprečje:
(Belle, BaBar, CLEO, FOCUS, E791, CDF)



$$x = (0.97_{-0.29}^{+0.27})\% \quad y = (0.78_{-0.19}^{+0.18})\%$$

Točka "ni mešanja" $> 5\sigma$

$$x \sim y \sim 1\%$$



$$|q/p| = 0.86_{-0.15}^{+0.18} \quad \phi = -0.17_{-0.16}^{+0.14}$$

Točka "ni kršitve CP" $\sim 1\sigma$

$$|q/p| = 1, \quad \phi = 0$$

Interpretacija rezultatov

- ❖ Mešanje pri mezonih D^0 je veliko večje od napovedi SM v najnižjem redu!
 - a) novi delci (supersimetrični, 4.gen. kvarkov, FCNC v drev. redu,...)?
 - b) prispevki višjih redov v SM?
- ❖ Prispevek naslednjega reda v SM:

$$M_{12} = \langle \bar{D}^0 | \mathcal{H}_{eff}^{\Delta c=-2} | D^0 \rangle + \mathcal{P} \sum_n \frac{\langle \bar{D}^0 | \mathcal{H}_{eff}^{\Delta c=-1} | n \rangle \langle n | \mathcal{H}_{eff}^{\Delta c=-1} | D^0 \rangle}{m_D^2 - E_n^2}$$

$$\Gamma_{12} = \sum_n \rho_n^{ph.sp.} \langle \bar{D}^0 | \mathcal{H}_{eff}^{\Delta c=-1} | n \rangle \langle n | \mathcal{H}_{eff}^{\Delta c=-1} | D^0 \rangle$$

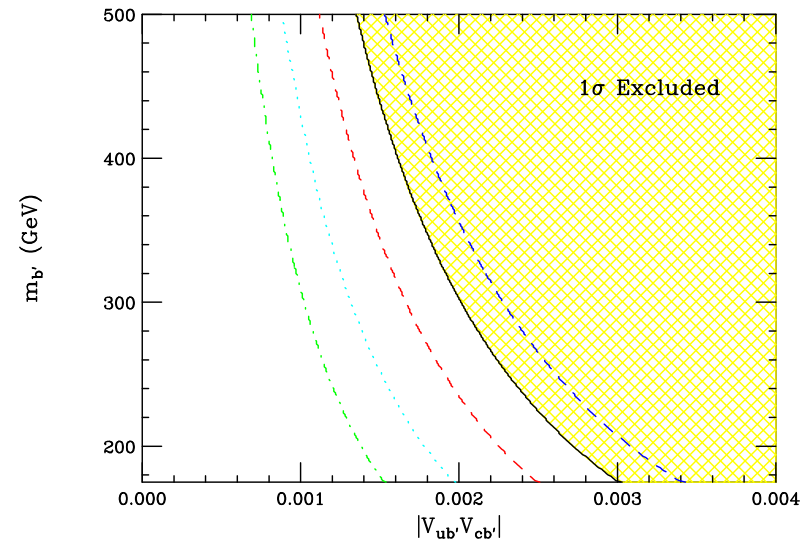
- ❖ Izračuni težavni, potrebnih precej privzetkov, zato nenatančni
- ❖ Nekateri pristopi dajo: $x \sim y \sim \mathcal{O}(10^{-2})$
- ❖ Splošno mnenje: bolj verjeten je vzrok b)

E. Golowich et al., arXiv:0705.3650 (2007)

Model	Approximate Constraint
Fourth Generation (Fig. 2)	$ V_{ub'}V_{cb'} \cdot m_{b'} < 0.5 \text{ (GeV)}$
$Q = -1/3$ Singlet Quark (Fig. 4)	$s_2 \cdot m_S < 0.27 \text{ (GeV)}$
$Q = +2/3$ Singlet Quark (Fig. 6)	$ \lambda_{uc} < 2.4 \cdot 10^{-4}$
Little Higgs	Tree: See entry for $Q = -1/3$ Singlet Quark Box: Region of parameter space can reach observed x_D
Generic Z' (Fig. 7)	$M_{Z'}/C > 2.2 \cdot 10^3 \text{ TeV}$
Family Symmetries (Fig. 8)	$m_1/f > 1.2 \cdot 10^3 \text{ TeV}$ (with $m_1/m_2 = 0.5$)
Left-Right Symmetric (Fig. 9)	No constraint
Alternate Left-Right Symmetric (Fig. 10)	$M_R > 1.2 \text{ TeV}$ ($m_{D_1} = 0.5 \text{ TeV}$) $(\Delta m/m_{D_1})/M_R > 0.4 \text{ TeV}^{-1}$
Vector Leptoquark Bosons (Fig. 11)	$M_{VLQ} > 55(\lambda_{PP}/0.1) \text{ TeV}$
Flavor Conserving Two-Higgs-Doublet (Fig. 13)	No constraint
Flavor Changing Neutral Higgs (Fig. 15)	$m_H/C > 2.4 \cdot 10^3 \text{ TeV}$
FC Neutral Higgs (Cheng-Sher ansatz) (Fig. 16)	$m_H/ \Delta_{uc} > 600 \text{ GeV}$
Scalar Leptoquark Bosons	See entry for RPV SUSY
Higgsless (Fig. 17)	$M > 100 \text{ TeV}$
Universal Extra Dimensions	No constraint
Split Fermion (Fig. 19)	$M/ \Delta y > (6 \cdot 10^2 \text{ GeV})$
Warped Geometries (Fig. 21)	$M_1 > 3.5 \text{ TeV}$
Minimal Supersymmetric Standard (Fig. 23)	$ (\delta_{12}^{\nu})_{LR,RL} < 3.5 \cdot 10^{-2}$ for $\tilde{m} \sim 1 \text{ TeV}$ $ (\delta_{12}^{\nu})_{LL,RR} < .25$ for $\tilde{m} \sim 1 \text{ TeV}$
Supersymmetric Alignment	$\tilde{m} > 2 \text{ TeV}$
Supersymmetry with RPV (Fig. 27)	$\lambda'_{12k}\lambda'_{11k}/m_{\tilde{d}_{R,k}} < 1.8 \cdot 10^{-3}/100 \text{ GeV}$
Split Supersymmetry	No constraint

❖ Ostrejše omejitve na parametrih 17/21 modelov nove fizike

❖ Primer:
kvark b' iz 4. generacije



$$|V_{ub'}V_{cb'}| \cdot m_{b'} < 0.5 \text{ GeV}$$

$|V_{ub'}V_{cb'}| < 0.003$ za red velikosti ostreje, kot iz unitarnosti CKM

Zaključek

- ❖ Mešanje mezonov D^0 je bilo po 31. letih definitivno odkrito (2007)
- ❖ Mešanje je veliko večje, kot smo pričakovali: $x \sim y \sim 1\%$
- ❖ Razložimo ga lahko znotraj Standardnega modela s prispevki višjega reda od box diagrama.
- ❖ Postavljene ostrejšše omejitve za parametre kar 17 od 21 modelov nove fizike