

---

# Mešanje in kršitev simetrije CP

Fizika jedra in osnovnih delcev, 19.3.2007

Peter Križan

<http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/fjod/fjod-cpv-07.pdf>

# Vsebina

---

Uvod

Eksperimentalna aparatura: Belle in KEK-B

Kršitev CP v sistemu mezonov B

Pingvini

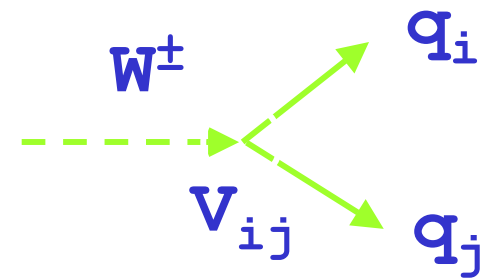
Prehodi s spremembo okusa in nevtralnimi tokovi

Načrti za prihodnost

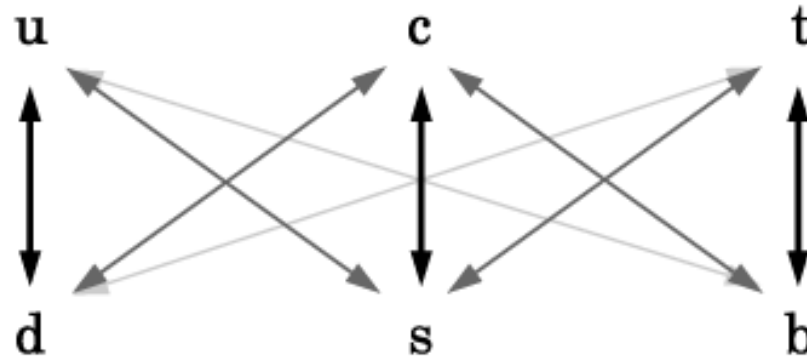
# Matrika CKM

Prehodi med kvarki z nabojem  $2/3$  in  $-1/3$ : kompleksni matrični elementi unitarne matrike CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)

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



Prehodi med kvarki iste družine so bistveno bolj verjetni (=debelejše črte) kot ostali

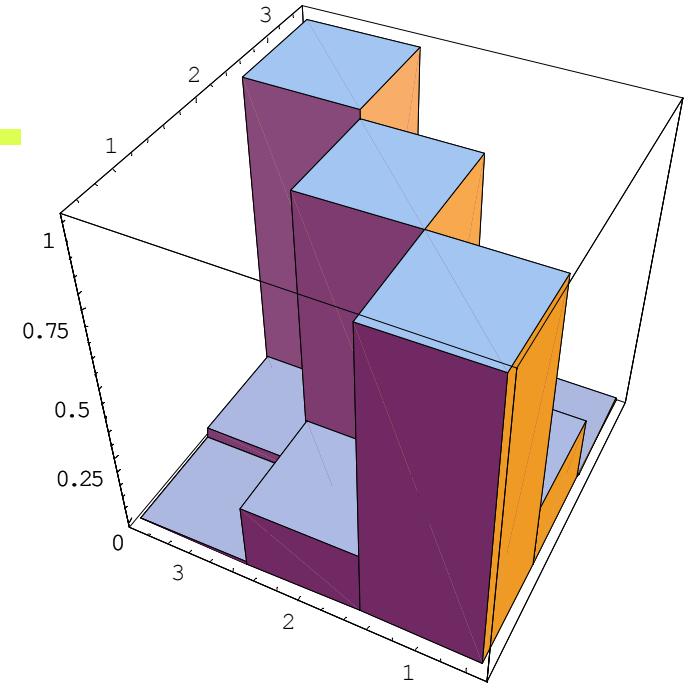


# Matrika CKM

→ matrika za prehode je skorajda diagonalna

Wolfensteinova parametrizacija: razvoj po parametru  $\lambda$  ( $=\sin\theta_c=0.22$ )

$A$ ,  $\rho$  and  $\eta$ : reda velikosti 1



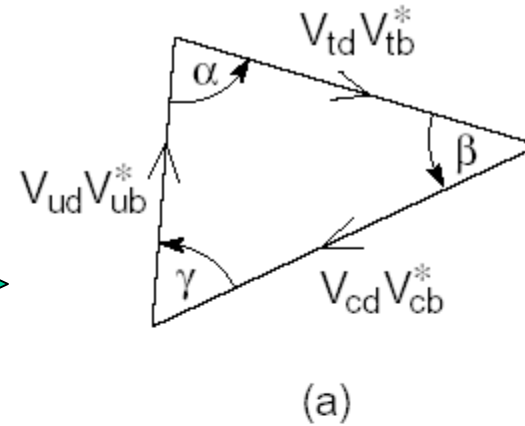
$$V = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

# Unitarni trikotnik

Unitarnost: vrstice in stolpci so ortogonalni.

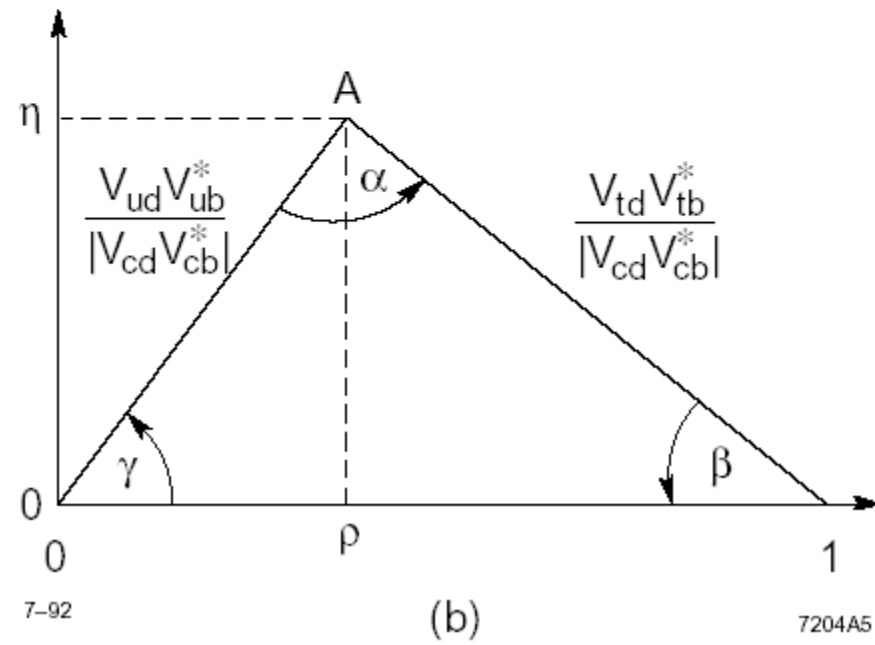
Na primer:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$



V rabi so še oznake:

$$\phi_1 = \beta, \phi_2 = \alpha, \phi_3 = \gamma$$



# Kršitev CP v Standardnem Modelu

$$\mathcal{L} = \boxed{V_{ij}} \bar{U}_i \gamma^\mu (1 - \gamma_5) D_j W_\mu^+ + \boxed{V_{ij}^*} \bar{D}_i \gamma^\mu (1 - \gamma_5) U_j W_\mu^-$$

$\Downarrow$  CP

$$\mathcal{L}_{CP} = \boxed{V_{ij}} \bar{D}_i \gamma^\mu (1 - \gamma_5) U_j W_\mu^- + \boxed{V_{ij}^*} \bar{U}_i \gamma^\mu (1 - \gamma_5) D_j W_\mu^+$$

Če  $V_{ij} = V_{ij}^*$   $\blacktriangleright$   $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{CP}$   $\blacktriangleright$  CP se ohranja

# Simetrija CP

---

Simetrijska operacija CP: pretvori delec v anti-delec

Če se delec in anti-delec ne obnašata vedno enako – torej če na primer različno razpadata, je to kršitev simetrije CP.

Ker je bilo ob nastanka vesolje sestavljeno iz enakega števila delcev in anti-delcev, danes pa je sestavljeno skoraj izključno iz snovi (=delcev), in ne iz anti-snovi, je ta simetrija očitno kršena!

 Zelo pomembno: razumeti kako in zakaj je ta simetrija kršena.

# Kršitev CP pri mezonih B

Kršitev simetrije CP so prvič izmerili pred 40 leti pri nevtralnih kaonih – in to je bil do pred kratkim edini sistem, kjer smo jo lahko preučevali.

Zakaj naj bi bila kršitev CP drugačna pri drugem paru kvarkov ( $b\bar{d}$  (=B) namesto  $s\bar{d}$  (=K))?

Nekateri pojavi so **močno odvisni od energije**, ki je zanje na razpolago: **masivnejši kvarki** so zato potencialno **zelo zanimivi**.

**Kvark b** je **najtežji** kvark, ki še tvori vezano stanje, mezon B.

**Meritev kršitve CP** pri mezonih B: po odkritju **mešanja** (ARGUS 1987) → taka meritev je **možna!**



# Časovni razvoj v sistemu mezonov B

Časovni razvoj poljubne linearne kombinacije nevtralnega mezona B in njegovega antidelca

$$a|B^0\rangle + b|\bar{B}^0\rangle$$

določa časovno odvisna Schroedingerjeva enačba

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = H\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (M - i\Gamma)\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

M in  $\Gamma$  sta hermitski 2x2 matriki.

*CPT* invarianca  $\rightarrow H_{11} = H_{22}$

# Časovni razvoj v sistemu mezonov B

---

Lastni stanji ('masni') sta lahki  $B_L$  in teži  $B_H$

$$|B_L\rangle = p|B^0\rangle + q|\bar{B}^0\rangle$$

$$|B_H\rangle = p|B^0\rangle - q|\bar{B}^0\rangle$$

Za razliko lastnih vrednosti vpeljemo oznaki

$$\Delta m_B = m_H - m_L,$$

$$\Delta\Gamma_B = \Gamma_H - \Gamma_L$$

# Časovni razvoj v sistemu mezonov B

---

Poljubno stanje lahko zapišemo kot linearno kombinacijo stanj  $B_H$  and  $B_L$ , njuni amplitudi pa se tako spreminjata s časom

$$a_H(t) = a_H(0)e^{-iM_H t} e^{-\Gamma_H t/2}$$

$$a_L(t) = a_L(0)e^{-iM_L t} e^{-\Gamma_L t/2}$$

Če smo ob  $t=0$  ustvarili stanje  $B^0$  (označimo z  $B^0_{\text{phys}}$ ), velja  $a_H(0) = a_L(0) = 1/(2p)$ ,

Če pa smo ustvarili anti-B ( $\text{anti-}B^0_{\text{phys}}$ ), je  $a_H(0) = a_L(0) = 1/(2q)$

# Časovni razvoj Bjev

Časovni razvoj lahko zapišemo tudi v bazi  $B^0$  in  $\bar{B}^0$

$$\left| B_{phys}^0(t) \right\rangle = g_+(t) \left| B^0 \right\rangle + (q/p) g_-(t) \left| \bar{B}^0 \right\rangle$$

$$\left| \bar{B}_{phys}^0(t) \right\rangle = (p/q) g_-(t) \left| B^0 \right\rangle + g_+(t) \left| \bar{B}^0 \right\rangle$$

kjer je  $g_+(t) = e^{-iMt} e^{-\Gamma t/2} \cos(\Delta m t / 2)$

$$g_-(t) = e^{-iMt} e^{-\Gamma t/2} i \sin(\Delta m t / 2)$$

$$M = (M_H + M_L)/2, \Gamma_1 \sim \Gamma_2 = \Gamma$$

→ Začetni  $B^0$  se čez čas delno pretvori v  $\bar{B}^0$

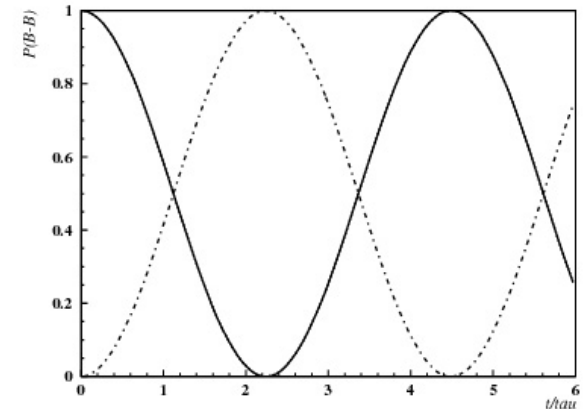
→ Mešanje

# Časovni razvoj Bjev

Če mezoni B ne bi razpadali ( $\Gamma=0$ ),  
bi bil časovni razvoj:

$$g_+(t) = e^{-iMt} \cos(\Delta mt / 2)$$

$$g_-(t) = e^{-iMt} i \sin(\Delta mt / 2)$$



→ Verjetnost, da se B pretvori v svoj anti delec

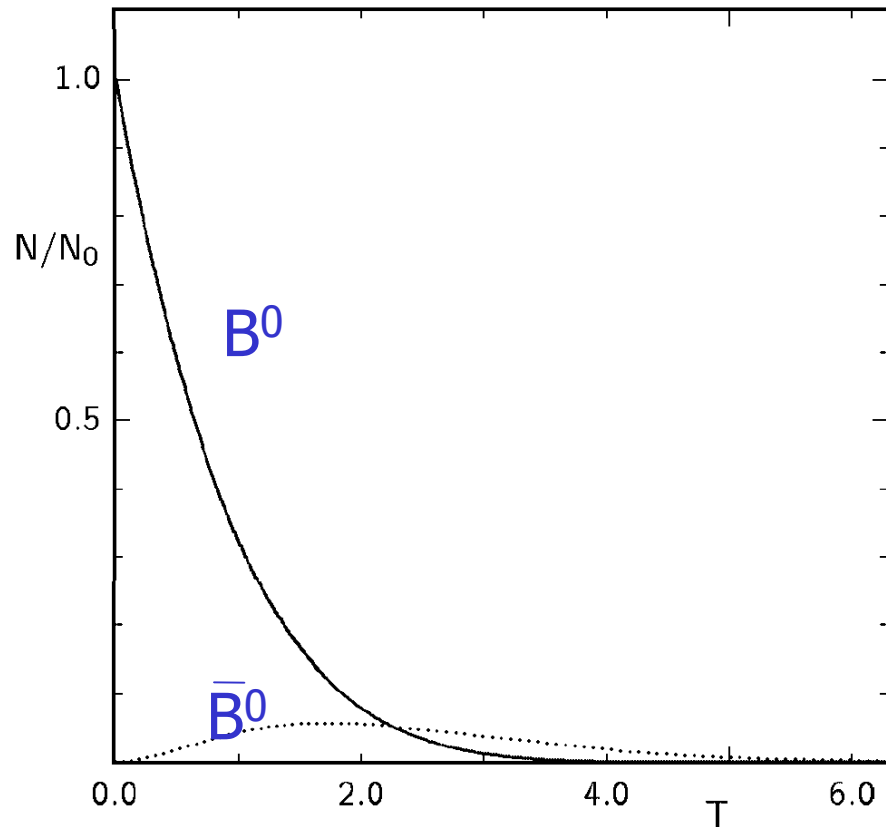
$$\left| \langle \bar{B}^0 | B_{phys}^0(t) \rangle \right|^2 = |q/p|^2 |g_-(t)|^2 = |q/p|^2 \sin^2(\Delta mt / 2)$$

→ Verjetnost, da B ostane B

$$\left| \langle B^0 | B_{phys}^0(t) \rangle \right|^2 = |g_+(t)|^2 = \cos^2(\Delta mt / 2)$$

**→ utripanje!**

# Mešanje



$B^0$  ob  $t=0$ , časovni razvoj:

- polna črta:  $B^0$ ,
- črtkana:  $\bar{B}^0$

$T$ : v enotah življenjskega časa  $\tau=1/\Gamma$

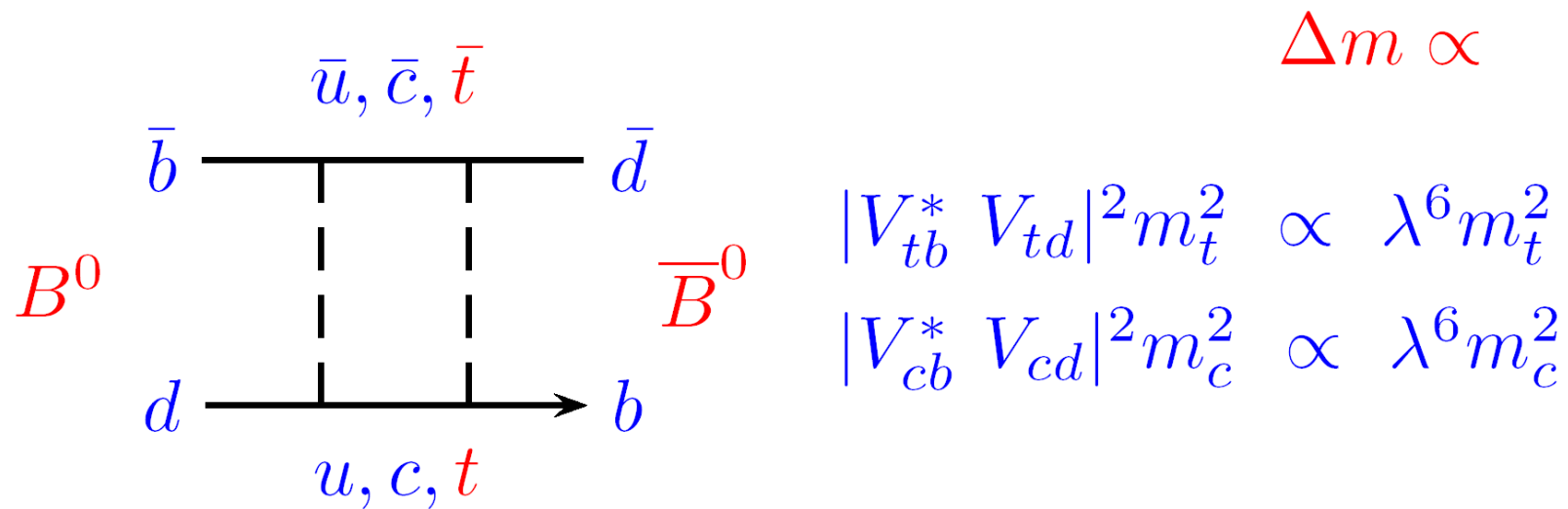
$$\Delta m_B/\Gamma_B = 0.73 \pm 0.05$$

Odkritje mešanja: skupina ARGUS (1987)

>1000 citatov!

→ Phys.Lett. B192 (1987) 245.

# Nepričakovano močno mešanje (=velik $\Delta m$ ) v sistemu $B^0$ !



V Standardnem modelu: močno mešanje  $\rightarrow$  velika masa kvarka t

Kvark t so odkrili šele nekaj let kasneje!

# Razpadna verjetnost

Verjetnost za razpad  $P(B^0 \rightarrow f, t) \propto \left| \langle f | H | B_{phys}^0(t) \rangle \right|^2$

Amplituda za razpada B and anti-B v isto končno stanje  $f$

$$A_f = \langle f | H | B^0 \rangle$$

$$\bar{A}_f = \langle f | H | \bar{B}^0 \rangle$$

Razpadna amplituda kot funkcija časa:

$$\begin{aligned} \langle f | H | B_{phys}^0(t) \rangle &= g_+(t) \langle f | H | B^0 \rangle + (q/p) g_-(t) \langle f | H | \bar{B}^0 \rangle \\ &= g_+(t) A_f + (q/p) g_-(t) \bar{A}_f \end{aligned}$$

... in podobno za anti-B



# Asimetrija v razpadni verjetnosti

Asimetrija v verjetnosti za razpad:

$$a_f = \frac{P(\bar{B}^0 \rightarrow f, t) - P(B^0 \rightarrow f, t)}{P(\bar{B}^0 \rightarrow f, t) + P(B^0 \rightarrow f, t)} =$$

$$= C \cos(\Delta mt) + S \sin(\Delta mt)$$

$$= \frac{(1 - |\lambda_f|^2) \cos(\Delta mt) - 2 \operatorname{Im}(\lambda_f) \sin(\Delta mt)}{1 + |\lambda_f|^2}$$

kjer je:  $\lambda_f = \frac{q}{p} \frac{\bar{A}_f}{A_f}$

Če je poleg tega še  $|\lambda| = 1 \rightarrow$

$$a_f = -\operatorname{Im}(\lambda_f) \sin(\Delta mt)$$

# Asimetrija v razpadni verjetnosti $\rightarrow$ kršitev CP

---

Zveza med asimetrijo v verjetnosti za razpad in kršitvijo simetrije CP je najlepše vidna, če kot **končno stanje** izberemo:

$f=f_{CP}$  : lastno stanje simetrije CP,

recimo:

- $J/\psi K_S, J/\psi K_L$
- $\pi^- \pi^+, \rho^- \rho^+$
- $\phi K_S, \phi K_L$
- $D^+ D^-$

# Kršitev CP v razpadih $B \rightarrow J/\psi K_S$ in $B \rightarrow J/\psi K_L$

Za  $B \rightarrow J/\psi K_S$ ,  $J/\psi K_L$  je  $|\lambda| = 1 \rightarrow$

$$a_f = -\text{Im}(\lambda_f) \sin(\Delta mt)$$

in

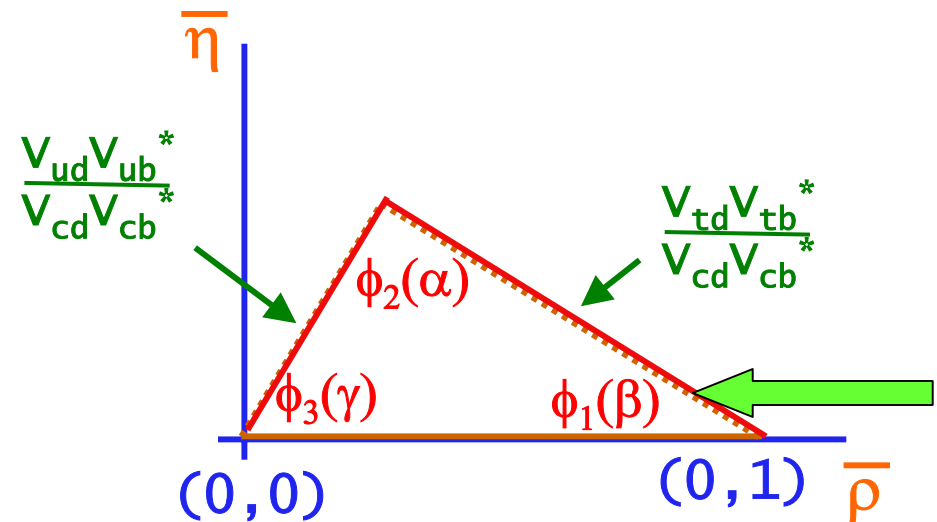
$$\text{Im}(\lambda_f) = \xi_f \sin 2\phi_1$$

$\phi_1$ : kot unitarnega trikotnika

$\xi_f$ : CP parnost končnega stanja

$$\xi_f = \pm 1 \text{ za } CP = \pm 1$$

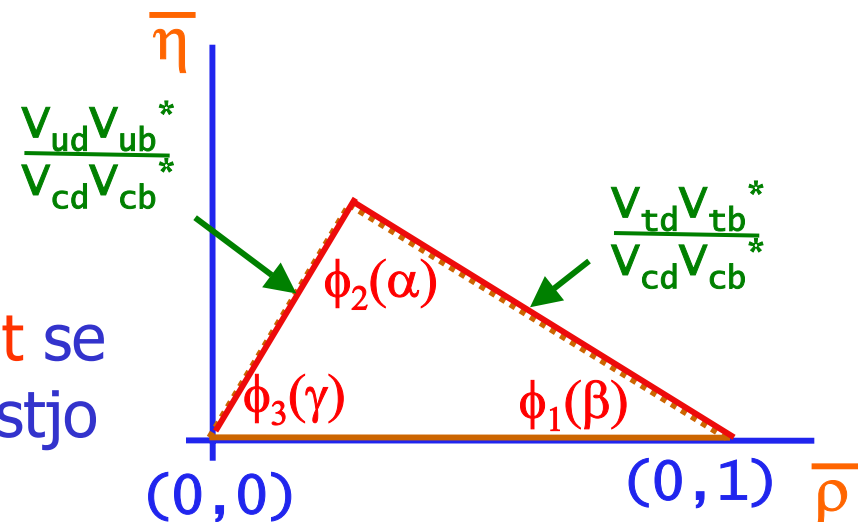
$$J/\psi K_S : -1, \quad J/\psi K_L : +1$$



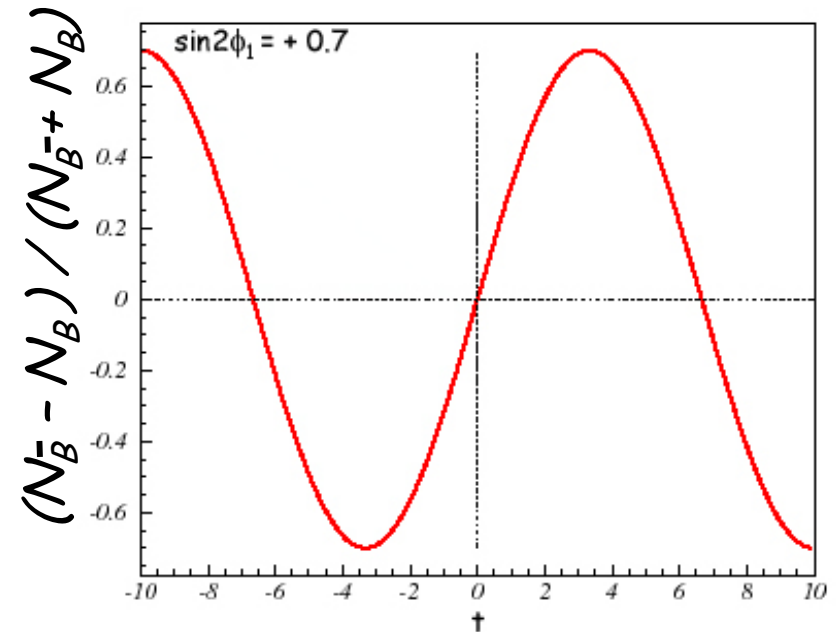
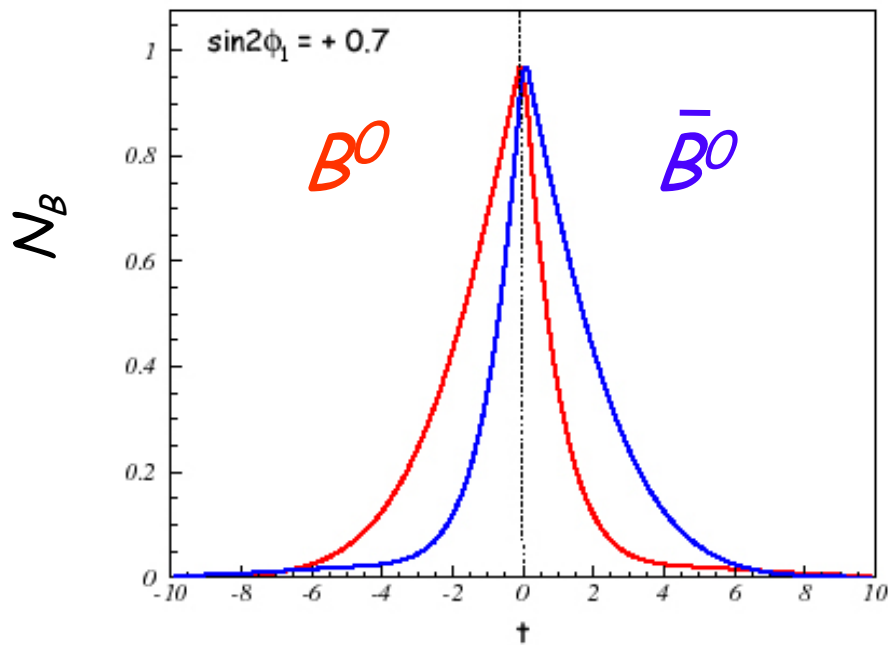
# Meritev kršitve CP v $B \rightarrow J/\psi K_S$ in $B \rightarrow J/\psi K_L$

Pomen meritve:

- Z njo izmerimo **kršitev CP** v sistemu mezonov B
- V okviru SM nam omogoči **meritev kompleksnih** matričnih elementov matrike **CKM**
- Preverjanje konsistentnosti SM: **kot** se mora ujemati s pričakovano vrednostjo iz meritev **stranic** trikotika
- Konsistentnost slike: **asimetriji** za  $J/\psi K_S$  in  $J/\psi K_L$  morata imeti **nasproten predznak**



# Kršitev CP: asimetrija v razpadni verjetnosti



→ 
$$a(t) = \frac{P(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - P(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{P(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + P(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} = \xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta m_B t$$

$\xi_f = \pm 1$  for  $CP = \pm 1$

# Meritev kršitve CP pri mezonih B

---

Kako izmeriti kršitev CP pri mezonih B?

Najprej jih moramo ustvariti: uporabimo reakcijo pri trku elektrona in pozitrona z dovolj veliko energijo:  $e^- e^+ \rightarrow Y(4s) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

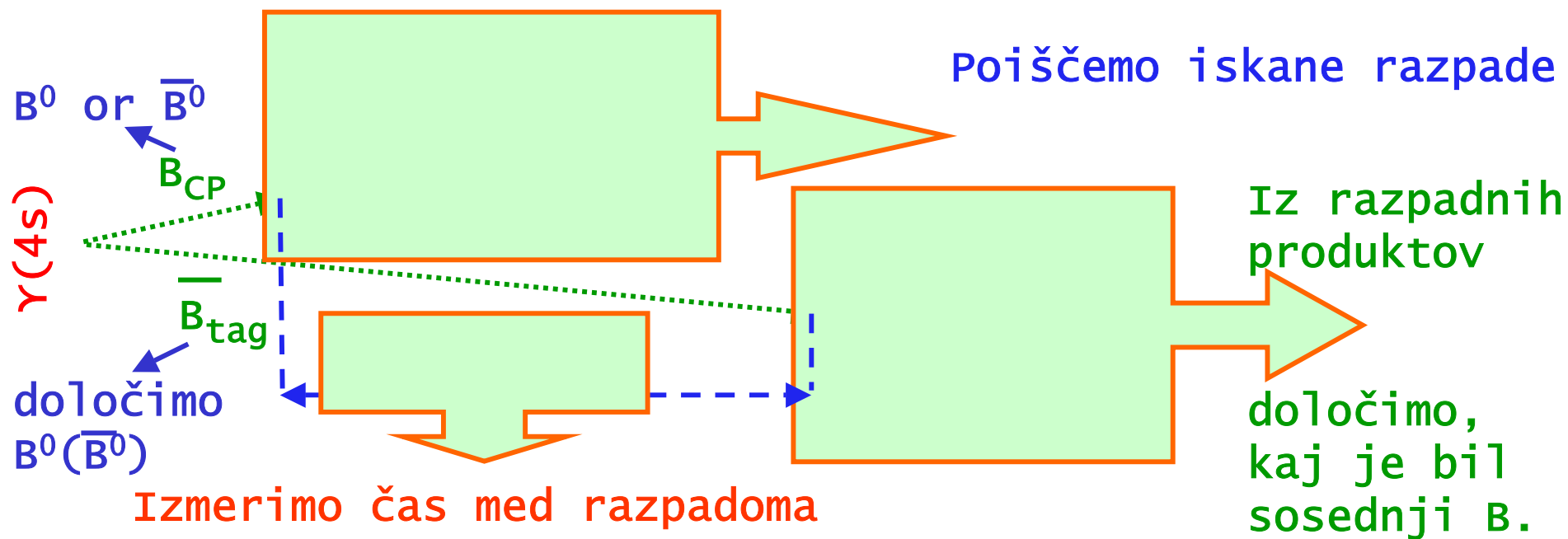
Nato počakamo, da eden od obeh  $B^0$  razpade v stanje, za katero vemo, kakšna je njegova CP parnost (torej kako se obnaša pri simetrijski operaciji CP). Primer takega stanja je razpad

$B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ . Razpadna produkta naprej razpadeta:

$J/\psi \rightarrow \mu^- \mu^+$  in  $K_S \rightarrow \pi^- \pi^+$

Izmeriti moramo, **kje** se je to zgodilo, in določiti ali je v  $J/\psi K_S$  razpadel  $B^0$  ali njegov **anti-delec**  $\bar{B}^0$  (=meritev okusa B).

# Kako merimo kršitev CP



# Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



19. marec 2007

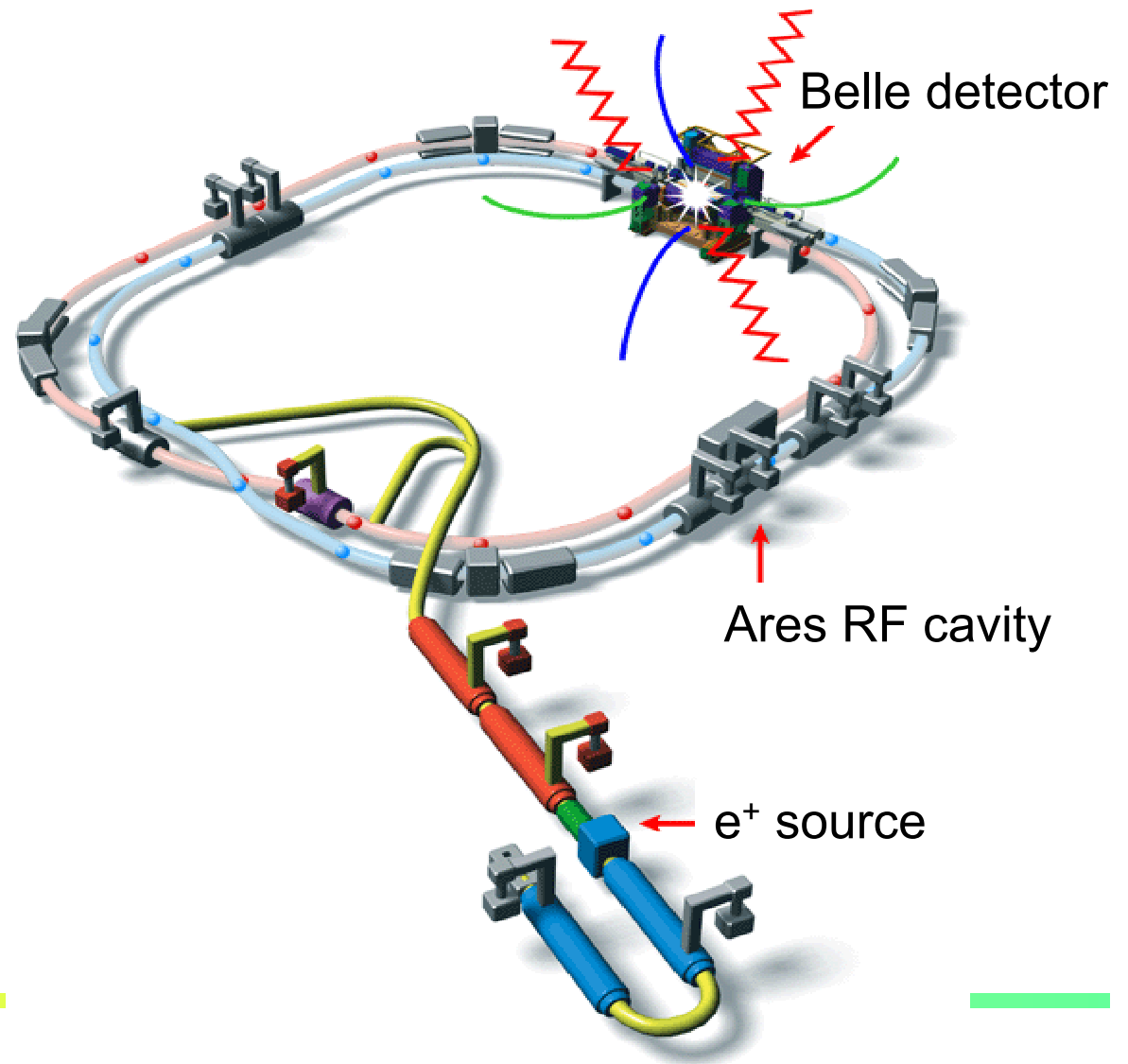
FJOD

Peter Križan



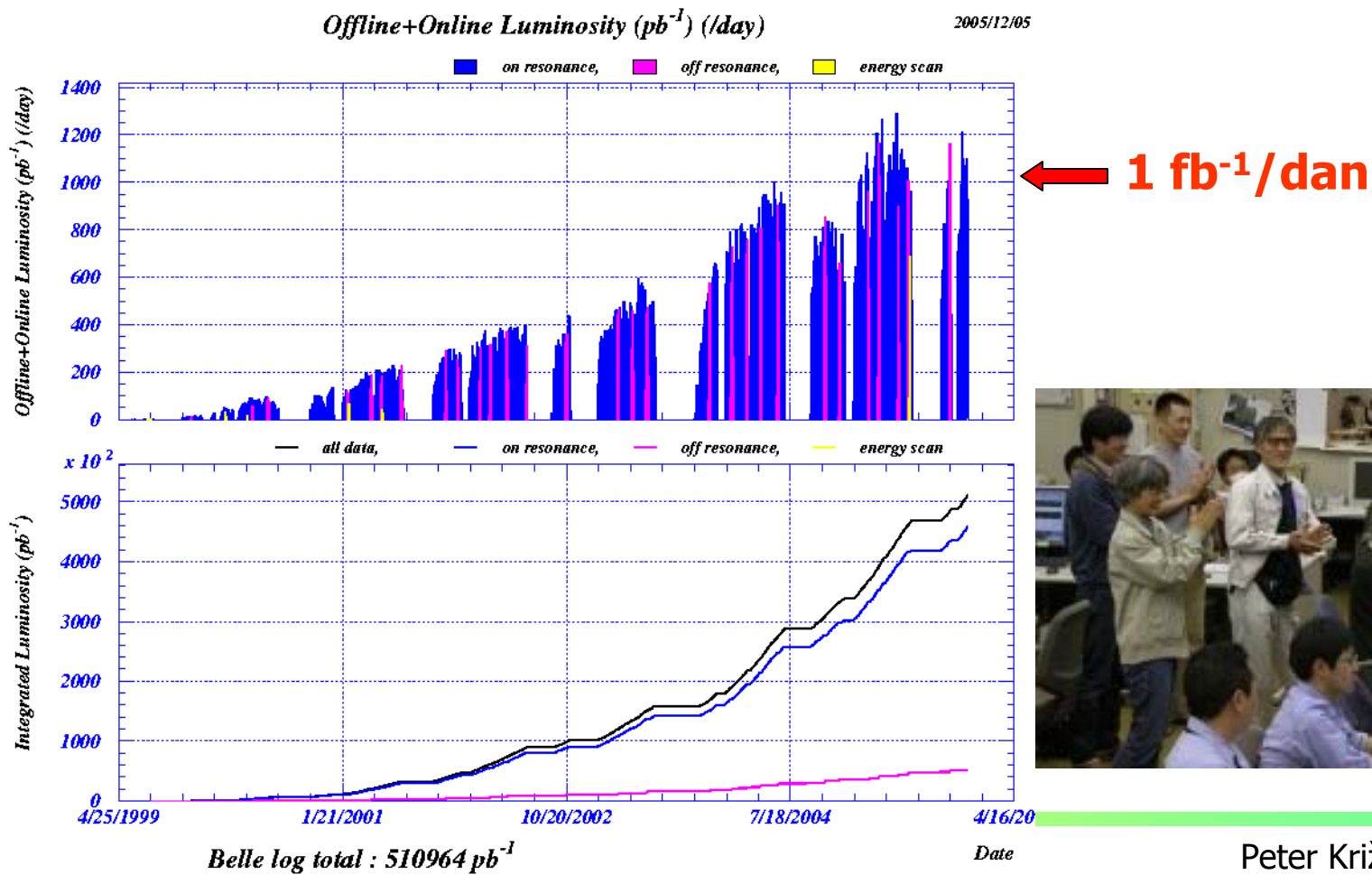
# Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



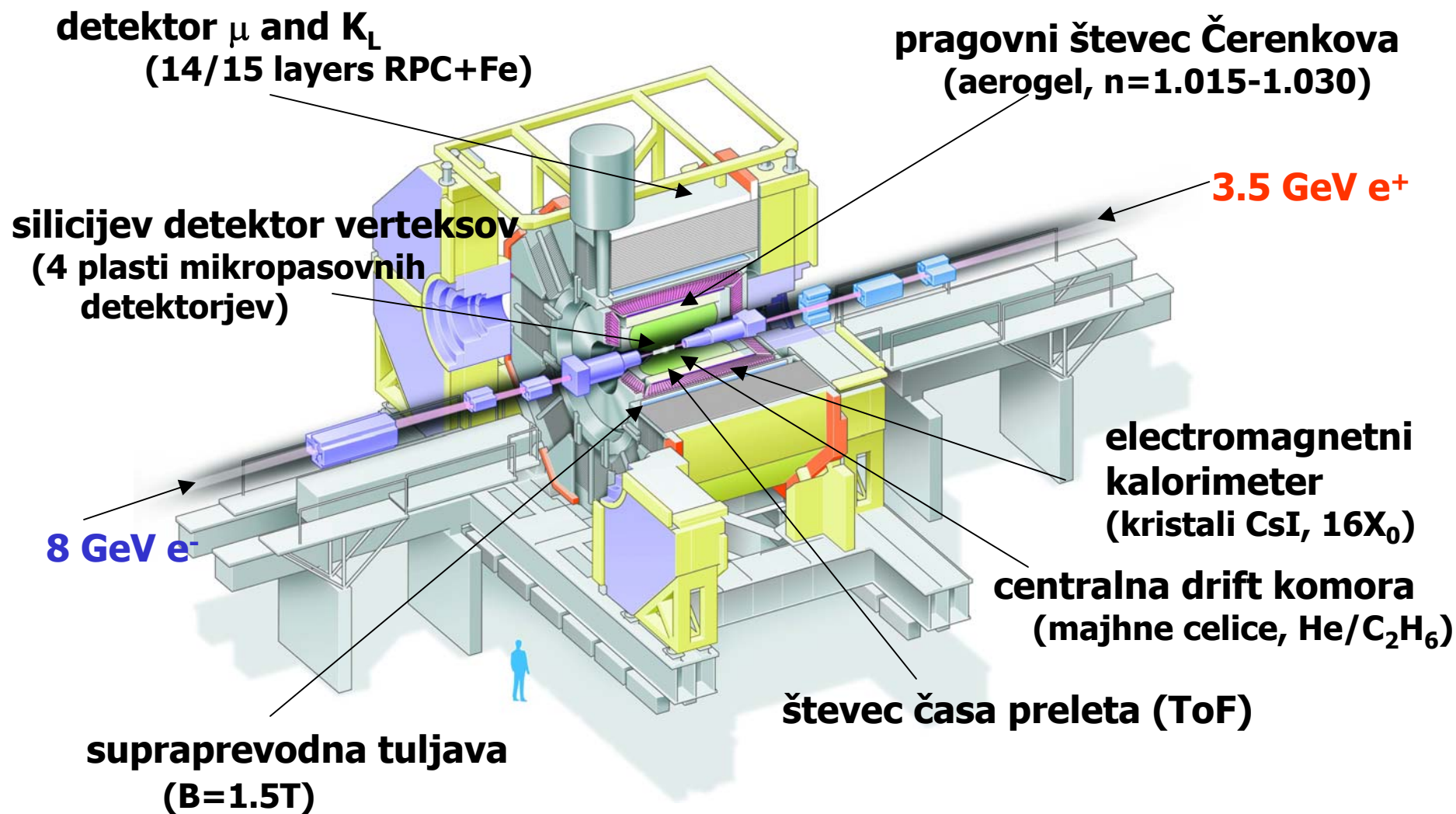
# Luminoznosti KEK-B

Zbranih  $> 700$  M parov BB!



Peter Križan

# Spektrometer Belle



# Detektor verteksov

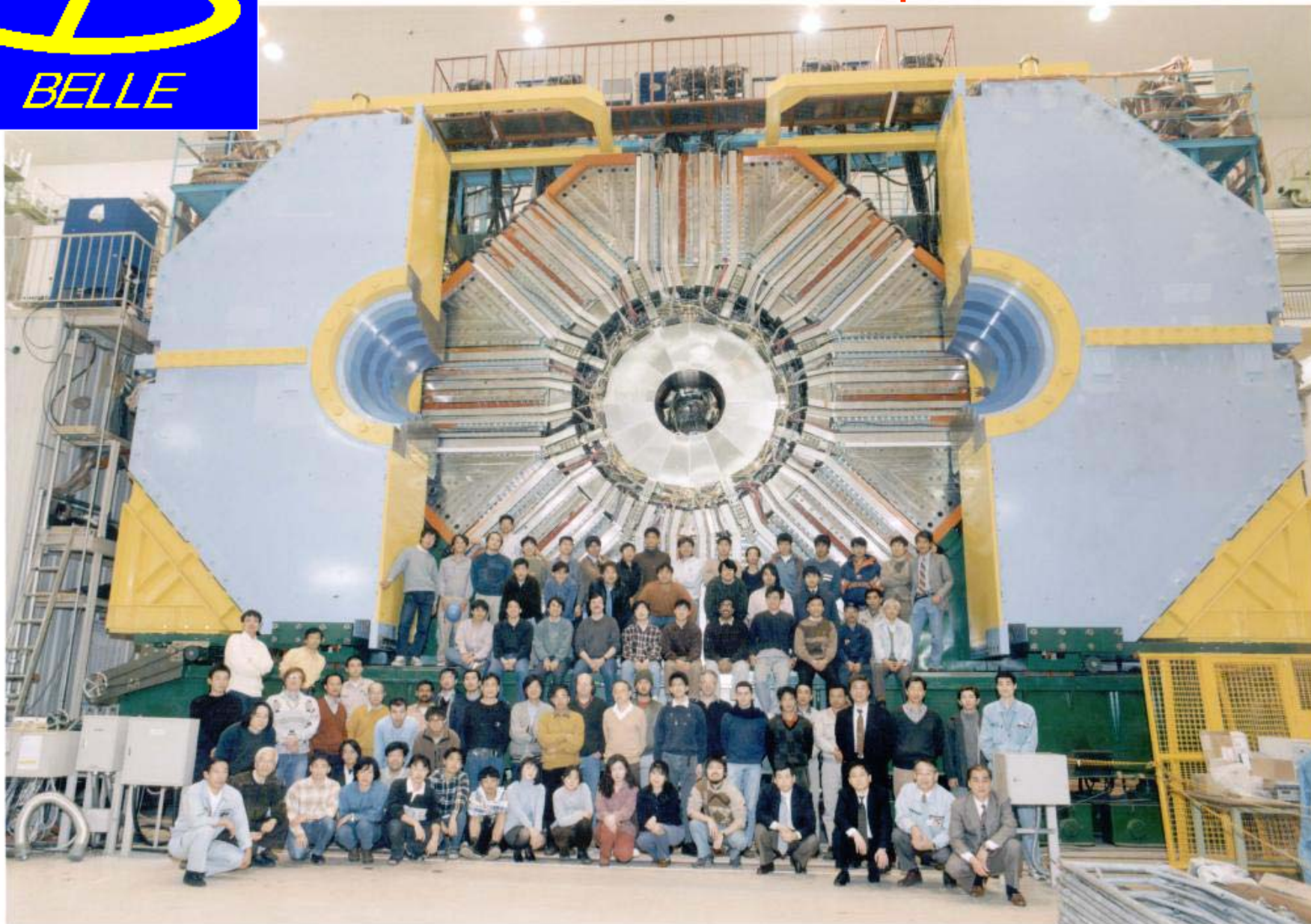
- Eden bistvenih elementov detektorja je detektor verteksa, točke, kjer je mezon B razpadel.
- Zelo občutljiv kos aparature iz  $300\mu\text{m}$  debelih silicijevih plošč z gosto nanešenimi elektrodami: natančnost meritve mesta preleta nabitega delca:  $10\mu\text{m}$ !





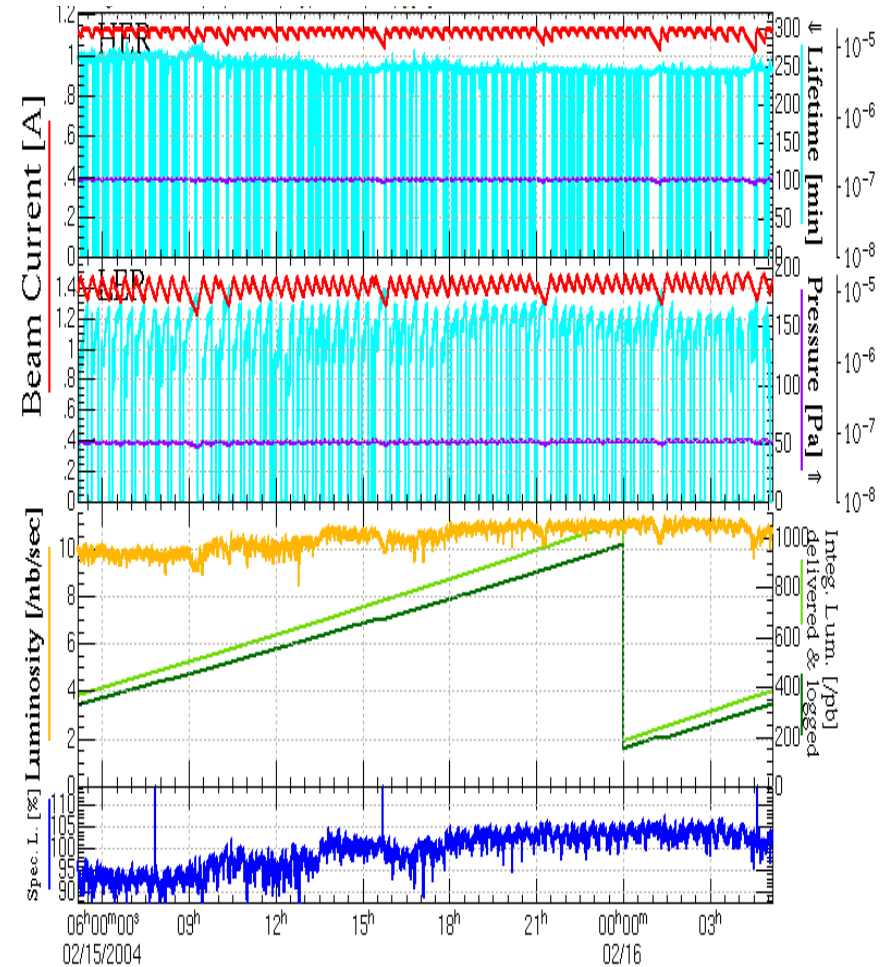


# Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine



# S potrpežljivim merjenjem, dan in noč, nekaj let...

Kontrolna soba eksperimenta Belle:  
nadzor na vseh komponentami  
detektorja, prenosom in  
shranjevanjem podatkov



V enem dnevu naberemo  $\sim$ trikrat toliko podatkov kot v celotnem času obratovanja eksperimenta ARGUS...



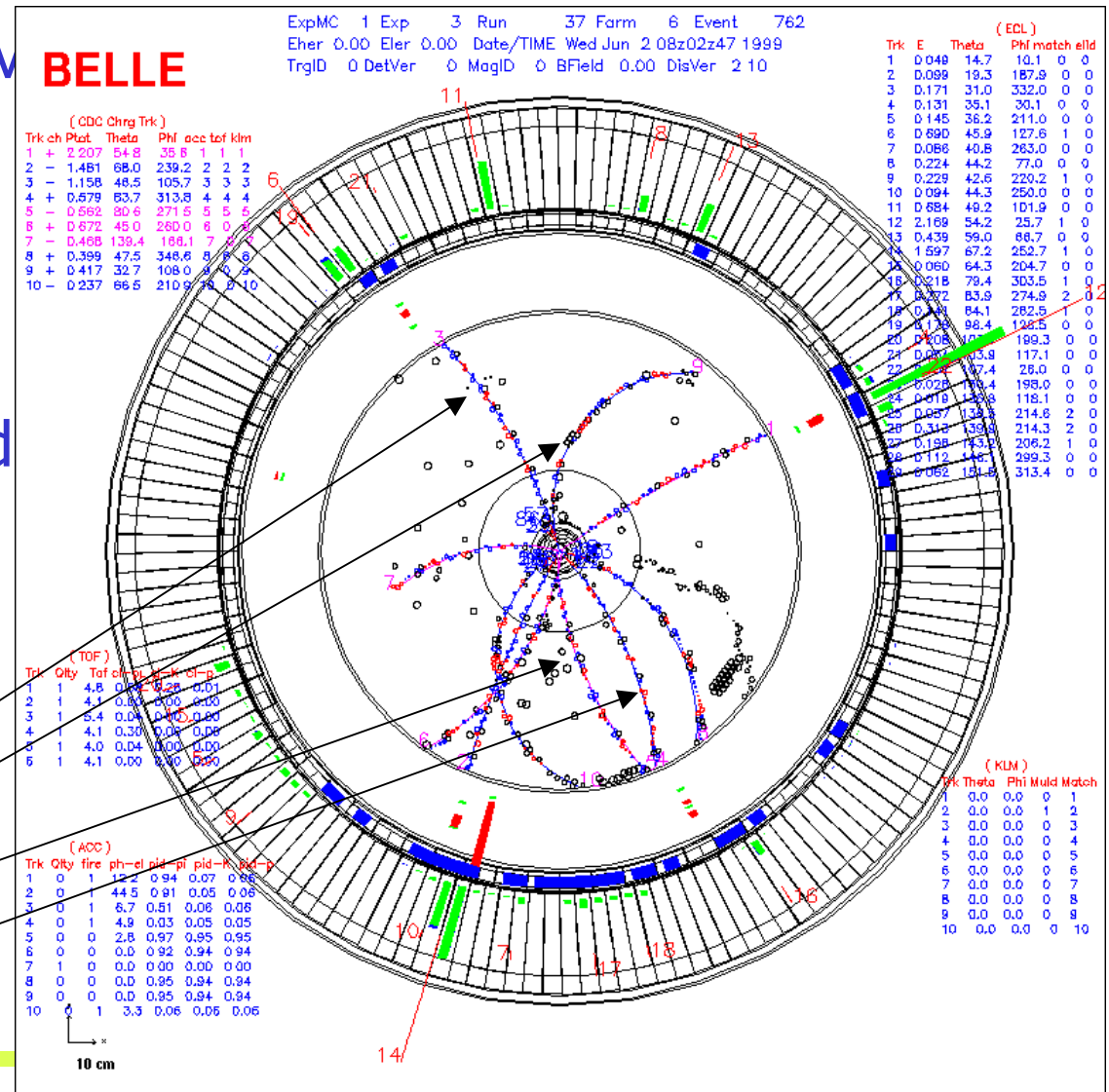
# Kaj izmerimo z detektorjem?

- sledi nabitih delcev v magnetnem polju (polmer kroga je odvisen od gibalne količine delca)
- koordinate točke, od koder sledi izhajajo
- dodatne podatke o identiteti delca

$$B^0 \rightarrow K_S J/\psi$$

$$K_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

$$J/\psi \rightarrow \mu^- \mu^+$$



# 2001, rezultat meritve: CP je kršena!

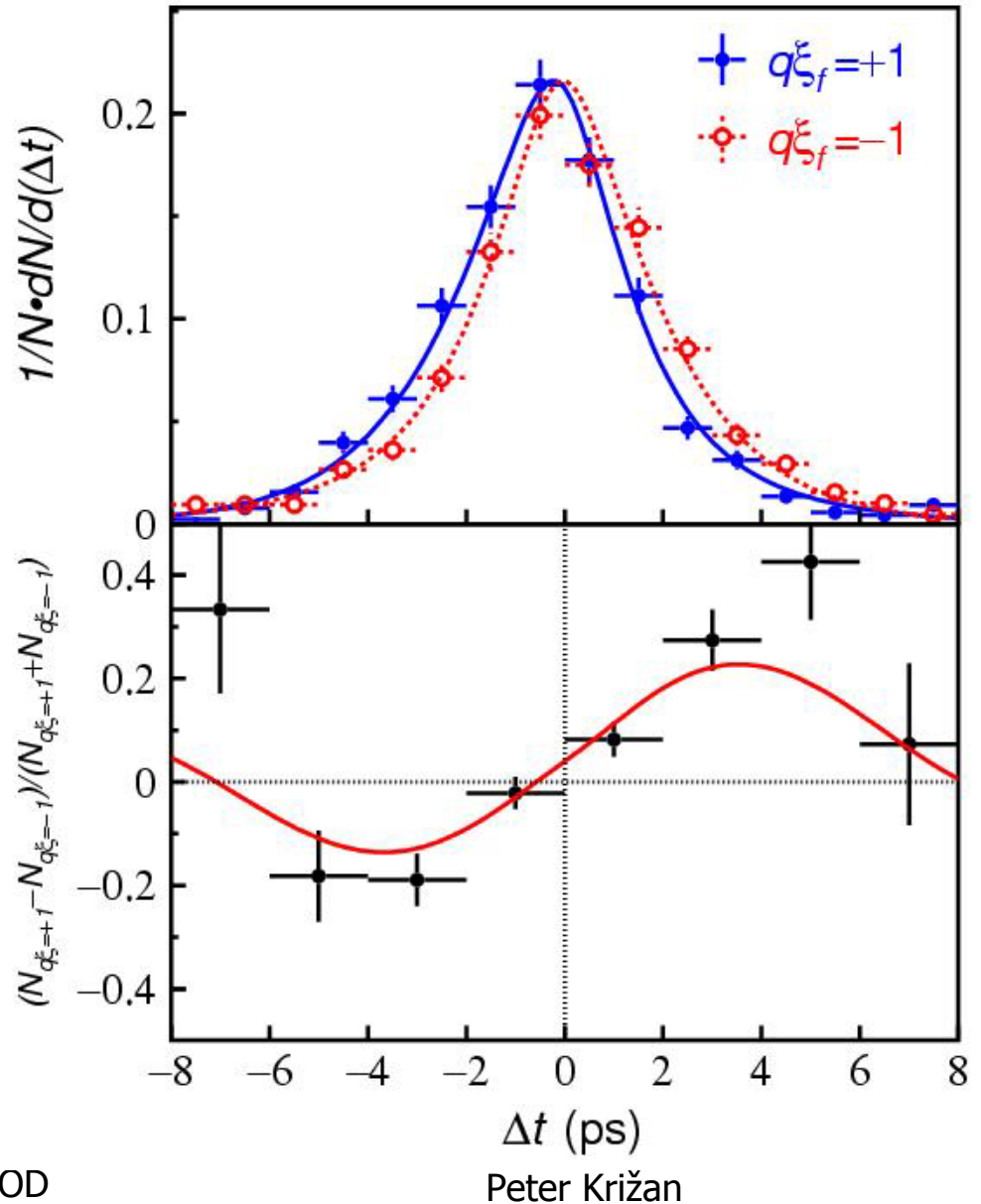
Razlika med delci in antidelci:

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

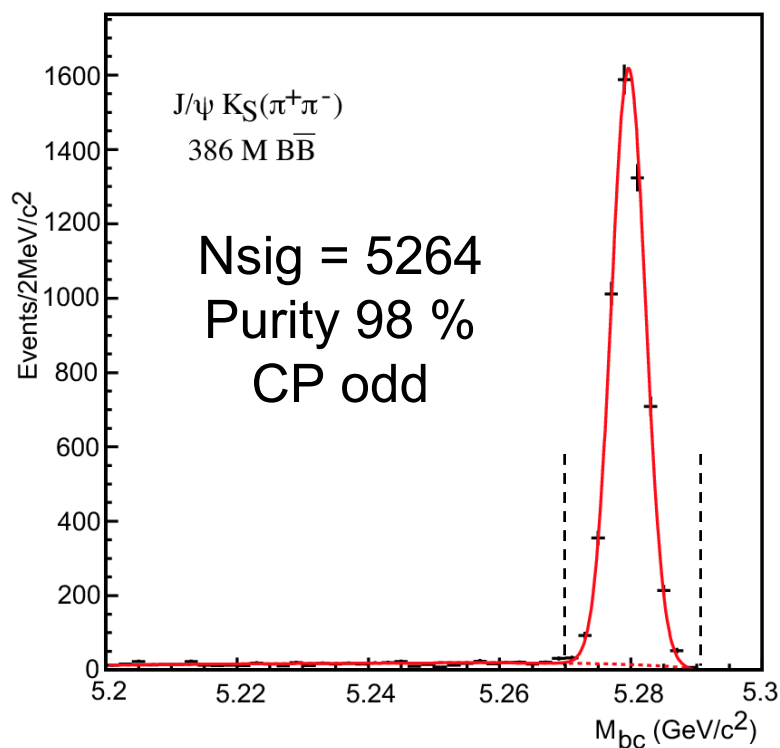
Razlika med obema porazdelitvama

→objavi v PRL in PRD imata več kot 500 citatov!

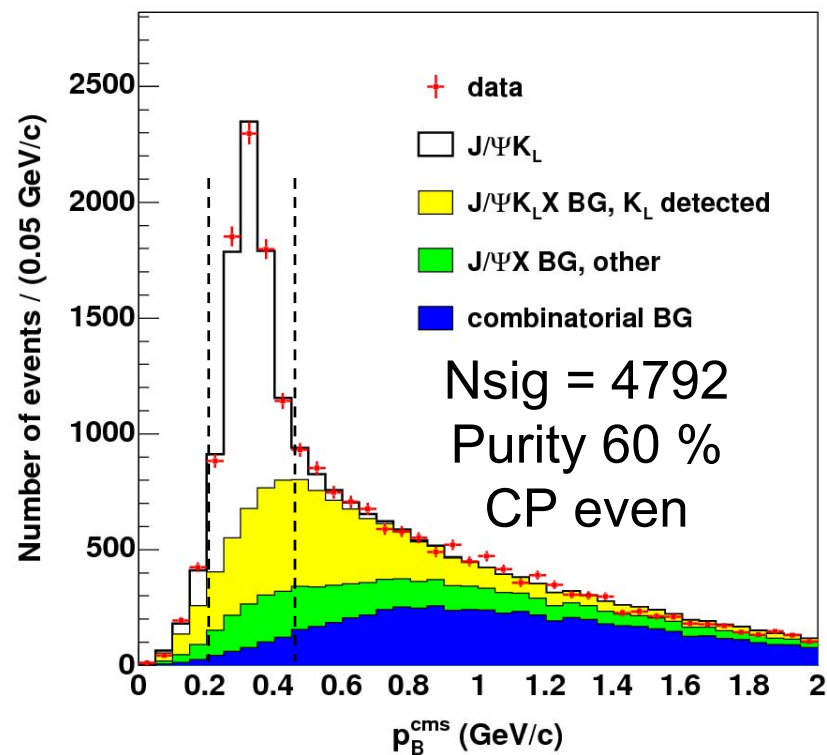




# 2005: $B^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^0$ with 386 M $B\bar{B}$ pairs

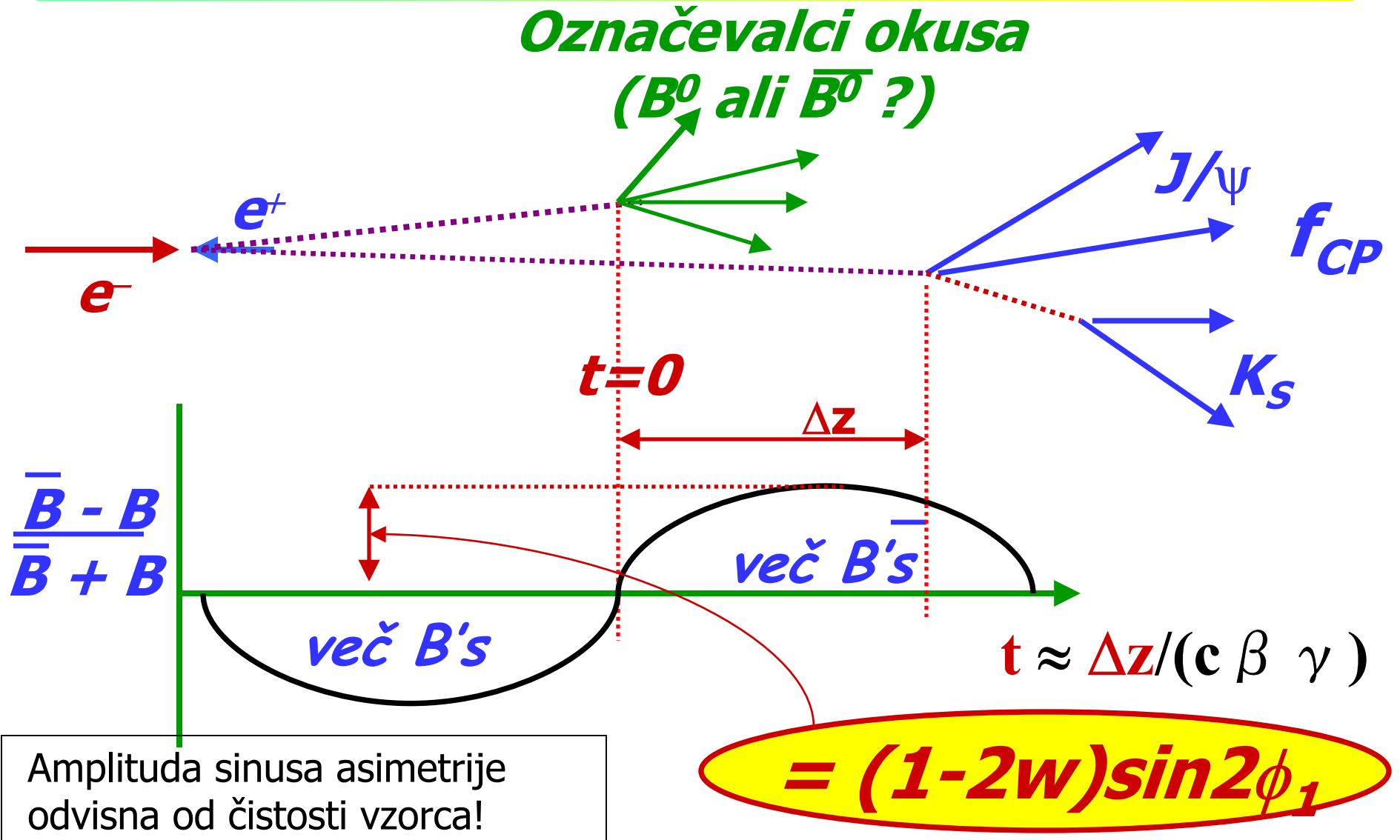


$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^{*2} - P_{J/\psi K_S}^{*2}}$$

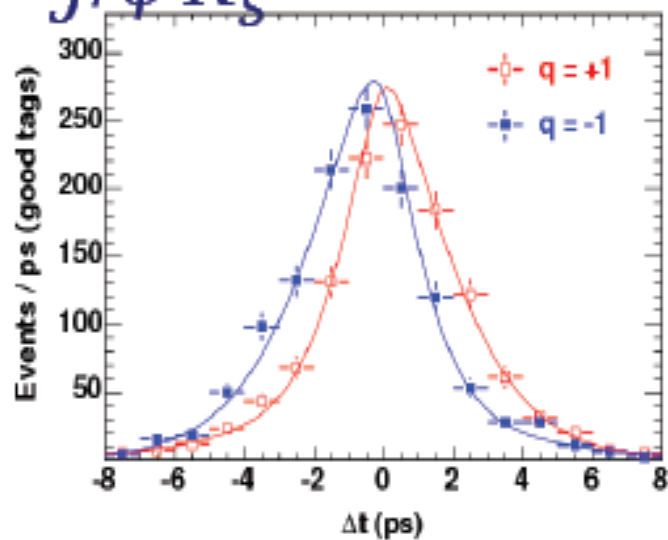


$p_B^*$  (momentum in CM)

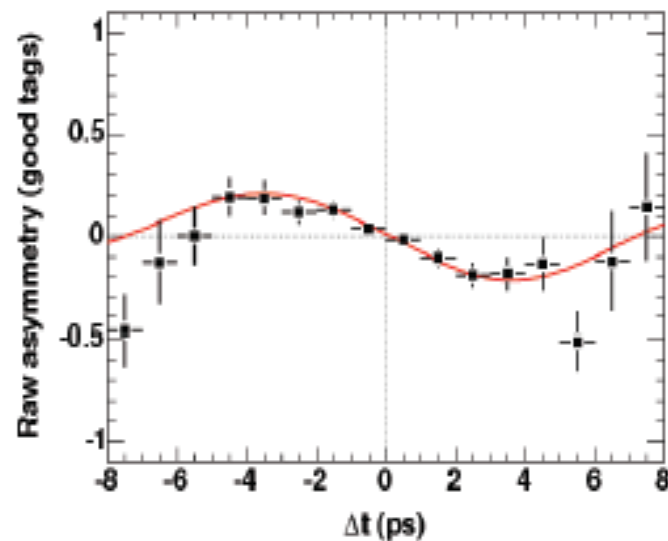
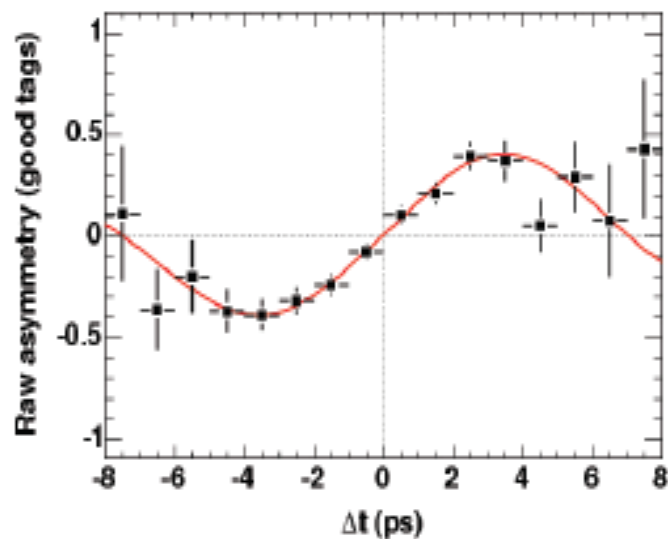
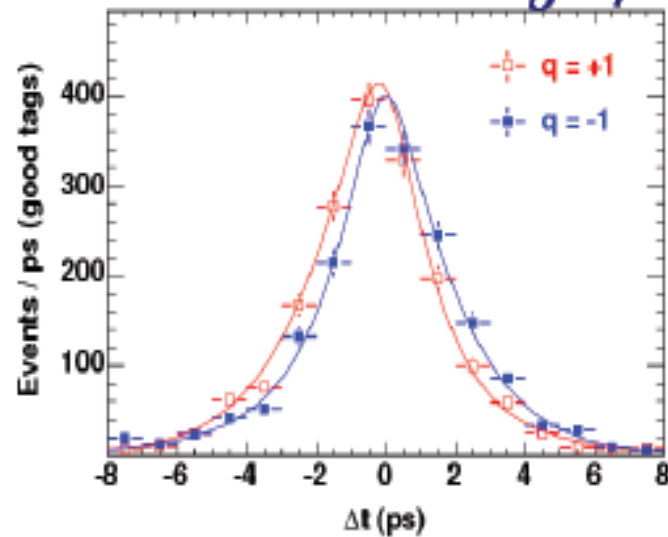
# Principle of CPV Measurement



$J/\psi K_S$  Belle ( $386 \times 10^6 B\bar{B}$ )

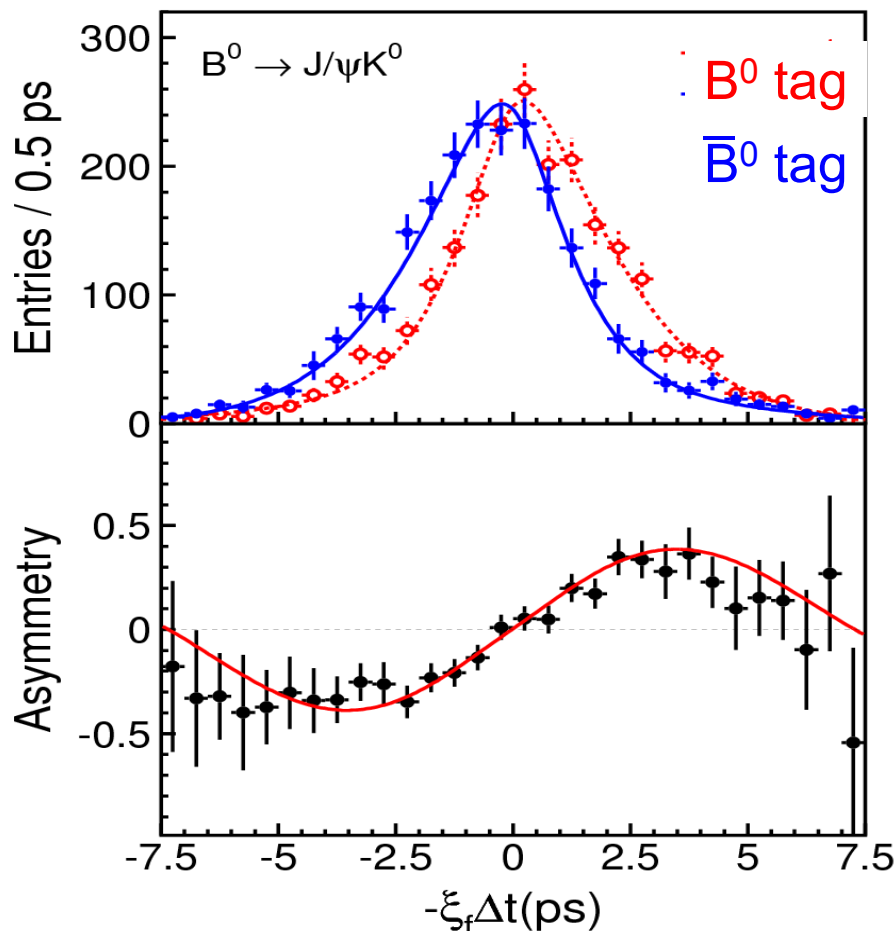


$J/\psi K_L$



# 2005: $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$

$$\sin 2\phi_1 = 0.652 \pm 0.039 \text{ (stat)} \pm 0.020 \text{ (syst)}$$
$$C = 0.010 \pm 0.026 \text{ (stat)} \pm 0.036 \text{ (syst)}$$



$$a_f = S \sin(\Delta mt) + C \cos(\Delta mt)$$

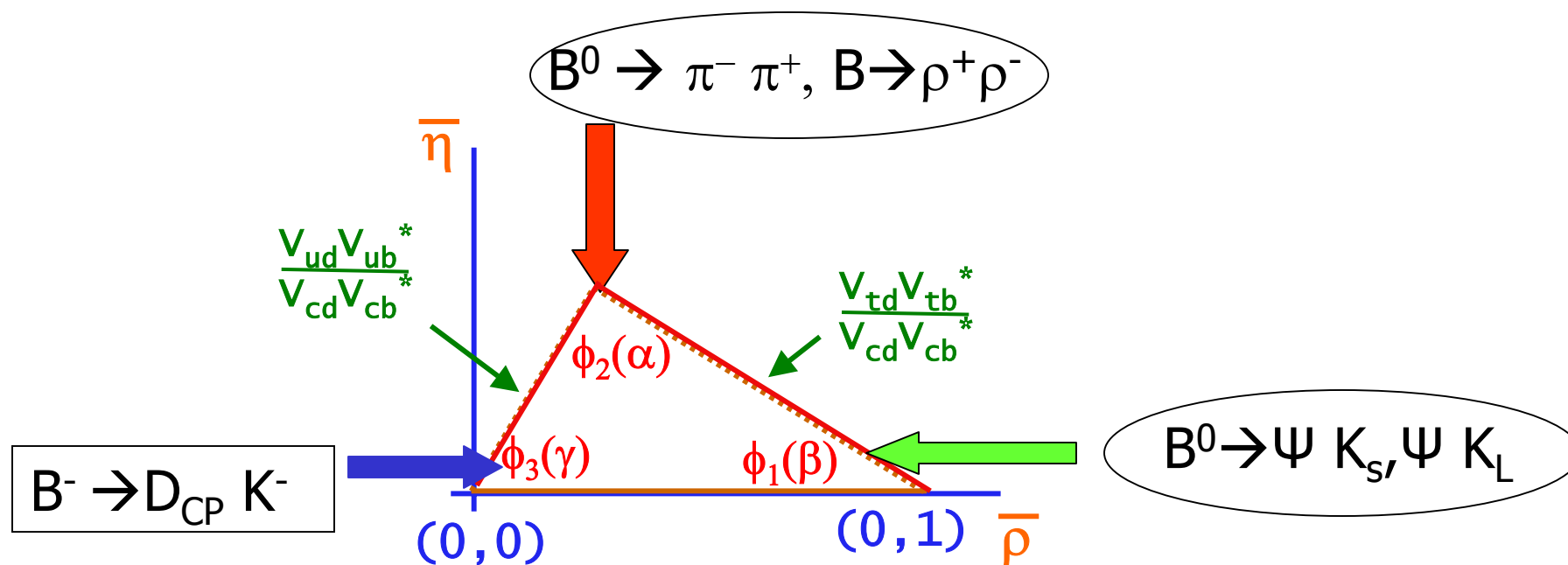
Sestavljen vzorec, razpadi

- $J/\psi K_S$ :  $N(\Delta t)$ ,
- $J/\psi K_L$ :  $N(-\Delta t)$

2001: odkritje →

2005: precizijska meritev!

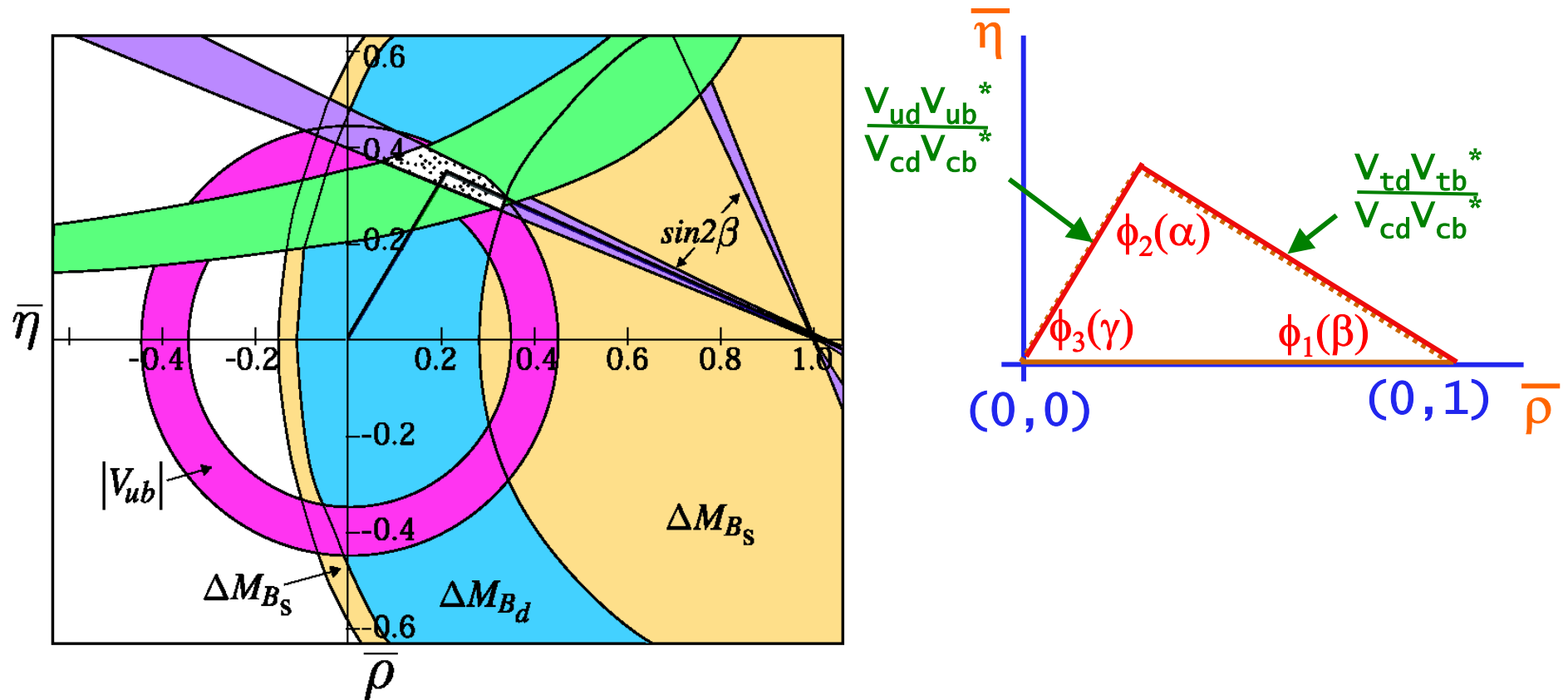
# Trije koti: $(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$ ali $(\beta, \alpha, \gamma)$



Velika vprašanja: *Ali so meritve kotov konsistentne z meritvami stranic trikotnika? Ali so meritve kotov konsistentne, če jih merimo v procesih, ki potekajo v drevesnem redu ali preko zank?*

# Meritve unitarnega trikotnika

Ali so meritve *kotov* konsistentne z meritvami *stranic* trikotnika?

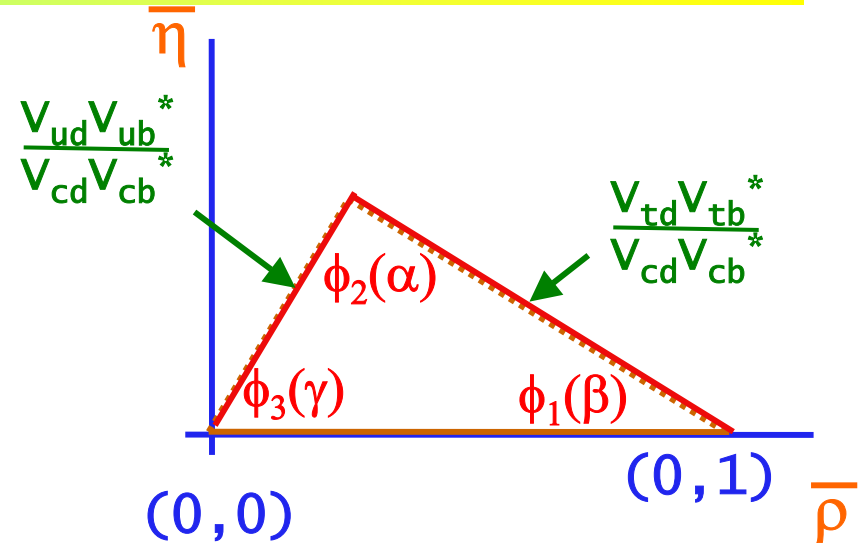


Ali so meritve kotov konsistentne, če jih merimo v procesih, ki potekajo v *drevesnem* redu ali preko *zank*?



# Meritve unitarnega trikotnika

Kaj so izmerili vaši predhodniki?



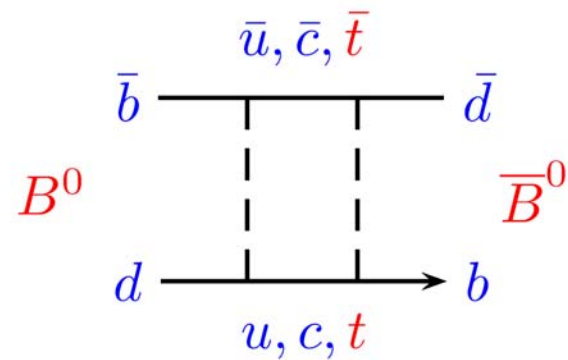
Ilija Bizjak (2005): do tedaj najbolj natančna meritev matričnega elementa  $V_{ub}$

Saša Fratina (2006): kršitev simetrije CP v razpadu  $B \rightarrow D^+ D^-$ , meritev kota  $\phi_1$ , presenetljiv rezultat (velik koeficient pri  $\cos\Delta mt$ )

Urban Bitenc (2006): iskal mešanje pri mezonih D, bistveno izboljšal zgornjo mejo.

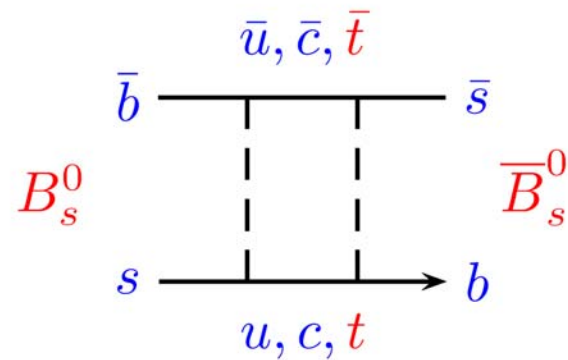
## Mešanje: ocene za $\Delta m$

$\Delta m \propto$



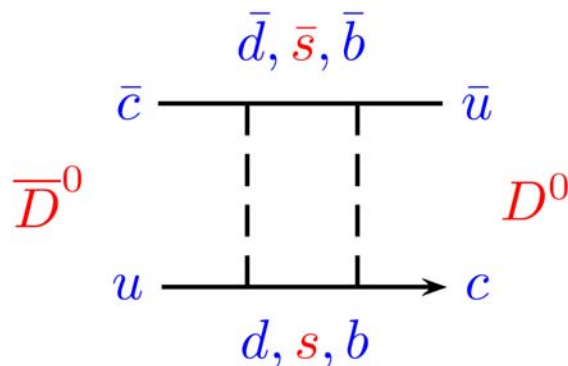
$$|V_{tb}^* V_{td}|^2 m_t^2 \propto \lambda^6 m_t^2 \approx 3$$

$$|V_{cb}^* V_{cd}|^2 m_c^2 \propto \lambda^6 m_c^2 \approx 3 \cdot 10^{-4}$$



$$|V_{tb}^* V_{ts}|^2 m_t^2 \propto \lambda^4 m_t^2 \approx 70$$

$$|V_{cb}^* V_{cs}|^2 m_c^2 \propto \lambda^4 m_c^2 \approx 7 \cdot 10^{-3}$$



$$|V_{bu}^* V_{bc}|^2 m_b^2 \propto \lambda^{10} m_b^2 \approx 7 \cdot 10^{-6}$$

$$|V_{su}^* V_{sc}|^2 m_s^2 \propto \lambda^2 m_s^2 \approx 4 \cdot 10^{-3}$$



# Mešanje v sistemu $D^0$

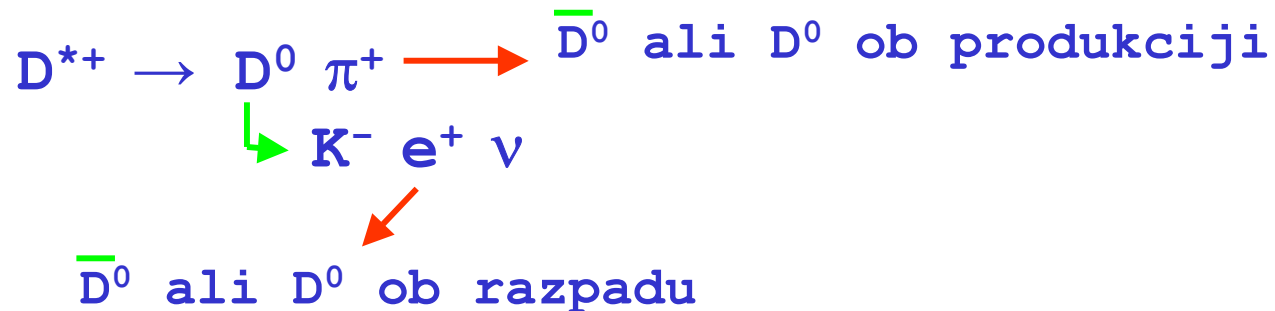
Zelo različno od mešanja pri mezoni B:  $\Delta m$  zelo majhen ( $\Delta m t \ll 1$ ) ->

Verjetnost pa razpad zmešanega mezona:

$$P_m = \frac{1}{2} \Gamma_q e^{-\Gamma_q t} [1 - \cos(\Delta m_q t)] \rightarrow \frac{1}{2} \Gamma_q e^{-\Gamma_q t} \frac{(\Delta m_q t)^2}{2}$$

Skoraj nič se ne zgodi, preden D razpade.

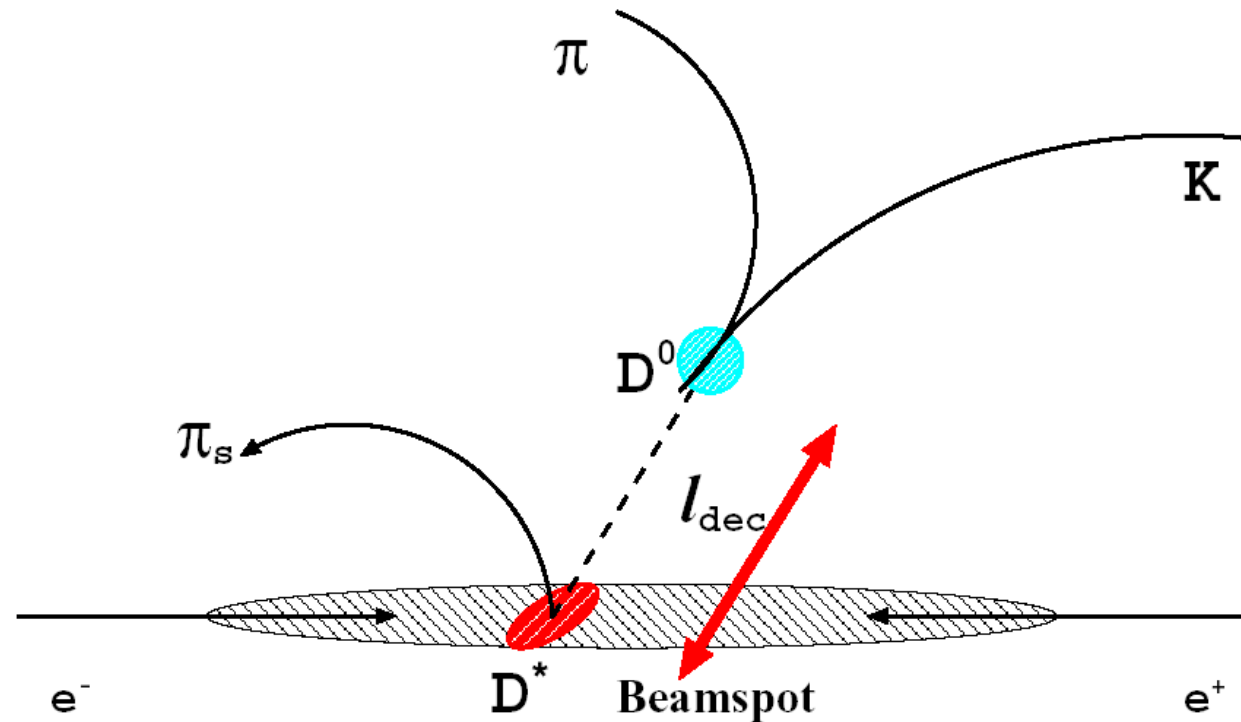
Metoda: iščemo mešanje v razpadnem zaporedju:  $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$ ,  
 $D^0 \rightarrow$  končno stanje, ki nam pove, ali je razpadel D ali anti-D.



# Mešanje v sistemu $D^0$ : razpadi v stanje z določeno CP parnostjo

$D^0 \rightarrow KK, \pi\pi$  primerjamo z razpadi  $D^0 \rightarrow K\pi$

Če je razpadni čas različen, je to dokaz za mešanje



Marko Starič, objavljeno na konferenci prejšnji teden →



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



## Results (preliminary)

	$y_{CP}$ (%)	$A_\Gamma$ (%)
$KK$	$1.25 \pm 0.39 \pm 0.28$	$0.15 \pm 0.34 \pm 0.16$
$\pi\pi$	$1.44 \pm 0.57 \pm 0.42$	$-0.28 \pm 0.52 \pm 0.30$
$KK + \pi\pi$	$1.31 \pm 0.32 \pm 0.25$	$0.01 \pm 0.30 \pm 0.15$

Belle preliminary ( $540 \text{ fb}^{-1}$ )

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

>  $3\sigma$  above zero ( $4.1\sigma$  stat. only)  
first evidence for  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing

$$A_\Gamma = 0.01 \pm 0.30 \pm 0.15 \%$$

no evidence for CP violation

