



KRŠITEV SIMETRIJE CP V SISTEMU NEVTRALNIH MEZONOV B

Peter Križan

Univ. of Ljubljani in Institut J. Stefan

7. oktober 2002

Kolokvij Oddelka za fiziko

- ◆ Uvod in košček zgodovine
- ◆ Eksperimentalna aparatura
- ◆ Meritev kršitve simetrije CP v sistemu nevtralnih mezonov B
- ◆ Pogled v prihodnost
- ◆ Zaključek



Kršitev simetrije CP



Fundamentalna količina: loči materijo in od antimaterije

Košček zgodovine

- ◆ Odkrita pri razpadih mezonov K^0 leta 1964
- ◆ Meritev mešanja v sistemu nevtralnih mezonov $B^0 - \bar{B}^0$ s spektrometrom ARGUS leta 1987 je pokazala, da bi kršitev simetrije CP znala biti znatna pri razpadih mezonov B
- ◆ Kar nekaj poskusov je bilo predlaganih, nekaj univerzalnih spektrometrov jo je poskušalo izmeriti
- ◆ Izmerjena v sistemu $B^0 - \bar{B}^0$ leta 2001 z dvema predvsem v ta namen zgrajenima spektrometroma Belle in BaBar ob asimetričnih trkalnikih elektronov in pozitronov



Kršitev simetrije CP v Standardnem Modelu

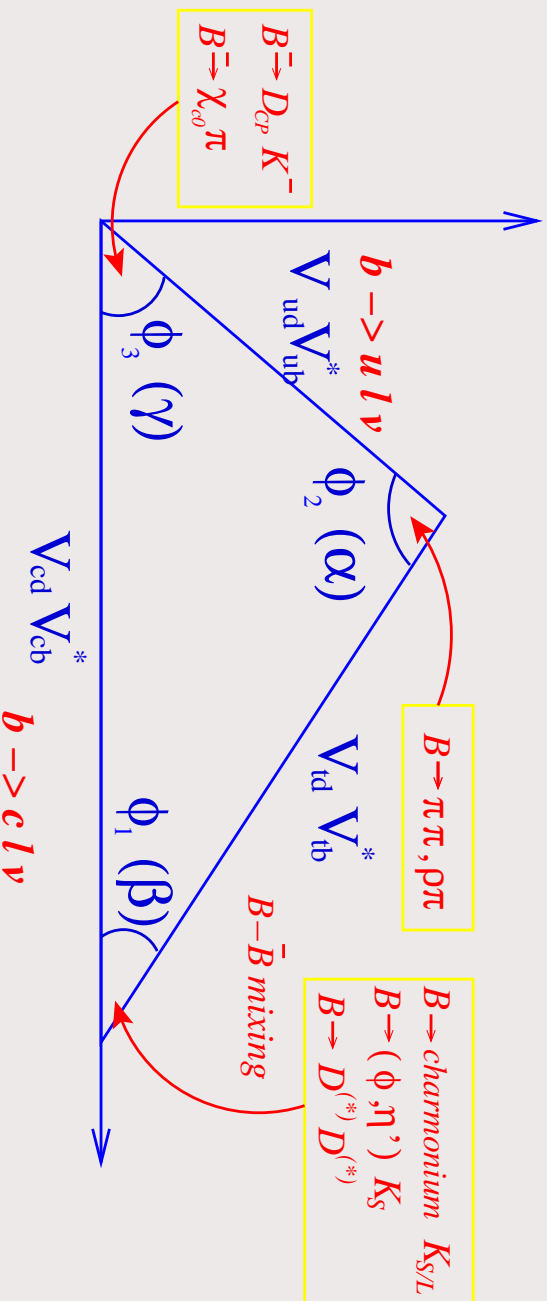


Kršitev simetrije CP opišemo s kompleksno mešalno matriko za kvarke (CKM - Cabibbo, Kobayashi, Maskawa), ki v principu ne more biti realna

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

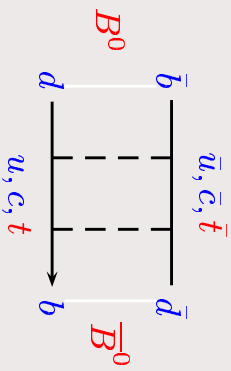
Unitarnost matrike V vodi do pogojev za matrične elemente, na primer $V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$.

→ unitarni trikotnik





Mešanje v sistemu nevtralnih mezonov B^0

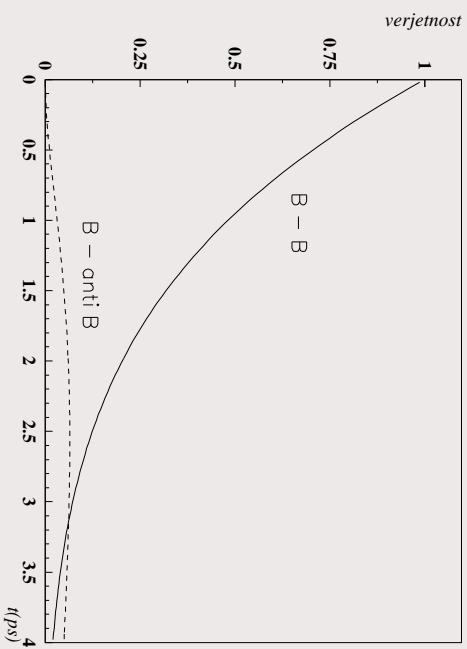


mezon B^0 se z znatno verjetnostjo pretvori v \bar{B}^0 , preden razpade

$$|\langle B^0 | B^0(t) \rangle|^2 = e^{-t/\tau} \cos^2 \frac{\Delta m t}{2} = \frac{1}{2} e^{-t/\tau} (1 + \cos \Delta m t)$$

$$|\langle \bar{B}^0 | B^0(t) \rangle|^2 = e^{-t/\tau} \sin^2 \frac{\Delta m t}{2} = \frac{1}{2} e^{-t/\tau} (1 - \cos \Delta m t)$$

$\Delta m = 0.5 \text{ ps}^{-1} \quad \tau = 1.5 \text{ ps}$

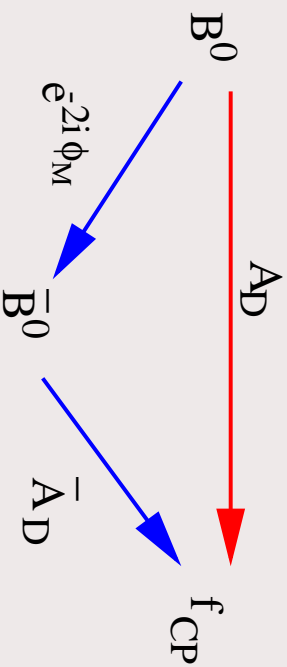




Kršitev simetrije CP pri mezonih B



Kršitev simetrije CP pri mezonih B : potencialno velik efekt zaradi interference



amplitud za direktni razpad v končno stanje f_{CP} z določeno vrednostjo parnosti CP in razpad po mešanju.

To povzroči asimetrijo v verjetnosti za razpad:

$$A_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} = S_f \sin \Delta m t$$

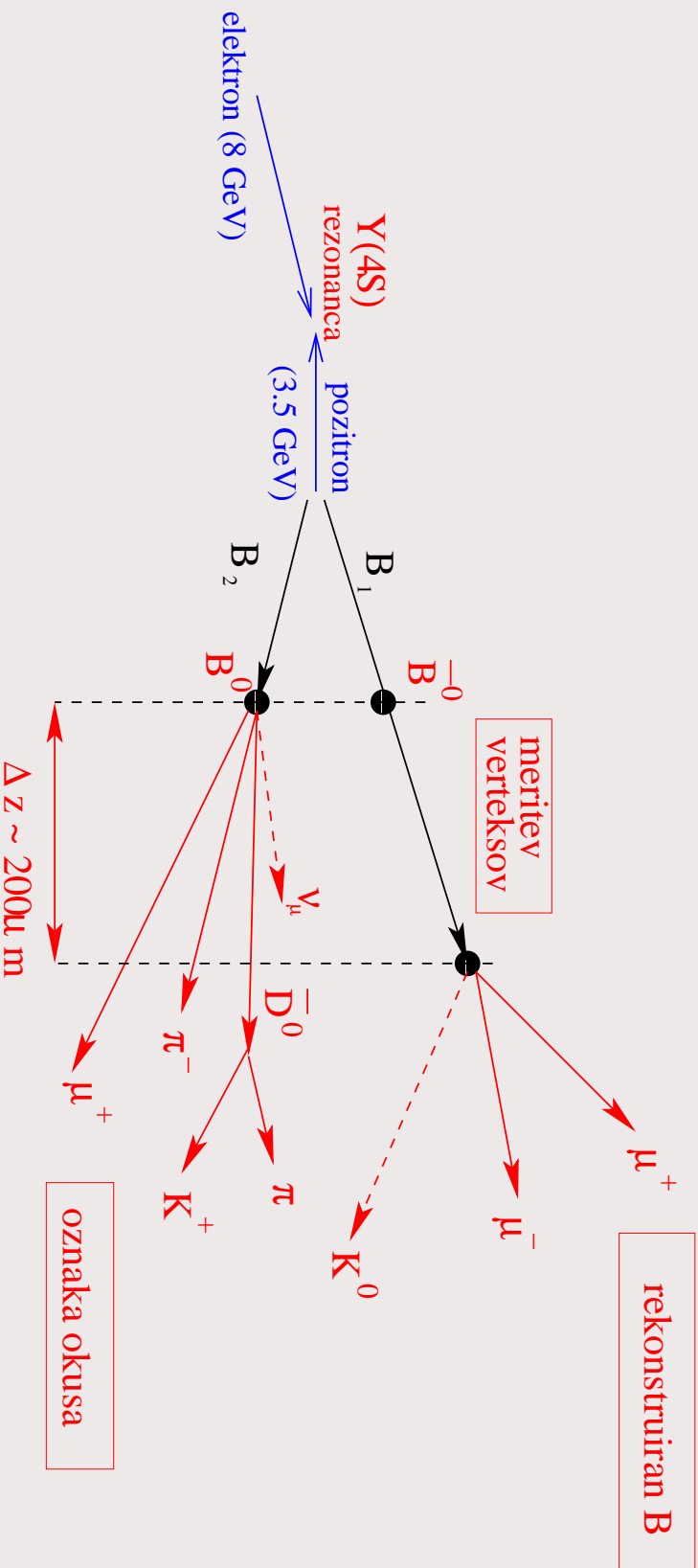
Napovedi standardnega modela

- $f_{CP}: J/\psi K_S^0, CP = -1,$
- $f_{CP}: J/\psi K_L^0, CP = +1,$
- $f_{CP}: \pi^+ \pi^-, CP = -1,$

- $S_f = \sin 2\phi_1$
- $S_f = -\sin 2\phi_1$
- $S_f = -\sin 2\phi_2'$



Meritev kršitev CP - princip



Potrebujemo:

veliko število parov $B\bar{B}$ (100 M)

→ tovarna mezonov $B =$

trkalnik e^+e^- z veliko luminoznostjo

in z asimetričnima energijama žarkov

in spektrometer z:

- ♦ natančnim detektorjem verteksov (Δt iz Δz)
- ♦ natančnim sledenjem v magnetnem polju (gibalne količine razpadnih produktov)
- ♦ učinkovito identifikacijo e, μ, π, K (označevanje okusa B)



Delovanje trkalnika KEKB 1



merilo za zmogljivost trkalnika:

Luminoznost L

število zaznanih reakcij = $L\sigma$,

σ je presek za reakcijo

najvišja luminoznost

$$= 7.348 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

integrirana luminoznost v:

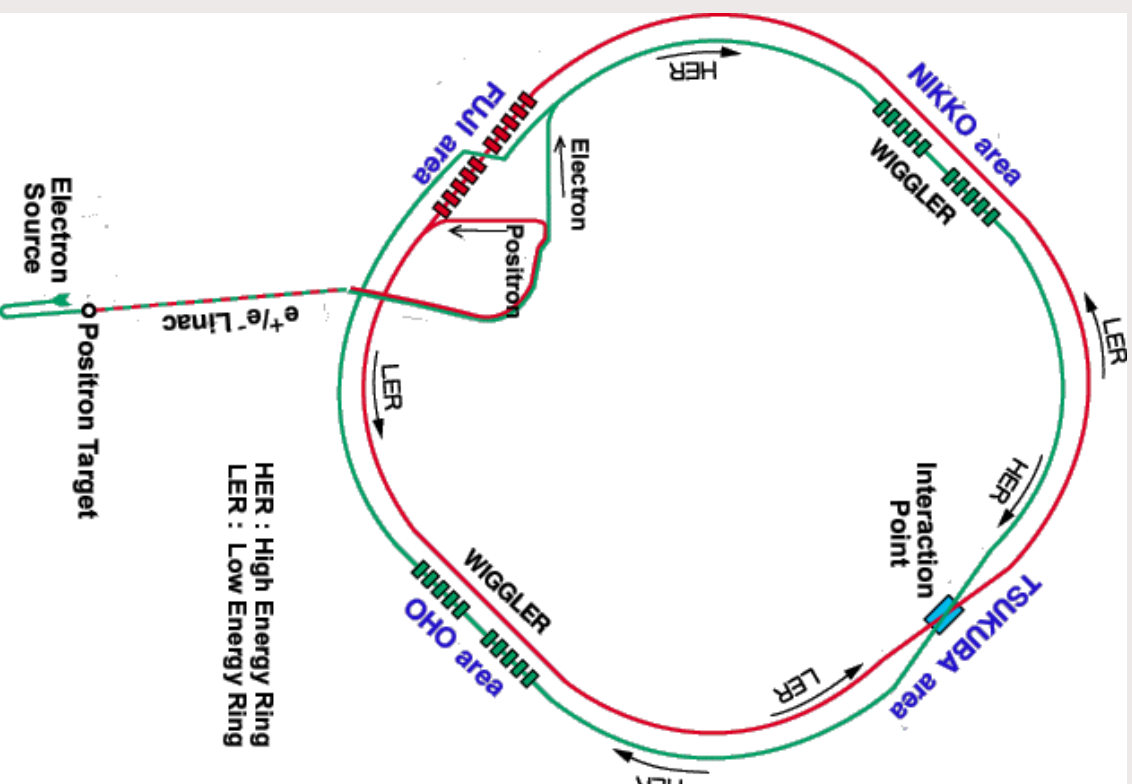
24 h = 409.8 /pb

7 dneh = 2524. /pb

meseču = 7348. /pb

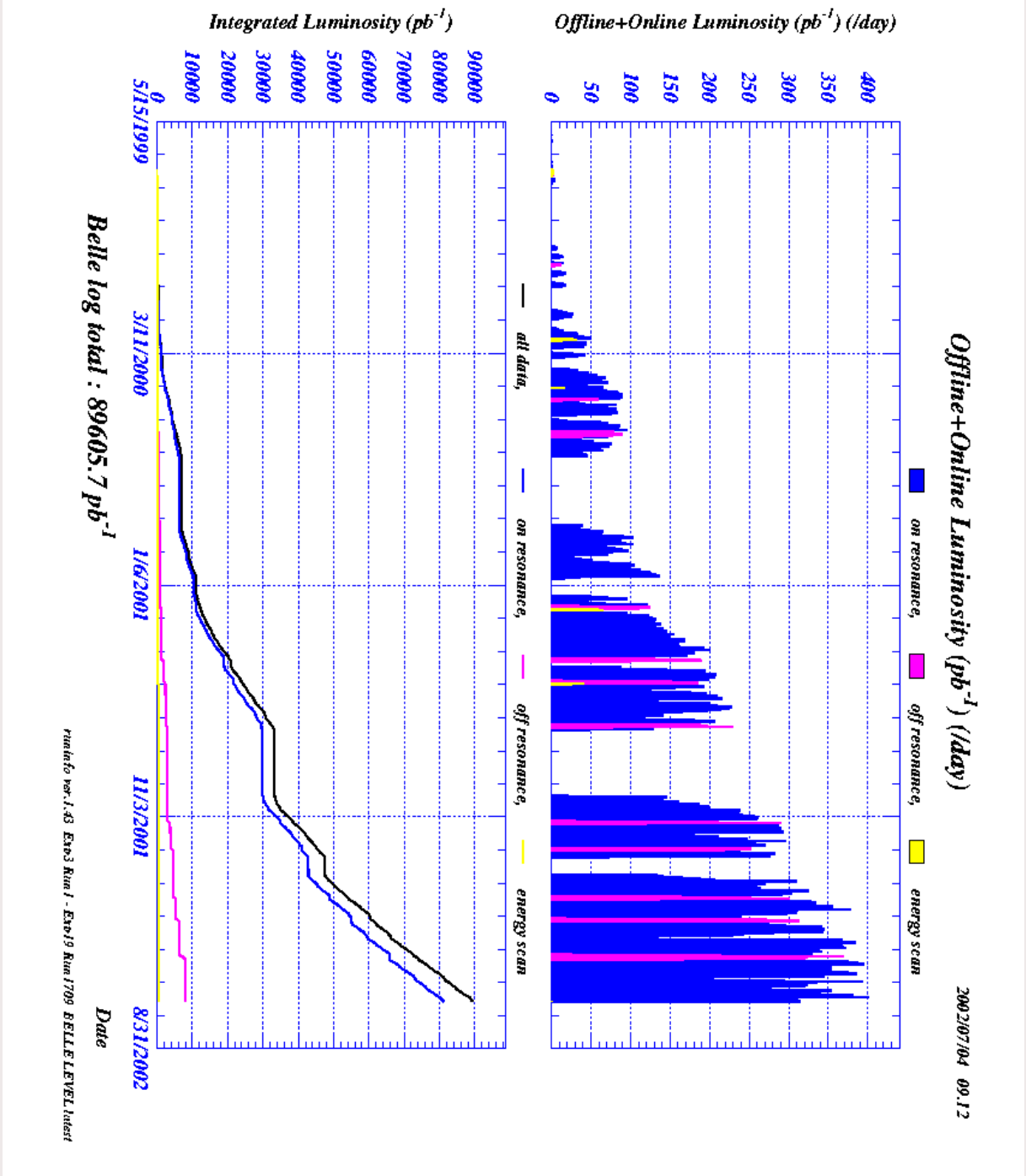
→ v dveh dneh nabereemo toliko, kot smo pri

ARGUSu nabrali v nekaj letih!





Delovanje trkalnika KEKB 2





Delovanje spektrometra Belle

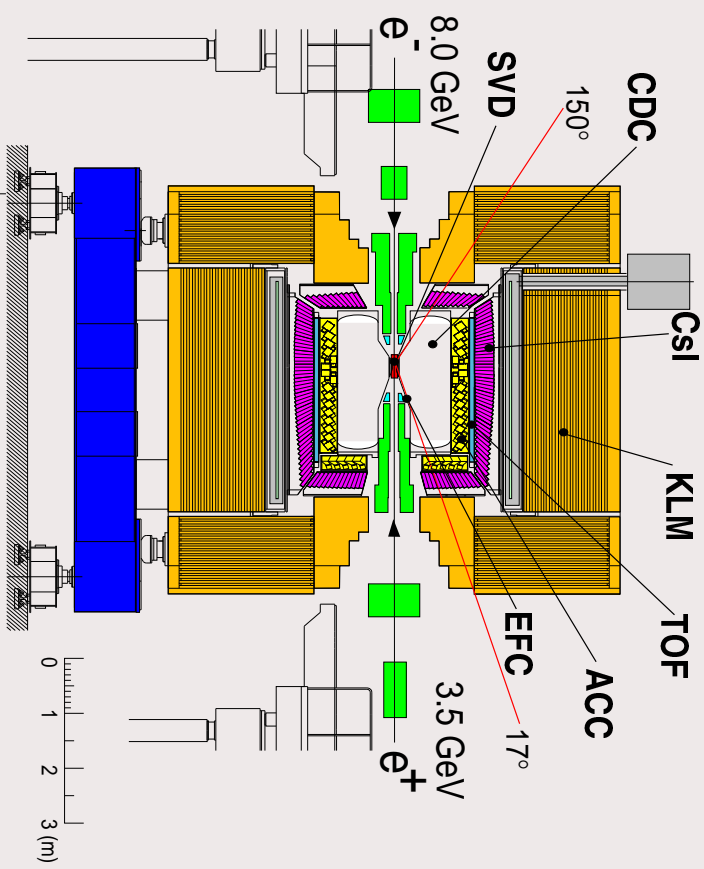


Sledilni sistemi

- ◆ central drift komora (CDC)
 - 50 plasti
 - $\frac{\sigma_{pT}}{pT} \approx 0.35\%$ at 1 GeV/c
- ◆ silicijev detektor verteksov (SVD)
 - 3 dvostranske silicijeve plasti
 - vpadni parameter $\sigma = 55 \mu\text{m}$
 - za sledi s $p = 1 \text{ GeV}/c$ (90°)

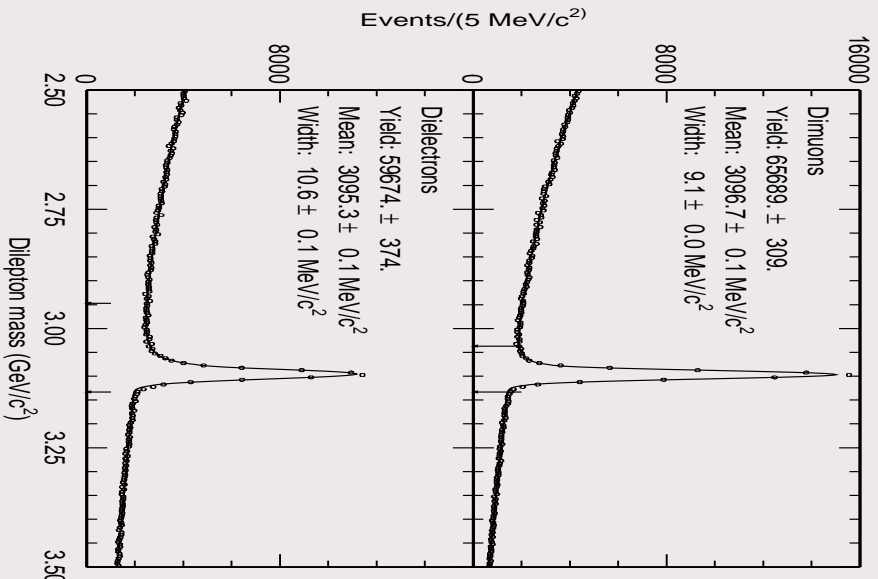
identifikacija razpadnih produktov:

- ◆ identifikacija K^\pm do 3.5 GeV/c (izkoristek $\approx 90\%$, napačna id. $\approx 6\%$)
 - ◆ pragovni Čerenkov števec z aerogelom (ACC): $n = 1.01-1.03$
 - ◆ števec časa preleta (TOF): $\sigma = 95 \text{ ps}$
 - ◆ dE/dx v drift komori (CDC): $\sigma_{dE/dx} \approx 7\%$
- elektronska id: elektromagnetni kalorimeter (CSl(Ti)) $\frac{\sigma_E}{E} \approx 1.8\%$ at 1 GeV
 detektor K_L in mionov (KLM): 14 plasti, $\epsilon_\mu > 90\%$ at napačna id. 2%



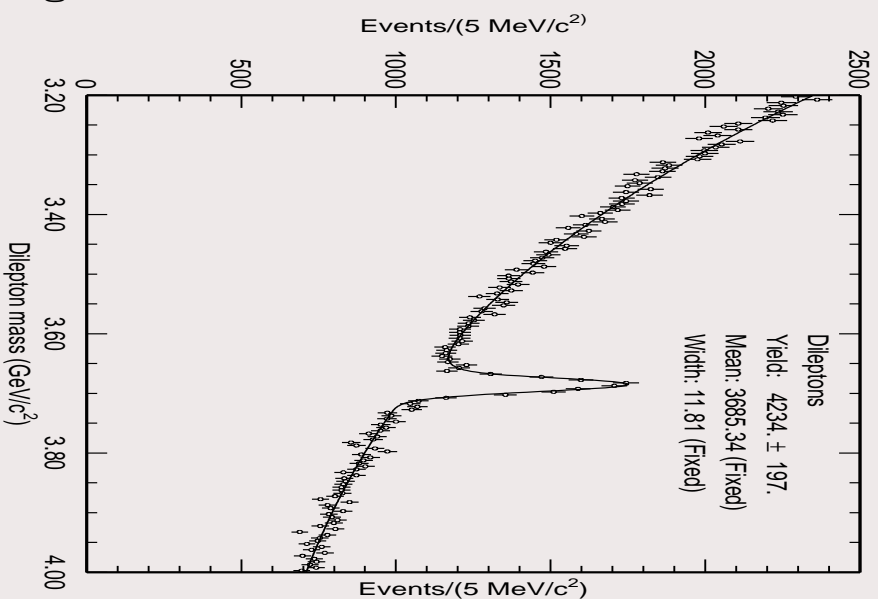


Rekonstrukcija razpadov $B^0 \rightarrow (c\bar{c})K_S$



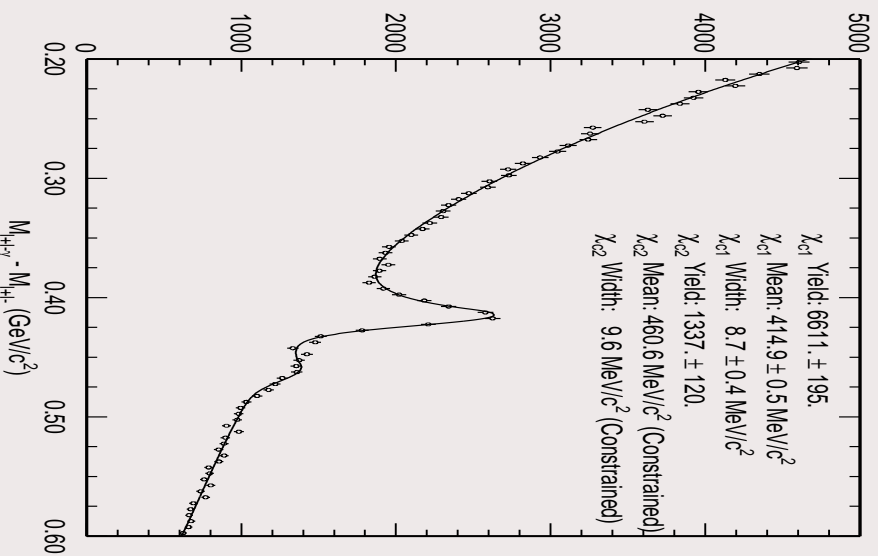
$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-, e^+ e^-$$

$$\sigma_M = 9.6(10.7) \text{ GeV}/c^2$$



$$\psi(2s) \rightarrow \mu^+ \mu^-, e^+ e^-$$

$$\sigma_M = 12.1 \text{ GeV}/c^2$$



$$\chi_{c1}, \chi_{c2} \rightarrow J/\psi \gamma$$

$$\sigma_{\Delta M} = 7.0 \text{ GeV}/c^2$$



Rekonstrukcija $B^0 \rightarrow (c\bar{c})K_S$



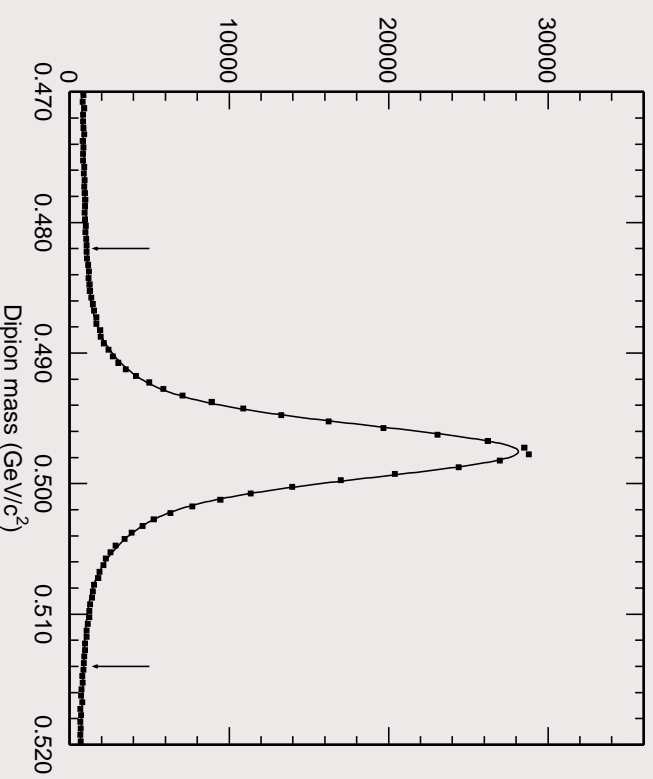
Kratkoživi kaon razpade tipično po nekaj cm na dva načina:



Običajno ga rekonstruiramo v razpadu v dva nabita piona, v pričujoči analizi pa smo uspeli uporabiti tudi bistveno bolj zahtevni kanal



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



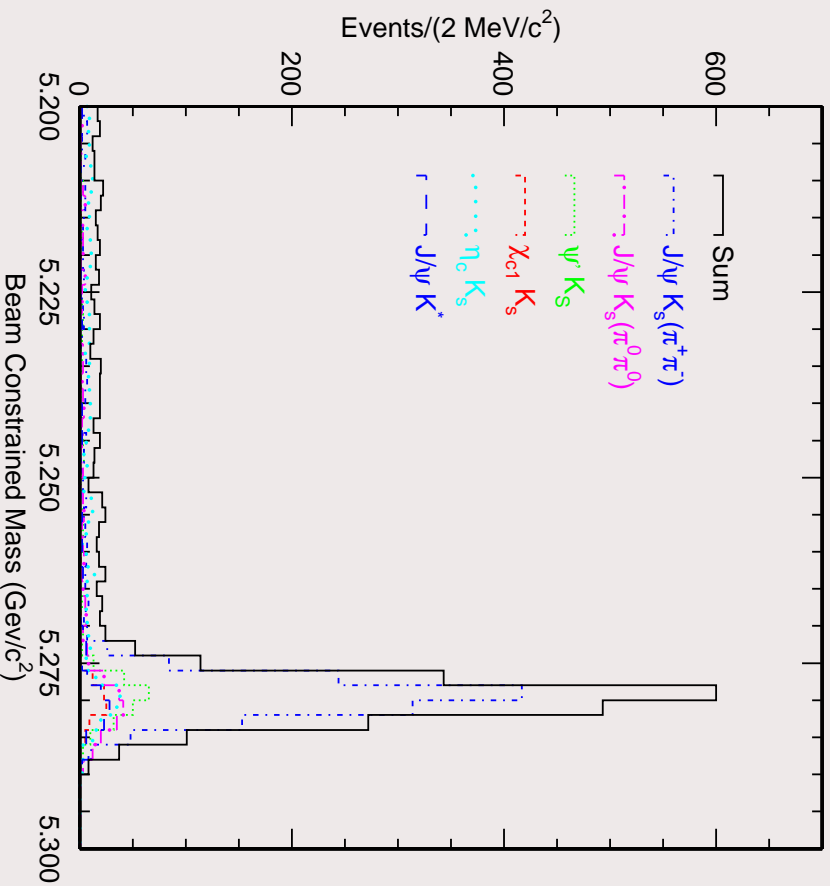
$$\sigma_M = 4.1 \text{ GeV}/c^2$$



Rekonstrukcija lastnih stanj CP tipa $b \rightarrow c\bar{c}s$ CP



Rekonstruirani razpadni kanali

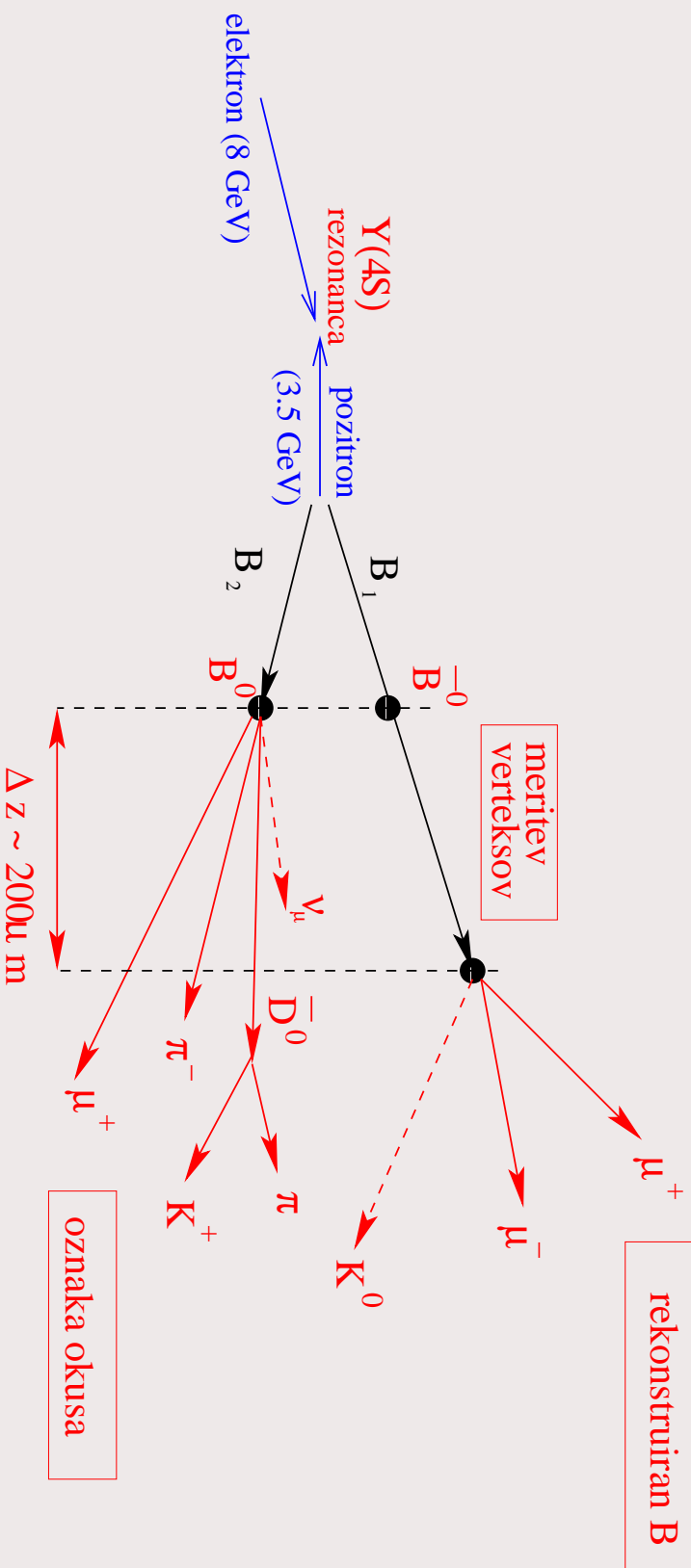


$$M_{bc} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - \vec{p}_{\text{Bcandidate}}^2}$$

$B^0 \rightarrow$	dogodkov	$\frac{S}{S+N}$
$J/\psi K_S(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)$	1285	.976
$J/\psi K_S(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)$	188	.824
$\psi(2S)K_S$		
$(\psi(2S) \rightarrow \ell^+ \ell^-)K_S$	91	.957
$(\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)$	112	.911
$\chi_{c1} K_S$	77	.958
$\eta_c(\eta_c \rightarrow K_S K \pi)K_S$	72	.646
$\eta_c(\eta_c \rightarrow K K \pi^0)K_S$	49	.725
$\eta_c(\eta_c \rightarrow p\bar{p})K_S$	21	.936
$J/\psi K^*(K^* \rightarrow K_S \pi^0)$	101	.917
skupno $CP = -1$	1996	.935
$J/\psi K_L, CP = +1$	1330	.627
skupno	3326	.807



Meritev kršitve CP - nadaljevanje



Za vsak dogodek določimo Δt iz $\Delta z = \beta\gamma c\Delta t$:

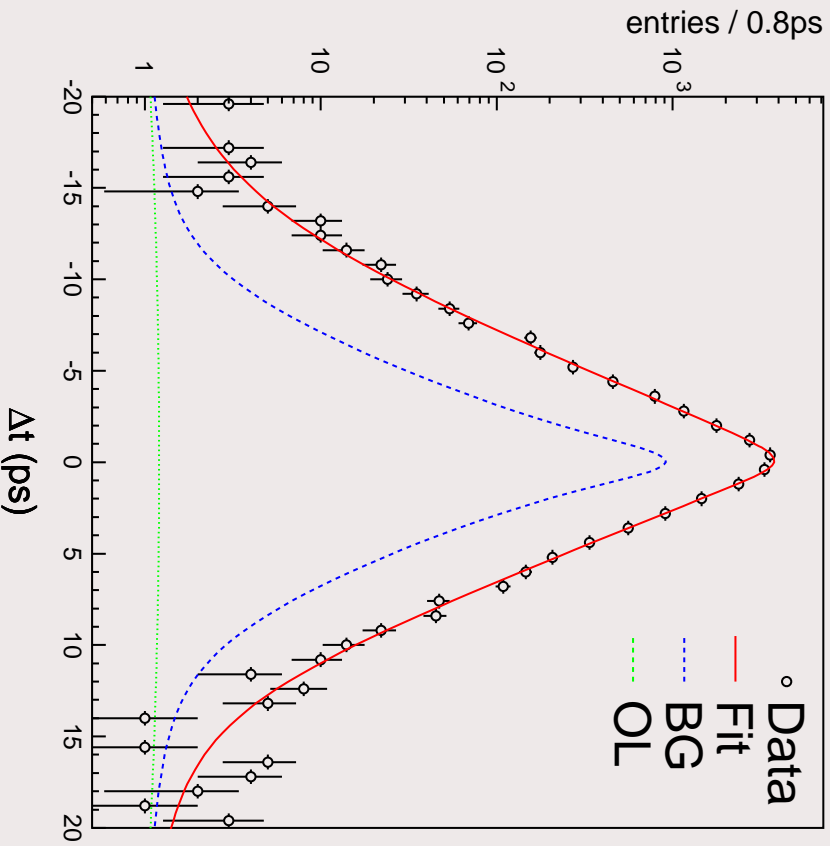
- ◆ začetek štetja časa: ločljivost na označevalni strani $140 \mu\text{m}$ ($\epsilon = 91\%$)
- ◆ konec štetja časa: ločljivost na CP strani $75 \mu\text{m}$ ($\epsilon = 92\%$)
- tipično $\Delta z = \beta\gamma c\tau_B = 200 \mu\text{m}$



Meritev Δz : preverjanje



Ponovimo meritev razpadnega časa s kanali $B^0 \rightarrow D^- \pi^+$, $D^{*-} \pi^+$, $D^{(*)-} \rho^+$,
 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ in $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$



- ◆ ločljivost: 1.43 ps
- ◆ razpadni čas B^0 1.551 ± 0.018 (stat) ps
- ◆ svetovno povprečje: 1.542 ± 0.016 ps



Označevanje okusa 1



Določimo, ali je v stanje z določeno CP parnostjo razpadel B^0 ali \bar{B}^0 , tako da gledamo naboje razpadnih produktov asociiranega mezona B

Inkluzivni leptoni

- ◆ ℓ^- z veliko gib. količino $b \rightarrow c\ell^- \nu$
- ◆ ℓ^+ s srednje veliko gib. količino $c \rightarrow s\ell^+ \nu$

Inkluzivni hadroni

- ◆ π^+ z veliko gib. količino $B^0 \rightarrow D^{(*)-} \pi^+, D^{(*)-} \rho^+ (\rho^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0), \dots$
- ◆ K^+ s srednje veliko gib. količino $\rightarrow K^+ X$
- ◆ π^- z nizko gib. količino $D^{(*)-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-$

Izkoristek $> 99.5\%$, $\epsilon_{\text{efektivna}} = 28.8 \pm 0.5\%$



Označevanje okusa 2



Označevanje ni idealno: vedno je mogoče (z verjetnostjo w), da je oznaka napačna (manj za leptone, več za kaone).

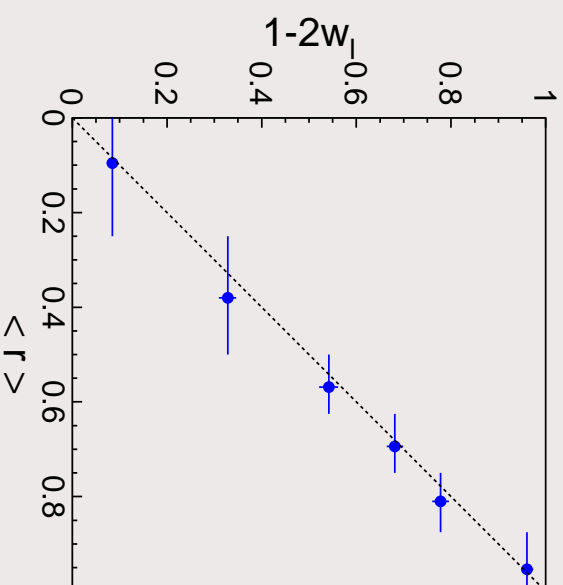
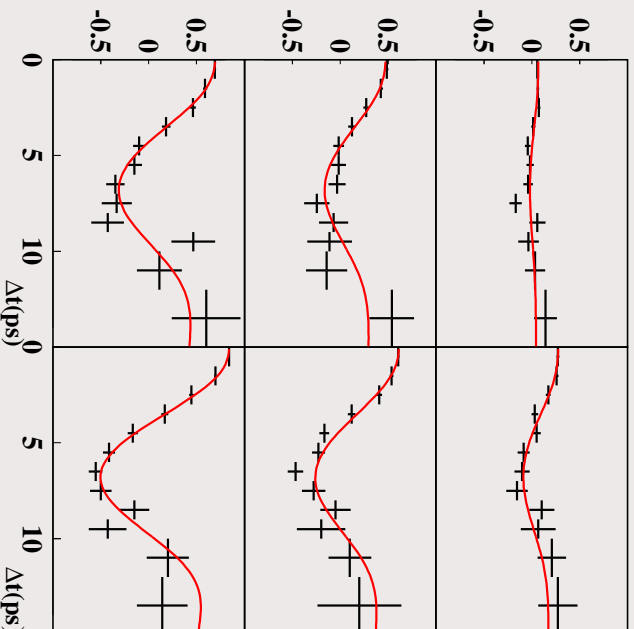
→ oscilacija asimetrije se zmanjša, $\sin \Delta m_d t \rightarrow (1 - 2w) \sin \Delta m_d t$.

→ Potrebujemo: w za vsak dogodek.

Dogodke uredimo v šest kategorij v spremenljivki r , katere vrednost določimo s pomočjo simulacije na podlagi lastnosti dogodka.

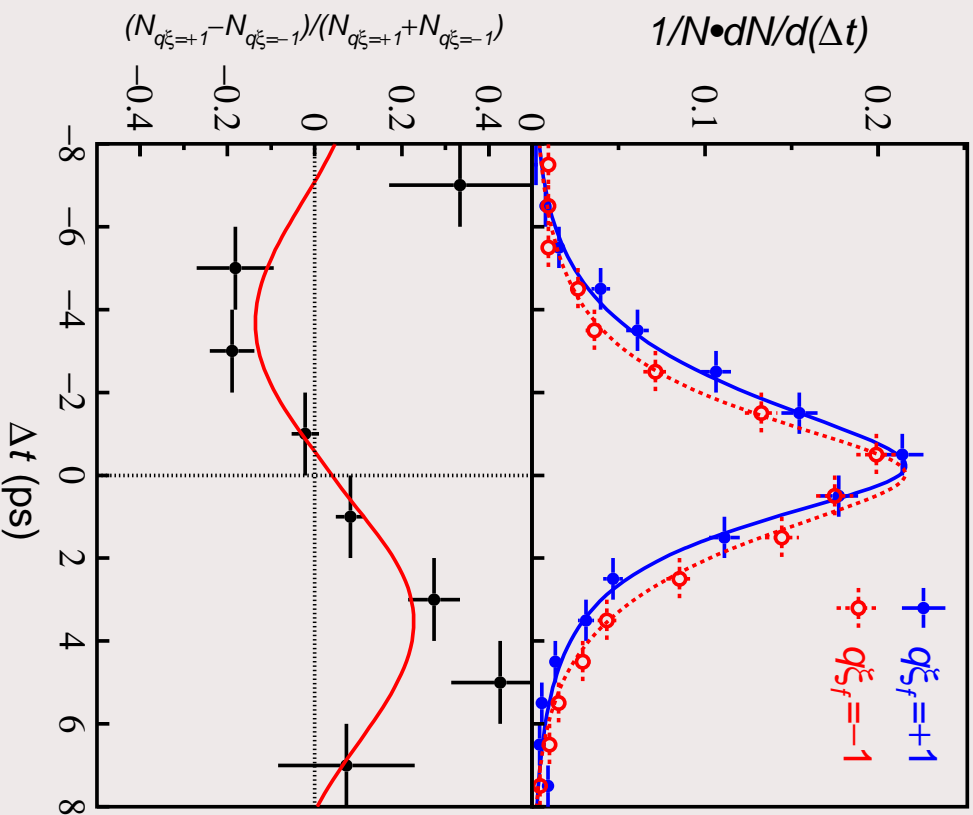
Zvezo med $(1 - 2w)$ in r kalibriramo s podatki: merimo mešalno amplitudo $B^0 \bar{B}^0$ (v kanalih $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \ell^- \nu$, $D^{(*)+} \pi^-$ in $D^{(*)+} \rho^-$) v 6 intervalih v r

$$(OF-SF)/(OF+SF)$$





Rezultat s celotno nabrano statistiko (78 fb⁻¹, 85M B \bar{B})



CP je kršen! Rdeče točke se razlikujejo od modrih.

Rdeče točke: $B^0 \rightarrow f_{CP=-1}$ (or $B^0 \rightarrow f_{CP=+1}$)

Modre točke: $B^0 \rightarrow f_{CP=-1}$ (or $\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP=+1}$)

Rezultat prilagajanja s fisknim $A_{ccs} = 0$:

$$-S_{ccs} = \sin 2\phi_1 = 0.719 \pm 0.074 \pm 0.035$$

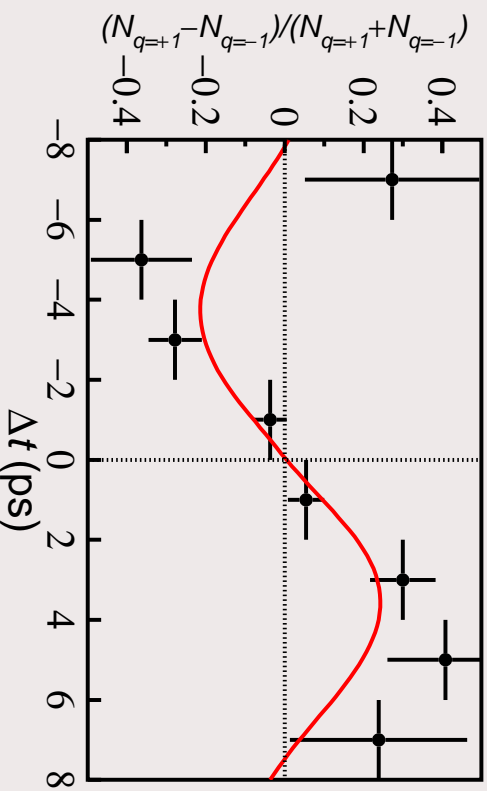
s prostima A_{ccs} in S_{ccs} :

$$|A_{ccs}| = 0.950 \pm 0.046 \pm 0.026$$

A_{ccs} je konsistenten z 0

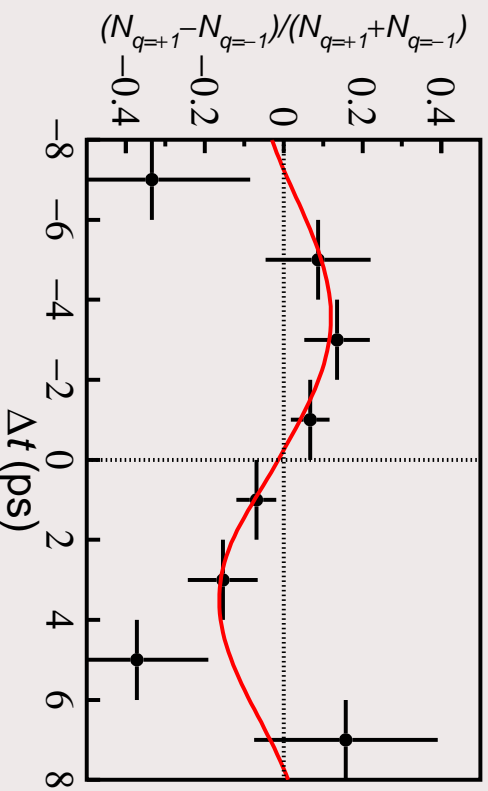


Primerjava med $CP = +1$ in $CP = -1$



$CP = -1$ vzorec

$$\sin 2\phi_1 = 0.716 \pm 0.083$$



$CP = +1$ vzorec

$$\sin 2\phi_1 = 0.78 \pm 0.17$$

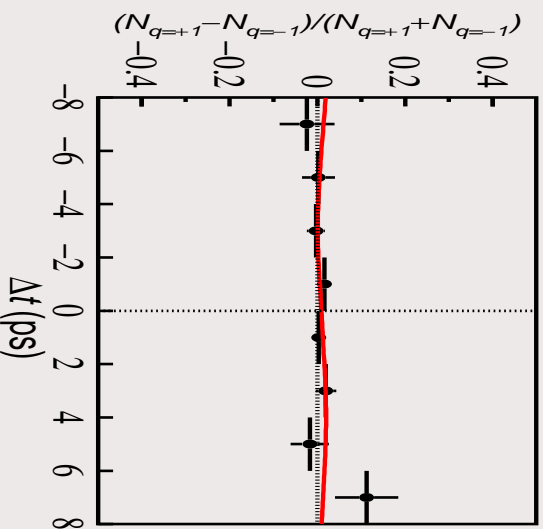
Pozor: amplituda $\pm \sin 2\phi_1 \sin \Delta m_d \Delta t$ je zmanjšana zaradi napačeno označenih dogodkov za faktor $(1 - 2w)$.

Preverjanja, sistematske napake



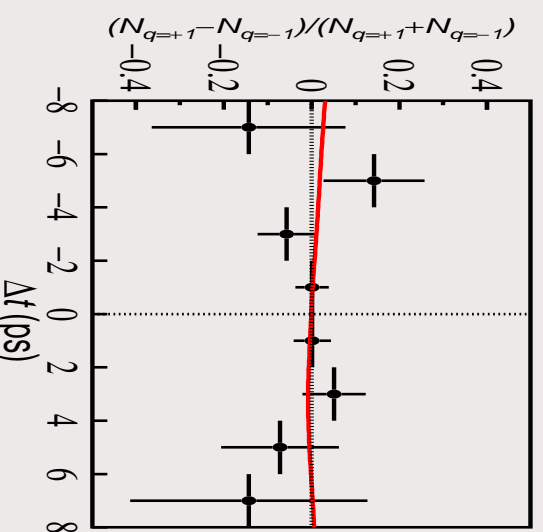
Enaka analiza za okusno specifična končna stanja, kjer ne sme biti asimetrije

$$B^0 \rightarrow D^{*\pm} \pi^\mp$$



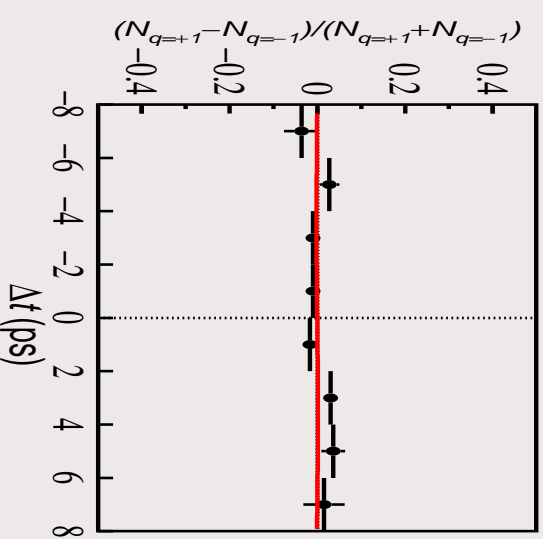
$$“\sin 2\phi_1” = 0.035 \pm 0.032$$

$$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}, K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$$



$$“\sin 2\phi_1” = -0.021 \pm 0.093$$

$$B^0 \rightarrow D^{*} \ell \nu$$

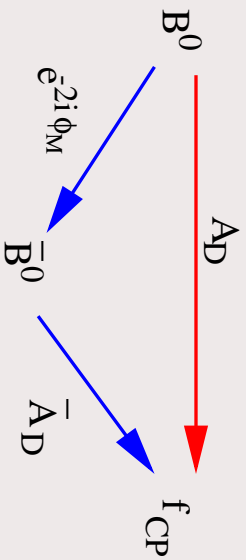


$$“\sin 2\phi_1” = 0.004 \pm 0.017$$

Sistematske napake:

meritev verteksa	0.022	resolucijska funkcija	0.014
predsodek v prilagajanju $\sin 2\phi_1$	0.011	delež ozadja v $J/\psi K_L$	0.010
Δm_d	< 0.010	τ_B	< 0.010

Kršitev CP pri prehodu $b \rightarrow u\bar{u}d$



Razpadna amplituda A_D je vsota drevesnega diagrama (s ϕ_2) in pingvinskega diagrama (s ϕ_1)



$$A_D =$$

$$\frac{\bar{b}}{b} \frac{\bar{u}}{u} \frac{d}{d}$$

+

$$\frac{\bar{b}}{b} \frac{\bar{u}}{u} \frac{d}{d}$$

$$S_{\pi\pi} \sin \Delta m_d \Delta t + A_{\pi\pi} \cos \Delta m_d \Delta t$$

with

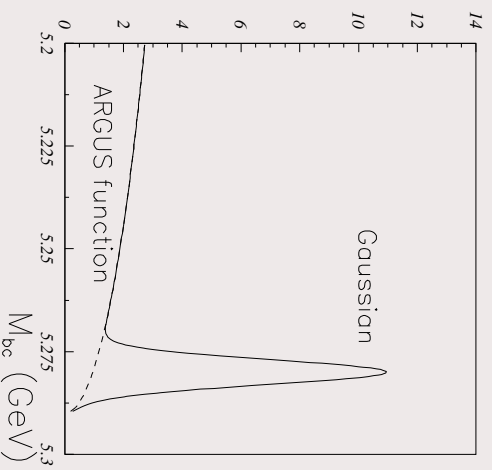
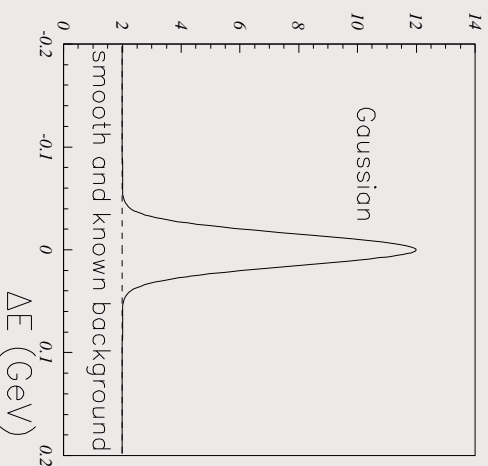
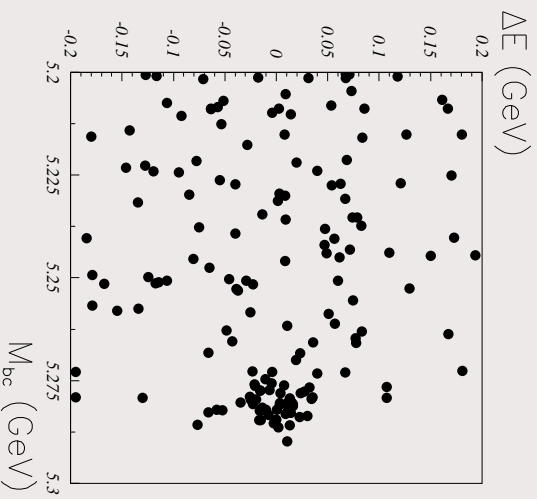
$$S_{\pi\pi} \neq \sin 2\phi_2$$

$$A_{\pi\pi} \neq 0$$

$\rightarrow |\lambda_{\pi\pi}| \neq 1$ in $\Gamma(B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-) \neq \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$ (direktna CP kršitev)



Metoda za rekonstrukcijo razpadov mezonov B



Dve količini v težiščnem sistemu:

$$\blacklozenge \Delta E = E(B_{\text{candidate}}) - E_{\text{beam}}$$

$$\blacklozenge M_{bc} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - p_{B_{\text{candidate}}}^2}$$



Rekonstrukcija $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$

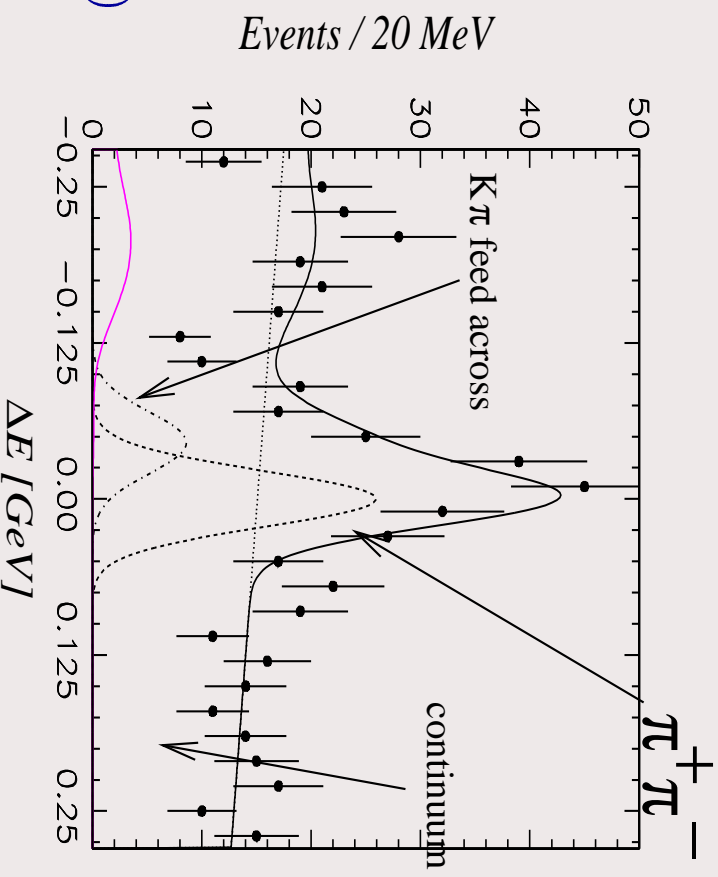


Signalno območje:

- ◆ $5.271\text{GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.287\text{GeV}/c^2$
- ◆ $|\Delta E| < 0.067\text{ GeV}$

$$N(\pi\pi) = 73.5 \pm 13.8 \text{ dogodkov}$$

(28.4 ± 12.5 $K\pi$, napačno identificirani)

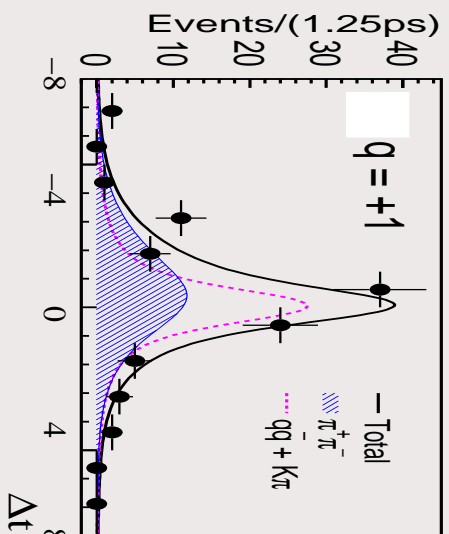


porazdelitev po ΔE po rezu na M_{bc}

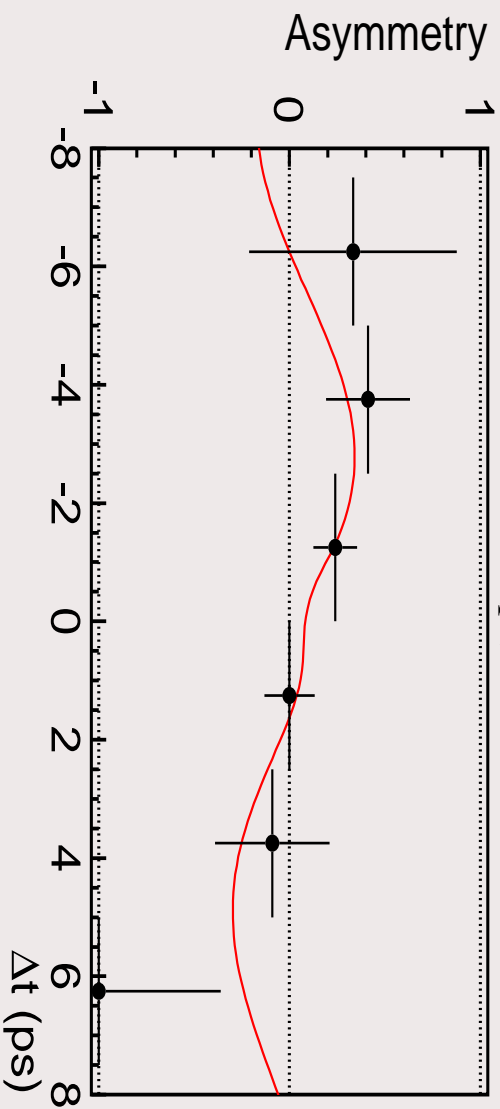
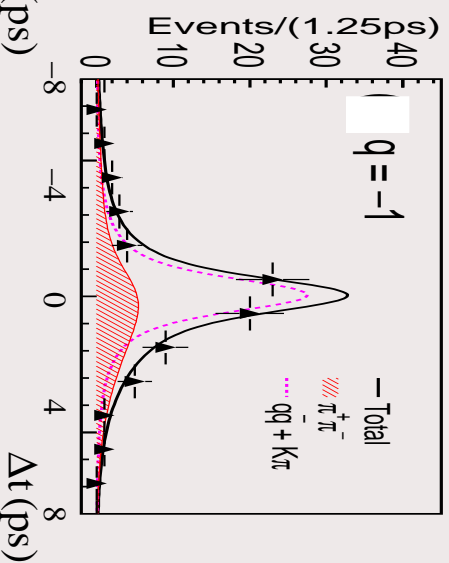
Porazdelitev po Δt za $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$



$\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$



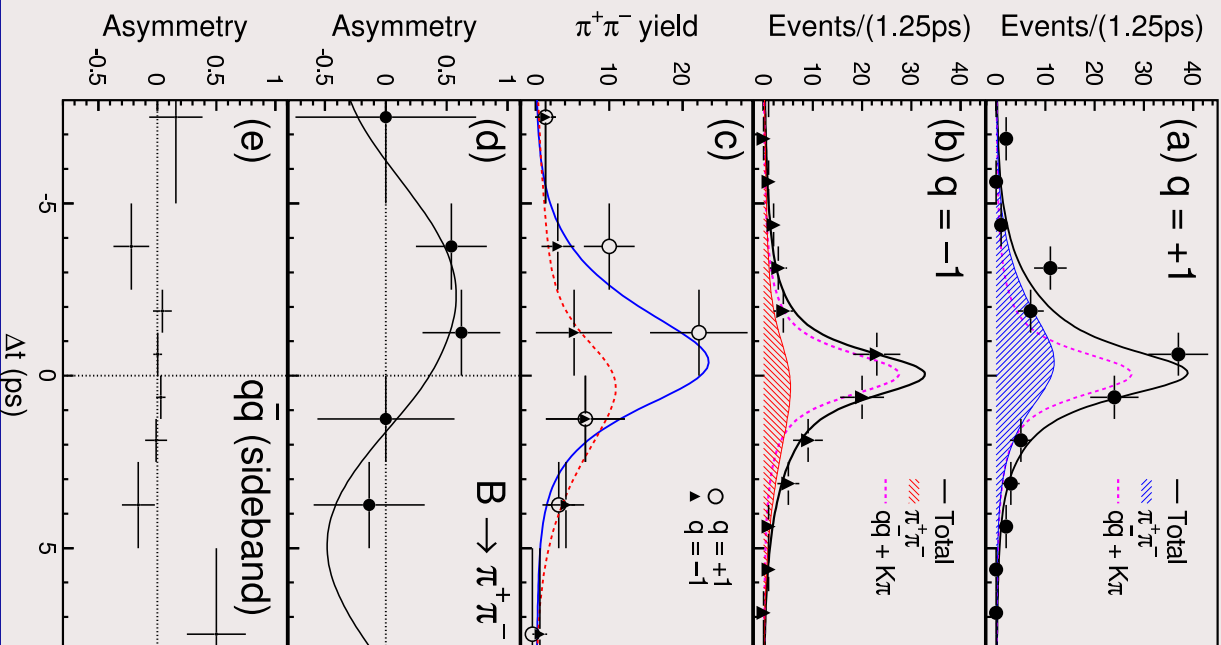
$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$



Asimetrija



Kršitev CP : $S_{\pi\pi}$ in $A_{\pi\pi}$



$$S_{\pi\pi} = -1.21^{+0.38+0.16}_{-0.27-0.13}$$

$$A_{\pi\pi} = +0.94^{+0.25}_{-0.31} \pm 0.09$$

$A_{\pi\pi} \neq 0 \rightarrow$ direktna kršitev CP ,
 $\Gamma(B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-) \neq \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$

$$A_{\pi\pi} > 0 \text{ z } 99.6\% \text{ CL.}$$

$$S_{\pi\pi} < 0 \text{ z } 99.6\% \text{ CL.}$$

(vzorec podatkov 41.8 fb^{-1})

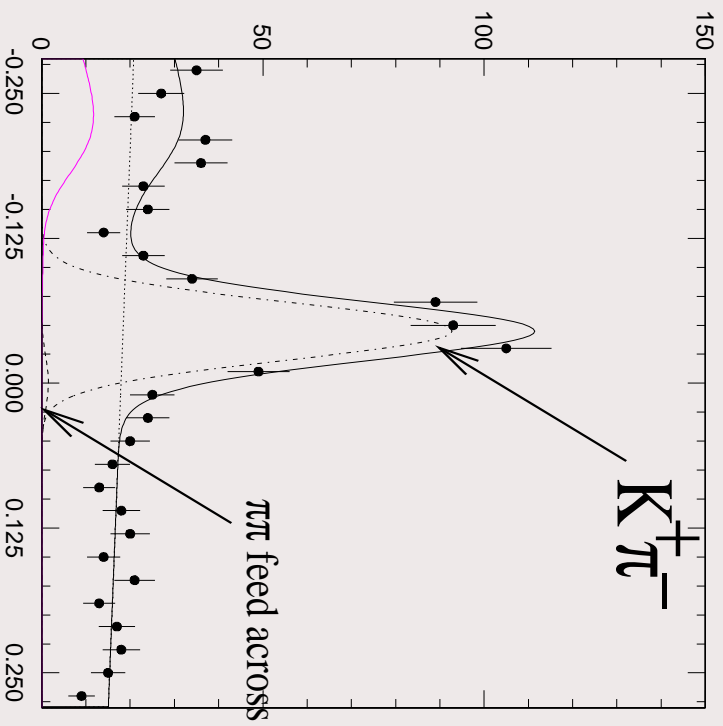


Test: $B^0 \rightarrow K^- \pi^+$

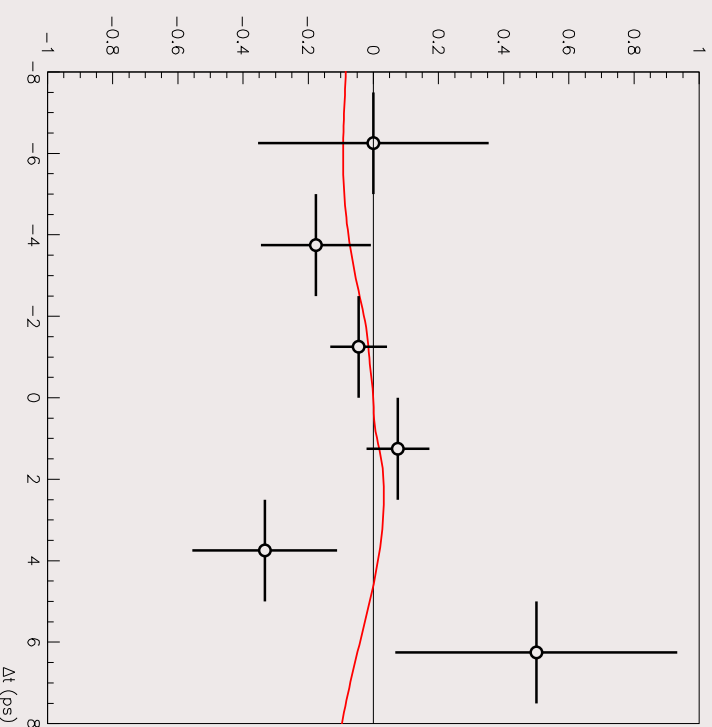


V tem kanalu ne pričakujemo asimetrije, zato ga uporabimo kot test metode.

$$N(K\pi) = 289.5 \pm 21.5$$



Izmerjena asimetrija



konzistentna z ničelno asimetrijó

$$S_{K\pi} = 0.15 \pm 0.24$$

$$A_{K\pi} = 0.07 \pm 0.17$$



Zaključek



- ◆ Spektrometer Belle ob trkalniku KEKB je nabral 89.6 fb^{-1} podatkov (oziroma 85 milijonov razpadov parov $B\bar{B}$)

- ◆ Izmerili smo parametre asimetrije zaradi kršitve CP

$$S_{ccs} = 0.719 \pm 0.074 \pm 0.035, \quad |\lambda_{ccs}| = 0.950 \pm 0.046 \pm 0.026$$

$$S_{\pi\pi} = -1.21_{-0.27}^{+0.38+0.16}, \quad A_{\pi\pi} = +0.94_{-0.31}^{+0.25} \pm 0.09 \text{ (na polovični statistiki)}$$

- ◆ Imamo precej novih načrtov!





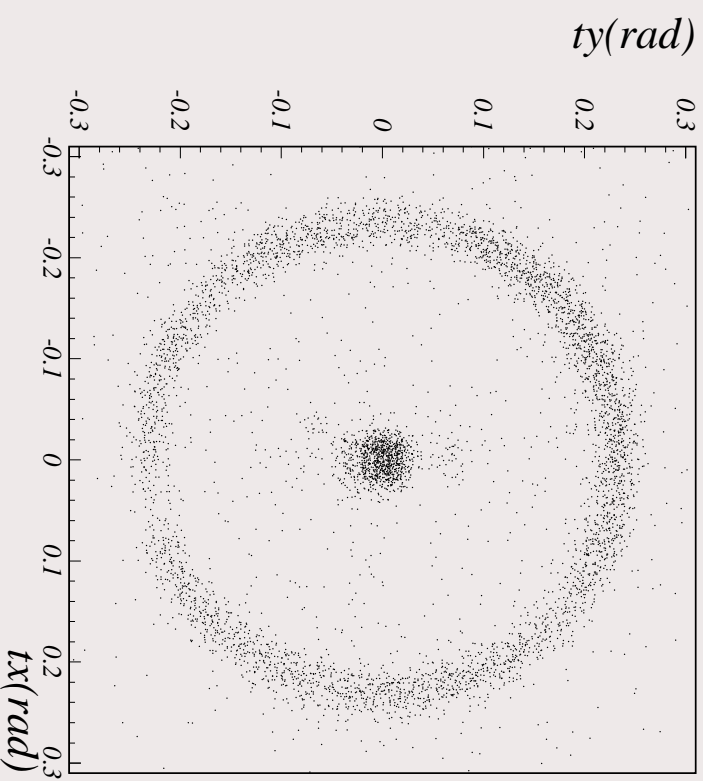
Izboljšave detektorja



Nadgradnja silicijevega mikropasovnega detektorja verteksov



Študij nove metode za identifikacijo nabitih delcev - seveda nov tip Čerenkovovega detektorja z aerogelom kot sevalcem



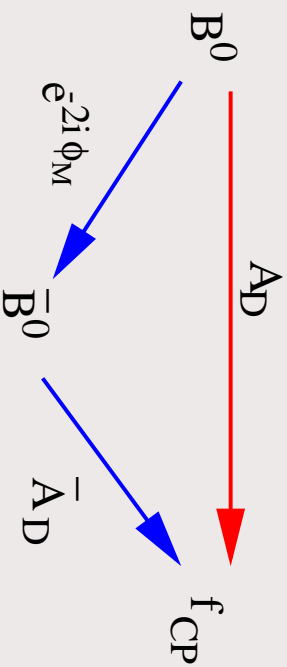
Čerenkovi obroči za pione ($p=3 \text{ GeV}/c$)



Kršitev simetrije CP pri mezonih B



Kršitev simetrije CP pri mezonih B : potencialno velik efekt zaradi interference amplitud za direktni razpad v končno stanje f_{CP} z določeno vrednostjo parnosti CP in razpad po mešanju.



To povzroči asimetrijo v verjetnosti za razpad:

$$A_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}$$

$$= A_f \cos \Delta m_d t + S_f \sin \Delta m_d t$$

Napovedi Standardnega Modela

	$b \rightarrow c\bar{c}s$	$b \rightarrow c\bar{c}d$	$b \rightarrow s\bar{s}s$	$b \rightarrow u\bar{u}d$
example	$J/\psi K_S$	$J/\psi \pi^0$	ϕK_S	$\pi^+ \pi^-$
A_f	0	0	small	$\neq 0$
S_f	$\sin 2\phi_1$	$\sin 2\phi_1$	$\sin 2\phi_1$	" $\sin 2\phi_2$ "

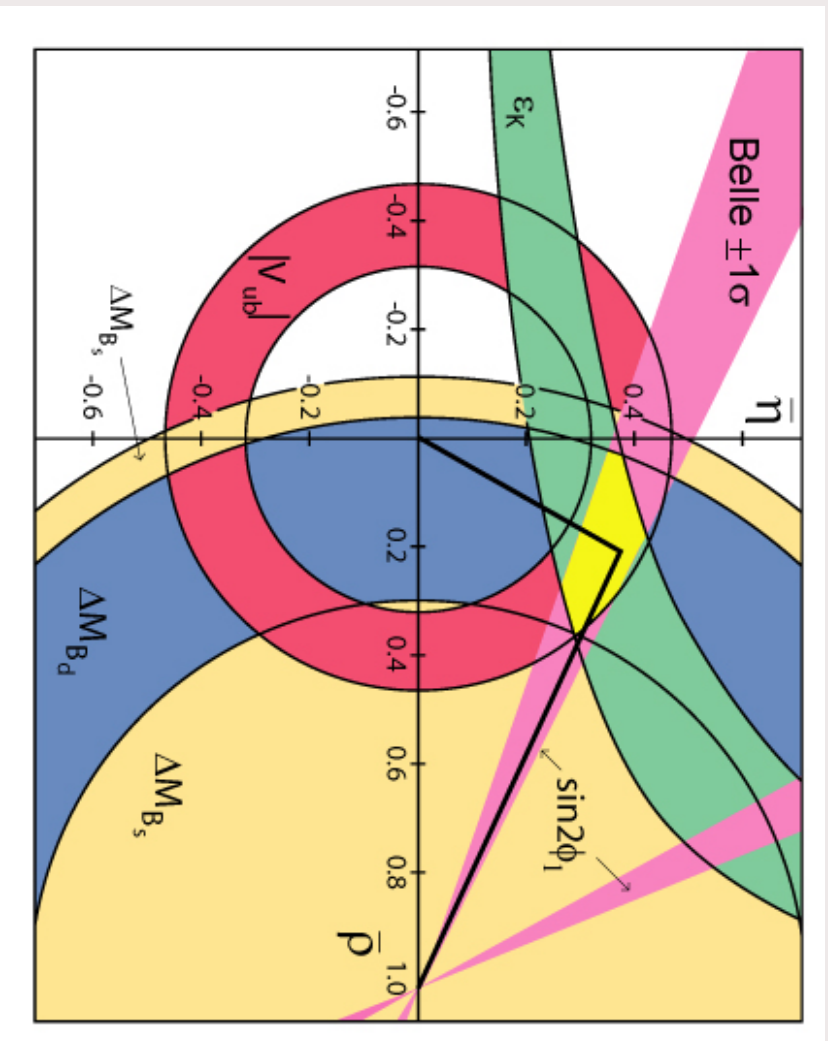
Pozor! $A_f \neq 0 \rightarrow \Gamma(\bar{B} \rightarrow f_{CP}) \neq \Gamma(B \rightarrow f_{CP})$

\rightarrow direktna CP kršitev CP

$$A_f = \frac{|\lambda_f^2| - 1}{|\lambda_f^2| + 1}$$

$$S_f = \frac{2Im(\lambda_f)}{|\lambda_f^2| + 1}$$

$$\lambda_f \equiv e^{-2i\phi_M} \frac{A_D(\bar{B} \rightarrow f_{CP})}{A_D(B \rightarrow f_{CP})}$$



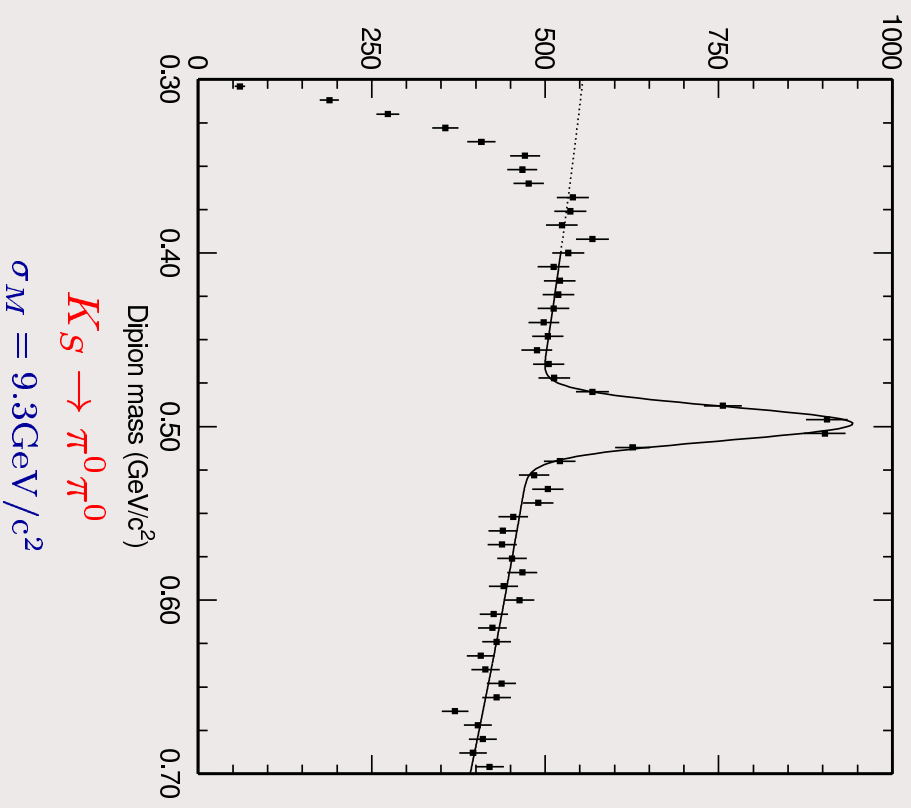
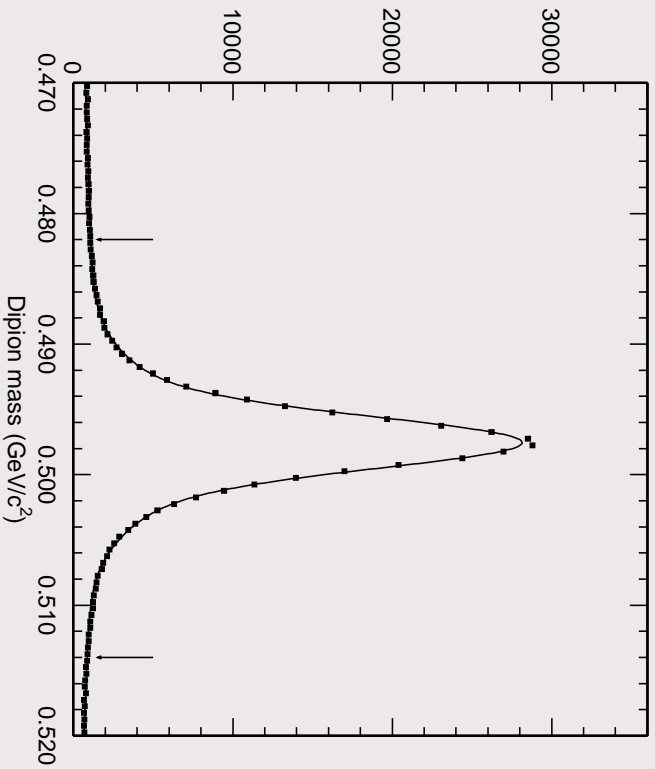
- ◆ Trikotnik: kot ga določajo druge meritve
- ◆ Belle: pričujoča meritev $\sin 2\phi_1$



Rekonstrukcija $B^0 \rightarrow (c\bar{c})K_S$



$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$$
$$\sigma_M = 4.1 \text{ GeV}/c^2$$



$$K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$$
$$\sigma_M = 9.3 \text{ GeV}/c^2$$