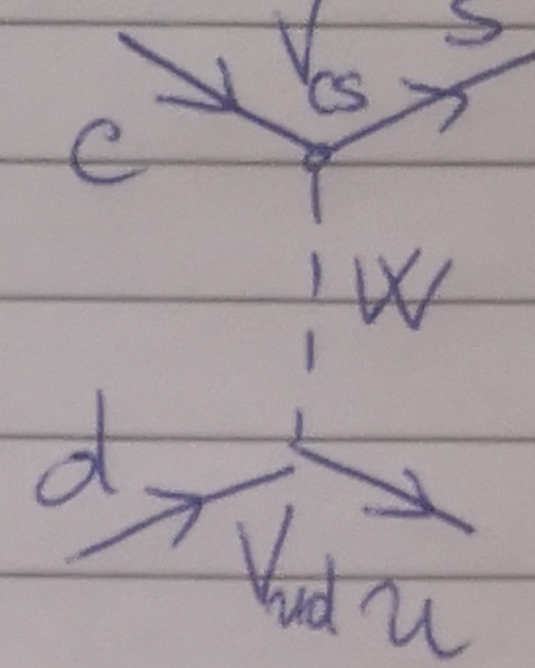
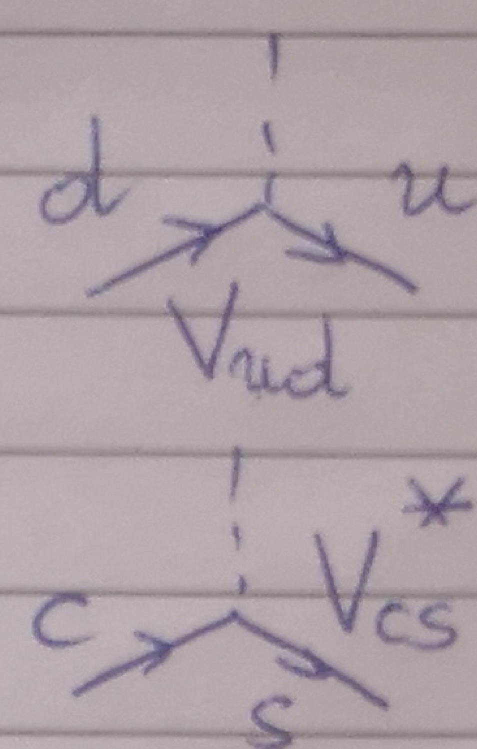
$K^0_L \to \pi^+\pi^-$ KRŠITEV OHRANITVE PARNOSTI CP

KRŠITEV CP V STANDARDNEM MODELU



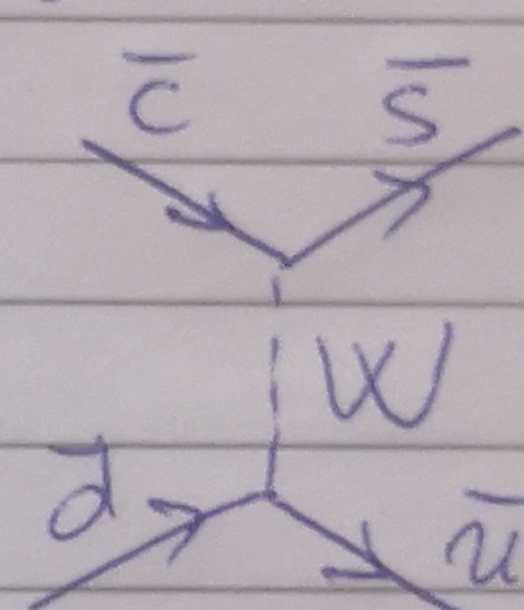
$$\mathcal{M} \propto \left[\bar{u}_u \gamma^\mu (1-\gamma^5) u_d\right] \cdot V_{ud}\, V_{cs}^* \left[\bar{u}_s \gamma_\mu (1-\gamma^5) u_c\right]$$



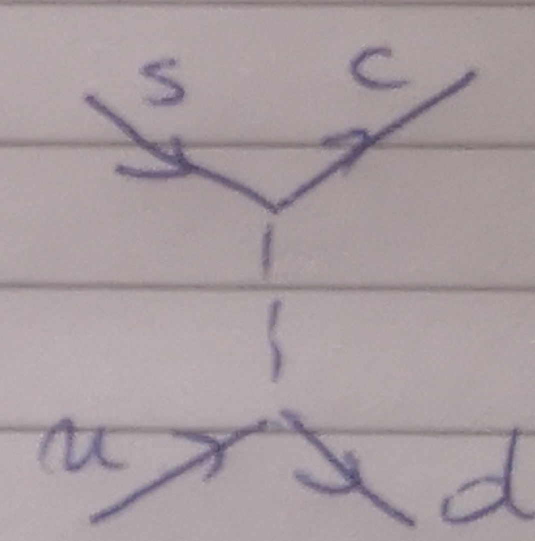
$-\frac{1}{3} \to +\frac{2}{3}$

$+\frac{2}{3} \to -\frac{1}{3}$

ČE ZAMENJAM DELCE Z ANTIDELCI



$\equiv$



$$\mathcal{M}' \propto \left[\bar{u}_d \gamma^\mu (1-\gamma^5) u_u\right] \cdot V_{ud}^*\, V_{cs} \cdot \left[\bar{u}_c \gamma_\mu (1-\gamma^5) u_s\right]$$

$\mathcal{M} \propto V_{ud} V_{cs}^*$ $\qquad$ $\mathcal{M}' \propto V_{ud}^* V_{cs}$

ČE CKM REALNA MATRIKA – AMPLITUDA ZA PROCES Z DELCI = AMPL. ZA PROCES Z ANTIDELCI $\Rightarrow$ CP <u>NI</u> KRŠENA

EKSPERIMENT: CP <u>JE</u> KRŠENA $\rightarrow$ MATRIKA IMA KOMPLEKSNE MAT. ELEMENTE

PREJŠNJA PREDAVANJA: GOVORILI SMO O MERITVAH VELIKOSTI MATRIČNIH ELEMENTOV

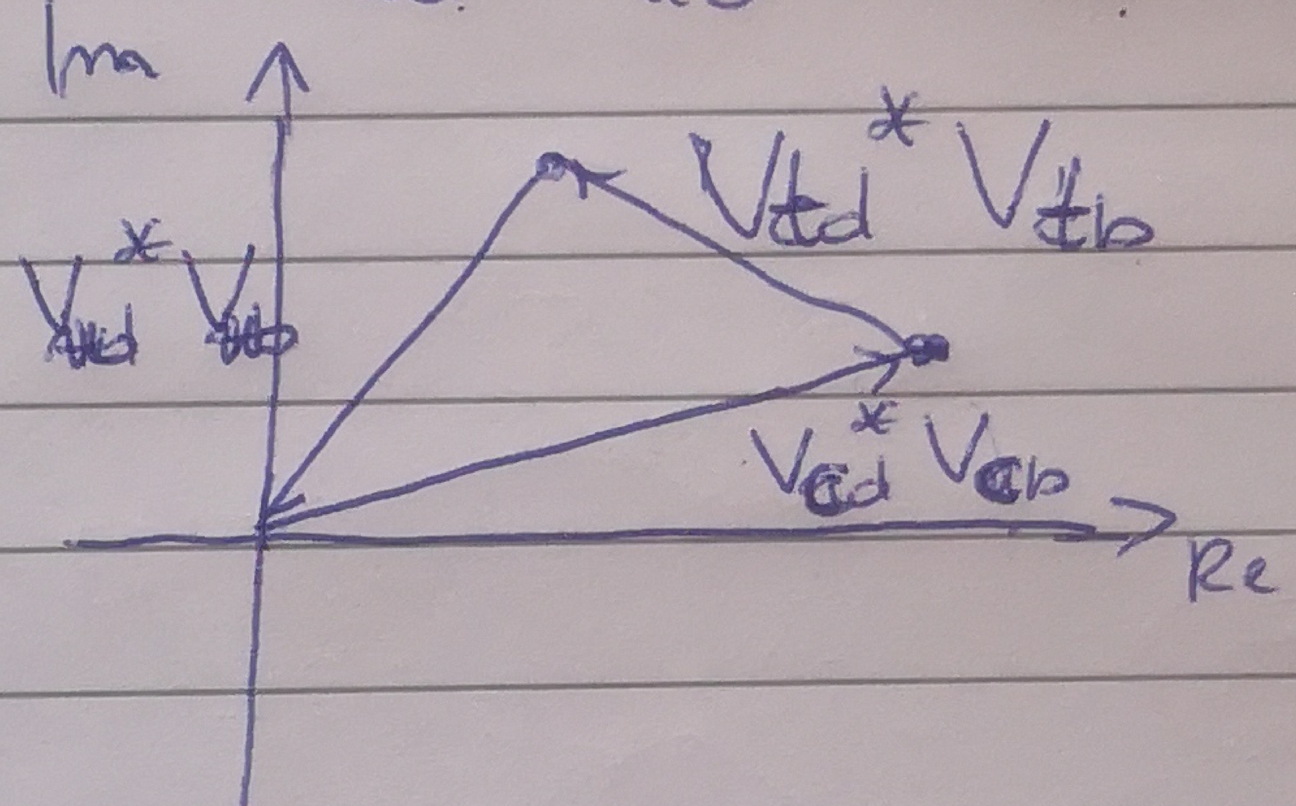
VERJETNOST $\propto |V_{ij}|^2$ ZA PROCES $j \to i$

MATRIKA CKM UNITARNA $V^\dagger V = I$

$$\begin{bmatrix} V_{ud}^* & V_{cd}^* & V_{td}^* \\ V_{us}^* & V_{cs}^* & V_{ts}^* \\ V_{ub}^* & V_{cb}^* & V_{tb}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

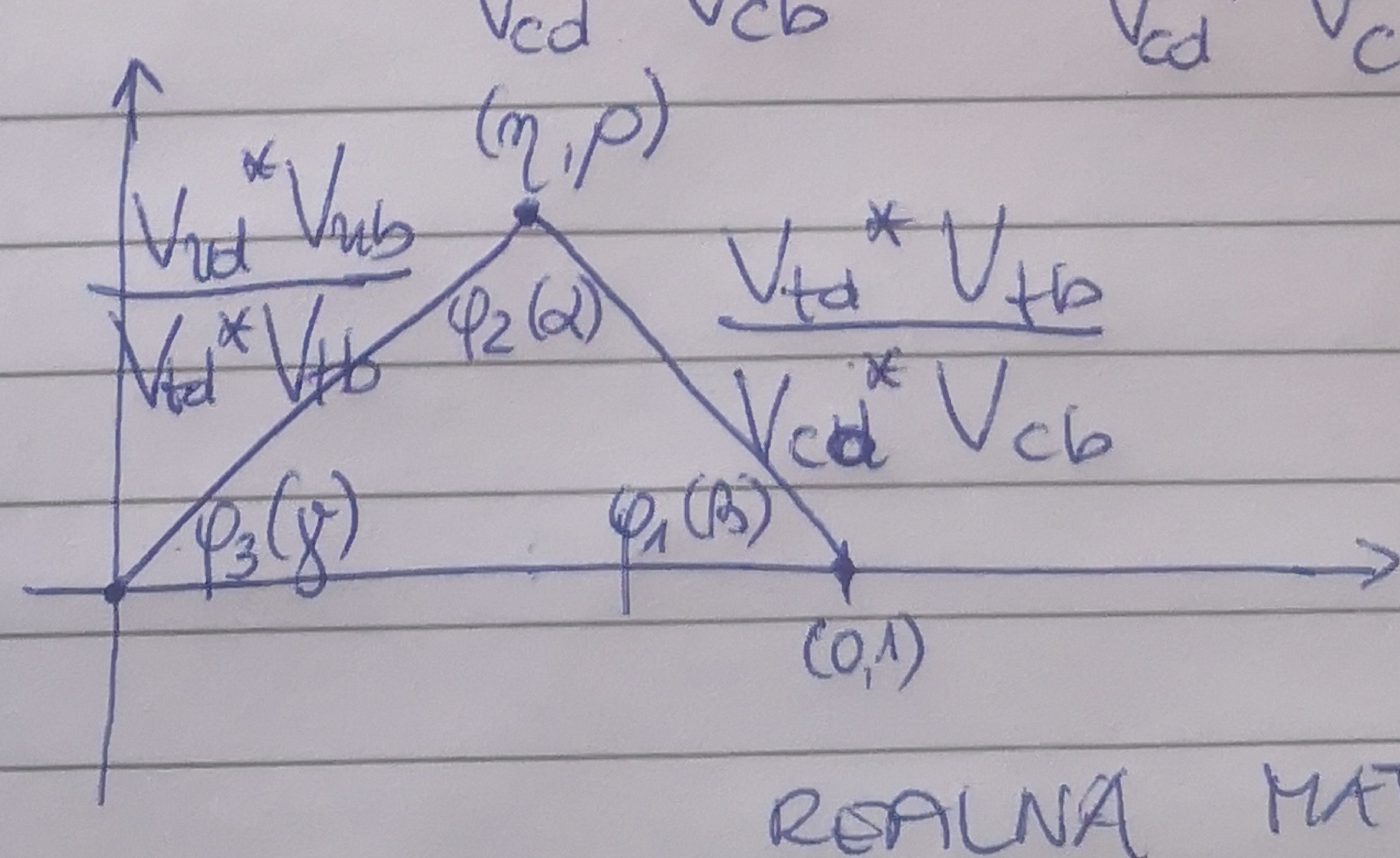
$$V_{ud}^* V_{ud} + V_{cd}^* V_{cd} + V_{td}^* V_{td} = 1$$

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



UNITARNI TRIKOTNIK

$$1 + \frac{V_{td}^* V_{tb}}{V_{cd}^* V_{cb}} + \frac{V_{ud}^* V_{ub}}{V_{cd}^* V_{cb}} = 0 \qquad \Big| : V_{cd}^* V_{cb}$$



REALNA MATRIKA → IZROJEN TRIKOTNIK

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ (α, β, γ) ! ALI 0° ALI 180°

MERITEV KOMPLEKSNIH ELEMENTOV V_{CKM}
$\rightarrow$ MERITEV KOTOV UNITARNEGA TRIKOTNIKA

NAJBOLJŠI PRIMER: MERITEV KRŠITVE SIMETRIJE CP PRI RAZPADIH $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$

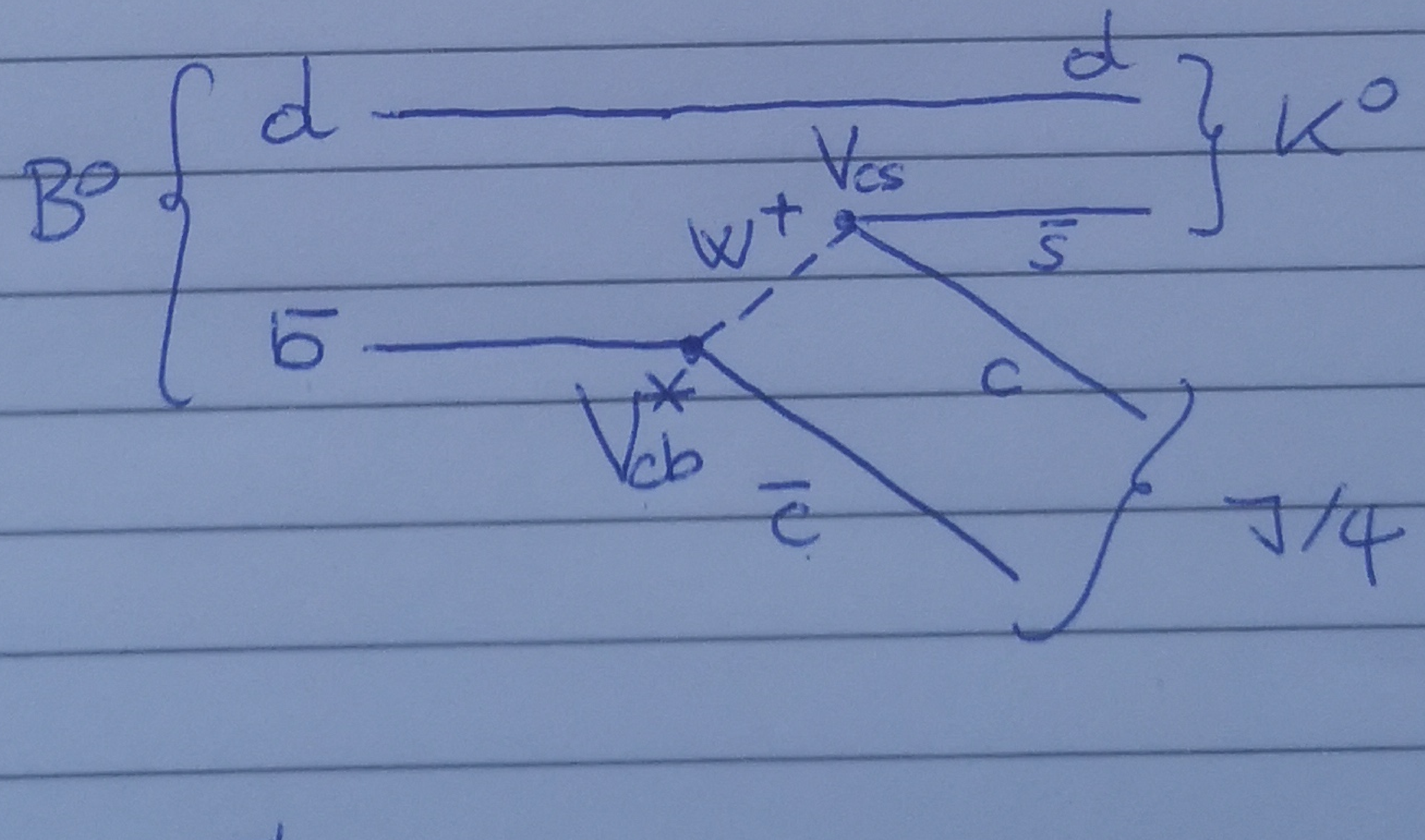
$$B^0 \rightarrow J/\psi\, K_S^0$$
$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$
$$J/\psi \rightarrow e^+ e^-,\ \mu^+ \mu^-$$

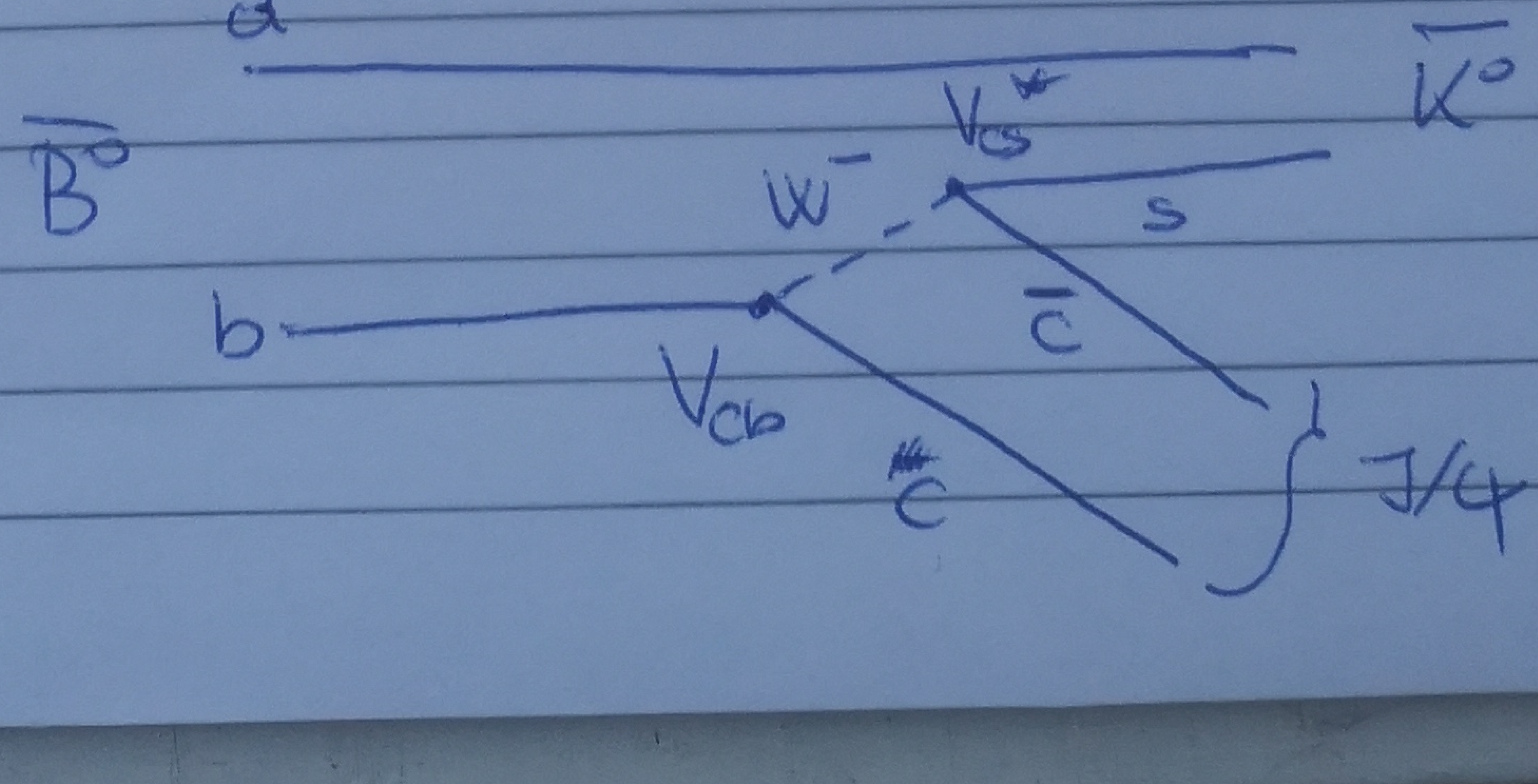
PRIMERJAMO Z RAZPADOM $\bar{B}^0 \rightarrow \underbrace{J/\psi\, K_S^0}_{\text{LASTNO STANJE CP}}$

$B^0 \rightarrow$ } ISTO KONČNO STANJE
$\bar{B}^0 \rightarrow$ } LASTNO STANJE CP

RAZLIKA MED RAZPADI B^0 IN $\bar{B}^0 \rightarrow$
$\rightarrow$ SIMETRIJA CP JE KRŠENA

MERITEV RAZLIKE $\rightarrow$ KOT UNITARNEGA TRIKOTNIKA.





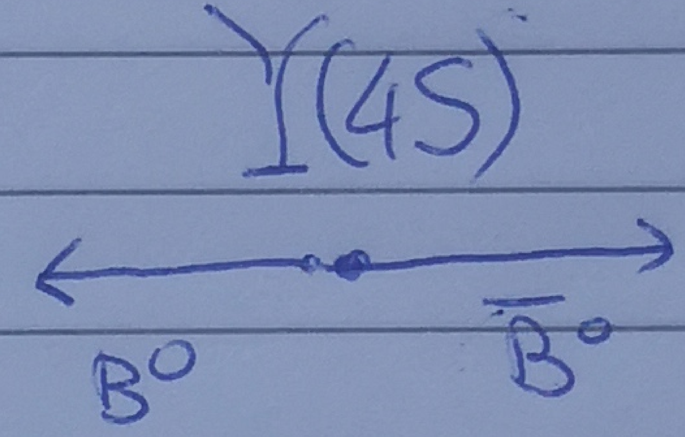
MERITEV RAZLIKE RAZPADOV $B^0 \to J/\psi K_S^0$
IN $\bar{B}^0$ V ISTI KANAL
$\Rightarrow$ KOT φ_1 (β)

KAKO IZVEDEMO TO MERITEV?

1.) NAREDIMO B^0 OZ. $\bar{B}^0$
2.) IZMERIMO RAZPADNE PRODUKTE
$J/\psi \to \mu^+\mu^-$ $\quad K_S^0 \to \pi^+\pi^-$
3.) UGOTOVIMO, ALI JE RAZPADEL B^0 ALI $\bar{B}^0$
4.) IZMERIMO ČAS RAZPADA (= RAZLIKA ČASOV)

$e^+e^- \to \Upsilon(4S)$ VEZANO STANJE $b\bar{b}$
$\hookrightarrow B^+B^-, \; B^0\bar{B}^0$

$\Upsilon(4S)$: VRTILNA KOLIČINA $J=1$, $B^0, \bar{B}^0$: $J=0$
OHRANITEV VRT. KOL. $\Rightarrow$ $l=1$

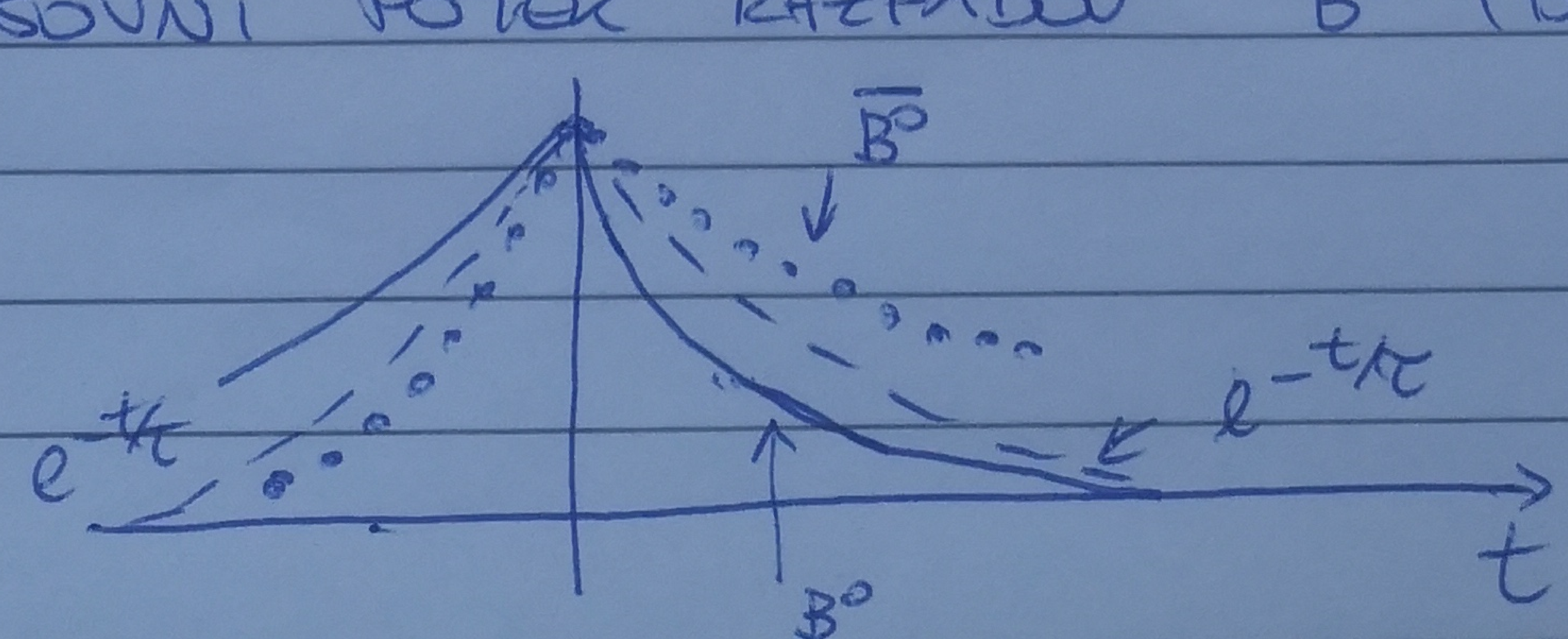


KVANTNO PREPLETENO STANJE

$B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ ČE PROSTA
ČE BI SE EDEN OD OBEH SPREMENIL, RECIMO
$B^0 \to \bar{B}^0$: $(B^0\bar{B}^0) \to (\bar{B}^0\bar{B}^0)$

$(\bar{B}^0\bar{B}^0) \xrightarrow{P} (\bar{B}^0\bar{B}^0)$, KER PA JE $l=1$
$\Rightarrow \psi(\bar{B}^0, \bar{B}^0) \to -\psi(\bar{B}^0, \bar{B}^0)$
TO PA JE PREPOVEDANO, KER STA BOZONA

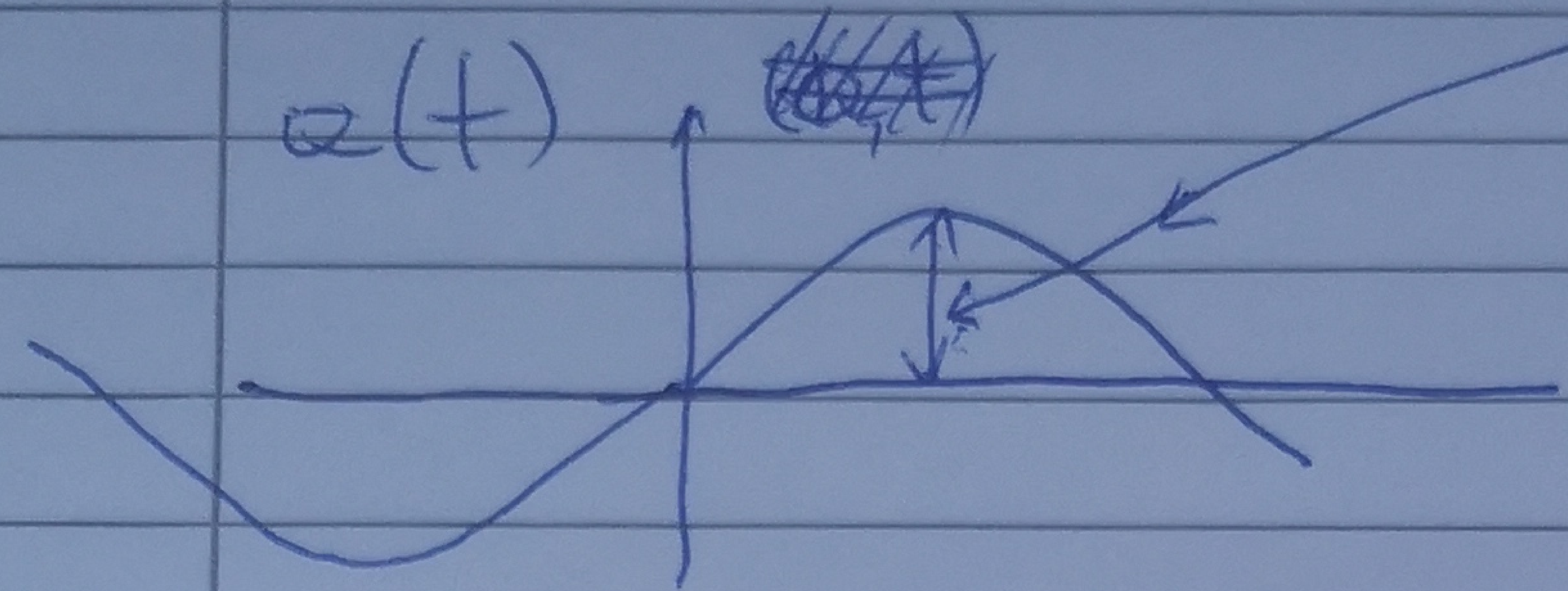
ČASOVNI POTEK RAZPADOV B^0 ($\bar{B}^0$)



$$\frac{N(\bar{B}^0, t) - N(B^0, t)}{N(\bar{B}^0, t) + N(B^0, t)} = a$$

$$a = \frac{N(\bar{B}^0_1,t) - N(B^0_1,t)}{N(\bar{B}^0_1,t) + N(B^0_1,t)} \propto \sin 2\varphi_1 \cdot \sin(\omega t)$$

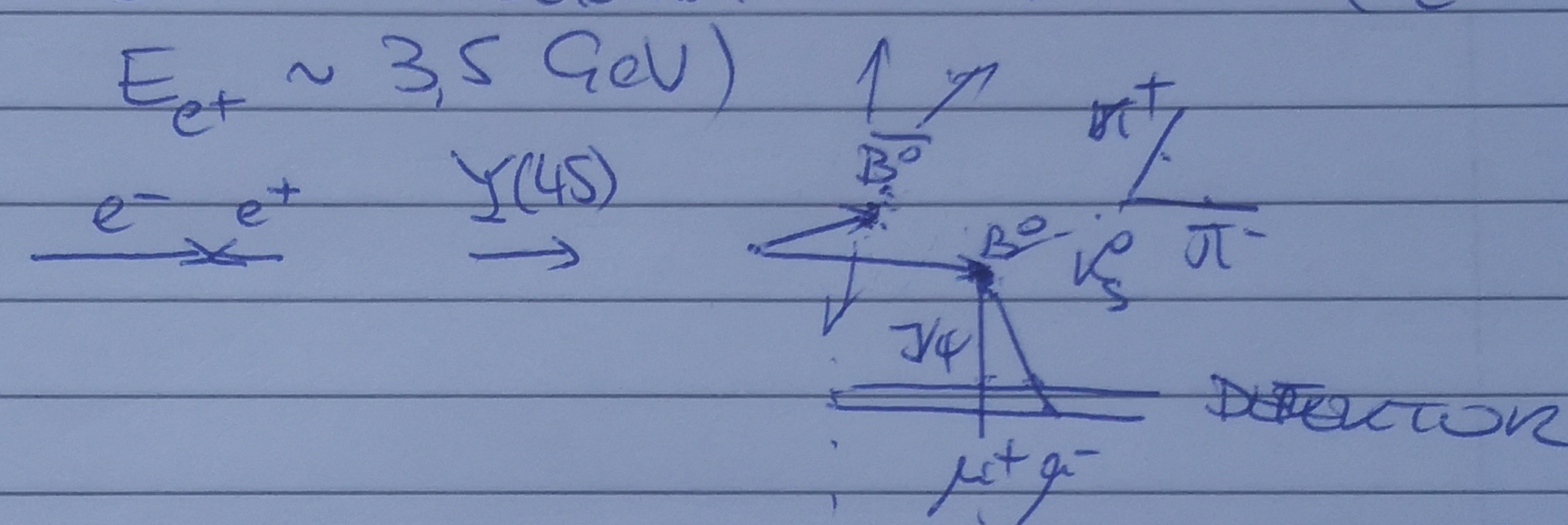
$B^0 \Leftrightarrow \bar{B}^0$



KDAJ STA RAZPADLA? RAZLIKA ~ 1ps

POSPEŠENI DELCI: IZMERIMO KOORDINATO, KJER SO RAZPADLI → POZNAM HITROST → DOLOČIM ČAS

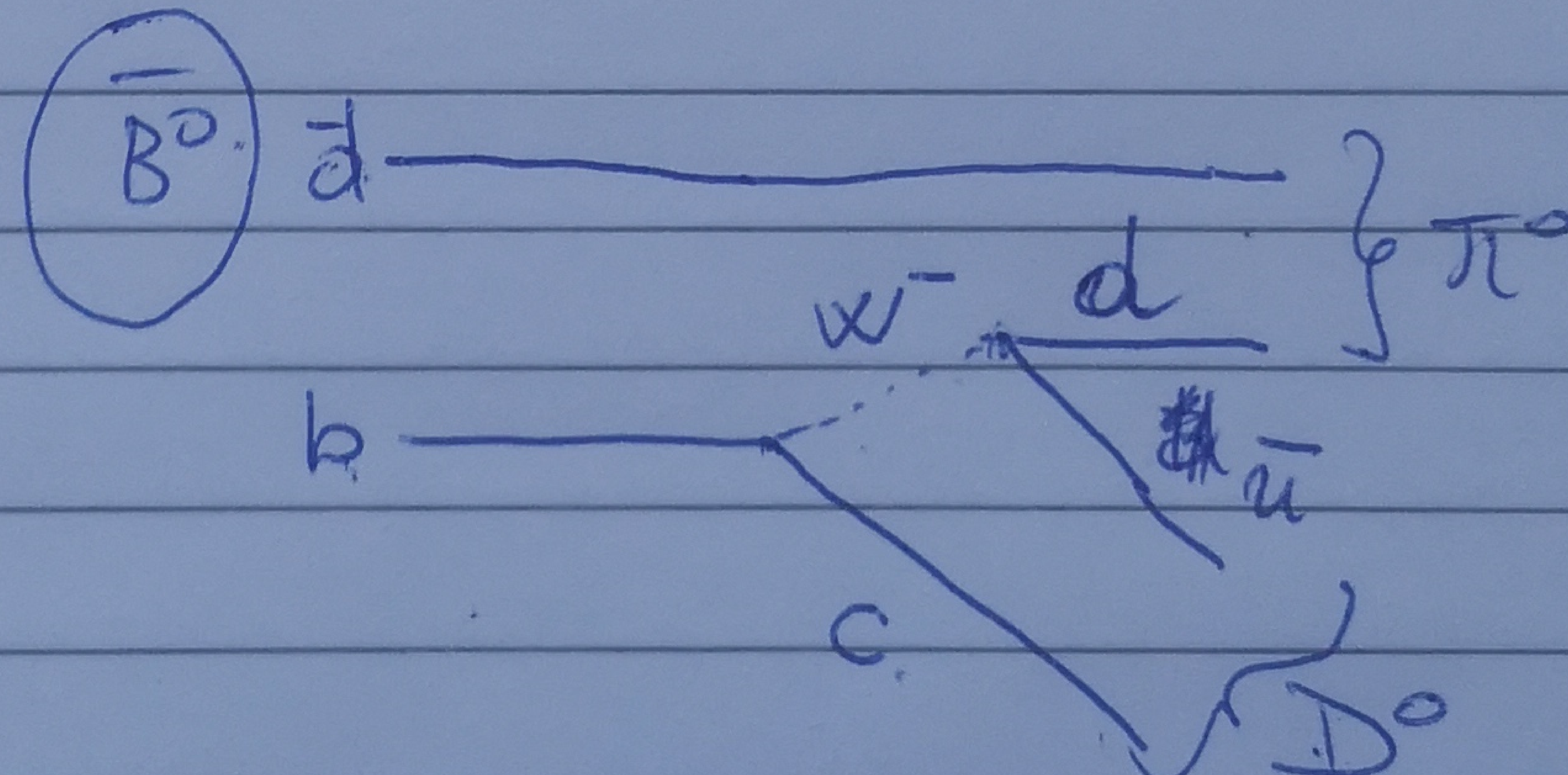
→ e^-e^+ Z RAZLIČNIMI ENERGIJAMI ($E_{e^-} \sim 8$ GeV, $E_{e^+} \sim 3{,}5$ GeV)



KOORDINATO RAZPADA DOLOČIM Z EKSTRAPOLACIJO SLEDI.

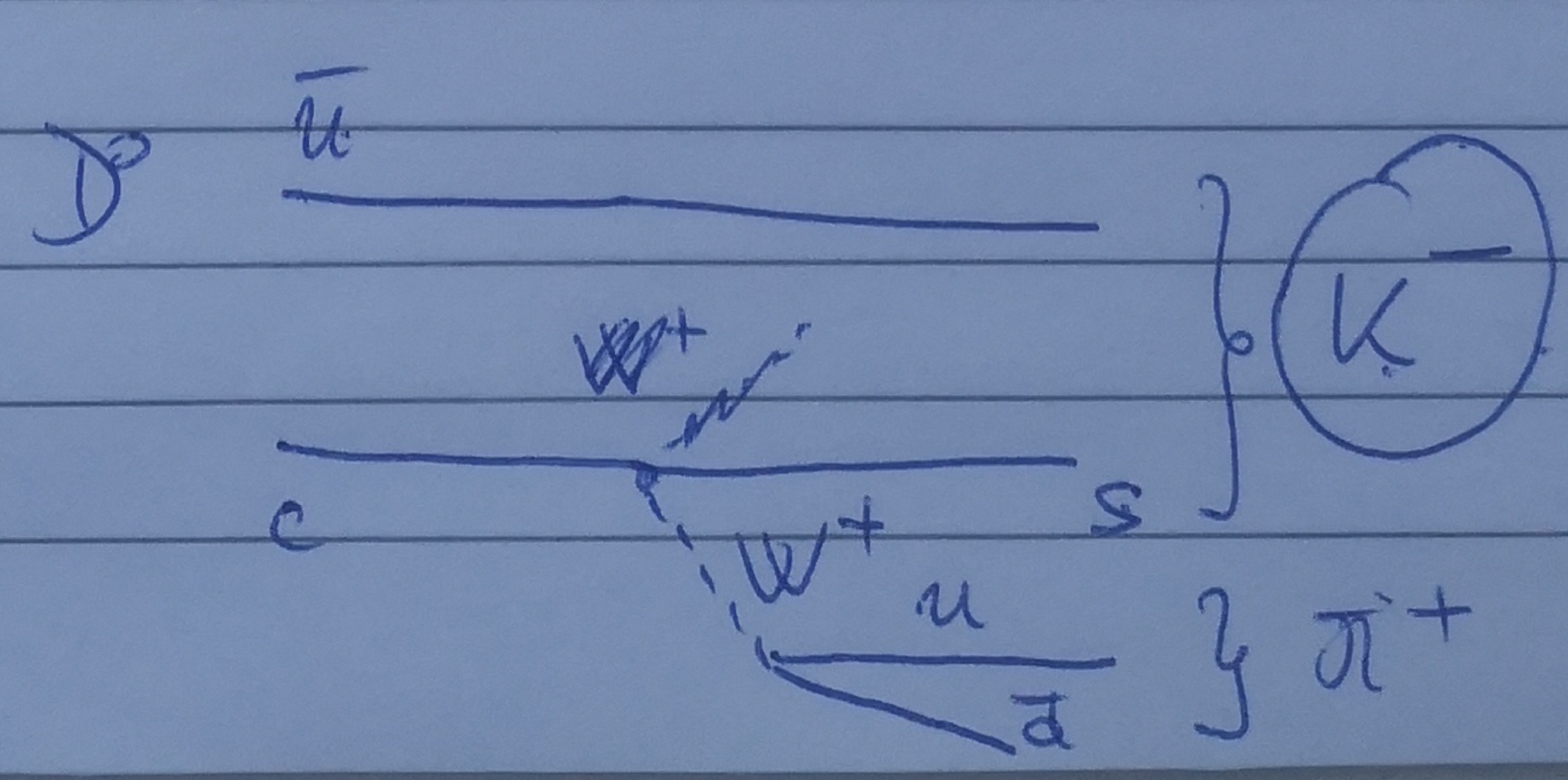
$\Delta z \rightarrow \Delta t$

$\bar{B}^0$ ALI B^0?

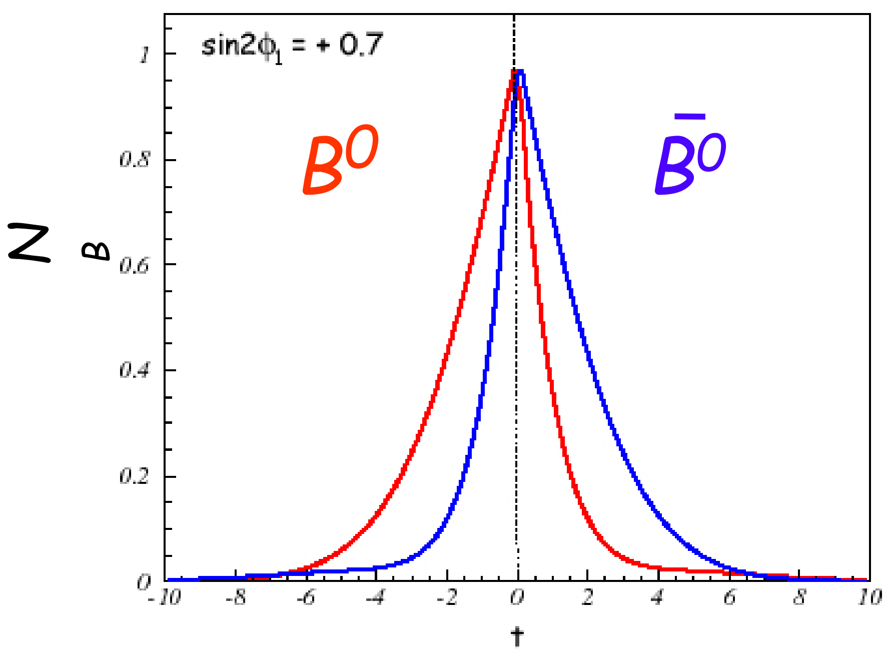


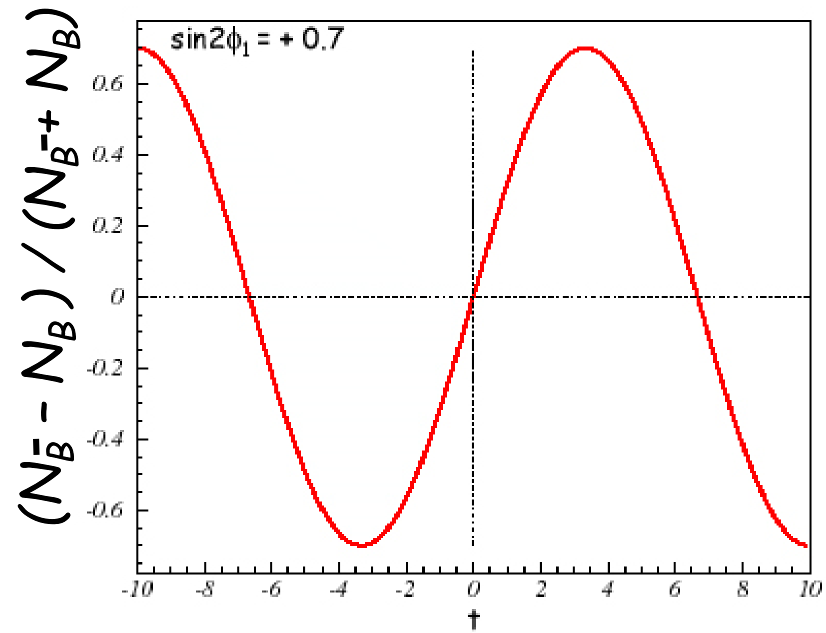
$\bar{B}^0 \to K^- \ldots$

$B^0 \to K^+ \ldots$



Kršitev CP: asimetrija v razpadni verjetnosti





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

$\xi_f = \pm 1$ 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: $e^- e^+ \rightarrow \Upsilon(4s) \rightarrow B^0 \overline{B}^0$

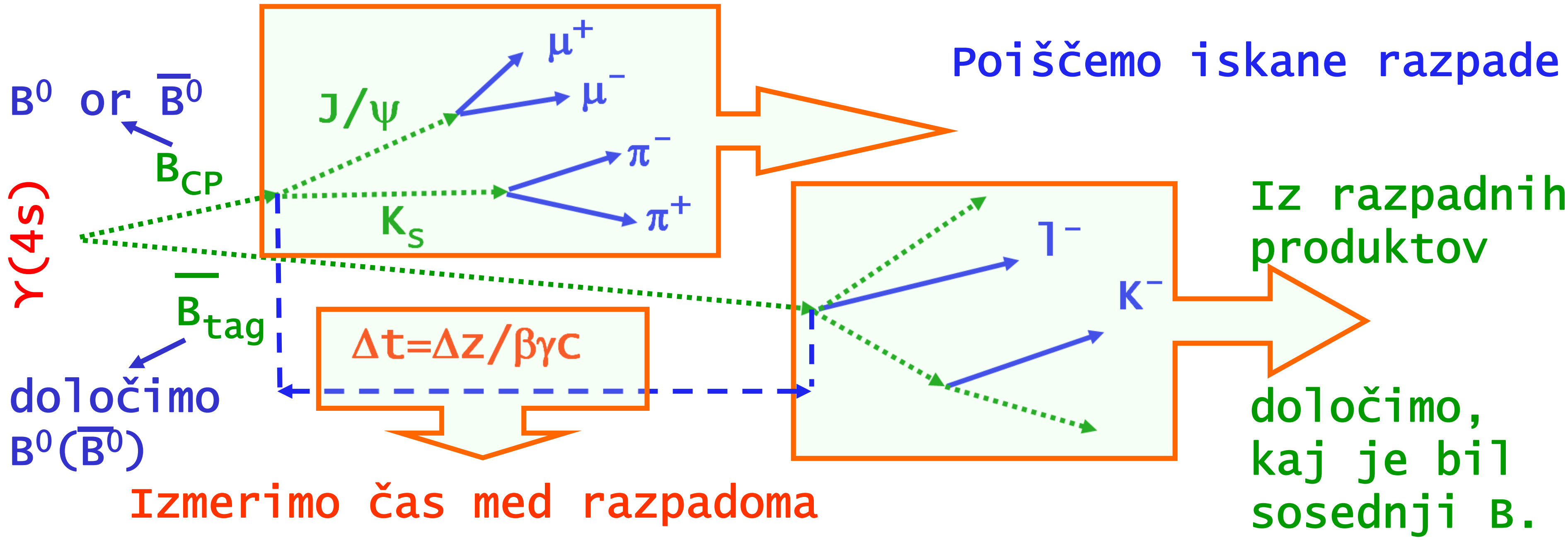
Nato počakamo, da eden od obeh B^0 razpade v stanje, za katero vemo, kakšna je njegova CP parnost (torej kako se obnaša pri simetrijski operaciji CP). Primer takega stanja je razpad

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

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

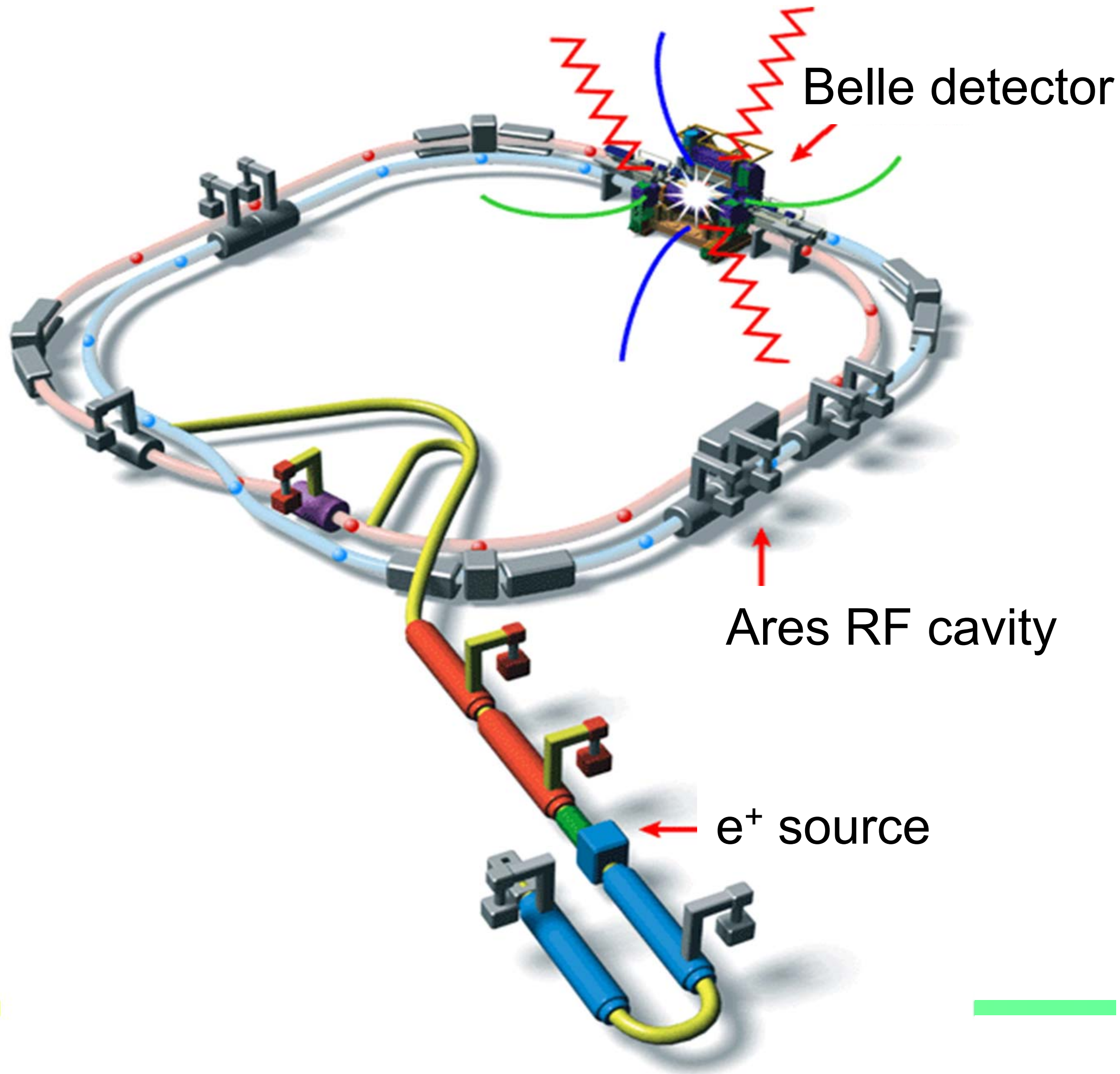
Izmeriti moramo, kje se je to zgodilo, in določiti ali je v $J/\psi\, K_S$ razpadel B^0 ali njegov anti-delec $\overline{B}^0$ (=meritev okusa B).

Kako merimo kršitev CP



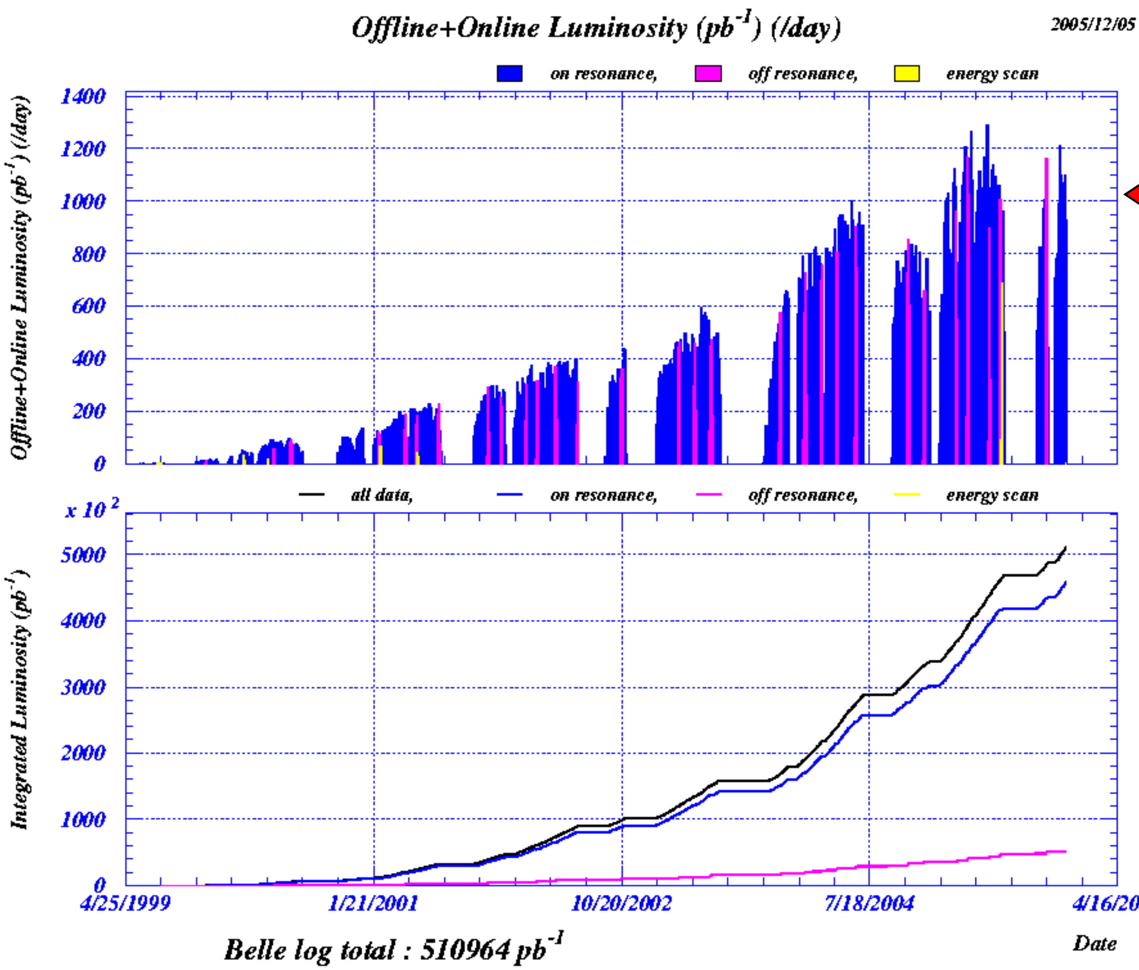
Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi

Trkalnik KEK-B
pospešuje elektrone in pozitrone do trka



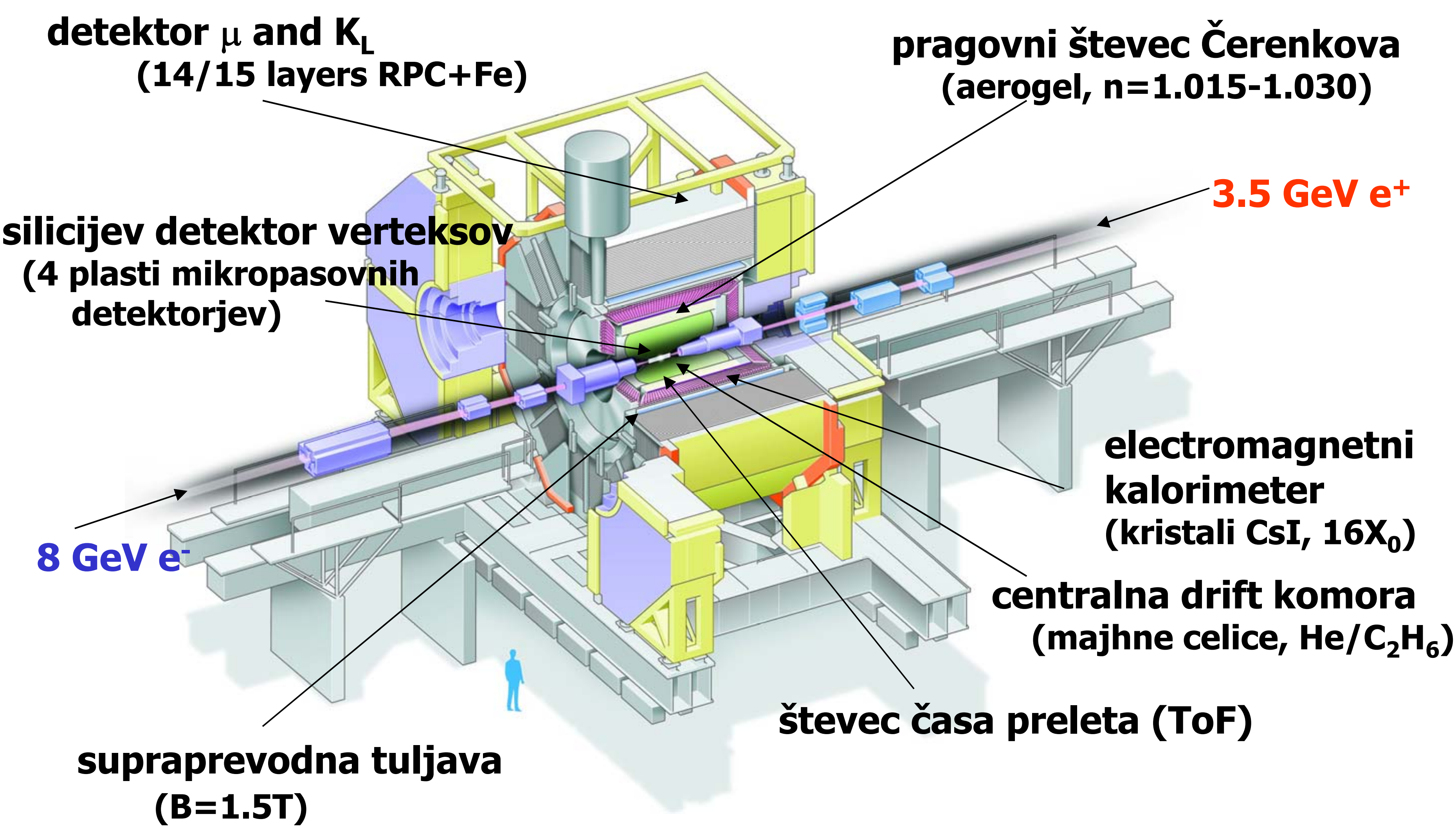
Luminoznosti KEK-B

Zbranih > 700 M parov BB!



1 fb^{-1}/dan

Spektrometer Belle

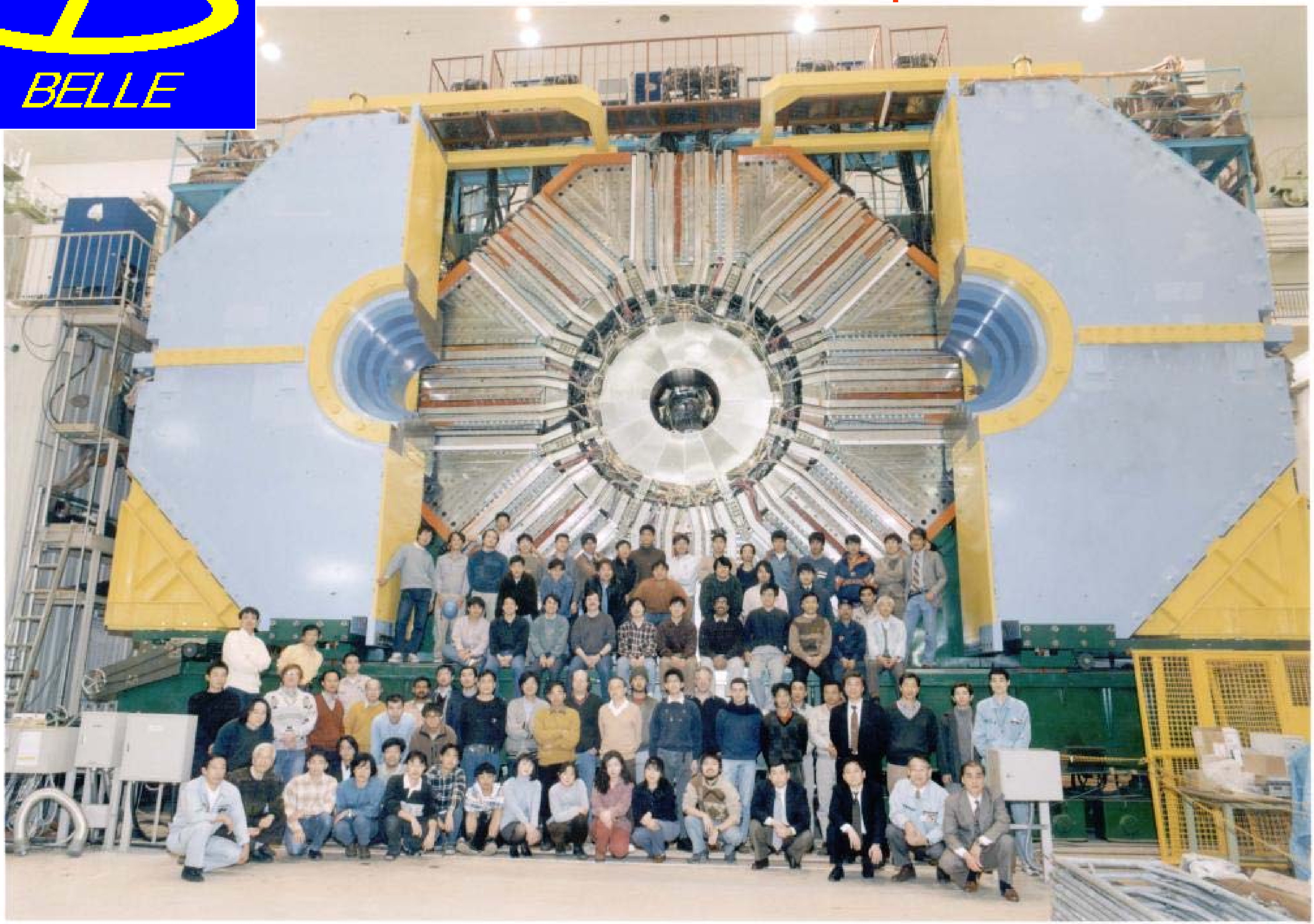


Detektor verteksov

- Eden bistvenih elementov detektorja je detektor verteksa, točke, kjer je mezon B razpadel.

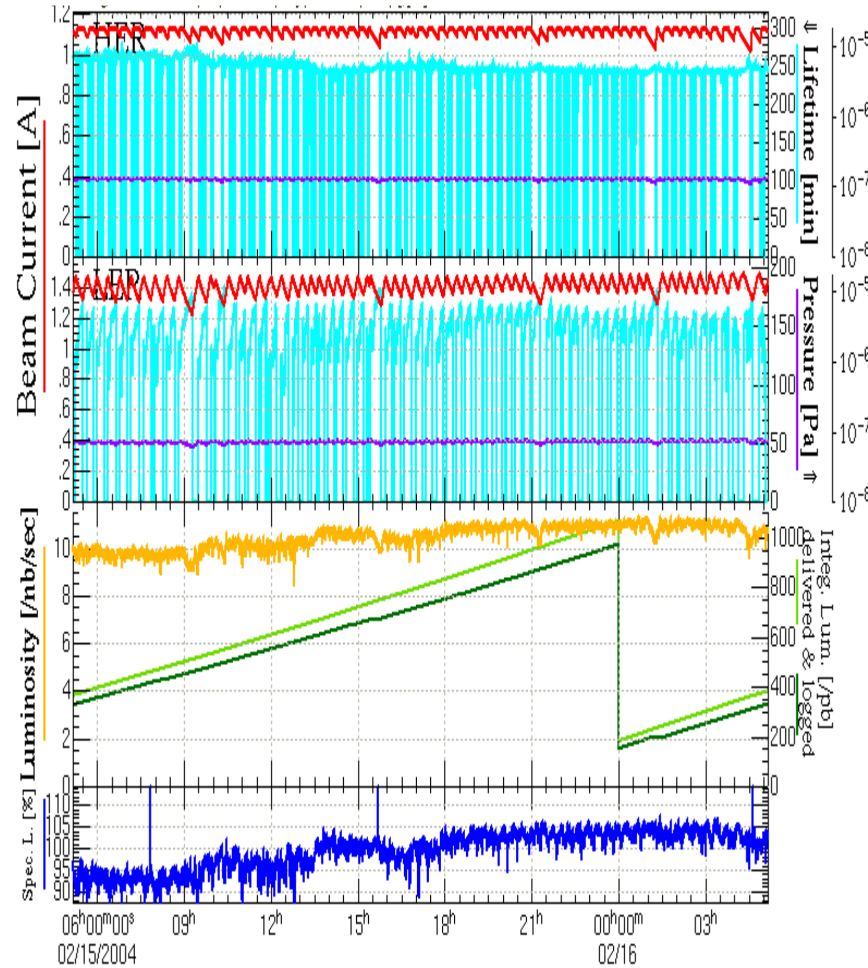
- Zelo občutljiv kos aparature iz 300μm debelih silicijevih plošč z gosto nanešenimi elektrodami: natančnost meritve mesta preleta nabitega delca: 10 μm!

Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine



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

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



V enem dnevu naberemo ~trikrat toliko podatkov kot v celotnem času obratovanja eksperimenta ARGUS...

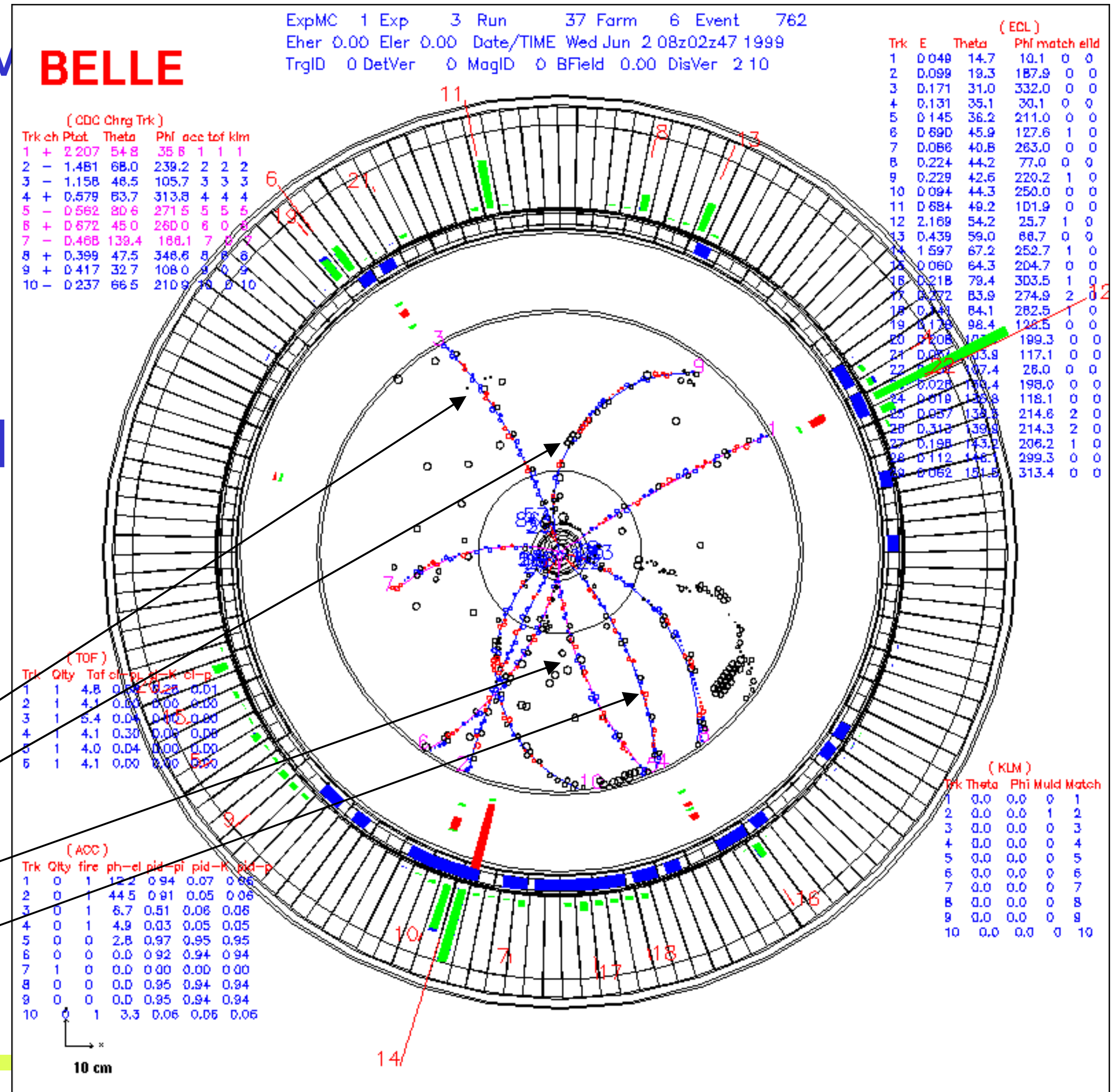
Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

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

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

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

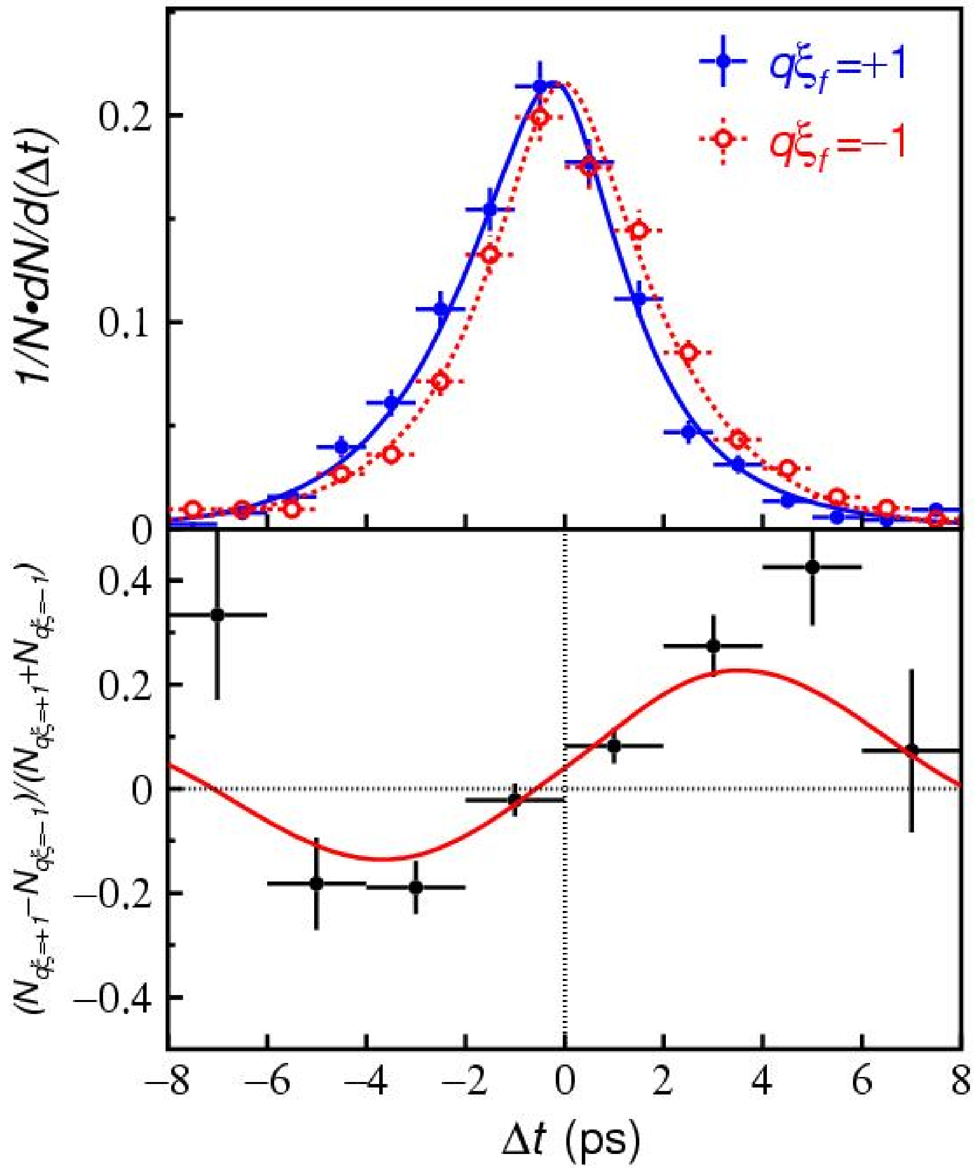


2001, rezultat meritve: CP je kršena!

Razlika med delci in antidelci:

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

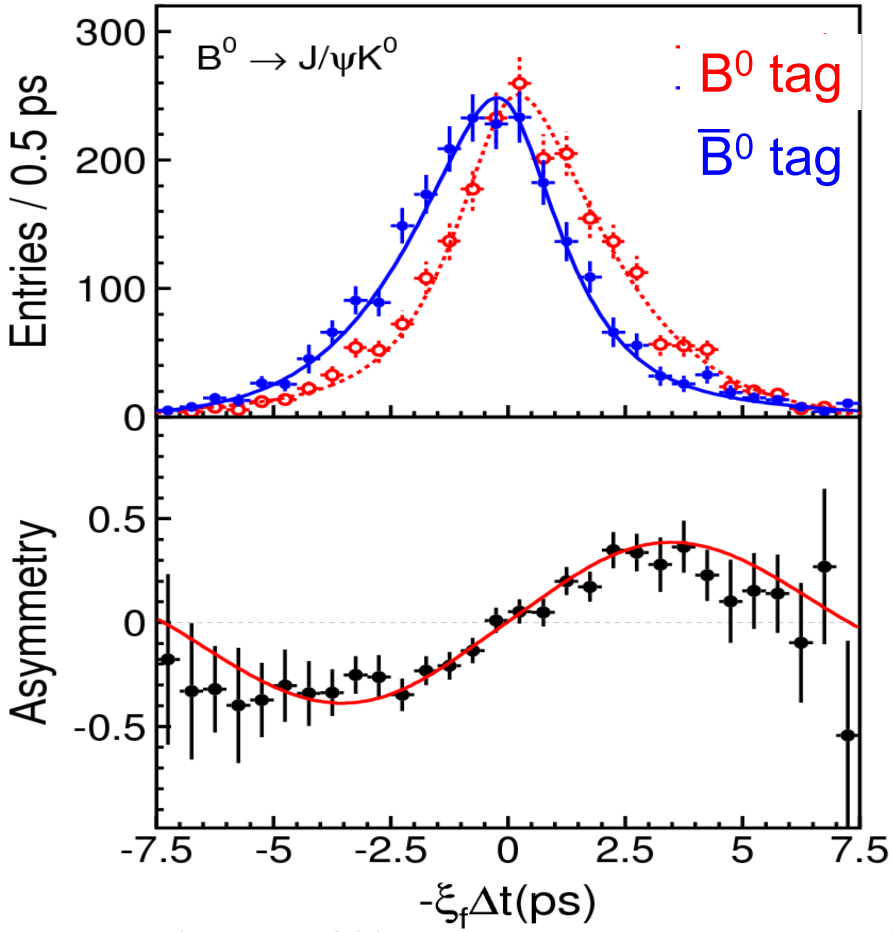


Razlika med obema porazdelitvama

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

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

$\sin 2\phi_1$ = 0.652 ± 0.039 (stat) ± 0.020 (syst)
C = 0.010 ± 0.026 (stat) ± 0.036 (syst)

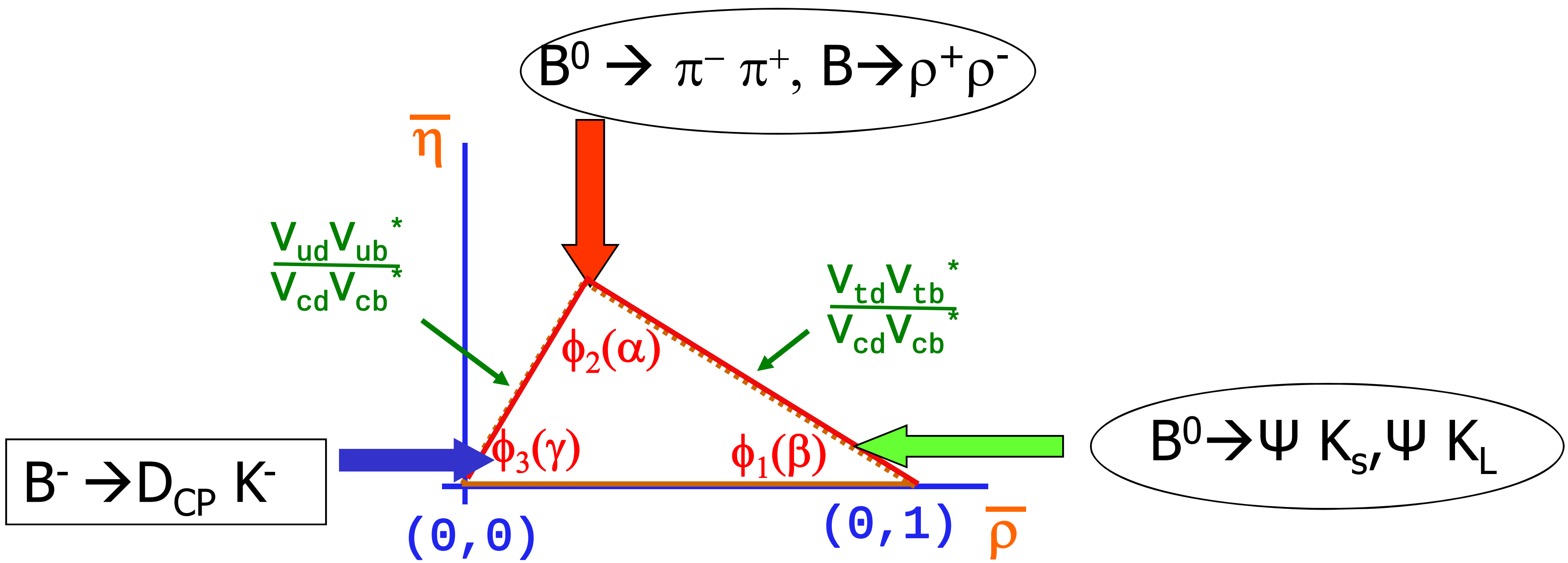


$$a_f = S\sin(\Delta m t) + C\cos(\Delta m t)$$

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

2001: odkritje →
2005: precizijska meritev!

Trije koti: (ϕ_1,ϕ_2,ϕ_3) ali (β, α, γ)



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?*

ŠTEVILO PARAMETROV V_{CKM}

KOMPL. MATRIKA $N \times N$: $2N^2$ PARAMETROV
UNITARNOST: N^2 ENAČB $\rightarrow$ N^2 PARAMETROV

$$\underset{N}{-\frac{1}{3}} \rightarrow \underset{N}{+\frac{2}{3}} \qquad V_{ji}\, \bar{u}_j \gamma^\mu (1-\gamma^5) u_i$$

$(2N-1)$ RELATIVNIH FAZ: POLJUBNE

ŠTEVILO PARAMETROV $V_{CKM} = N^2 - (2N-1) =$
$= (N-1)^2$

$N=2$: 1 $\qquad \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix}$
$N=3$: 4

ZA $N=2$ V_{CKM} REALNA! $\rightarrow$ NI KRŠITVE CP
ŠELE PRI $N=3$! 4 PARAMETRI =
= 3 KOTI (RECIMO EULERJEVI)
+ 1 FAZA!

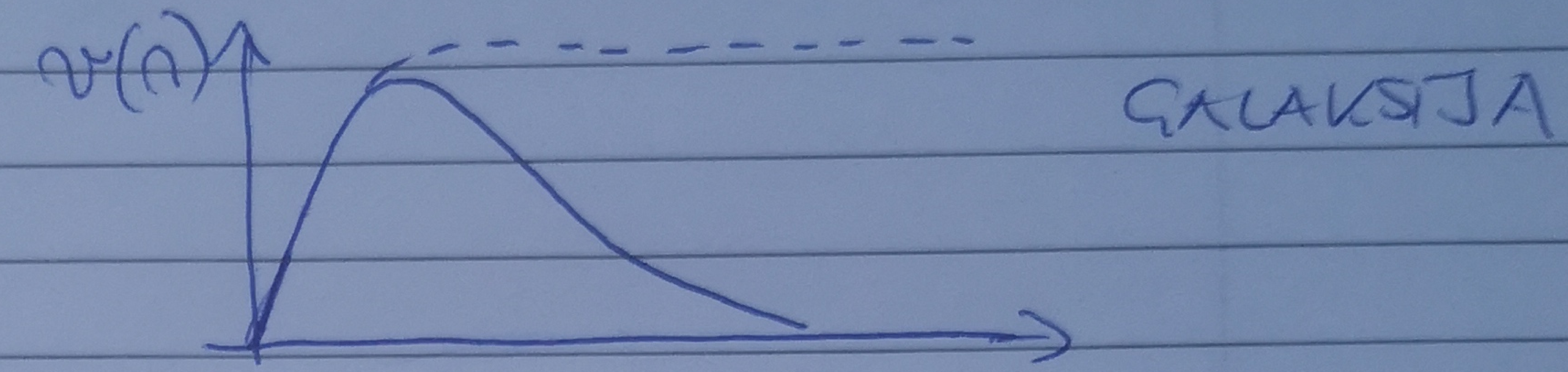
WOLFENSTEINOVA PARAMETRIZACIJA
λ, A, ρ, η $\qquad V_{ub} = A\lambda^3(\rho - i\eta)$

1964: KRŠITEV CP PRI KAONIH
(TAKRAT SO POZNALI 3 KVARKE!)
1973 KOBAYASHI, MASKAWA
V_{CKM} MORA BITI 3×3 $\rightarrow$ OBSTAJAJO
ŠE 3 VRSTE KVARKOV
1974 KVARK c, 77 b, 95 t
2001 KRŠITEV CP V RAZPADIH B $\rightarrow$
KOMPLEKSNA FAZA V_{CKM}
2008 NN ZA K+M.

SM IZREDNO DOBRO OPISUJE INTERAKCIJE MED OSNOVNIMI DELCI

TODA

- SM NE VSEBUJE TEMNE SNOVI



- RAZLIKA MED KOLIČNO SNOVI IN ANTI-SNOVI V VESOLJU

FOD: IŠČEMO SIGNALE „NOVE FIZIKE"

→ NOVI DELCI
→ NOVE VRSTE INTERAKCIJ

1) VISOKE ENERGIJE (LHC) $pp \to X$

2) ZELO NATANČNE MERITVE PRI NIŽJIH ENERGIJAH: REDKI RAZPADI MEZONOV B^0 → ODSTOPANJE OD NAPOVEDI STANDARDNEGA MODELA

$$\left.\begin{array}{l} B^0 \to D^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu \\ B^0 \to D^+ \tau^- \bar{\nu}_\tau \end{array}\right\} \text{KRŠITEV LEPTONSKE UNIVERZALNOSTI??}$$

ENA OD RAZLAG: LEPTOKVARKI