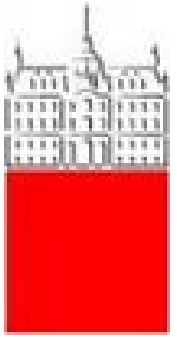


Kršitev simetrije CP

kaj novega lahko izmerimo (in povemo...)?

B. Golob

Vsebina

1. Snovno vesolje
2. Saharovi pogoji
3. Kršitev simetrije CP
4. Meritev kršitve
5. Interpretacija

Snovno vesolje

na začetku je bil Veliki pok...

količina snovi (delcev) in antisnovi (antidelcev) naj bi bila enaka:

začetni pogoj v razvoju vesolja $N_b - N_{\bar{b}} = 0$

N_b: **število barijonov**

današnje (vsaj) bližnje vesolje (~ 10 Mpc) je sestavljeno iz snovi in ne antisnovi

$1\ \mathrm{Mpc} = 3{,}3 \cdot 10^6$ svetlobnih let

v zgodnjem vesolju anihilacija

$$b + \bar{b} \rightarrow \gamma$$

$$N_\gamma \sim N_b + N_{\bar{b}}$$

to je izvor mikrovalovnega kozmološkega ozadja, ki ga izmerimo danes

Snovno vesolje

v današnjem vesolju:

št. barionov (snov) ⟵

št. fotonov (mikroval. ozadje) ⟵

$$\frac{N_b - N_{\bar{b}}}{N_\gamma} = \frac{N_b - N_{\bar{b}}}{N_b + N_{\bar{b}}} = 10^{-10} - 10^{-9}$$

samo izjemno majhen del prvotno prisotne snovi se je ohranil do danes

kako smo prišli od

$$\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} = 0 \quad \textbf{do} \quad \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} = 10^{-10} - 10^{-9} \quad \textbf{?}$$

(en od 10^{10} barijonov se ni anihiliral)

Snovno vesolje

nestabilni težki delci razpadajo
ohlajanje vesolja: $n_b \to 0 \Rightarrow \Gamma_{anih} < \Gamma_{raz}$

(majhna)
(majhnega števila prostalih) **razlika med razpadi delcev in antidelcev**
$\Rightarrow$ asimetrija

različne razpade delcev in antidelcev opišemo s kršitvijo simetrije CP

A. Saharov l. 1967 postavi 3 pogoje za razvoj asimetričnega vesolja (in l. 1975 prejme Nobelovo nagrado za mir):

- **neohranitev barijonskega števila**
- **kršitev simetrije CP in C**
- **neravnovesno stanje**

Saharovi pogoji

prepostavimo obstoj X, razpada v f_1 in f_2:

$$X \to f_1 \quad (N_B^1, r) \qquad X \to f_2 \quad (N_B^2, 1-r)$$

$$\overline{X} \to \overline{f_1} \quad (-N_B^1, \overline{r}) \qquad \overline{X} \to \overline{f_2} \quad (-N_B^2, 1-\overline{r})$$

N_B: barijonsko število N_B; barijoni +1
antibarijoni -1
pri vseh znanih procesih v svetu osnovnih delcev se N_B ohranja (razpad p);

r: relativna pogostost razpadov

Saharovi pogoji

$X \to f_1 \quad (N_B^1, r)$ $\qquad$ $X \to f_2 \quad (N_B^2, 1-r)$

$\overline{X} \to \overline{f}_1 \quad (-N_B^1, \bar{r})$ $\qquad$ $\overline{X} \to \overline{f}_2 \quad (-N_B^2, 1-\bar{r})$

sprememba barijonskega števila:

$$\Delta N_B = rN_B^1 + (1-r)N_B^2 + \bar{r}(-N_B^1) + (1-\bar{r})(-N_B^2) =$$

$$= (r-\bar{r})(N_B^1 - N_B^2)$$

pogostosti razpadov $X \to f$ in $\overline{X} \to \overline{f}$ nista enaki $\Rightarrow$ kršitev simetrije CP

X razpada v f_1 in f_2, ki imata različno N_B $\Rightarrow$ neohranitev barijonskega števila

Kršitev simetrije CP

Mezoni B:

mezon	sestava	masa (GeV/c^2)	življenjski čas
B^0	$\bar{b}d$	5.28	1.54 ps
B^+	$\bar{b}u$	5.28	1.67 ps

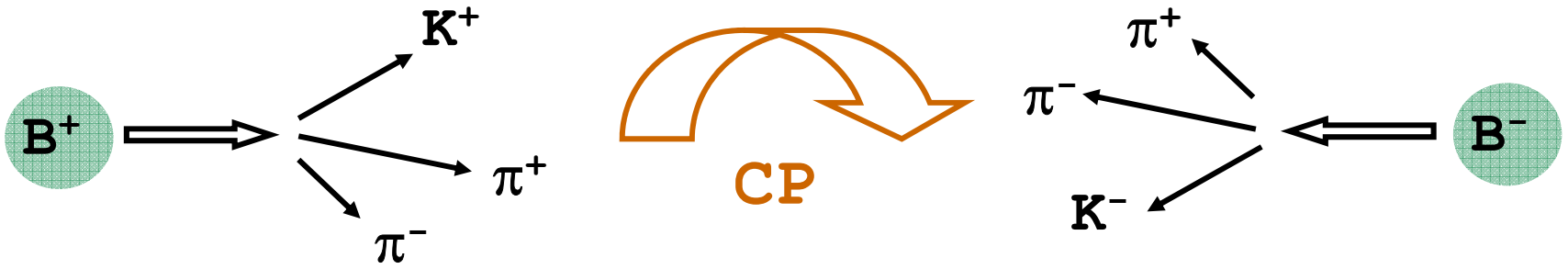
Simetrija CP:

C: konjugacija naboja $C|B^0\rangle = |\bar{B}^0\rangle$

P: zrcaljenje prostora $P|B^0\rangle = -|B^0\rangle$

CP: hkratna operacija $CP|B^0\rangle = -|\bar{B}^0\rangle$

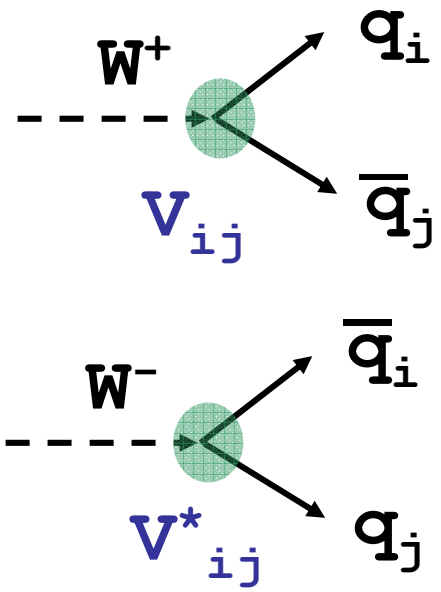
Primer:



Kršitev simetrije CP

Standardni model (SM) elektrošibke in močne interakcije:

kršitev CP (CPV) je posledica matrike Cabbibo-Kobayashi-Maskawe(CKM)



če $V_{ij}=V_{ij}^*$ ▶ $\mathcal{L}=\mathcal{L}_{CP}$ ▶
CP simetrija se ohranja

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

matrika CKM je unitarna;
npr.

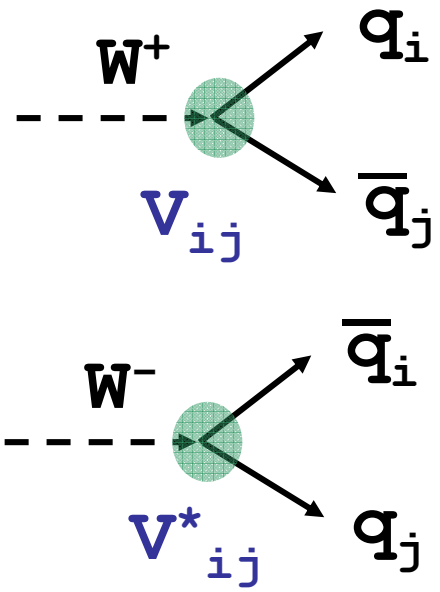
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

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

Kršitev simetrije CP

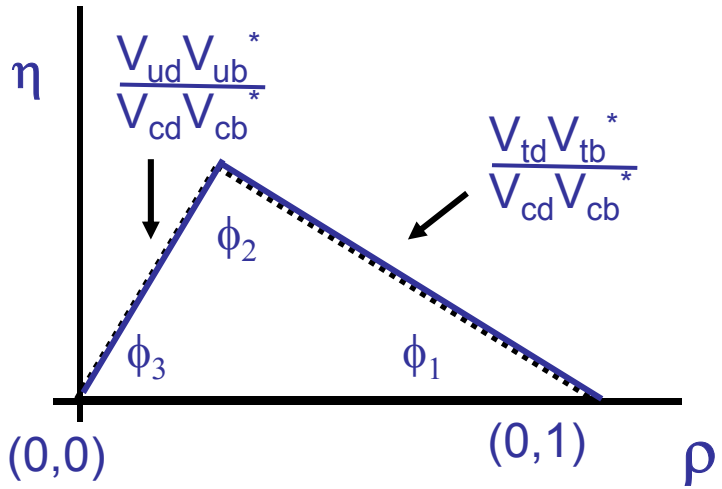
Unitarni trikotnik:

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



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

$$\begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\phi} \\ -s_{12}c_{23} & c_{12}c_{23} & s_{23} \\ s_{12}s_{23}-c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\phi} & -c_{12}s_{23} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

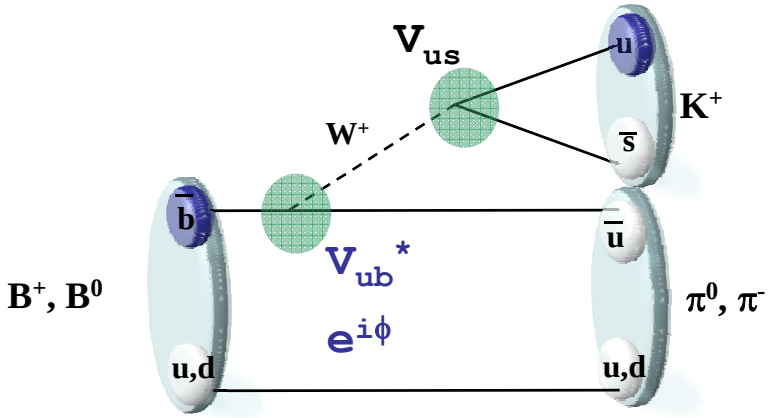


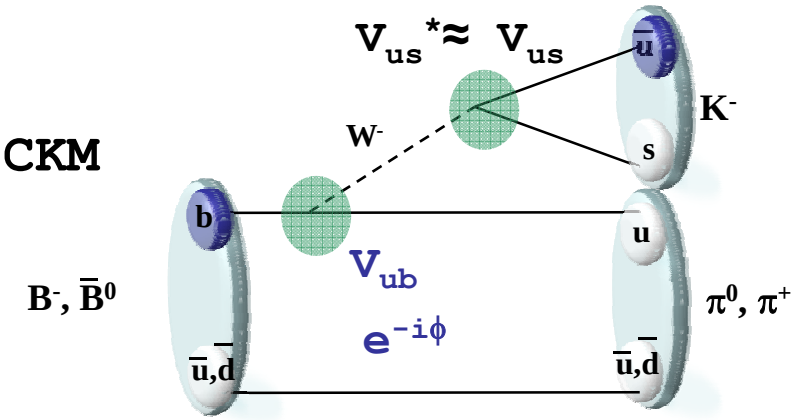
Kršitev simetrije CP

CPV v razpadih (direktna CPV):

$$|A_f| = \left|\sum_i A_i e^{i(\delta_i+\varphi_i)}\right|$$

$$|\bar{A}_{\bar{f}}| = \left|\sum_i A_i e^{i(\delta_i-\varphi_i)}\right|$$





ϕ_i: **posledica kompleksnih elem. CKM**

δ_i: **ostala faza, posledica močne int. med kvarki**

$$\frac{|\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2} \neq 1 \quad \Rightarrow \text{CPV}$$

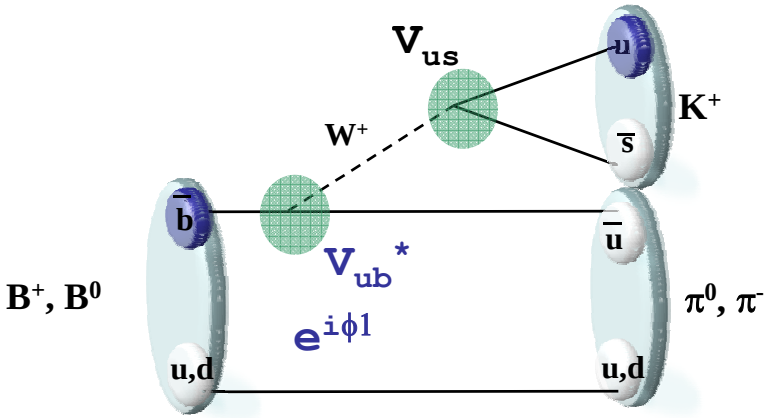
$$|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2 = -2\sum_{i,j} A_i A_j \sin(\varphi_i - \varphi_j)\sin(\delta_i - \delta_j)$$

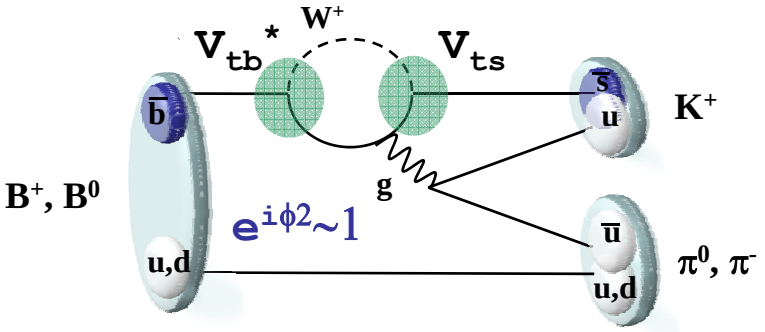
za direkten CPV potrebujemo vsaj dve amplitudi z različnima šibkima in močnima fazama

Meritev CPV (ena od)

Belle Coll., Nature, 452, 332 (2008)

CPV v razpadih $B^{+,0} \to K^+\pi^{0,-}$:





$|V_{us}V_{ub}{}^*| << |V_{tb}{}^*V_{ts}|$ **proces višjega reda**

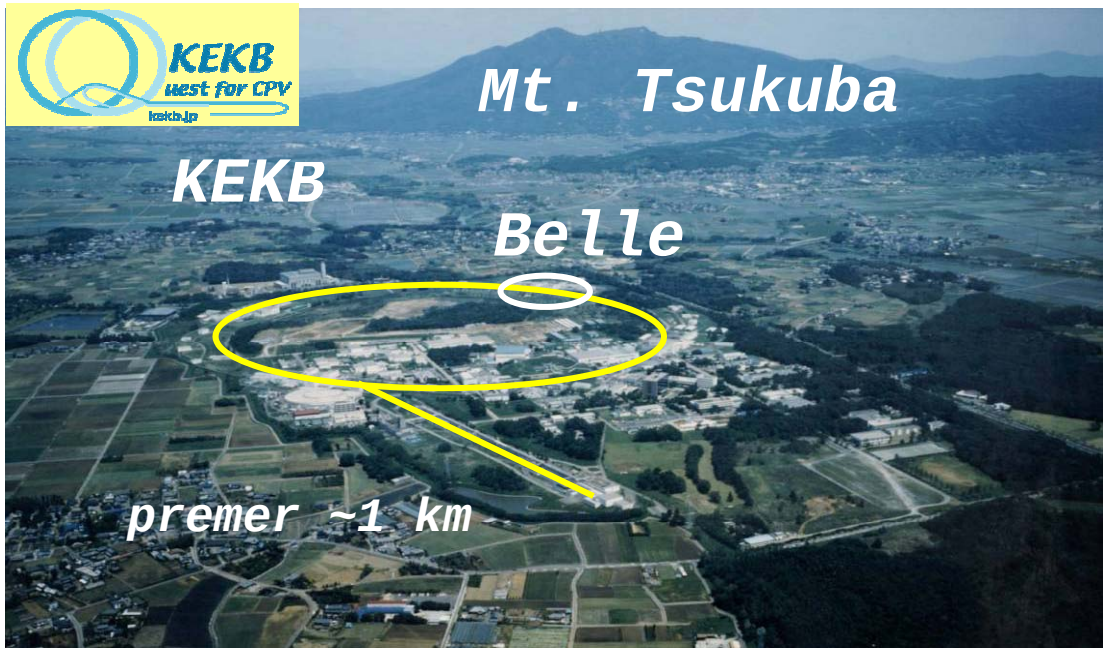
$$|A_1| \sim |A_2|$$

relativna pogostost razpadov:

$Br(B^0 \to K^+\pi^-) = 1,82 \cdot 10^{-5}$

$Br(B^+ \to K^+\pi^0) = 1,21 \cdot 10^{-5}$

Meritev CPV (ena od)



$\sqrt{s}$=10.58 GeV

e^+ → Υ(4s) ← e^-

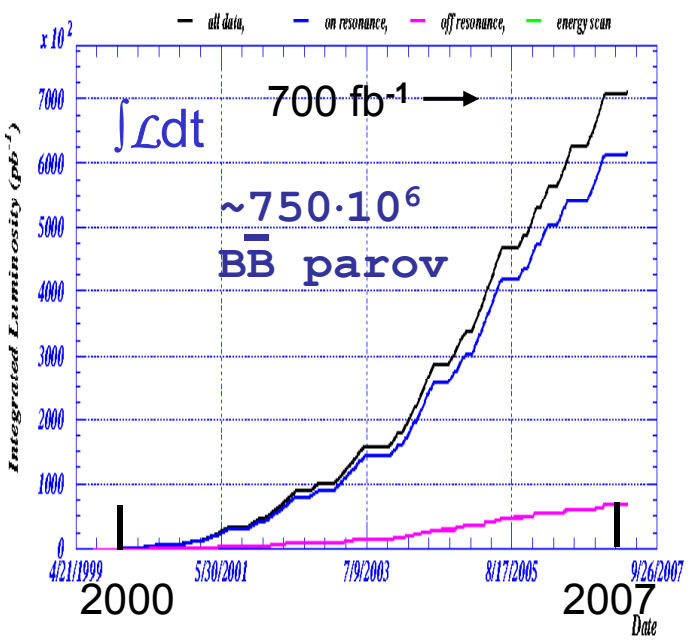
Υ(4s) → B + $\overline{B}$

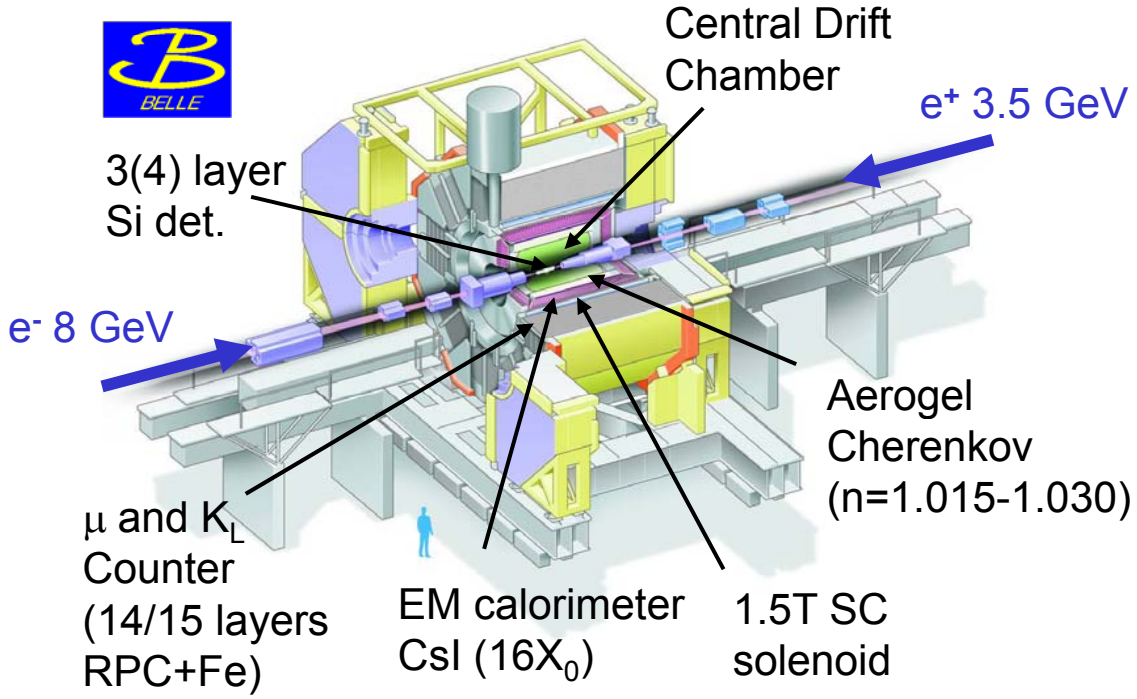
$\Delta z \sim c\beta\gamma\tau_B \sim 200\mu m$

$p(e^-)$=8 GeV $p(e^+)$=3.5 GeV $\beta\gamma$=0.42

Meritev CPV (ena od)

Belle Coll., Nature, 452, 332 (2008)





Meritev CPV (ena od)

Belle Coll., Nature, 452, 332 (2008)

rezultat:

$$\mathcal{A}_{K^+\pi^-} = \frac{N(B^0 \to K^+\pi^-) - N(\overline{B}^0 \to K^-\pi^+)}{N(B^0 \to K^+\pi^-) + N(\overline{B}^0 \to K^-\pi^+)} =$$

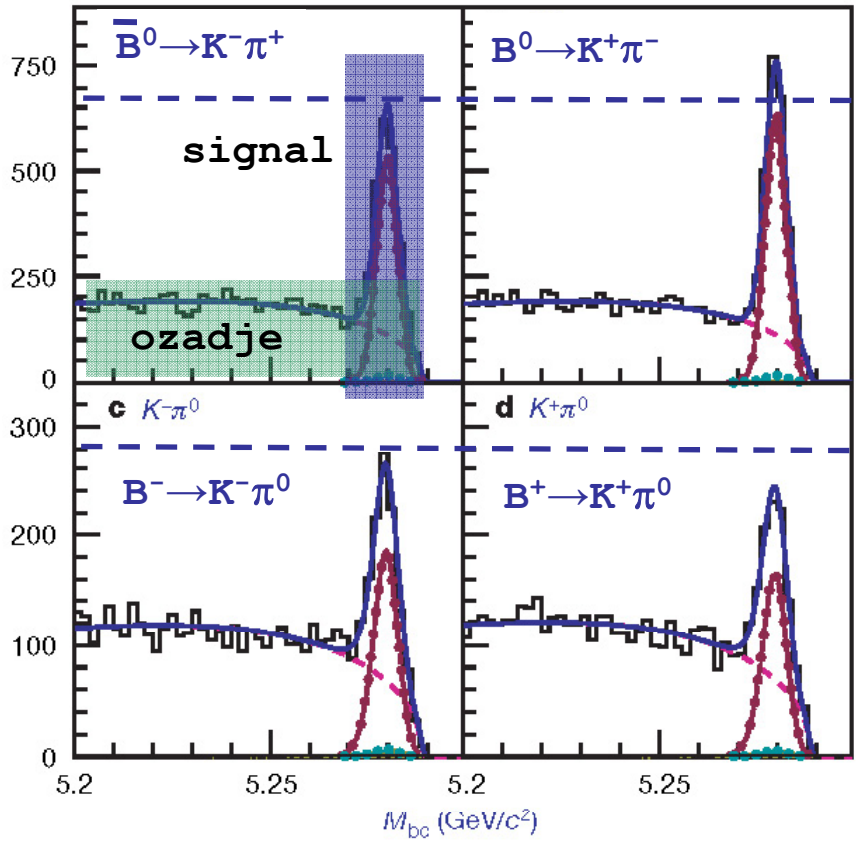
$$= -0{,}094 \pm 0{,}018 \pm 0{,}008$$

$$\mathcal{A}_{K^+\pi^0} = \frac{N(B^+ \to K^+\pi^0) - N(B^- \to K^-\pi^0)}{N(B^+ \to K^+\pi^0) + N(B^- \to K^-\pi^0)} =$$

$$= +0{,}07 \pm 0{,}03 \pm 0{,}01$$

$$\mathcal{A}_{K^+\pi^0} - \mathcal{A}_{K^+\pi^-} = +0{,}164 \pm 0{,}037$$

invariantna masa razpadnih produktov B

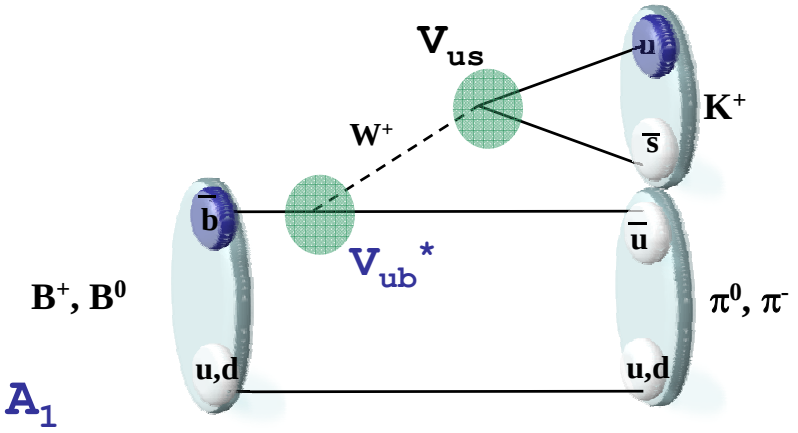


direktna CPV že opažena;
zares zanimiva je razlika asimetrij v obeh razpadnih načinih

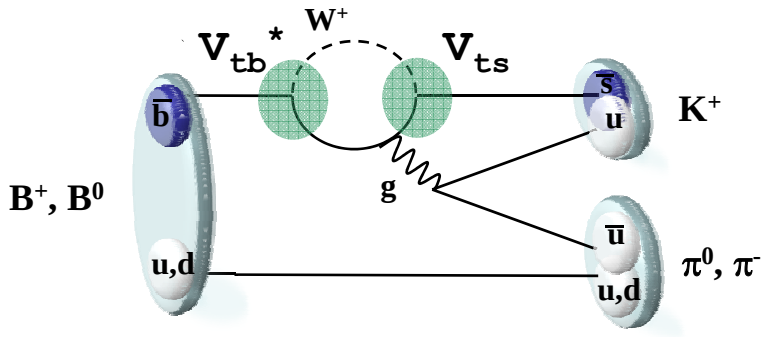
Interpretacija

Belle Coll., Nature, 452, 332 (2008)

CPV v razpadih $B^{+,0} \to K^+\pi^{0,-}$:

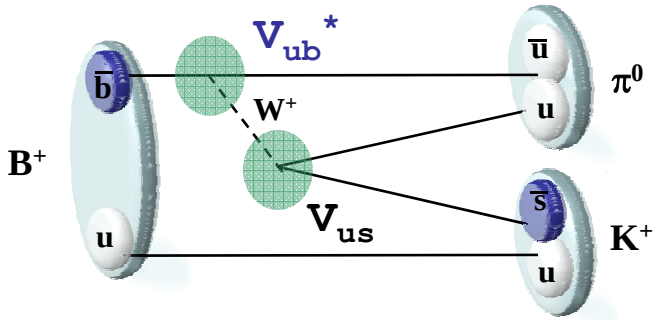


A_1

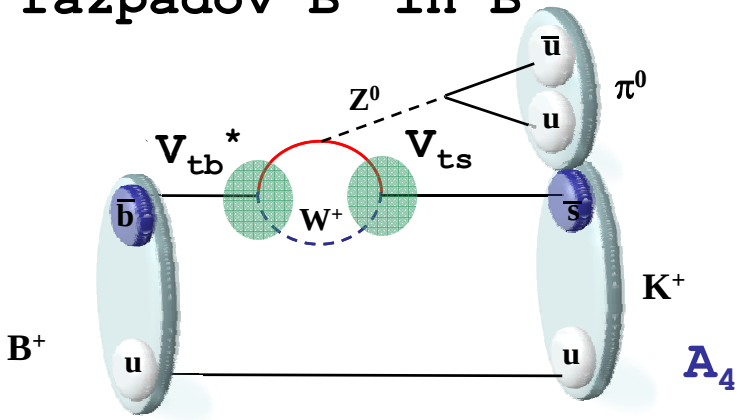


A_2

enak prispevek k asimetriji razpadov B^+ in B^0



A_3



A_4

prispevek k asimetriji razpadov B^+

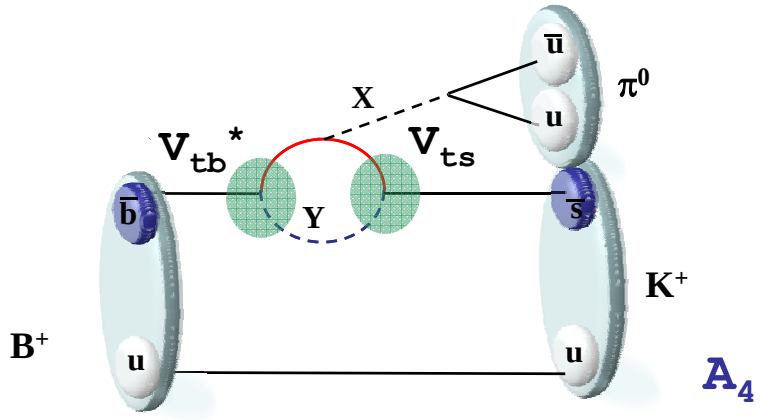
$|A_3|, |A_4| << |A_1|, |A_2|$; A_4 ima zanemarljivo kompl. fazo

Interpretacija

Belle Coll., Nature, 452, 332 (2008)

"Nova fizika":

v zanki lahko prispevajo doslej neznani delci;
če so njihove sklopitve take, da močno kršijo simetrijo CP, bi lahko to razložilo opaženo razliko v asimetrijah;



eksperimentalno nič znanega o takih delcih;
morebiten doslej neznan prispevek k CPV

Eksaktnejši pogoj za CPV (primerjava $\mathcal{L}$ in $\mathcal{L}_{CP}$):

$$\Im\left[V_{ij}V_{kl}V_{il}^{*}V_{kj}^{*}\right] = J\sum_{m,n=1}^{3}\varepsilon_{ikm}\varepsilon_{jln} \neq 0 \quad \Rightarrow \quad J \neq 0$$

Interpretacija

velikost CPV:

$$J = c_{12}c_{23}c_{13}^2 s_{12}s_{23}s_{13}\sin\varphi$$

$$J_{max} = \frac{1}{6\sqrt{3}} \approx 0{,}1$$ **maksimalna vrednost**

$$J_{izm} \approx 4\cdot 10^{-5}$$ **izmerjena vrednost**

CPV v okviru SM je (pre)majhna

$$\boldsymbol{J_{izm}} \Rightarrow \quad \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} \sim 10^{-16}$$

in ne

$$\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} = 10^{-10} - 10^{-9}$$

Zaključek

velikost CPV:

$$J_{izm} \Rightarrow \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} \sim 10^{-16}$$

in ne

$$\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} = 10^{-10} - 10^{-9}$$

- **za razlago asimetrije v vesolju so potrebni doslej neznani viri CPV**
- **to daje težo rezultatom skupine Belle, ki kažejo na morebitne prispevke Nove fizike**
- **za ugotavljanje odstopanj od SM potrebne nadaljne natančne(jše) meritve**
- **Super Belle (2010), z vašo pomočjo**