



Univerza v Ljubljani

---

# Fizika onkraj Standardnega modela

Peter Križan

# Vsebina

---

Uvod

Težave Standardnega modela

Kam naprej

# Standardni model

---

Standardni model:

- 12 osnovnih delcev
- 3 vrste interakcij, 1+3+8 nosilcev sile
- delec, ki poskrbi za maso vseh ostalih (Higgs)

Ena izmed najbolj natančno preverjenih teorij vseh časov

# Težave Standardnega modela

---

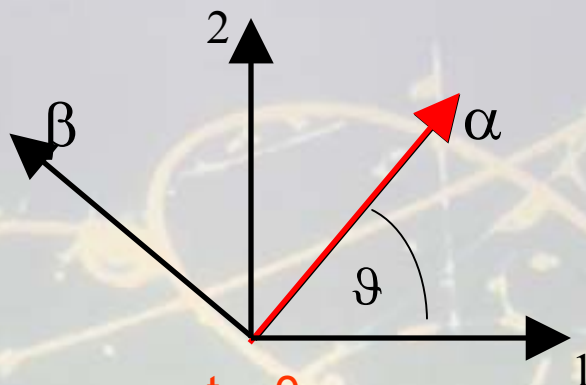
- 18 parametrov...
- Nevtrini imajo (zelo majhno) maso
- Premalo CP
- SM ne vsebuje gravitacije
- Večina vesolja je iz nam neznane snovi....

## Iskanje lukenj v SM

- Prehodi s spremembo okusa in nevtralnimi tokovi
- Direktno iskanje supersimetričnih delcev

# Teorija nevtrinskih oscilacij I.

Oscilacije → pojav v KM, ko stanje ob svojem nastanku **NI** lastno stanje operatorja polne energije



$$H|\alpha\rangle \neq E_\alpha|\alpha\rangle$$

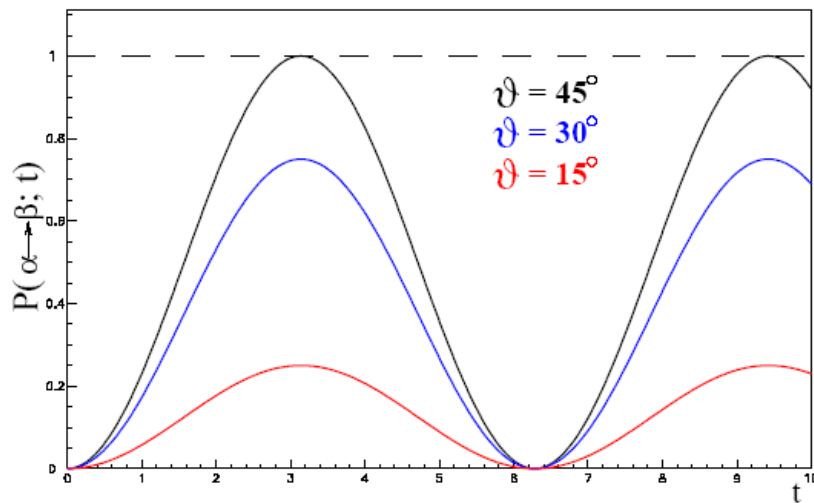
$$|\psi, t = 0\rangle = |\alpha\rangle$$

$$H|1\rangle = E_1|1\rangle$$

časovni razvoj

$$|\psi, t\rangle = e^{iHt}|\psi, t = 0\rangle$$

$$|1, t\rangle = e^{iE_1t}|1\rangle$$

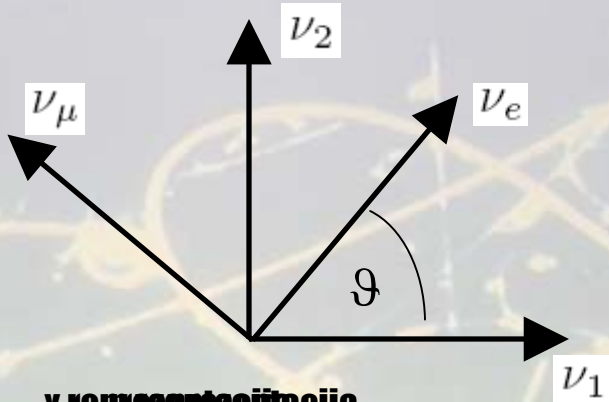


$$\begin{aligned} |\psi, t\rangle &= |\alpha\rangle \\ &= (\cos^2\vartheta e^{iE_1t} + \sin^2\vartheta e^{iE_2t}) |\alpha\rangle \\ &+ (\cos\vartheta\sin\vartheta e^{iE_2t} - \cos\vartheta\sin\vartheta e^{iE_1t}) |\beta\rangle \end{aligned}$$

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = \sin^2 2\vartheta \sin^2\left(\frac{\Delta E_{12}t}{2}\right)$$

# Teorija nevtrinskih oscilacij II.

Nevtrini  $\rightarrow$  okusna/šibka lastna stanja:  $\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$   
 masna lastna stanja:  $\nu_1 \quad \nu_2 \quad \nu_3$



$$|\Psi_\alpha^W(\vec{x}, t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* \psi_i^M(\vec{x}, t) |\nu_i\rangle$$

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = \left| \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* \psi_i^M(0, 0) \psi_i^{M*}(\vec{x}, t) \right|^2$$

x reprezentacija  
 časovno razvito



$$\psi_i^M(x, t) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/4}} e^{-\frac{(x-v_i t)^2}{4\sigma_x^2}} e^{i(\langle p_i \rangle x - \langle E_i \rangle t)}$$

ultrarelativističen približek:

$$\langle E_i \rangle \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2E_i}$$

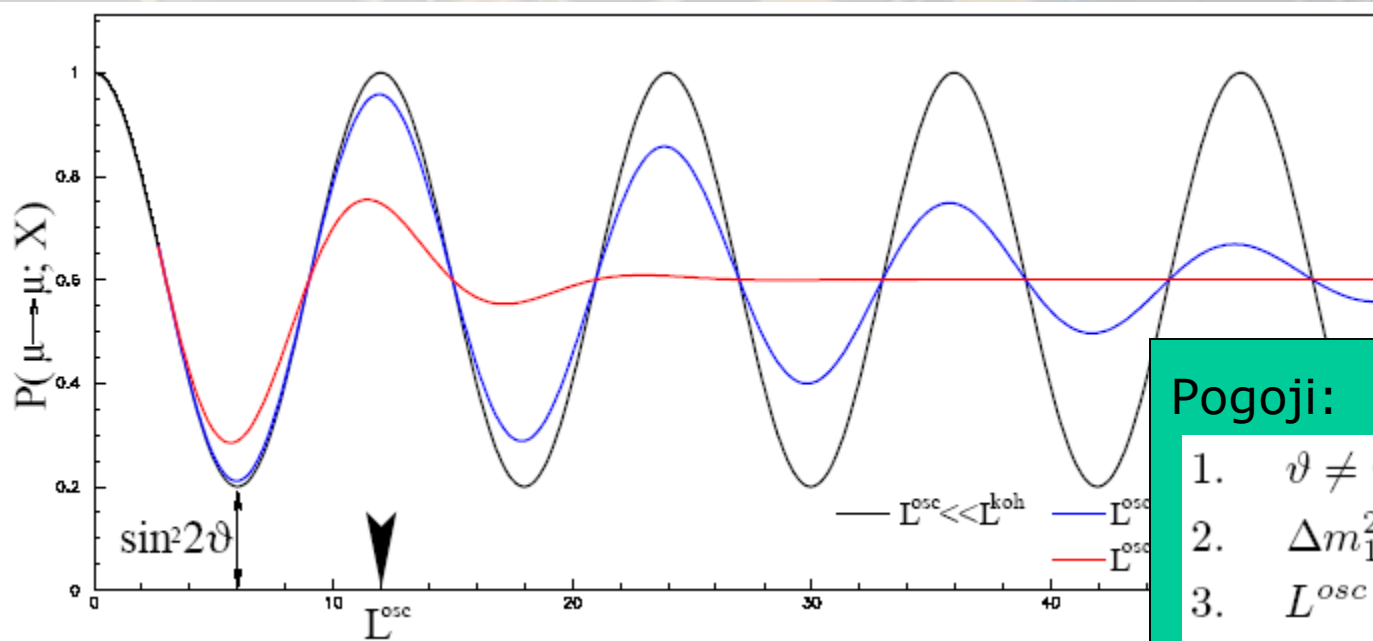
$$v_1 \simeq v_2 \simeq 1$$

# Teorija nevtrinskih oscilacij III.

Verjetnost za preživetje nevtrina:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu, x) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\vartheta \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi x}{L^{osc}} \right) \cdot e^{-(x/L^{koh})^2} \right]$$

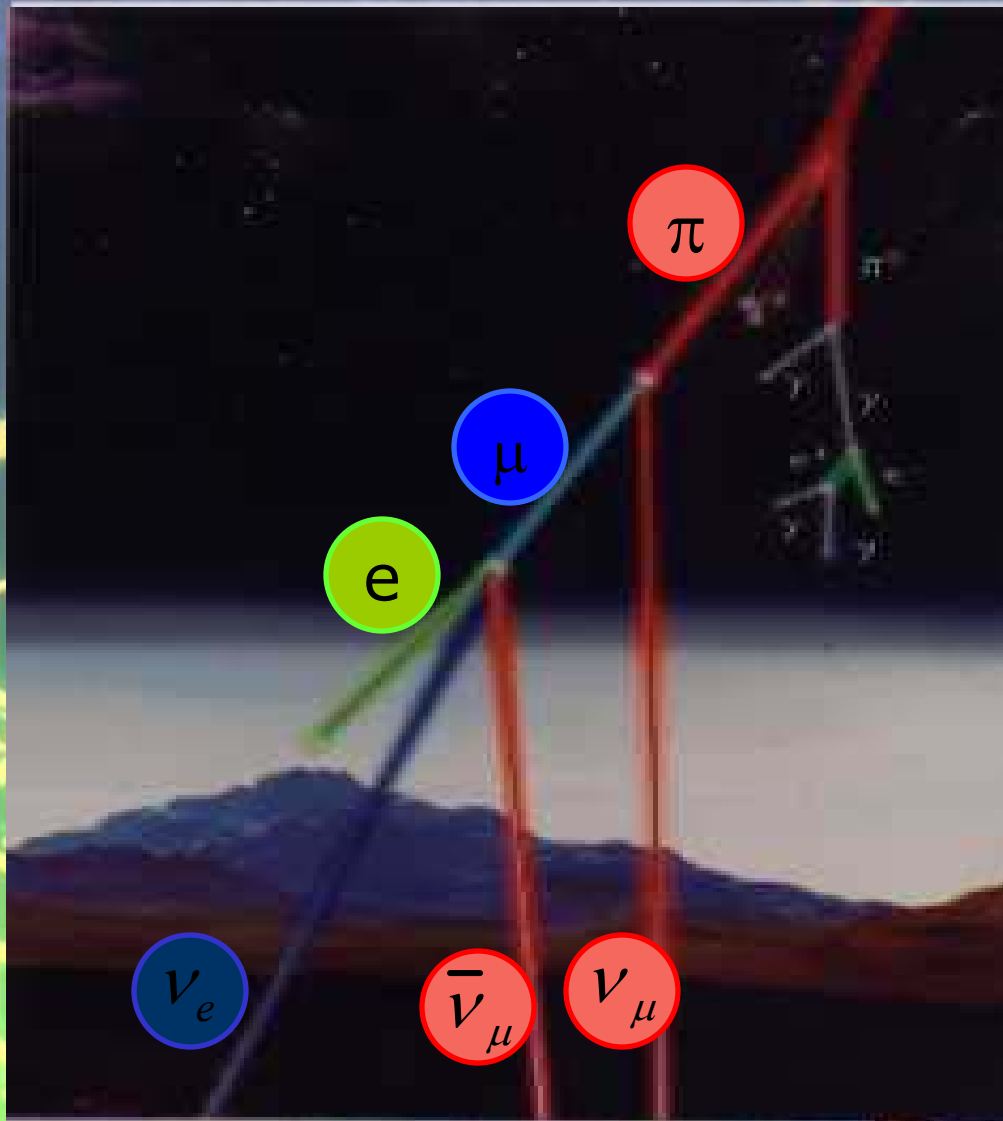
$$L^{osc} = \frac{4\pi E}{\Delta m_{21}^2} \quad L^{koh} = 2\sqrt{2}\sigma_x \frac{2E^2}{\Delta m_{12}^2}$$



Pogoji:

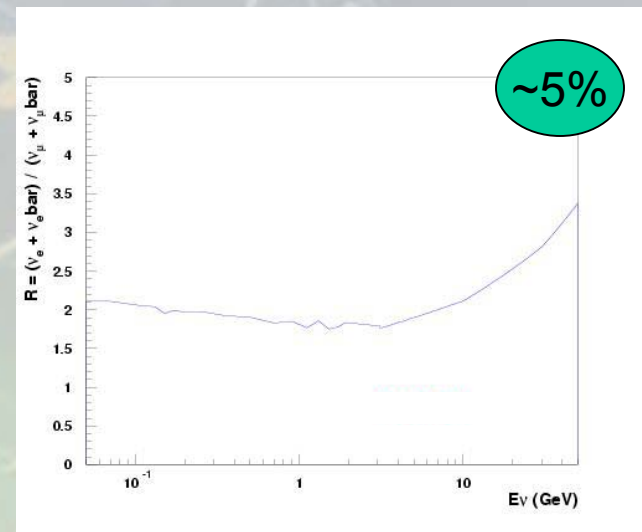
1.  $\vartheta \neq 0$
2.  $\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2 \neq 0$
3.  $L^{osc} < L^{koh}$
4.  $x < L^{koh}$

# Atmosferski nevtrini



$$400 \text{ MeV} \leq E_\nu \leq 10 \text{ GeV}$$

$$r = \frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \cong 2$$

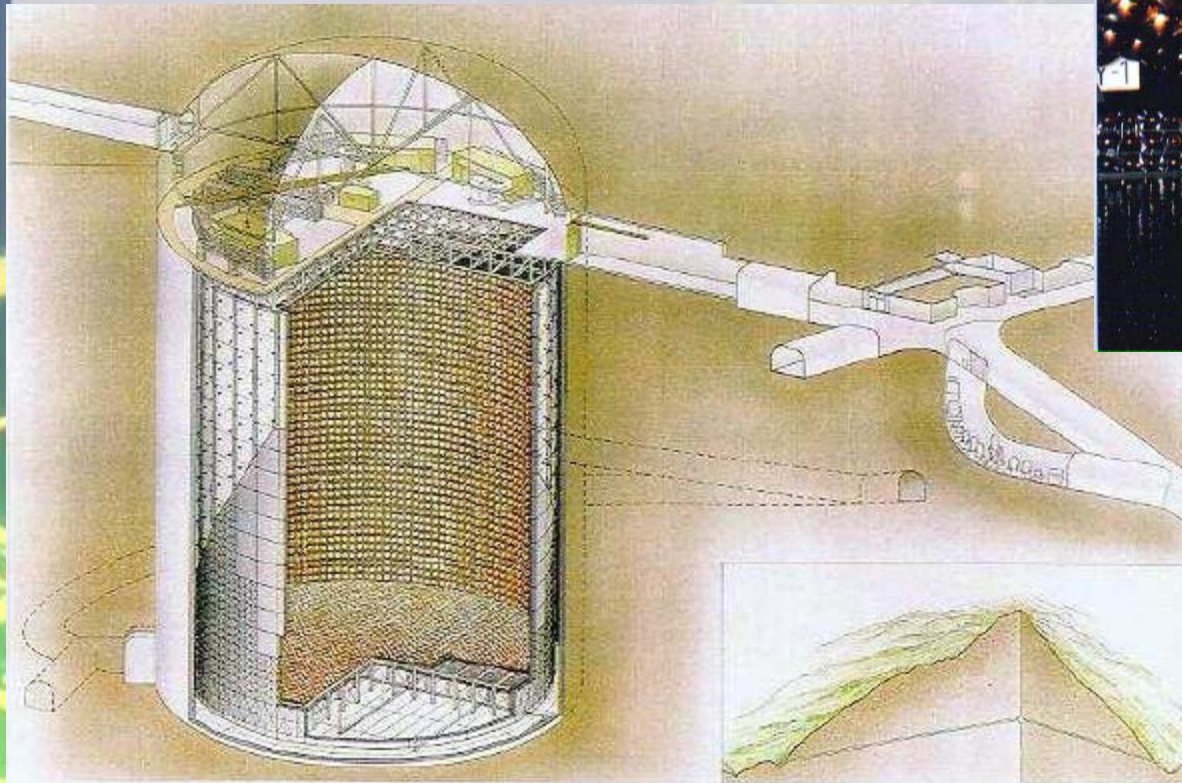


$$R = \frac{[N_{\nu_\mu}/N_{\nu_e}]_{meritev}}{[N_{\nu_\mu}/N_{\nu_e}]_{napoved}}$$

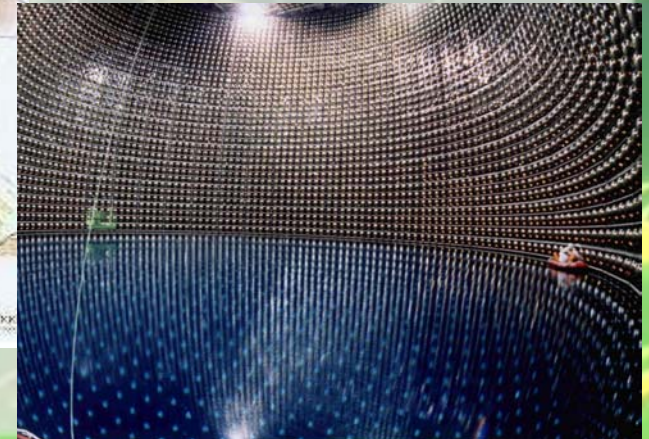


# Super-Kamiokande I.

## Detektor Čerenkove svetlobe



50.000 ton vode

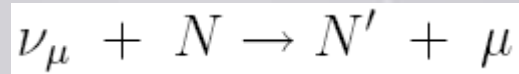


SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

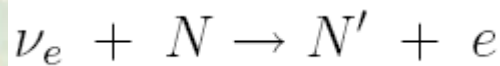
11.000 fotopomnoževalk

# Super-Kamiokande II.

**Nevtrine detektiramo posredno preko  
intreakcije s snovjo:**

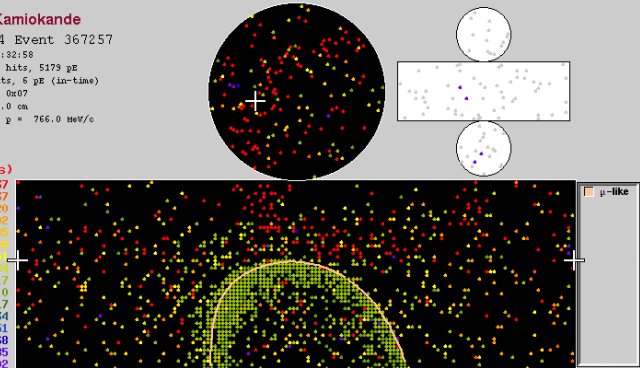


$$R = 0,675 \pm 0,087 \quad (\text{pri\u010dakovali } 1)$$



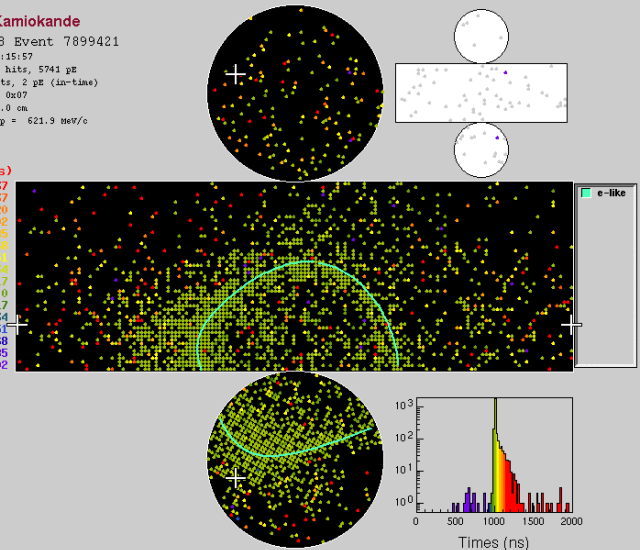
Super-Kamiokande  
Run 4234 Event 367257  
97-06-16:23:22:58  
Inner: 1904 hits, 5179 pE  
outer: 5 hits, 6 pE (in-time)  
Trigger: 00:00  
D wall: 895.0 cm  
FC mu-like, p = 766.0 MeV/c

Resid(ns)  
\* > 137  
\* 120- 137  
\* 102- 120  
\* 85- 102  
\* 68- 85  
\* 51- 68  
\* 34- 51  
\* 17- 34  
\* 0- 17  
\* -17- 0  
\* -34- -17  
\* -51- -34  
\* -68- -51  
\* -85- -68  
\* -102- -85  
\* <-102



Super-Kamiokande  
Run 4268 Event 7899421  
97-06-29:03:15:57  
Inner: 2652 hits, 5741 pE  
outer: 3 hits, 2 pE (in-time)  
Trigger: 00:00  
D wall: 506.0 cm  
FC e-like, p = 621.9 MeV/c

Resid(ns)  
\* > 137  
\* 120- 137  
\* 102- 120  
\* 85- 102  
\* 68- 85  
\* 51- 68  
\* 34- 51  
\* 17- 34  
\* 0- 17  
\* -17- 0  
\* -34- -17  
\* -51- -34  
\* -68- -51  
\* -85- -68  
\* -102- -85  
\* <-102



# Kršitev CP in razvoj vesolja

Začetni pogoj ob rojstvu vesolja  $N_B - N_{\bar{B}} = 0$

Danes v naši okolici (najmanj do  $\sim 10$  Mpc):  
sama snov, nobene anti-snovi

$$\begin{array}{ccc} \text{št. barionov} & \longleftarrow & \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma} = 10^{-10} - 10^{-9} & \longrightarrow & \text{Št. fotonov} \\ \text{(snov)} & & & & \text{(mikrovalovno o.)} \end{array}$$

Zgodnje vesolje  $B + \bar{B} \rightarrow \gamma \leftrightarrow N_\gamma = N_B + N_{\bar{B}}$

Kako smo prišli iz

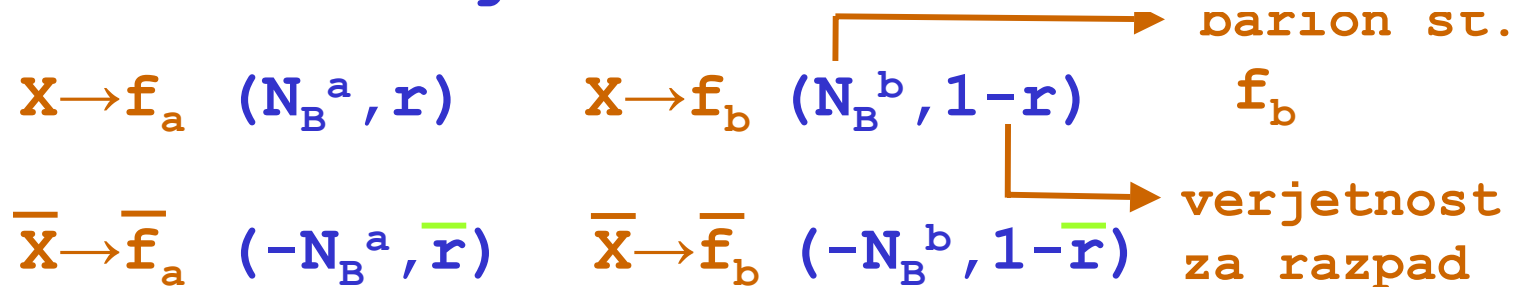
$$\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} = 0 \quad \text{do} \quad \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} = 10^{-10} - 10^{-9} \quad ?$$

(le eden izmed  $10^{10}$  barionov se ni anihiliral)

# Trije pogoji

Trije pogoji (A.Saharov, 1967) :

- neohranitev barionskega števila
- kršitev simetrije CP
- neravnovesno stanje



Sprememba barionskega števila v razpadu delca X:

$$\begin{aligned} \Delta B &= rN_B^a + (1-r)N_B^b + \bar{r}(-N_B^a) + (1-\bar{r})(-N_B^b) = \\ &= (r - \bar{r})(N_B^a - N_B^b) \end{aligned}$$

# Trije pogoji

$$N_B - N_{\bar{B}} = \Delta B n_X =$$

$$= (r - \bar{r})(N_B^a - N_B^b) n_X$$

X razpade v stanja z  $N_B^a \neq N_B^b$   
-> neohranitev barionskega števila

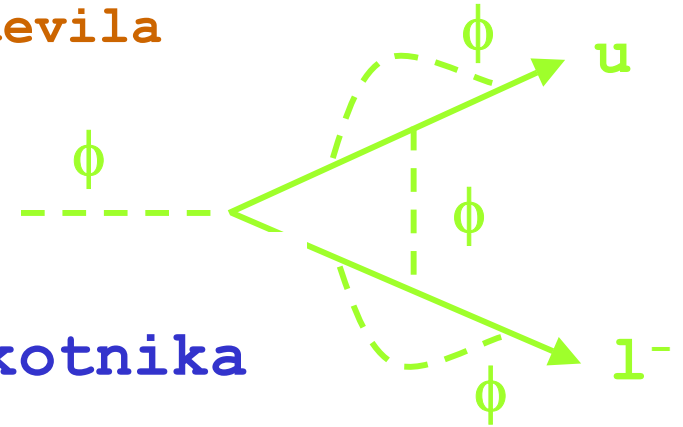
$r \neq \bar{r}$  ->  
kršitev CP

V termičnem ravnovesju bi obratni proces poskrbel za  $\Delta B=0$  -> potrebujemo neravnovesno stanje

Na primer: X živi dovolj dolgo -> vesolje se ohladi -> ni več mogoča produkcija delcev X

# Ni dovolj kršitve CP!

Razpad  $\phi$  krši ohranitev barionskega števila  
(recimo Higgsov bozon z nabojem  $-1/3$ )



Izkaže se, da je  $\Delta B$  sorazmeren  
 $J = 2x$  površina unitarnega trikotnika  
matrice CKM,  $J_{\max} = 1/6\sqrt{3}$

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

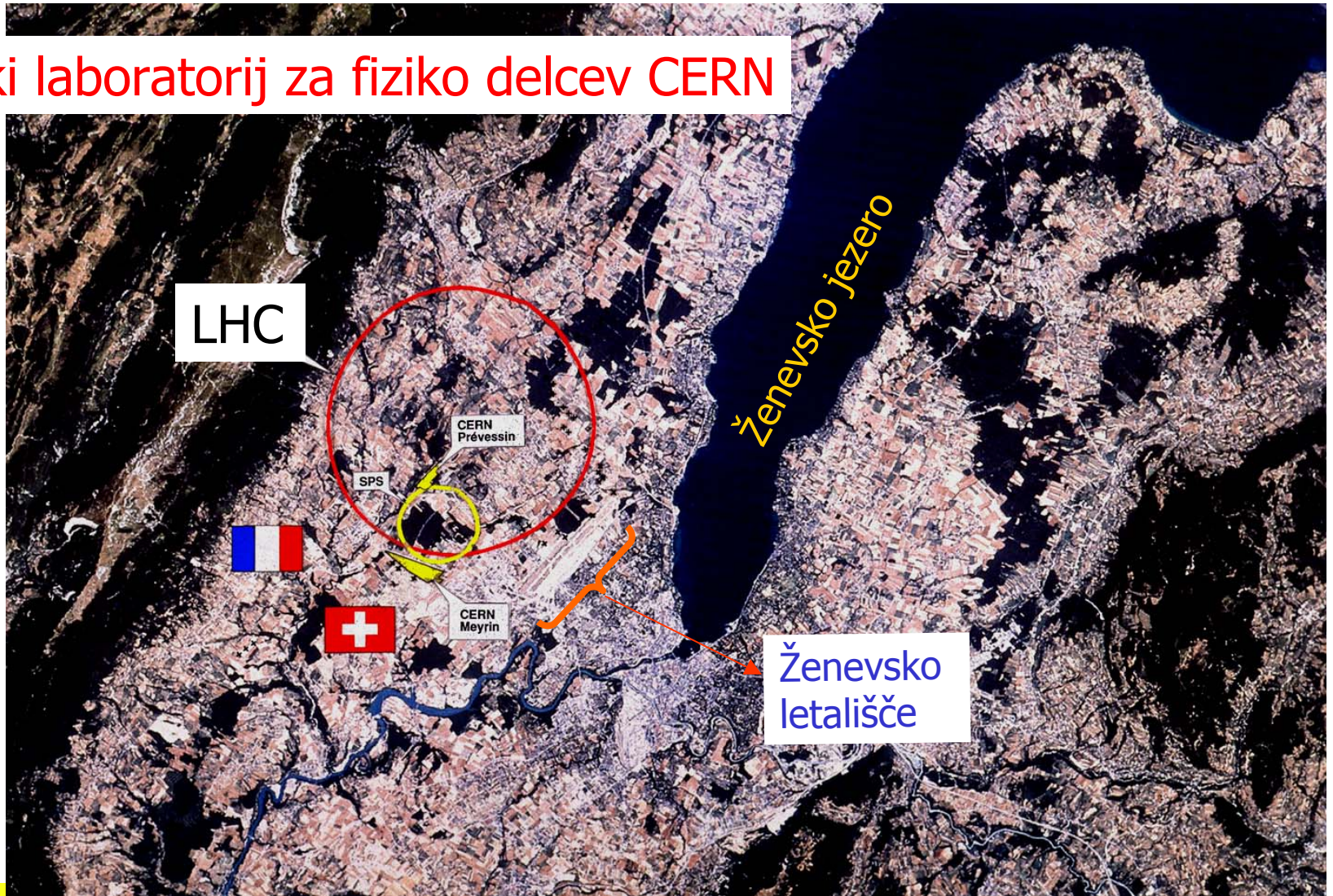
$$J = c_{12}c_{23}c_{13}^2 s_{12}s_{23}s_{13} \sin \delta \leq 4 \cdot 10^{-5}$$

$$(N_B - \bar{N}_B) / N_\gamma = \Delta B n_x / N_\gamma \sim \Delta B \sim 10^{-16}$$

$$\ll (N_B - \bar{N}_B) / N_\gamma = 10^{-10} - 10^{-9}$$

# Na lovu za Higgsovimi delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN

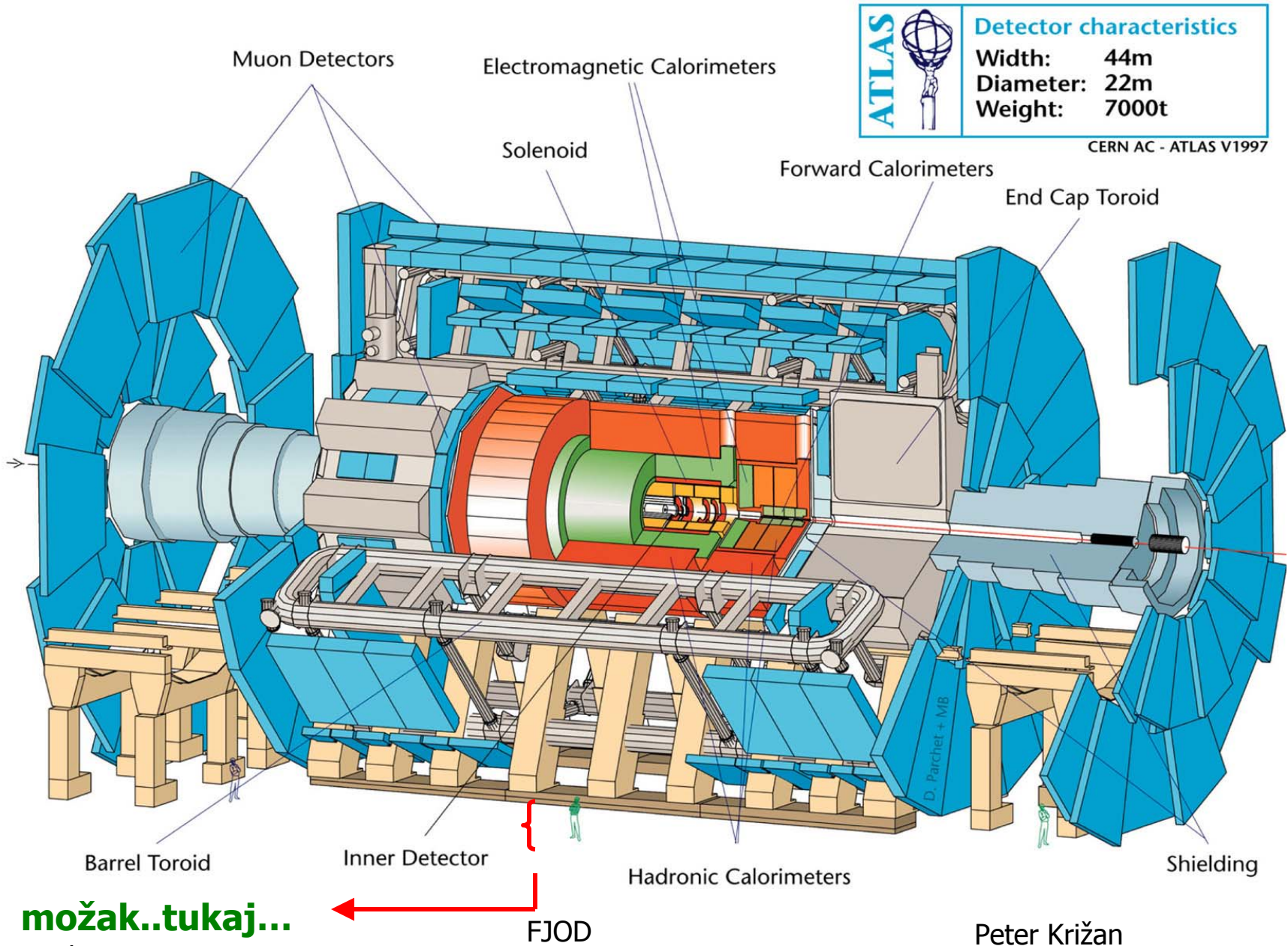


23. april 2007

FJOD

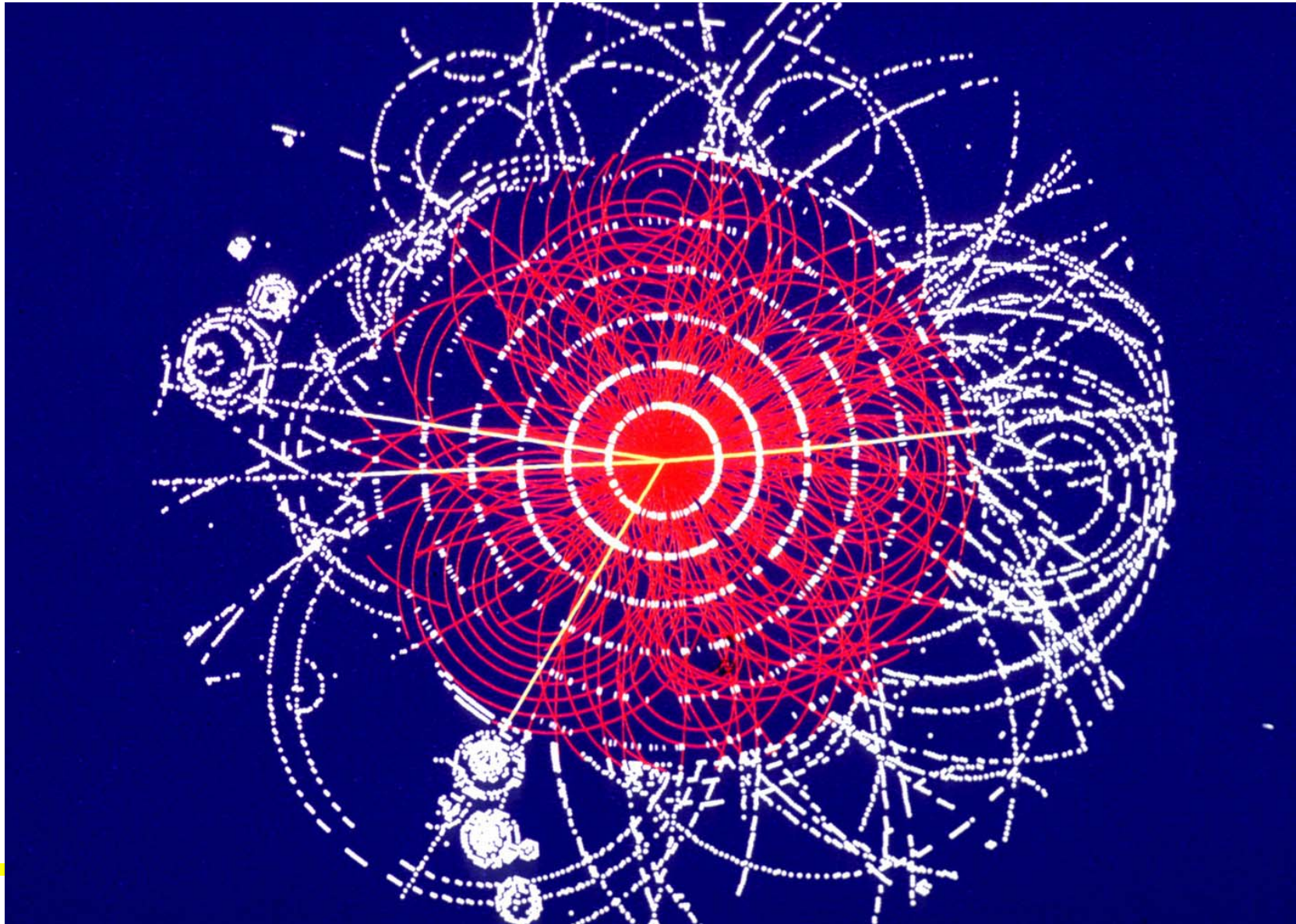
Peter Križan

# Detektor ATLAS ob LHC – v pripravi





# Računalniška simulacija: $H \rightarrow 4 \mu$ (ATLAS)



# Kako raziskati fiziko onkraj SM

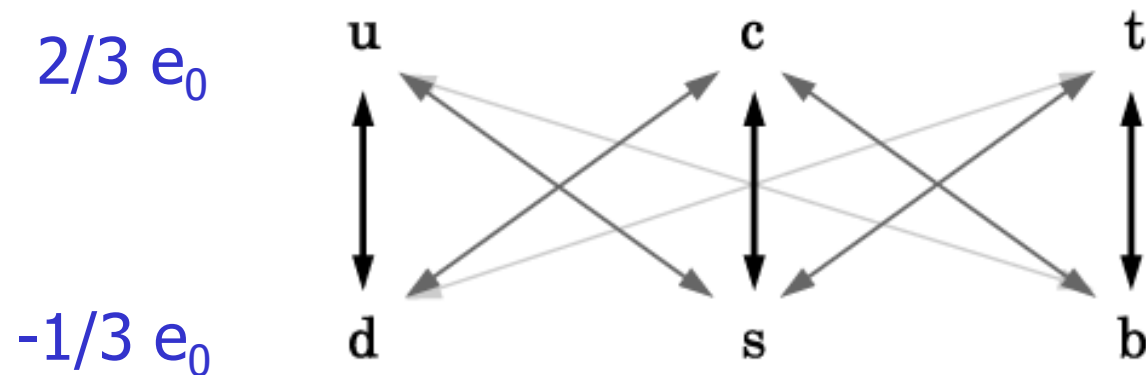
---

Stranski efekti lova za Higgsovim delcem:  
mogoče bomo našli nove vrste delcev, ki ne spadajo v SM...

Druga možnost: iskati odstopanja od napovedi SM  
z natančnimi meritvami pri nižjih energijah

# Prehodi med kvarki brez spremembe naboja

V SM dovoljeni le prehodi med kvarki, pri katerih se spremeni naboj ( $2/3 \leftrightarrow -1/3$ ).

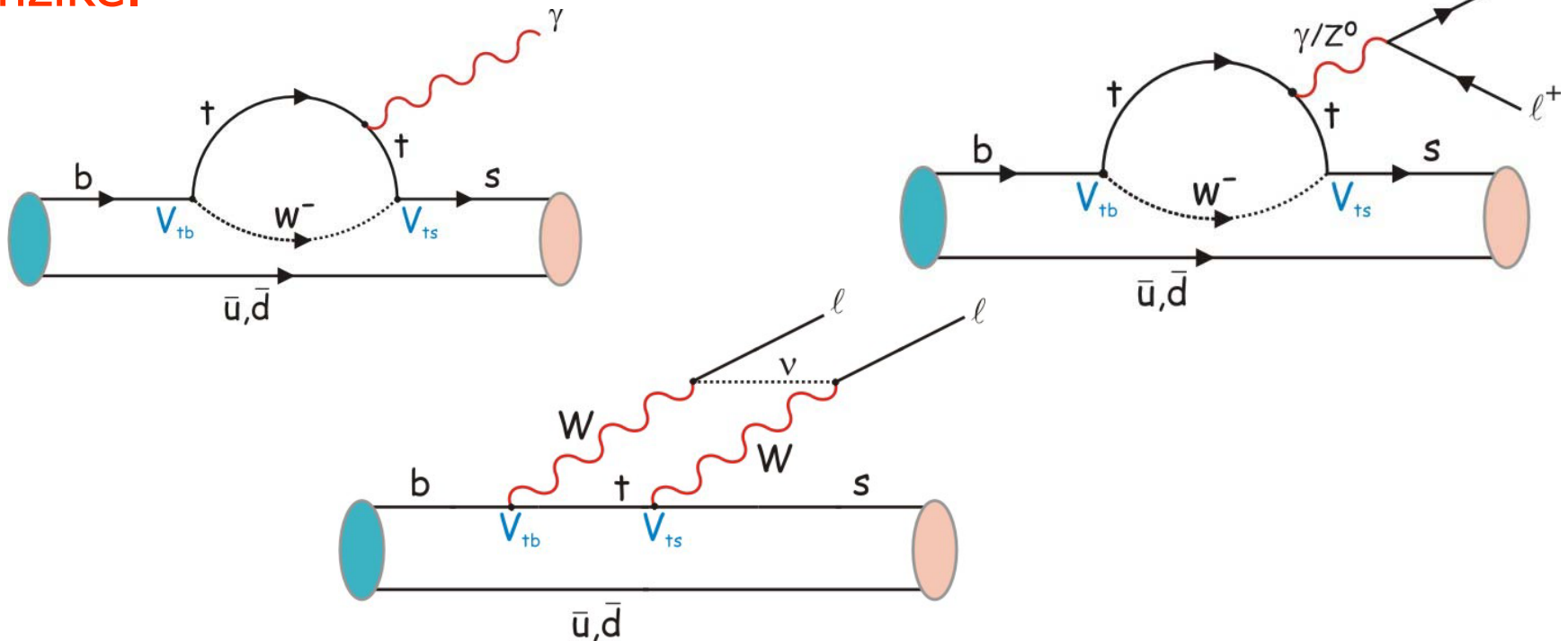


Prehodi med kvarki, pri katerih se ne spremeni naboj ( $-1/3 \rightarrow -1/3$ ), recimo  $b \rightarrow s$ ,  $b \rightarrow d$ , so v SM možni le v višjem redu, preko zank.



# Zakaj so zanimivi prehodi med kvarki brez spremembe naboja?

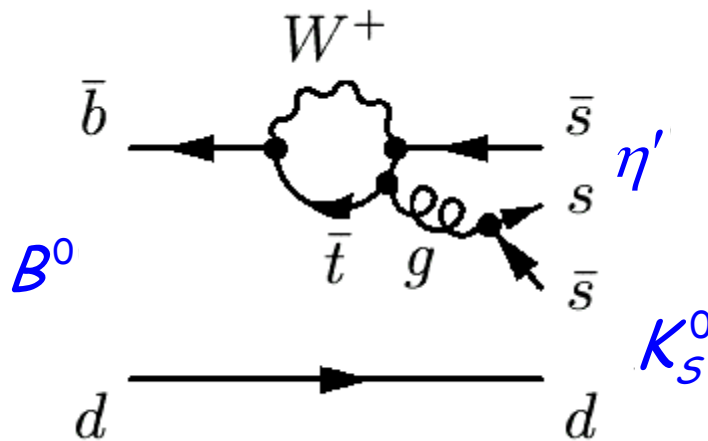
Ker so taki procesi (=Flavour changing neutral current - FCNC) prepovedani v drevesnem redu, potekajo le preko diagramov višjega reda z zankami. So idealni za iskanje fizikalnih pojavov izven Standardnega modela, t.i. Nove fizike.



# Kako bi lahko nova fizika prispevala k prehodu $b \rightarrow s$ ?

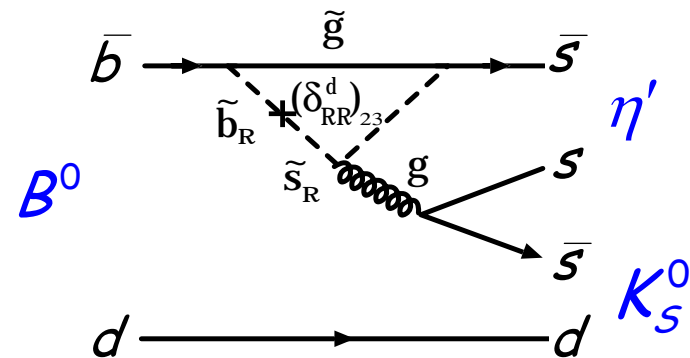
Na primer v procesu:

$$B^0 \rightarrow \eta' K^0$$



Običajen pingvinski diagram s kvarkom  $t$  v zanki

Diagram s supersimetričnimi delci v zanki



# Kakšni delci bi lahko nastopali v zanki?

---

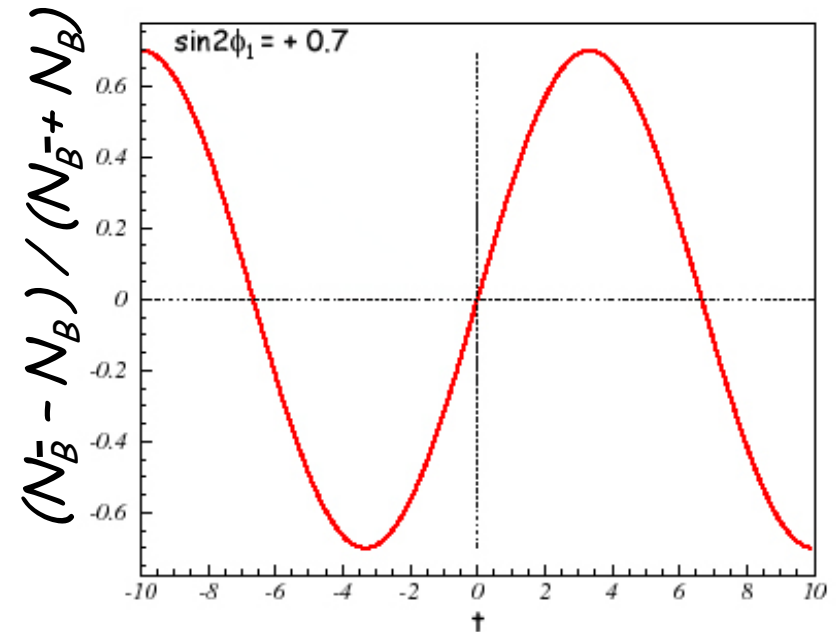
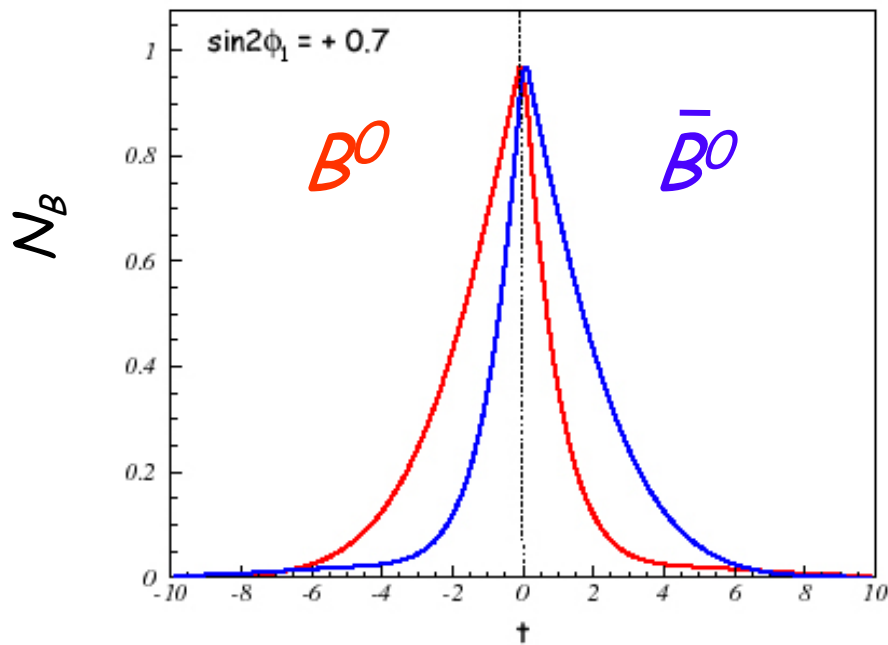
Zelo mikavna možnost: v zanki nastopajo supersimetrični partnerji osnovnih delcev.

elektron $e$	selektron $\tilde{e}$
kvark $b$	skvark $\tilde{b}$
foton $g$	fotino $\tilde{g}$

Take delce napovedujejo supersimetrične teorije, ki poskušajo združiti vse štiri interakcije, tudi gravitacijo.

Do sedaj nismo videli še nobenega supersimetričnega partnerja.

# Kršitev CP: asimetrija v razpadni verjetnosti



➔

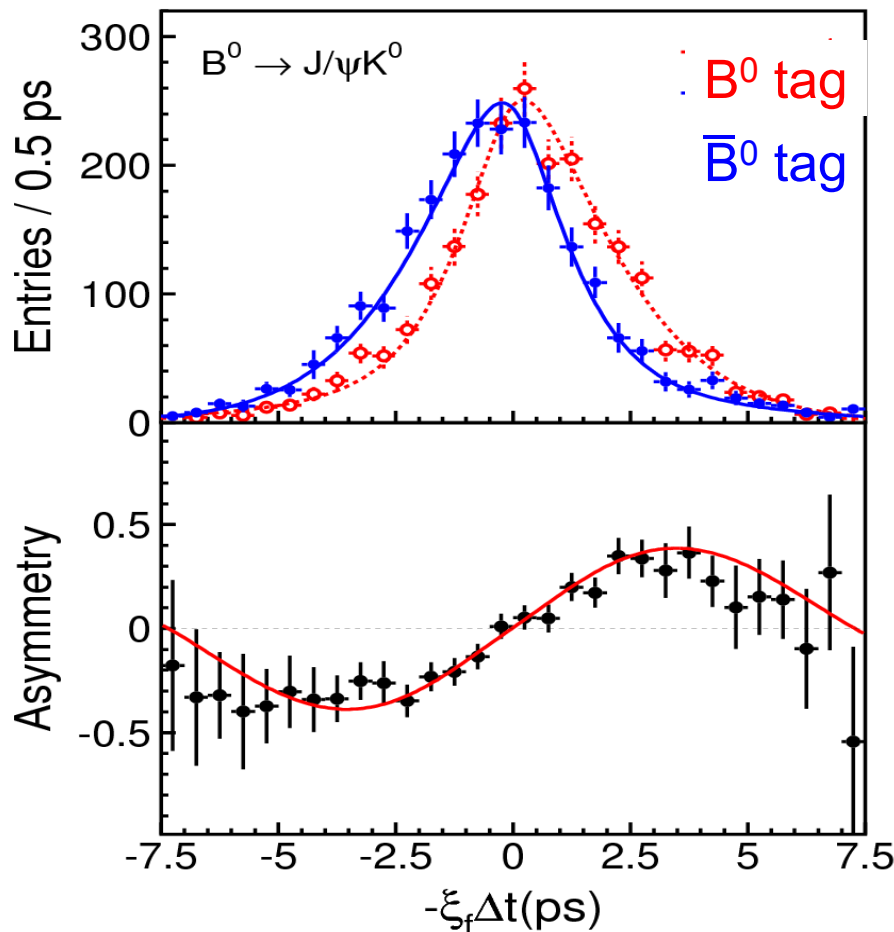
$$a(t) = \frac{P(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - P(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{P(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + P(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} = \xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta m_B t$$

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



# Kršitev CP pri razpadu $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$

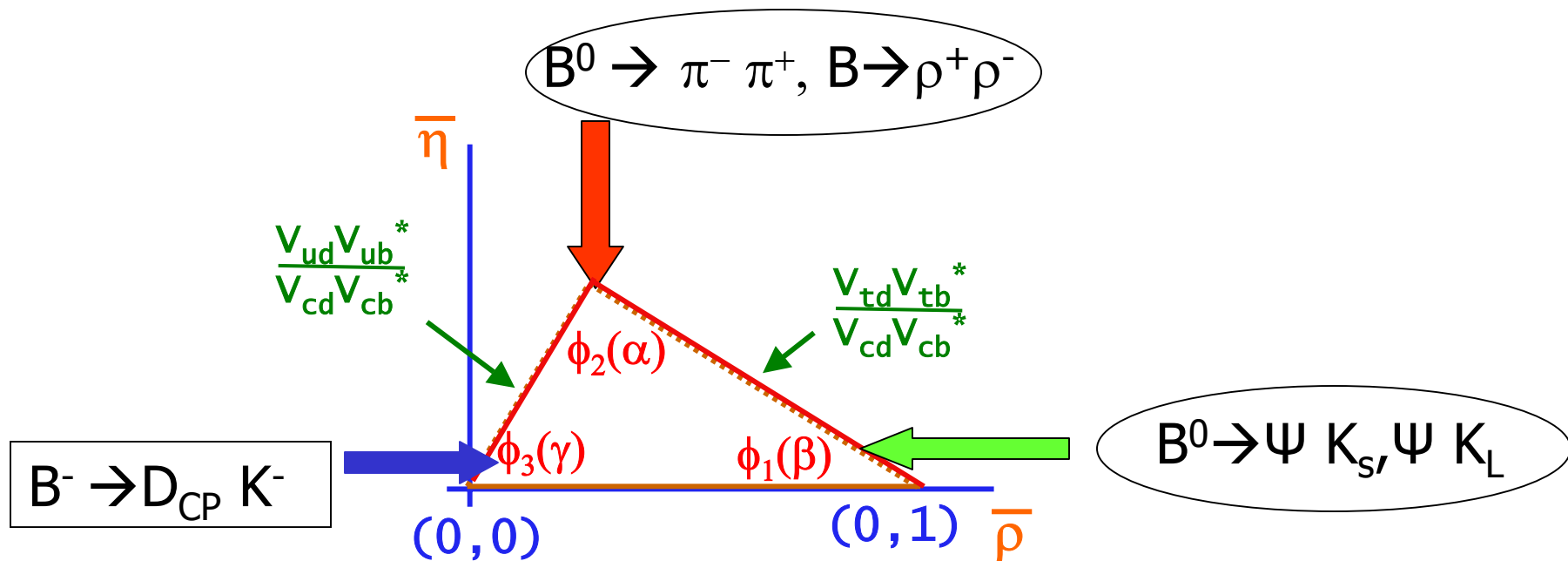
$$\sin 2\phi_1 = 0.652 \pm 0.039 \text{ (stat)} \pm 0.020 \text{ (syst)}$$



$$a(t) = \frac{P(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - P(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{P(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + P(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} =$$

$$= -\xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta m_B t$$

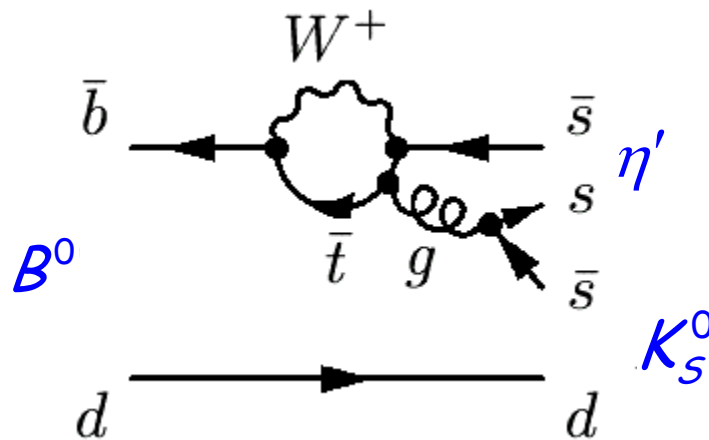
# Velika vprašanja



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?*

# Iskanje odstopanja od Standardnega modela pri kršitvi CP v prehodih $b \rightarrow s$

Napoved SM za asimetrijo pri razpadu:  $B^0 \rightarrow \eta' K^0$



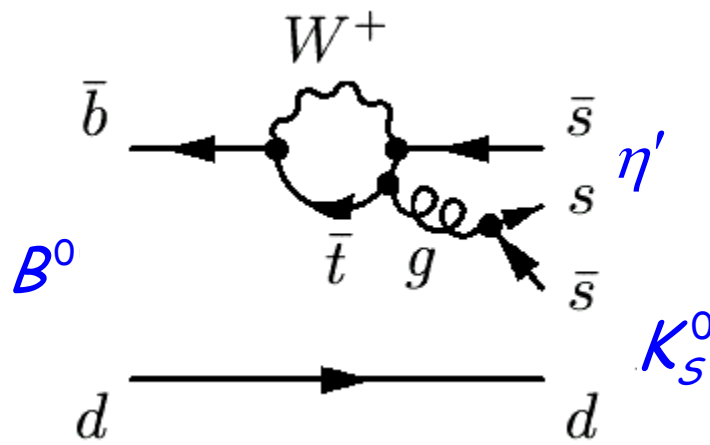
$$a_f = -\text{Im}(\lambda_f) \sin(\Delta m t)$$

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

Enaka vrednost kot pri razpadu  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ !

To je seveda res, če v zanki ne nastopajo novi delci. V splošnem je ima parameter  $\sin 2\phi_1$  lahko drugačno vrednost, označimo jo s  $\sin 2\phi_1^{\text{eff}}$

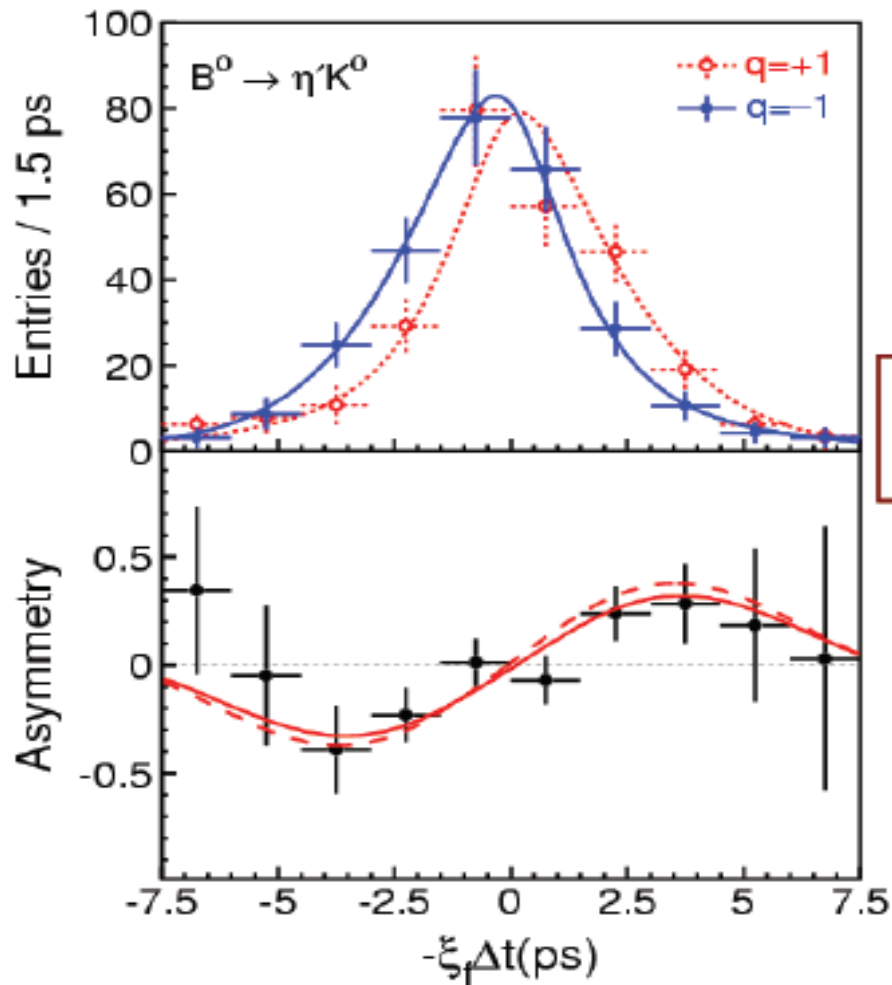
# Iskanje odstopanja od Standardnega modela pri kršitvi CP v prehodih $b \rightarrow s$



S primerjavo  $\sin 2\phi_1^{\text{eff}}$  z vrednostjo  $\sin 2\phi_1$  (iz razpada  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ ) poskušamo podobno kot pri ARGUSovi meritvi mešanja: s precizno meritvijo pri nizkih energijah skušamo odkriti pojave, ki so pomembni na bistveno višji energijski skali.

# Meritev kršitve CP v procesih $b \rightarrow s$

$\eta' K^0$  (background subtracted)



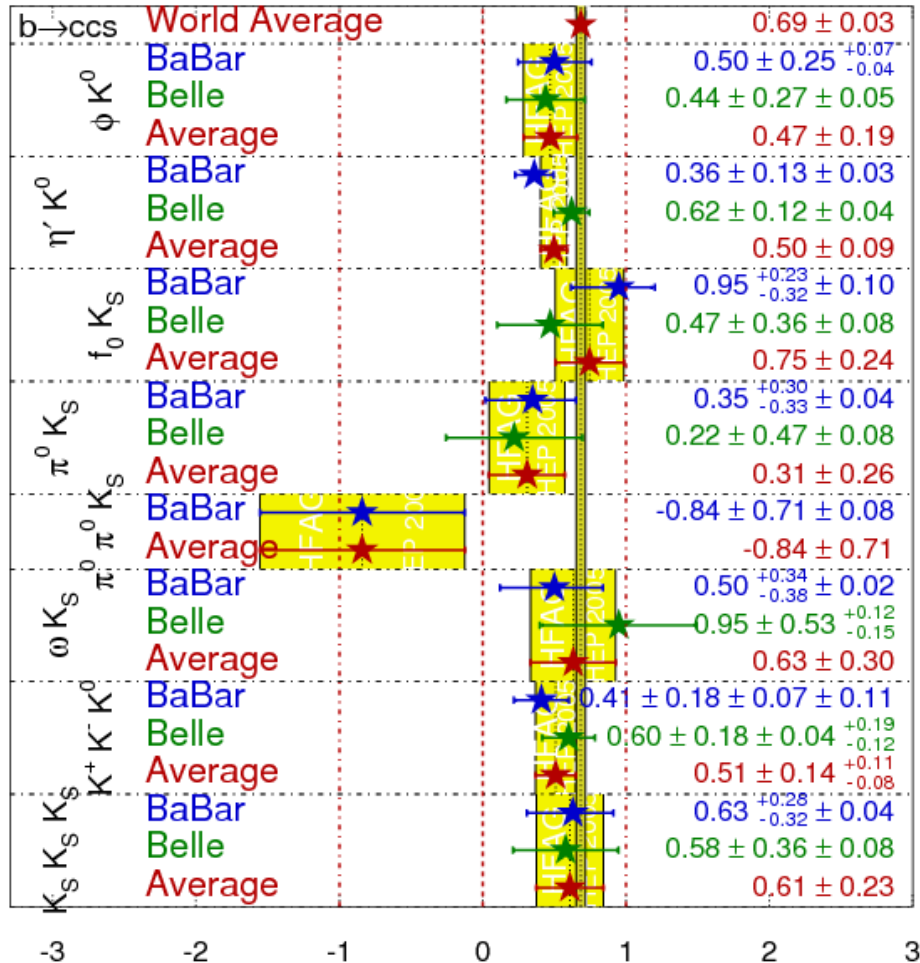
$$\sin 2\phi_1 = +0.62 \pm 0.12 \pm 0.04$$
$$A = -0.04 \pm 0.08 \pm 0.06$$

*significance*  $> 4\sigma$

# Premerili smo kopico razpadov tipa $b \rightarrow s$

$\sin(2\beta^{\text{eff}})/\sin(2\phi_1^{\text{eff}})$  **HFAG**  
HEP 2005  
PRELIMINARY

Belle data: hep-ex/0507037



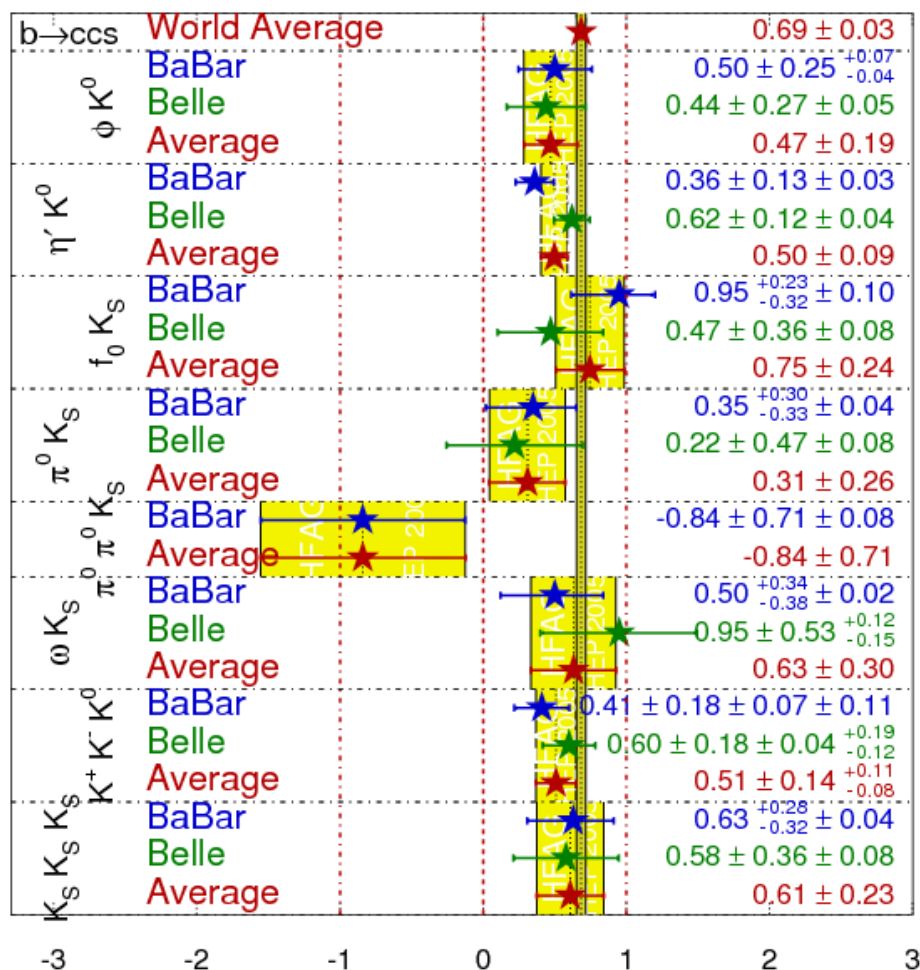
## Razpadi tipa $b \rightarrow s$

- $\phi K_S, \phi K_L$
- $\eta K_S, \eta K_L$
- $\omega K_S, f_0 K_S$
- $K_S K_S K_S, K_S K^+ K^-$
- $\pi^0 K_S, \pi^0 \pi^0 K_S$

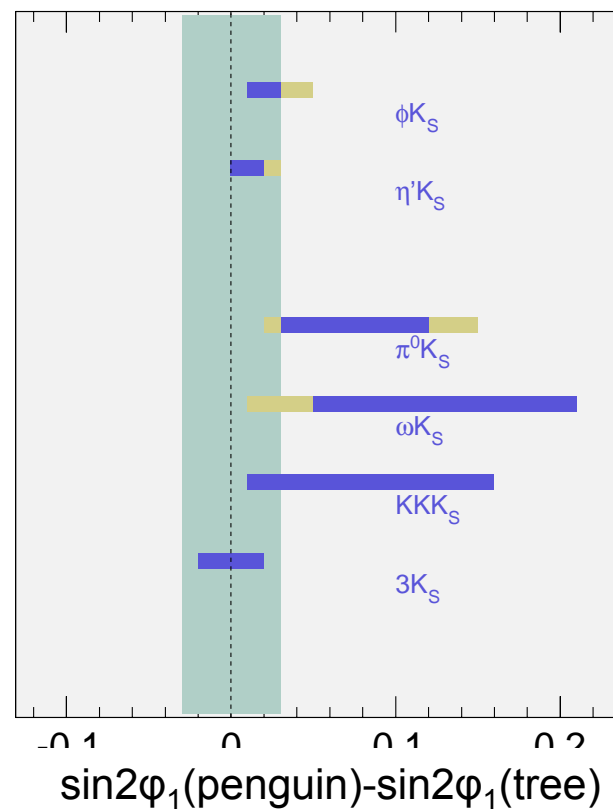
→ Večina sistematsko nižje kot vrednost  $\sin 2\phi_1$  iz meritev razpada  $B \rightarrow J/\psi K^0$

# Primerjava s teoretskimi napovedmi za $b \rightarrow s$

$\sin(2\beta^{\text{eff}})/\sin(2\phi_1^{\text{eff}})$  **HFAG**  
HEP 2005  
PRELIMINARY



Teoretski popravki (v okviru SM) k vrednosti  $\sin 2\phi_1$  kažejo v drugo smer



[Beneke, hep-ph/0505075]

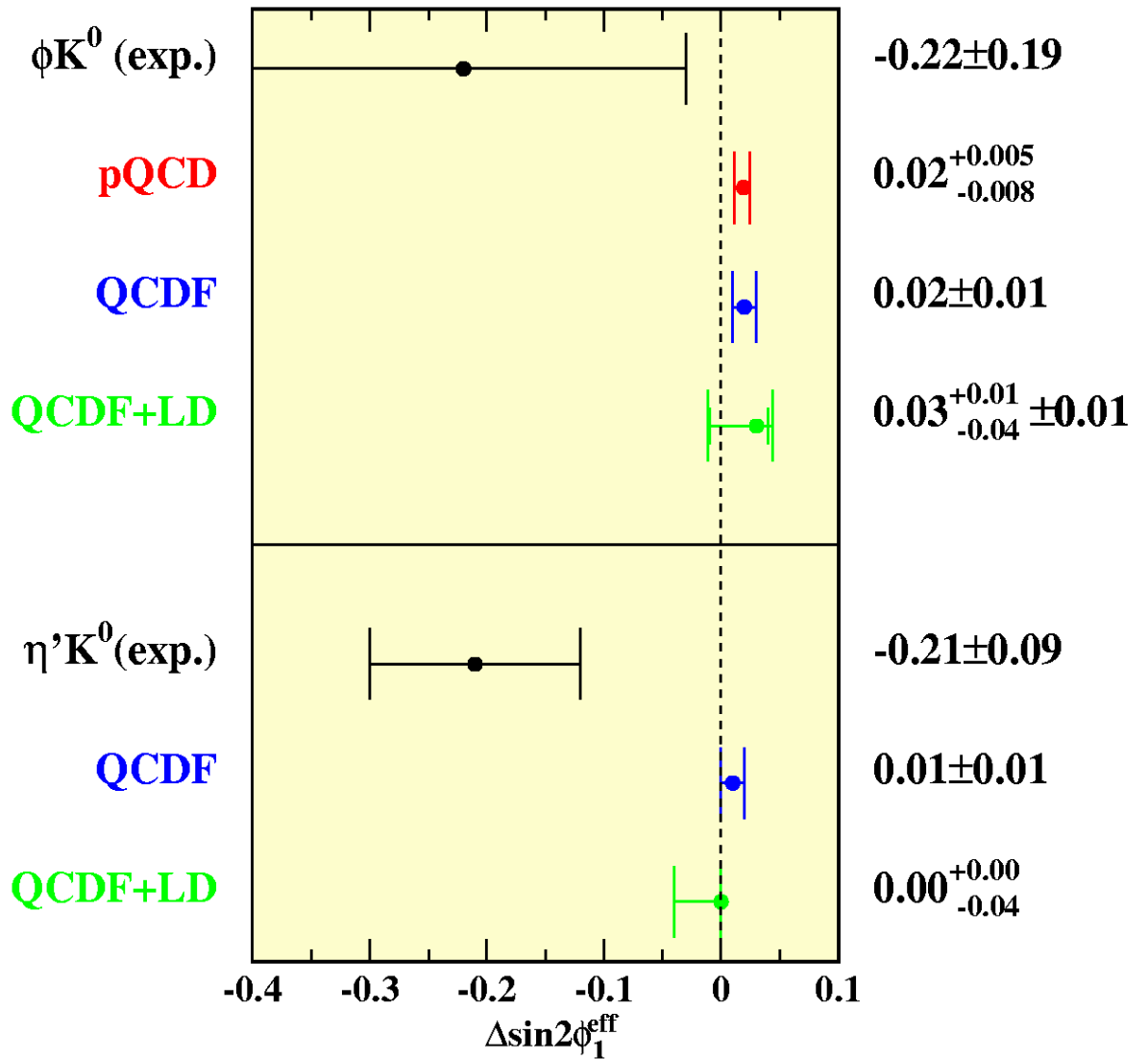
[Cheng, Chua, Soni, hep-ph/0506268]

# Ali tu diši po Novi fiziki?

$\Delta\sin 2\phi_1^{\text{eff}}$  in  $b \rightarrow s\bar{q}q$  golden modes (July 2005)

Teoretski popravki v SM so majhni in kažejo v obratno smer kot izmerjena odstopanja.

Toda: Zaradi majhnosti vzorcev je eksperimentalna statistična napaka velika!

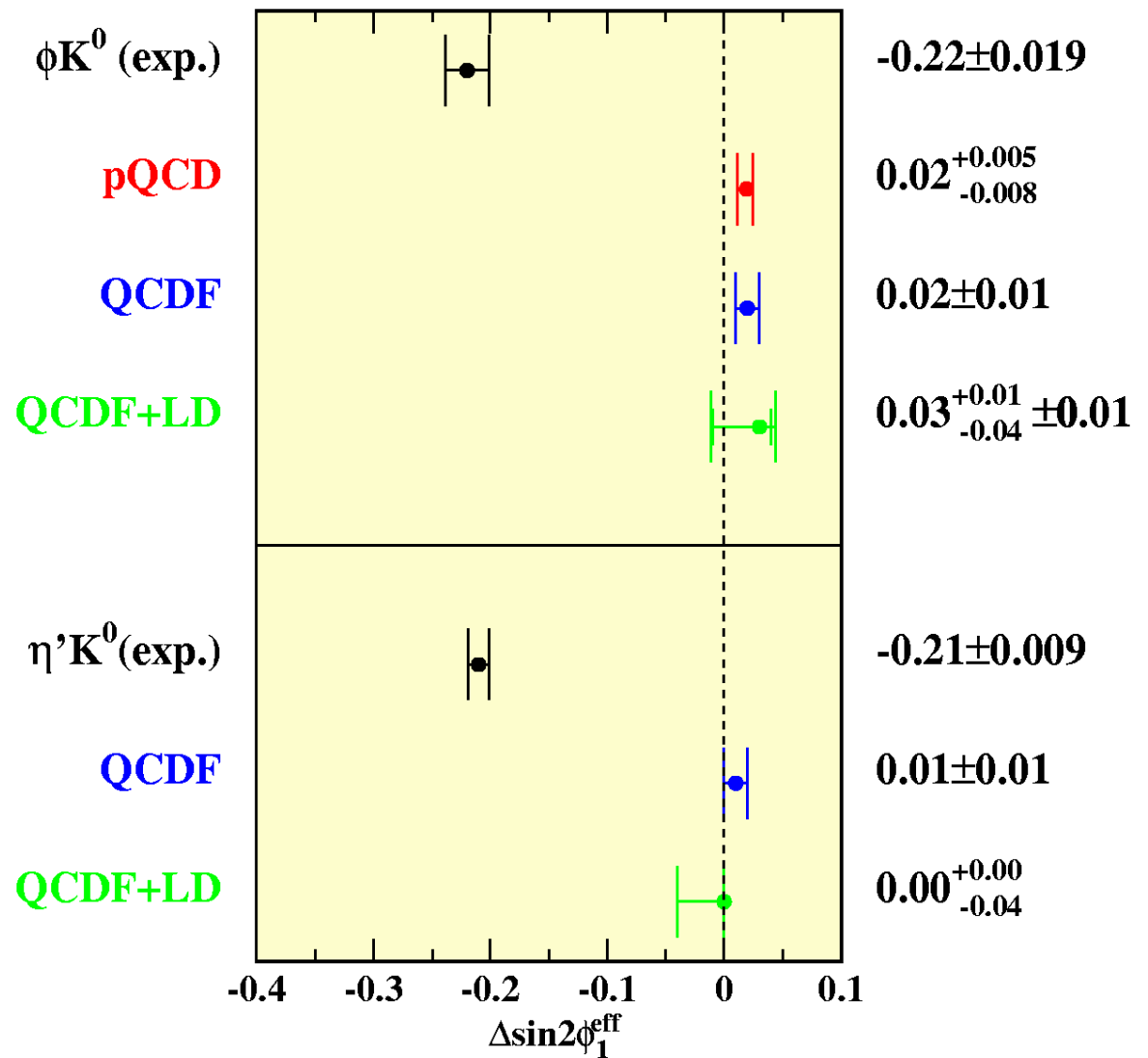




# Kaj pa s 100x več podatki?

Projection for Super B Factory ( $50\text{ab}^{-1}$ )

Naslednja generacija tovarne mezonov B, Super B, bo lahko odgovorila na to vrašanje.



# Motivacija za Super B

- Standard Model očitno ni dokončna teorija.

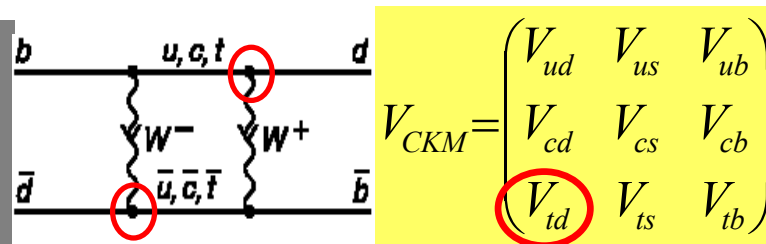
- končna  $m_\nu$
- gravitacija



- Če bo LHC našel znake za novo fiziko na skali nekaj TeV,
  - bo potrebno raziskati njeno okusno strukturo. Super B je najboljšo orodje za to.

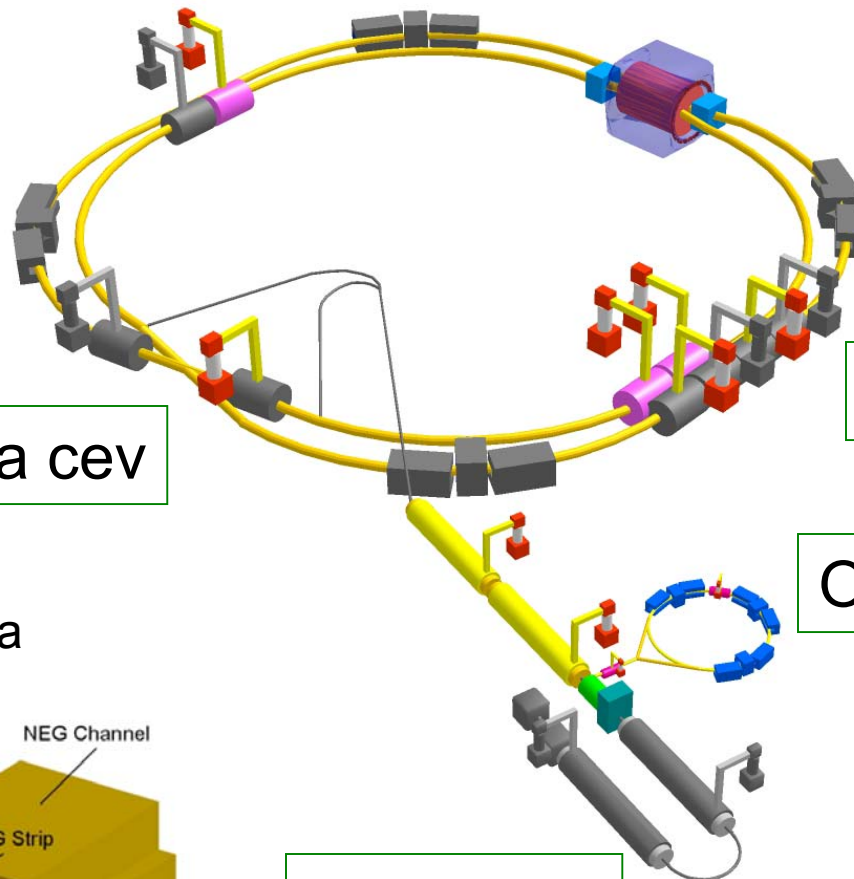
## Primerjava s kvarkom t

- |                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Prva ocena mase: mešanje BB       | → ARGUS       |
| Direktna produkcija, mass, širina | → CDF/D0      |
| Izvendiagonalne sklopitve, faze   | → BaBar/Belle |



- Ce bo LHC našel samo Higgsov bozon, kot ga predvideva SM
  - bo iskanje odstopanj od SM v fiziki okusov eden najboljših načinov za iskanje nove fizike.

# Super B v KEK



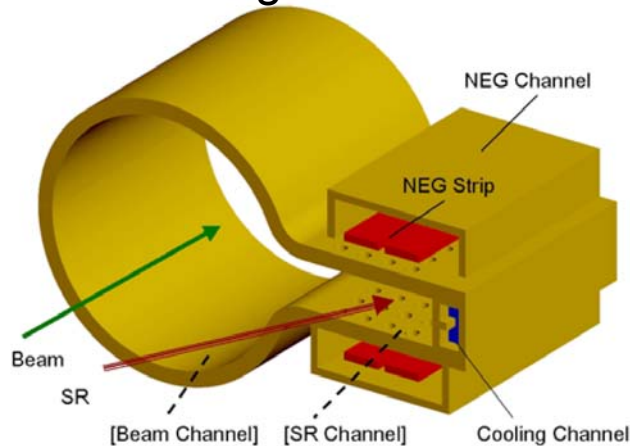
Interakcijska točka  
Rakovo križanje

Več RF moči

Obroč za dušenje

Nova žarkovna cev

Namen: zmanjšanje  
elektronskega oblaka



Linac:  
prenovitev

**Cilj:**  
 **$L = 4 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{s}$**

# Belle Upgrade for Super-B

