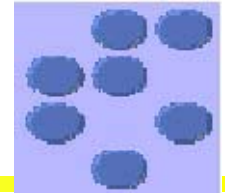




UNIVERZA V LJUBLJANI



# Na lovu za eksotičnimi delci

Peter Križan

*Fakulteta za matematiko in fiziko UL*

*Institut J. Stefan*

**Božični simpozij, Maribor, 16.12.2003**

---

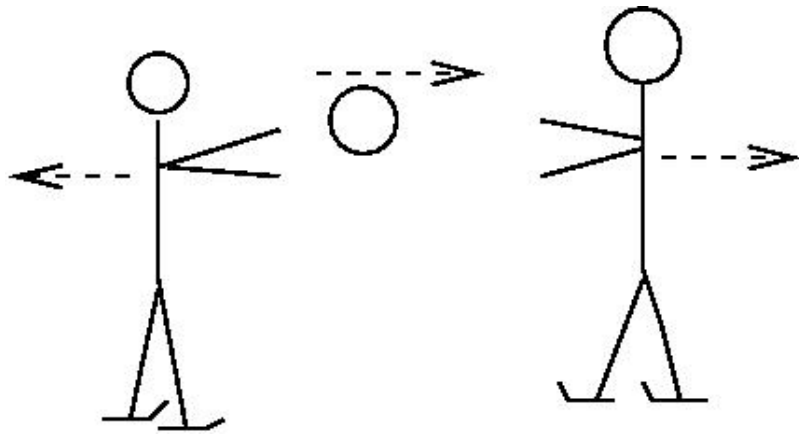
**Uvod: Sile med osnovnimi delci, močna sila**

**Običajna in eksotična vezana stanja  
kvarkov in gluonov**

**Iskanja eksotičnih stanj s spektrometrom  
Belle: stanja  $X(3872)$ ,  $D_{sJ}$ , pentakvarki**

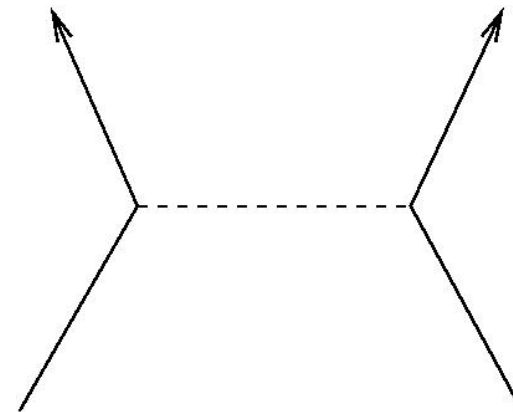
**Pogled naprej**

# Sile med osnovnimi delci: izmenjava nosilcev sile



**Drstalca na ledu, ki si podajata težko žogo, se oddaljujeta eden od drugega.**

**Osnovni delci sodelujejo (interagirajo) med sabo preko nosilcev sile (interakcije)**



# Standardni model 1

<b>Sila - interakcija</b>	<b>nosilci sile</b>	<b>doseg</b>
<b>elektromagnetna</b>	<b>foton <math>g</math></b>	<b>neskončen</b>
<b>šibka</b>	<b>šibki bozoni <math>W^+, W^-, Z^0</math></b>	<b>zelo kratek</b>
<b>močna</b>	<b>gluoni <math>g</math></b>	<b>kratek</b>

# Standardni model 2

Osnovni delci	1. družina	2. družina	3. družina
kvarki	u,d	s,c	b,t
leptoni	e, $\nu_e$	$\mu, \nu_\mu$	$\tau, \nu_\tau$

# Barioni: vezana stanja treh kvarkov

---

proton: kvarki <b>uud</b>	$m_p$
nevtron: kvarki <b>udd</b>	$\sim m_p$
$\Delta^{++}$ : kvarki <b>uuu</b>	$\sim 1.3m_p$
$\Lambda$ : kvarki <b>uds</b>	$1.1 m_p$

# Mezoni: vezana stanja **kvarkov** in **antikvarkov**

---

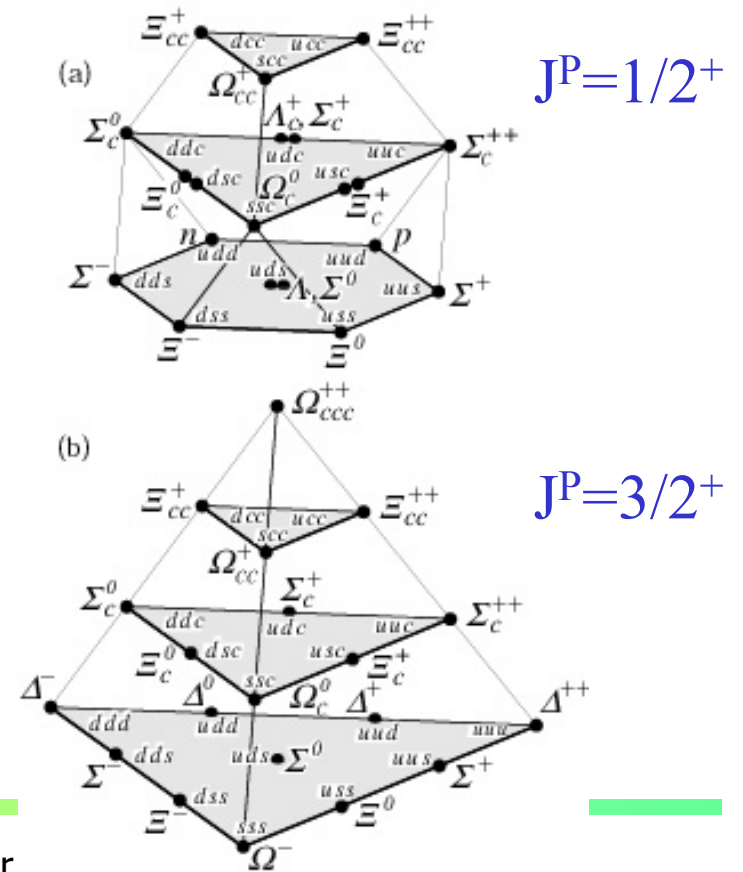
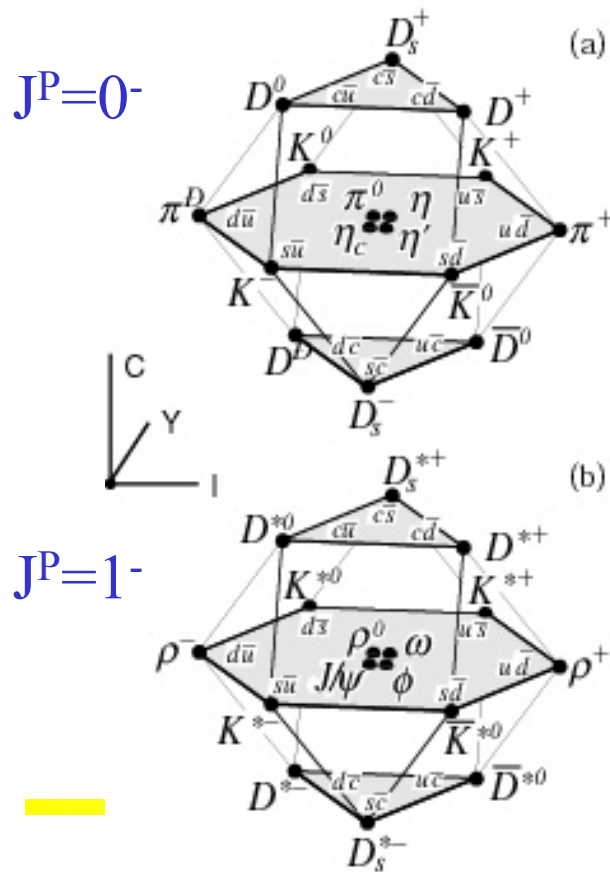
$\pi^+$ : kvark <b>u</b> + antikvark <b>d</b>	$1/7 m_p$
$K^+$ : kvark <b>u</b> + antikvark <b>s</b>	$1/2 m_p$
$K_S$ : kvark <b>d</b> + antikvark <b>s</b>	$1/2 m_p$
$\phi$ : kvark <b>s</b> + antikvark <b>s</b>	$1.1 m_p$
$D^+$ : kvark <b>c</b> + antikvark <b>d</b>	$2 m_p$
$J/\psi$ : kvark <b>c</b> + antikvark <b>c</b>	$3 m_p$
$B^0$ : kvark <b>d</b> + antikvark <b>b</b>	$5.5 m_p$

# 'Periodni sistem' vezanih stanj

Vezana stanja z istim spinom in parnostjo in podobno maso razvrstimo v multiplete SU(3)

**kvark + antikvark: oktet, triplet**

**trije kvarki: deкупlet, oktet**

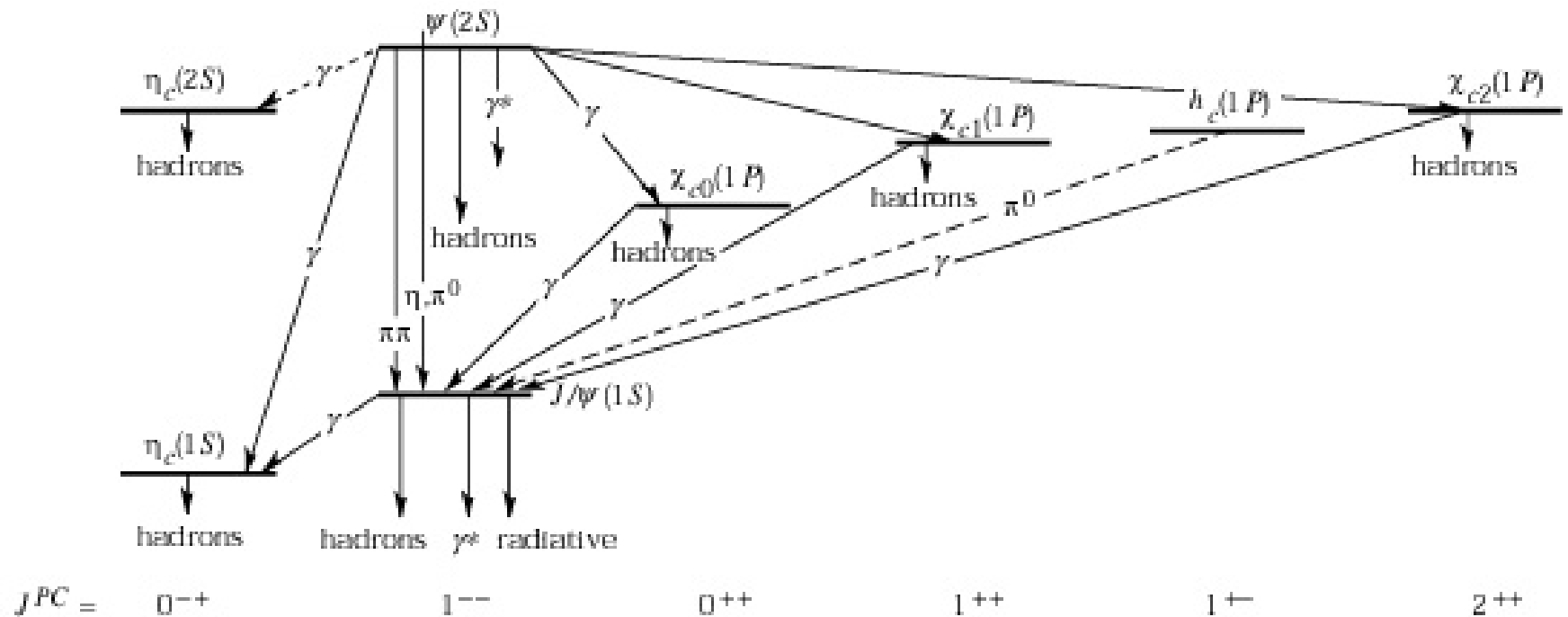




# 'Periodni sistem' vezanih stanj 2

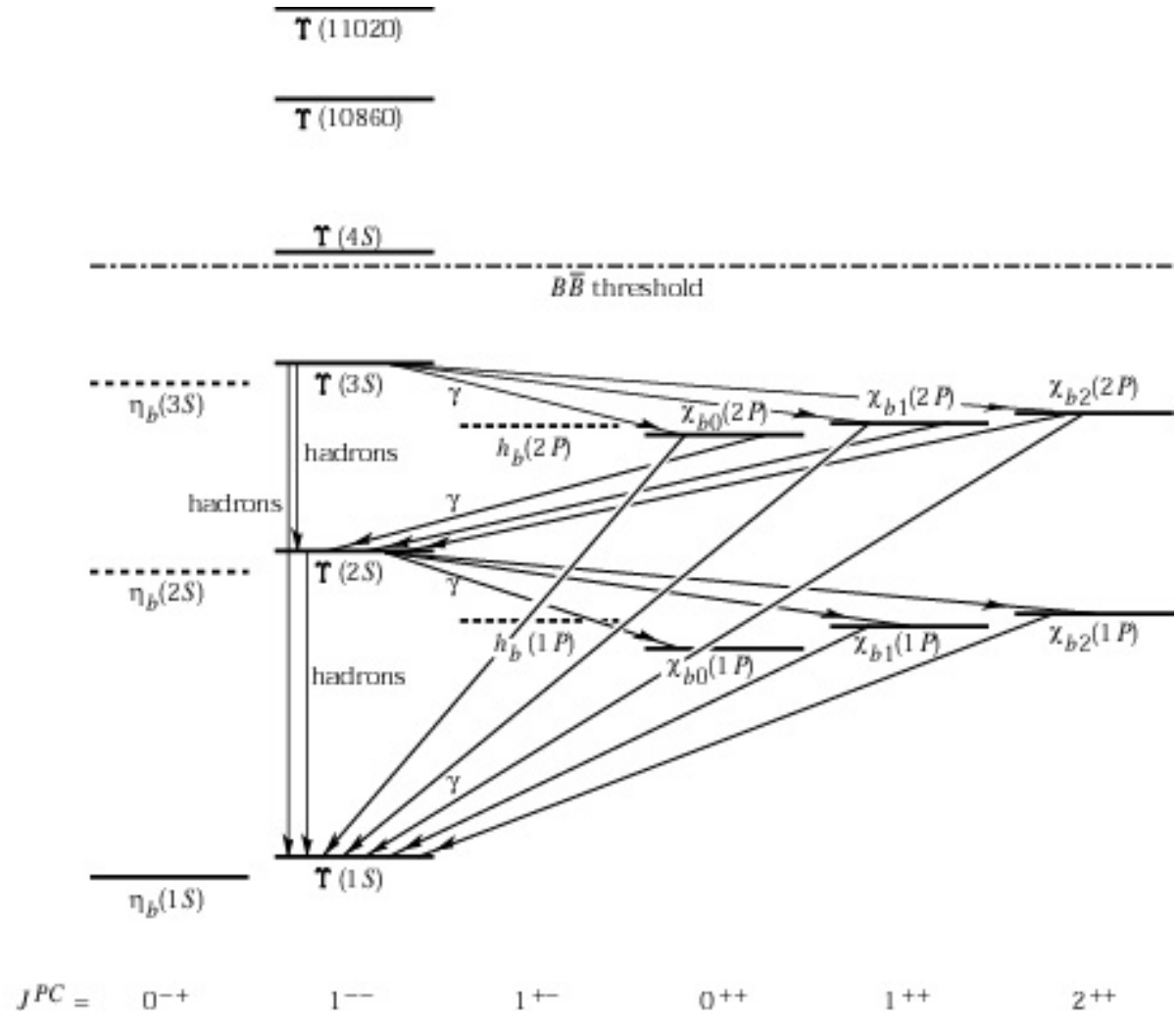
Spekter vezanih stanj para **kvarka c** in antikvarka c z različnim spinom in parnostjo: podobna struktura kot spekter pozitronija ali vodikovega atoma.

Iz spektra stanj sklepamo na podrobnosti potenciala med kvarkom in antikvarkom.



# 'Periodni sistem' vezanih stanj 3

Spekter vezanih stanj para kvarka **b** in antikvarka **b**



# Vezana stanja kvarkov

---

Kvarke veže v barione in mezone barvna (močna) sila. Vezana stanja so **brezbarvna**.

Mezoni: **barva**+**anti-barva**

Barioni: kombinacija treh barv  
**rdeča** + **modra** + **zelena** = bela

Močna sila postane **manj močna** pri **visokih energijah** = manjših razdaljah (**asimptotska svoboda**, letošnja Nobelova nagrada), pri nizkih energijah pa **perturbacijski račun odpove**.

# Kaj pa ostale kombinacije?

---

Načeloma so možne tudi ostale brezbarvne kombinacije:

dva kvarka + dva anti-kvarka = **tetrakvark**

štirje kvarki + en anti-kvark = **pentakvark**

dva gluona: **gluonij (glueball)**

Iz lastnosti takšnih stanj bi se lahko precej naučili o močni interakciji pri vezanih stanjih (nizkih energijah).

Nobene take kombinacije do sedaj niso odkrili

→ **"eksotična stanja"**

# Kako iščemo eksotična stanja?

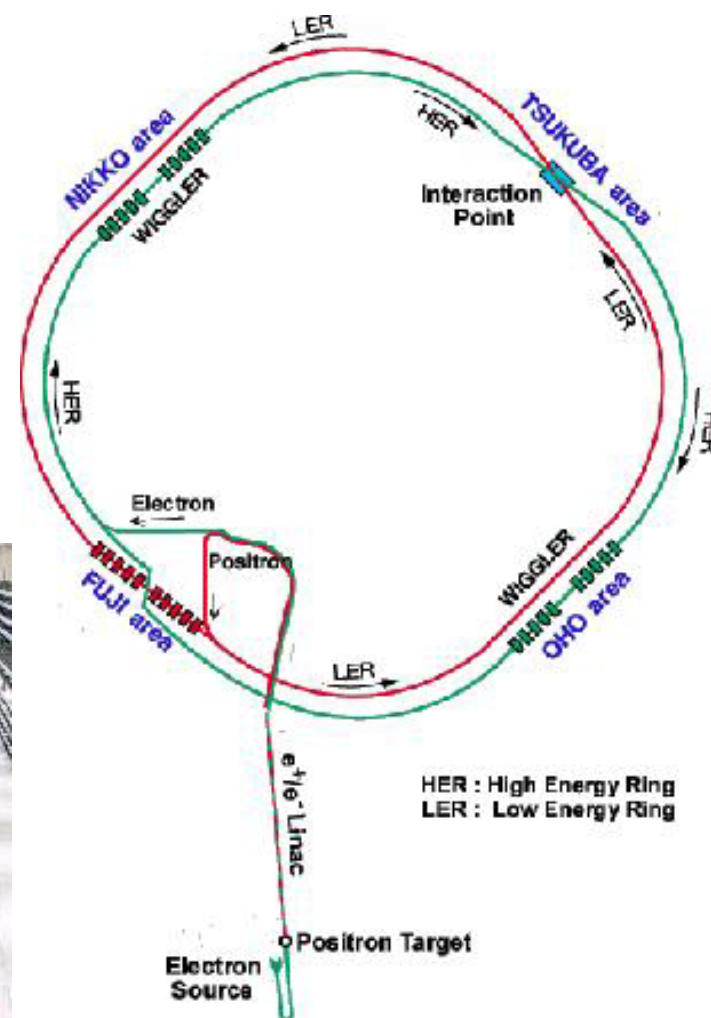
---

**Pri interakcijah visokoenergijskih:**

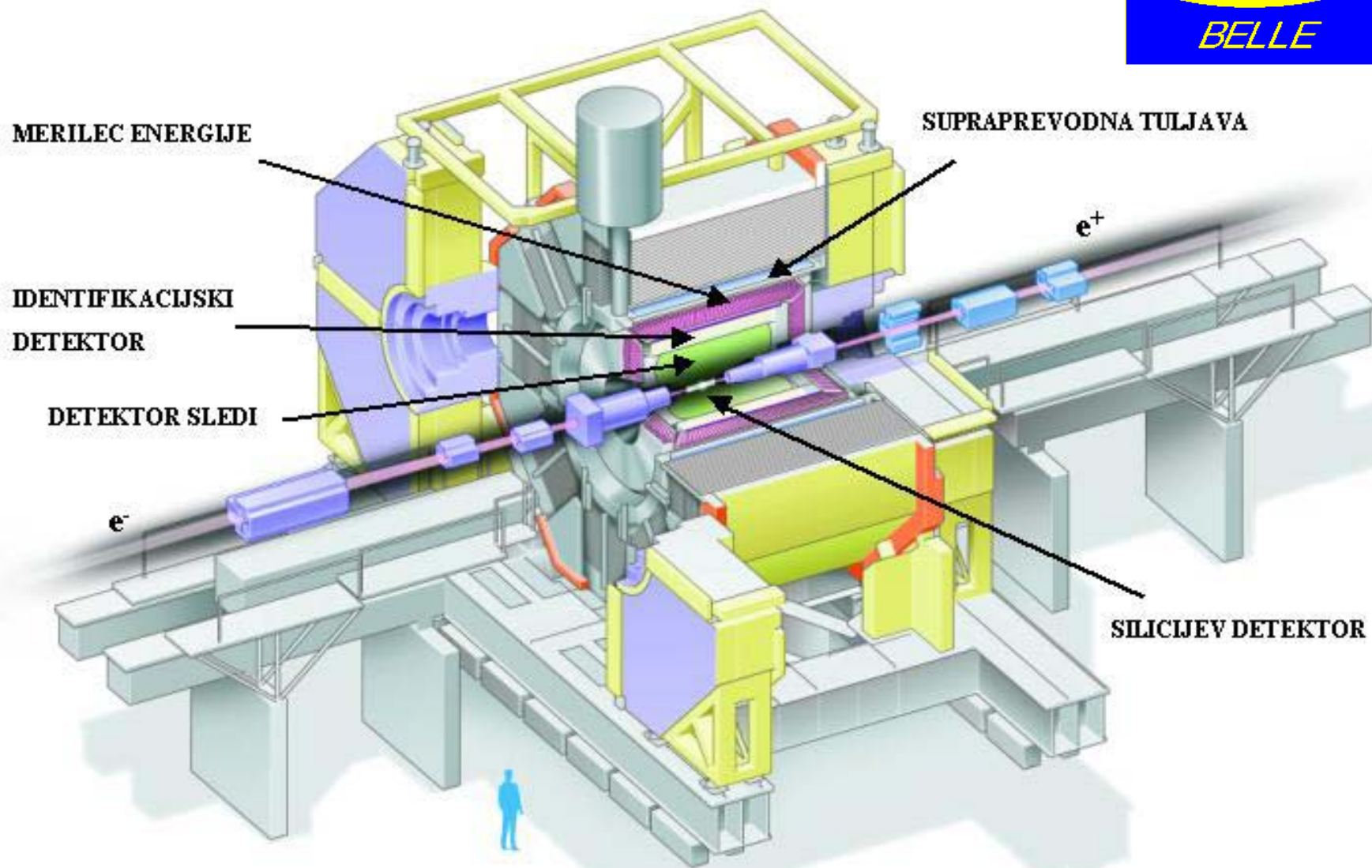
- **protonov z jedri**
- **fotonov z jedri**
- **elektronov z jedri**
- **elektronov s pozitroni**

**Danes: poročilo o meritvah s spektrometrom Belle ob elektronsko-pozitronskem trkalniku KEKB v Tsukubi.**

# KEKB: trkalnik elektronov in pozitronov

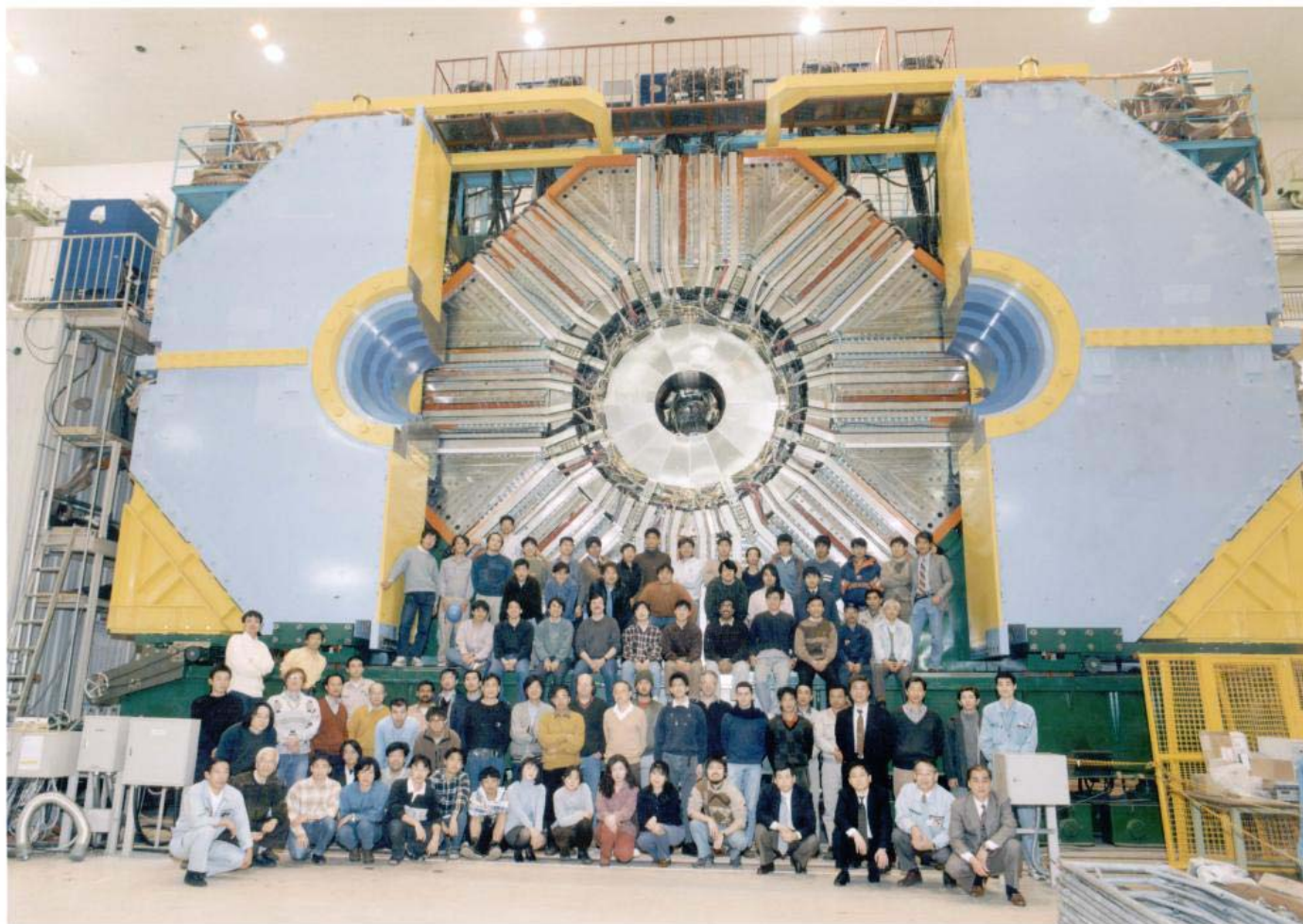


# Spektrometer Belle





# Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine



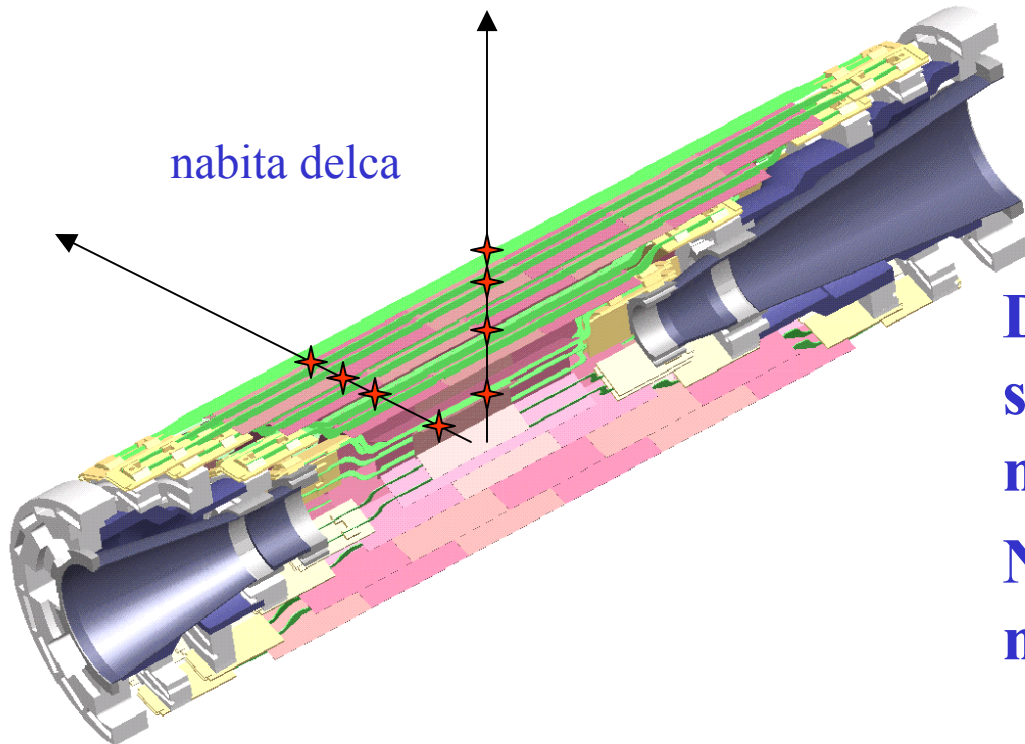
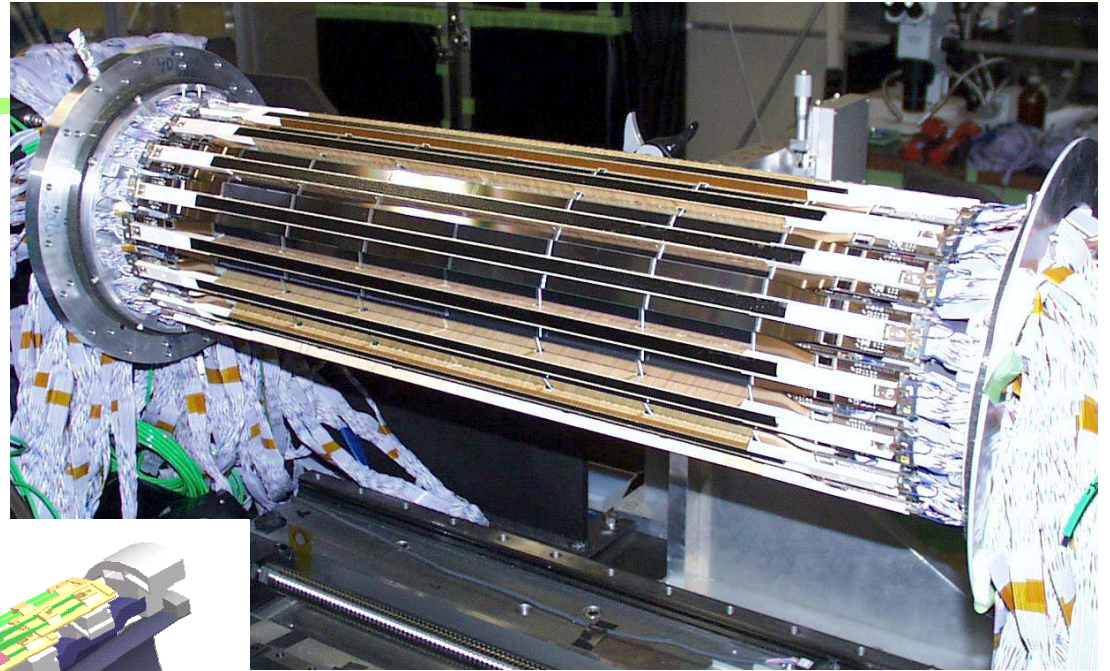
16.december 2004

Božični simpozij, Maribor



# Detektor verteksov

Eden bistvenih elementov aparature je detektor verteksa, točke, kjer so mezoni B razpadli.



Detektor je sestavljen iz tankih silicijevih plošč z gosto nanešenimi elektrodami.

Natančnost meritve mesta preleta nabitega delca: **10 mikronov!**

# Detektor verteksov 2



**Zelo občutljiv kos aparature! Nепrestano moramo meriti izpostavljenost sevanju, za sprotni nadzor smo lani poleti med sestavljanjem dodali polprevodniške senzorje (RADFET).**

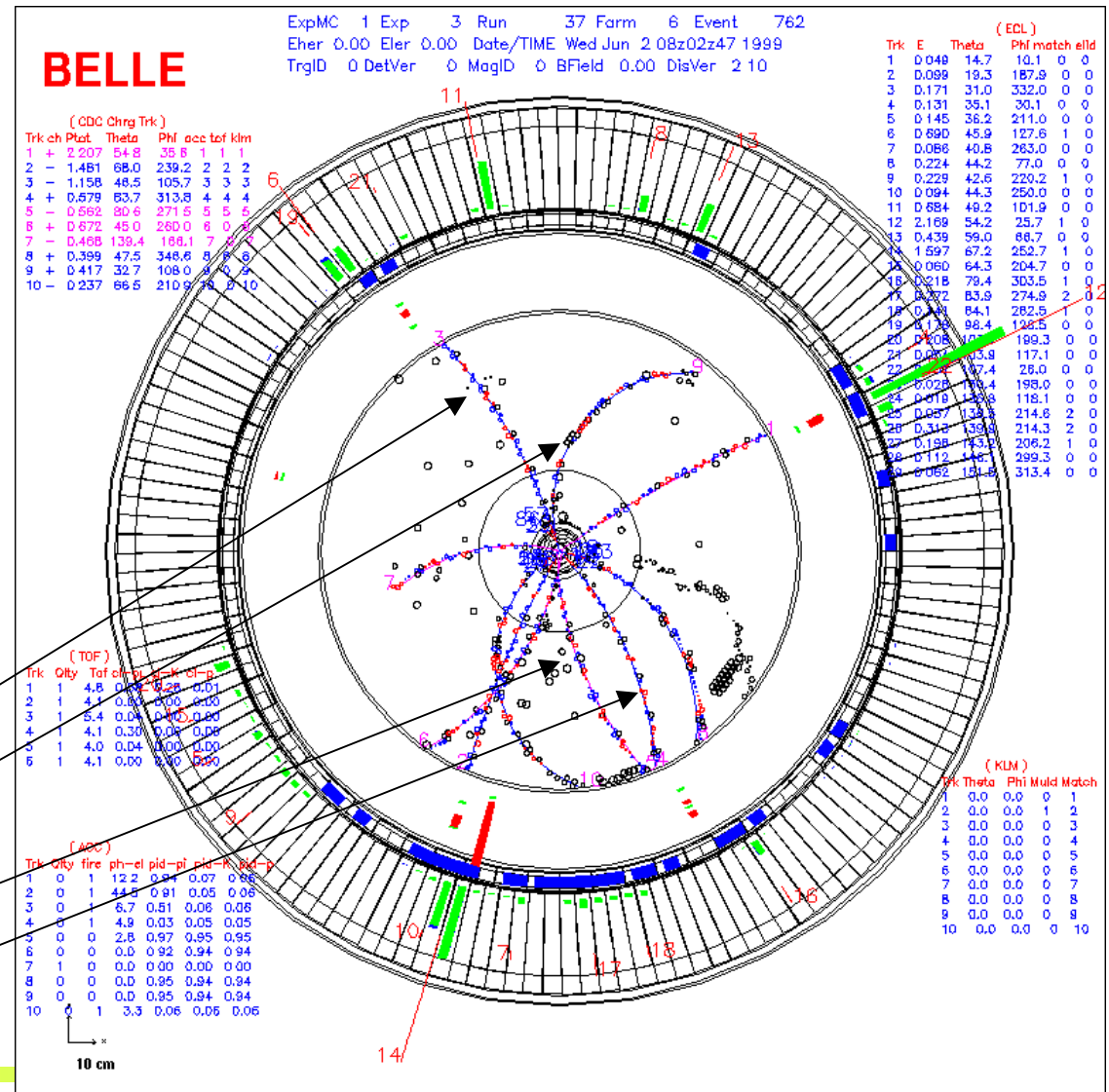
# Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

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

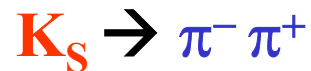
$$K_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

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



# Kaj izmerimo z detektorjem? -2

Kako vemo, da je potekla spodnja reakcija?

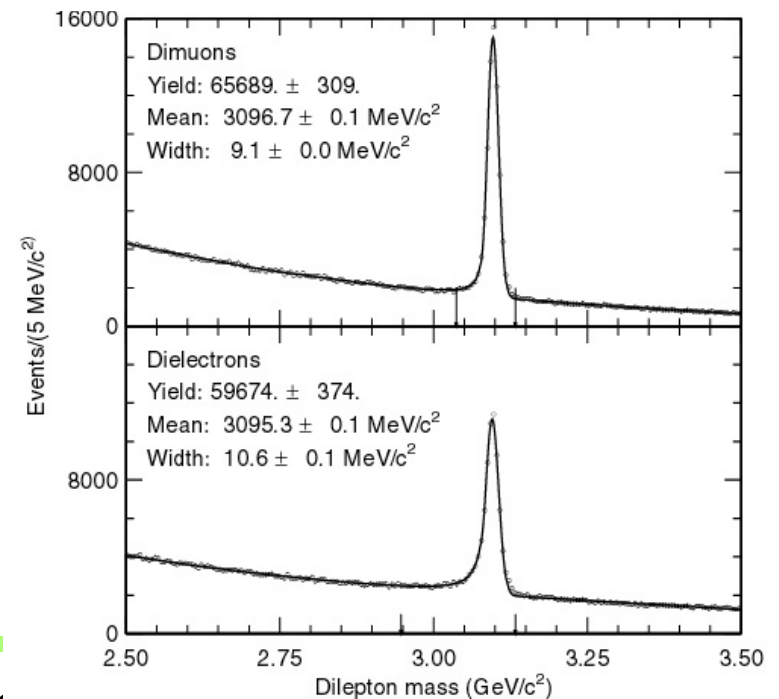
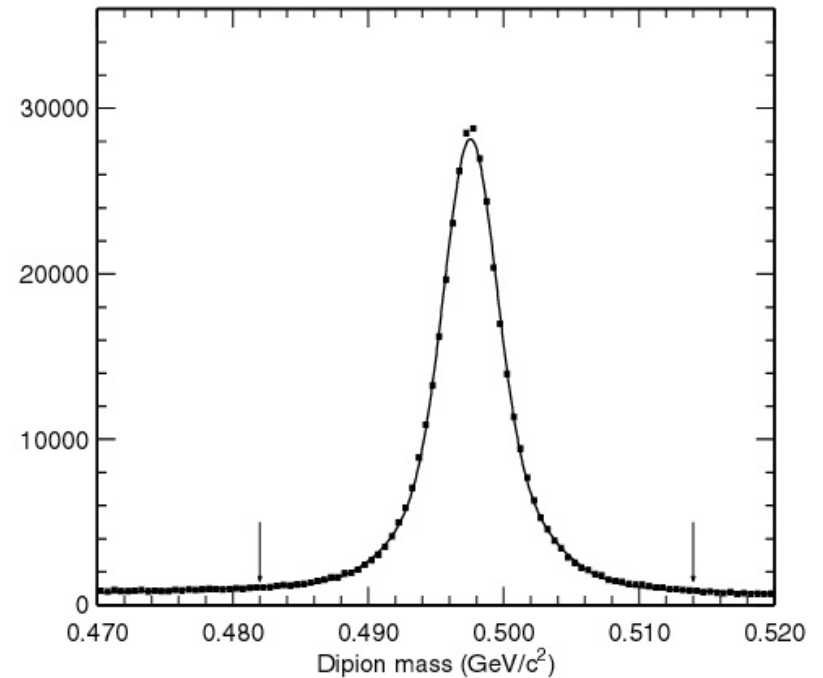


Za para  $\pi^- \pi^+$  in  $\mu^- \mu^+$  izračunamo invariantno maso:

$$M^2 c^4 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

$M c^2$  mora biti za  $K_S$  blizu **0.498 GeV**,

za  $J/\psi$  pa blizu **3.1 GeV**.



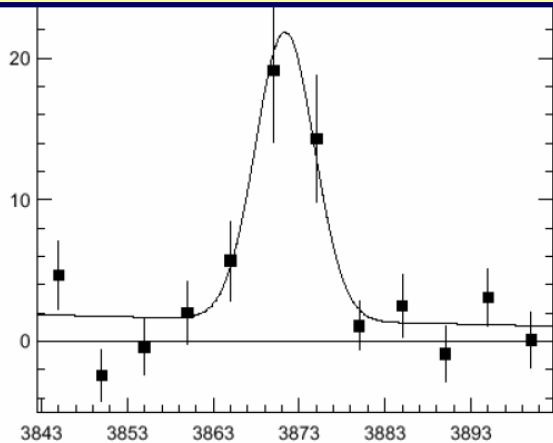
# Novo stanje: X(3872)

Pri smo Belle opazili **nevo stanje**,  
ki razpade v  $J/\psi \pi^+\pi^-$

$B^+ \rightarrow K^+ X(3872)$

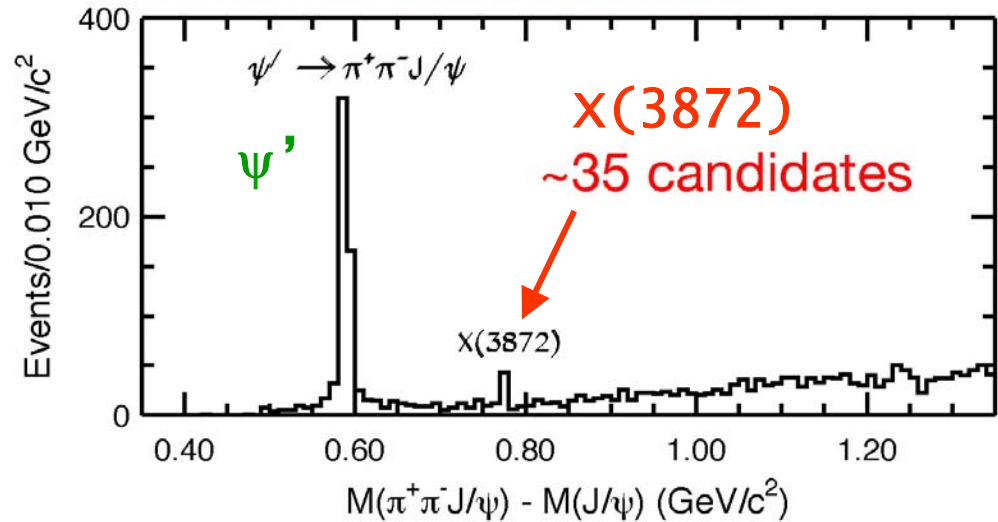
$\hookrightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$   
 $\hookrightarrow I^+I^-$

**35±7 dogodkov**  
**M=3872.0±0.8 MeV**  
**Γ<2.3MeV (90%)**



Belle, PRL 91 (2003) 262001

Mass  $3872.0 \pm 0.6 \pm 0.5$  MeV



$M(J/\psi \pi^+\pi^-) - M(J/\psi)$  [GeV]

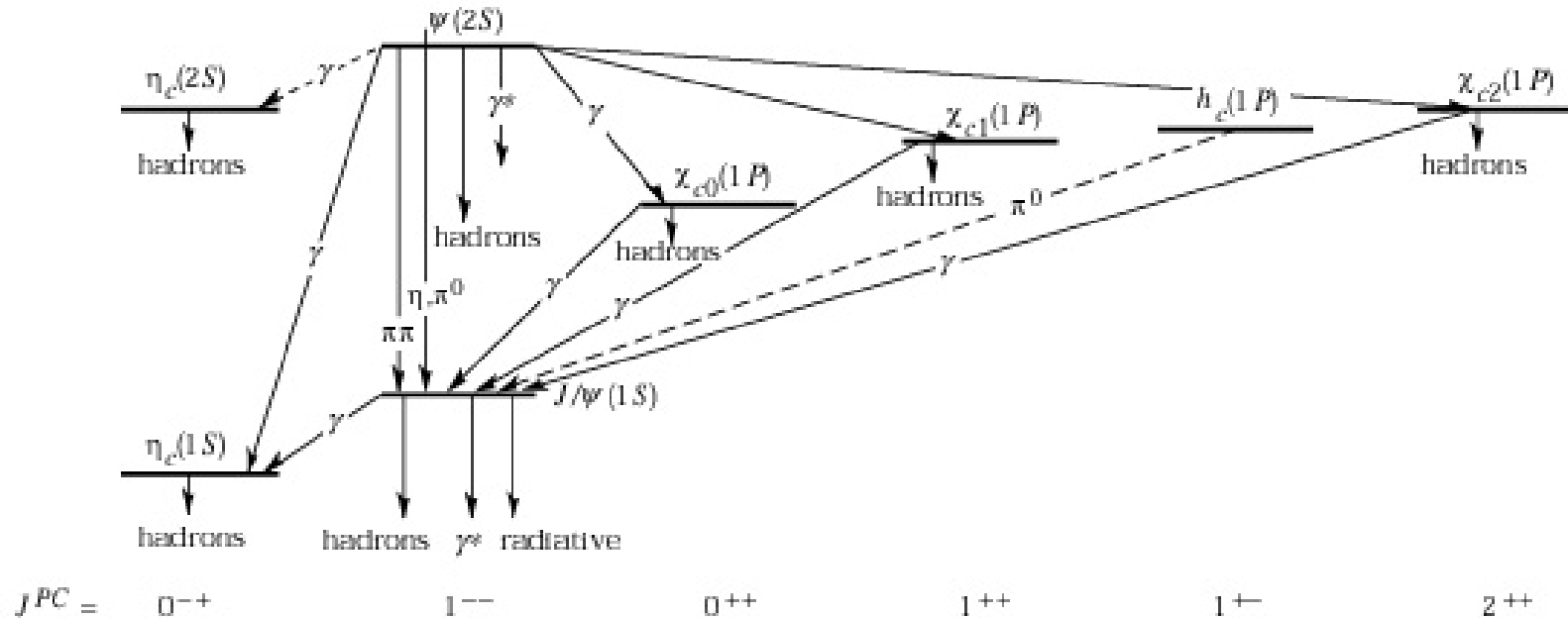
**Odkritje so potrdili CDF, D0, BaBar**

# Ali lahko to novo stanje uvrstimo v periodni sistem vezanih stanj $c\bar{c}$ ?

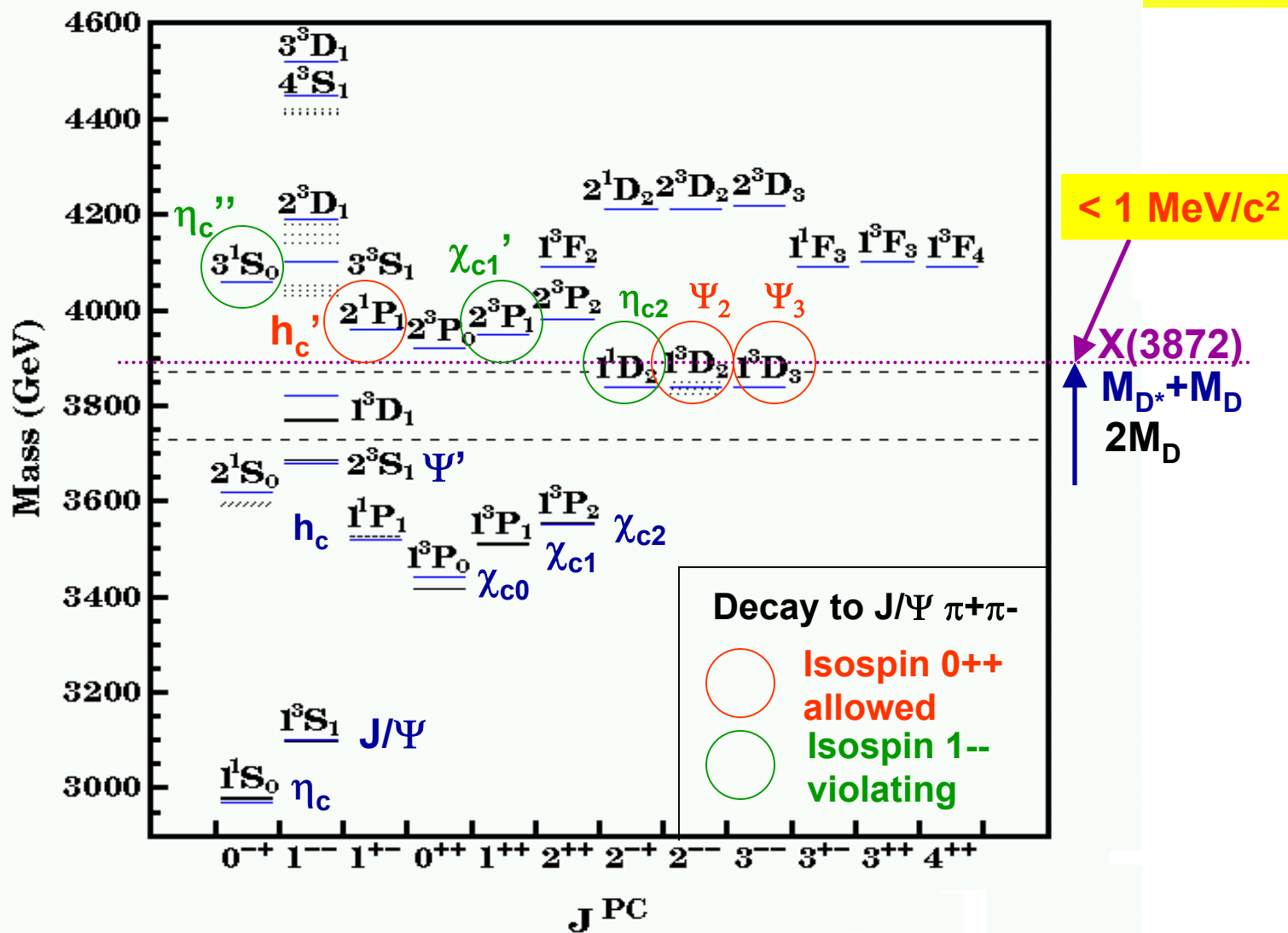
Stanje nastane pri razpadu  $B^+ \rightarrow K^+ X(3872)$ , podobno kot  $B^+ \rightarrow K^+ J/\psi$  ali  $B^+ \rightarrow K^+ \psi(2S)$ .



Ali je torej tudi to vezano stanje  $cc$ ?



# Kaj je to novo stanje X(3872)?



# Kaj je to novo stanje X(3872)?

**Iskanje ostali razpadnih načinov stanja X(3872):  
zgornje meje z 90% stopnjo zanesljivosti (večina  
zmerjema pri Belle):**

$$\Gamma(X \rightarrow \gamma\chi_{c1}) / \Gamma(X \rightarrow \pi\pi J / \psi) < 0.89$$

$$\Gamma(X \rightarrow \gamma\chi_{c2}) / \Gamma(X \rightarrow \pi\pi J / \psi) < 1.1$$

$$\Gamma(X \rightarrow \gamma J / \psi) / \Gamma(X \rightarrow \pi\pi J / \psi) < 0.40$$

$$\Gamma(X \rightarrow \eta J / \psi) / \Gamma(X \rightarrow \pi\pi J / \psi) < 0.6$$

$$\Gamma(X \rightarrow D\bar{D}) / \Gamma(X \rightarrow \pi\pi J / \psi) < 7$$

$$\Gamma(X \rightarrow D^0\bar{D}^0\pi^0) / \Gamma(X \rightarrow \pi\pi J / \psi) < 6$$


BaBar

**Ne vidimo razpadov v pare DD: izključeno  $J^P=0^+, 1^-, 2^+, \dots$**



# Kaj je to novo stanje X(3872)?

**Nobenih pravih kandidatov tipa cc za X(3872):**

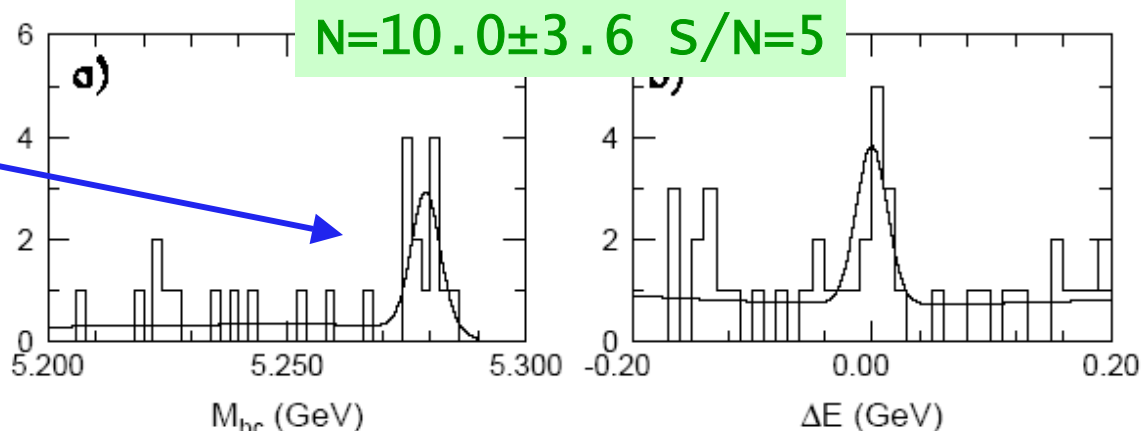
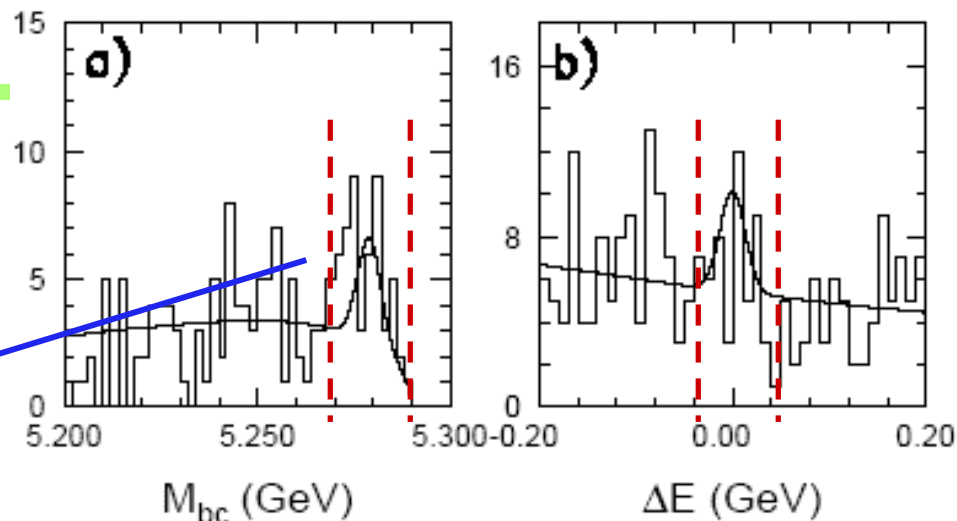
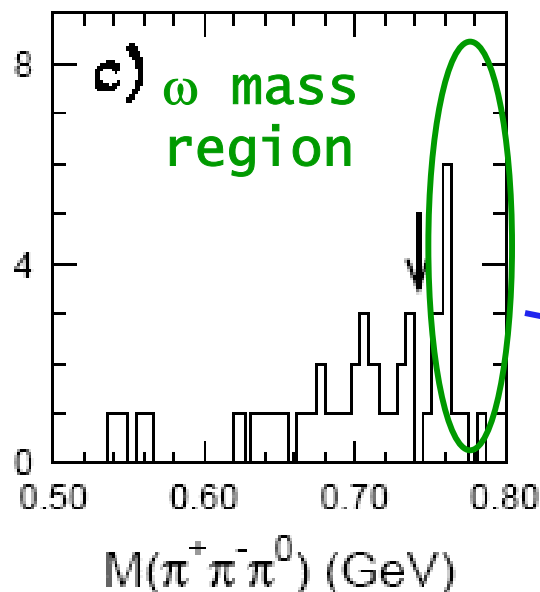
- $\eta_c''$  ← M prenizka in  $\Gamma$  premajhna
  - ~~$h_c'$~~  ← Kotna porazdelitev izključuje  $1^+$
  - ~~$\chi_{c1}'$~~  ←  $\Gamma(\gamma J/\psi)$  premajhna
  - ~~$\psi_2$~~  ←  $\Gamma(\gamma \chi_{c1})$  premajhna; (PRL 93, 2003)
  - $\eta_{c2}$  ←  $\pi\pi \eta_c$  bi moral prevladovati nad  $\pi\pi J/\psi$
  - ~~$\psi_3$~~  ←  $\Gamma(\gamma \chi_{c2} \& D\bar{D})$  premajhna
-  - Isospinsko prepovedani razpadi v  $J/\psi \pi^+\pi^-$

# Kaj je to novo stanje X(3872)?

## Iskanje razpada

$B^+ \rightarrow K^+ X(3872)$

$\hookrightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^0$



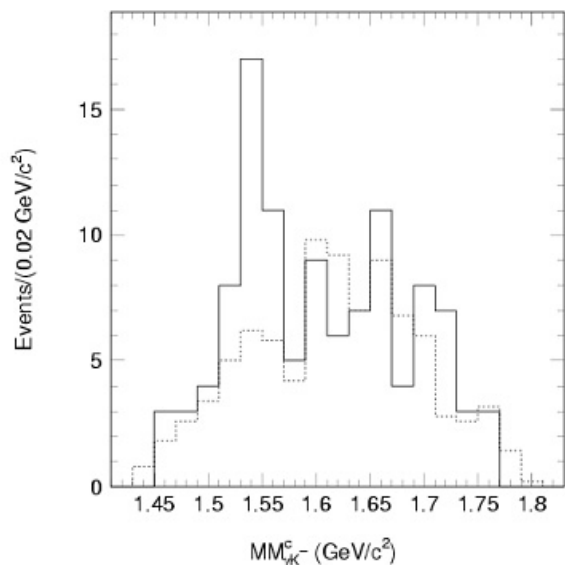
$M(\omega) + M(J/\psi) = 3879$  MeV  
 $X(3872) \rightarrow \omega J/\psi$  preko virtualne  $\omega$

$$\Gamma(\omega J/\psi) / \Gamma(J/\psi \pi^+ \pi^-) = 0.8 \pm 0.3 \pm 0.1$$

v skladu z  $DD^*$  molekularnim modelom

Swanson, PLB 588, 189 (2004)

# Iskanje pentakvarkov

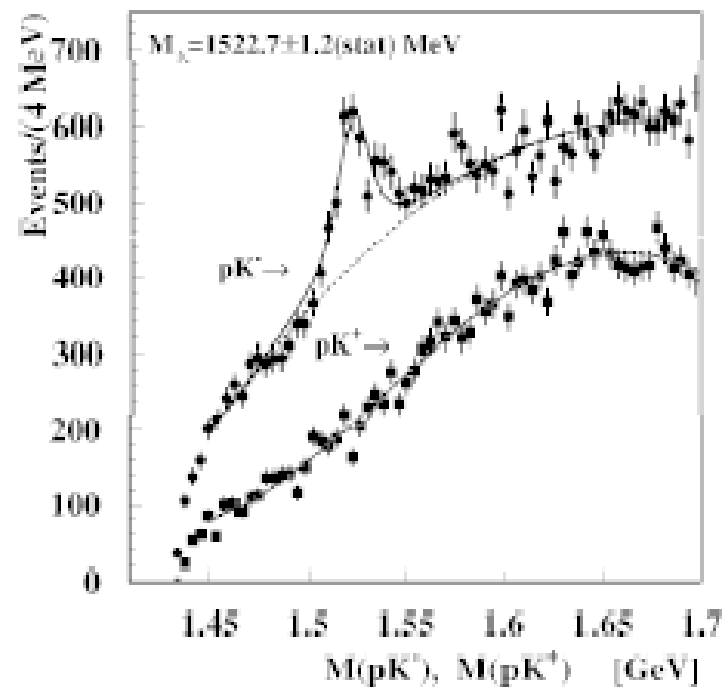


2003: eksperiment LEPS najde vrh v porazdelitvi invariantne mase  $nK^+ = (udd+u\bar{s}) \rightarrow$  **pentakvark**  $\theta^+(1520)$

Sledi prava poplava teoretičnih interpretacij...

Odkritje pentakvarkov je takoj potrdilo 10 eksperimentov, našli so se dve stanji pri višjih masah (vendar statistična signifikanca posamezne meritve ni presegala  $\sim 5-6 \sigma$ )

Primer: Rezultat meritev s spektrometrom Hermes →

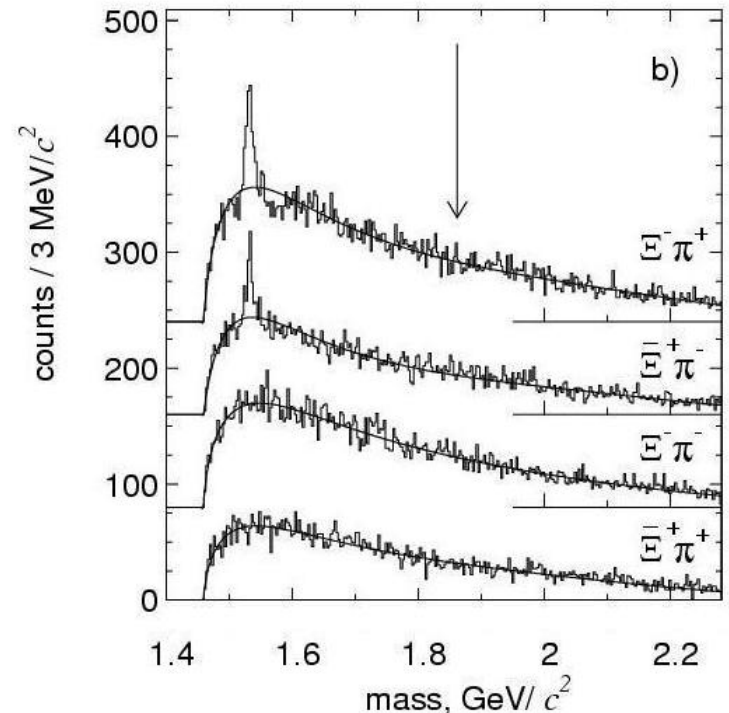
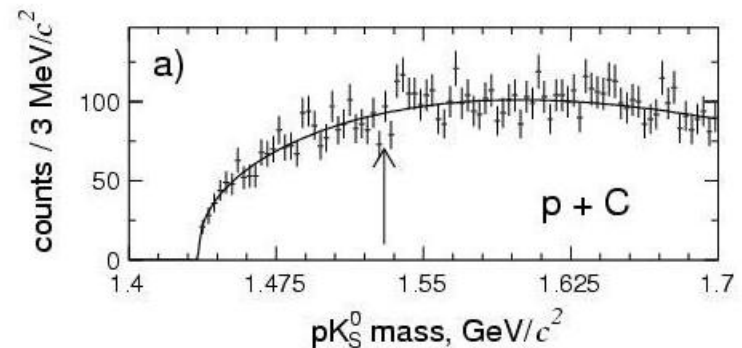


# Iskanje pentakvarkov 2

Vendar mnogo eksperimentov **NE VIDI** pentakvarkov  
⇒ Situacija **NI JASNA**

Eksperimenti, ki ne vidijo pentakvarkov, imajo povečini na razpolago več podatkov, tipično pa je to pri višjih energijah (n.pr. HERA-B, glej Phys.Rev.Lett. 93 (2004) 212003; povzetek pa na <http://www.f9.ijs.si/~zivko/pentakvark/pqintros.html>)

Primer: Rezultat meritev pri HERA-B→

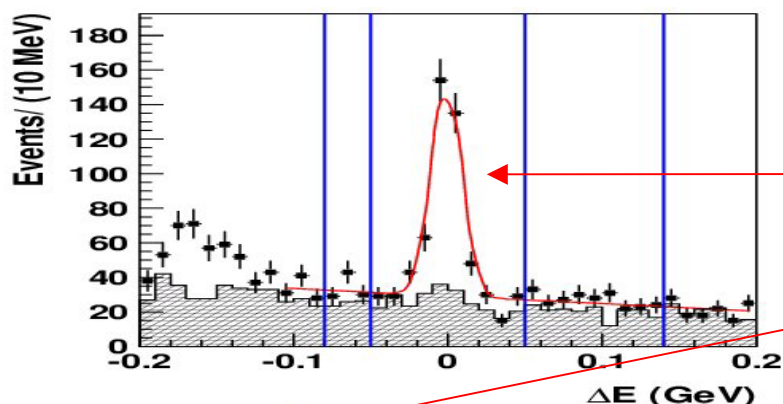


# Iskanje pentakvarkov pri Belle

Tudi v podatkih, zbranih s spektrometrom Belle, **ne vidimo** pentakvarkov v nobenem od razpadnih kanalov mezonov B

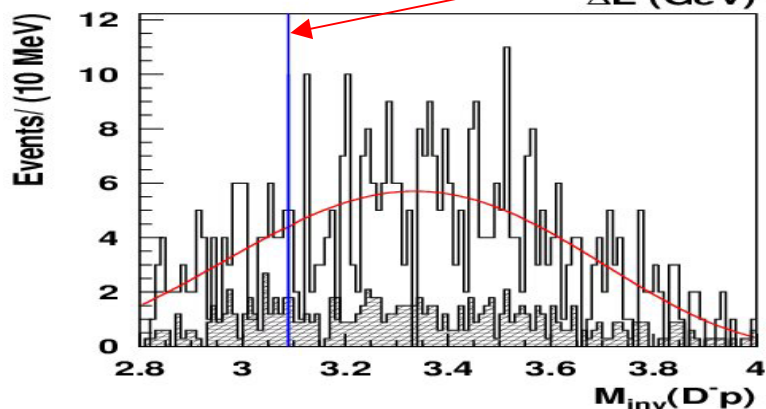
$$B^0 \rightarrow p \bar{p} K_S \quad \Theta^+(1540) \rightarrow p K_S \quad B^0 \rightarrow D^{(*)-} p \bar{p} \pi^+ \quad \Theta_c^0 \rightarrow D^{(*)-} p$$

$$B^+ \rightarrow p \bar{p} K^+ \quad \Theta^{*++} \rightarrow p K^+ \quad B^0 \rightarrow D^0 p \bar{p} \quad \Theta_c^{*+} \rightarrow \bar{D}^0 p$$



**Primer:  $B^0 \rightarrow D^- p p \pi^+$**

N dogodkov  $303 \pm 21$



$$\frac{BR(B^0 \rightarrow \Theta_c^0 \bar{p} \pi^+) BR(\Theta_c^0 \rightarrow D^- p)}{BR(B^0 \rightarrow D^- p \bar{p} \pi^+)}$$

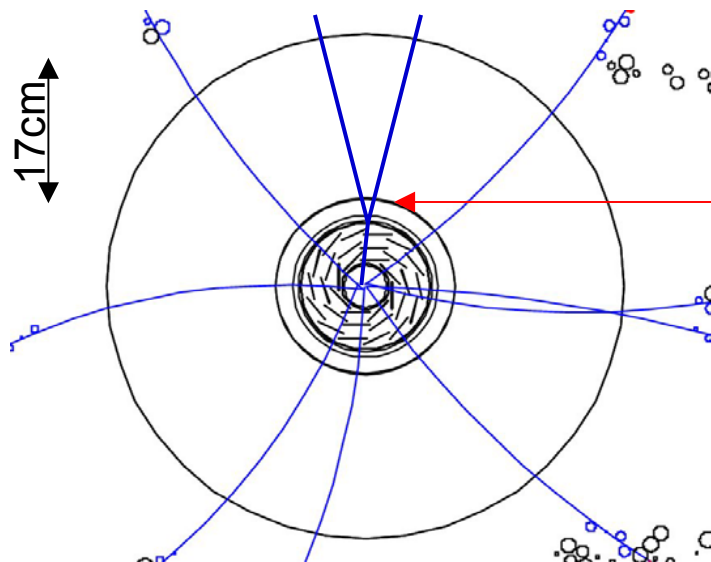
$< 1.2\%$  at 90% CL

# Iskanje pentakvarkov pri kaonskih interakcijah z detektorskim materialom

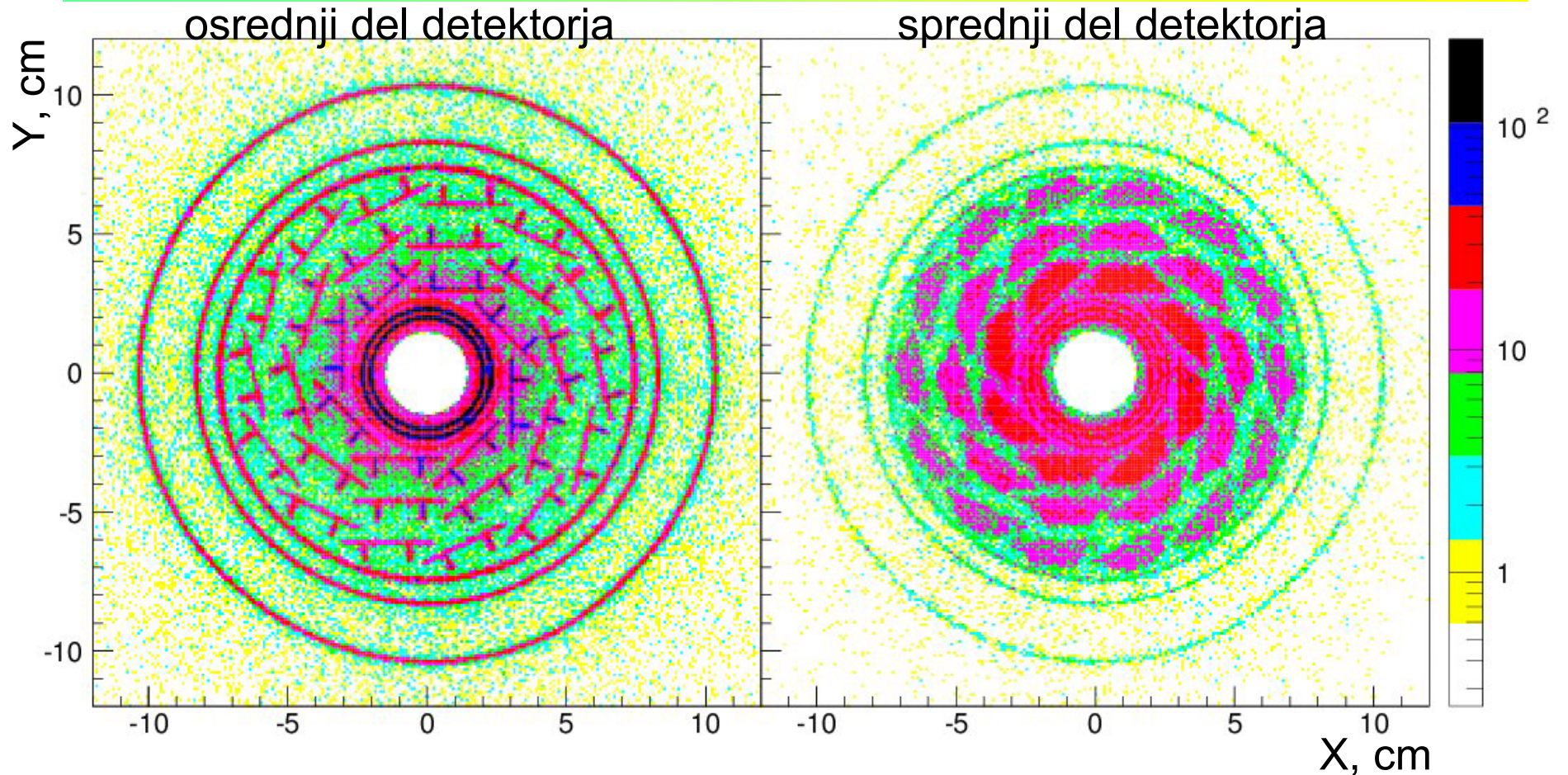
Kaj pa, če je pač verjetnost, da pentakvarki nastanejo pri razpadih mezonov B, zelo majhna? Poglejmo si zato reakcijo  $KN \rightarrow pK$ !

Pri trkih elektronov in pozitronov nastanejo tudi kaoni, del njih pa interagira z materialom detektorja.

Zato izberem pare p in K, ki imajo vertex neke v detektorju.



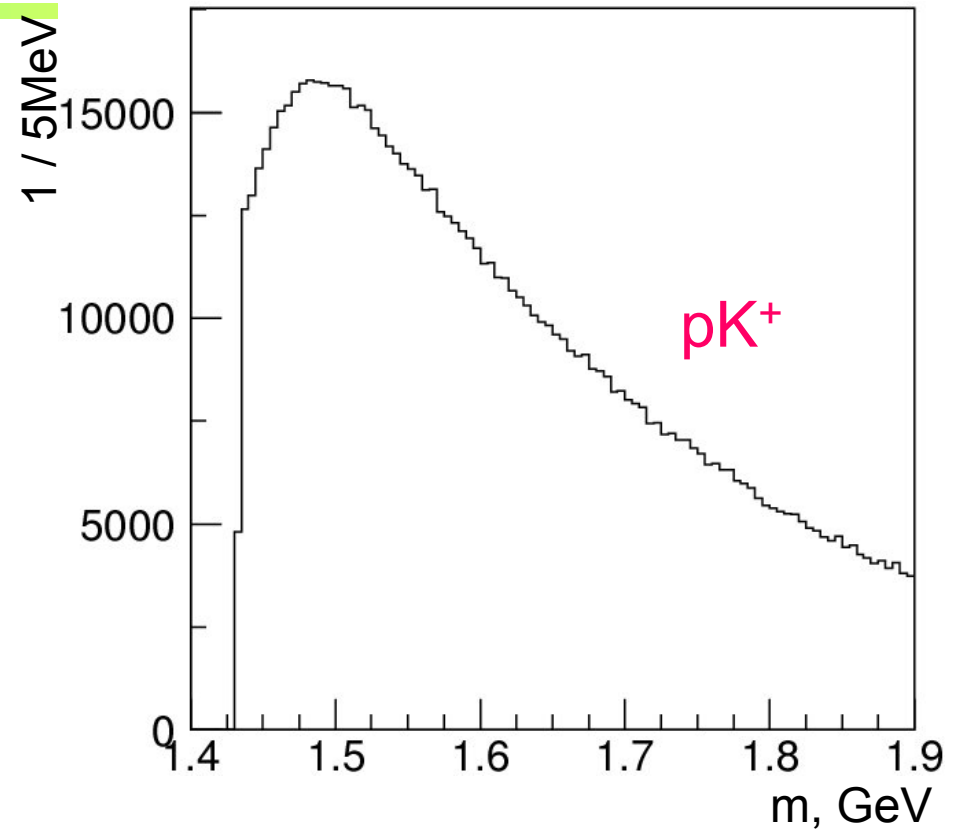
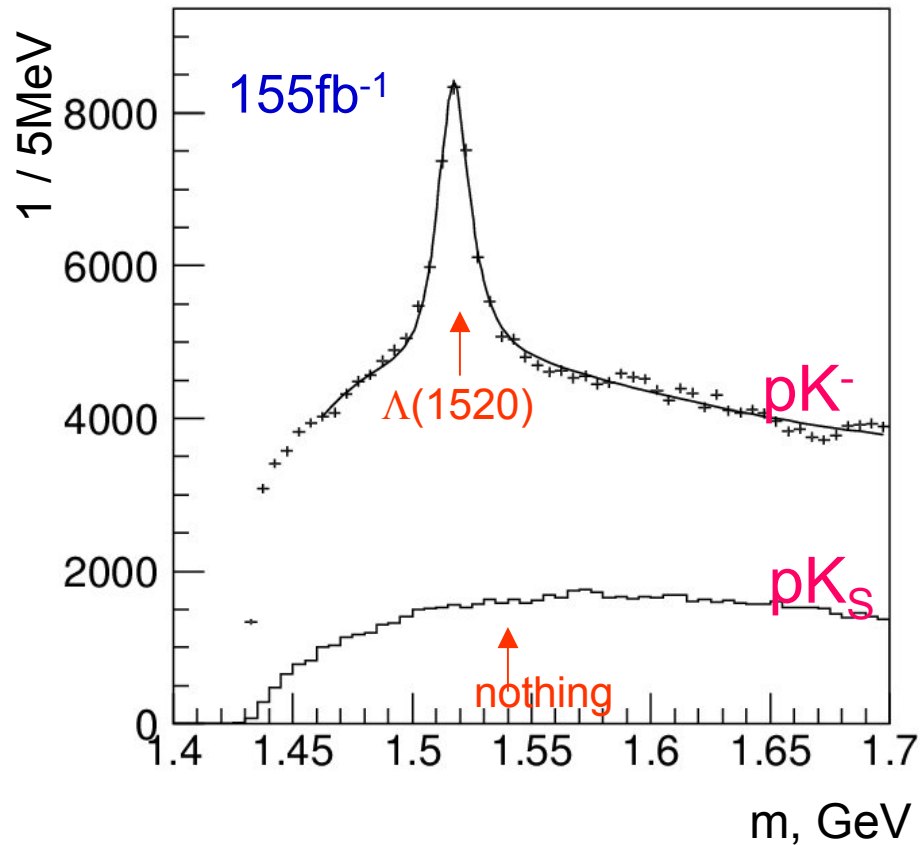
# Porazdelitev sekundarnih $pK^-$ verteksov



“tomografija s čudnimi delci”

⇒ Izberemo vertekse  $pK^-$ , ki so rezultat jedrskih interakcij

# Masni spekter of sekundarnih parov $pK$



Medtem ko v kanalu  $pK^-$  vidimo vrh pri masi znanega delca  $\Lambda(1520)$  (pri masi  $M=1518.5\pm 2\text{MeV}$  v skladu z PDG'02 vrednostjo  $1519.5\pm 1.0\text{MeV}$ ), ne vidimo v  $pK_S$  oz.  $pK^+$  ničesar!



# Mezoni $D_s$ : vezana stanja kvarkov $c$ in $s$

---

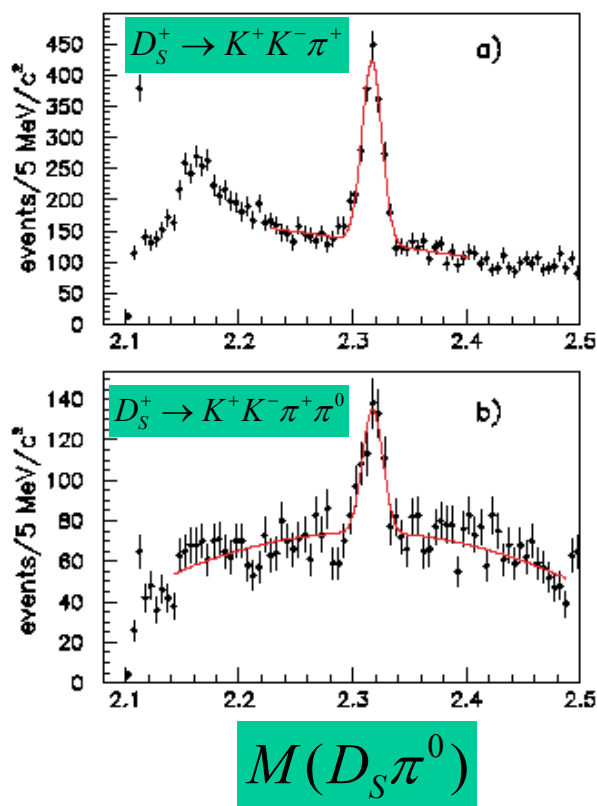
$D_s^+$ : kvark  $c$  + antikvark  $s$   $\sim 2 m_p$

Osnovno stanje z  $J^P = 0^-$

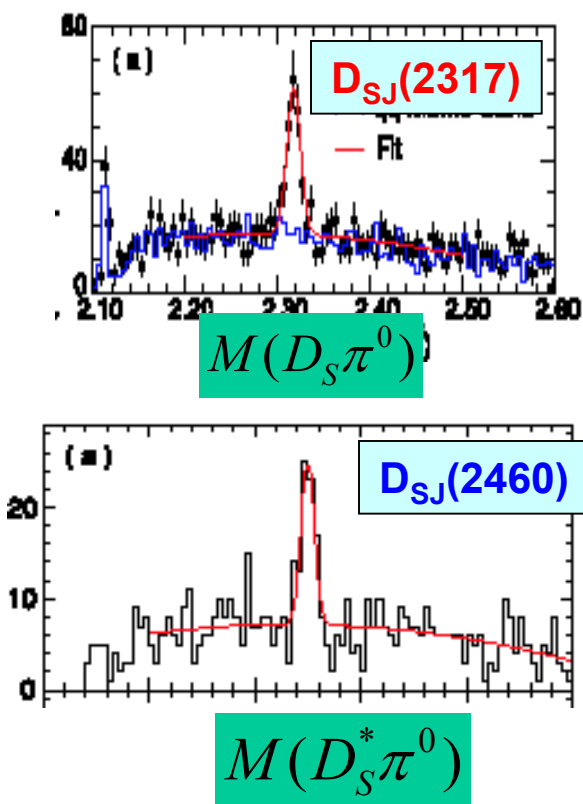
Vzbujena stanja  $D_{sJ}$ : pričakujemo, da je masa dovolj visoka, da lahko razpade na  $D_s^+ K^-$  – dovoljen razpad  $\rightarrow$   $M$  velik,  $\Gamma$  velik

# Nova mezona: $D_{sJ}(2317)$ and $D_{sJ}(2460)$

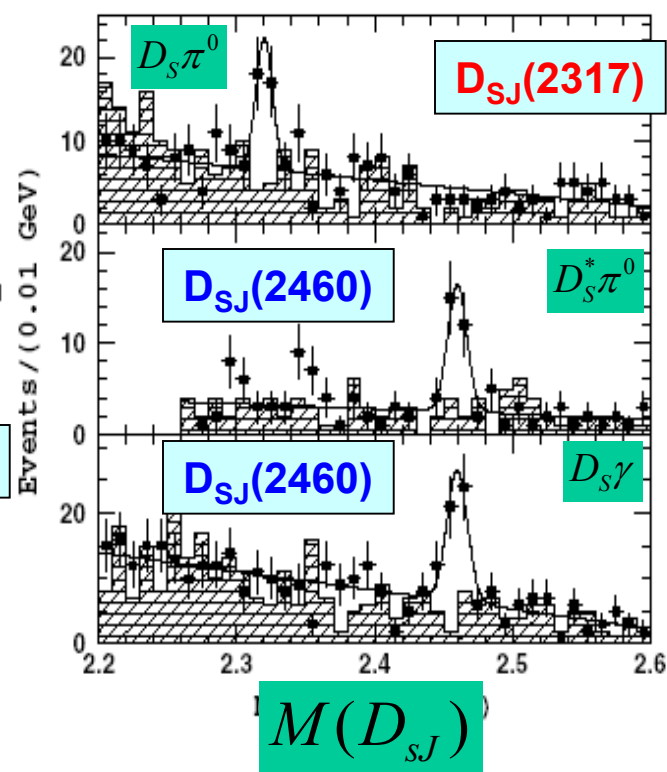
BaBar -  $D_{sJ}(2317)$



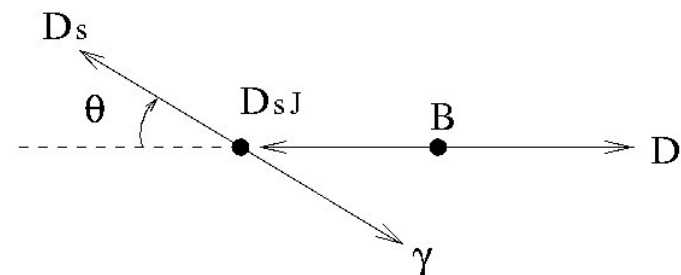
CLEO



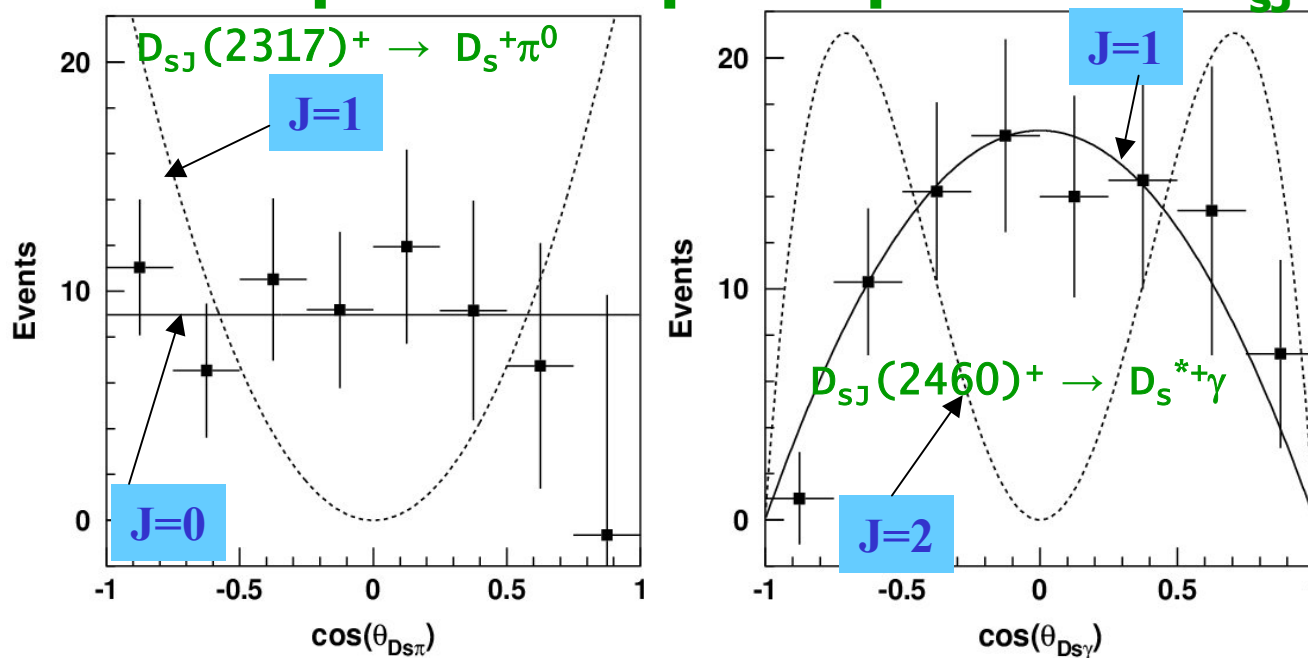
Belle



# Lastnosti mezonov $D_{sJ}$



## Kotna porazdelitev produktov pri razpadu $B \rightarrow DD_{sJ}$

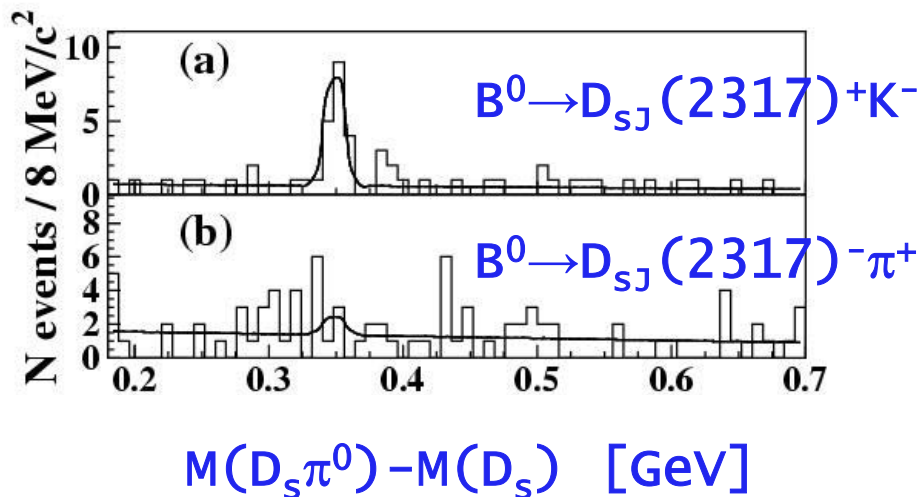


Razen presenetljivo nizkih mas so vse lastnosti konsistentne z najnižjimi P stanji z  $J^P=0^+,1^+$

# Lastnosti mezonov $D_{sJ}$

Opazili smo tudi  $B^0 \rightarrow D_{sJ}(2317)^+ K^-$

Primerjava razpadov  
s  $K$  in  $\pi$



Primerjava z razpadi  $D_s$

$$\text{Br}(B^0 \rightarrow D_s K^-) = (2.93 \pm 0.55 \pm 0.79) \times 10^{-5}$$

$$\text{Br}(B^0 \rightarrow D_s \pi^-) = (1.94 \pm 0.47 \pm 0.52) \times 10^{-5}$$

$$\text{Br}(B^0 \rightarrow D_{sJ}(2317)^+ K^-) \times \text{Br}(D_{sJ}(2317)^+ \rightarrow D_s^+ \pi^0) = (5.3 \pm 1.4 \pm 0.5 \pm 1.4) \times 10^{-5}$$

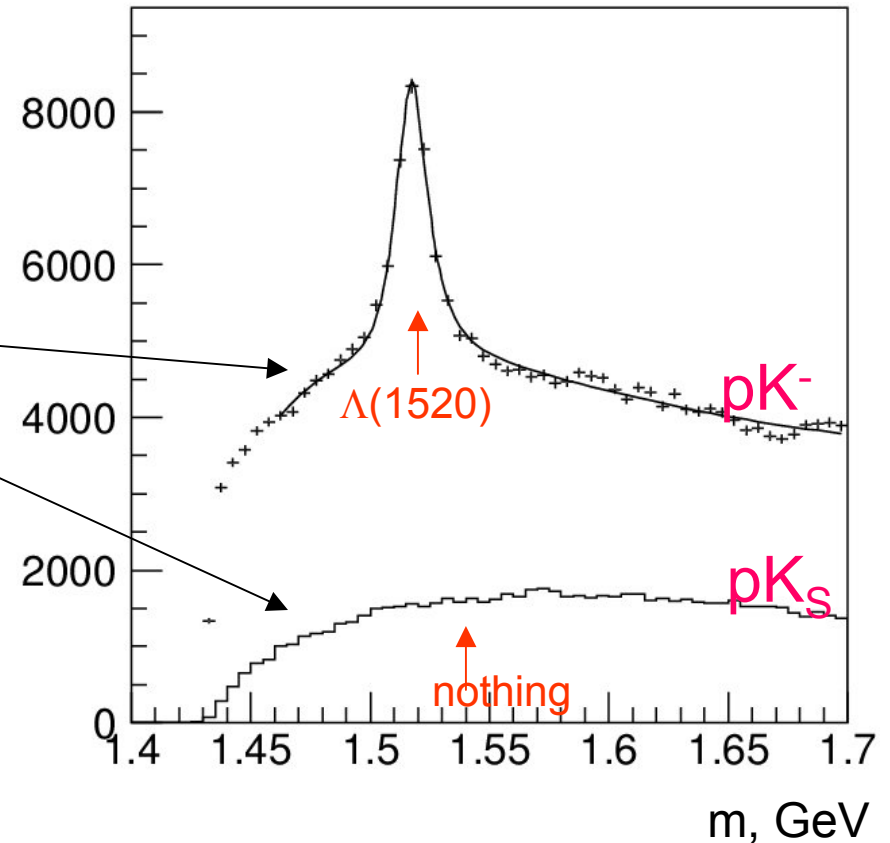
# Iščemo naprej...

---

- Opisane raziskave so le del meritev, ki potekajo spektrometrom Belle. Odkrili smo nekaj novih stanj, eno izmed njih -  $X(3872)$  - kaže zelo nenavadne lastnosti.
- Nadaljujemo z meritvami z obstoječo aparaturo in z izboljšanim trkalnikom. **Z večjo količino zajetih dogodkov in z novimi idejami, kje iskati, pričakujemo nova spoznanja v spektroskopiji hadronov.** Rezultati bodo pomembno pomagali pri razumevanju močne sile med kvarki.
- Izboljšati pa hočemo tudi spektrometer Belle. Z izboljšano identifikacijo nabitih delcev bi lahko **močno znižali t.i. kombinatorno ozadje**, naključne kombinacije delcev v končnem stanju, ki prispevajo bolj ali manj enakomerno ozadje pod vrhovi, ki jih iščemo.

# Zakaj izboljšati eksperimentalno aparaturo?

- Z izboljšano identifikacijo nabitih delcev bi lahko **močno znižali t.i. kombinatorno ozadje, naključne kombinacije delcev v končnem stanju, ki prispevajo bolj ali manj enakomerno ozadje pod vrhovi, ki jih iščemo.**



# Izboljšava aparature: Nadgradnja sistema za identifikacijo nabitih delcev

---

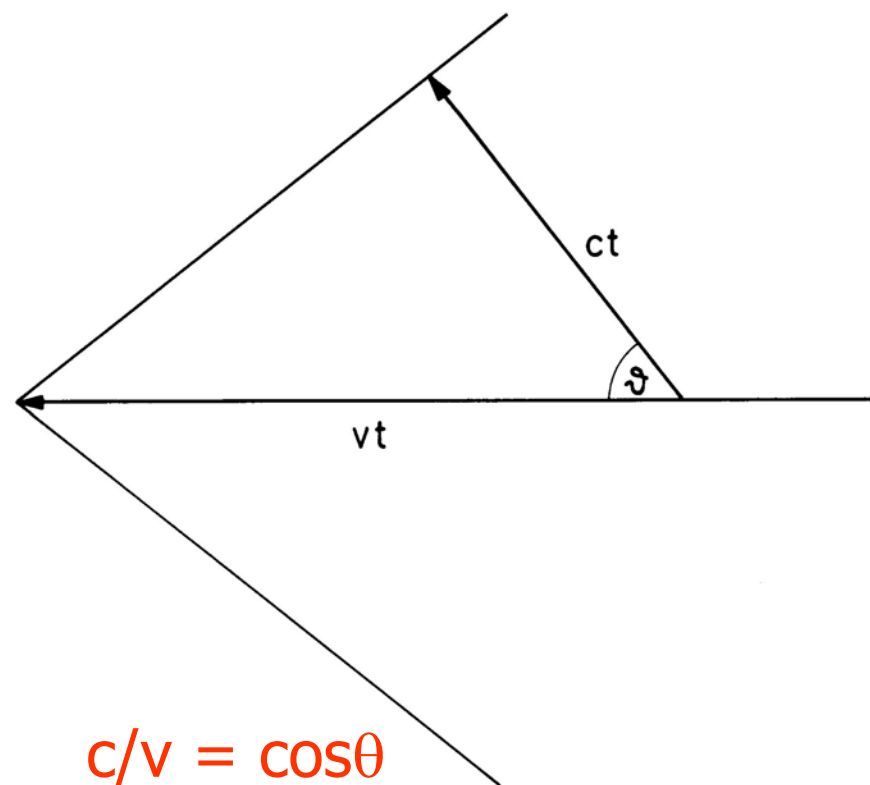
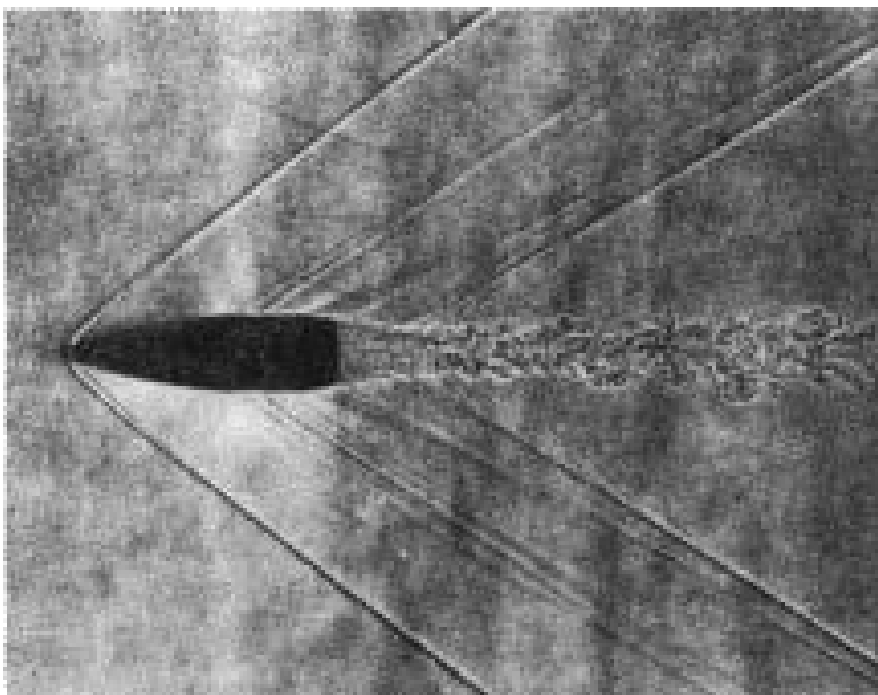
Delce identificiramo po njihovi **masi**. Kako določiti maso brez tehtanja?

→ Iz zveze med gibalno količino in hitrostjo:  **$p=mv$**

Ločeno izmerimo

- gibalno količino  **$p$**  (ukrivljenost tira v magnetnem polju)
- hitrost  **$v$**  (velikost kota Čerenkova) →

# Fronta pri nadzvočnem letu



Na sliki: kot  $52^\circ$ ,  $v = c/\cos\theta = 340\text{m/s} / \cos 52^\circ = 552\text{m/s}$   
Iz kota fronte določimo hitrost krogle!

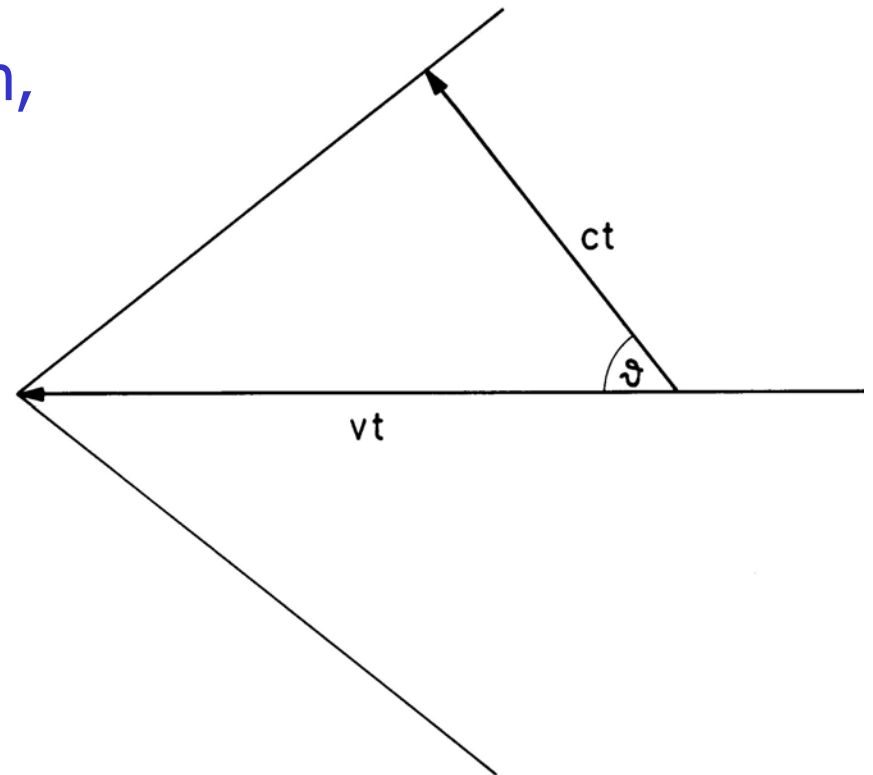


# Sevanje delca, ki leti hitreje od svetlobne hitrosti v sredstvu

Nabiti delci s hitrostjo  $v > c/n$ , sevajo: sevanje Čerenkova.

Ponovno:  $c/v = \cos\theta$

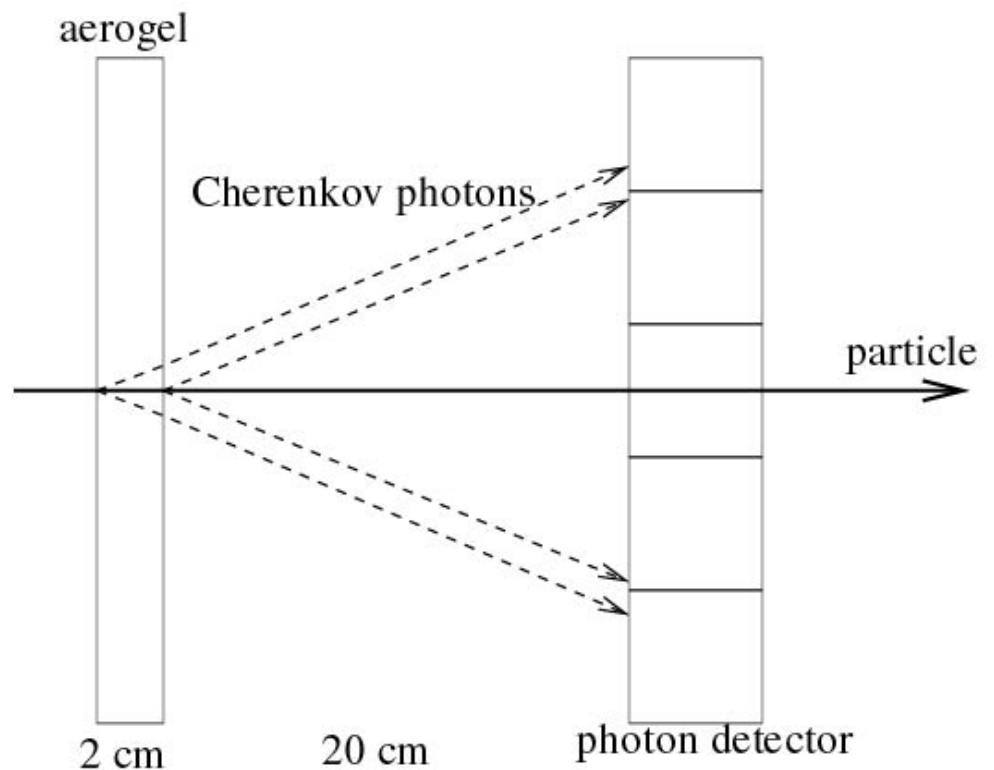
Iz kota, pod katerim je izsevana svetloba, določimo hitrost delca.



# Meritev kota Čerenkova

Nabit delec prečka sredstvo z lomnim količnikom  $n$ , seva svetlobo Čerenkova, to pa zaznamo z detektorji (fotopomnoževalkami).

Smer sevanja (fotonov) določimo iz znane točke izseva in izmerjene točke detekcije.



# Meritev kota Čerenkova

čitalna elektronika

fotopomnoževalke

sevalec – aerogel

pionski žarek



S. Korpar pri meritvi v testnem žarku v KEK

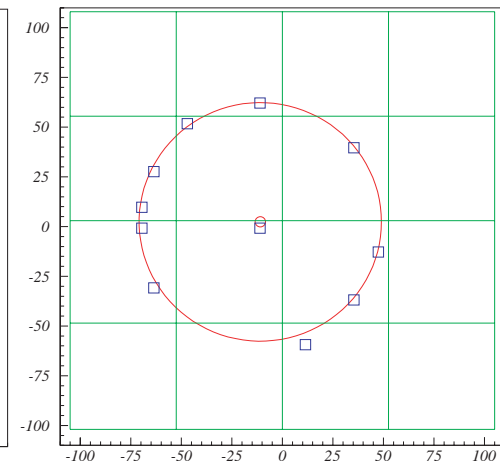
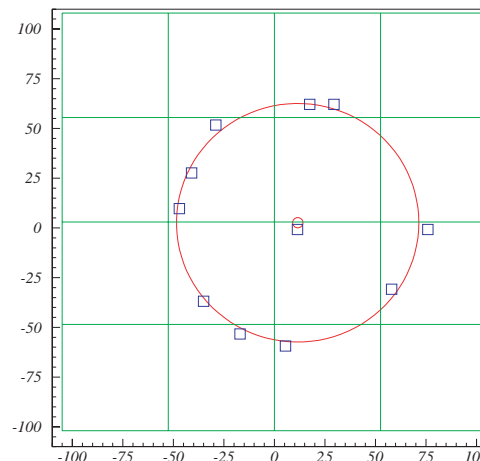
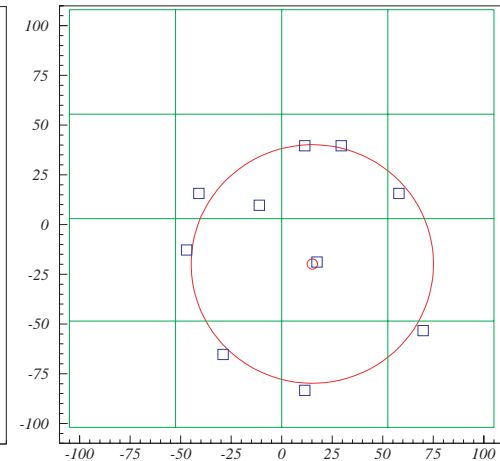
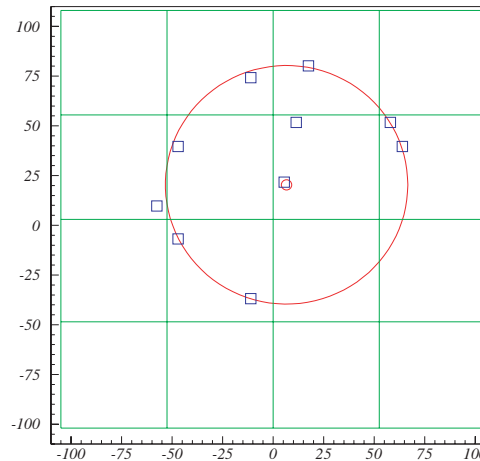
# Meritev kota Čerenkova

Primeri dogodkov, kot jih zaznajo fotopomnoževalke ob preletu nabitega delca.

Polmer kroga  
→ Čerenkov kot

Zadetek v središču kroga:  
Čerenkovi fotoni, ki jih nabit delec izseva v oknu fotopomnoževalke.

**Zelo malo ozadja!**



# Zaključek

---

**Eksperimentalna aparatura v Tsukubi je imenitno pripravljena, omogoča natančne meritve redkih procesov.**

**Do sedaj smo med drugim izmerili, kako je v sistemu mezonov B kršena simetrija CP.**

**Naleteli smo tudi na novo stanje z nenavadnimi lastnostmi, in našli nekaj stanj, ki jih lahko uvrstimo med običajna vezana stanja kvarkov, se pa njihove mase in širine ne ujemajo s pričakovanji.**

**Z izboljšano aparaturo in zmogljivejšim trkalnikom bomo imeli na razpolago večji vzorec, z njim bodo dosegljivi tudi zelo redki kanali.**