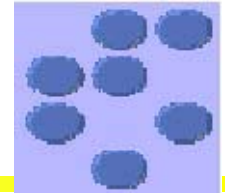




UNIVERZA V LJUBLJANI



Na lovu za eksotičnimi delci

Peter Križan

Fakulteta za matematiko in fiziko UL

Institut J. Stefan

Božični simpozij, Maribor, 16.12.2003

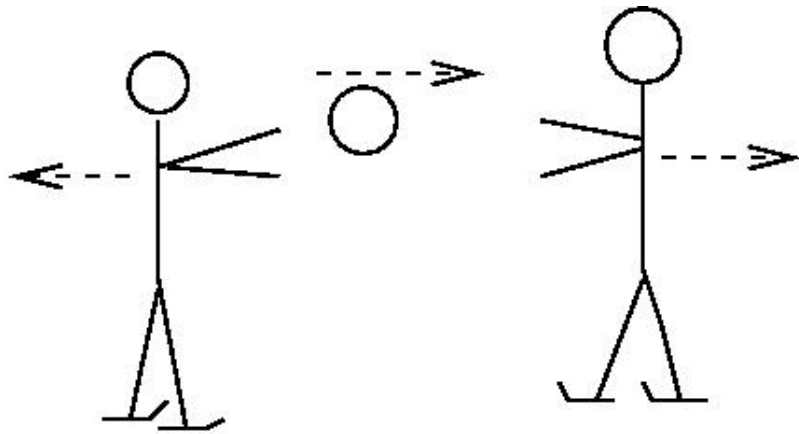
Uvod: Sile med osnovnimi delci, močna sila

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

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

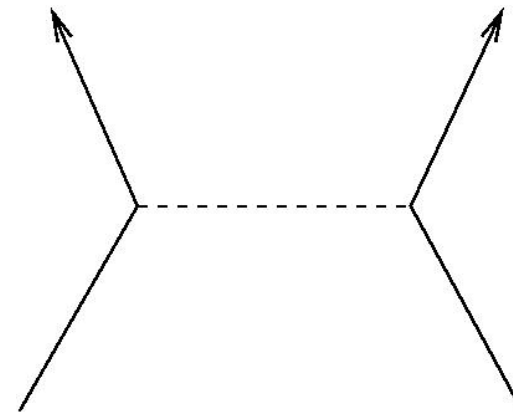
Pogled naprej

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

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

Standardni model 2

Osnovni delci	1. družina	2. družina	3. družina
kvarki	u,d	s,c	b,t
leptoni	e, ν_e	μ, ν_μ	τ, ν_τ

Barioni: vezana stanja treh kvarkov

proton: kvarki uud	m_p
nevtron: kvarki udd	$\sim m_p$
Δ^{++} : kvarki uuu	$\sim 1.3m_p$
Λ : kvarki uds	$1.1 m_p$

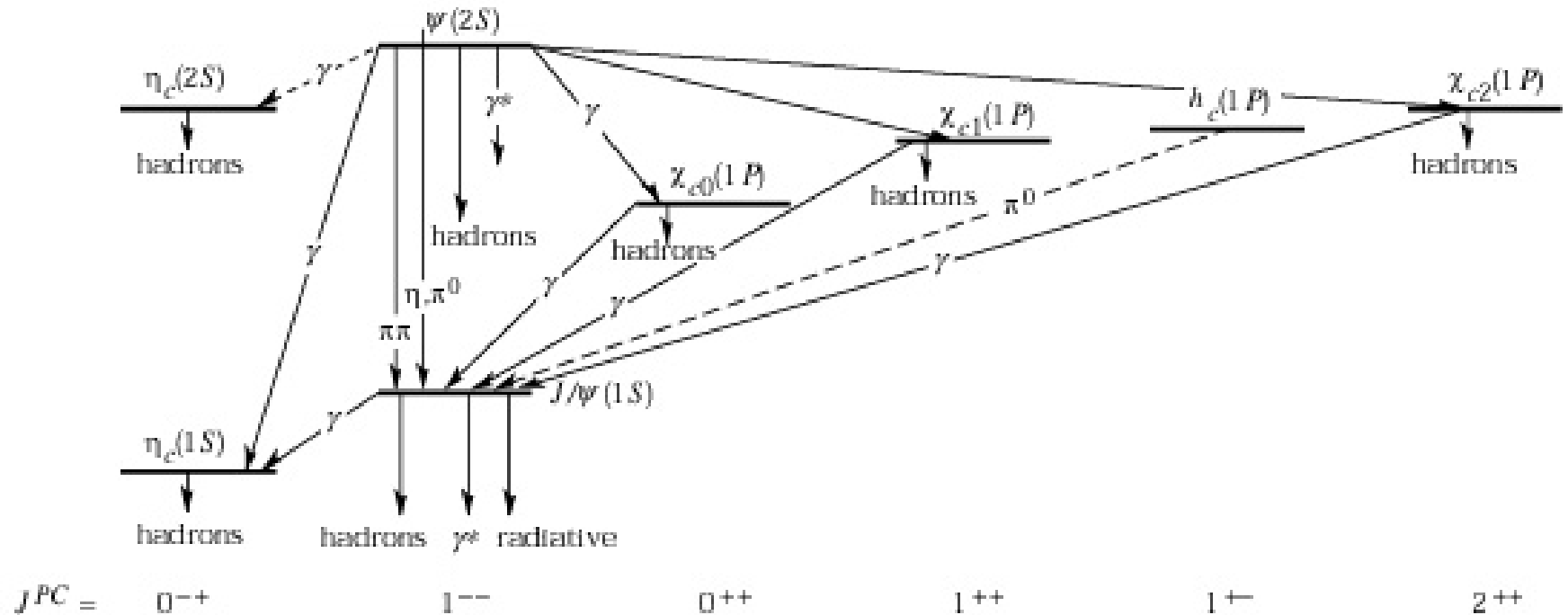
Mezoni: vezana stanja **kvarkov** in **antikvarkov**

π^+ : kvark u + antikvark d	$1/7 m_p$
K^+ : kvark u + antikvark s	$1/2 m_p$
K_S : kvark d + antikvark s	$1/2 m_p$
ϕ : kvark s + antikvark s	$1.1 m_p$
D^+ : kvark c + antikvark d	$2 m_p$
J/ψ : kvark c + antikvark c	$3 m_p$
B^0 : kvark d + antikvark b	$5.5 m_p$

'Periodni sistem' vezanih stanj 2

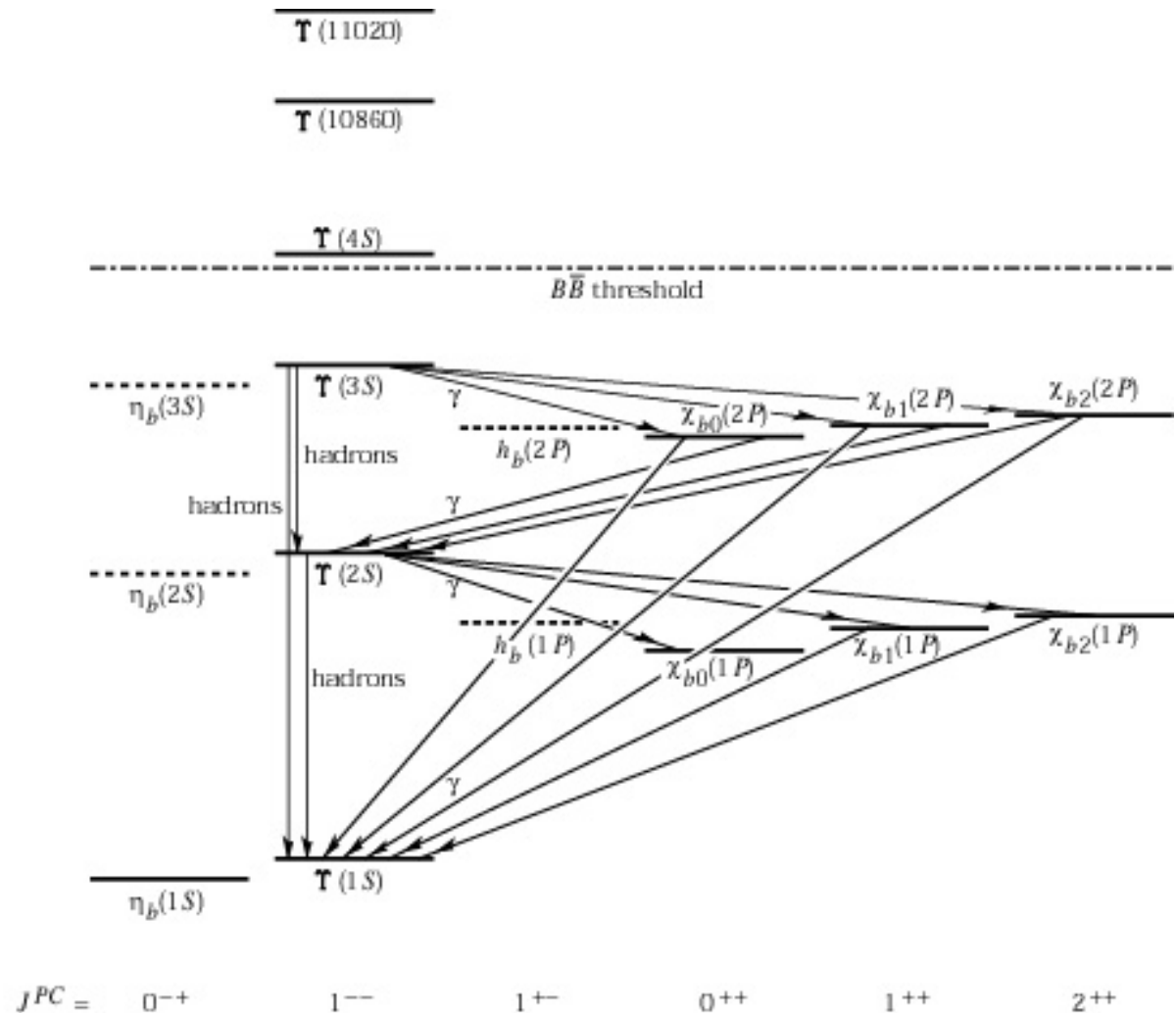
Spekter vezanih stanj para **kvarka c** in antikvarka c z različnim spinom in parnostjo: podobna struktura kot spekter pozitronija ali vodikovega atoma.

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"**

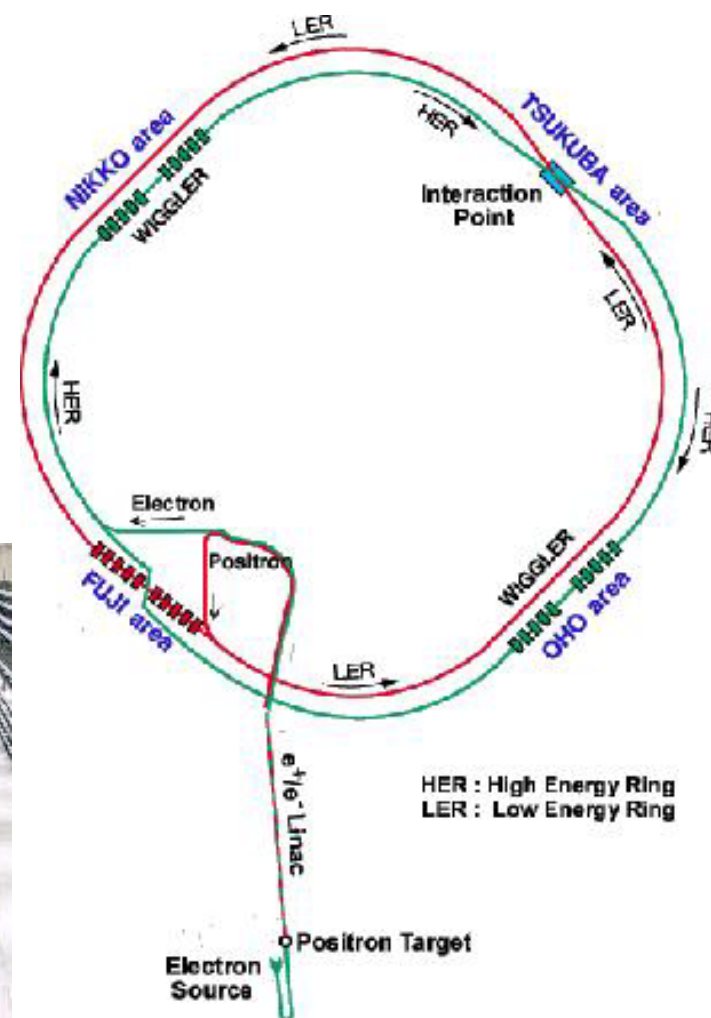
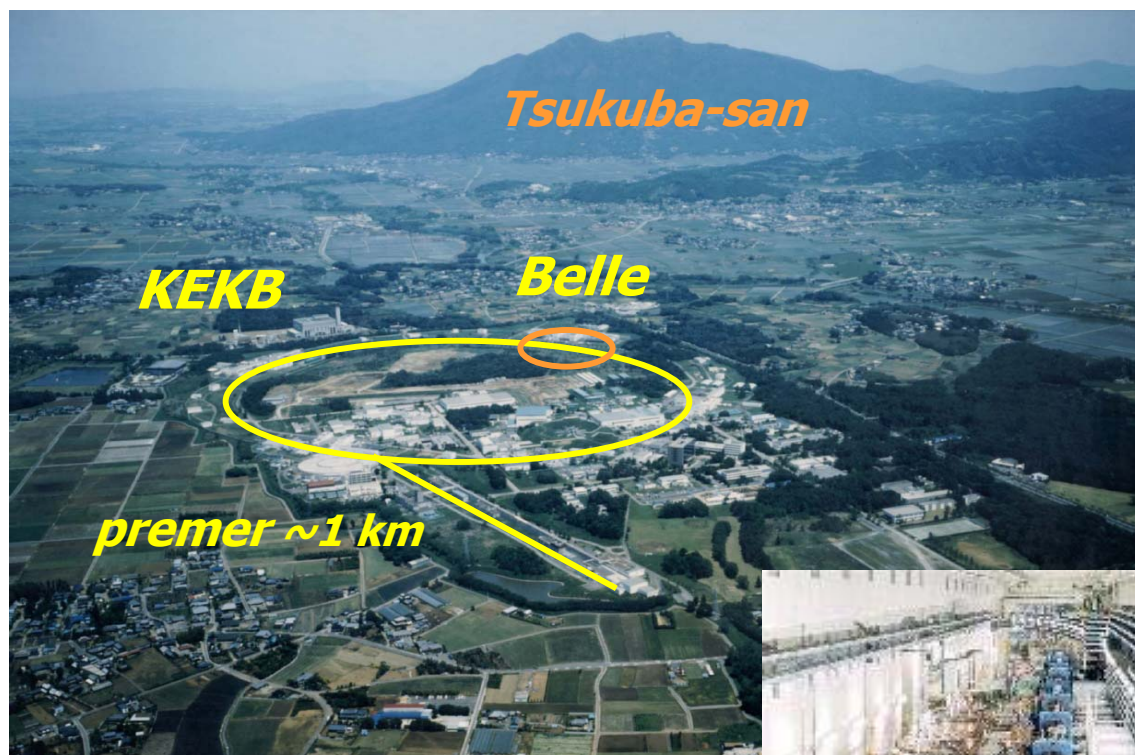
Kako iščemo eksotična stanja?

Pri interakcijah visokoenergijskih:

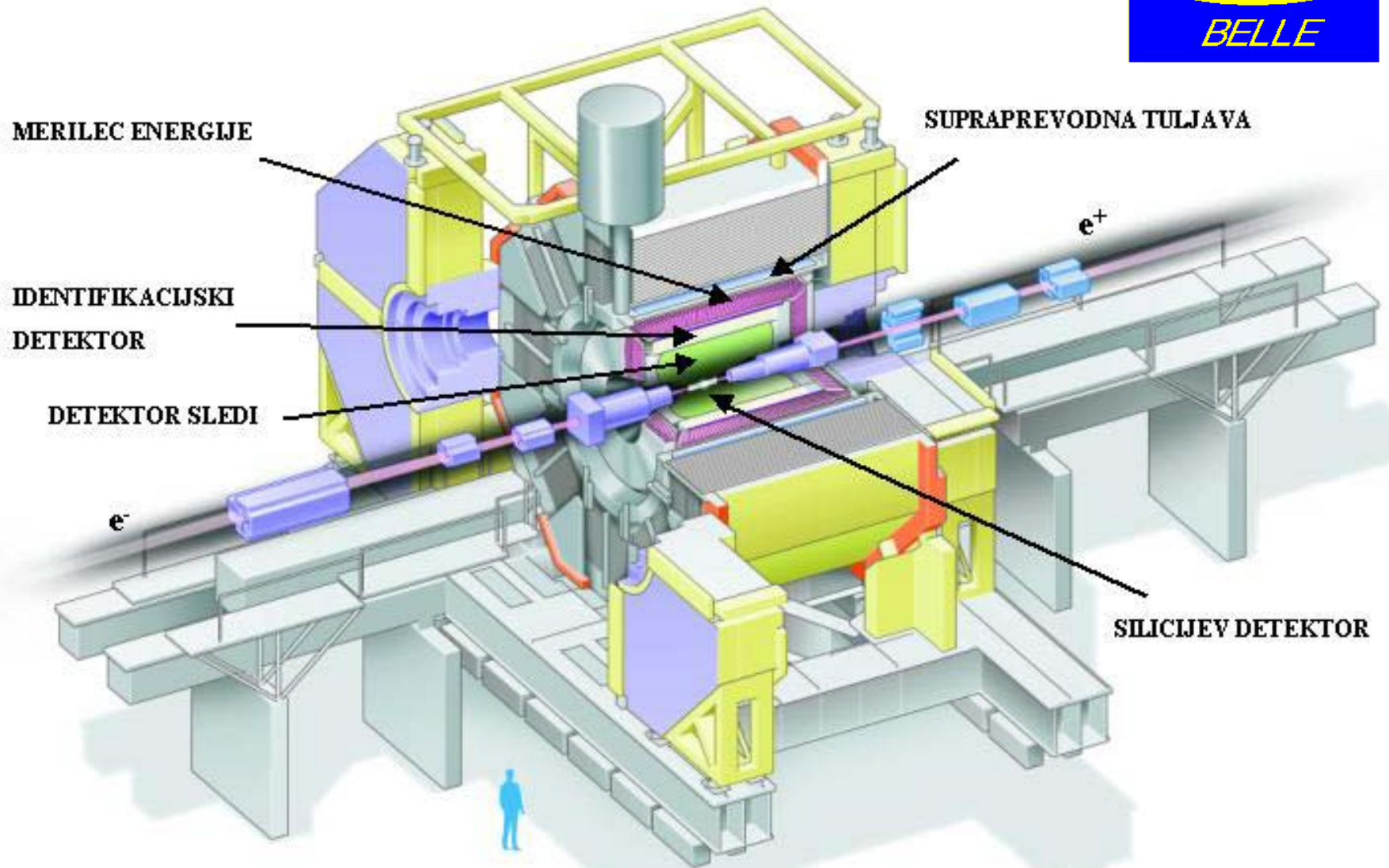
- **protonov z jedri**
- **fotonov z jedri**
- **elektronov z jedri**
- **elektronov s pozitroni**

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

KEKB: trkalnik elektronov in pozitronov

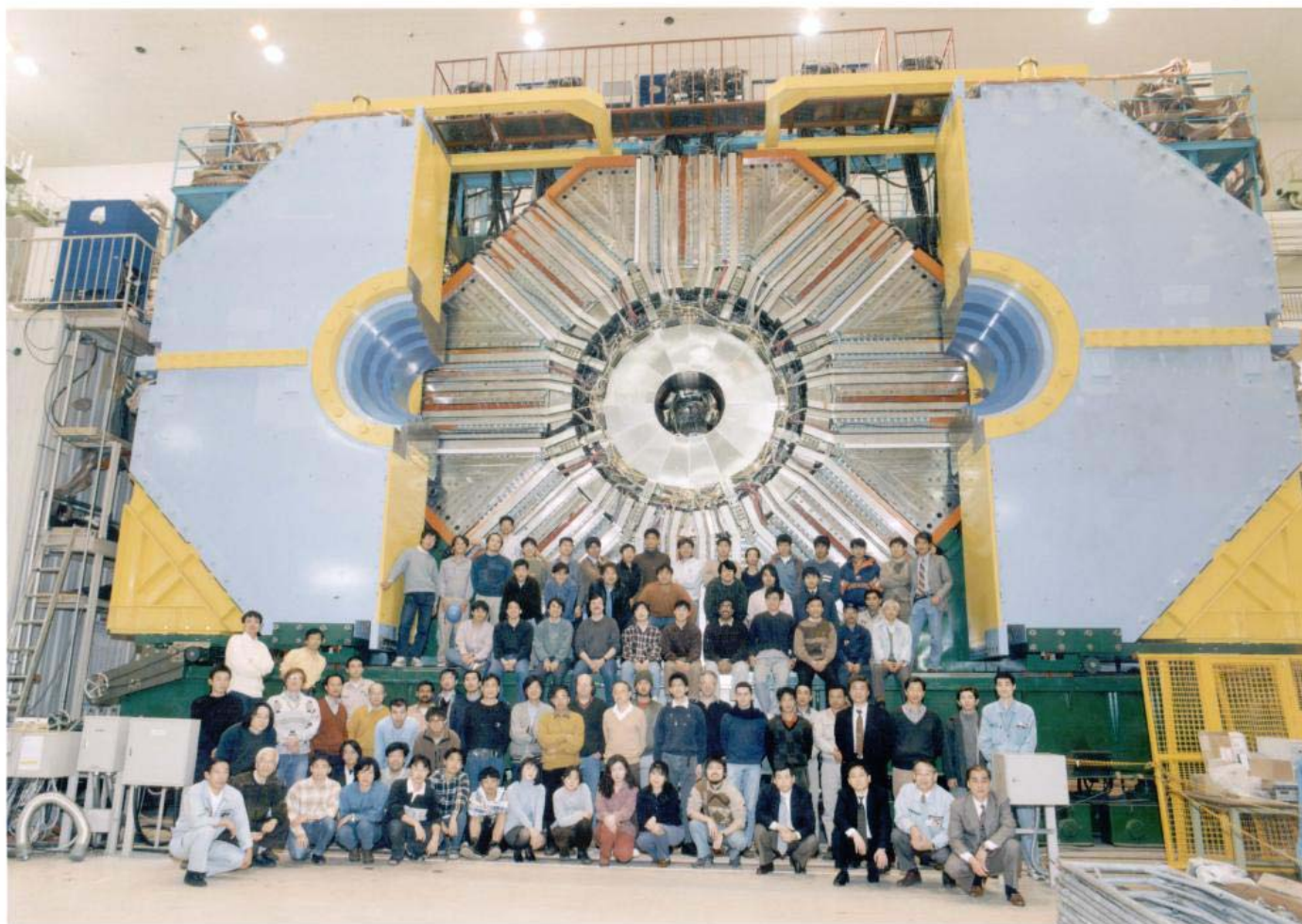


Spektrometer Belle





Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine

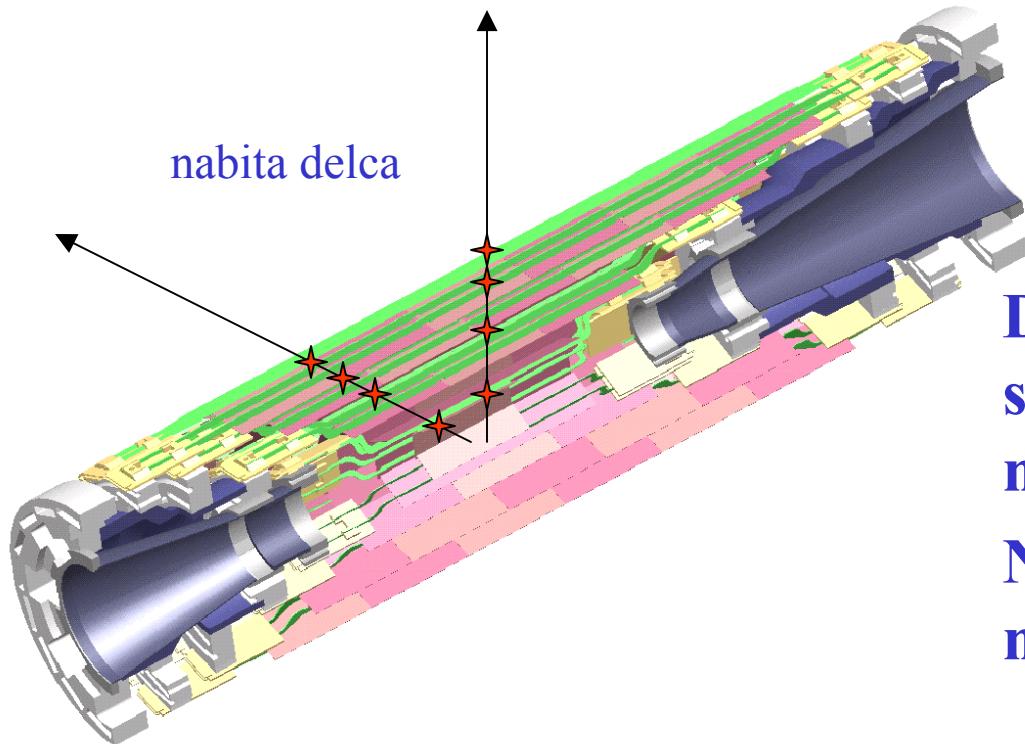
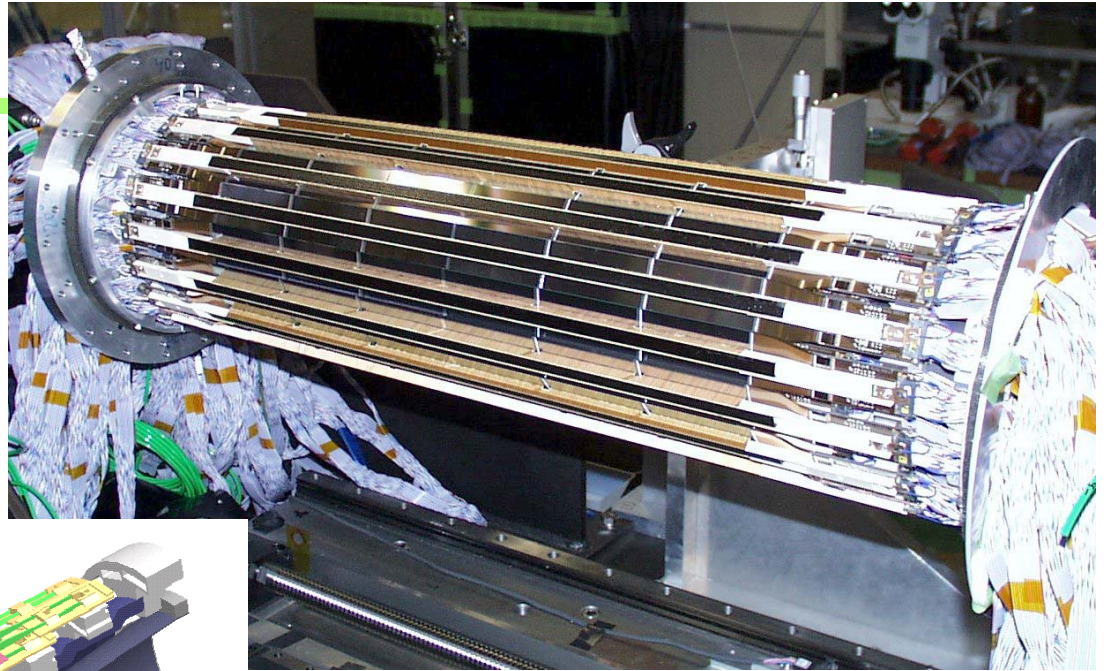


16.december 2004

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! Nprestano moramo meriti izpostavljenost sevanju, za sprotni nadzor smo lani poleti med sestavljanjem dodali polprevodniške senzorje (RADFET).

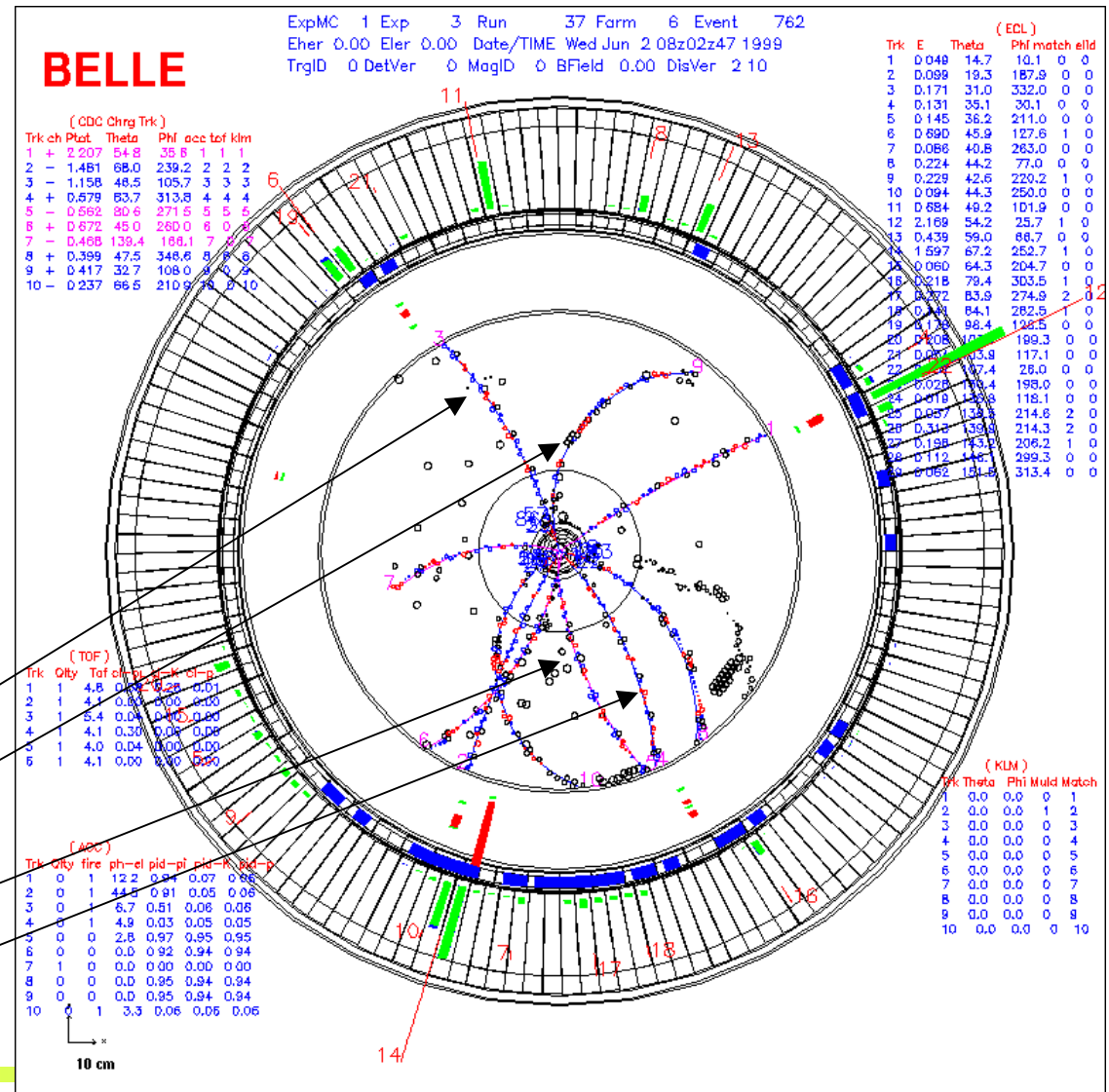
Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

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

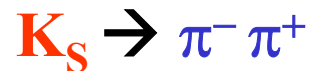
$$K_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

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



Kaj izmerimo z detektorjem? -2

Kako vemo, da je potekla spodnja reakcija?

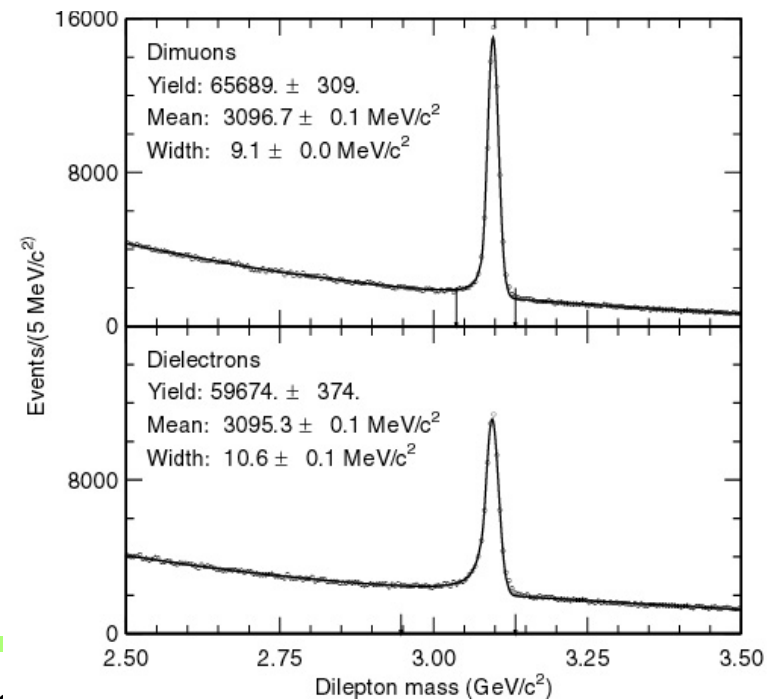
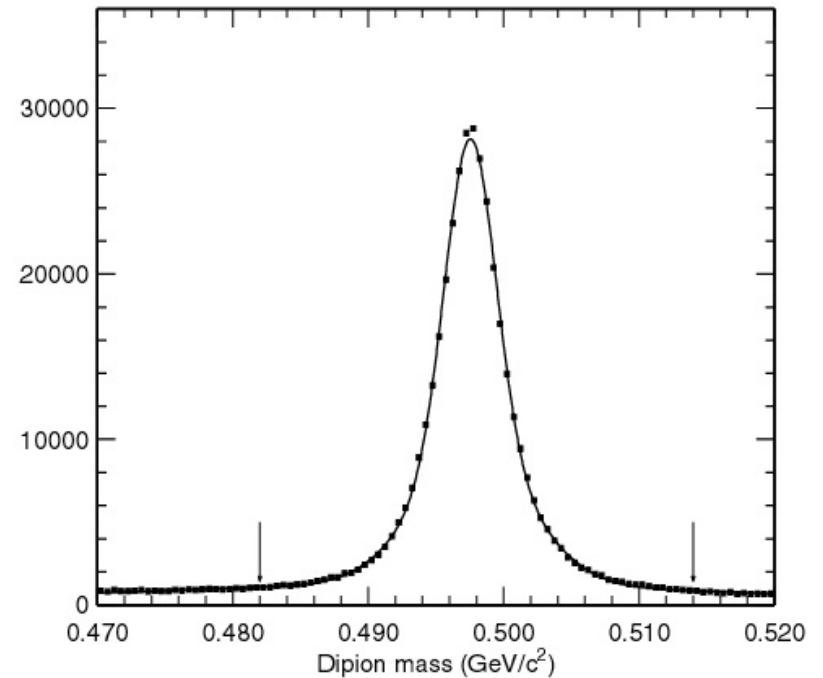


Za para $\pi^- \pi^+$ in $\mu^- \mu^+$ izračunamo invariantno maso:

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

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

za J/ψ pa blizu **3.1 GeV**.



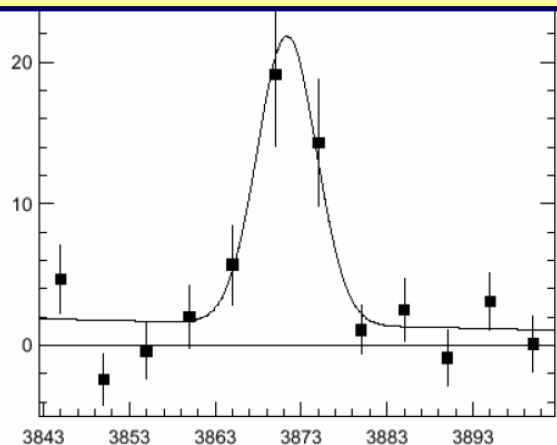
Novo stanje: X(3872)

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

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

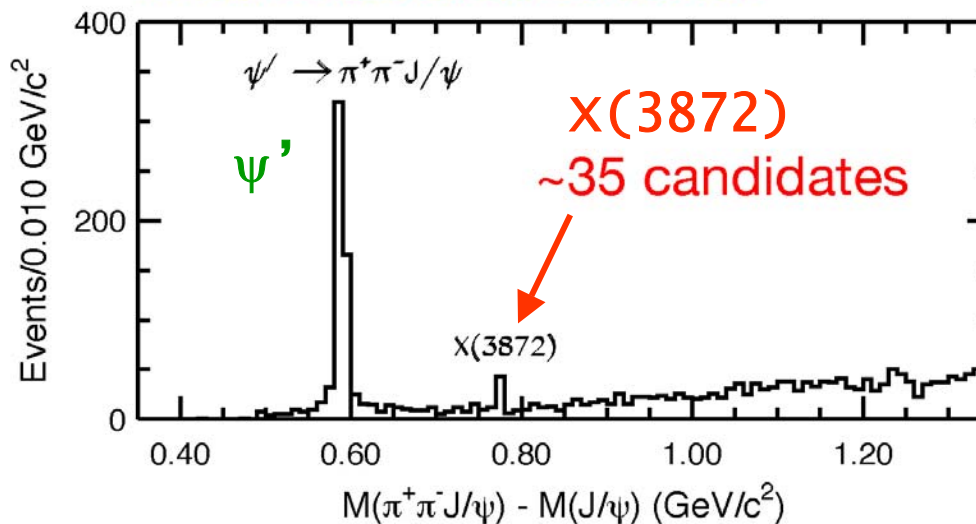
$\rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$
 $\rightarrow I^+I^-$

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]

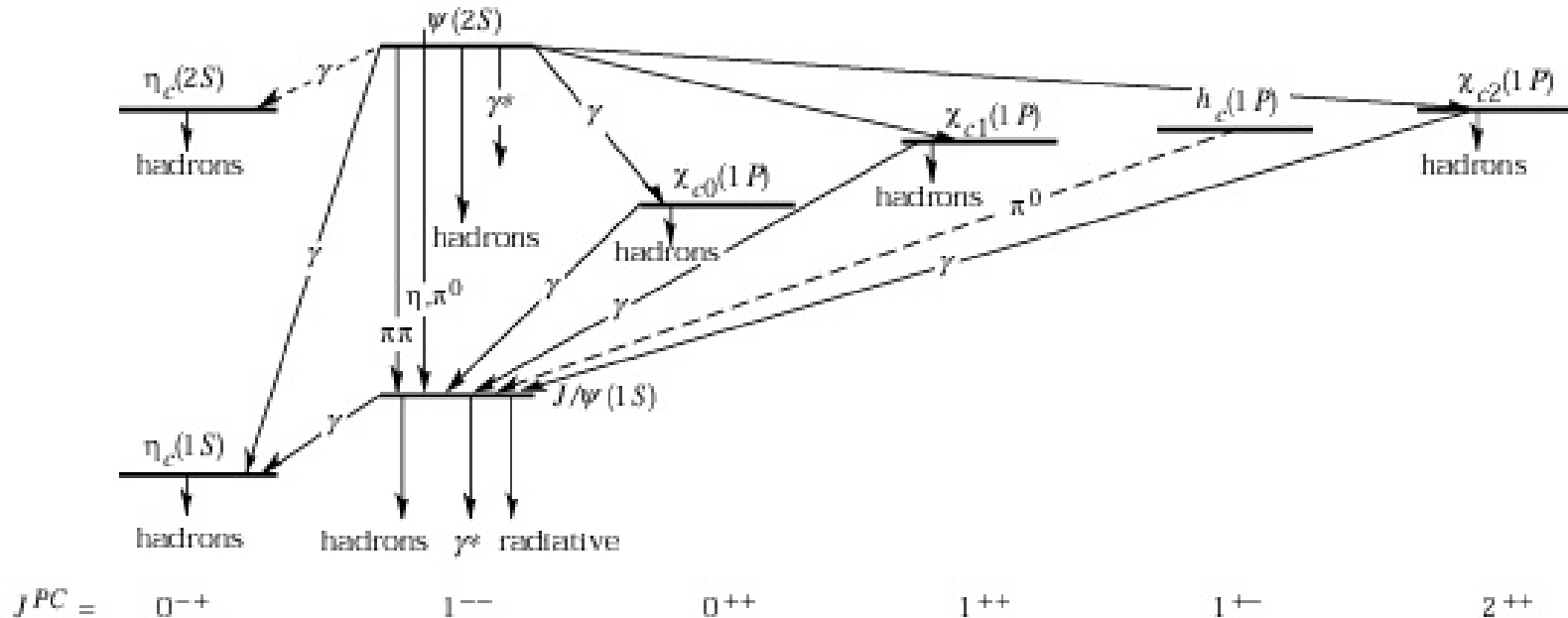
Odkritje so potrdili CDF, D0, BaBar

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)?

**Iskanje ostalih razpadnih načinov stanja X(3872):
zgornje meje z 90% stopnjo zanesljivosti (večina
zmerjena 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):

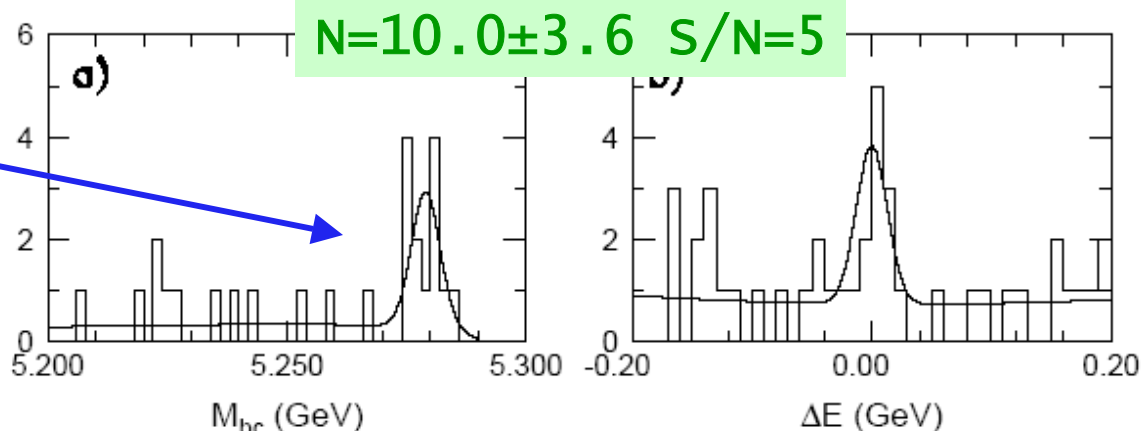
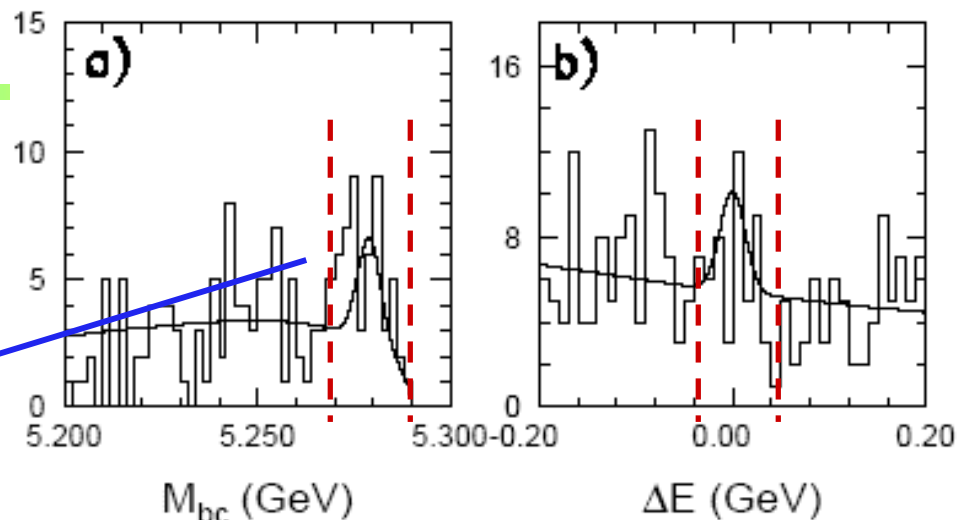
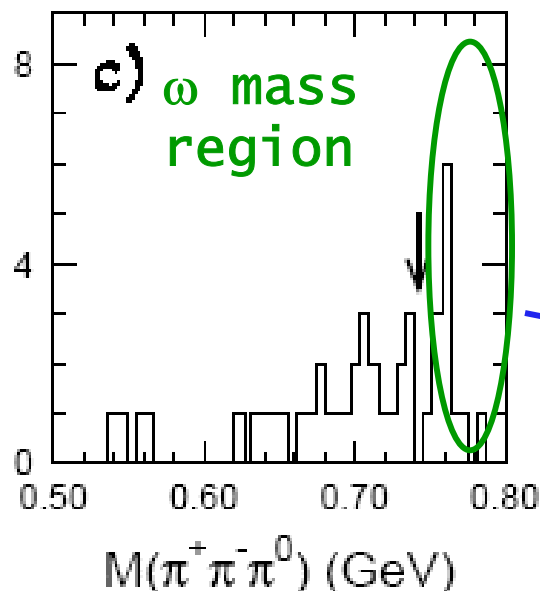
- η_c'' ← M prenizka in Γ premajhna
 - ~~h_c'~~ ← Kotna porazdelitev izključuje 1^+
 - ~~χ_{c1}'~~ ← $\Gamma(\gamma J/\psi)$ premajhna
 - ~~ψ_2~~ ← $\Gamma(\gamma \chi_{c1})$ premajhna; (PRL 93, 2003)
 - η_{c2} ← $\pi\pi \eta_c$ bi moral prevladovati nad $\pi\pi J/\psi$
 - ~~ψ_3~~ ← $\Gamma(\gamma \chi_{c2} \& D\bar{D})$ premajhna
-  - Izospinsko prepovedani razpadi v $J/\psi \pi^+\pi^-$

Kaj je to novo stanje X(3872)?

Iskanje razpada

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

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



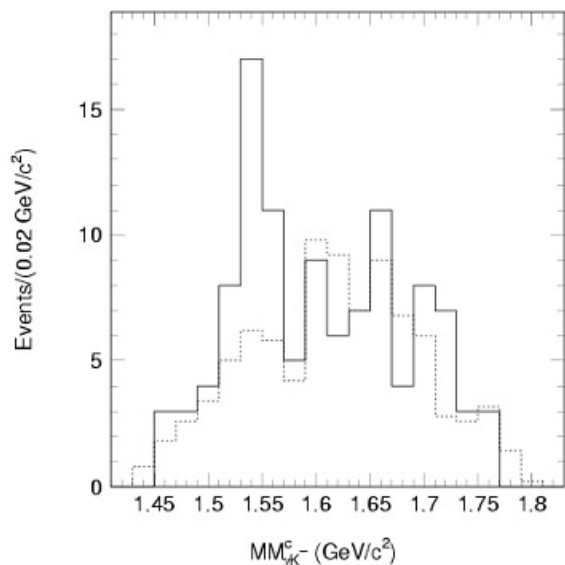
$M(\omega) + M(J/\psi) = 3879 \text{ MeV}$
 $X(3872) \rightarrow \omega J/\psi$ preko virtualne ω

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

v skladu z DD^* molekularnim modelom

Swanson, PLB 588, 189 (2004)

Iskanje pentakvarkov

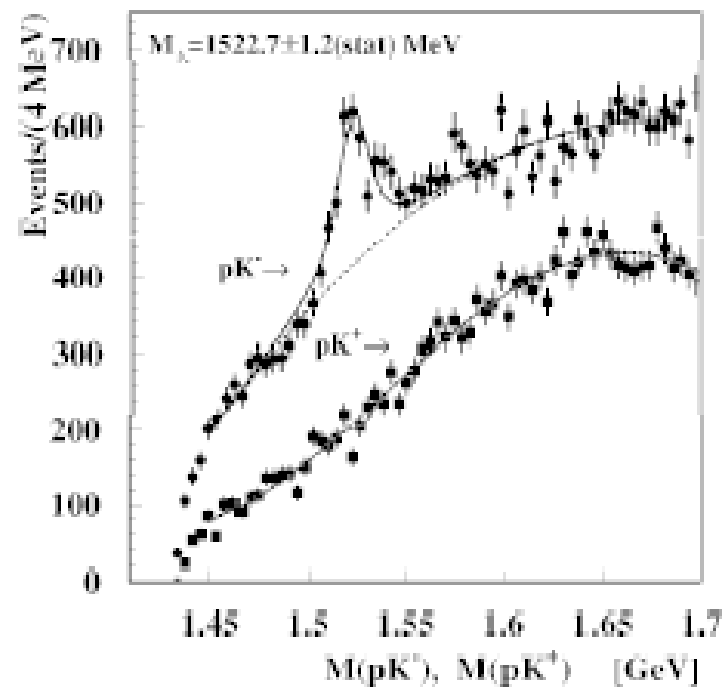


2003: eksperiment LEPS najde vrh v porazdelitvi invariantne mase $nK^+ = (udd+u\bar{s}) \rightarrow$ **pentakvark** $\theta^+(1520)$

Sledi prava poplava teoretičnih interpretacij...

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

Primer: Rezultat meritev s spektrometrom Hermes \rightarrow

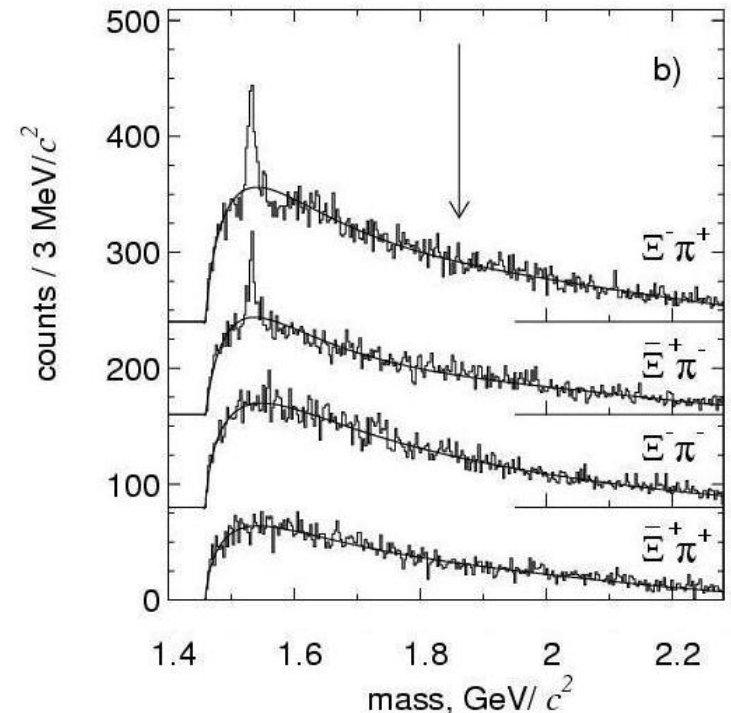
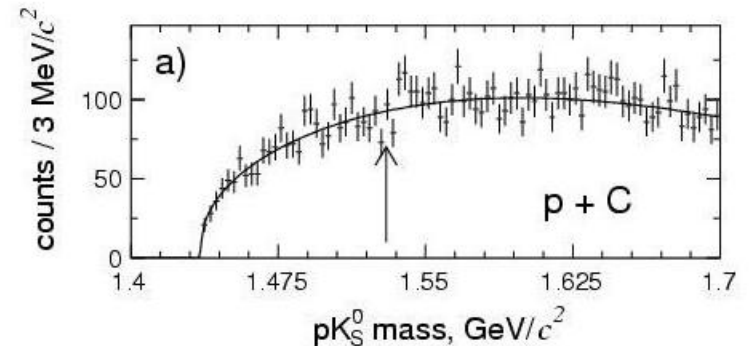


Iskanje pentakvarkov 2

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/pentakva
rk/pqintros.html](http://www.f9.ijs.si/~zivko/pentakva
rk/pqintros.html))

Primer: Rezultat meritev pri HERA-B→

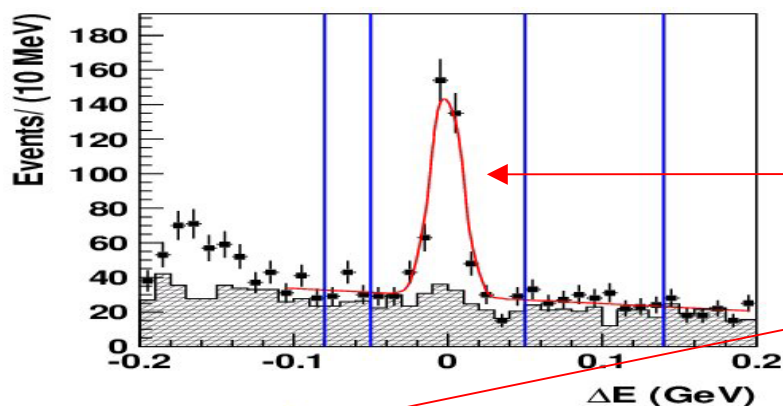


Iskanje pentakvarkov pri Belle

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

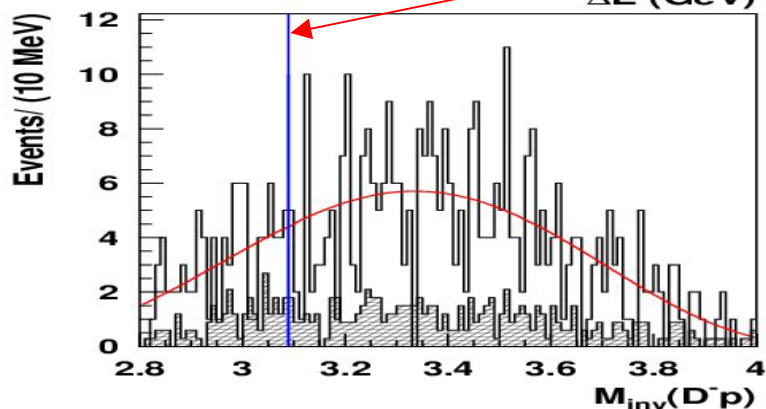
$$B^0 \rightarrow p \bar{p} K_S \quad \Theta^+(1540) \rightarrow p K_S \quad B^0 \rightarrow D^{(*)-} p \bar{p} \pi^+ \quad \Theta_c^0 \rightarrow D^{(*)-} p$$

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



Primer: $B^0 \rightarrow D^- p p \bar{\pi}^+$

N dogodkov 303 ± 21



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

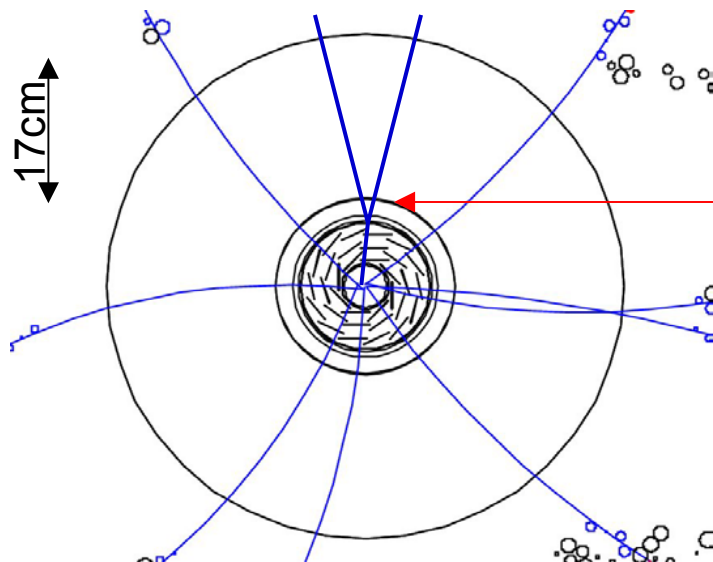
$< 1.2\%$ at 90% CL

Iskanje pentakvarkov pri kaonskih interakcijah z detektorskim materialom

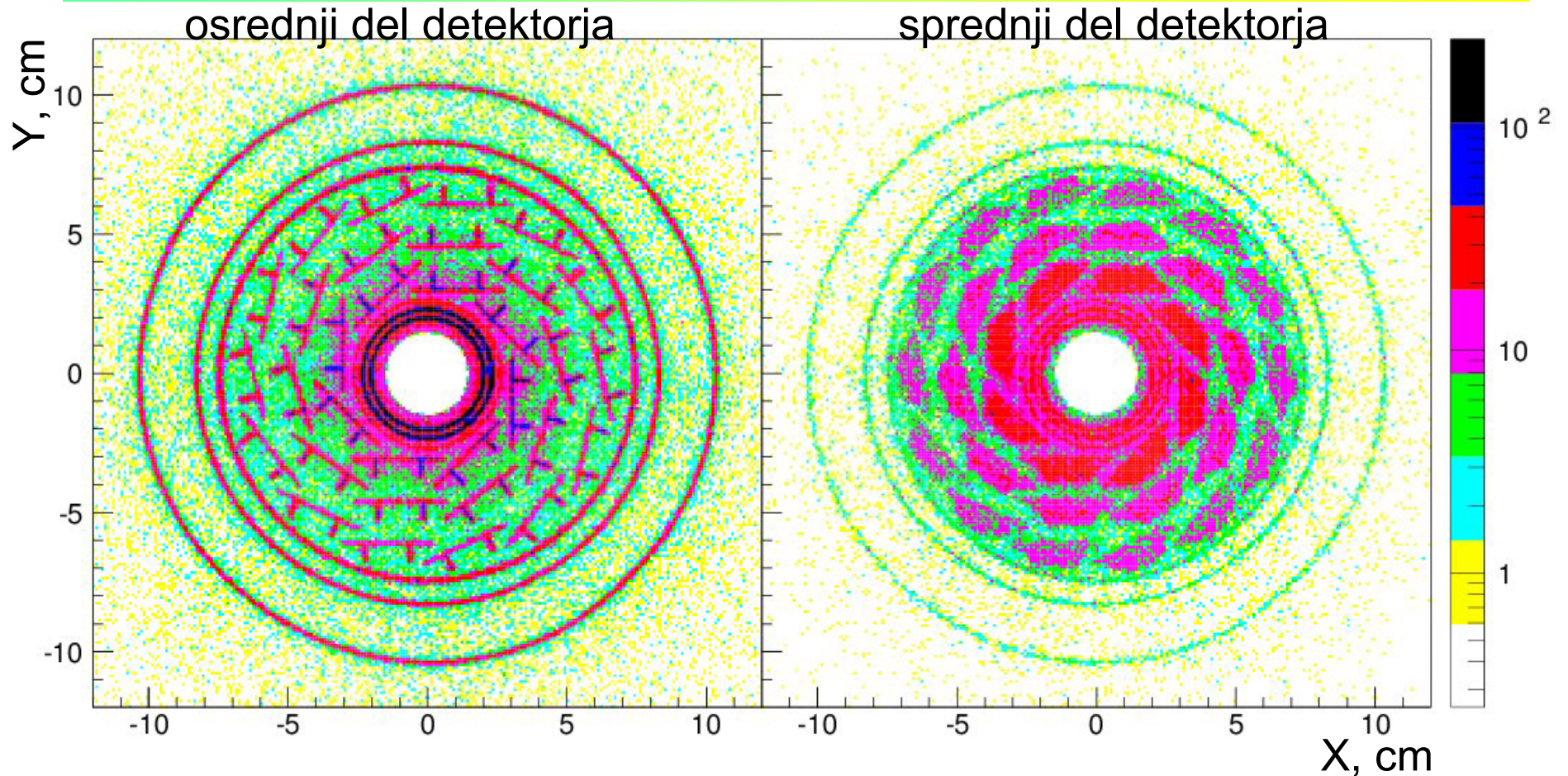
Kaj pa, če je pač verjetnost, da pentakvarki nastanejo pri razpadih mezonov B, zelo majhna? Poglejmo si zato reakcijo $KN \rightarrow pK$!

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.



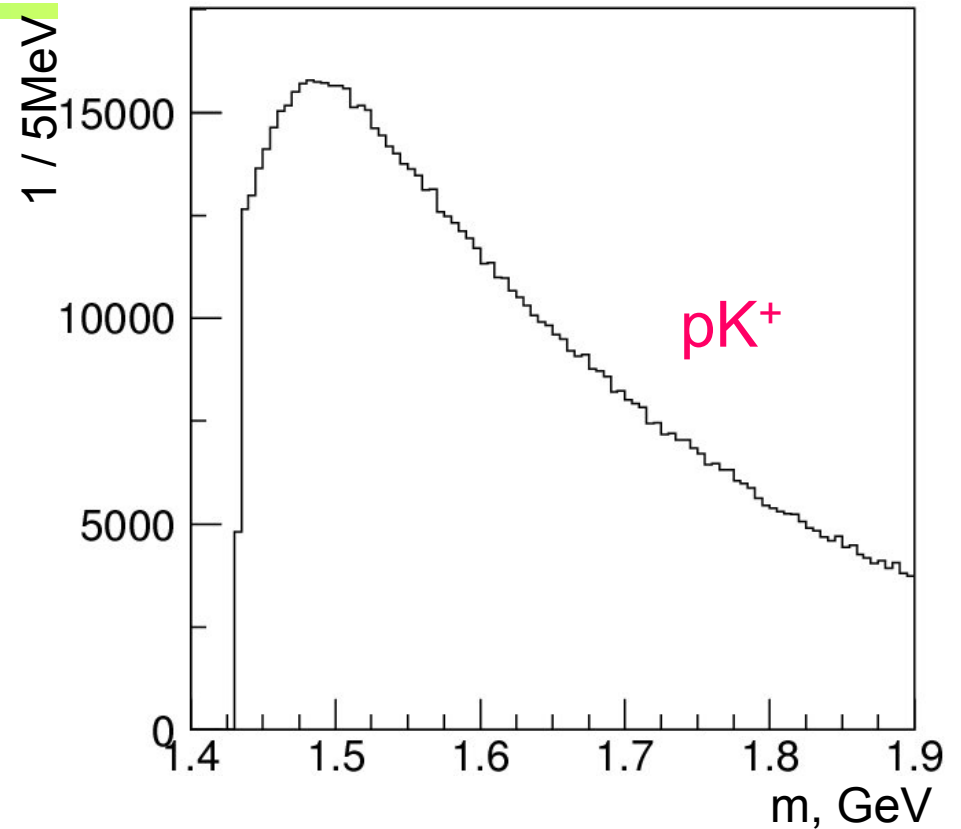
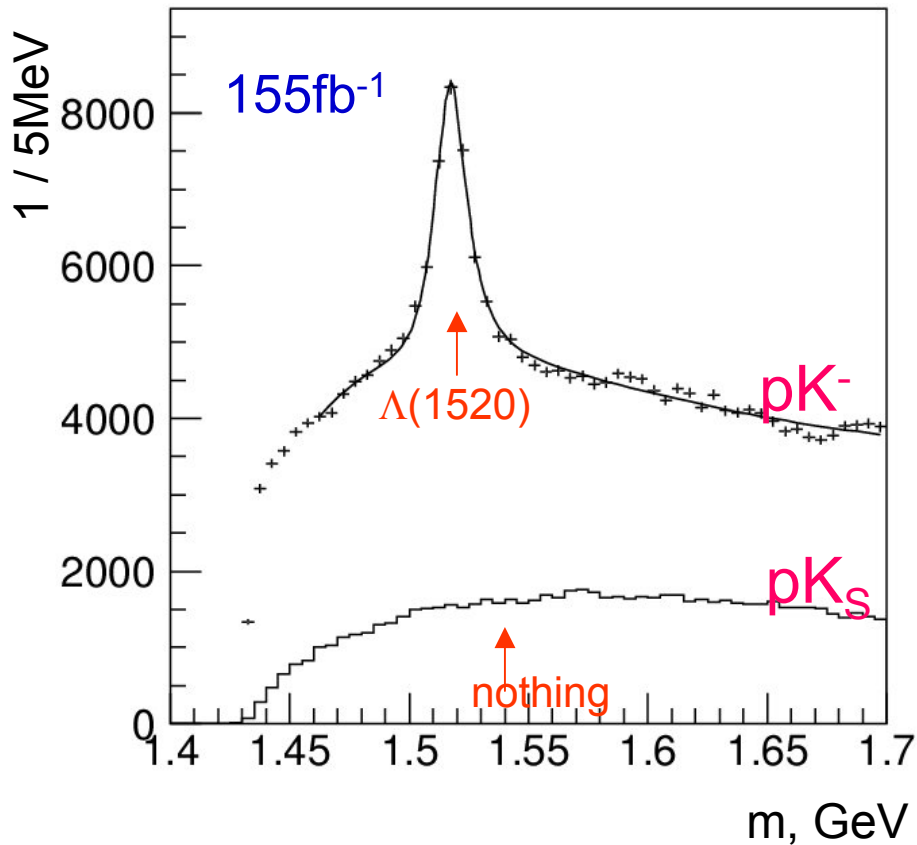
Porazdelitev sekundarnih pK^- verteksov



“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

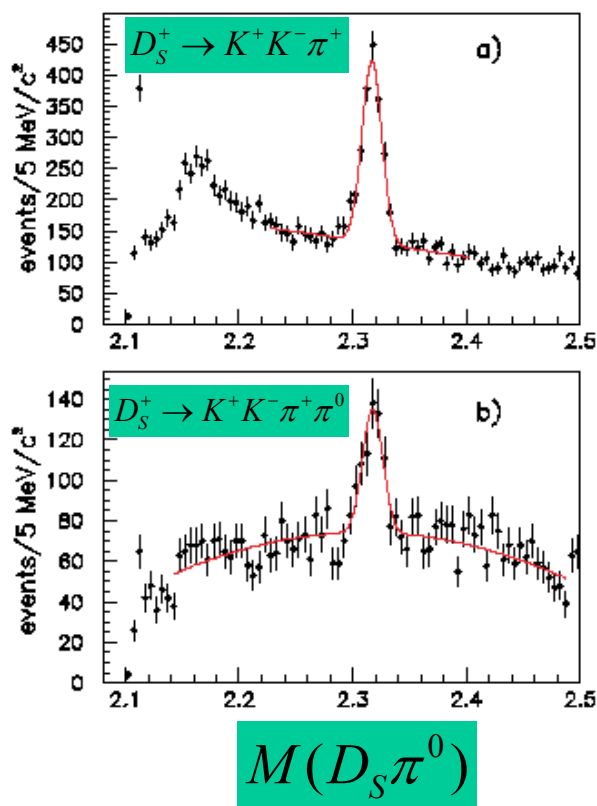
D_s^+ : kvark **c** + antikvark **s** $\sim 2 m_p$

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

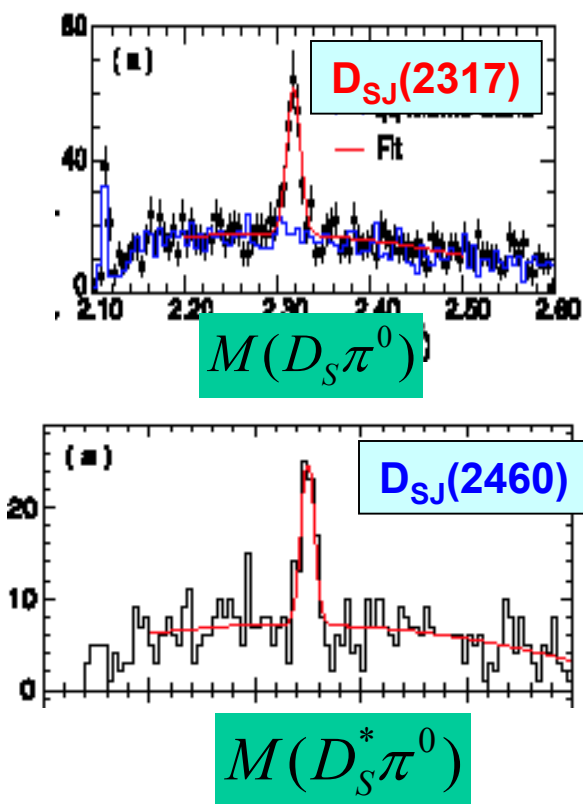
Vzbujena stanja D_{sJ} : pričakujemo, da je masa dovolj visoka, da lahko razpade na $D_s^+ K^-$ – dovoljen razpad \rightarrow **M velik, Γ velik**

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

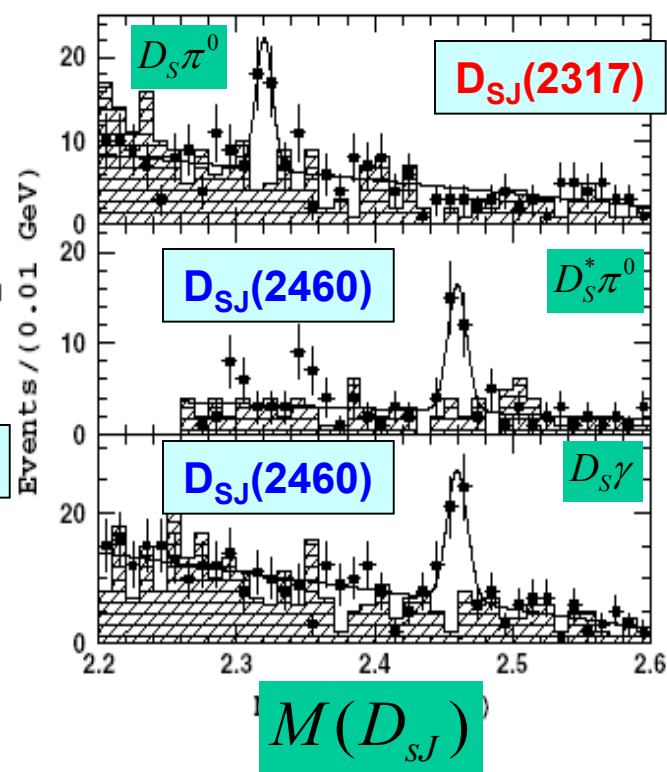
BaBar - $D_{sJ}(2317)$



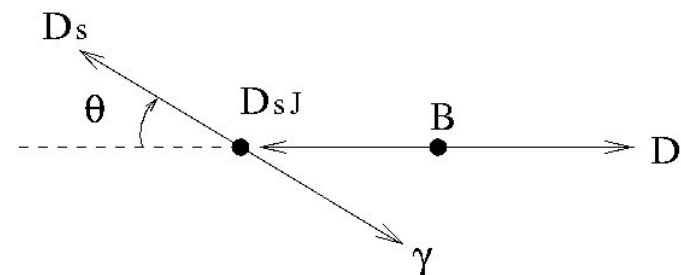
CLEO



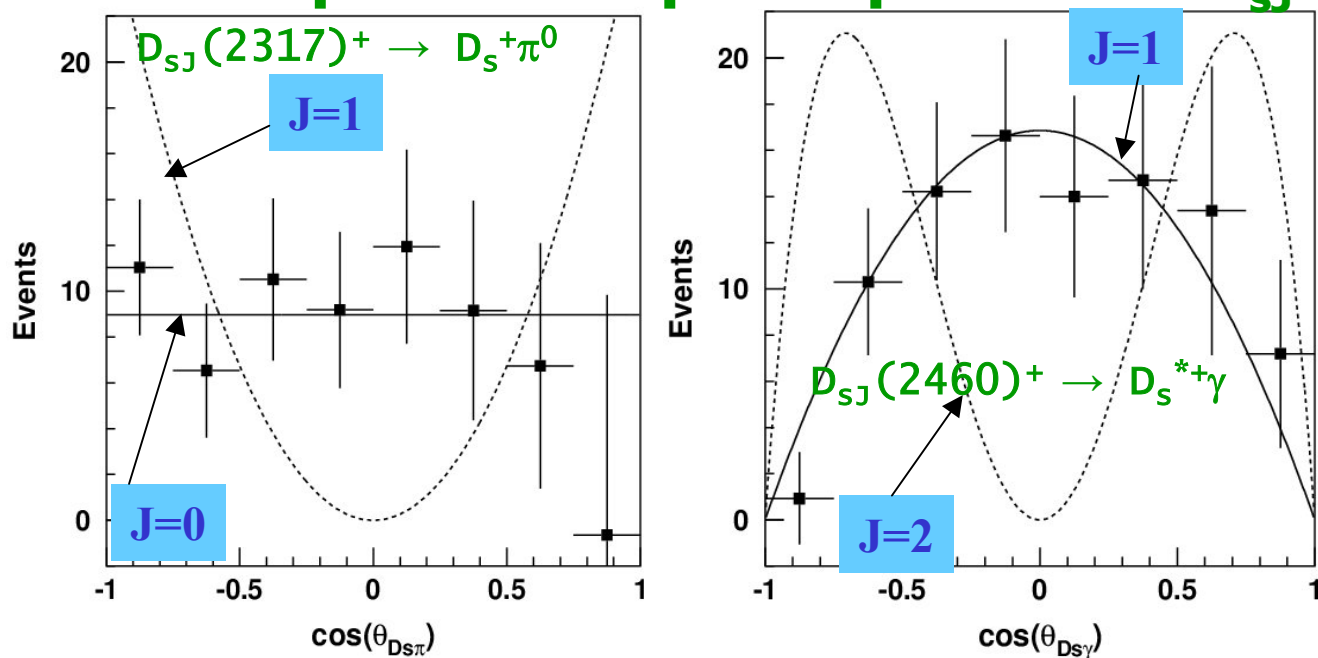
Belle



Lastnosti mezonov D_{sJ}



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

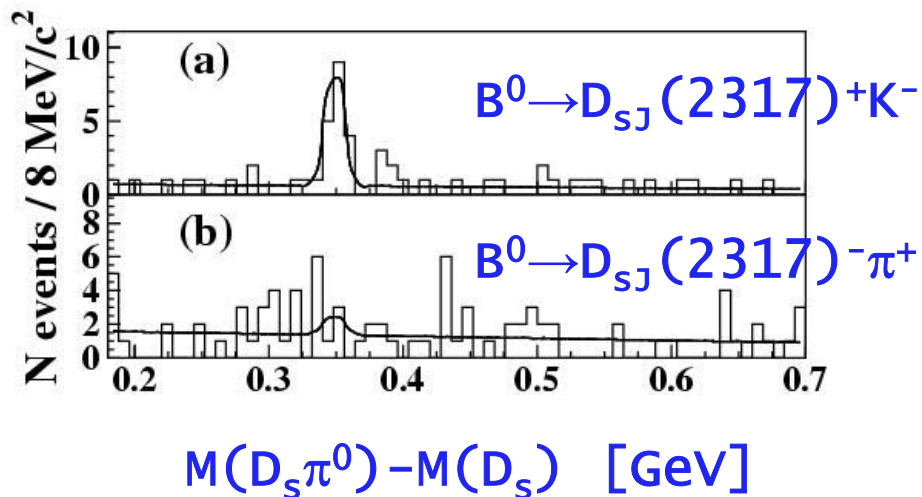


Razen presenetljivo nizkih mas so vse lastnosti konsistentne z najnižjimi P stanji z $J^P=0^+,1^+$

Lastnosti mezonov D_{sJ}

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

Primerjava razpadov
s K in π



Primerjava z razpadi D_s

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

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

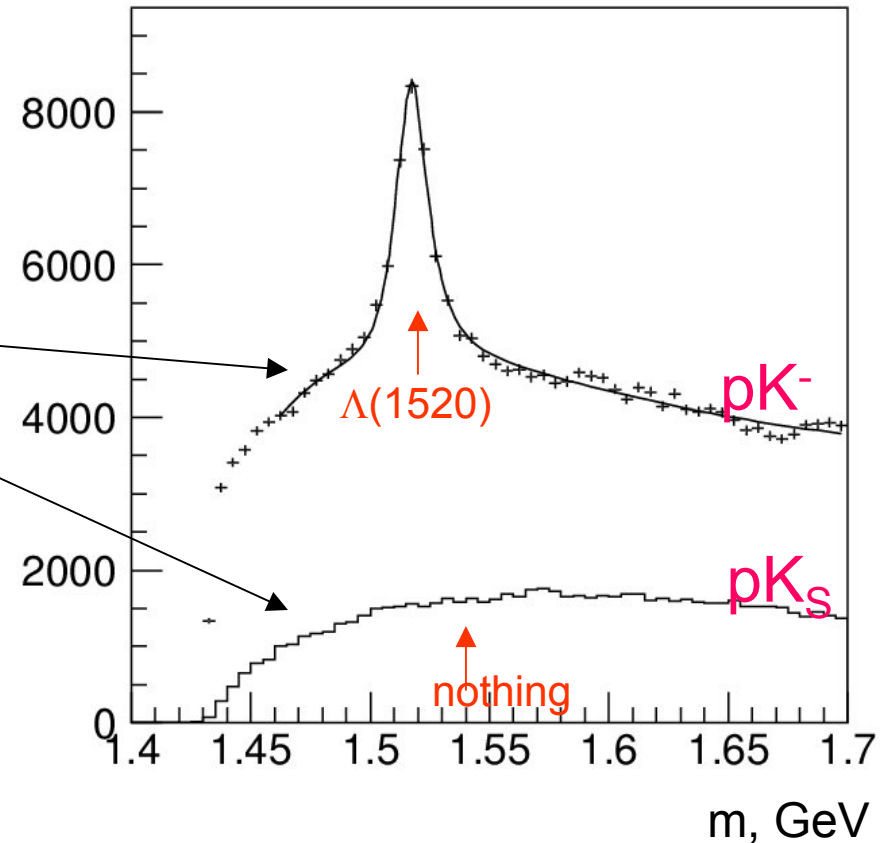
$$\text{Br}(B^0 \rightarrow D_{sJ}(2317)^+ K^-) \times \text{Br}(D_{sJ}(2317)^+ \rightarrow D_s^+ \pi^0) = (5.3 \pm 1.4 \pm 0.5 \pm 1.4) \times 10^{-5}$$

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

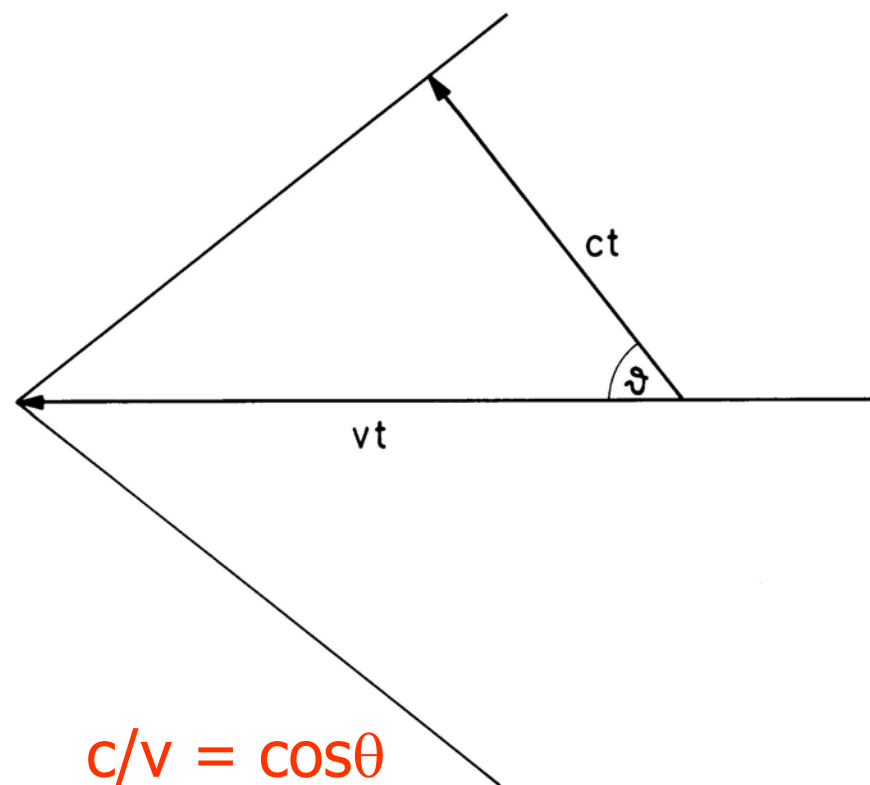
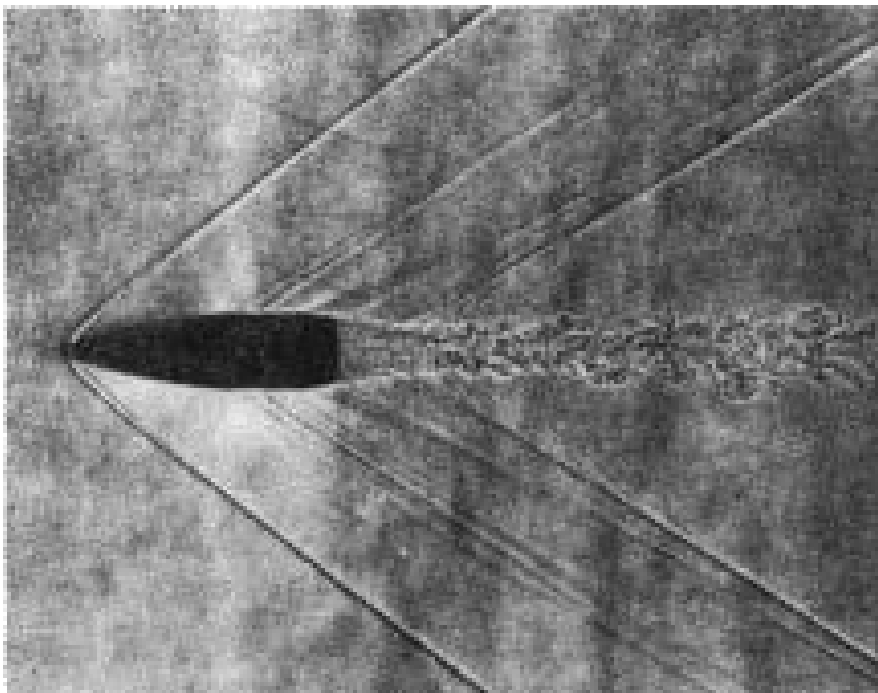
Delce identificiramo po njihovi **masi**. Kako določiti maso brez tehtanja?

→ 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



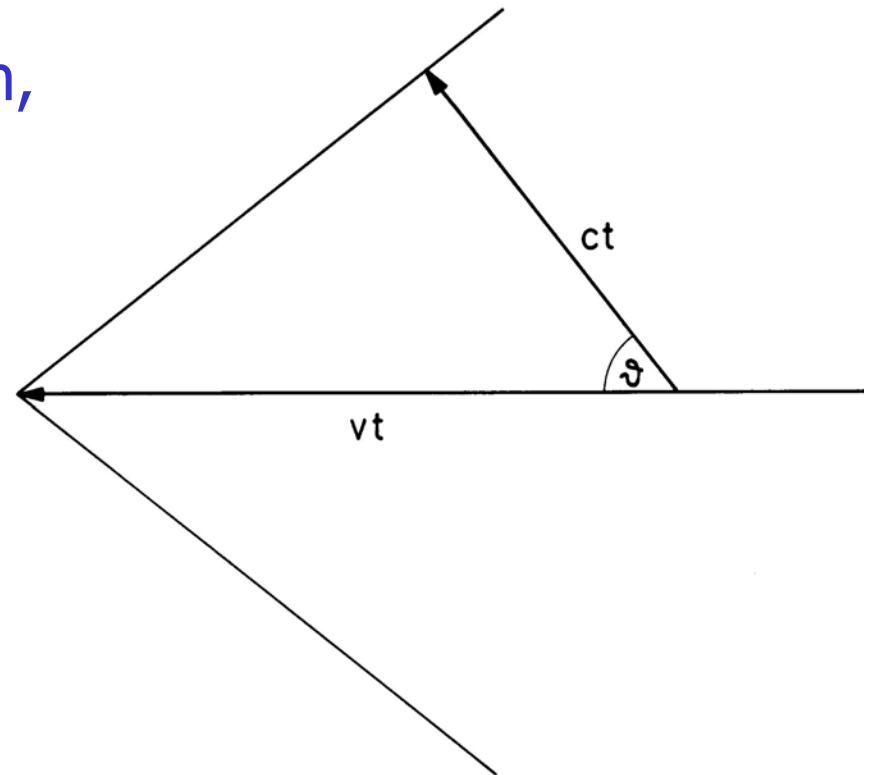
Na sliki: kot 52° , $v = c/\cos\theta = 340\text{m/s} / \cos 52^\circ = 552\text{m/s}$
Iz kota fronte določimo hitrost krogle!

Sevanje delca, ki leti hitreje od svetlobne hitrosti v sredstvu

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

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

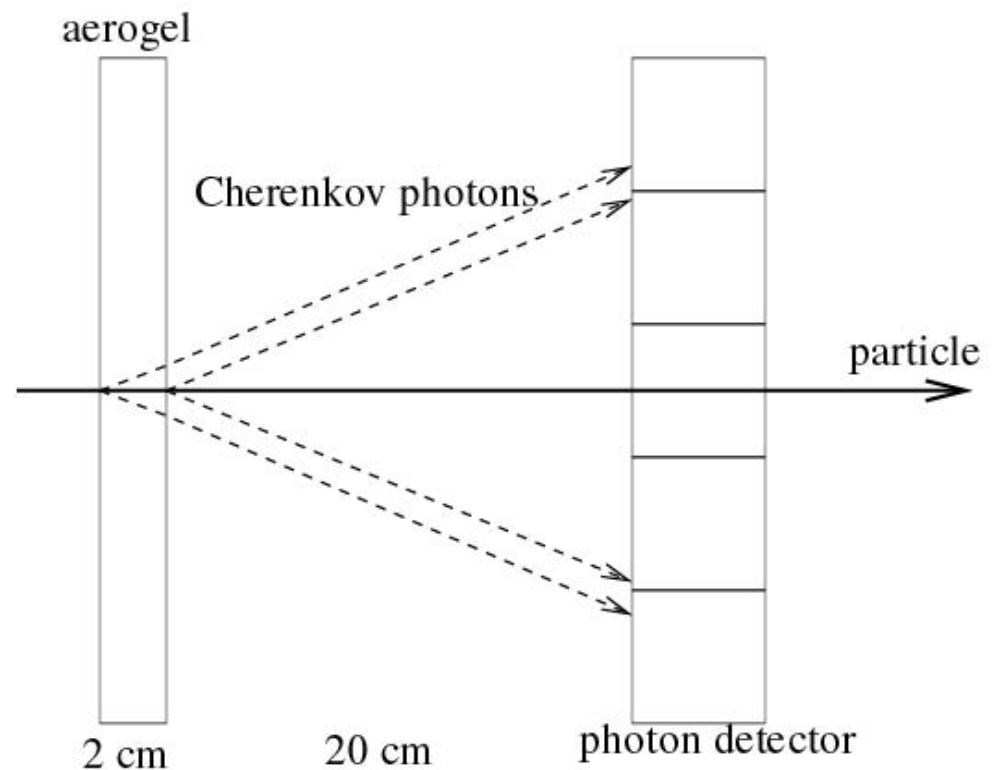
Iz kota, pod katerim je izsevana svetloba, določimo hitrost delca.



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

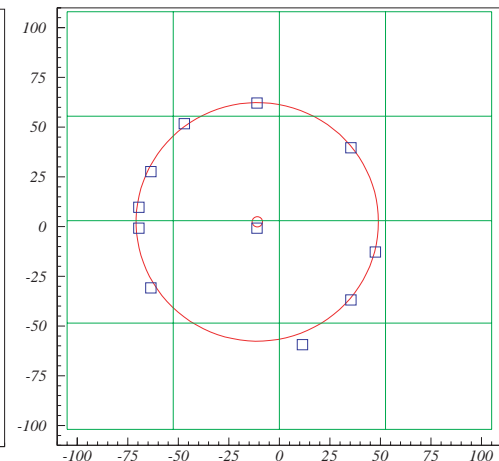
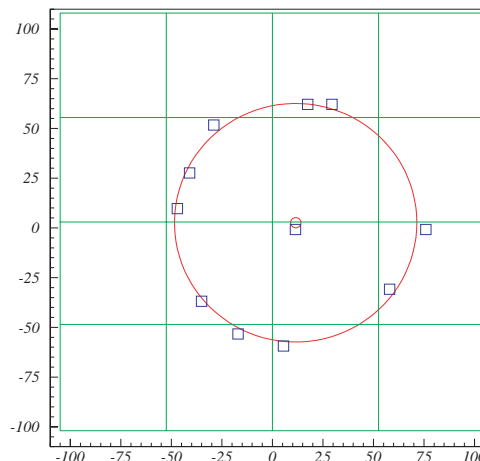
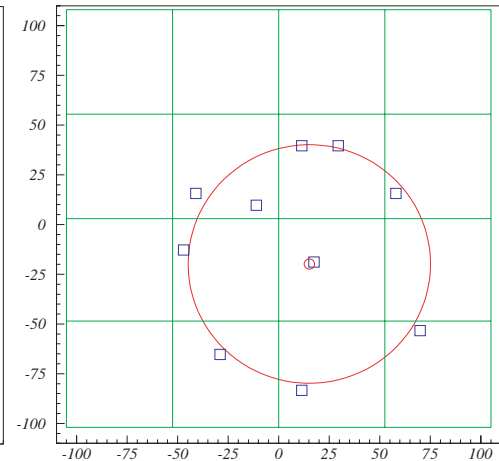
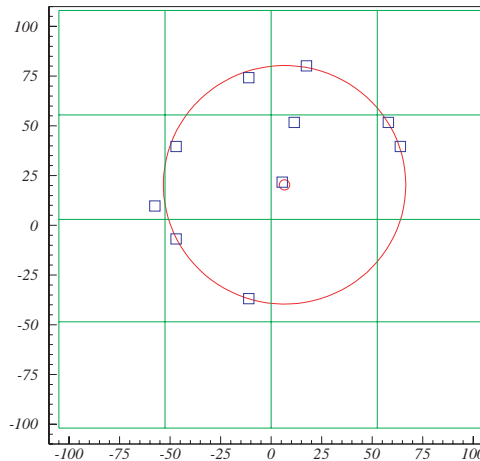
Meritev kota Čerenkova

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.