



# Fizika jedra in osnovnih delcev

## Uvod

Peter Križan

# Vsebina

---

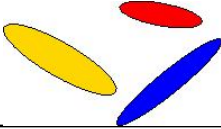
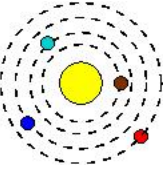
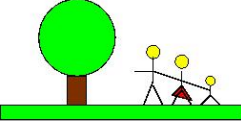
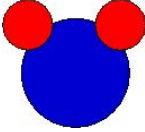
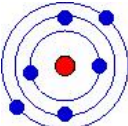
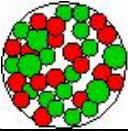
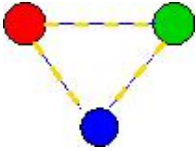

Uvod

Standardni model osnovnih delcev in njihovih interakcij

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

Program predmeta

Pregled literature

<b>DELCI</b>		<b>in</b>	<b>SILE</b>	<b>po</b>	<b>nadstropjih</b>
Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
$10^{21}$	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
$10^{14}$	galaksije zvezde planeti				astronom, astrofizik
1	živa bitja		instinkti	ohranitev vrste	biolog, sociolog
$10^{-8}$	molekule		elektro- magnetna	pestrost svetlobe, življenja  energija	kemik, atomski fizik,
$10^{-10}$	atomi				atomski fizik
$10^{-14}$	jedra		jedrska	kemijski elementi, sonce, reaktor	jedrski fizik
$10^{-15}$	nukleoni		močna, šibka	moja plača	fizik osnovnih delcev
$10^{-18}$	kvarki		?	?	

# Kakšen naj bo opis narave?

---

Dve zahtevi:

- Preprost
- Pravilen



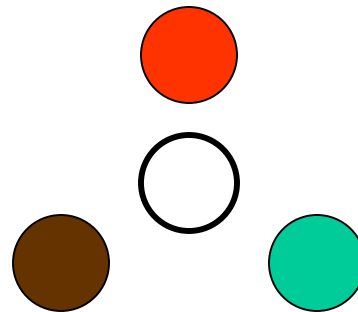
# Opis narave po Anaksimenesu

---

Anaksimenes iz Mileta:

Narava je sestavljena iz štirih elementov:

- zrak
- zemlja
- voda
- ogenj



→ Preprost, a napačen...

# Opis narave po Medeljejevu

D.I. Mendeljejev:

Periodni sistem elementov:

	IA																	0	
1	1 H	IIA																	2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na	12 Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VII	IB	IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110	111	112	113						

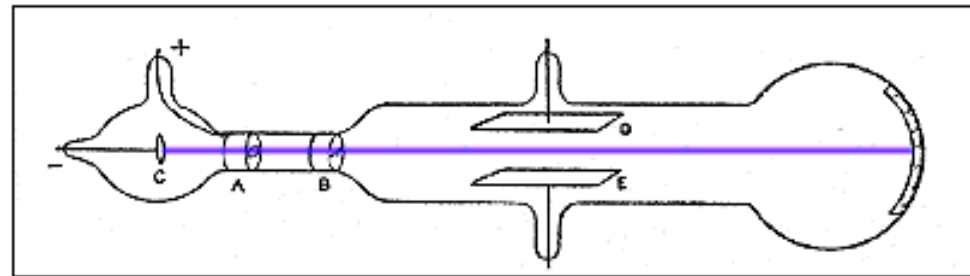
  

* Lanthanide Series	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
+ Actinide Series	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

~100 elementov

→Pravilen, a zapleten...

# Odkritje elektrona: začetek fizike osnovnih delcev



**J.J. Thomson** (1897): odkritje elektrona (NN 1906)

---

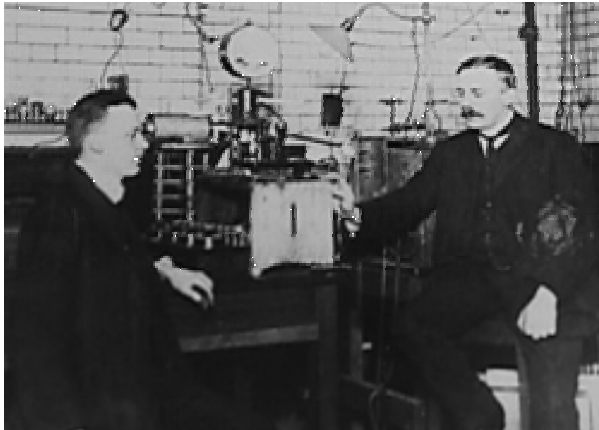
A. Einstein:  $E = mc^2$

A. Einstein, M. Planck: energijski paketi svetlobe  
(NN 1921, 1918)

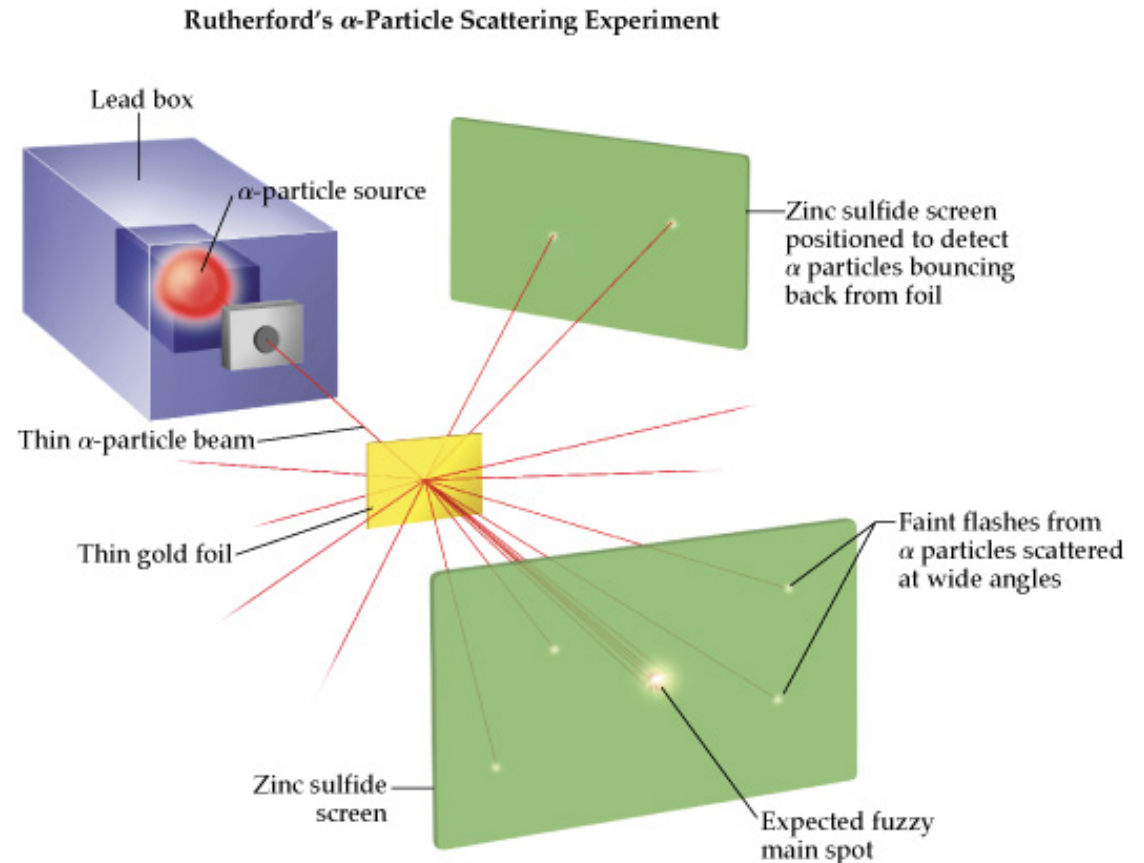
L. de Broglie:  $\lambda_B = hc / E_{\text{kin}}$  (NN 1929)

W. Heisenberg:  $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$  (NN 1932)

# Sipanje delcev $\alpha$ na Au foliji

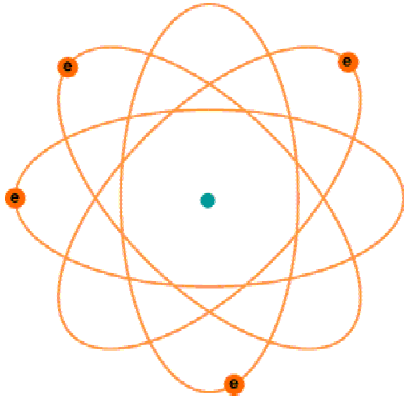


Rutherford, Geiger



Pozitivni naboj enakomerno porazdeljen po atomu  $\rightarrow$  vsi delci  $\alpha$  se sipljejo pod majhnimi koti.

Poskus: precej delcev  $\alpha$  se siplje **pod velikimi koti!**



E.Rutherford (1911):  
atomi so iz masivnega  
jedra in elektronskega  
oblaka

Jedro:  $1/1000000000000000000$  prostornine atoma

Toda: A ni enak Z - razen pri vodiku!

He:  $Z=2$ ,  $A=4$ ;

Li:  $Z=3$ ,  $A=7$

---

## J. Chadwick: odkritje nevtrona (NN 1935)



Jedra so sestavljena iz  
protonov in nevtronov !

# Na poti do osnovnih delcev

---

Red v periodnem sistemu → atomi so sestavljeni iz osnovnejših delcev, protonov in nevtronov v atomskem jedru, in elektronov.

Ali sta torej **p** in **n** osnovna delca?



Poleg elektromagnetne še dodatna (močna) sila!!!



H. Yukawa: nosilec močne sile  $\pi$

$$m_{\pi} \sim 0,1 \text{ GeV}$$

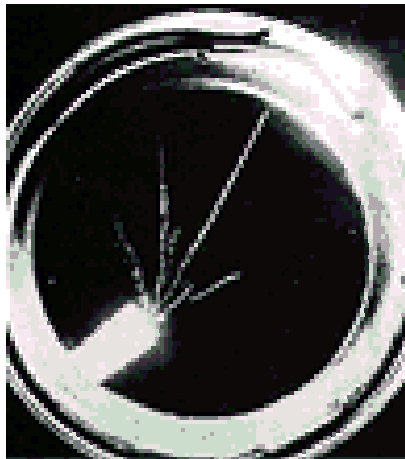
(NN 1949)

$$V(r) \propto \frac{e^{-r/a}}{r}$$

$$a = \frac{\hbar}{mc}$$

Potencial za interakcijo, ki jo prenaša masiven delec z maso  $m$

$a$ : doseg inerakcije



Žarki  $\alpha$  v meglični celici

(C. Wilson, NN 1927)

# Detekcija delcev

Delec detektiramo tako, da ga pustimo, da interagira s sredstvom v detektorju

Interakcijo nato zabeležimo (razvijemo filmsko emulzijo, fotografiramo mehurčke, obdelamo električni signal) in jo interpretiramo – rekonstruiramo reakcijo ('dogodek').

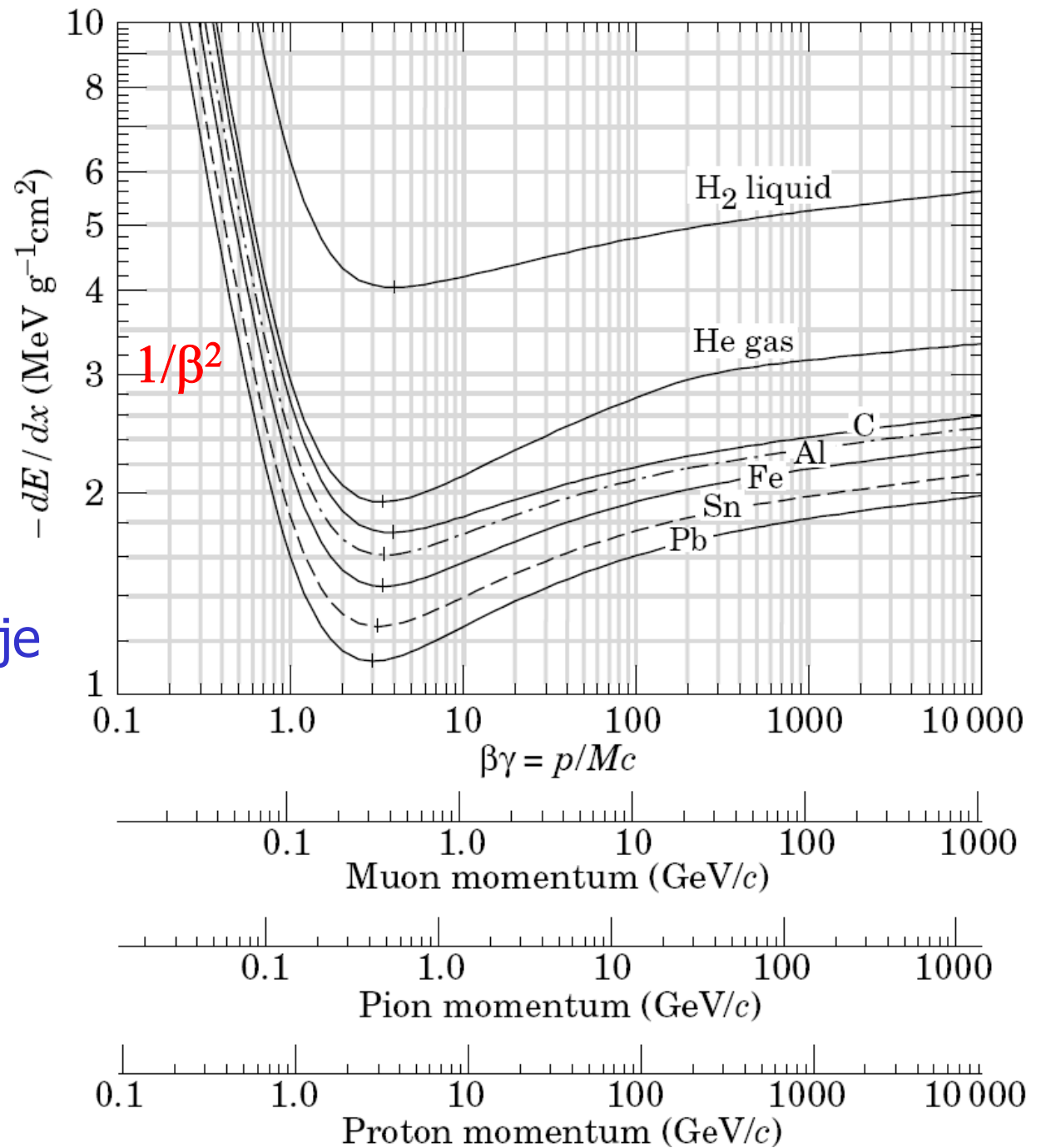
Energijske izgube na enoto poti: formula Betheja in Blocha

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n z^2}{\beta^2} \cdot \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

# Detekcija delcev 2

Energijske izgube na enoto poti: formula Betheja in Blocha

Za  $\beta\gamma < 1$ :  $dE/dx \propto 1/\beta^2$   
→ počasnejši delci izgubljajo več energije na enoto poti



# Izvori delcev

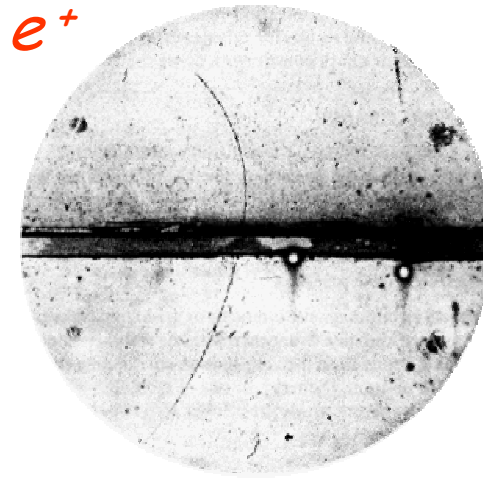
- Radioaktivni izotopi
- Kozmični delci
- Pospeševalniki



# Odkritje pozitrona



C. Anderson  
(NN 1936)



Nabit delec prečka ploščo iz Pb

Naboj: predznak ukrivljenosti v B (kaže v sliko)

Masa: iz gibalne količine – polmer kroga - in hitrosti (to pa ocenimo iz izgube  $\Delta E$  pri preletu svinca)

# Odkritje miona

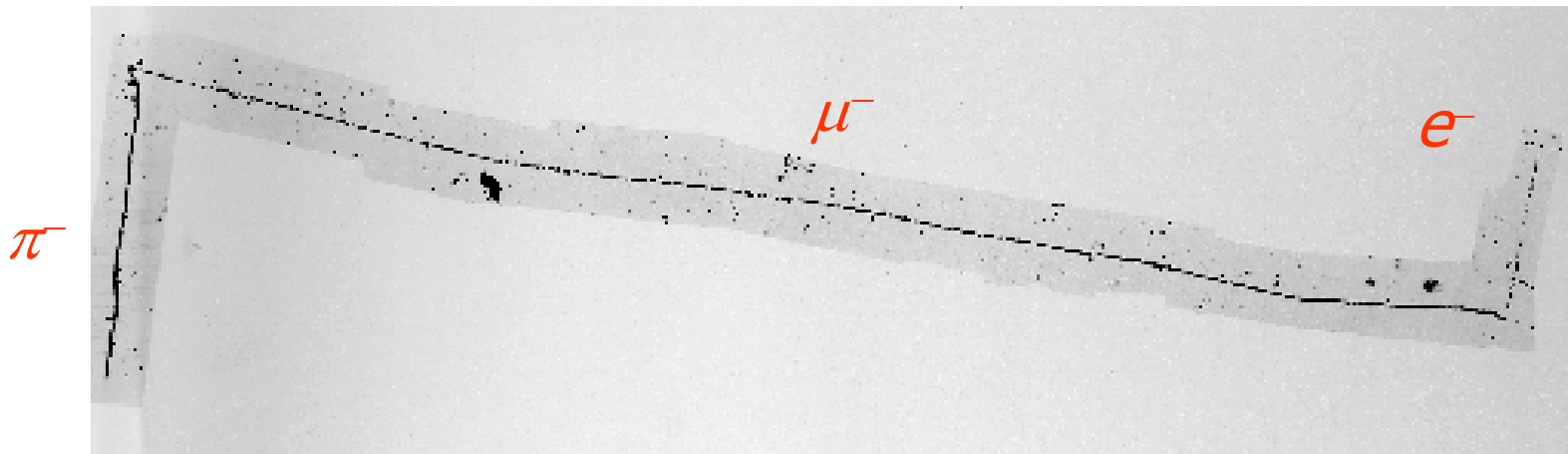


## C. Anderson (1936):

- meritve z meglično celico
- $\sim 4500$  m.n.m.
- $\sim 0$  m.n.m.
- **nov delec**,  $m \sim 0,1$  GeV
- NE občuti močne sile
- $\mu$  (200 – krat težji od **e**)

# Odkritje piona

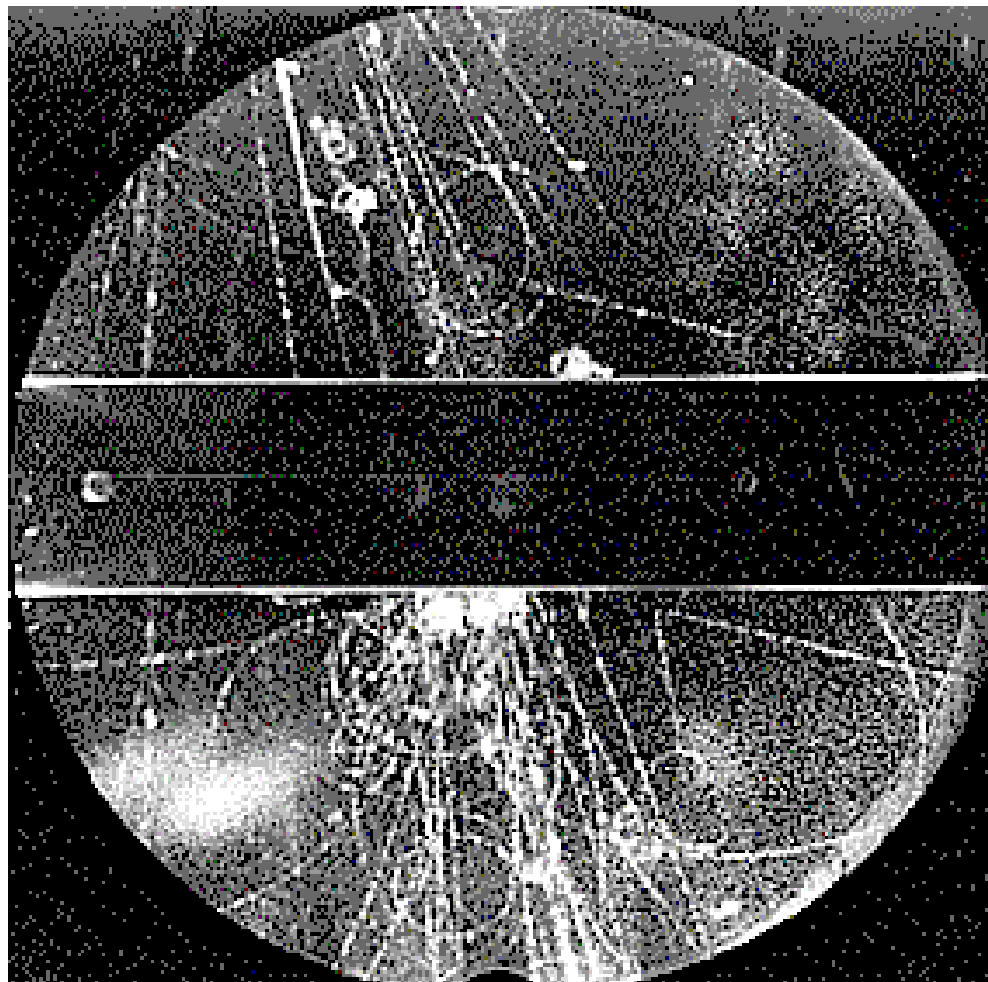
C. Powell: fotografska emulzija, odkritje  $\pi$  (1947)  
(NN 1950)



Pravilno zaporedje: počasnejši delci izgubljajo več energije  $\rightarrow$   
puščajo debelejšo sled



# Odkritje kaonov



svinčena plošča



Rochester, Butler (1947)

# Čudni delci

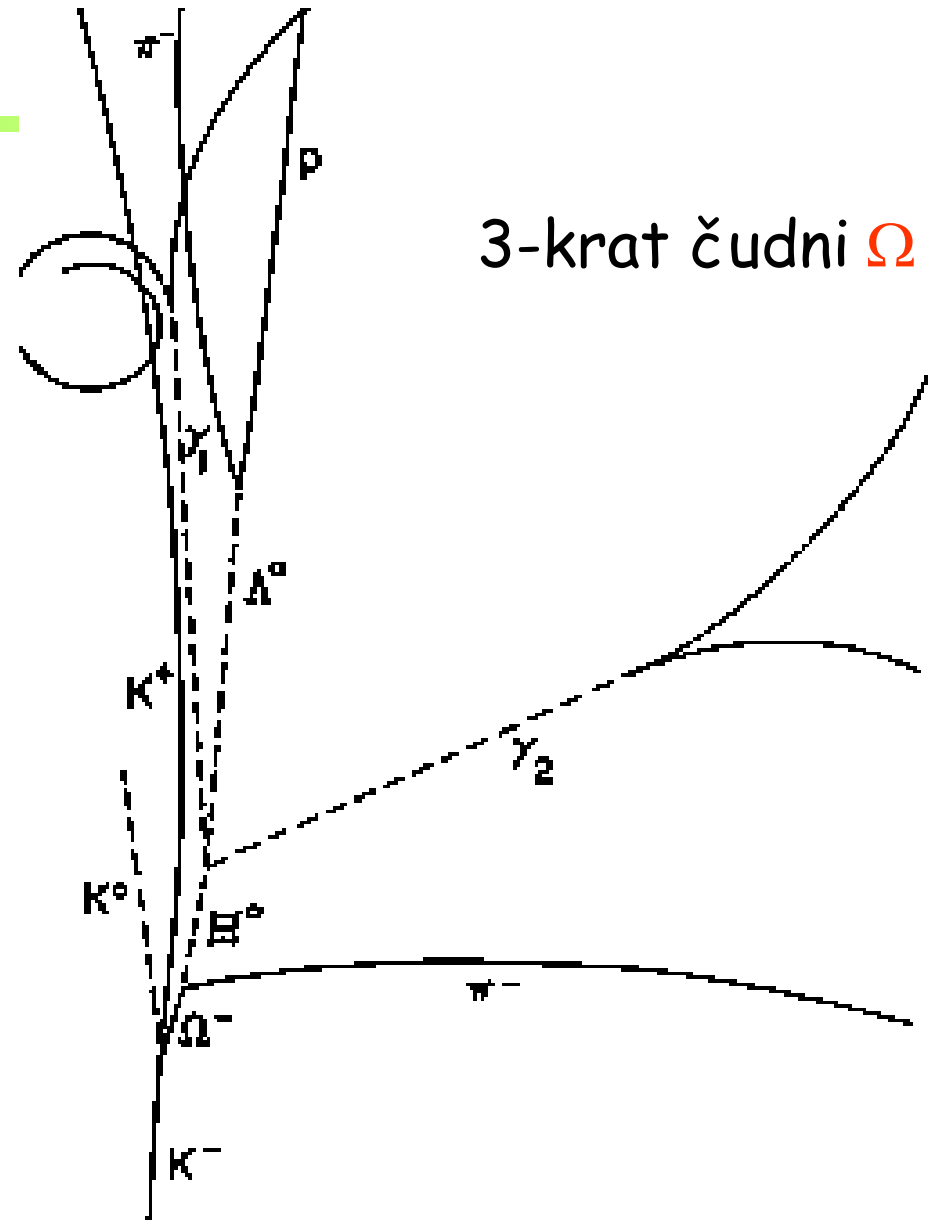
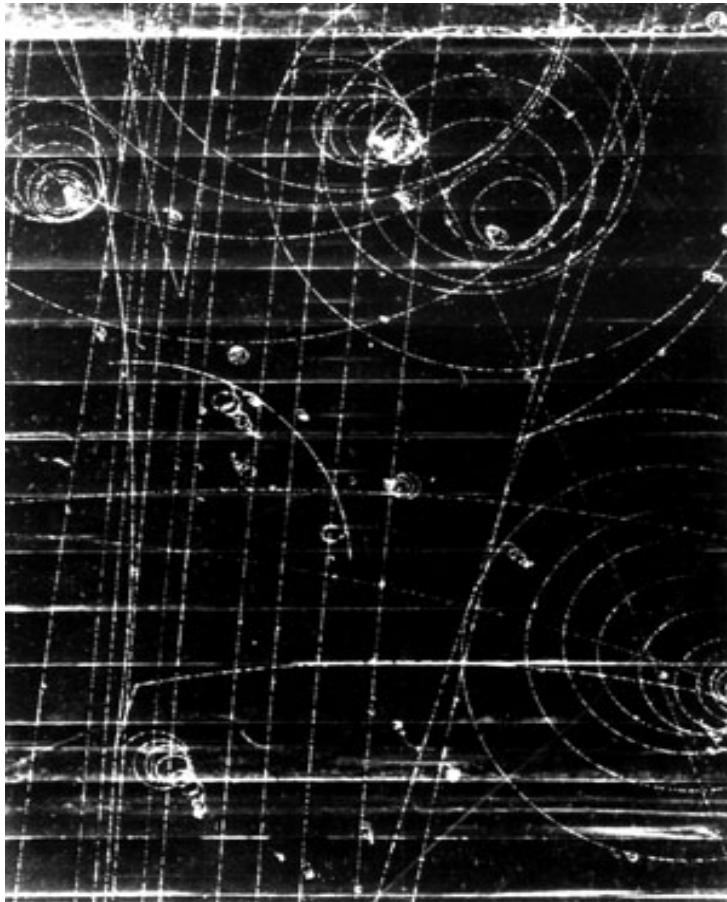
---

Kaoni so primer čudnih delcev: zelo radi nastanejo, razpadejo pa počasi.

Čudni delci **nastanejo** le **v parih**: recimo  
 $p+p \rightarrow p+p+K^++K^-$ , ne pa tudi  $p+p \not\rightarrow p+p+K^0$   
 $\rightarrow$  za nastanek je odgovorna **močna interakcija**, ki ohranja čudnost  $S$  (za  $K^+$   $S=+1$ , za  $K^-$   $S=-1$ )

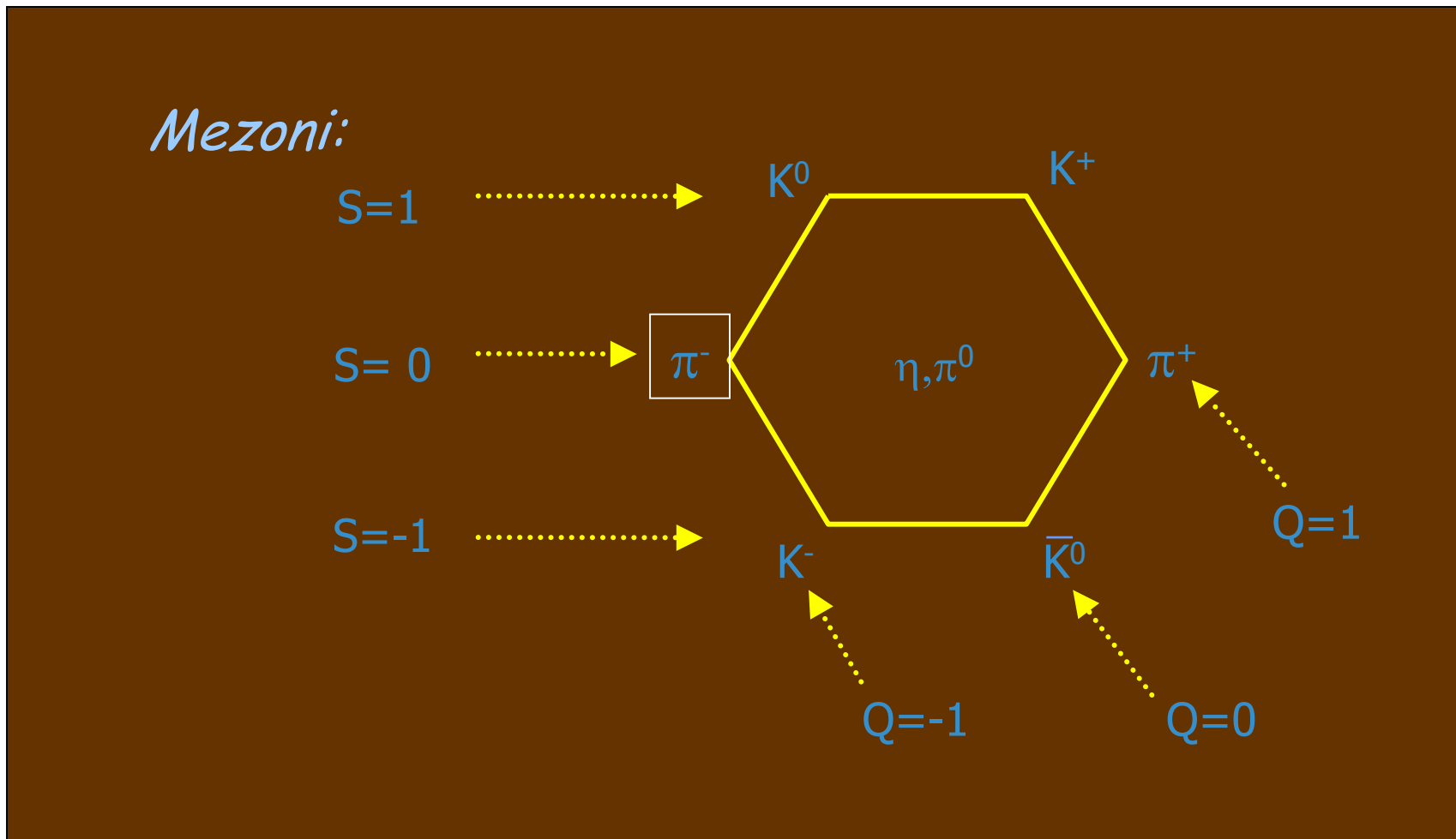
Razpad: na primer  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ : poteka zaradi **šibke interakcije**, čudnost **se ne ohranja**

**Šibka interakcija**: odgovorna tudi za razpad beta  
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$



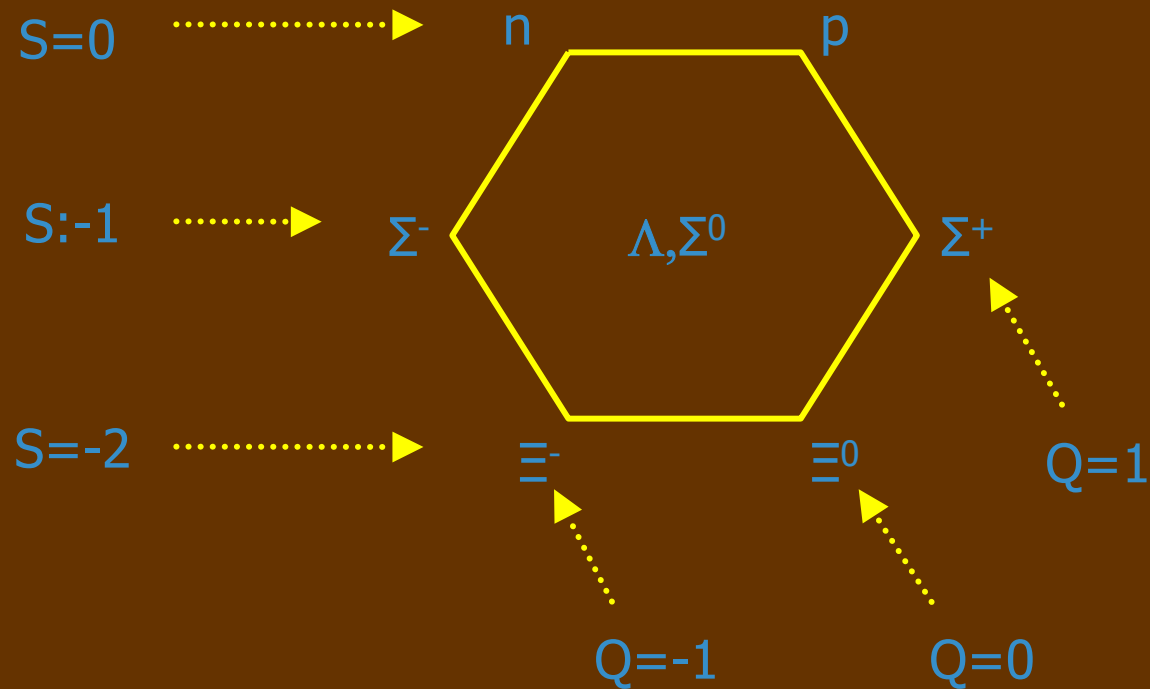
3-krat čudni  $\Omega$

# Periodni sistem: naboj in čudnost



# Periodni sistem: barioni

*Barioni:*



# Na poti do osnovnih delcev

---

Red v periodnem sistemu → atomi so sestavljeni iz osnovnejših delcev, protonov in nevtronov v atomskem jedru, in elektronov.

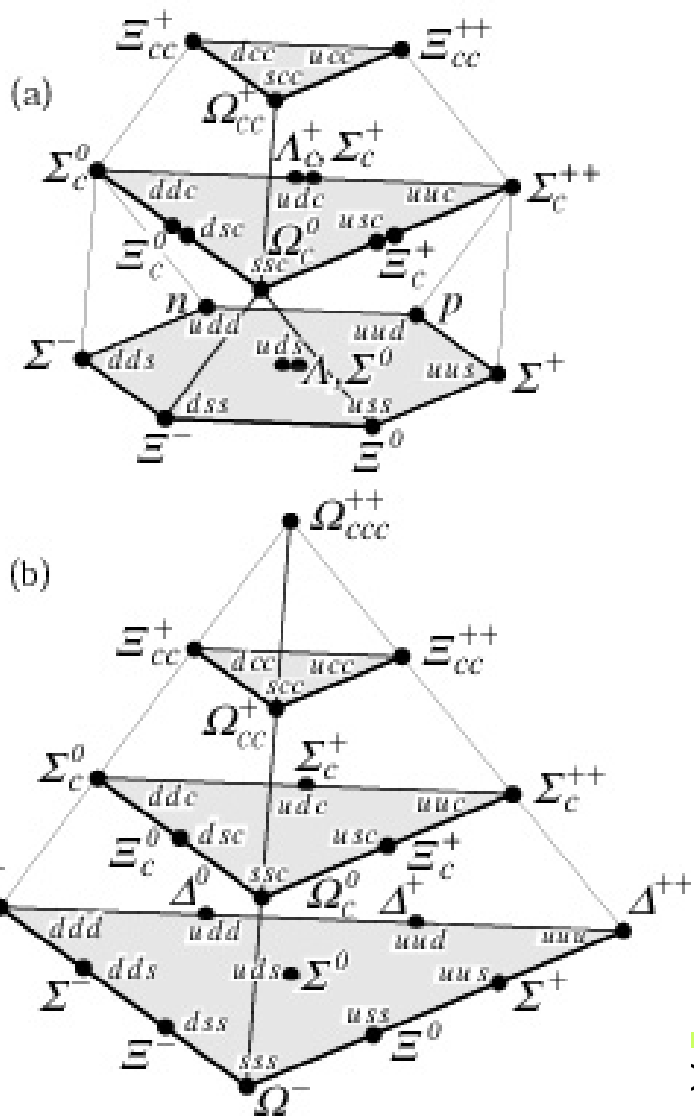
Ali sta torej **p** in **n** osnovna delca?

Težava: imata cel kup sorodnikov (**hadronov**), ki jih podobno kot atome uvrstimo v neke vrste periodni sistem.

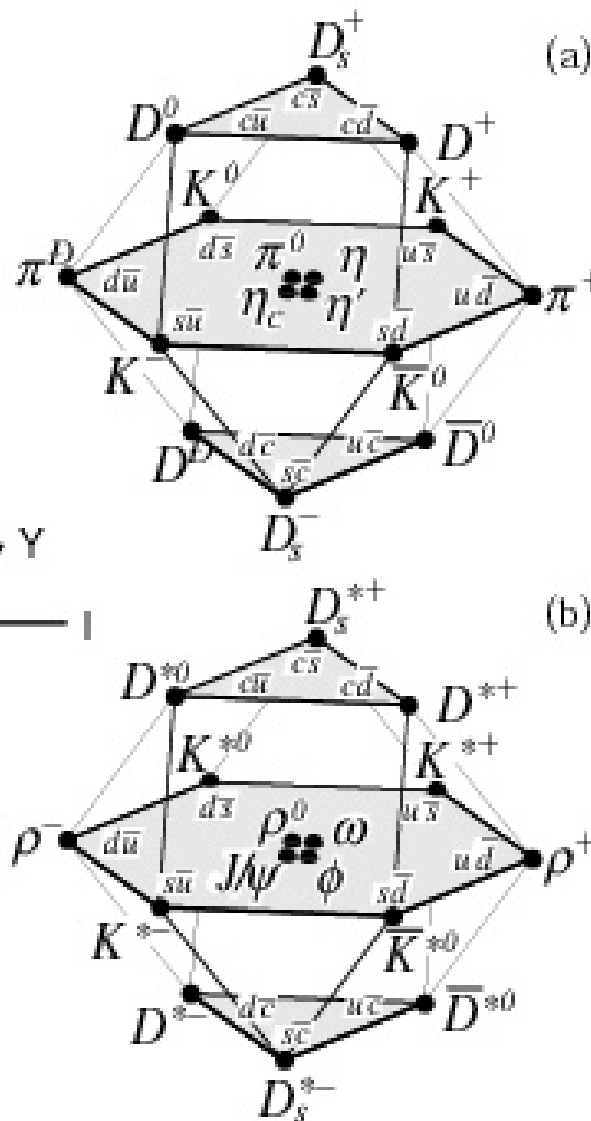
# Na poti do osnovnih delcev

Multipleti hadronov  $\sim$  periodni sistem.

$J=1/2$



$J=0$



$J=1$

) - uvod

n

---

M. Gell-Mann: hadroni so sestavljeni iz kvarkov!



u:  $Q=+2/3$

d:  $Q=-1/3$

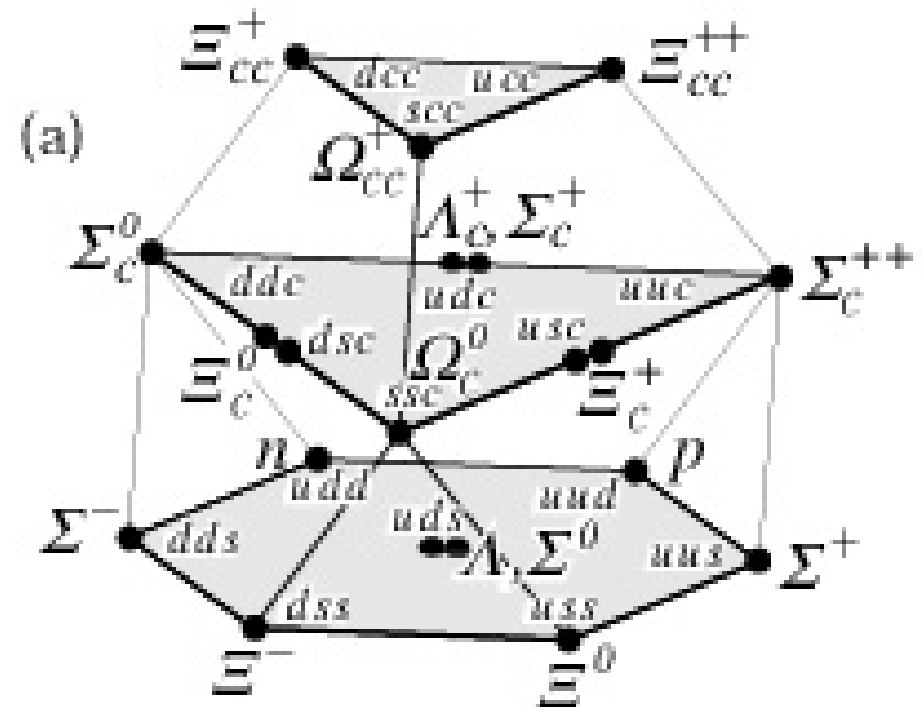
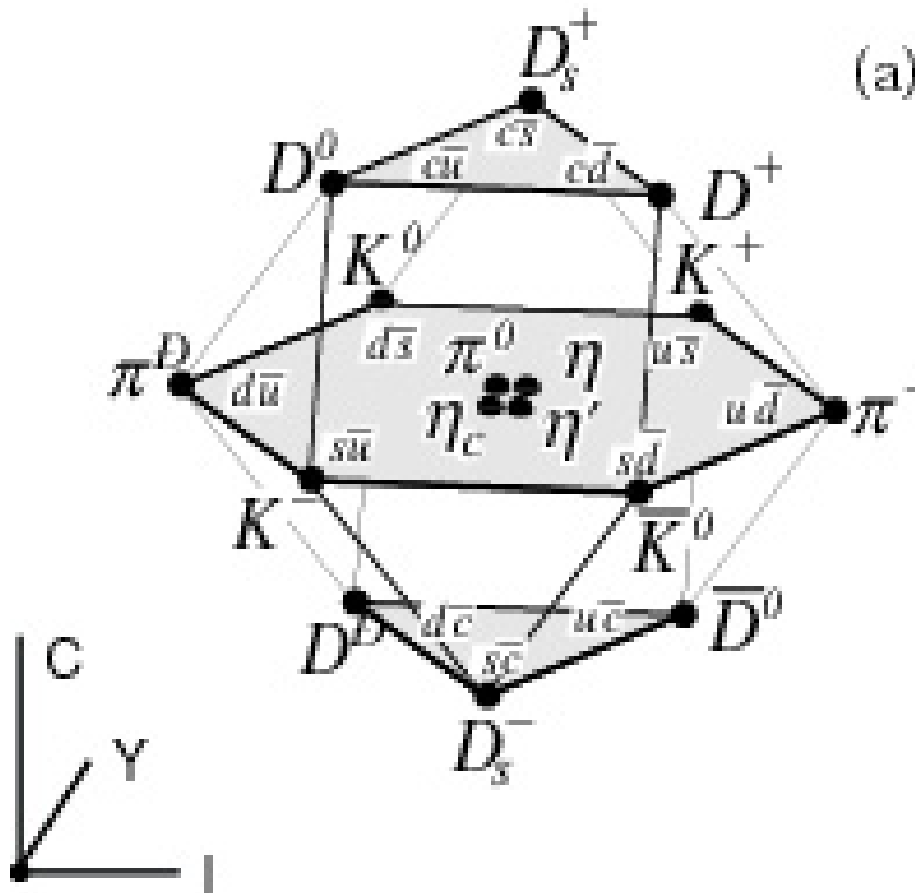
s:  $Q=-1/3$



# Hadroni: sestavljeni iz kvarkov

Mezoni: kvark + anti-kvark

barioni: trije kvarki

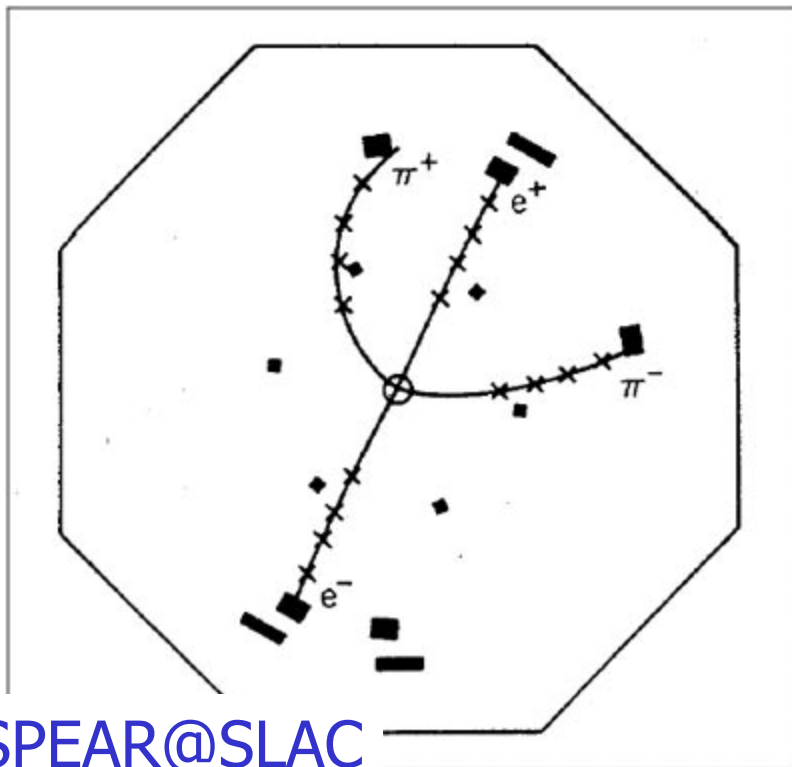


# Še več kvarkov: najprej kvark c

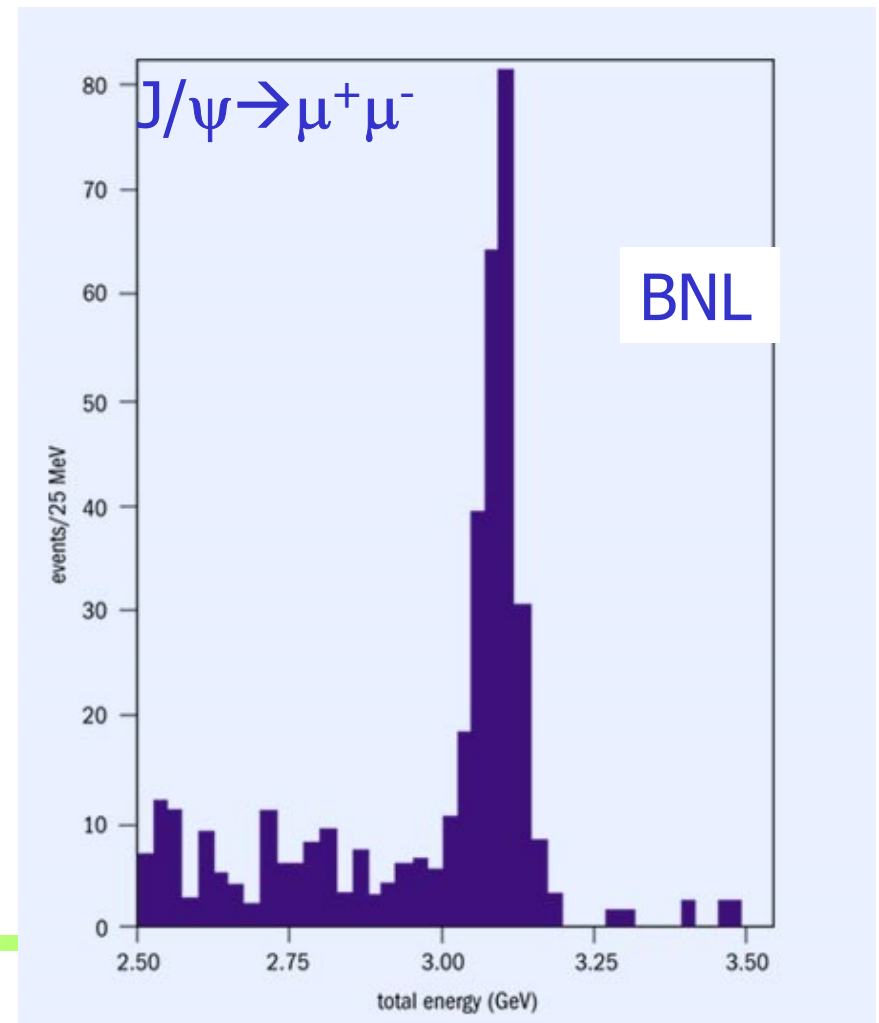
November 1974: odkritje delca  $J/\psi$  – vezano stanje kvarka c in anti-kvarka c pri  $3,1 \text{ GeV}/c^2$  ( $\rightarrow$  NN Sam Ting in Burt Richter)

$\rightarrow$  Masa kvarka c  $\sim 1,5 \text{ GeV}/c^2$

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



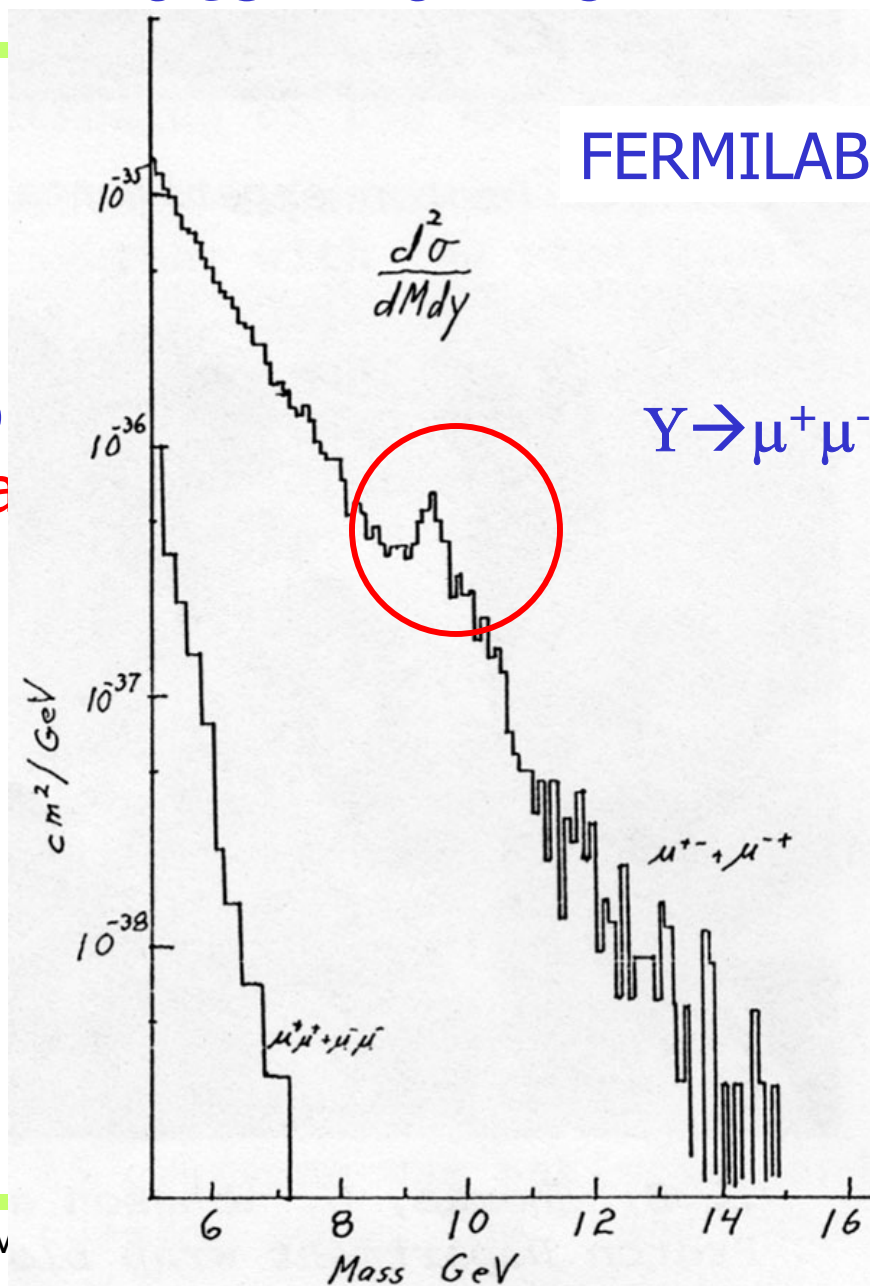
OD - uvod



# Še več kvarkov: nato kvark b

1977: odkritje delca  $Y$  – vezano stanje kvarka  $b$  in anti-kvarka  $b$  pri  $9,4 \text{ GeV}/c^2$

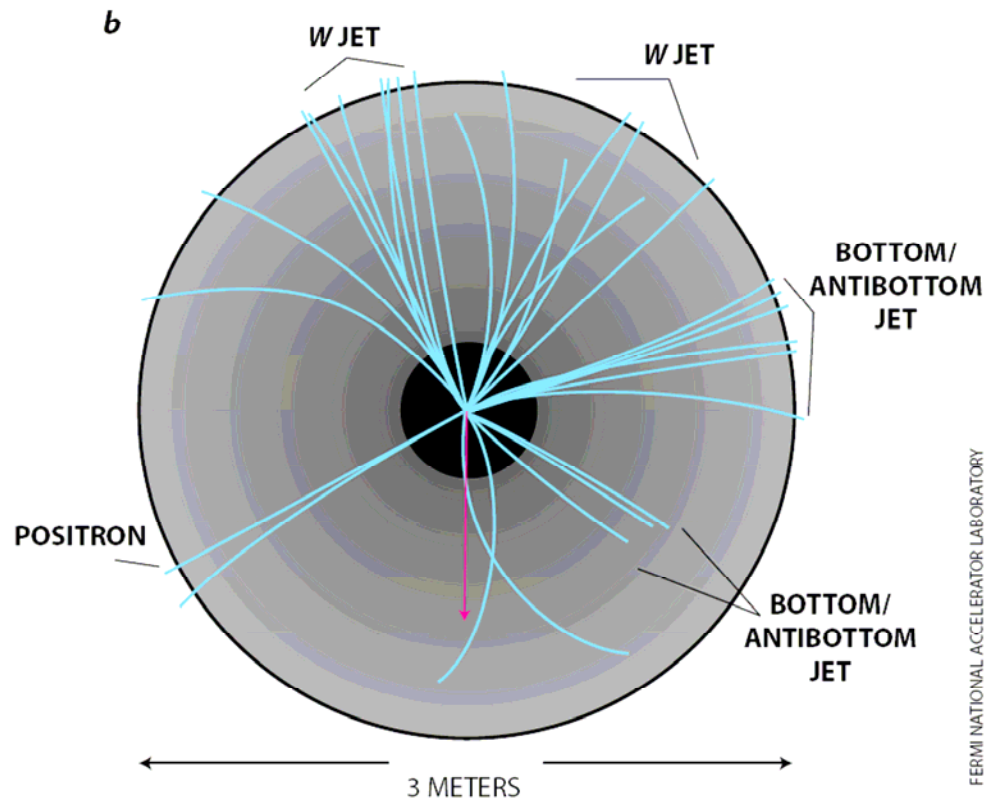
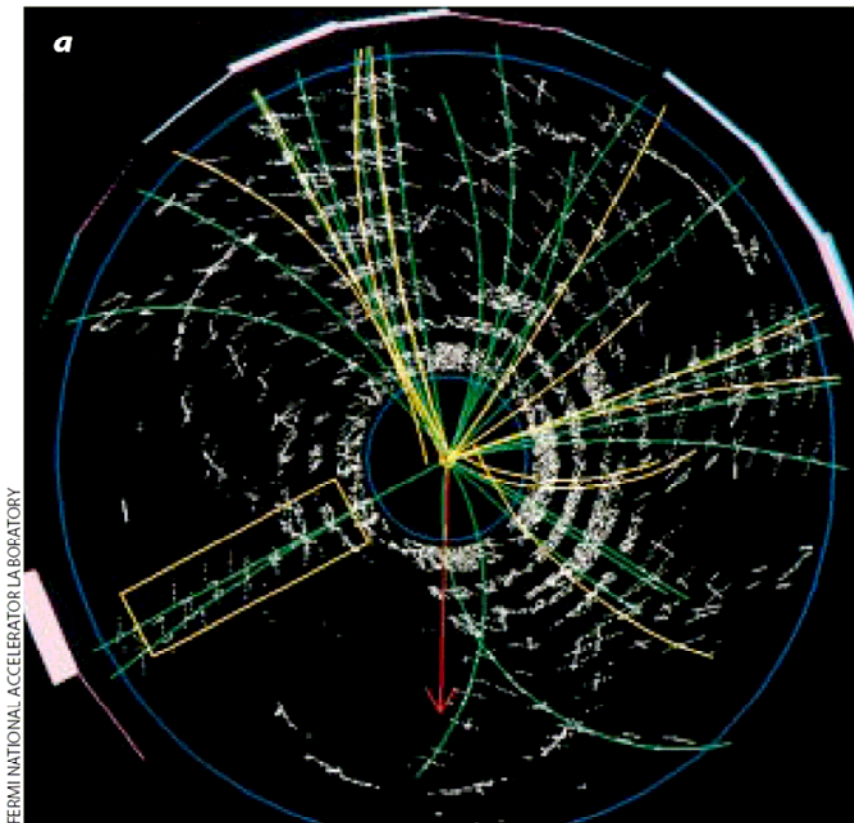
→ Masa kvarka  $b \sim 5 \text{ GeV}/c^2$



# Še več kvarkov: in končno t

1995: odkritje kvarka t v razpadih  $t \rightarrow b e^+ \nu_e$

Eksperiment CDF v FERMILABu



Pri zgornjem dogodku so zabeležili razpada obeh, t in anti-t (zmeraj nastaneta v paru); drugi t je razpadel takole  $\bar{t} \rightarrow \bar{b} d \bar{u}$

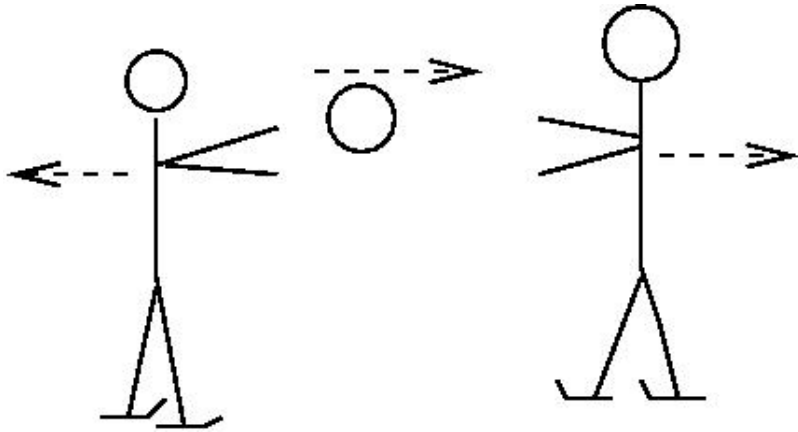
# Standardni model

---

Standardni model:

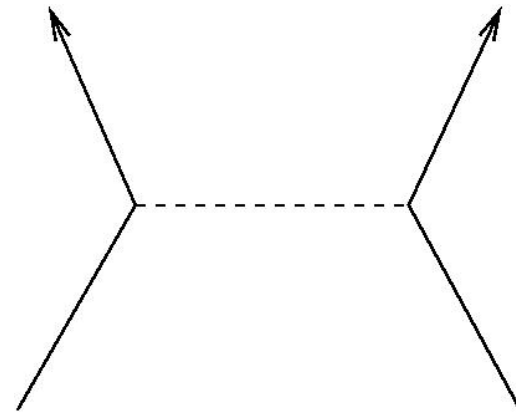
- 2 vrste osnovnih delcev (leptoni, kvarki)
- 3 vrste interakcij
  
- delec, ki poskrbi za maso vseh ostalih (Higgs)

# Sile med osnovnimi delci: izmenjava nosilcev sile



Drzalca na ledu, ki si podajata žogo, se oddaljujeta eden od drugega.

Če je žoga težka, si jo lahko podajata le na kratko razdaljo.



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

# Standardni model: osnovni delci

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

# Standardni model: Interakcije

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



# Barioni in mezoni: vezana stanja kvarkov in anti-kvarkov

Barioni: proton:  $uud$ , nevtron:  $udd$

Mezoni:	masa
$\pi^+$ : kvark $u$ + antikvark $\bar{d}$	$1/7 m_p$
$K^+$ : kvark $u$ + antikvark $\bar{s}$	$1/2 m_p$
$K^0$ : kvark $d$ + antikvark $\bar{s}$	$1/2 m_p$
$\phi$ : kvark $s$ + antikvark $\bar{s}$	$1.1 m_p$
$J/\psi$ : kvark $c$ + antikvark $\bar{c}$	$3 m_p$
$B^0$ : kvark $d$ + antikvark $\bar{b}$	$5.5 m_p$

# Šibka interakcija: pretvorba enega kvarka v drugega

Pri prehodu, ki ga povzroči šibka interakcija, se spremeni okus kvarka: recimo  $d \rightarrow u$ .

Primer:

Razpad beta pri nevtronu:  $(udd) \rightarrow (uud) + e^- + \nu_e$

Možni prehodi:

$u \leftrightarrow d, u \leftrightarrow s, u \leftrightarrow b$

$c \leftrightarrow d, c \leftrightarrow s, c \leftrightarrow b$

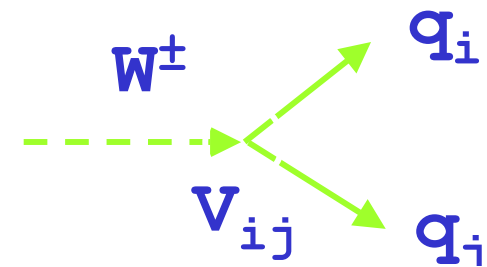
$t \leftrightarrow d, t \leftrightarrow s, t \leftrightarrow b$

Vsi prehodi niso enako verjetni!

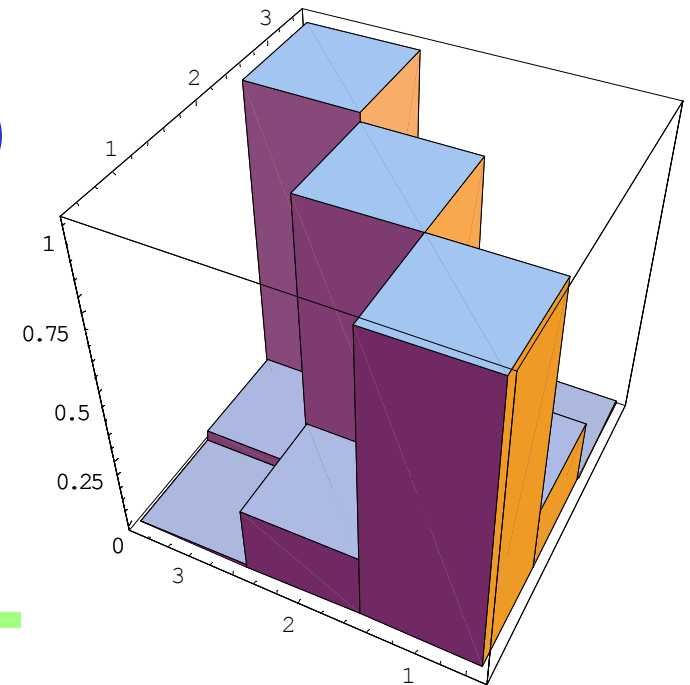
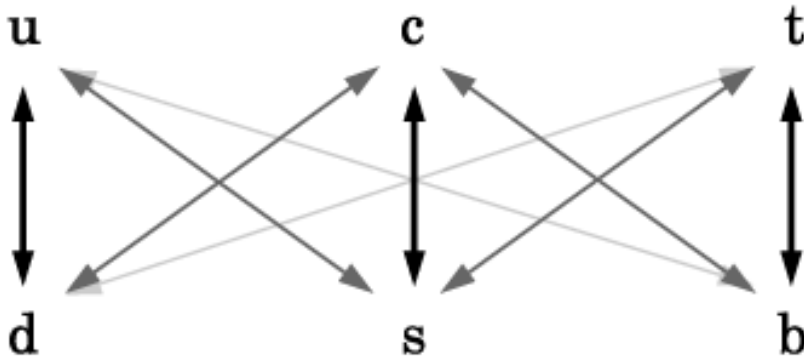
# Matrika CKM

Prehodi med kvarki z nabojem  $2/3$  in  $-1/3$ : kompleksni matrični elementi unitarne matrike CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)

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



Prehodi med kvarki iste družine so bistveno bolj verjetni (=debelejše črte)



# Ohranitveni zakoni

---

Pri vseh (do sedaj znanih) interakcijah se ohranjajo:

- četverec gibalne količine
- vrtilna količina
- naboj  $Q$
- barionsko število  $B$
- čudnost (razen pri šibki interakciji)
- parnost (razen pri šibki interakciji)
- leptonska števila (ločeno elektronsko, mionsko in tauonsko)\*

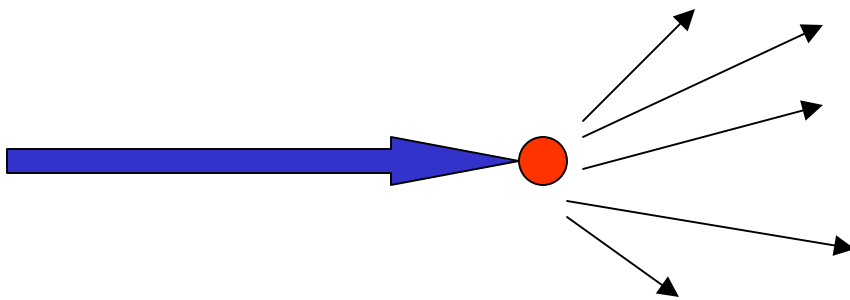
\* razen pri propagaciji nevtrinov

# Poskusi v fiziki osnovnih delcev

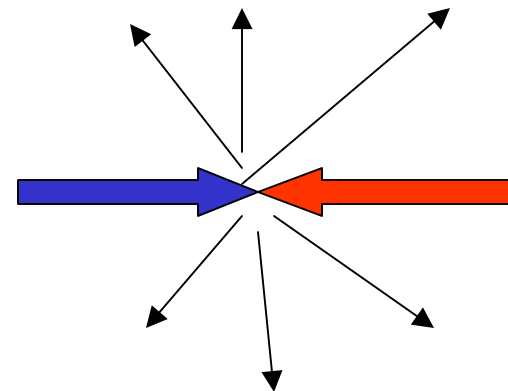
Pospešimo osnovne delce, pri trku se sprosti energija, ta se pretvori v materijo – delce, od katerih so nekateri neobstojni.

Dva načina trkanja:

Poskusi s fiksno tarčo

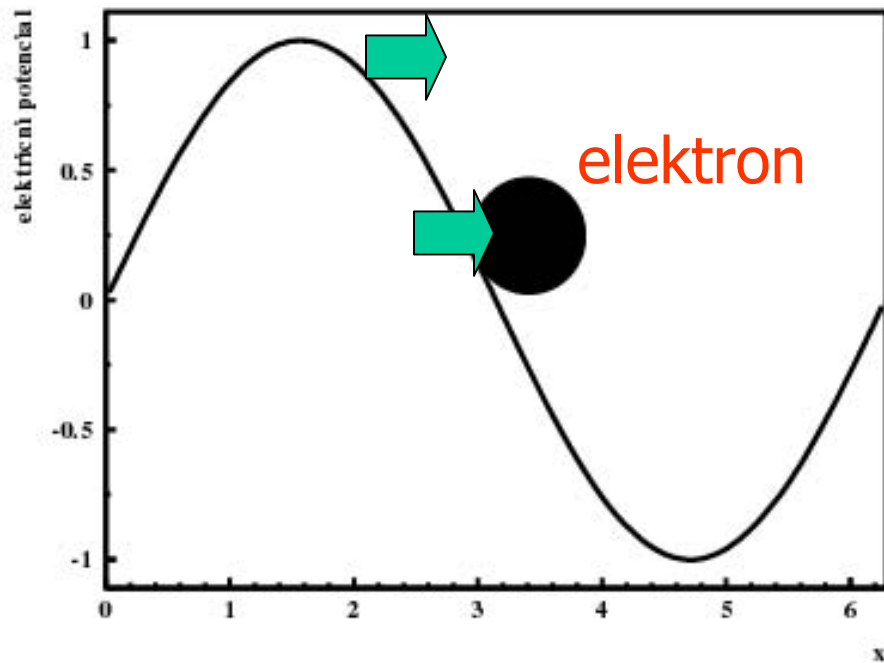


Trkalnik



# Kako pospešujemo nabite delce?

- Pospeševanje z elektromagnetnim valovanjem (tipična frekvenca 500 MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 oz. 1800 MHz)
- Valovanje v radifrekvenčni votlini:  $c < c_0$



... podobno deskanju na valovih



# Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



1. oktober 2007

FJOD - uvod

Peter Križan

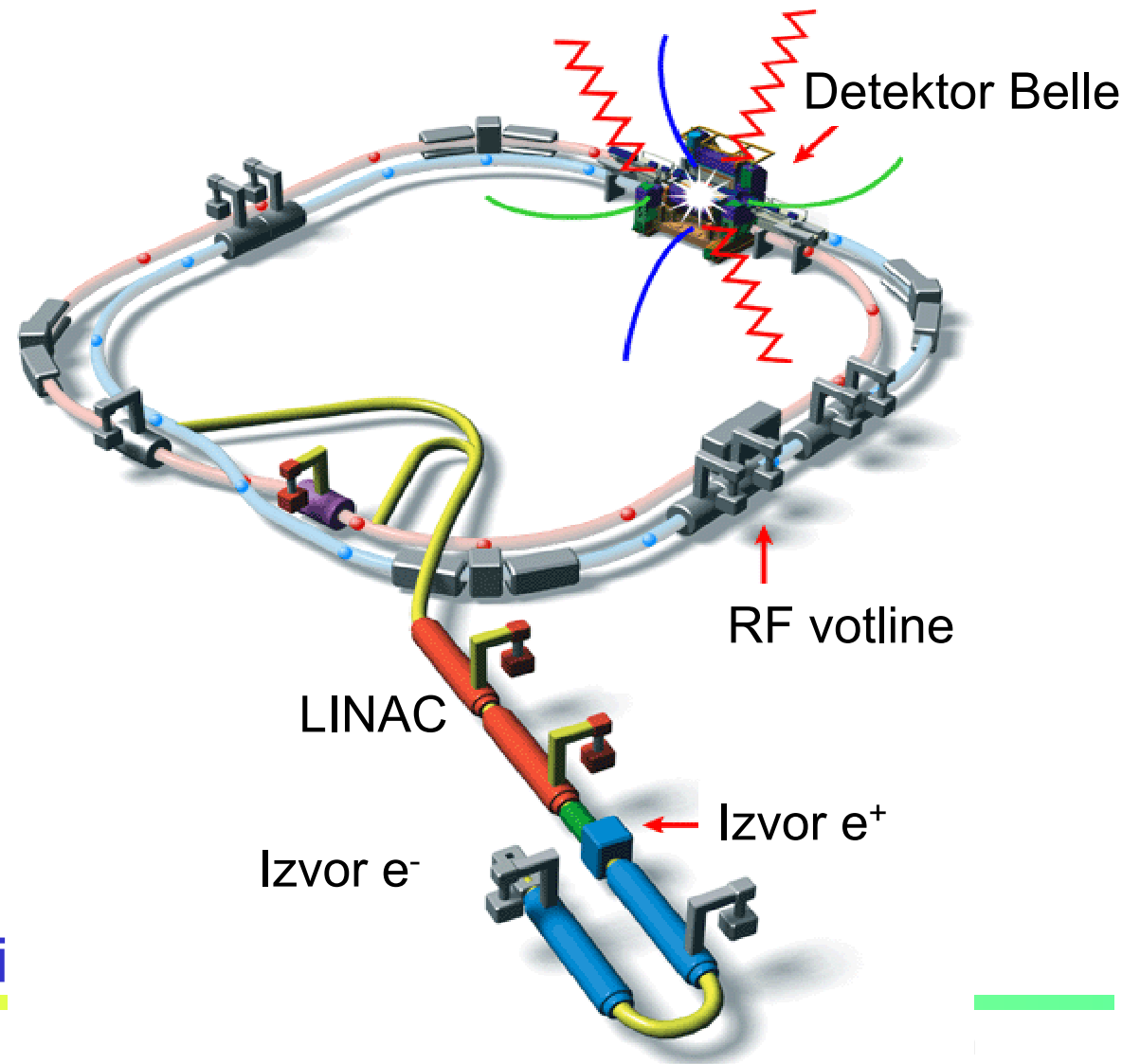
# Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



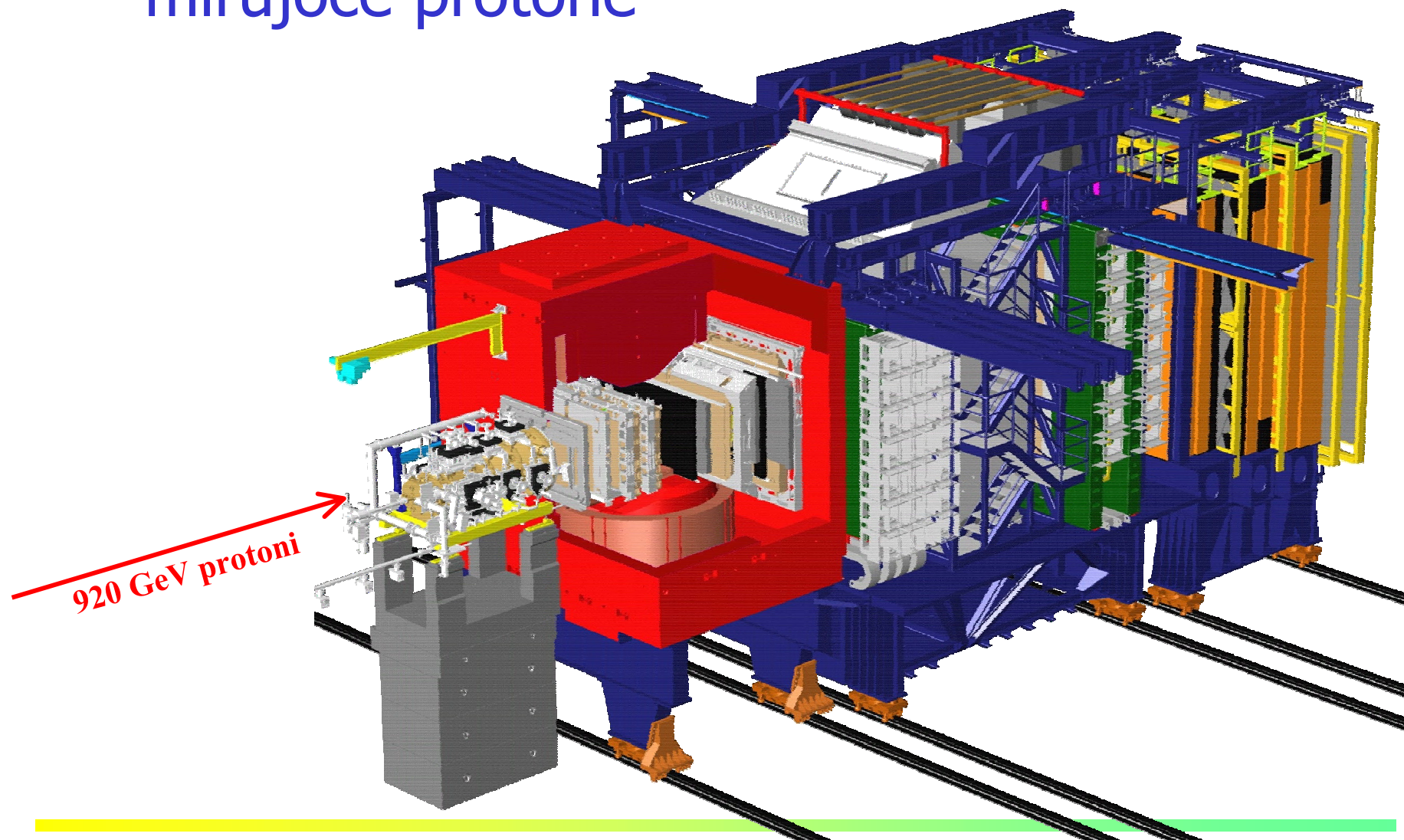
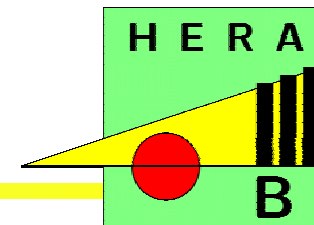
Del obroča trkalnika:  
magneti in  
pospeševalni elementi

1. oktober 2007





# Poskus HERA-B: trki pospešenih protonov v mirujoče protone



1. oktober 2007

FJOD - uvod

Peter Križan

# Kako ugotovimo, kaj se je zgodilo pri trku?

---

- Izmerimo koordinato točke (verteksa), kjer je potekla reakcija: izmerimo položaj in smer sledi nabitih delcev v bližini te točke.
- Izmerimo gibalno količino nabitih delcev: v močnem magnetnem polju ( $\sim 1\text{T}$ ) izmerimo ukrivljenost sledi, ki jo pustijo nabiti delci.
- Določimo identiteto nabitih delcev ( $e, \mu, \pi, K, p$ )
- Izmerimo energijo visokoenergijskih fotonov  $\gamma$

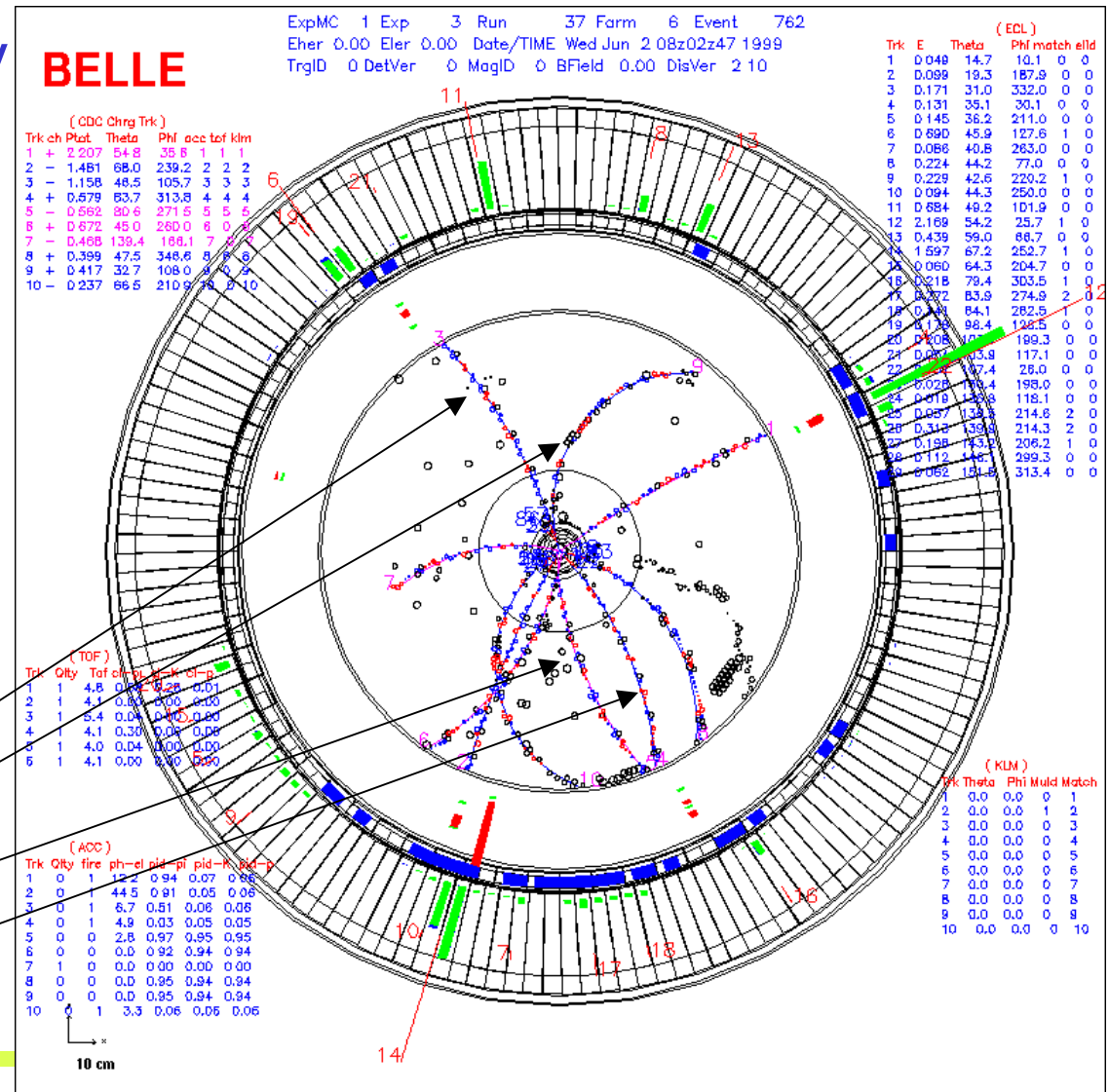
# Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

$$B^0 \rightarrow K^0_S J/\psi$$

$$K^0_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

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



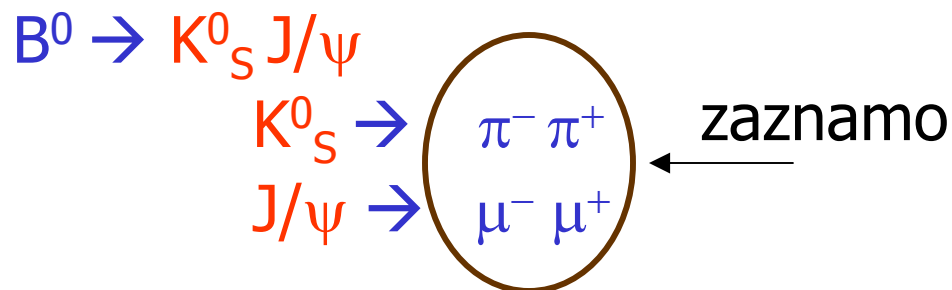
1. oktober 2007

1300 avda

Peter Krizan

# Kaj izmerimo z detektorjem? -2

Kako vemo, da je potekla spodnja reakcija?

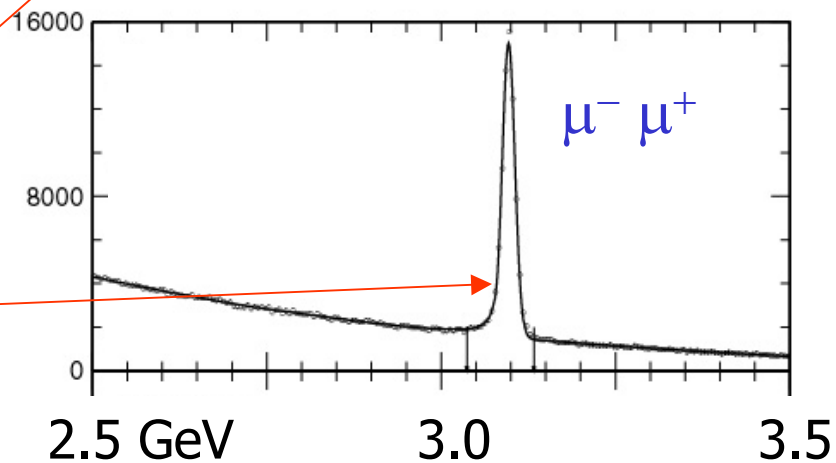
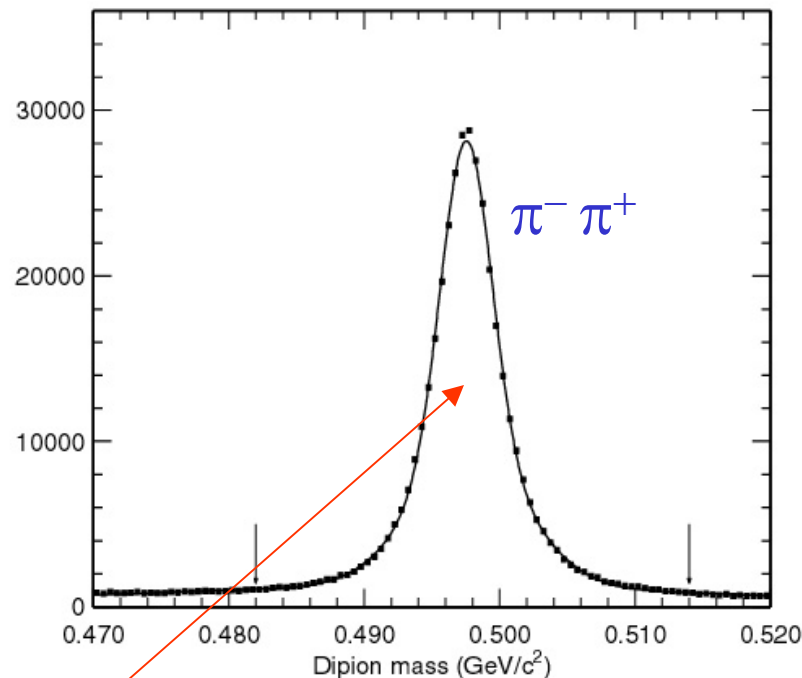


Za pare  $\pi^- \pi^+$  in  $\mu^- \mu^+$  izračunamo invariantno maso:

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

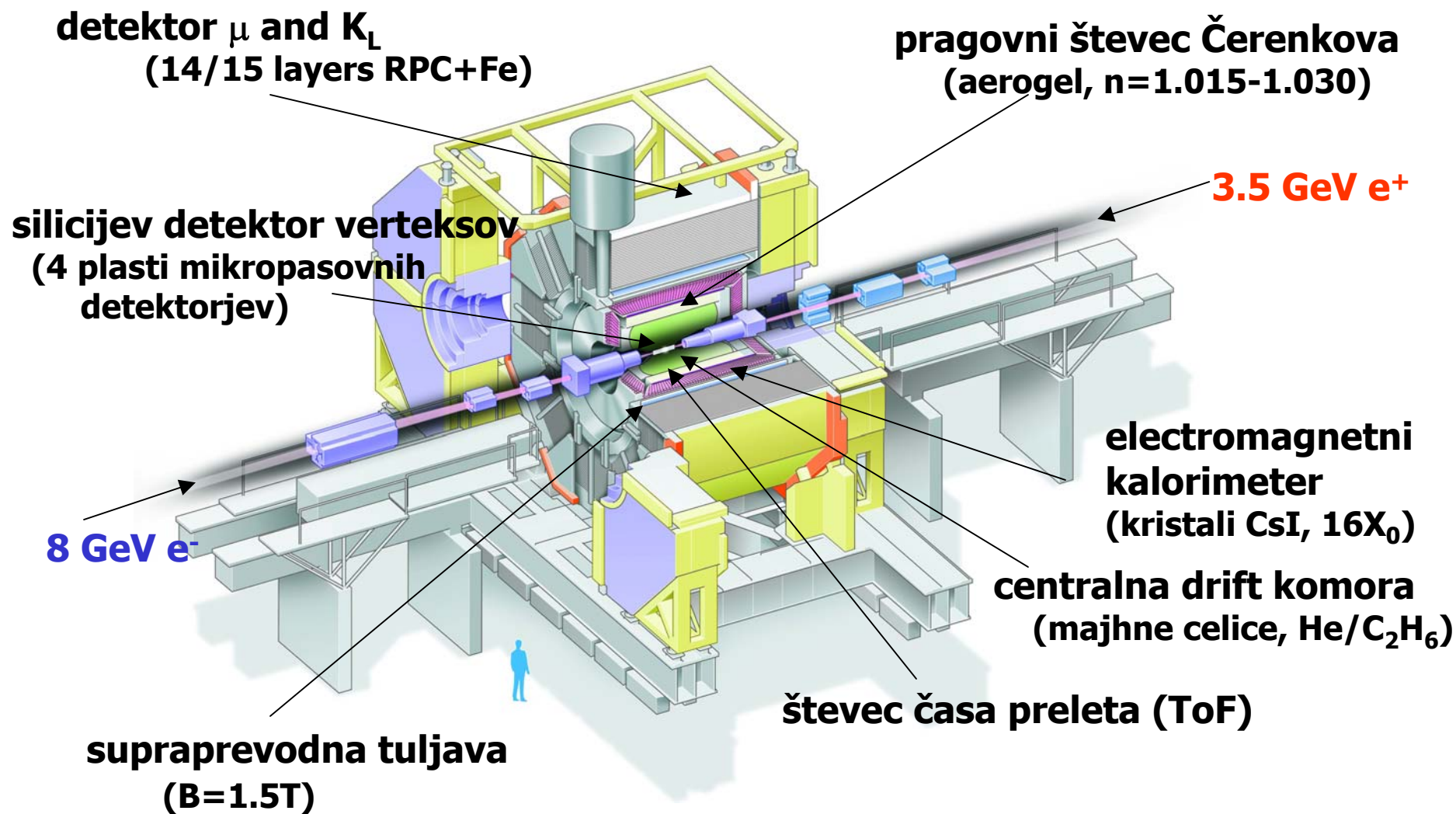
$Mc^2$  mora biti za  $K_S^0$  blizu **0.5 GeV** za  $J/\psi$  pa blizu **3.1 GeV**.

Ostalo: naključne kombinacije.



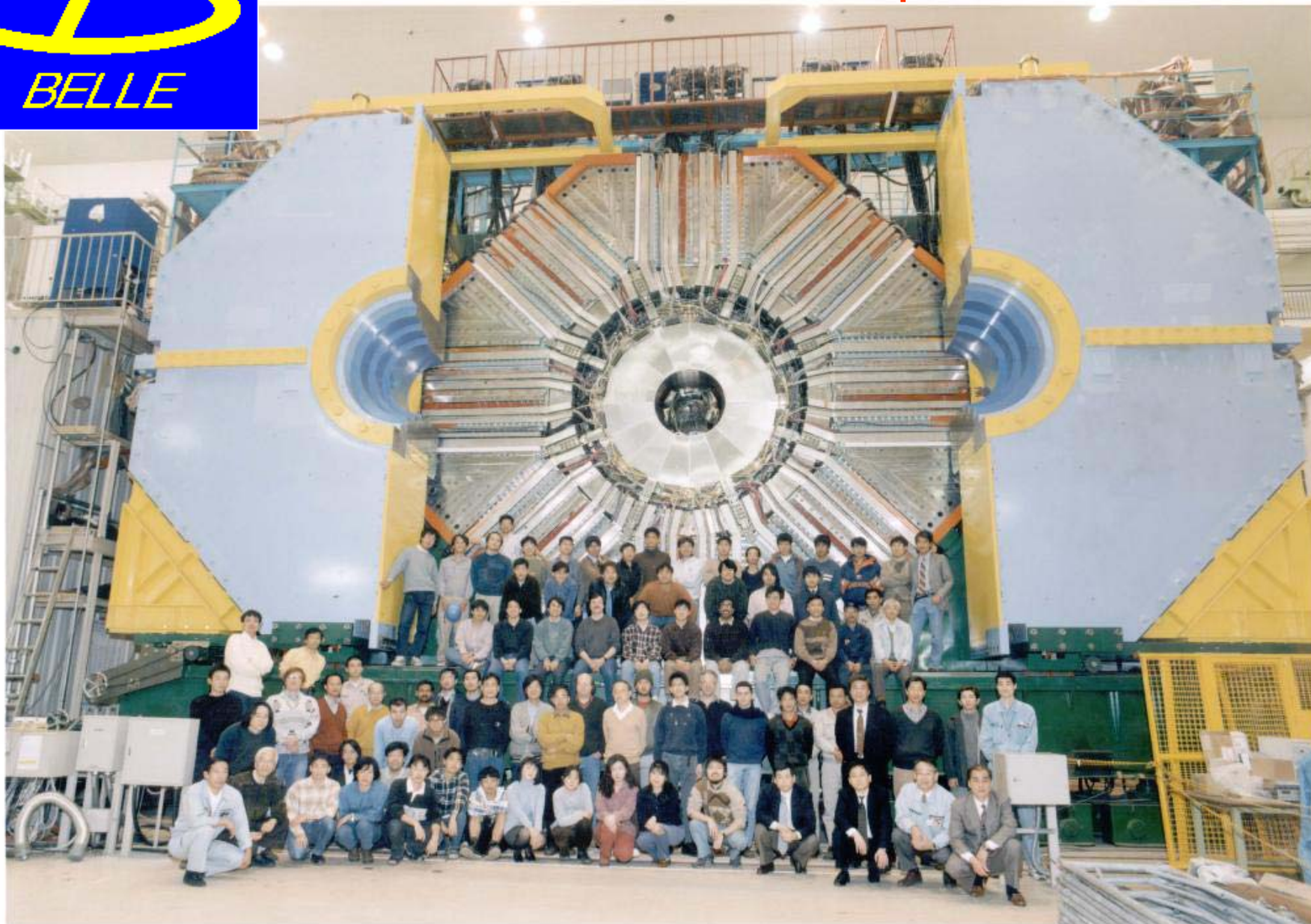


# Spektrometer Belle





# Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine



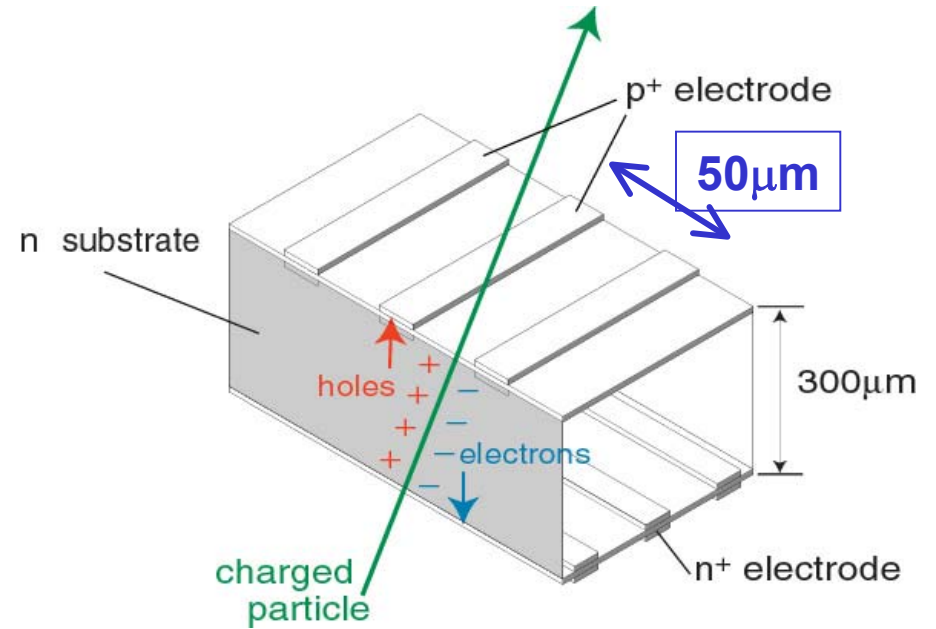
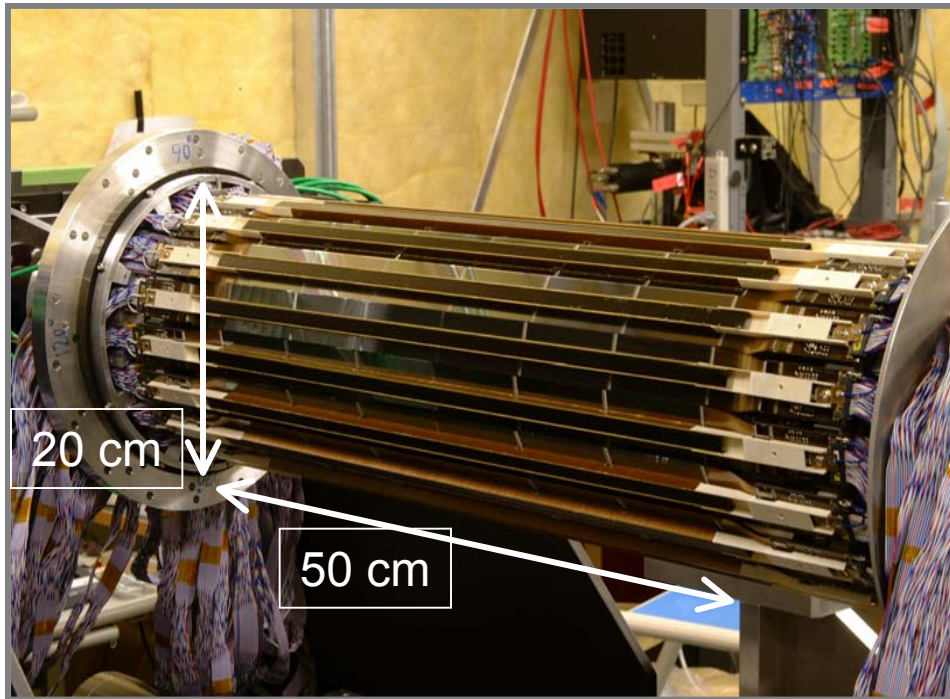


# Detektor verteksov

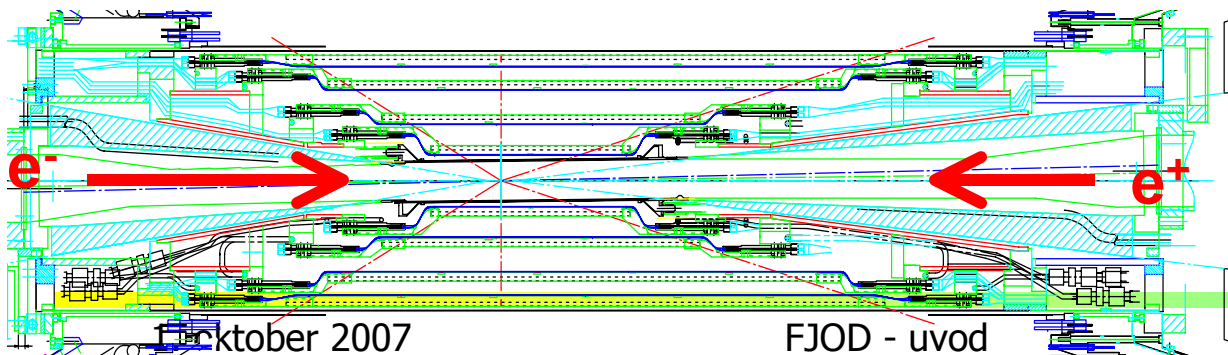
- Eden bistvenih elementov detektorja je detektor verteksa, točke, kjer je mezon B razpadel.
- Zelo občutljiv kos aparature iz  $300\mu\text{m}$  debelih silicijevih plošč z gosto nanešenimi elektrodami: natančnost meritve mesta preleta nabitega delca:  $10\mu\text{m}$ !



# Silicijev detektor verteksov



Dve koordinati merimo istočasno (na spodnji in zgornji površini).



1. oktober 2007

FJOD - uvod

Peter Križan

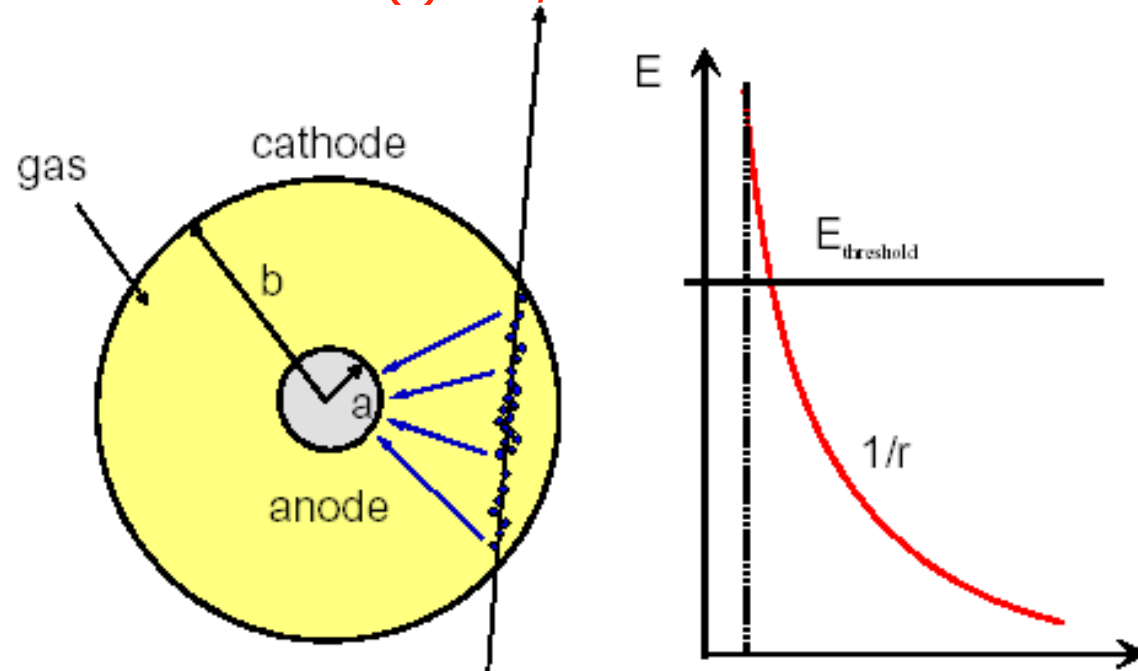


# Sledenje delcev v plinu: drift komora

Izkoriščamo ionizacijske izgube nabitih delcev v plinu.

Sproščeni elektroni (iz para elektron-ion) potujejo proti pozitivno nabiti tanki žici, ob površini pomnoževanje  $\rightarrow$  električni signal.

V bližini tanke nabite žičke:  $E = E(r) \propto 1/r$



Če elektron na prosti pot  $l$  dobi dovolj energije ( $eEl > E_{\text{ionizacija}}$ ), izbije pri trku z atomom elektron  $\rightarrow$  pomnoževanje

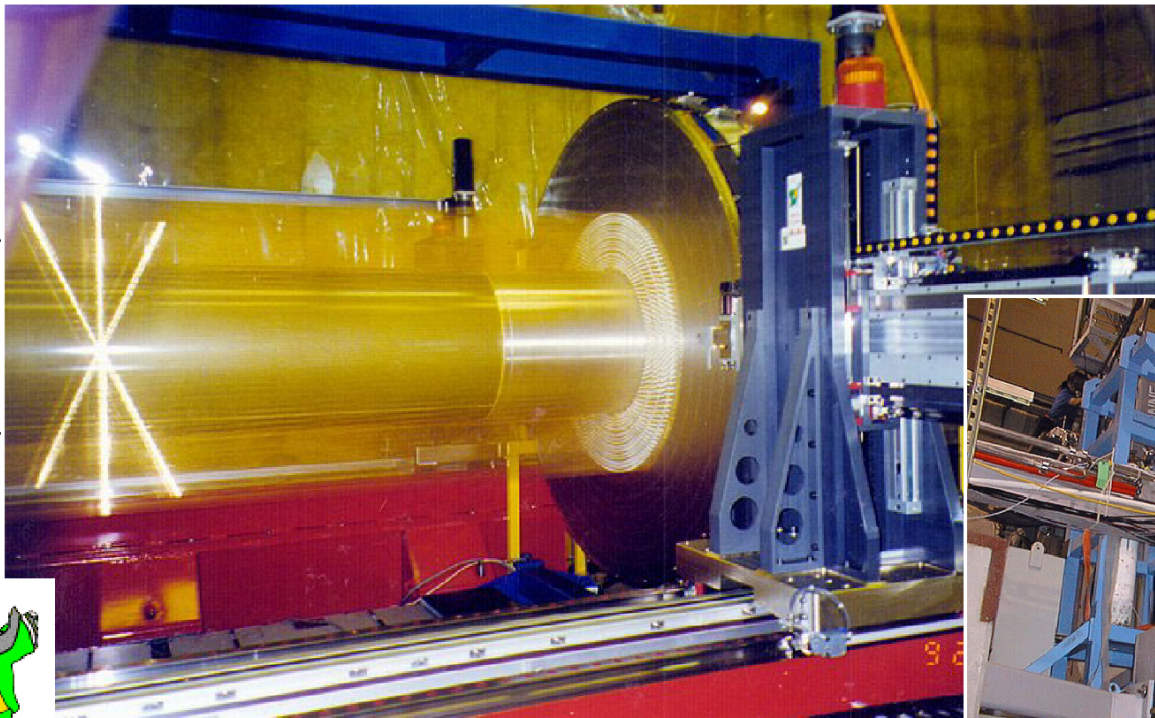
# Sledenje delcev: drift komora

40 plasti žic, plinska mešanica recimo He-izobutan ali He-etan.

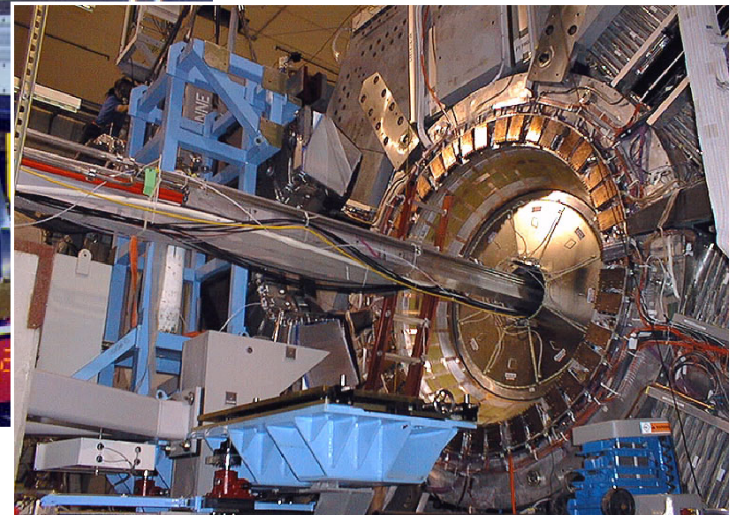
~4m



~2m



$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 0.13\% \times p_T + 0.45\%$$



16 axial, 24 stereo layers



# Identifikacija nabitih delcev

---

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

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

Ločeno izmerimo

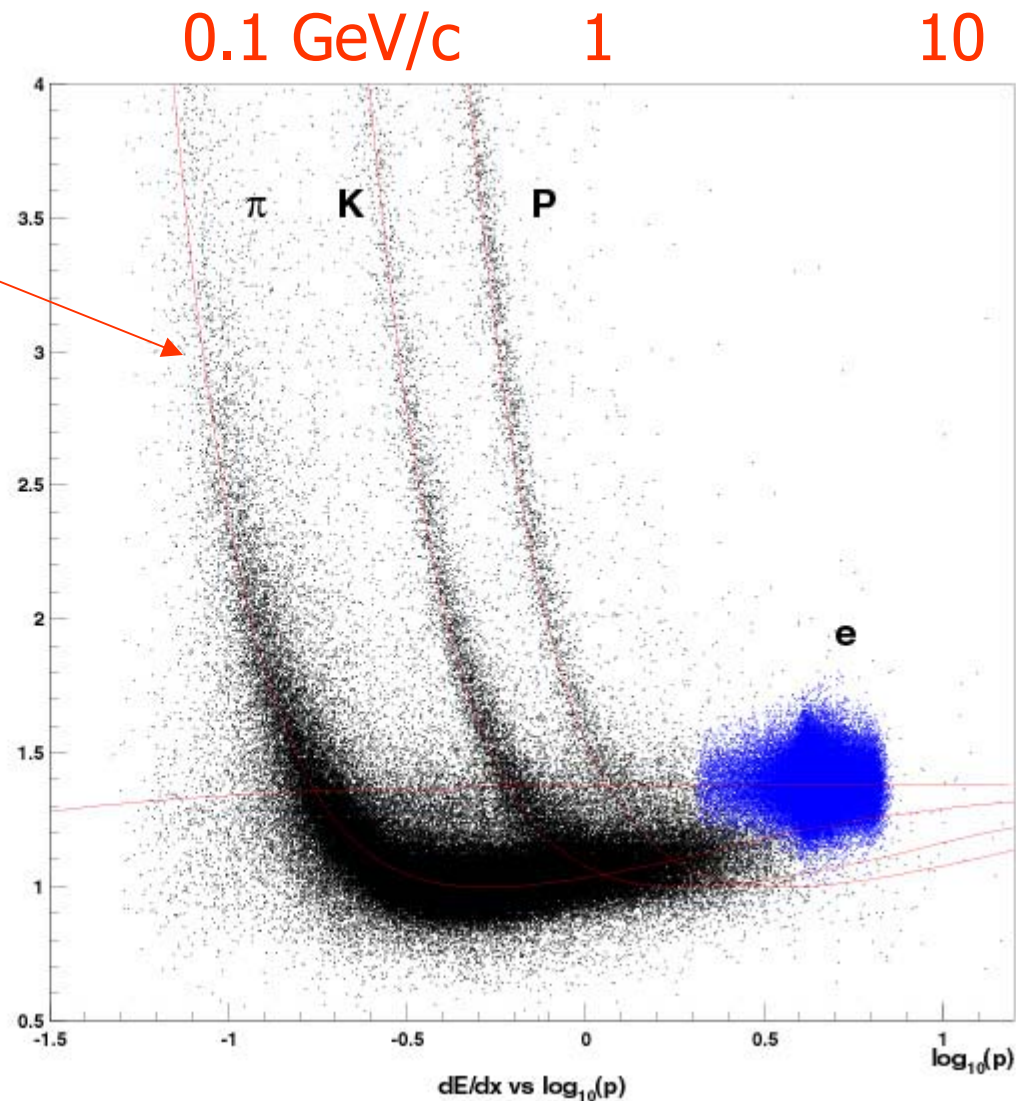
- gibalno količino  **$p$**  (ukrivljenost tira v magnetnem polju)
- hitrost  **$v$** 
  - čas preleta ( $\sim$ štoparica)
  - ionizacijske izgube (odvisne od hitrosti) →
  - velikost kota Čerenkova →

# Identifikacija z meritvijo energijskih izgub ( $dE/dx$ )

Pri dovolj majhni hitrosti  $\beta$   
 $dE/dx \sim \beta^{-2}$

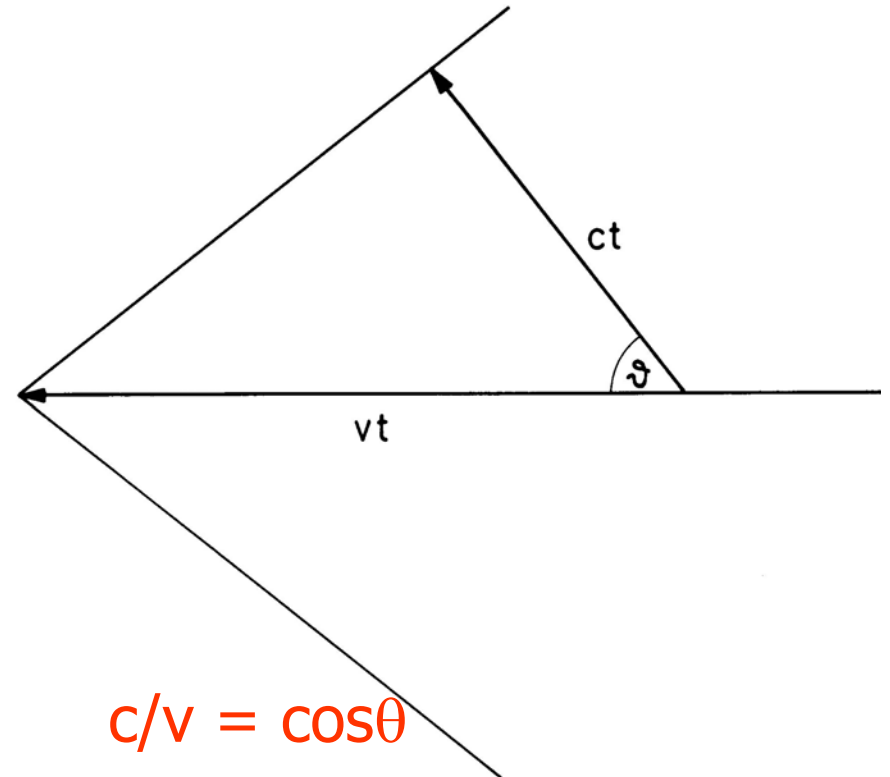
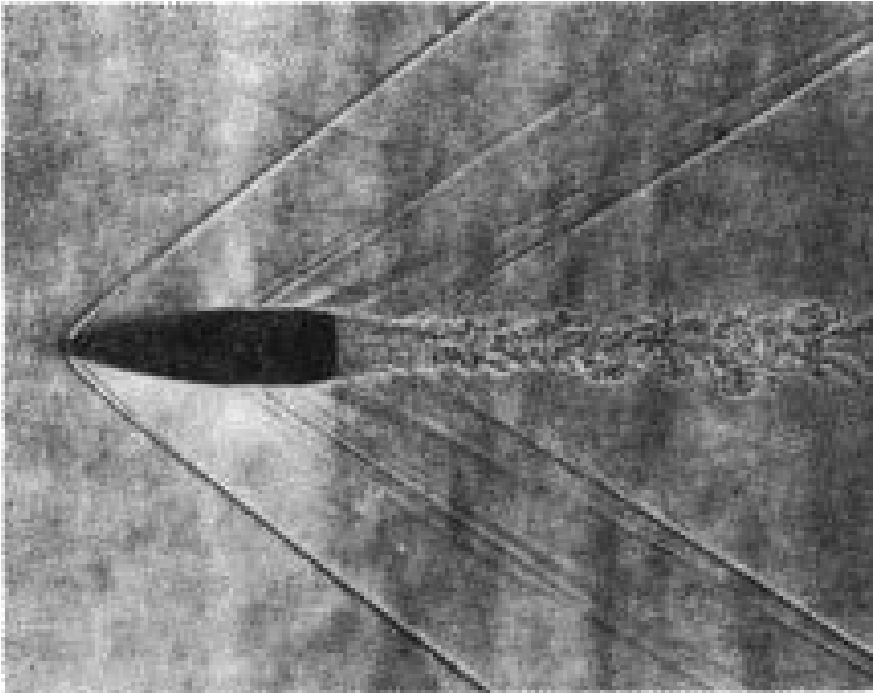
$dE/dx$  izgube v veliki drift  
komori  $\rightarrow$

Bistveno za identifikacijo  
nabitih delcev pri  
 $p < 1 \text{ GeV}/c$



# Identifikacija preko sevanja Čerenkova

## Fronta pri nadzvočnem letu



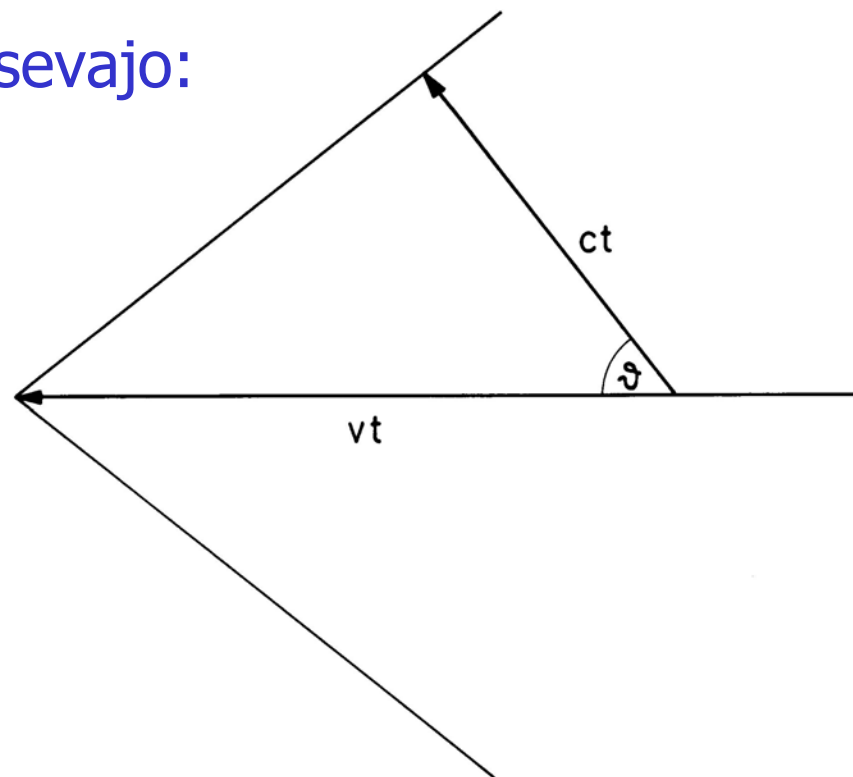
Na sliki: kot  $52^\circ$ ,  $v = c/\cos\theta = 340\text{m/s} / \cos 52^\circ = 552\text{m/s}$   
Iz kota fronte določimo hitrost krogle!

# 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, lahko določimo hitrost delca.



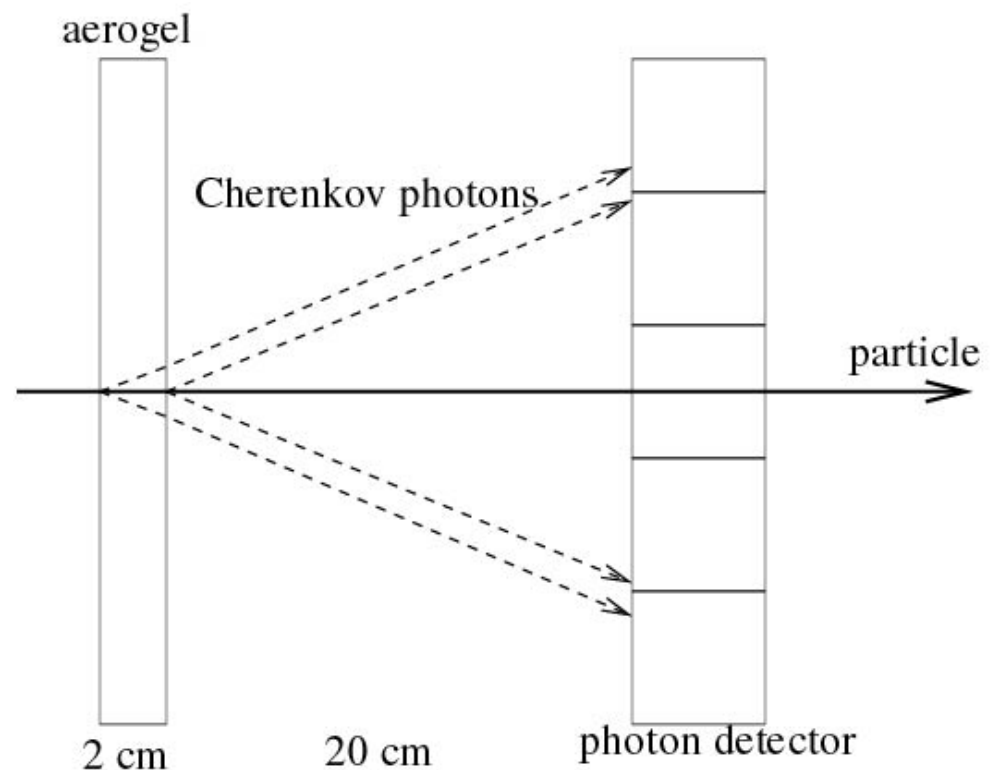
\*P.Čerenkov, Nobelova nagrada 1958



# Meritev kota Čerenkova

Nabit delec prečka sredstvo z lomnim količnikom  $n \rightarrow$  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

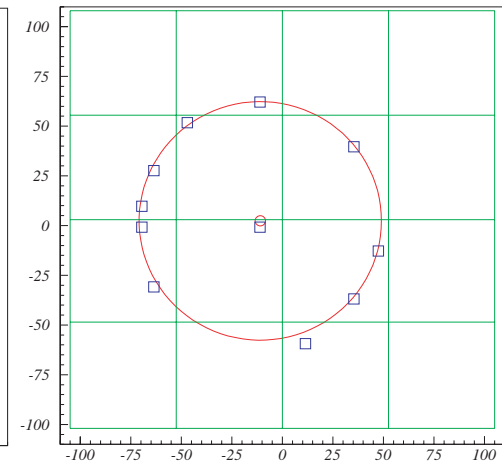
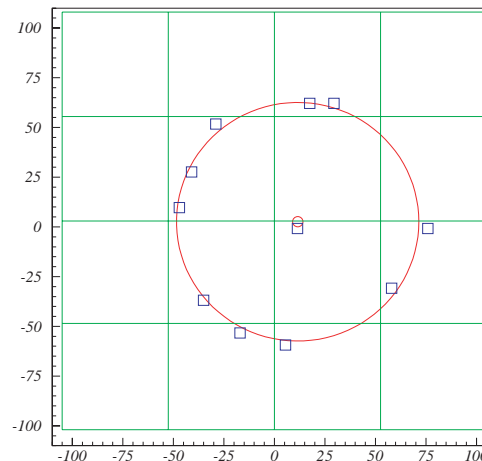
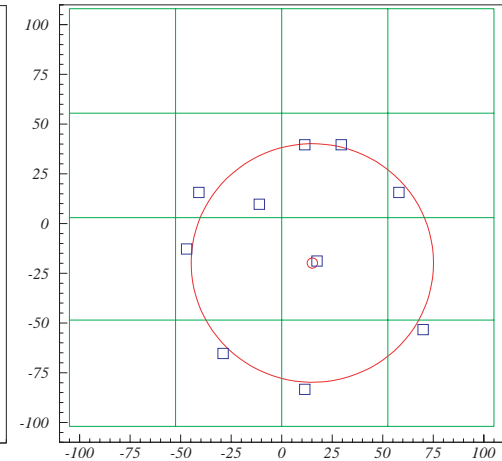
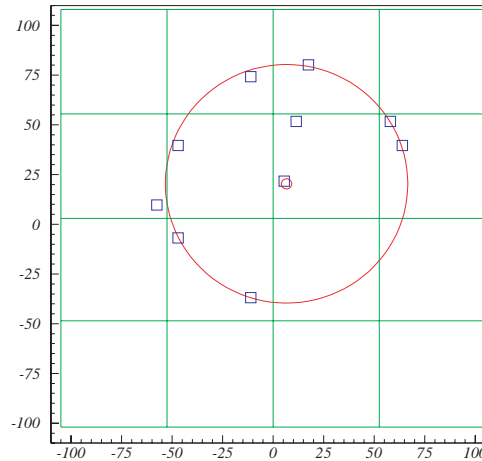


# Meritev kota Čerenkova: detektor Čerenkovih obročev

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.

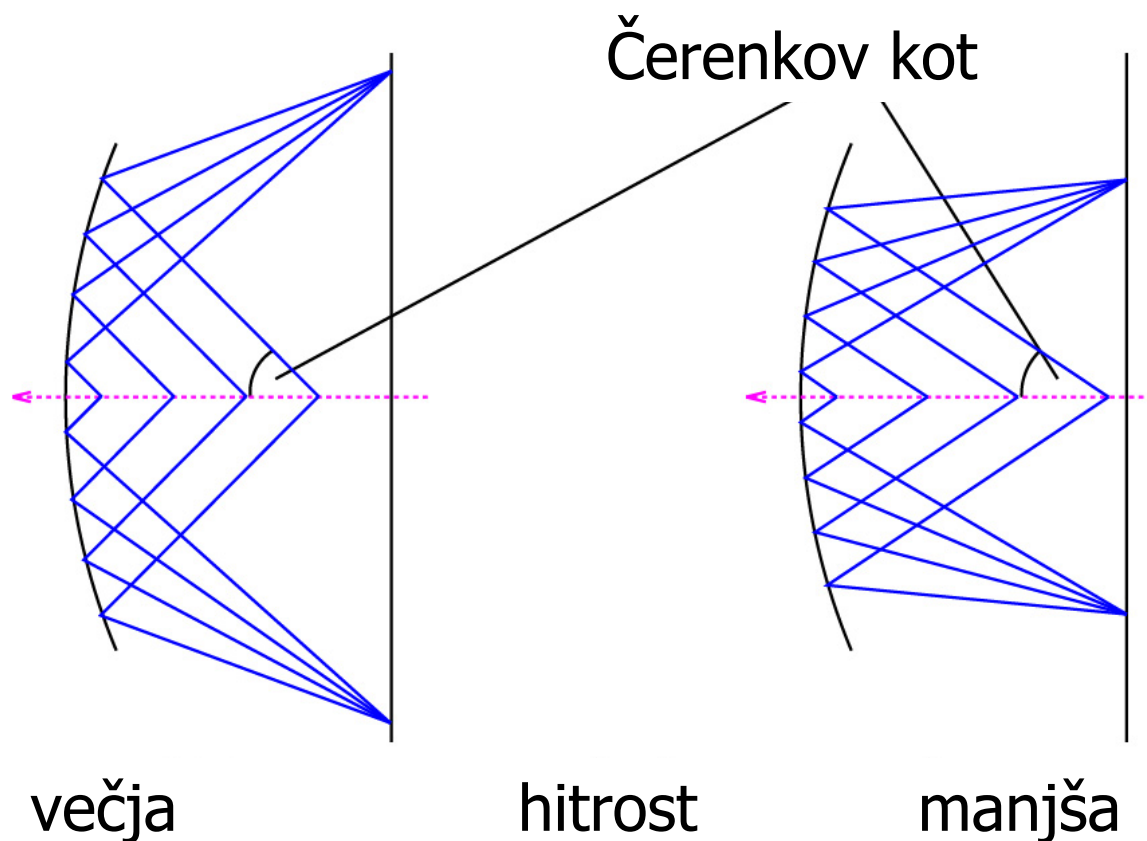


**Zelo malo ozadja!**

# Detektor Čerenkovih obročev 2

Druga možnost – debel sevalec: pretvoriti **smer** v **koordinato**.

Uporabimo **sferično zrcalo**: paralelni žarki se sekajo v goriščni ravnini.

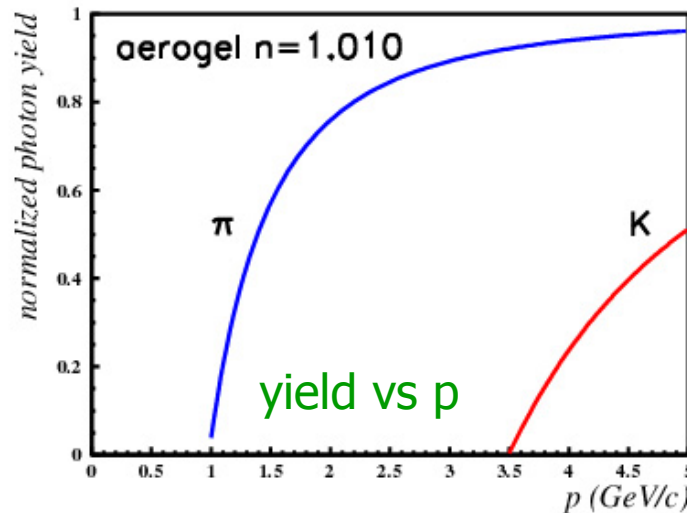


# Pragovni Čerenkov števec

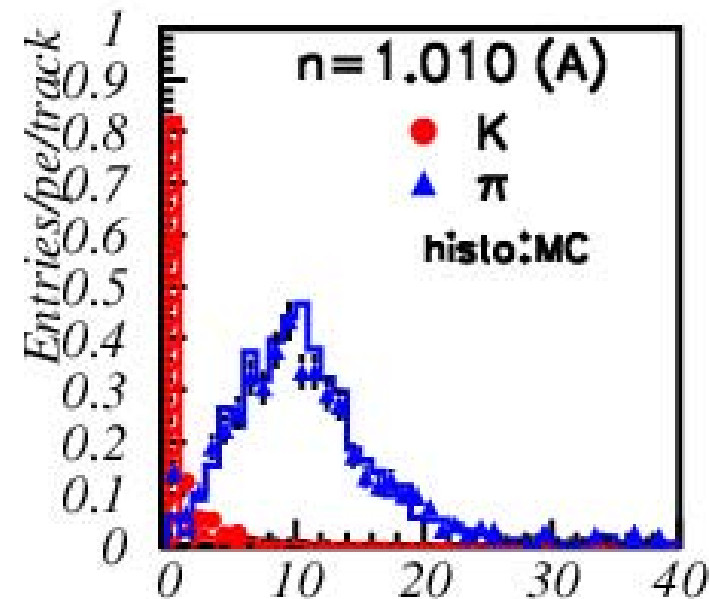
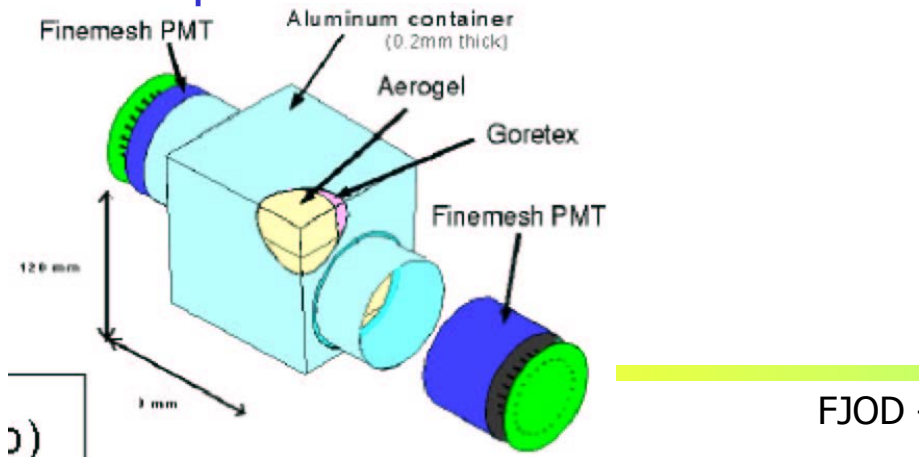
K (pod pragom),  $\pi$  (nad pragom)

$$\cos\theta = c/nv = 1/\beta n$$

Prag:  $\beta_t = 1/n$



Detektor: kos sevalca z dvema fotopomnoževalkama



Število zaznanih fotonov za pione in kaone,  $2 \text{ GeV} < p < 3.5 \text{ GeV}$

# Identifikacija nabitih delcev

---

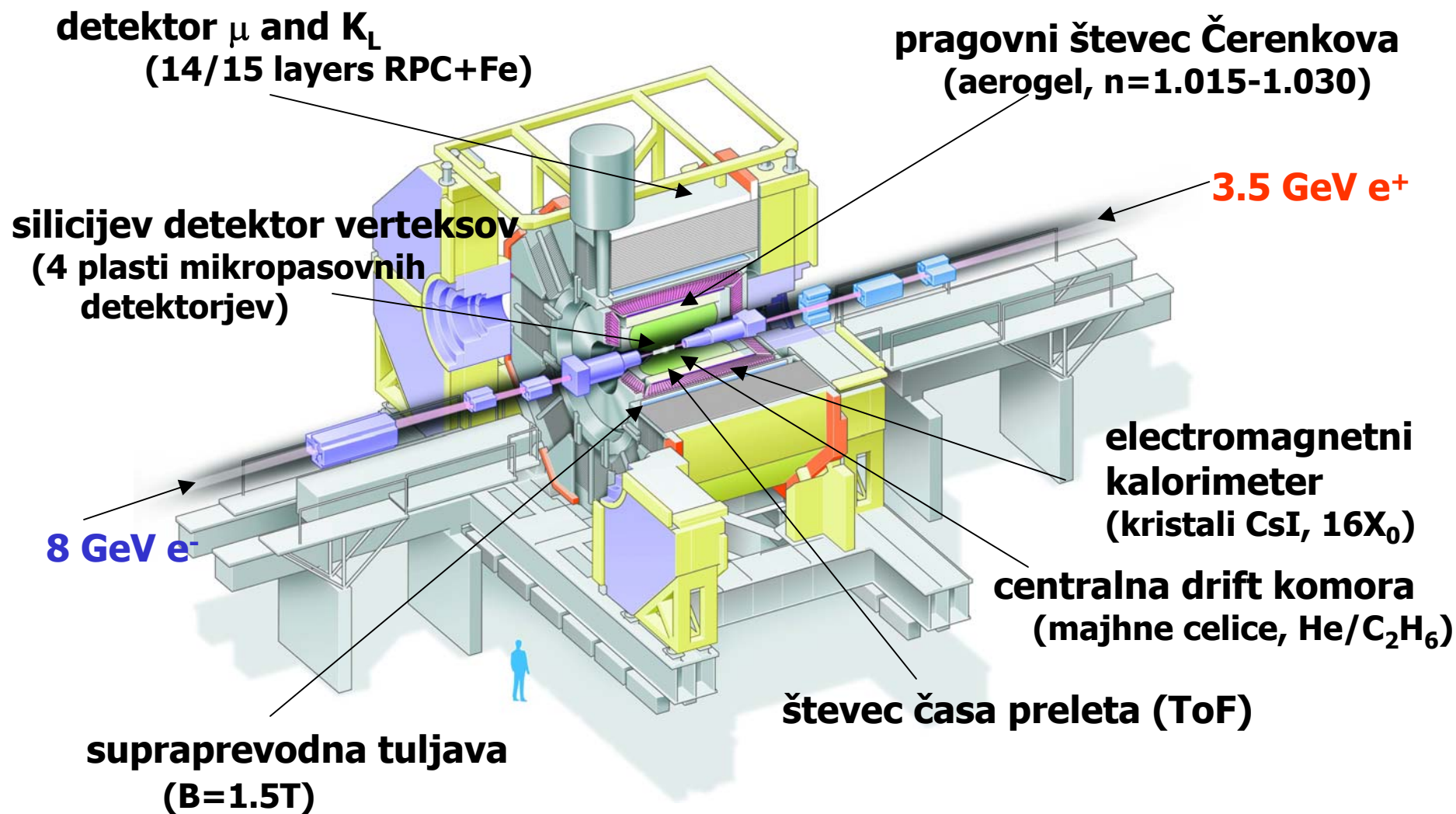
Hadroni ( $\pi$ , K, p):

- Čas preleta (Time-of-flight, TOF)
- $dE/dx$  v sledilni drift komori
- Čerenkovi detektorji

Elektroni: edini zavorno sevajo (dosti manjša masa kot ostali), povzročijo pljusk nabitih delcev v elektromagnetnem kalorimetru (scintilator+fotopomnoževalke)

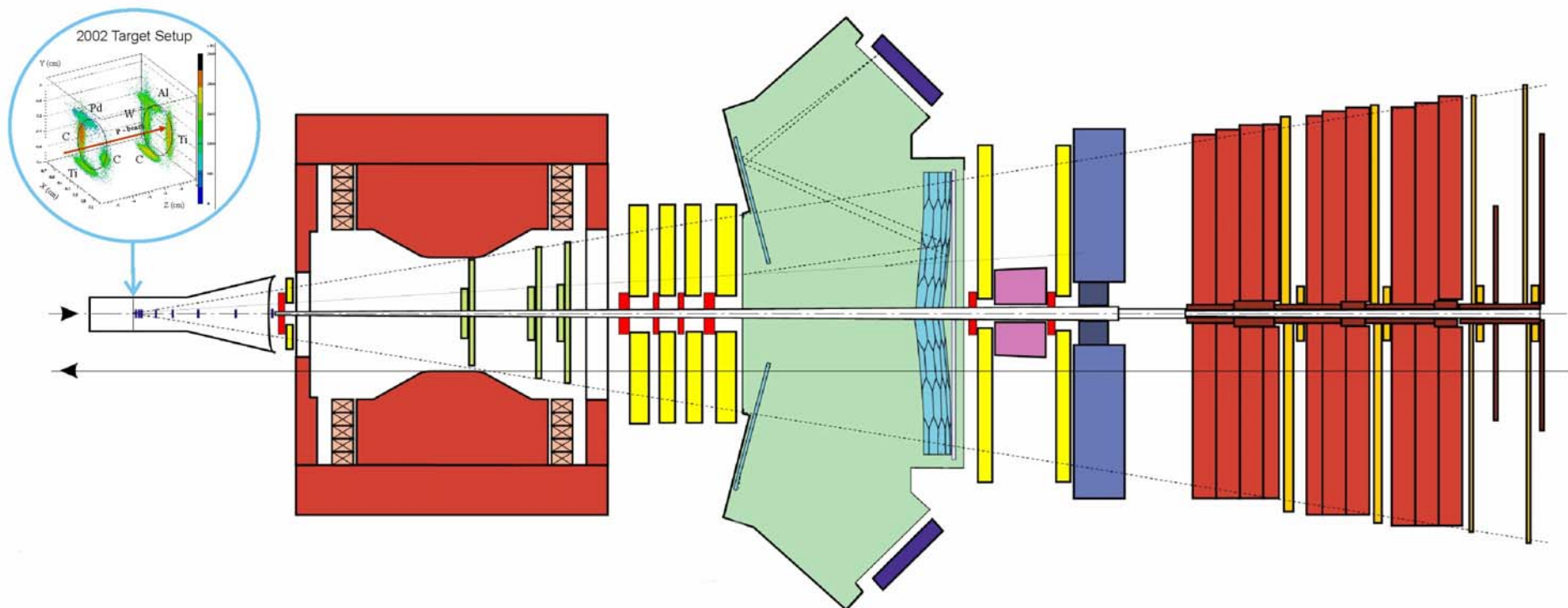
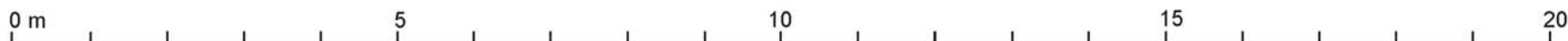
Mioni: interagirajo elektromagnetno, ne sevajo zavorno, preletijo tudi tuljavo magneta in debele železne plošče povratnega jarma.

# Spektrometer Belle





# HERA-B: detector ob fiksni tarči



<p><b>Target &amp; Vertex</b> 8 layers of double-sided Si-microstrips, movable on Roman-Pots; 8 wire-target (see above)</p>	<p><b>High <math>p_T</math></b> 3 superlayers gas, pixel and pad chambers; pre-trigger for high <math>p_T</math> tracks</p>	<p><b>Outer Tracker</b> 7 superlayers of honeycomb drift chambers, 5 and 10mm cells</p>	<p><b>RICH</b> Spherical mirror inside <math>C_2F_{10}</math> radiator, Lens-enhanced multianode PMT focal plane.</p>	<p><b>Inner Tracker</b> 7 superlayers of Micro Strip Gas Chambers with GEM-foil</p>	<p><b>Electromagnetic Calorimeter</b> W/Pb scintillator sandwich, shashlik WLS readout with PMTs; energy-cluster pre-trigger</p>	<p><b>Muon System</b> 4 superlayers of gas-pixel, tube &amp; pad chambers; pad-coincidence pre-trigger</p>
---	---	---	---	---	--	--

# Kaj se da s takimi detektorji izmeriti?

---

Primer: poskus Belle

Najbolj odmeven rezultat je meritev kršitve  
simetrije CP

Kaj je to?

# Simetrija CP

---

Simetrijska operacija **CP**: pretvori **delec** v **anti-delec**

Če se delec in anti-delec ne obnašata vedno enako – torej če na primer različno razpadata, je to kršitev simetrije CP.

Ker je bilo ob nastanka vesolje sestavljeno iz enakega števila delcev in anti-delcev, danes pa je sestavljeno skoraj izključno iz **snovi** (=delcev), in ne iz **anti-snovi**, je ta simetrija očitno **kršena!**



**Zelo pomembno: razumeti kako in zakaj je ta simetrija kršena.**



# Kršitev CP pri mezonih B

Kršitev simetrije CP so prvič izmerili pred 40 leti pri nevtralnih kaonih – in to je bil do pred kratkim edini sistem, kjer smo jo lahko preučevali.

Zakaj naj bi bila kršitev CP drugačna pri drugem paru kvarkov ( $b\bar{d}$  (=B) namesto  $s\bar{d}$  (=K))?

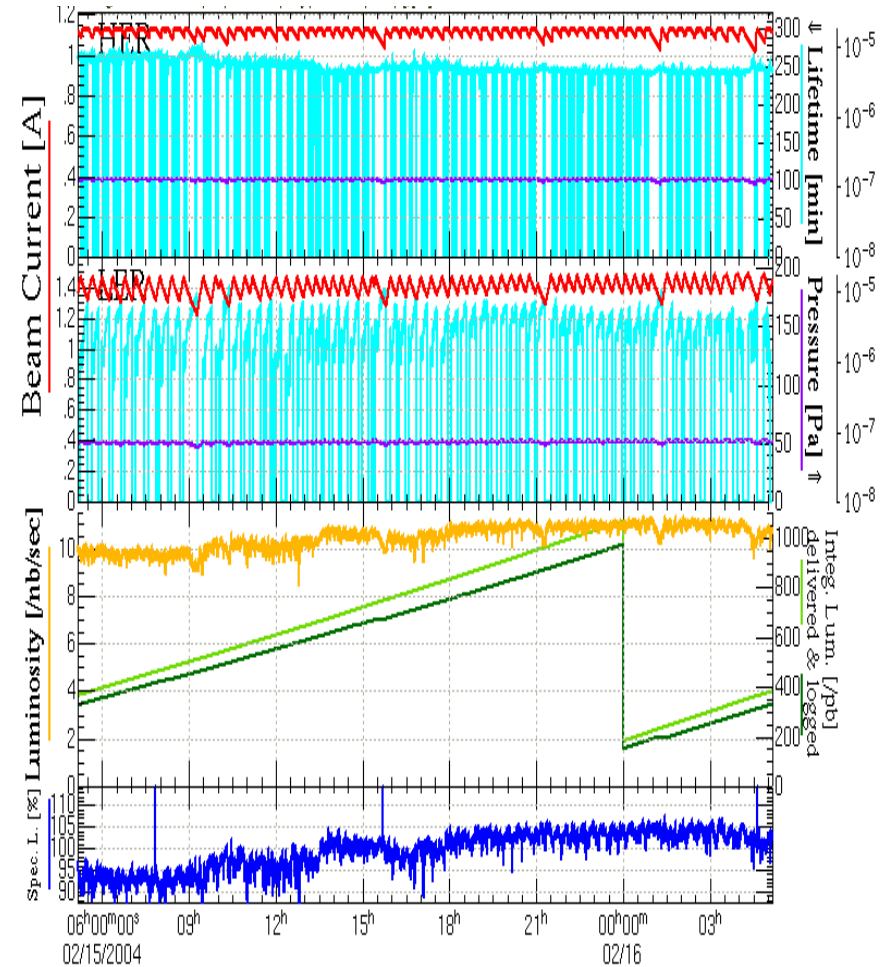
Nekateri pojavi so **močno odvisni od energije**, ki je zanje na razpolago: **masivnejši kvarki** so zato potencialno **zelo zanimivi**.

**Kvark b** je **najtežji** kvark, ki še tvori vezano stanje, mezon B.

**Meritev kršitve CP** pri mezonih B: po odkritju **mešanja** (ARGUS 1987) → taka meritev je **možna!**

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

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



V enem dnevu naberemo  $\sim$ trikrat toliko podatkov kot v celotnem času obratovanja eksperimenta ARGUS...

# 2001, rezultat meritve: CP je kršena!

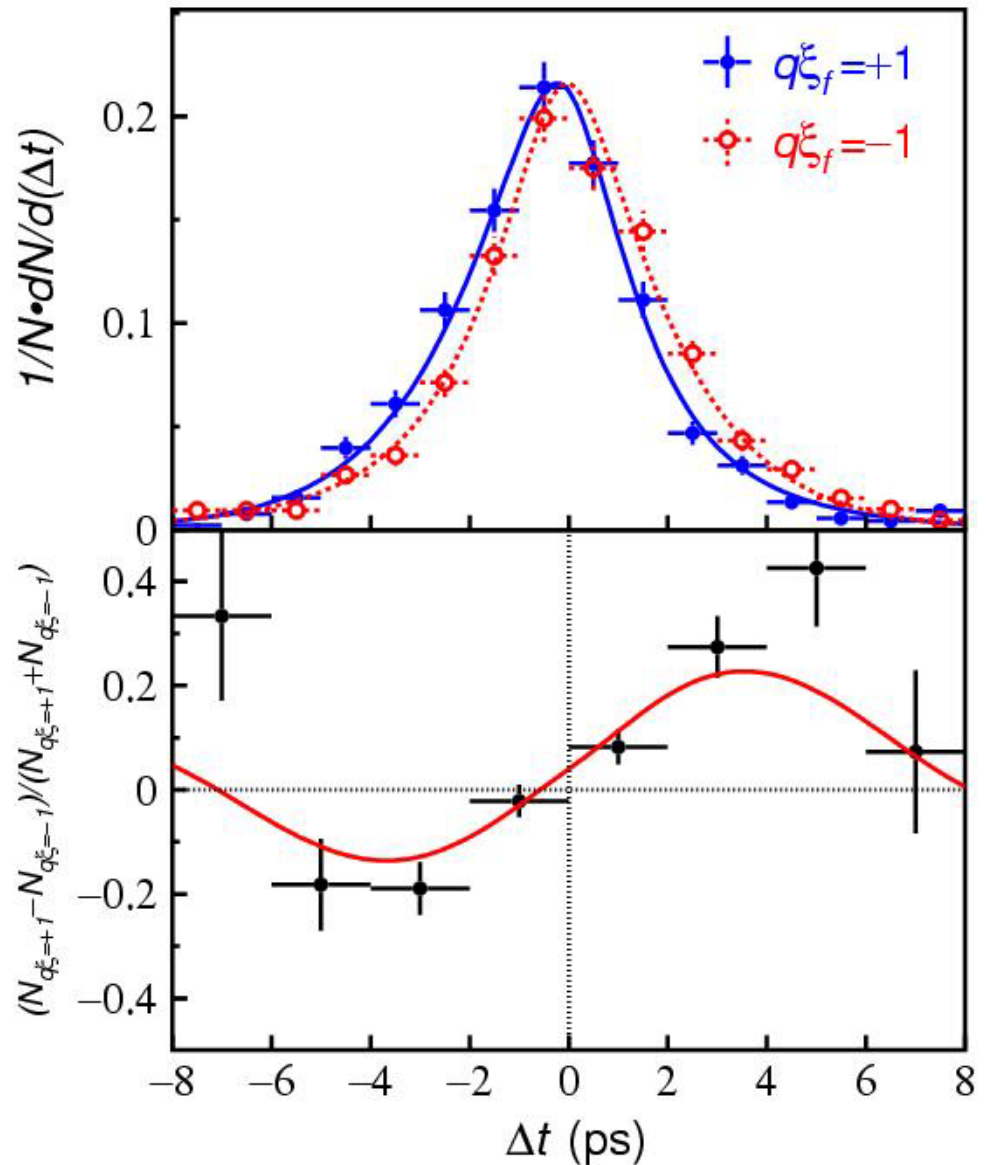
Razlika med delci in antidelci:

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

Razlika med obema porazdelitvama

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



# Meritev nevtrinske mase

---

Maso nevtrinov določimo posredno: če bi bili nevtrini brez mase, bi ne bili možni prehodi enega nevtrina (recimo  $\nu_e$ : elektronski nevtrino) v drugega (recimo  $\nu_\mu$ : mionski nevtrino).

Zato merimo pogostost prehodov

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$$

Verjetnost za prehod je odvisna od razlike mas obeh nevtrinov, energije in razdalje, ki jo nevtrino preleti, preden ga zaznamo.

# Kako zaznati nevtrine?

---

Zaznamo jih posredno: elektronski nevtrino povzroči nastanek elektrona, mionski nevtrino nastanek miona,



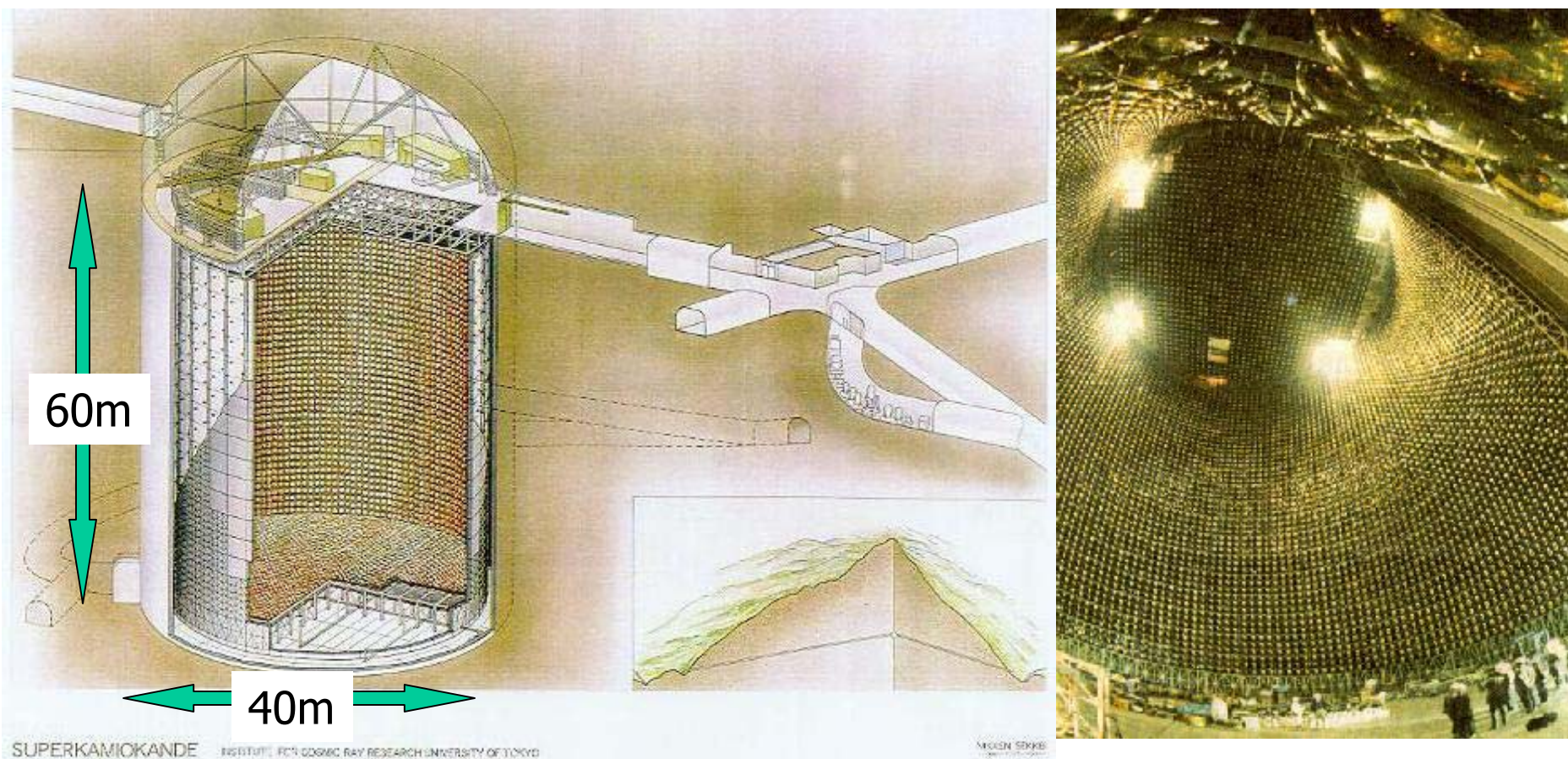
Toda: verjetnost za tako reakcijo v 100m vode je samo  $4 \cdot 10^{-16}$

Potrebujemo velikanski detektor .... in zopet nekaj let za meritve!



# Superkamiokande: primer nevtrinskega detektorja

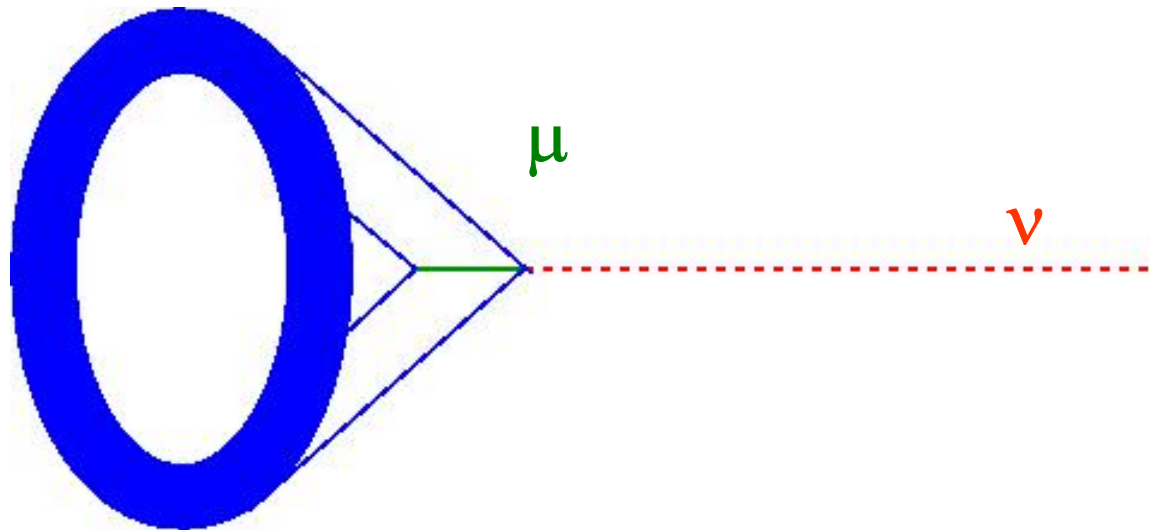
Tudi v tem primeru uporabimo Čerenkovo sevanje



**11.000 fotonoževalk premera 50cm!**

## Superkamiokande: zaznavanje elektronov in mionov

Kako zaznamo mion ali elektron? Ponovno preko Čerenkovega sevanja, tokrat v vodi.



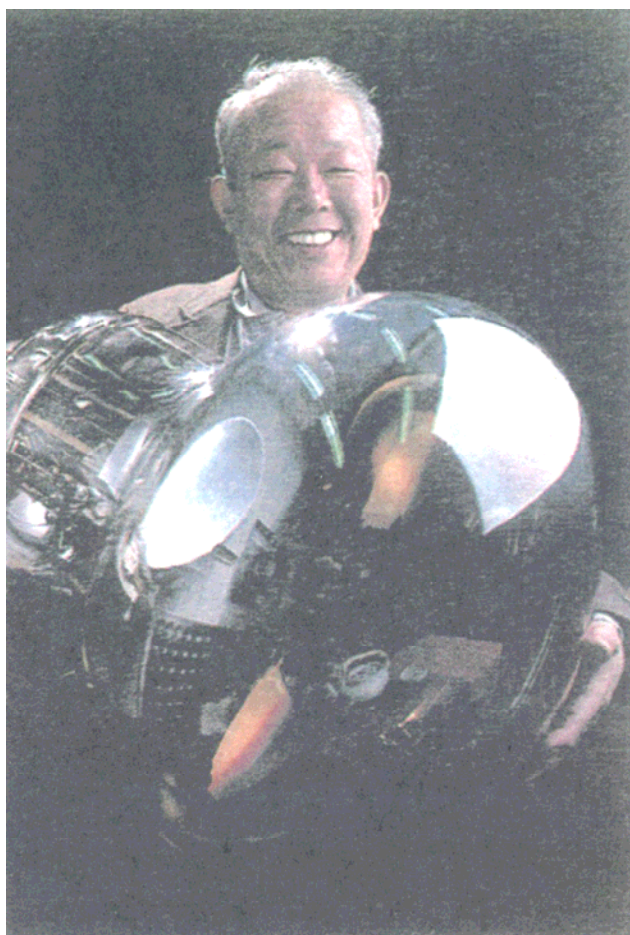
Nastali mion oz. elektron seva fotone Čerenkova → obroč na steni posode.

- mionski obroč: ostri robovi
- elektronski: razmazan (zavorno sevanje).

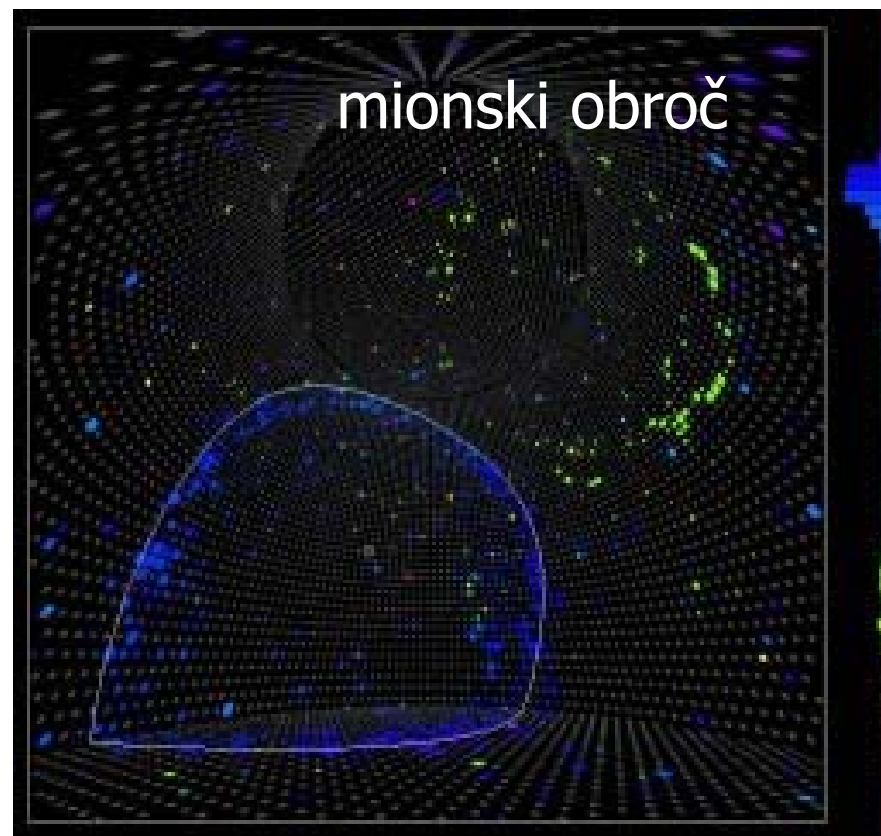


# Superkamiokande: zaznavanje elektronov in mionov

Detektorji svetlobe: zelo zelo velike fotopomnoževalke



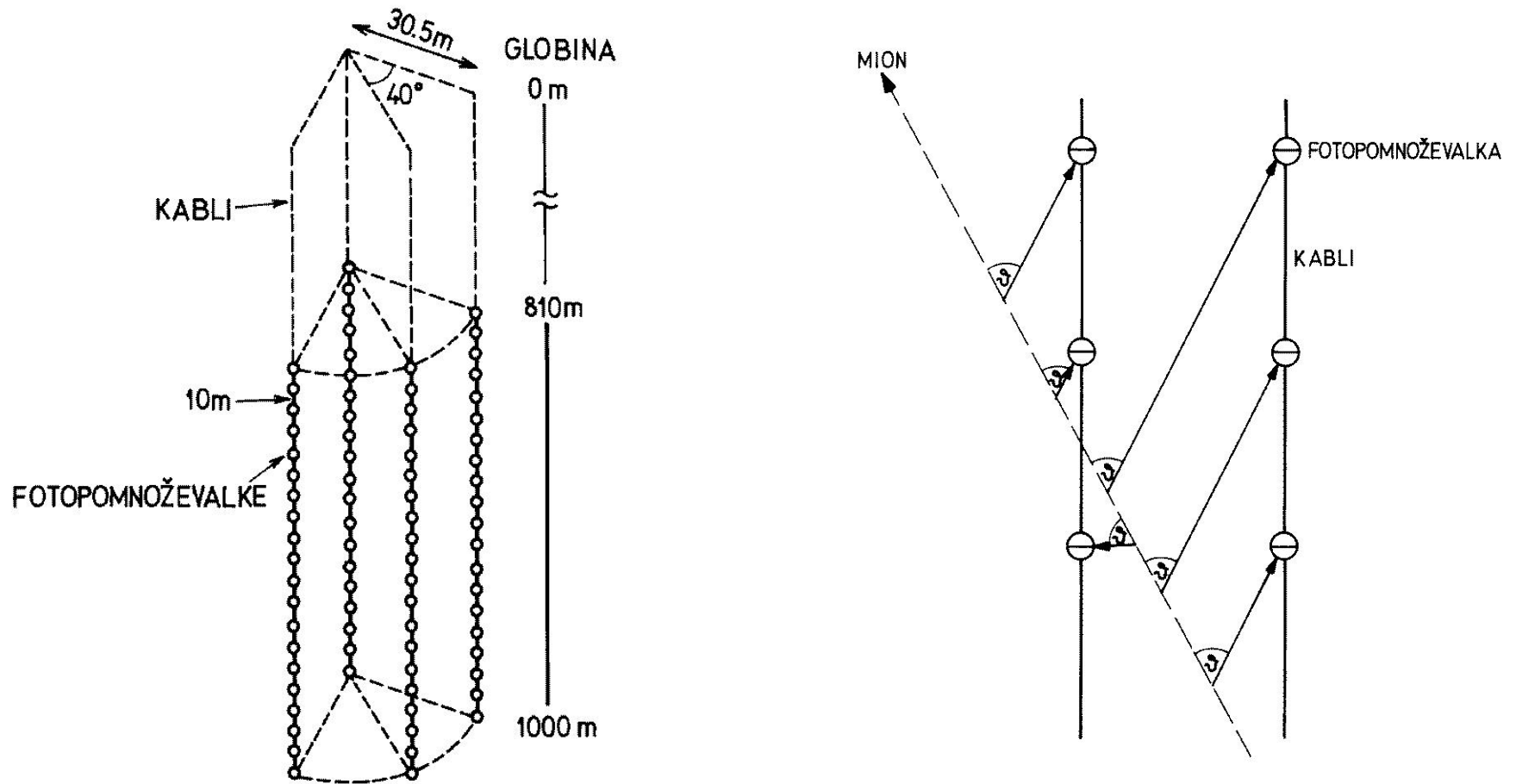
M. Koshihira



Elektrone ločimo od mionov po vzorcu na detektorju svetlobe.



# AMANDA: uporabimo led na Antarktiki namesto vode



Fotopomnoževalke merijo čas prihoda Čerenkovih fotonov

# AMANDA

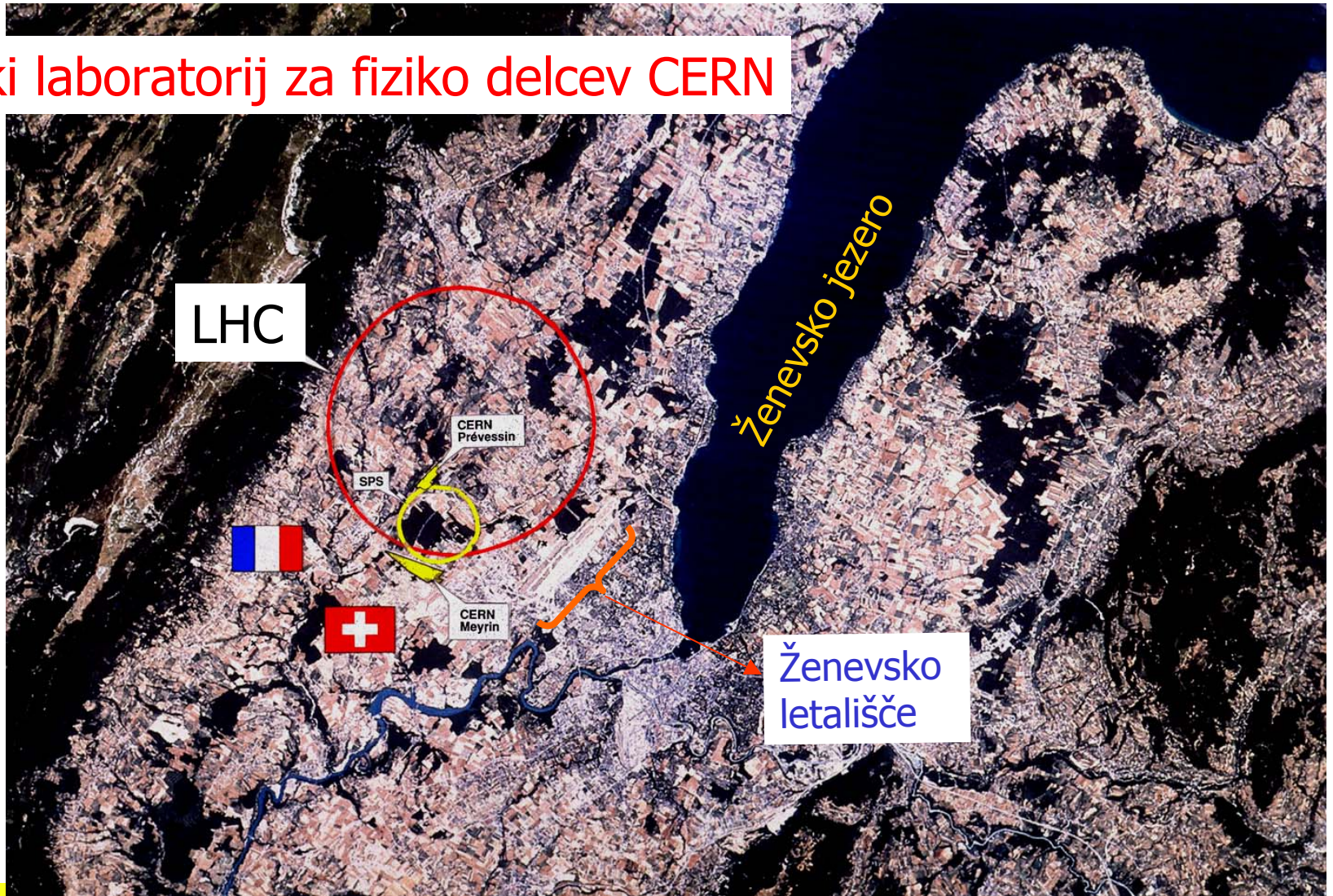
---

Primer dogodka, ki so ga  
zaznale  
fotopomnoževalke.

Mion prihaja v detekcijski  
sistem od spodaj.

# Na lovu za Higgsovimi delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



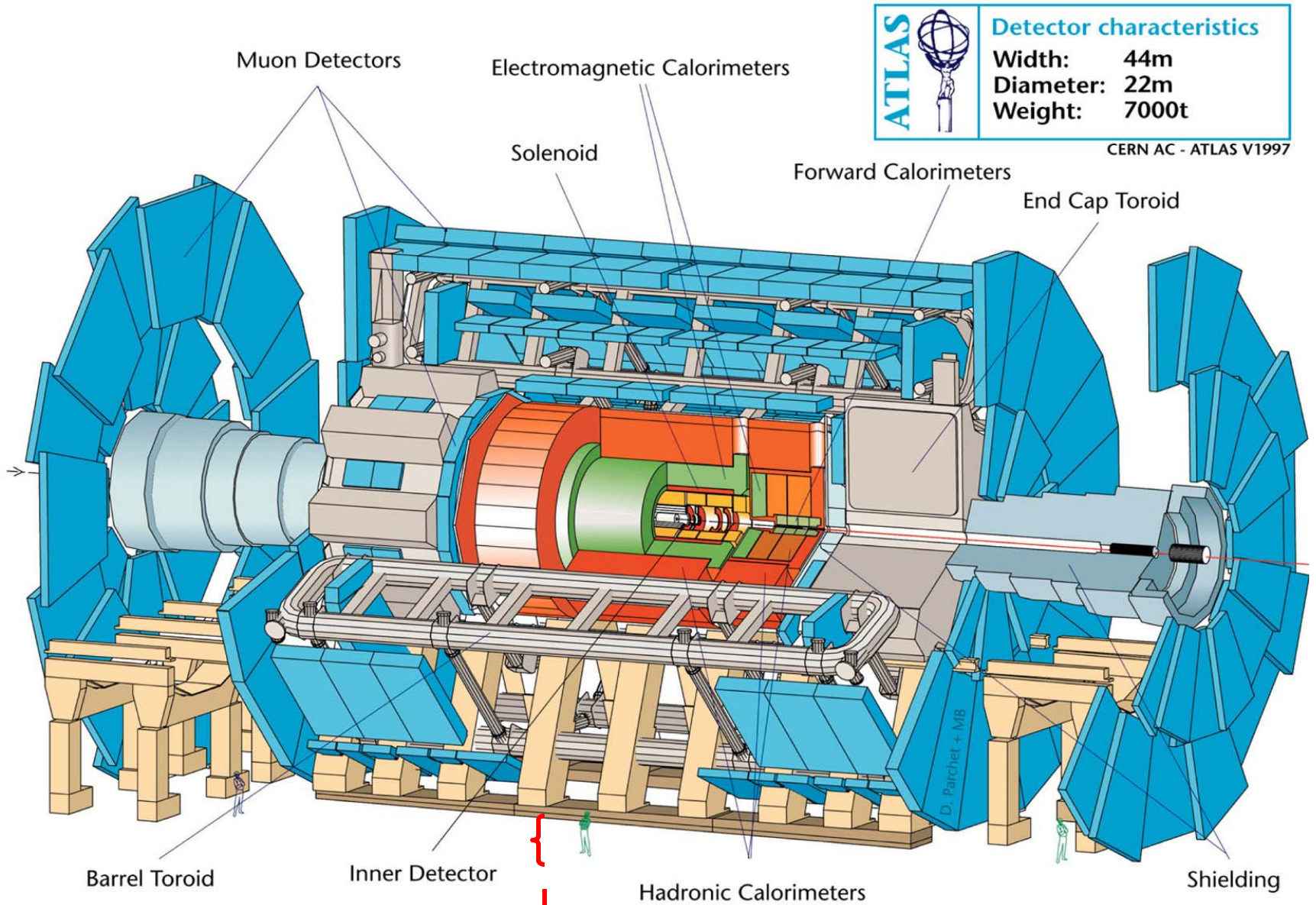
1. oktober 2007


FJOD - uvod

Peter Križan



# Detektor ATLAS ob LHC – v pripravi



<b>ATLAS</b>		<b>Detector characteristics</b>	
		<b>Width:</b>	<b>44m</b>
		<b>Diameter:</b>	<b>22m</b>
		<b>Weight:</b>	<b>7000t</b>

CERN AC - ATLAS V1997

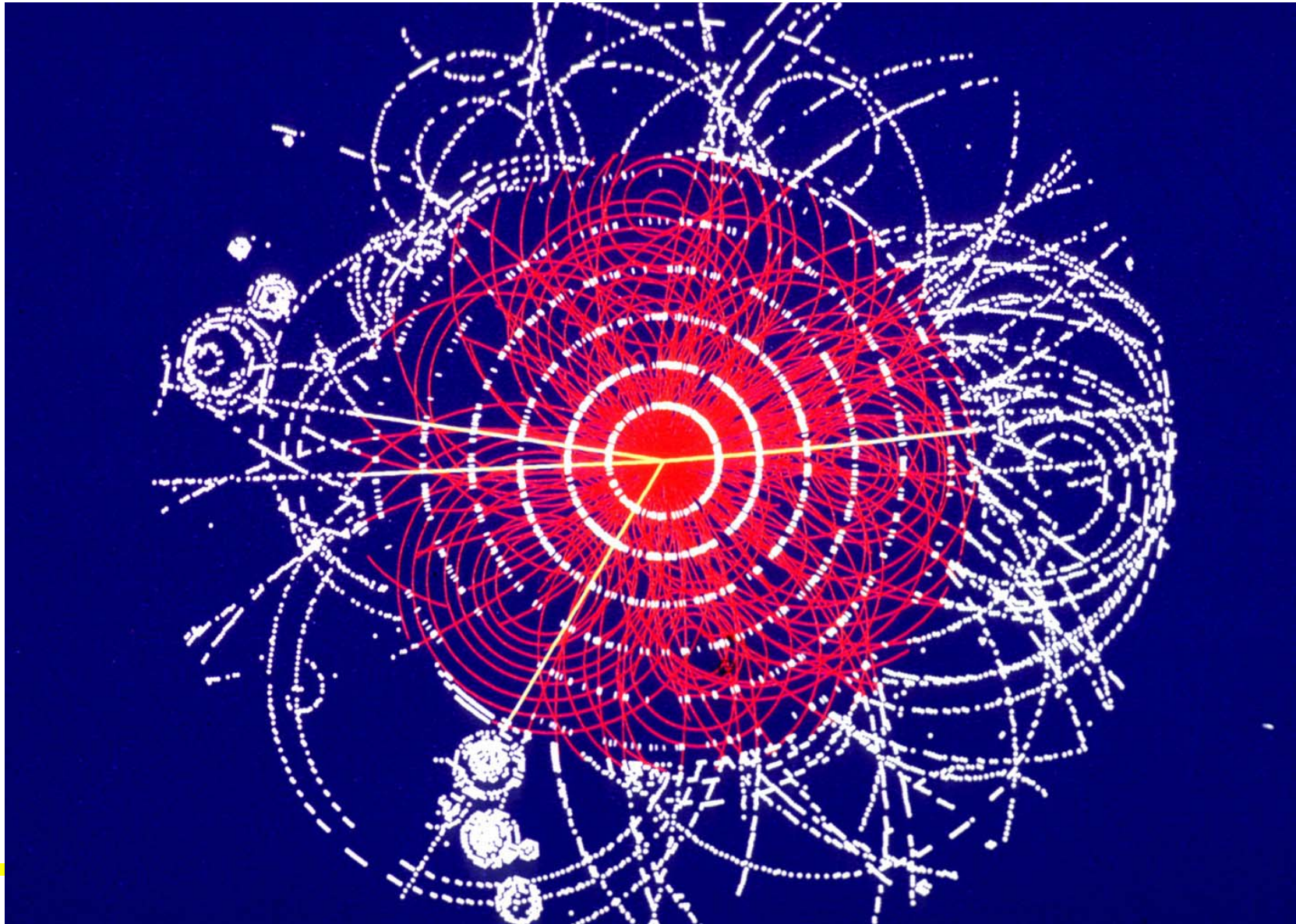
možak..tukaj...

FJOD - uvod

Peter Križan



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



# Na lovu za Higgsovim delcem

---

- Trkalnik je že skoraj pripravljen
- Oba velika detektorja (ATLAS, CMS) pospešeno sestavljajo
- Prvi trki naslednje leto
- V pričakovanju velikih presenečenj...

# Standardni model: dokončna teorija?

---

Standardni model:

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

→Pravilen, a s preveč osnovnimi delci?

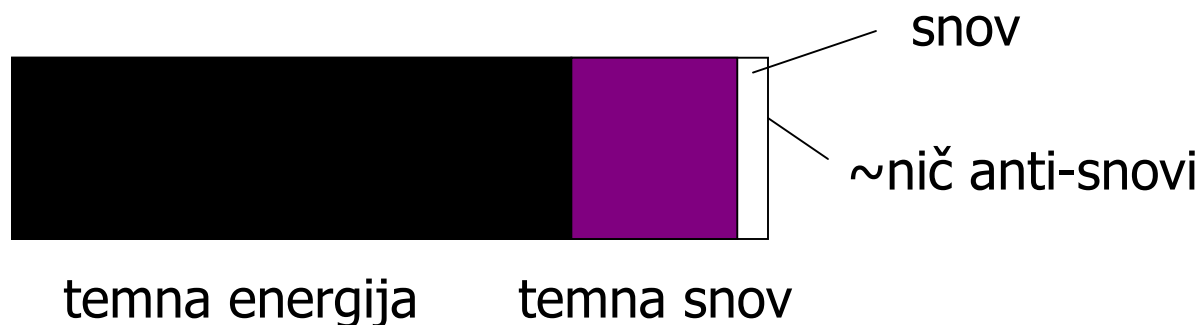
Poleg tega →

# Standardni model ni dokončna teorija

---

Poleg tega:

- Nevtrini imajo (majhno) maso
- Izmerjena kršitev CP je premajhna, da bi pojasnila asimetrijo med snovjo in anti-snovjo v vesolju
- Gravitacija še ni vključena
- Večina vesolja je iz nam neznane snovi.....





# Standardni model ni dokončna teorija

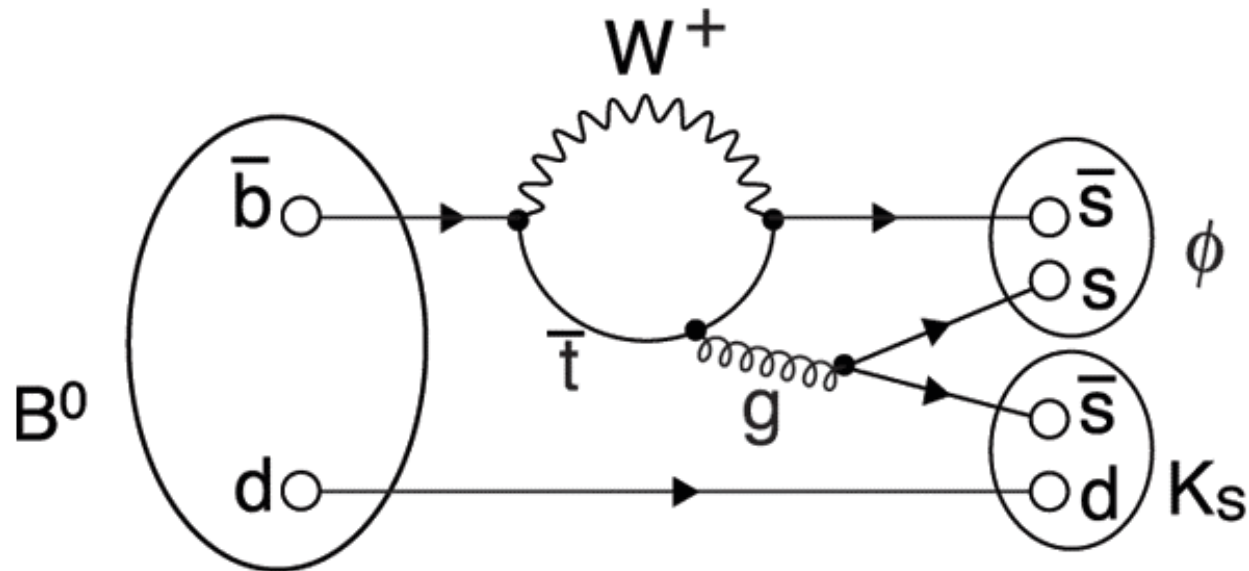
---

... Zato več raziskovalnih skupin na različne načine išče odstopanja od sicer izjemno natančno preverjenega Standardnega modela.

Ena izmed najbolj perspektivnih poti: izboljššan detektor Belle ('SuperBelle') ob bistveno zmogljivejšem trkalniku KEK-B.

Kako iščemo morebitna odstopanja?

## Diagram za prehod $B \rightarrow \phi + K_S$



Razpad  $B \rightarrow \phi + K_S$  poteka preko "kvantne fluktuacije": kvark  $b$  se za zelo kratek čas pretvori v bistveno težji kvark  $t$  in bozon  $W$ , nato pa konča kot kvark  $s$  in par antikvarkov anti- $s$ .

Možnost: namesto kvarka  $t$  ali bozona  $W$  se bi pri taki kvantni fluktuaciji lahko pojavile nove vrste delcev, ki jih sicer Standardni model ne predvideva in jih do sedaj še nismo odkrili.

# Kakšni delci bi lahko nastopali v zanki?

---

Zelo mikavna možnost: pri kvantni fluktuaciji nastopajo supersimetrični partnerji osnovnih delcev.

elektron  $e$       selektron  $\tilde{e}$

kvark  $b$       skvark  $\tilde{b}$

foton  $\gamma$       fotino  $\tilde{\gamma}$

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

**Do sedaj nismo videli še nobenega supersimet. partnerja...**

# Program tega cikla predavanj

- Poskusi v fiziki jedra in osnovnih delcev. Pospeševalniki. Detekcija nabitih in nevtralnih delcev.
- Standardni model. Sile na daljavo. Vrste interakcij. Barva.
- Jedrska fizika. Masa, spin, magnetni moment jedra. Modeli jedra. Jedrski razpadi.
- Simetrije in grupe. Rotacije. Clebsh-Gordonovi koeficienti. Izospin.
- Okusna SU(3) simetrija. Mezoni. Barioni
- Elektrodinamika delcev brez spina. Feynmanova pravila. Sipalni presek. Antidelci.
- Diracova enačba.
- Elektrodinamika delcev s spinom  $1/2$ . Feynmanova pravila.
- Sipanje  $e^- \mu^- \rightarrow e^- \mu^-$ . Anihilacija  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- Šibka interakcija. Matrika CKM: meritev matričnih elementov, unitarnost. GIM mehanizem. Nevtralni tok, ki spremeni okus.
- Mešnje pri nevtralnih mezonih K in B. Kršitev CP.
- Elektrošibka interakcija.
- Močna interakcija.
- Veliko poenotenje. Zveza med fiziko osnovnih delcev in razvojem vesolja.

# Literatura

---

Spletna stran teh predavanj je na:

<http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/fjod/fjod.html>

Predavanja v glavnem sledijo knjigi:

- F. Halzen, A.D. Martin: Quarks and Leptons
- Poglavlje Jedrska fizika: M. Rosina: Jedrska fizika

Zelo uporabni sta tudi:

- D. Griffiths, Introduction to Elementary Particles
- Bogdan Povh, K. Rith, Ch. Scholz, and F. Zetsche: Particles and nuclei, Springer 2004

# Dodatna literatura

Dodatno čtivo:

- B. Povh, M. Rosina: Scattering and Structures, Essentials and Analogies in Quantum Physics, Springer (2005)

- Prosojnice z mojega predavanja pri izbranih poglavjih  
<http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/izbr-pog/ip-270306.pdf>

- Prosojnice z mojega cikla predavanj na univerzah v Barceloni in Tokiju

<http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/barcelona/barcelona.html>

<http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/tokyo/tokyo.html>

Tam najdete tudi seznam dodatne priporočene literature.

# Seminarji, diplome

---

Za tiste, ki jih ta del fizike zanima, je na voljo več tem za:

- Seminarje
- Diplomaska dela

Oglasite se pri meni, ali pri asistentu Boštjanu Golobu, ali pa pogledjte na spletno stran (ki čaka na prenovo...):

<http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/diplome/diplome.html>

# Dodatne prosojnice

---