



Jedra, kvarki, leptoni

Peter Križan

Fizika jedra in osnovnih delcev na FMF



Vsebina

Uvod

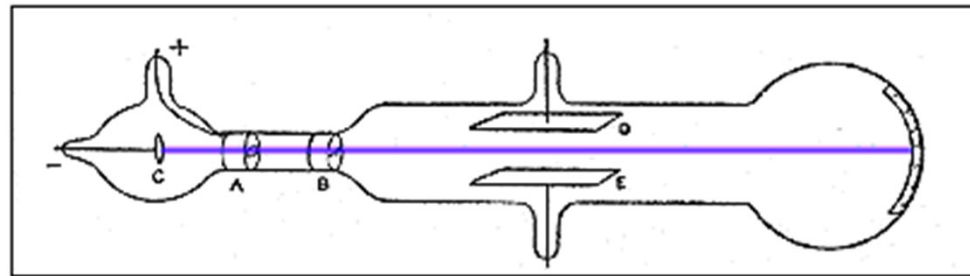
Standardni model osnovnih delcev in njihovih interakcij

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

Program predmeta

Pregled literature

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)

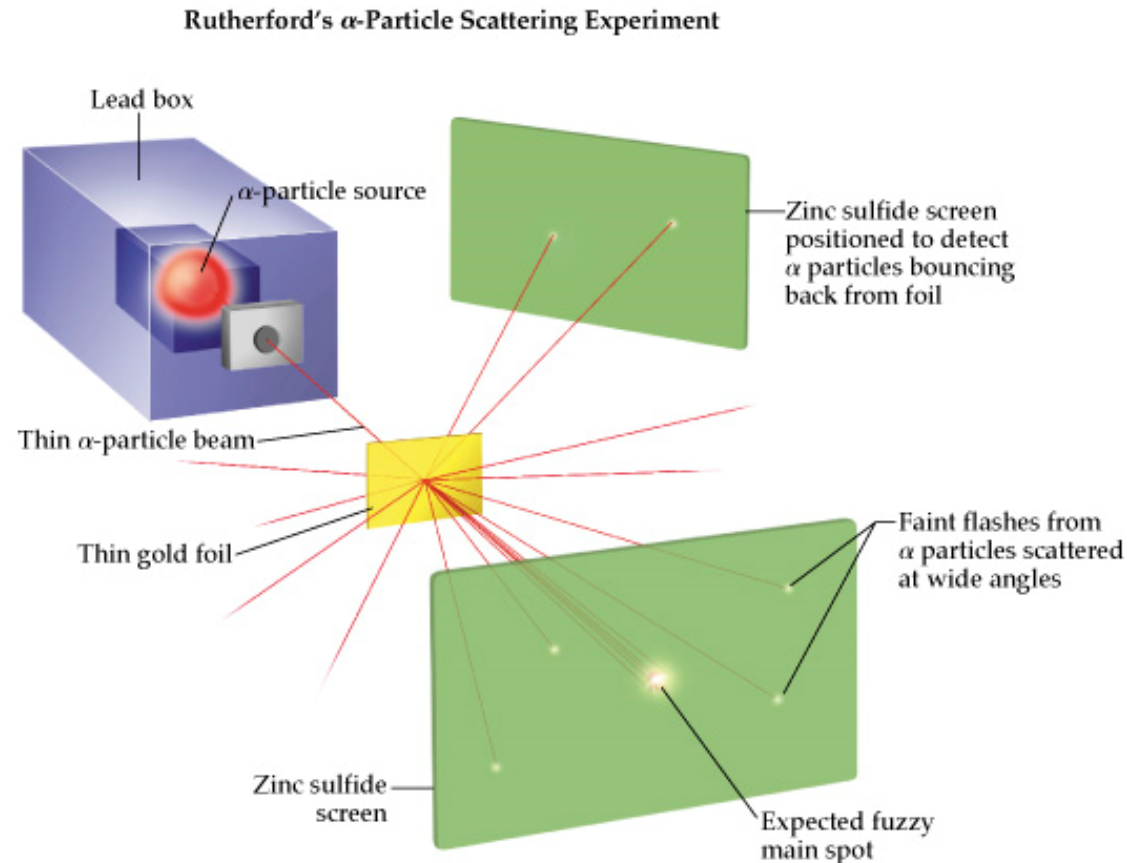
L. de Broglie: $\lambda_B = hc / E_{kin}$ (NN 1929)

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

Sipanje delcev α na Au foliji

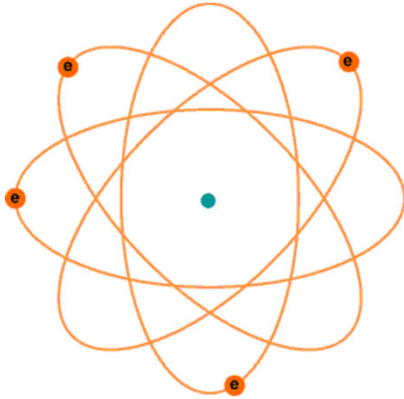


Rutherford, Geiger



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

Poskus: precej delcev α se siplje **pod velikimi koti!**



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

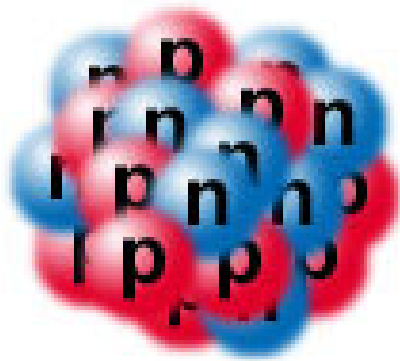
Jedro: $1/1000000000000000000$ prostornine atoma

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 π

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

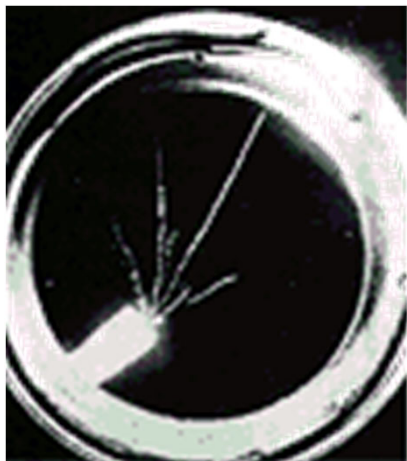
(NN 1949)

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

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

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

a : doseg inerakcije



Žarki α 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').

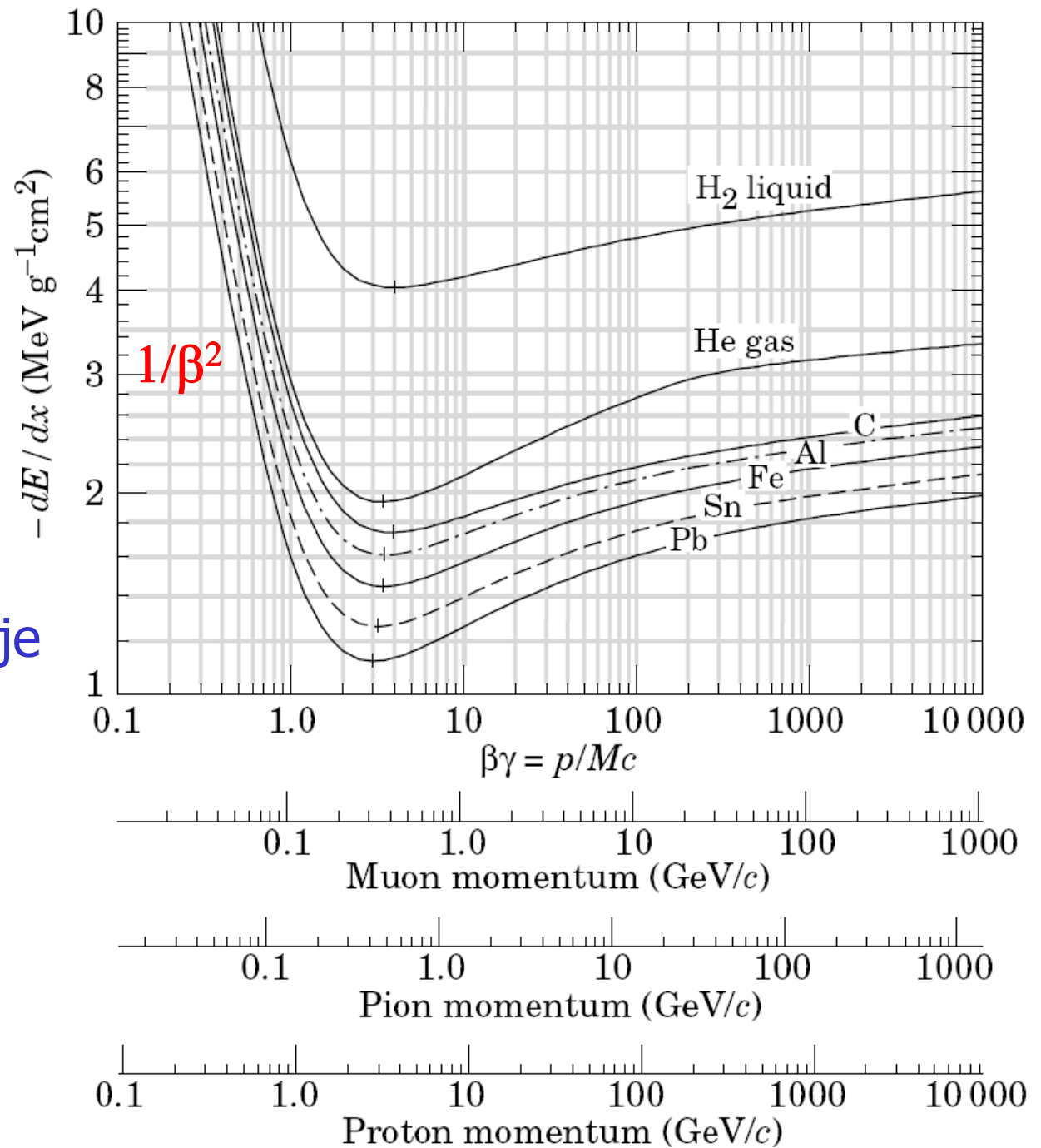
Energijske izgube na enoto poti: formula Betheja in Blocha

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

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

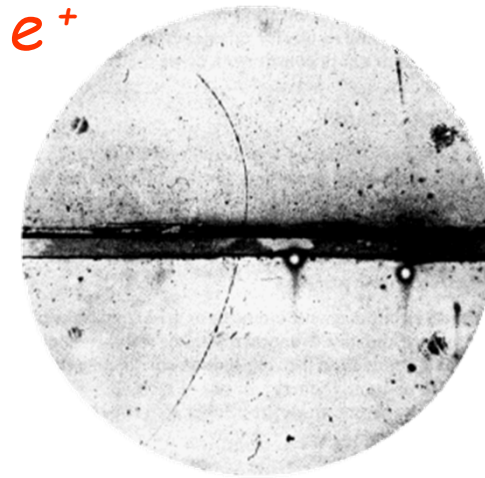
- Radioaktivni izotopi
- Kozmični delci
- Pospeševalniki



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 ΔE pri preletu svinca)

Odkritje miona

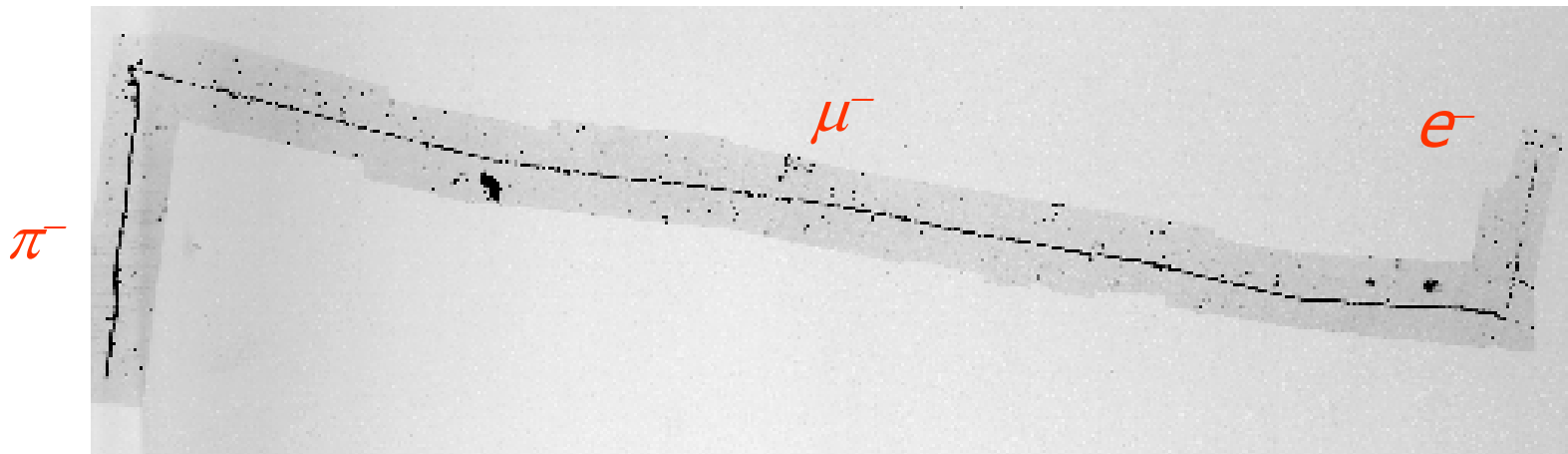


C. Anderson (1936):

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

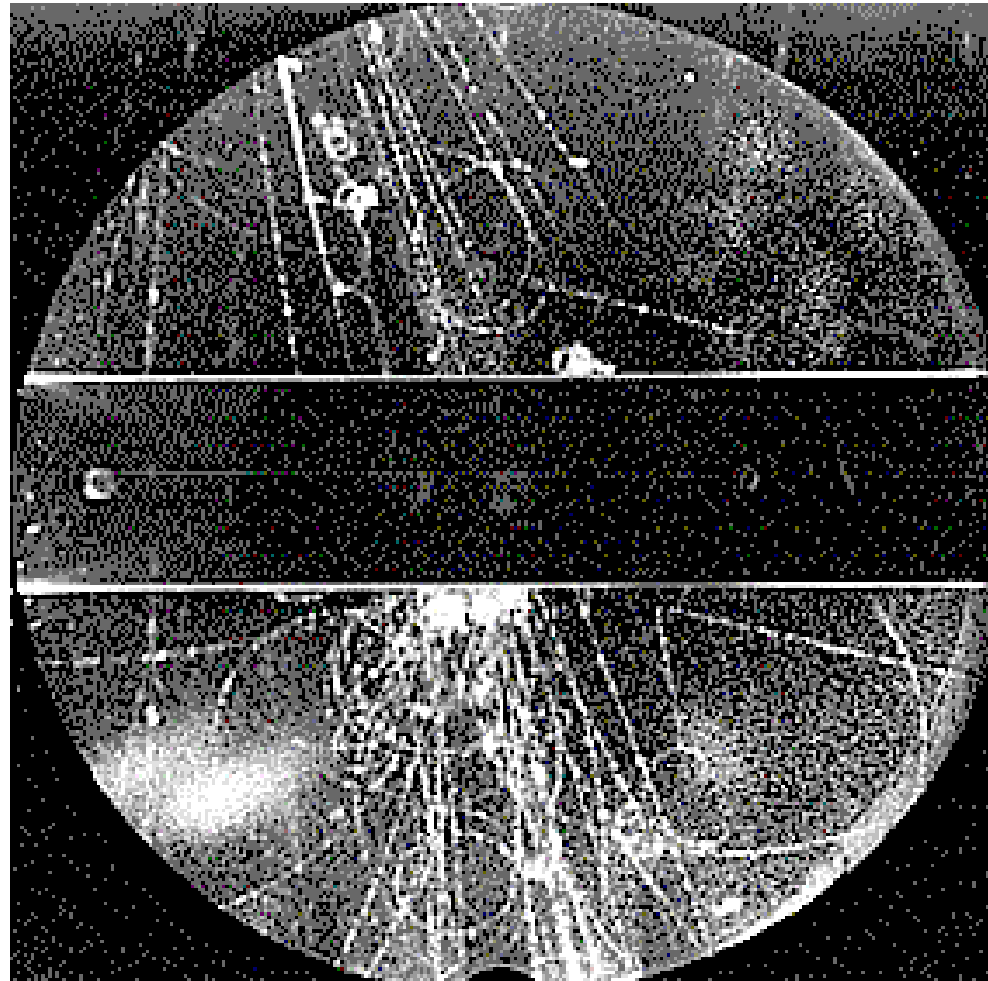
Odkritje piona

C. Powell: fotografska emulzija, odkritje π (1947)
(NN 1950)



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

Odkritje kaonov



svinčna plošča



Rochester, Butler (1947)

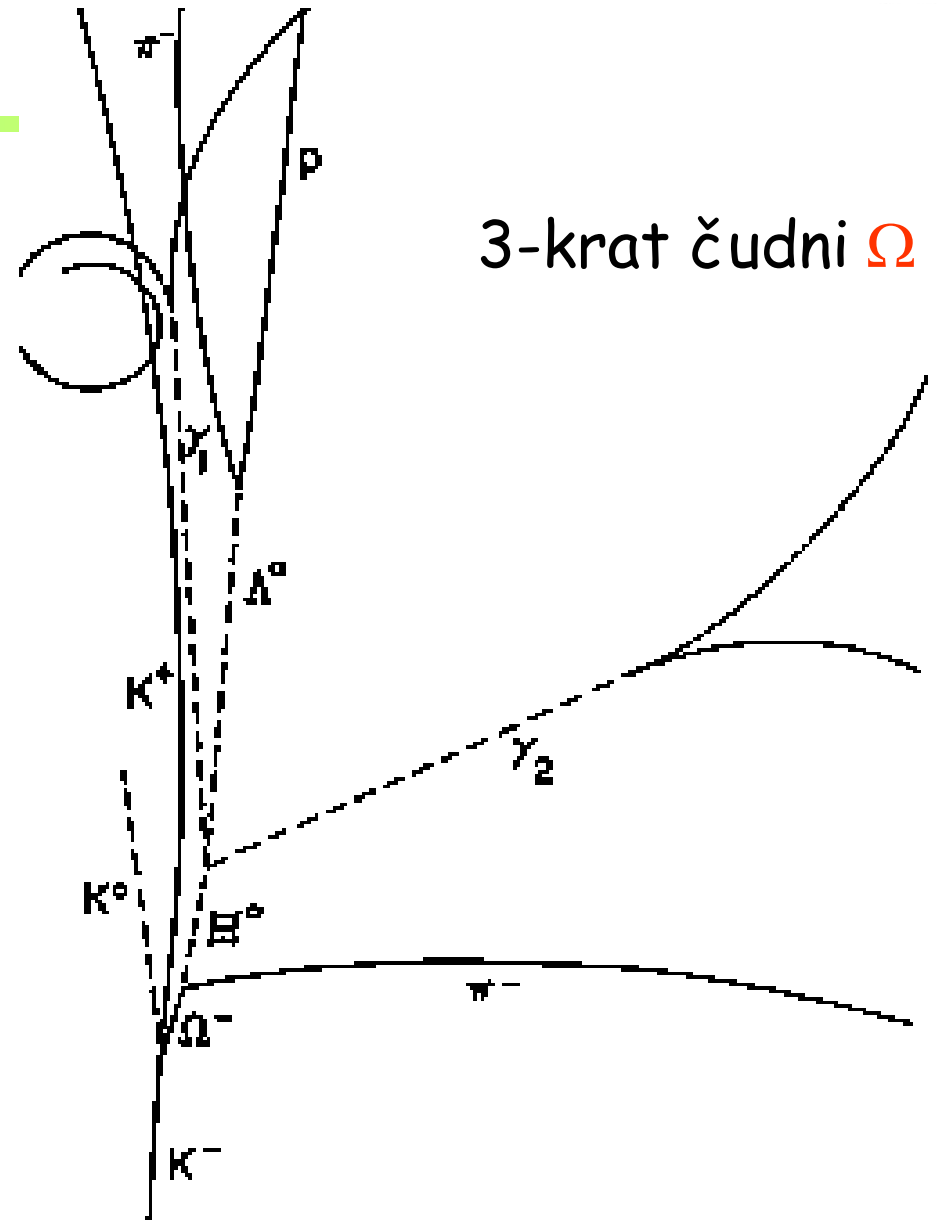
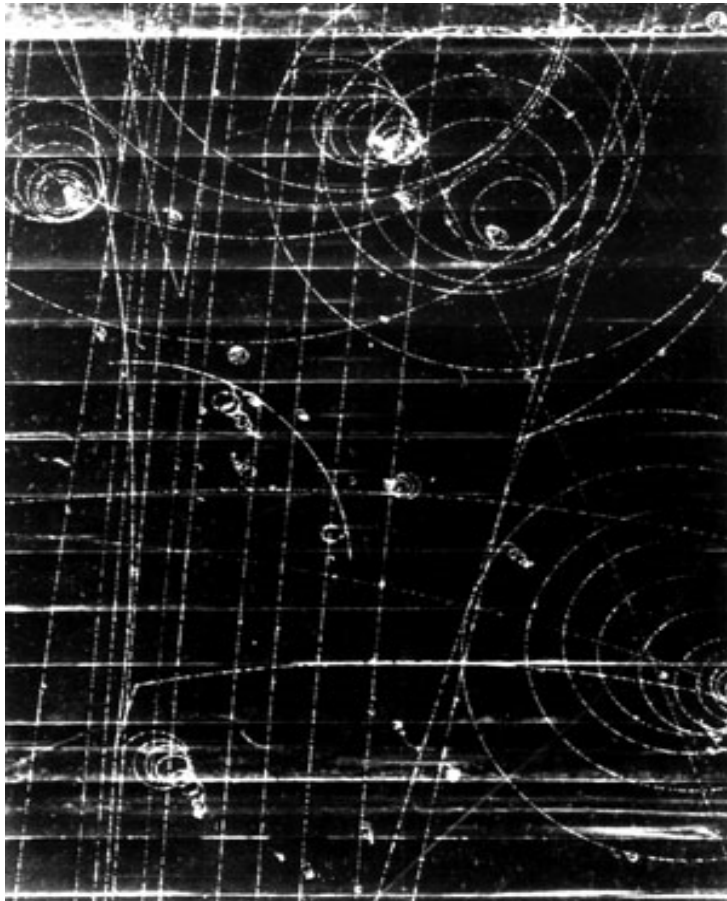
Čudni delci

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^- $S=-1$)

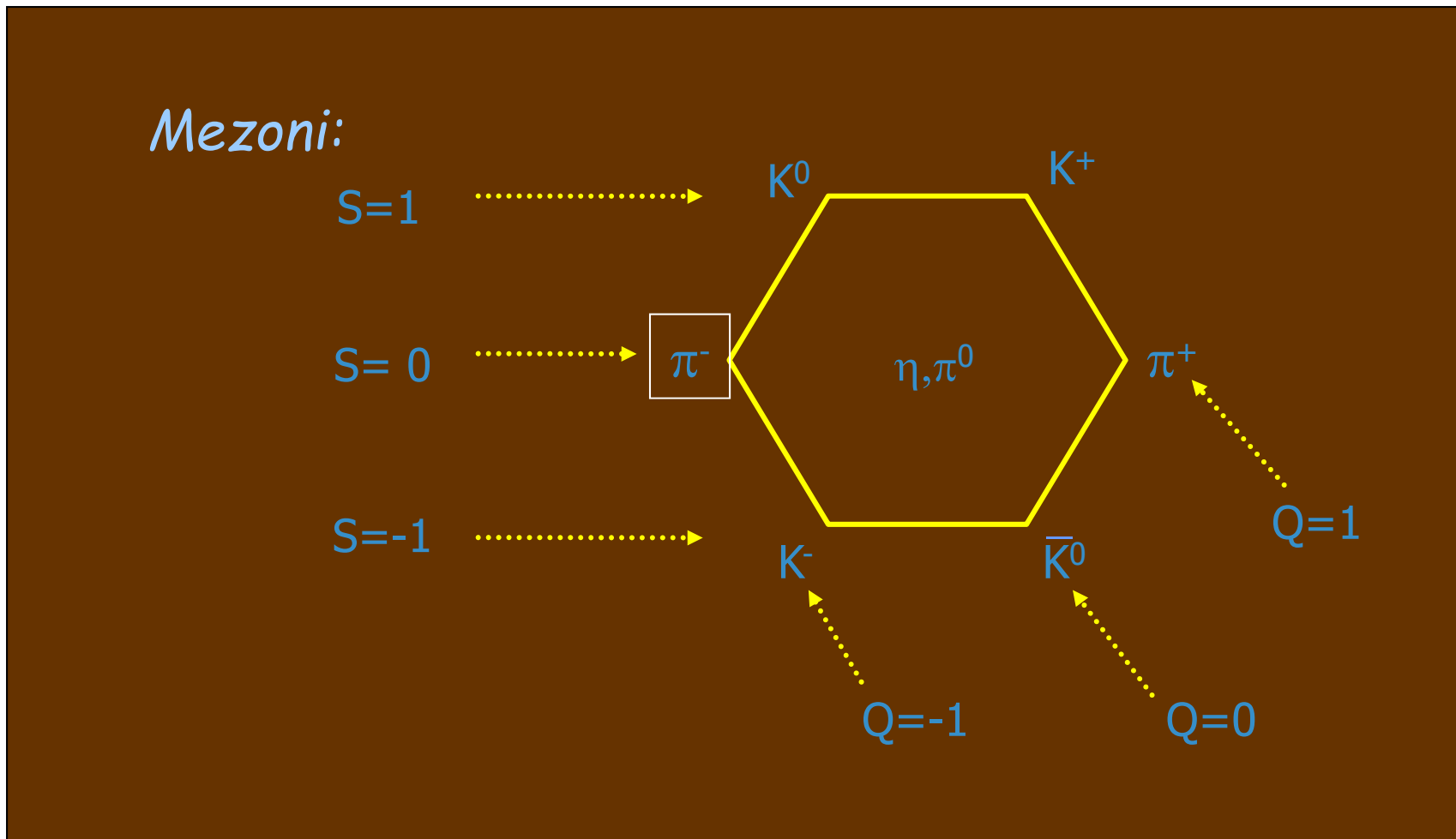
Razpadi čudnih delcev, na primer $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$: poteka zaradi **šibke interakcije**, čudnost **se ne ohranja**

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



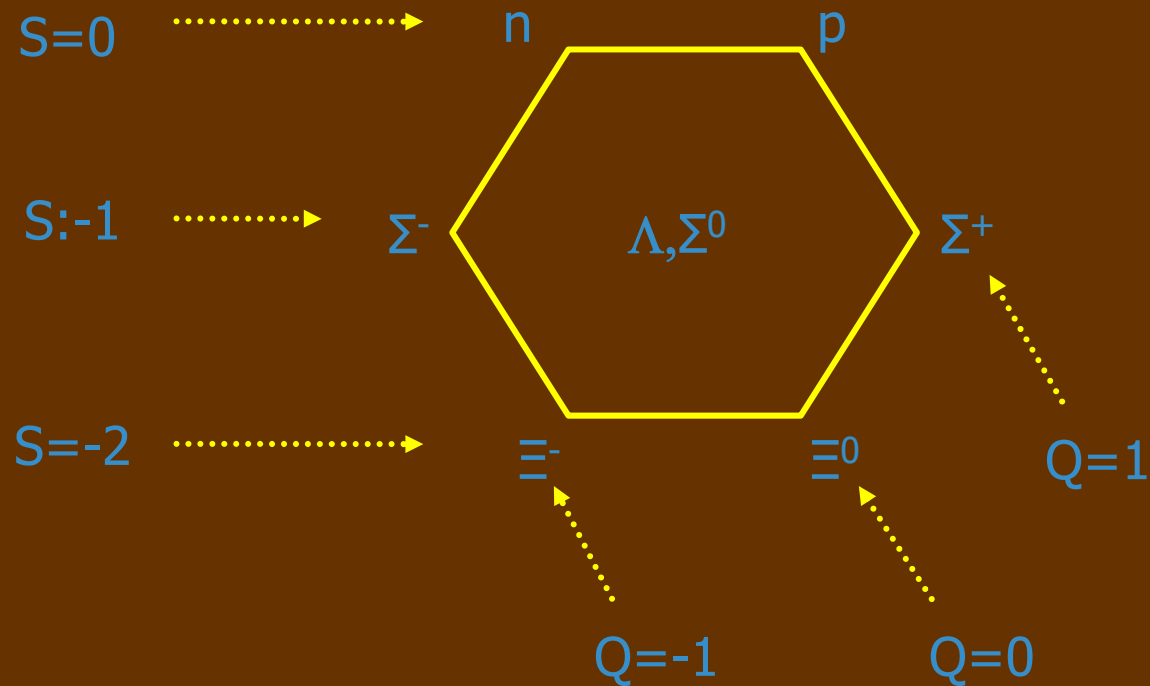
3-krat čudni Ω

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.

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



u: $Q=+2/3$

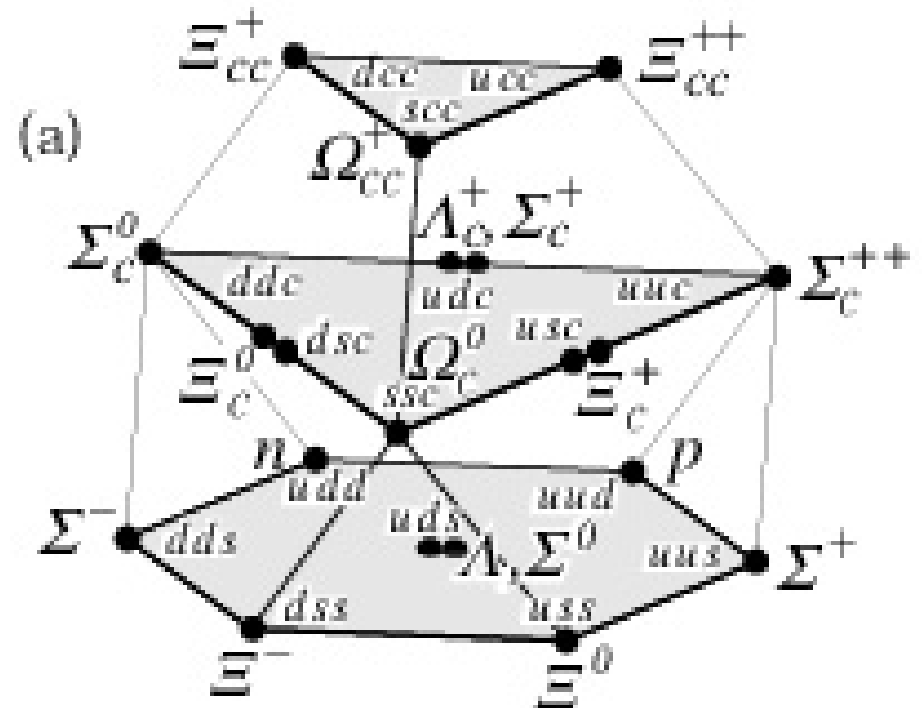
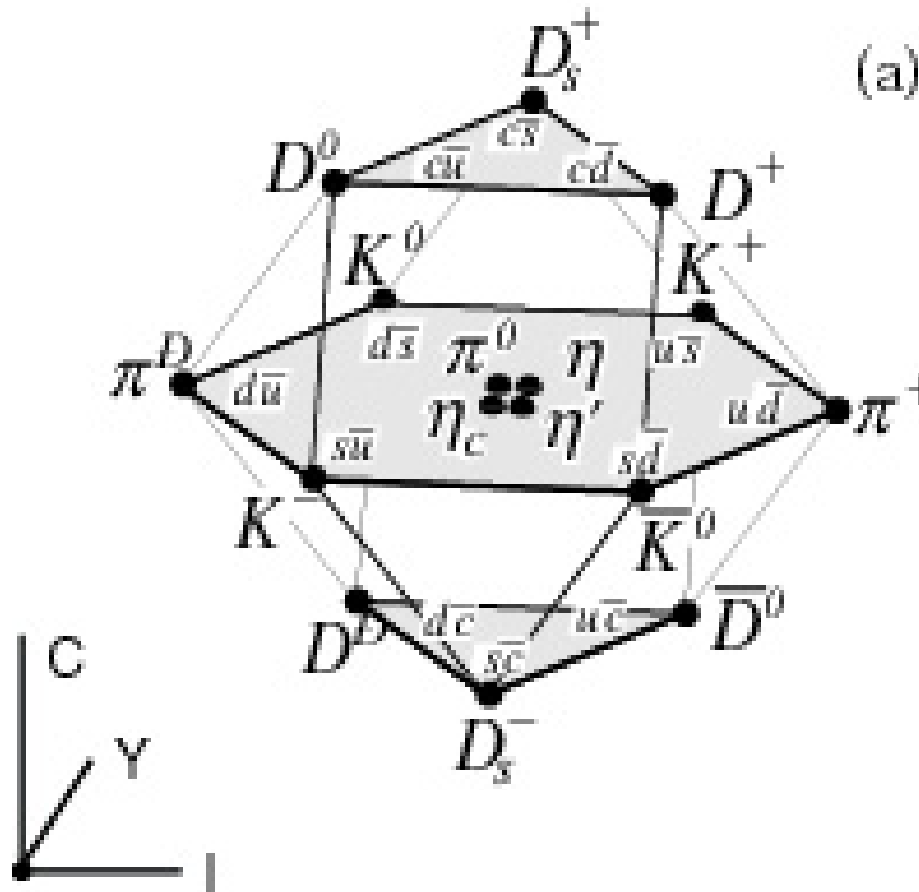
d: $Q=-1/3$

s: $Q=-1/3$

Hadroni: sestavljeni iz kvarkov

Mezoni: kvark + anti-kvark

barioni: trije kvarki

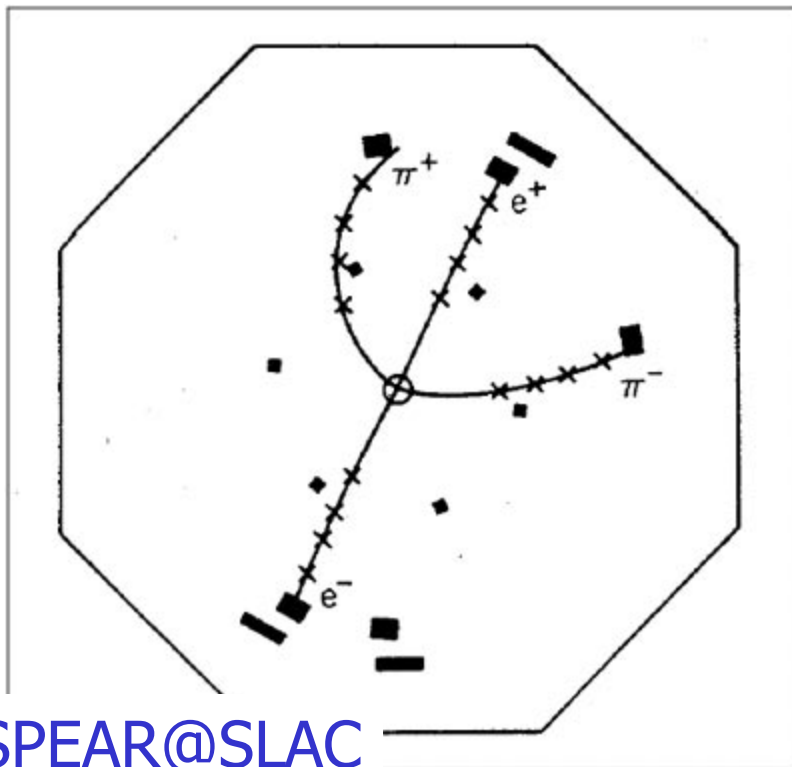


Še več kvarkov: najprej kvark c

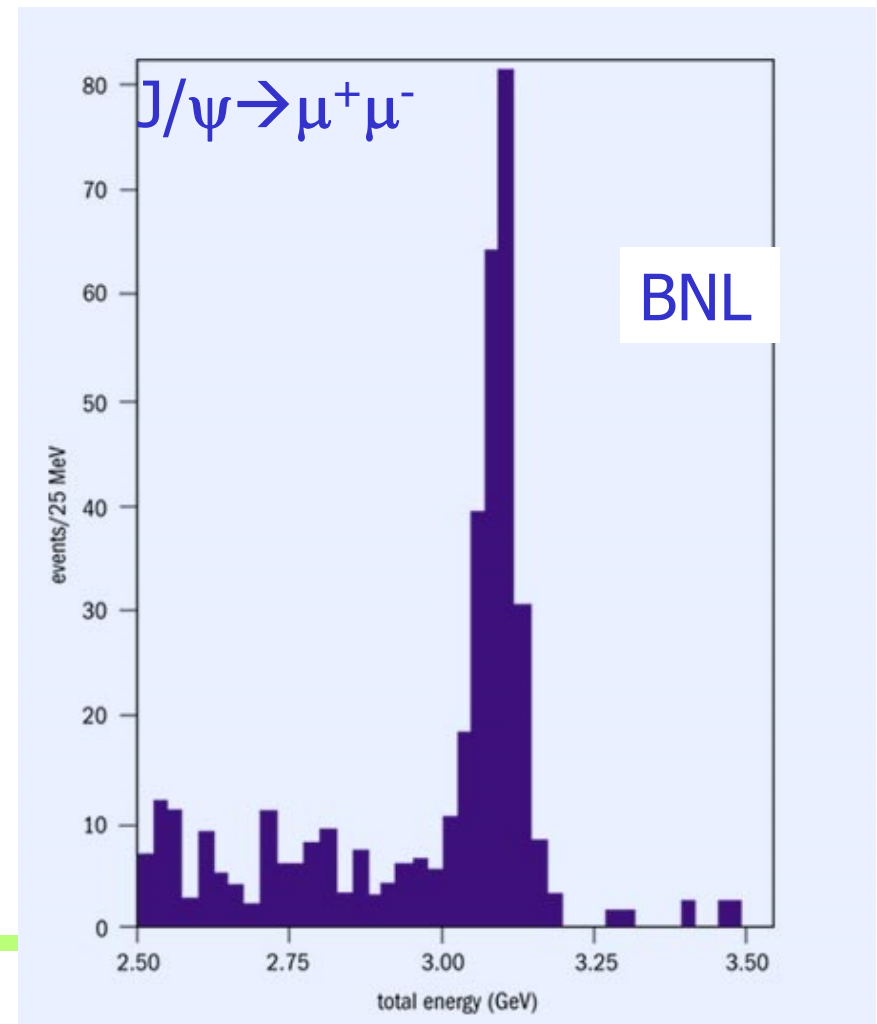
November 1974: odkritje delca J/ψ – vezano stanje **kvarka c** in **anti-kvarka c** pri $3,1 \text{ GeV}/c^2$ (\rightarrow NN Sam Ting in Burt Richter)

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

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



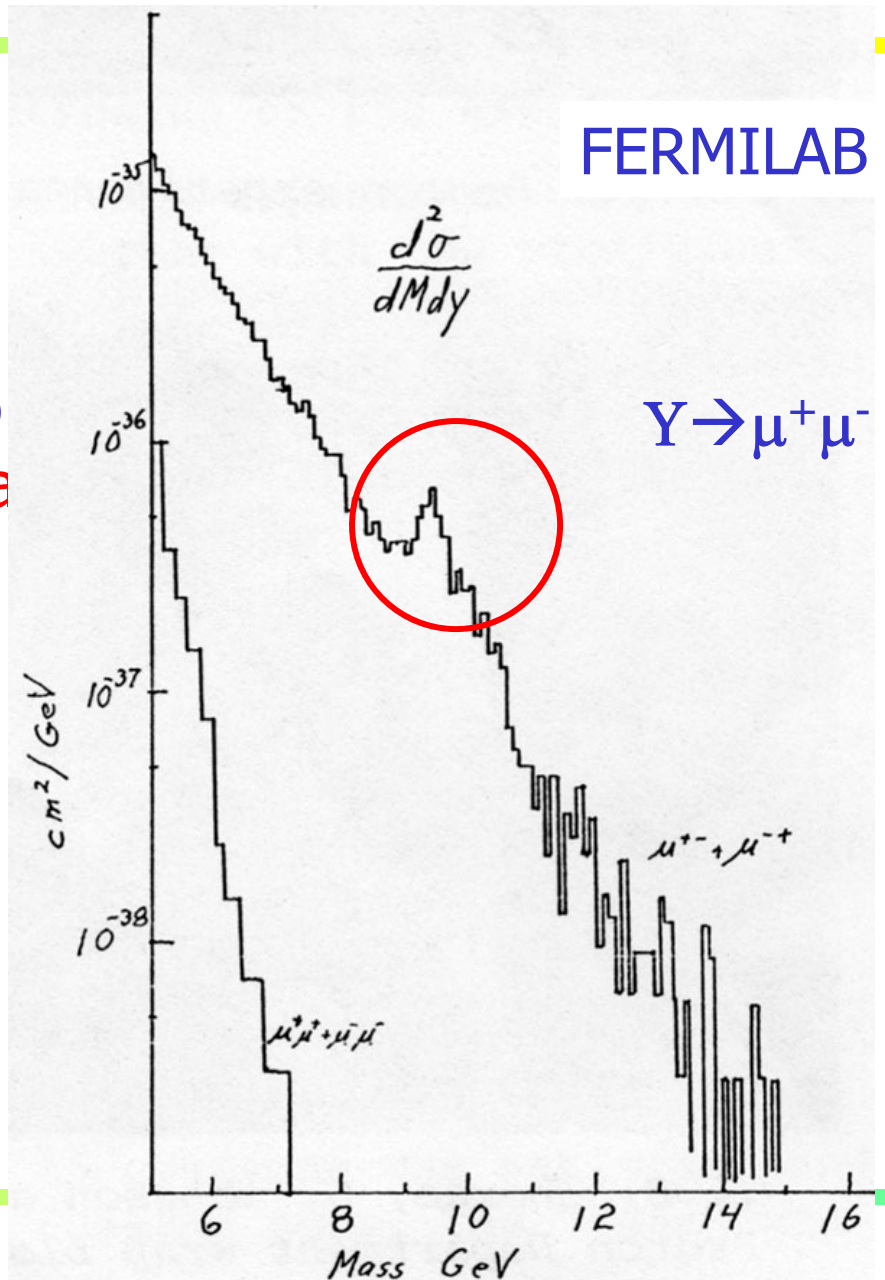
SPEAR@SLAC



Še več kvarkov: nato kvark b

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

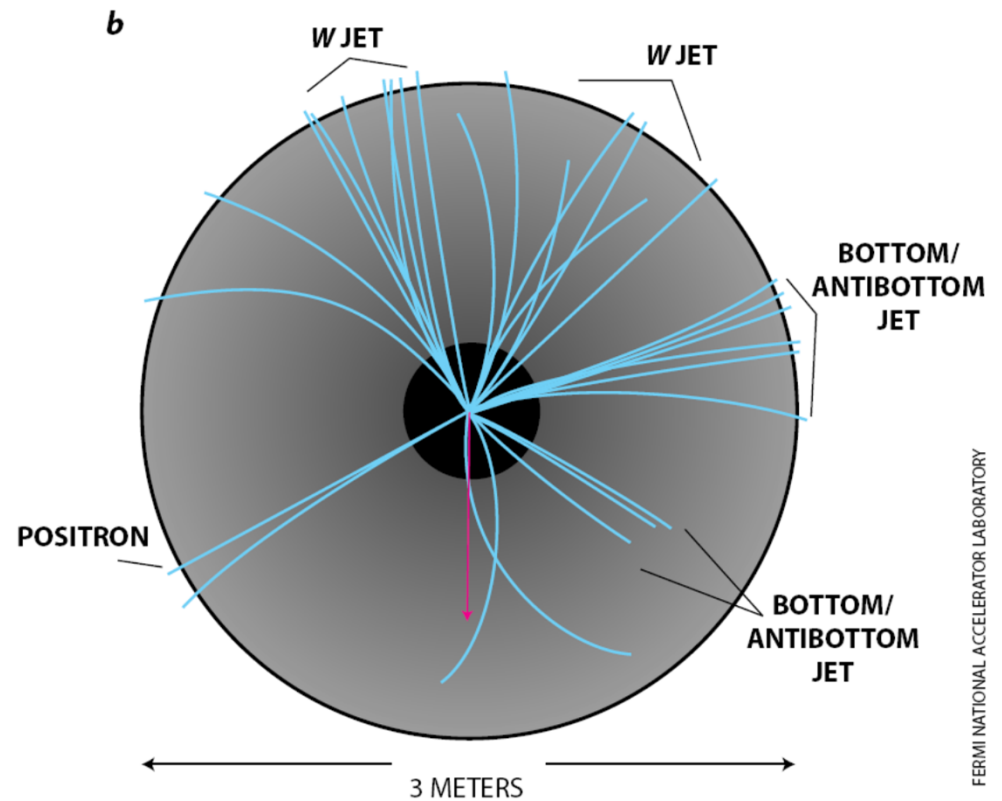
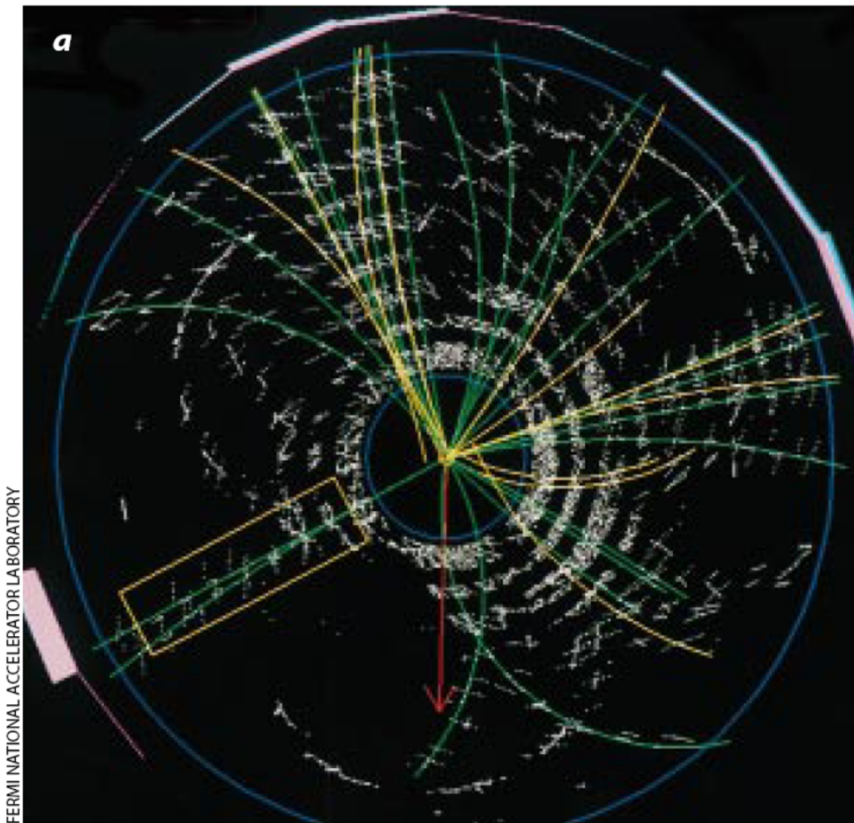
→ Masa kvarka $b \sim 5 \text{ GeV}/c^2$



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 $\bar{t} \rightarrow \bar{b} d \bar{u}$

1. avgusta

Standardni model

Standardni model:

- 2 vrste osnovnih delcev (leptoni, kvarki)
- 3 vrste interakcij

- delec, ki poskrbi za maso vseh ostalih (Higgs)

Standardni model: osnovni delci

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

Standardni model: Interakcije

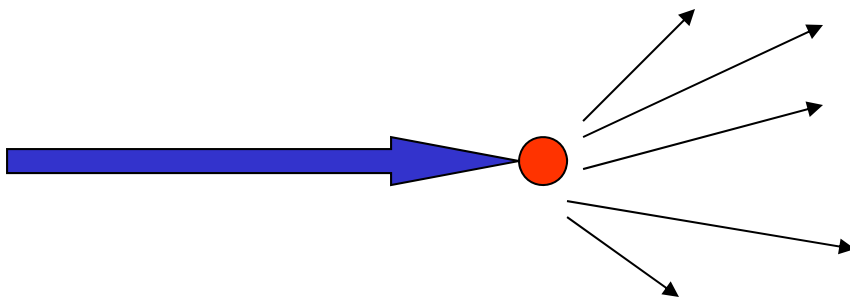
<i>Sila - interakcija</i>	<i>nosilci sile</i>	<i>doseg</i>
elektromagnetna	foton γ	neskončen
šibka	šibki bozoni W^+, W^-, Z^0	zelo kratek
močna	gluoni g	kratek

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

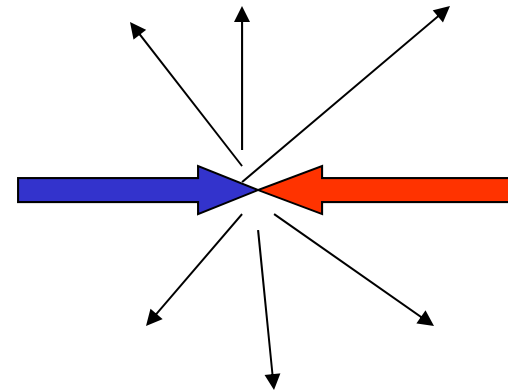
Pospešimo osnovne delce, pri trku se sprosti energija, ta se pretvori v materijo – delce, od katerih so nekateri neobstojni.

Dva načina trkanja:

Poskusi s fiksno tarčo

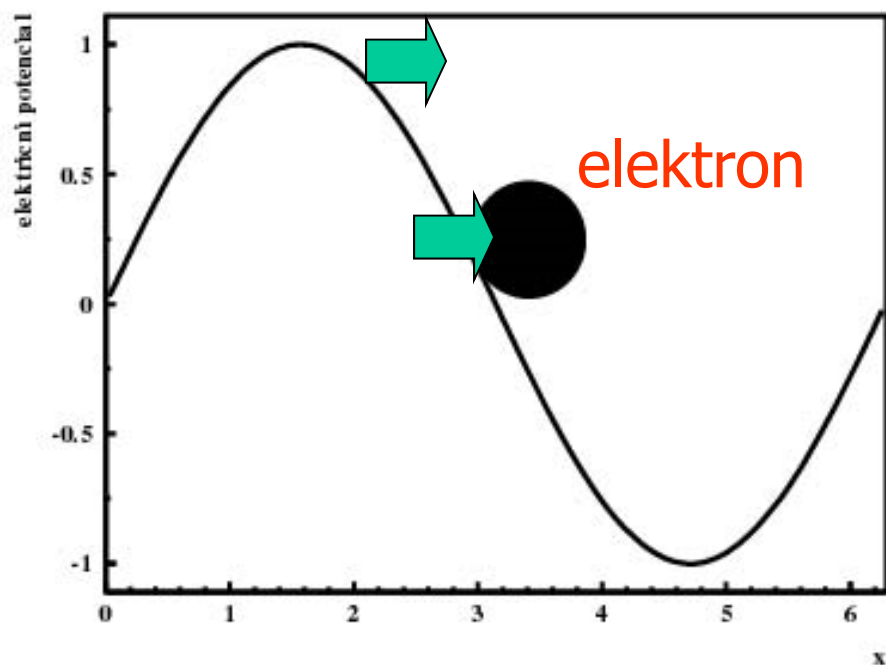


Trkalnik



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

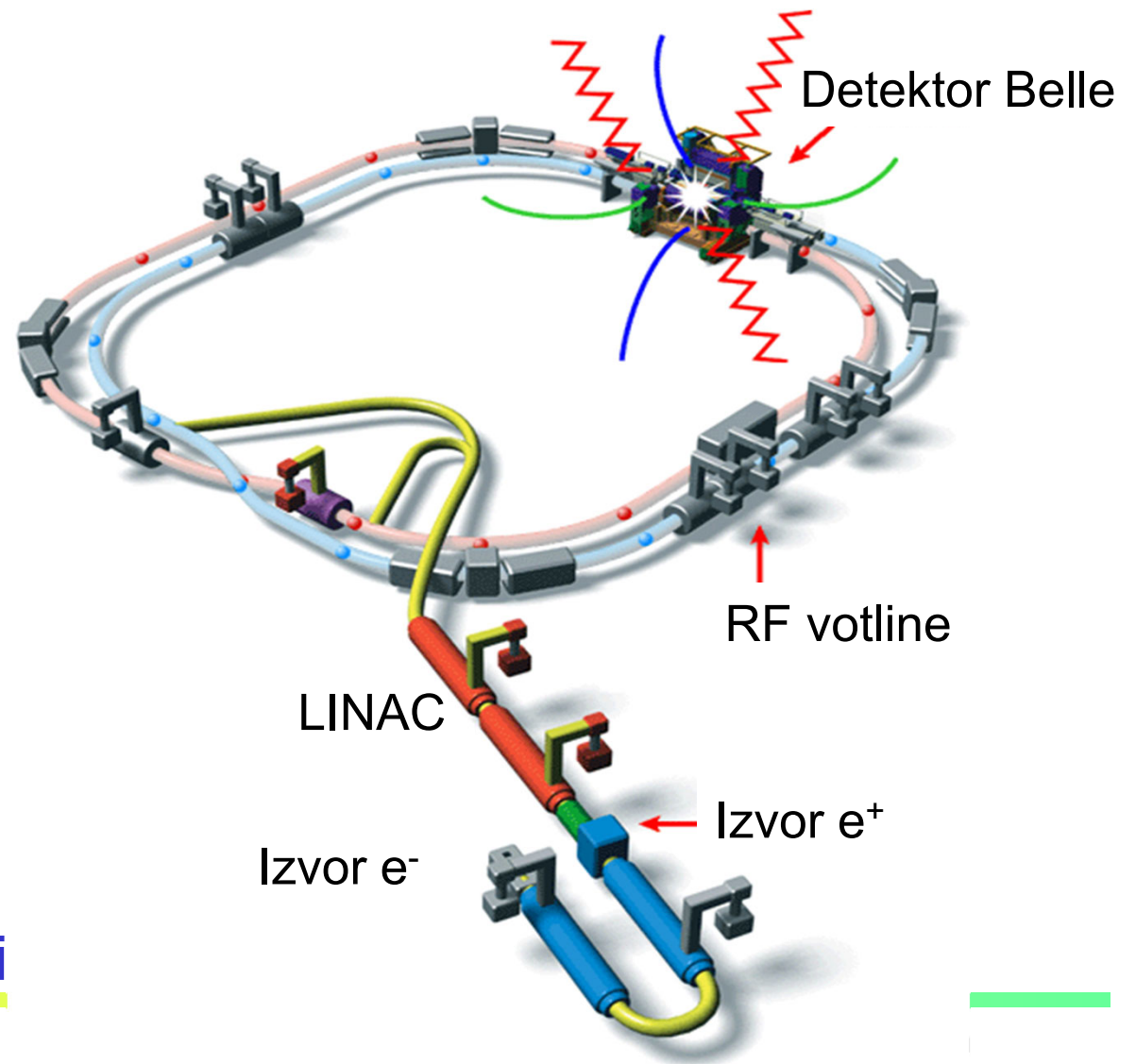


Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka

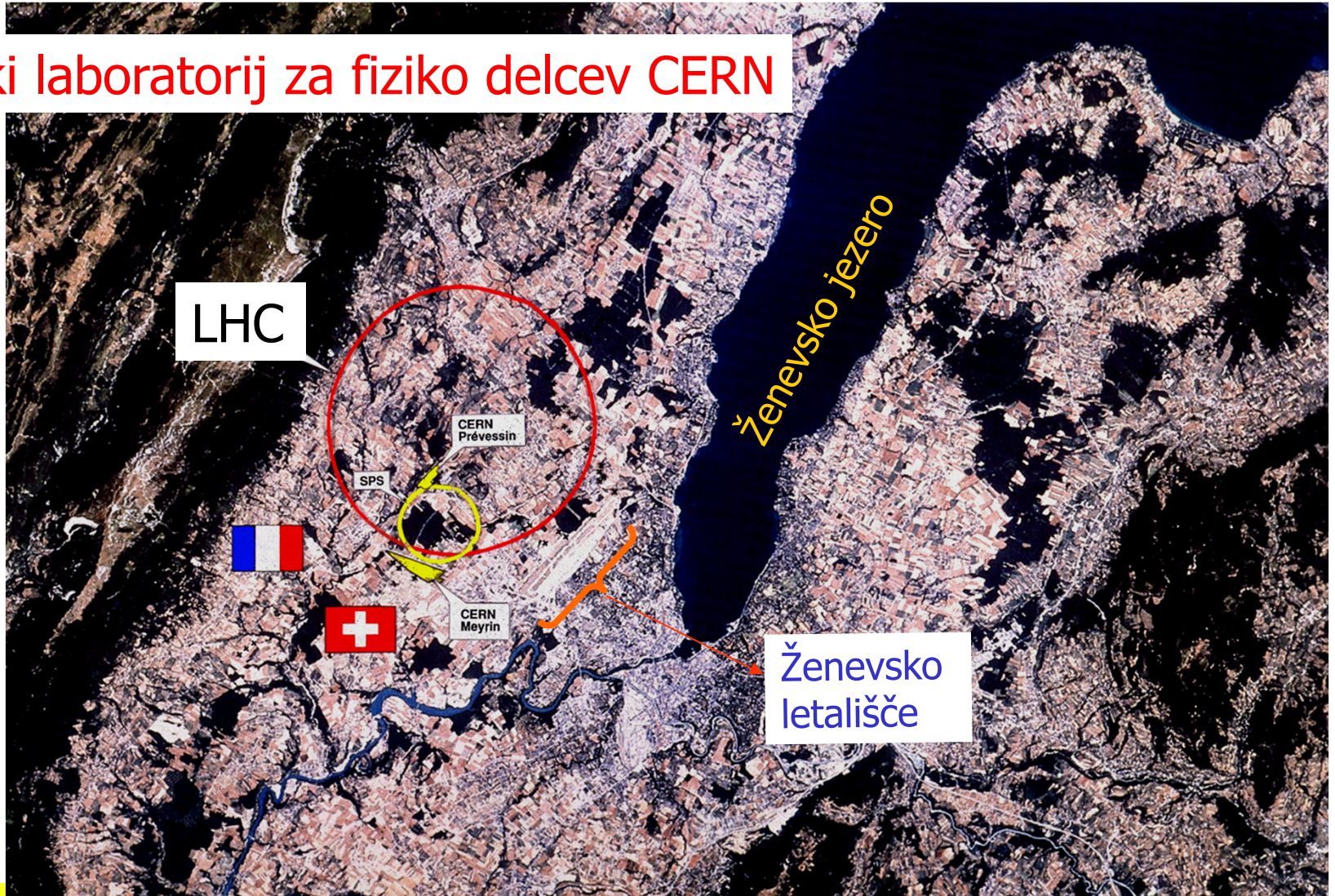


Del obroča trkalnika:
magneti in
pospeševalni elementi

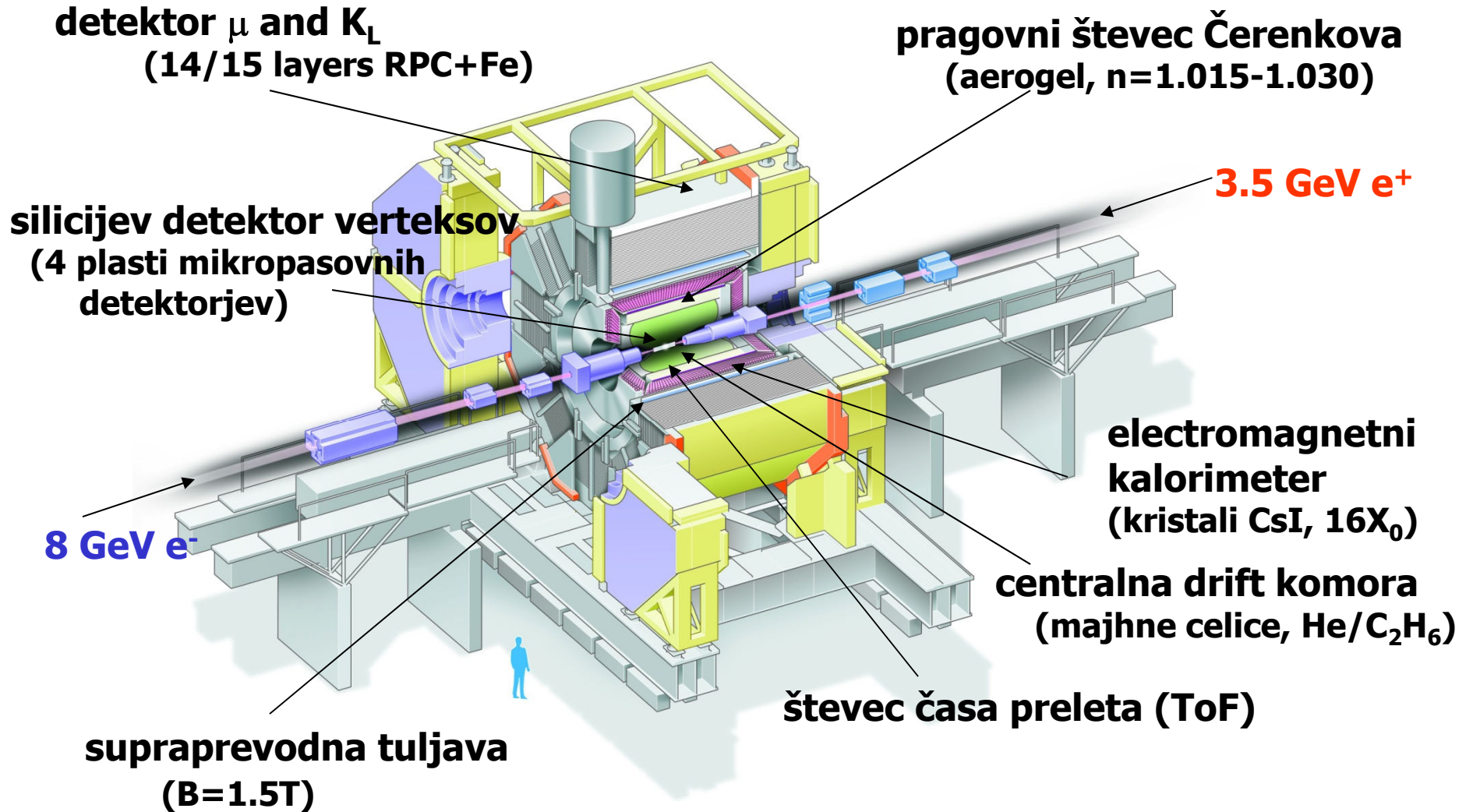


Na lovu za Higgsovimi delcem

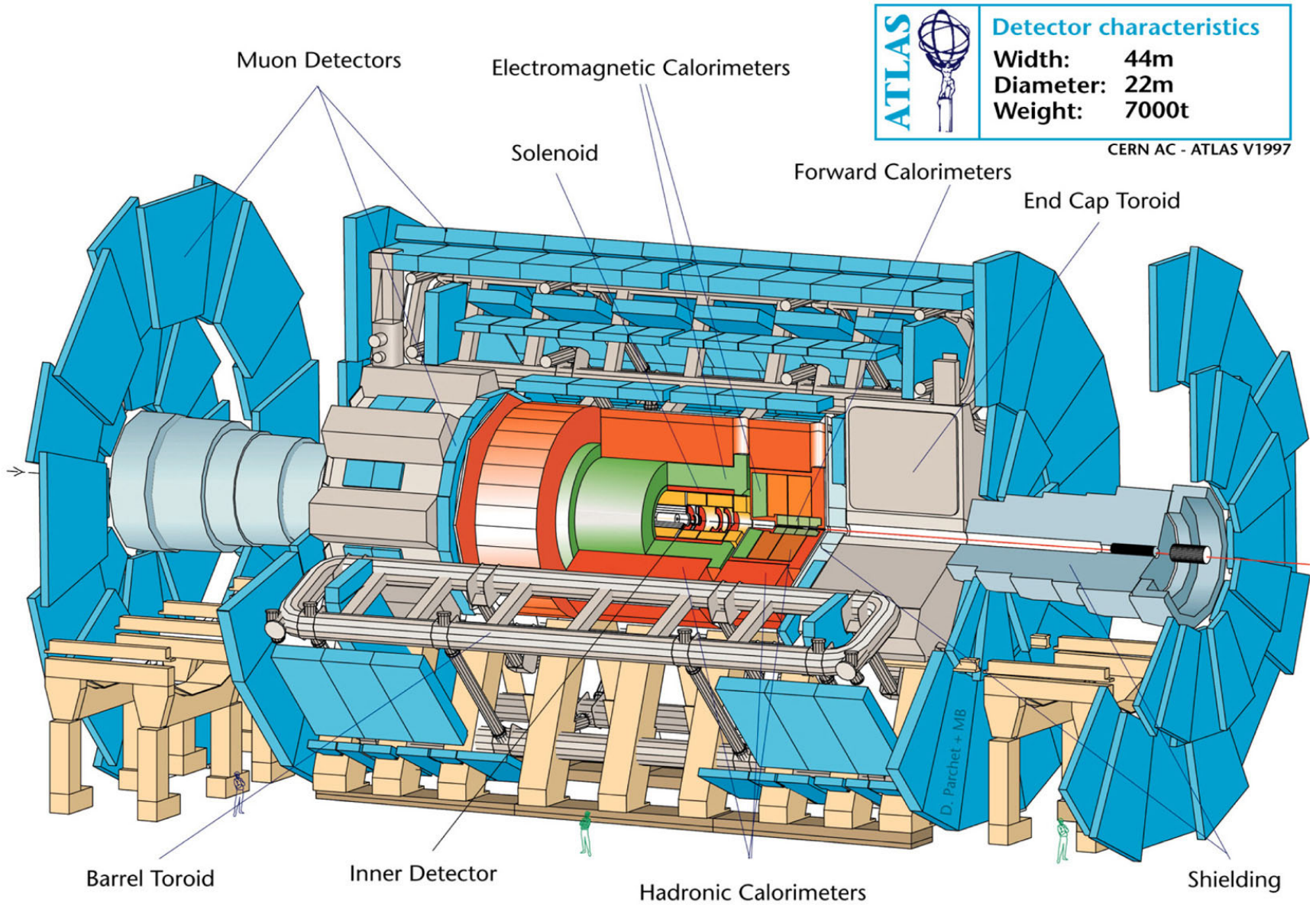
Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



Spektrometer Belle



Detektor ATLAS ob LHC



Peter Križan

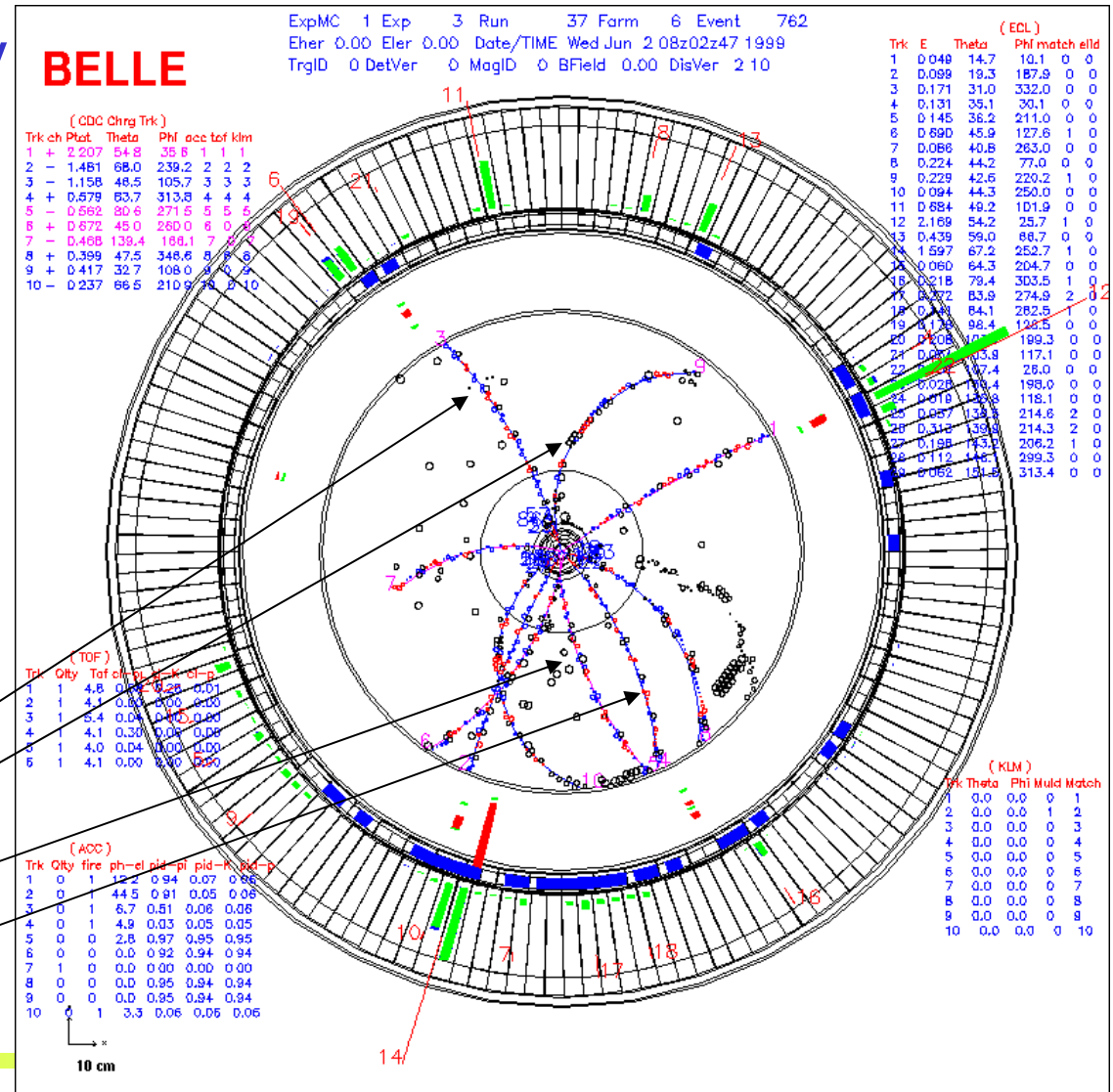
Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

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

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

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



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, μ, π, K, p)
- Izmerimo energijo visokoenergijskih fotonov γ

Kaj izmerimo z detektorjem? -2

Kako vemo, da je potekla spodnja reakcija?

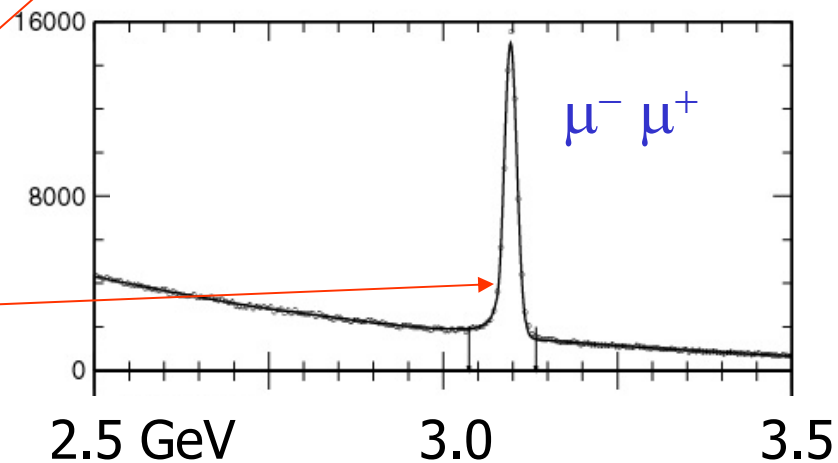
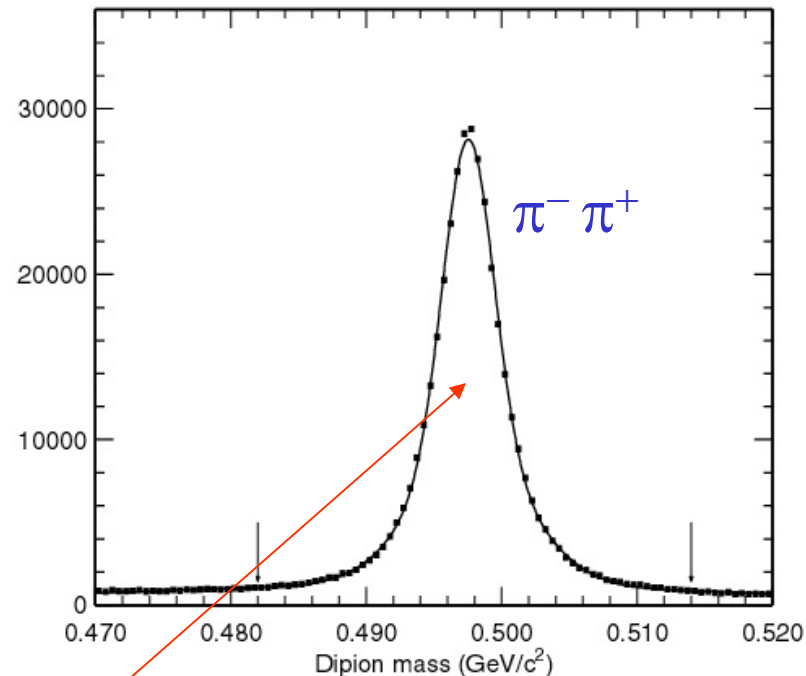


Za pare $\pi^- \pi^+$ in $\mu^- \mu^+$ izračunamo invariantno maso:

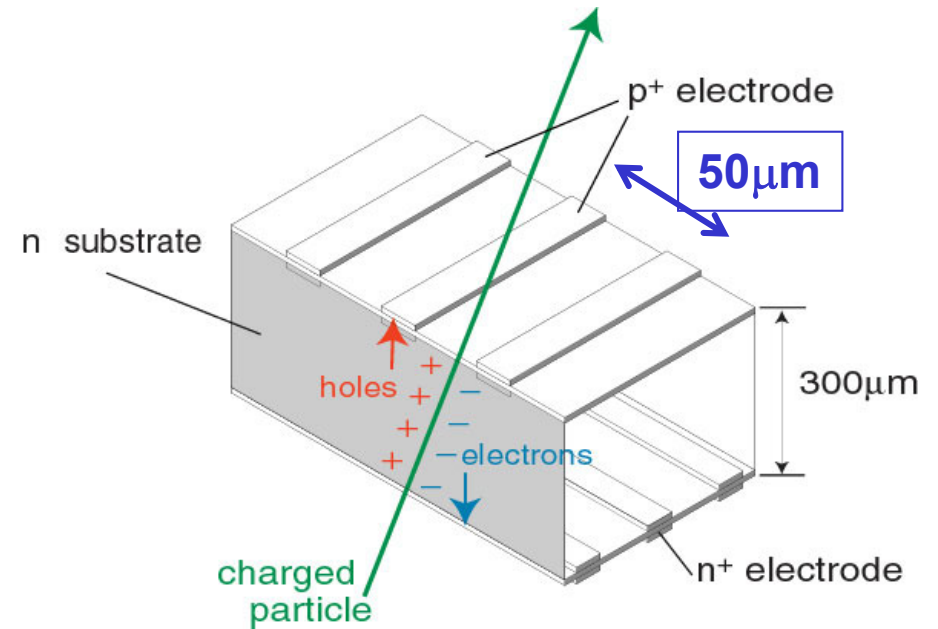
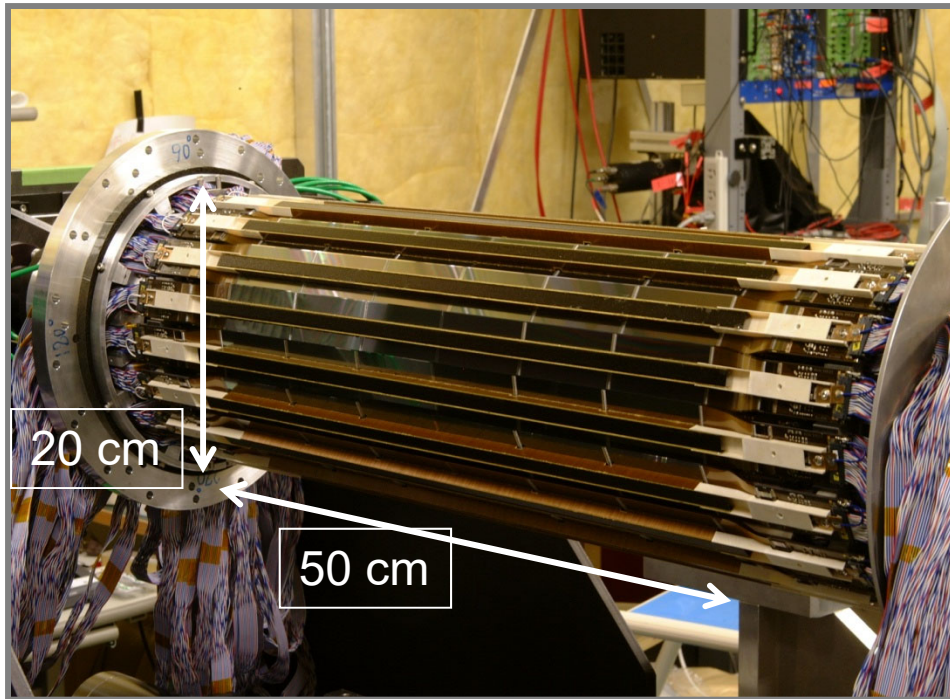
$$M^2 c^4 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

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

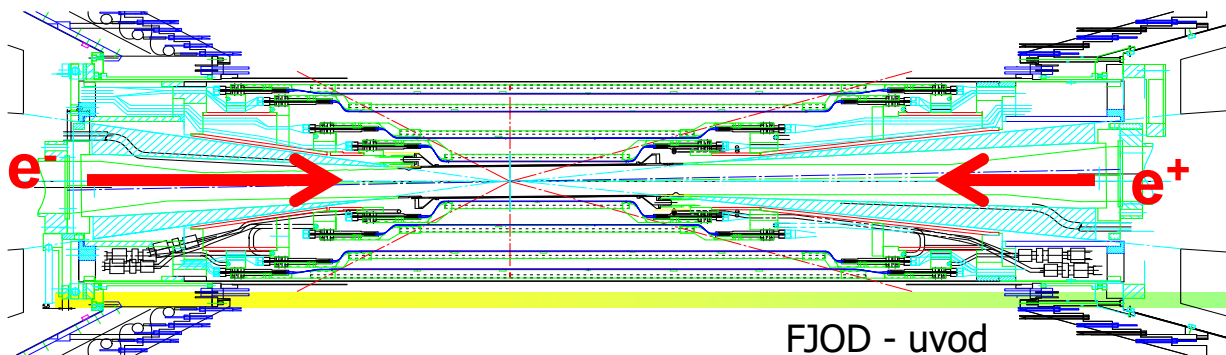
Ostalo: naključne kombinacije.



Silicijev detektor verteksov



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



1. avtor

FJOD - uvod

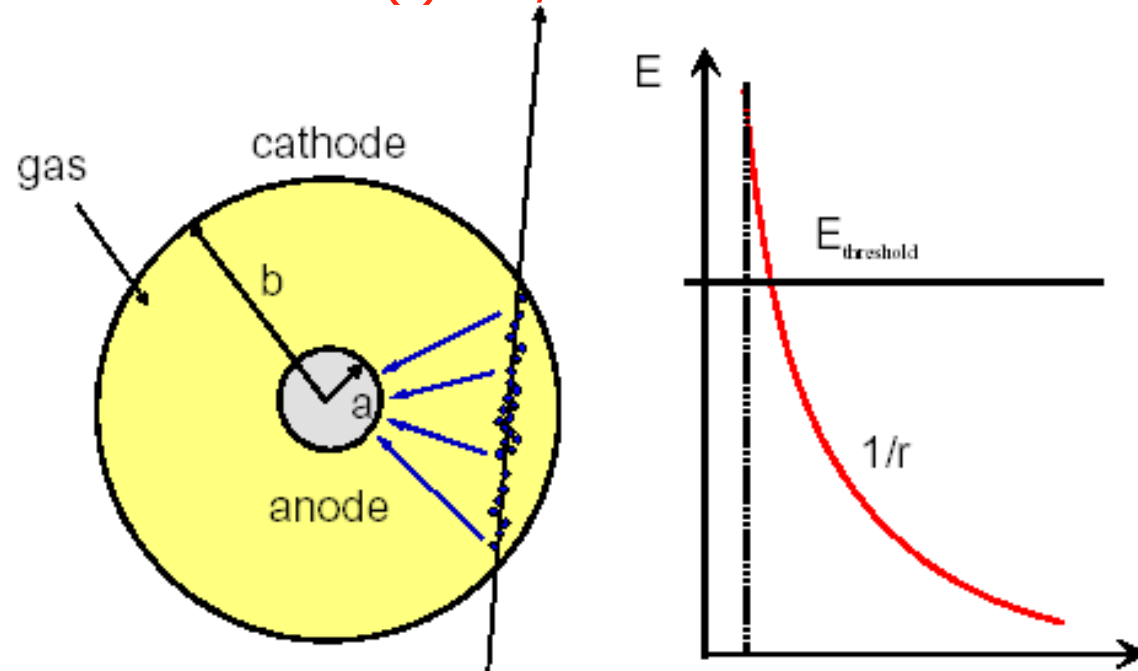
Peter Križan

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: $E = E(r) \propto 1/r$



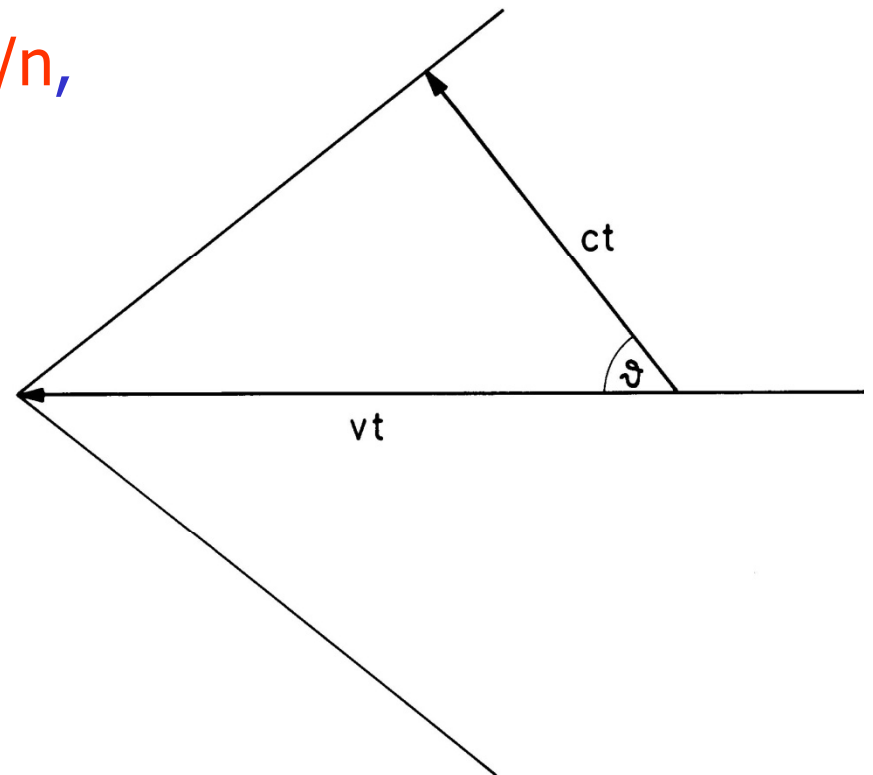
Če elektron na prosti pot l dobi dovolj energije ($eEl > E_{\text{ionizacija}}$), izbije pri trku z atomom elektron \rightarrow pomnoževanje

Sevanje delca, ki leti hitreje od svetlobne hitrosti v sredstvu

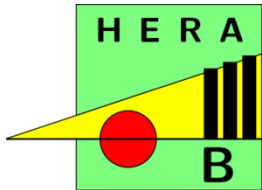
Nabiti delci s hitrostjo $v > c = c_0/n$, sevajo: sevanje Čerenkova*.

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

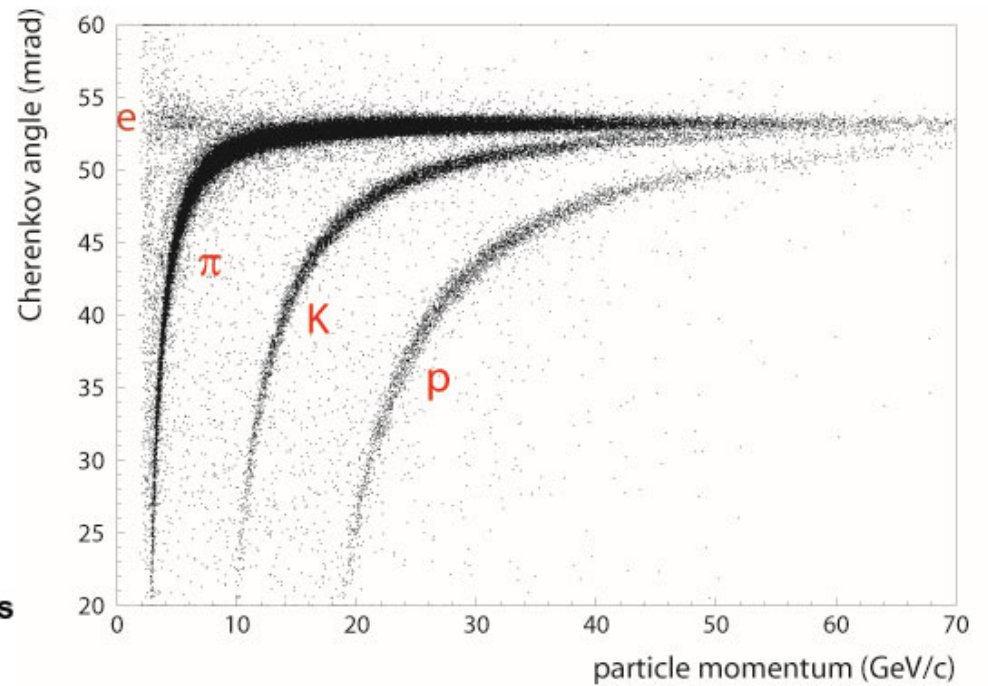
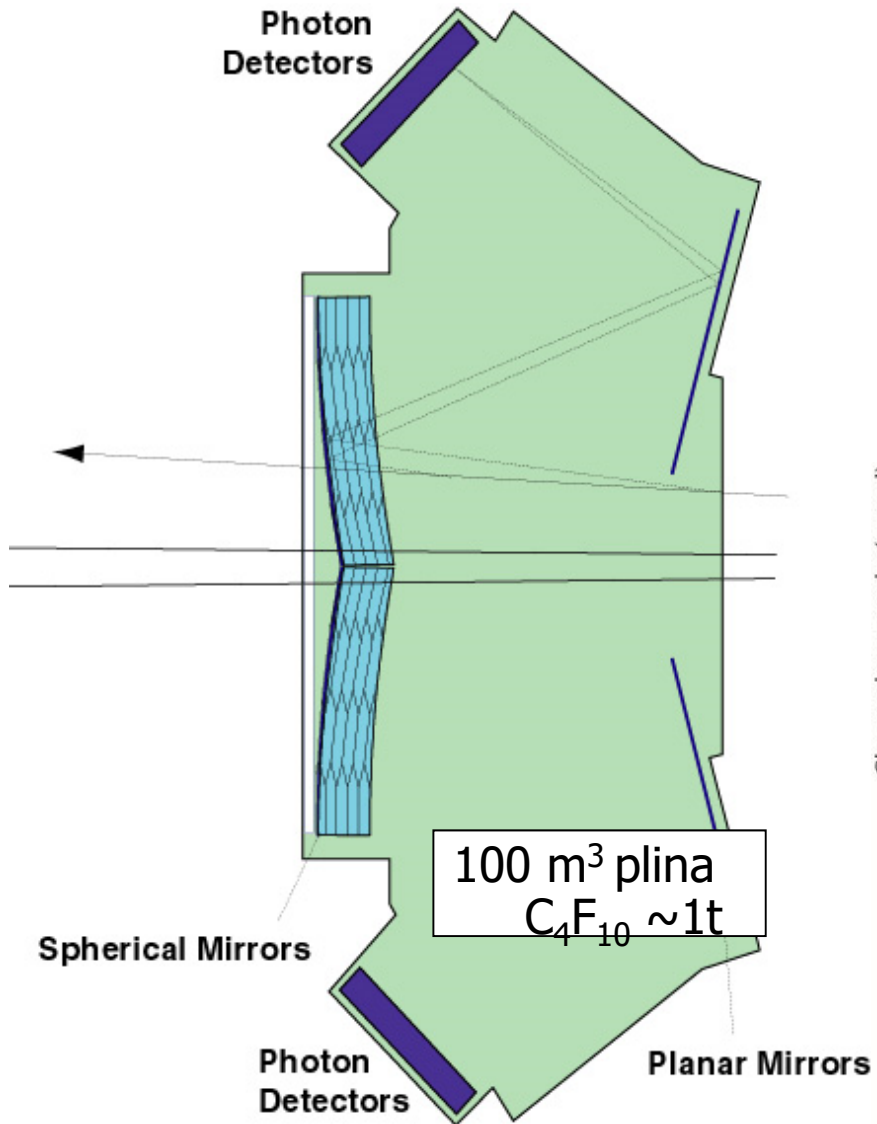
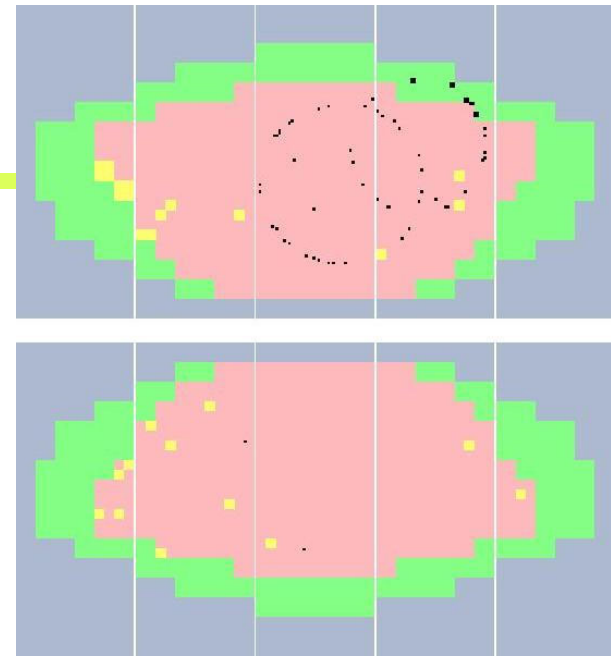
Iz kota, pod katerim je izsevana svetloba, lahko določimo hitrost delca.



*P. Čerenkov, Nobelova nagrada 1958



HERA-B RICH



Fizika jedra in osnovnih delcev na FMF



Literatura

Spletna stran teh predavanj je na:

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

Predavanja v glavnem sledijo knjigi:

- F. Halzen, A.D. Martin: Quarks and Leptons
- Teme iz jedrske fizike: 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

Seminarji, magisterij, prakse

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

- Seminarje
- Magistrska dela
- Študentsko delo

Oglasite se pri meni, ali pa pogledjte na spletne strani, da boste videli, kaj počnemo:

<https://faime.ijs.si/>

<https://photodetectors.ijs.si/>

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