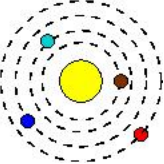
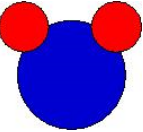
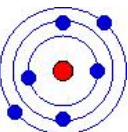
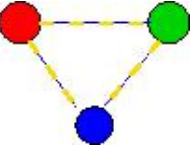





Moderna fizika

Uvod

Peter Križan

DELCI in SILE po nadstropjih					
Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
10^{21}	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
10^{14}	galaksije zvezde planeti				astronom, astrofizik
1					
10^{-8}	molekule		elektromagnetna	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:

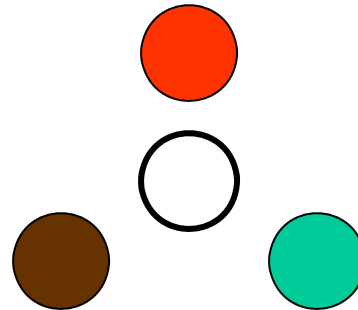
- Preprost
- Pravilen

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:

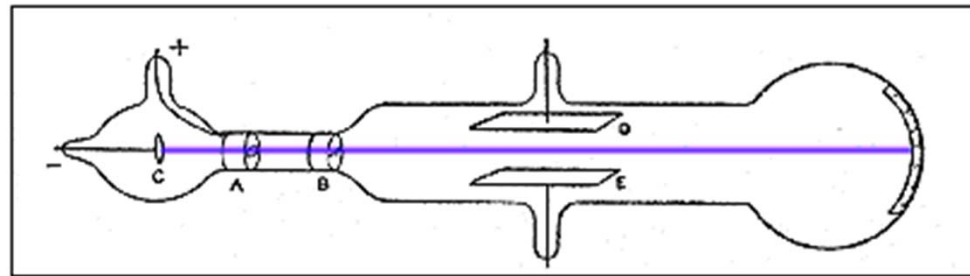
	IA																					0
1	1 H	IIA																				2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne					
3	11 Na	12 Mg	III B	IV B	VB	VIB	VIB	VII				IB	IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 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)

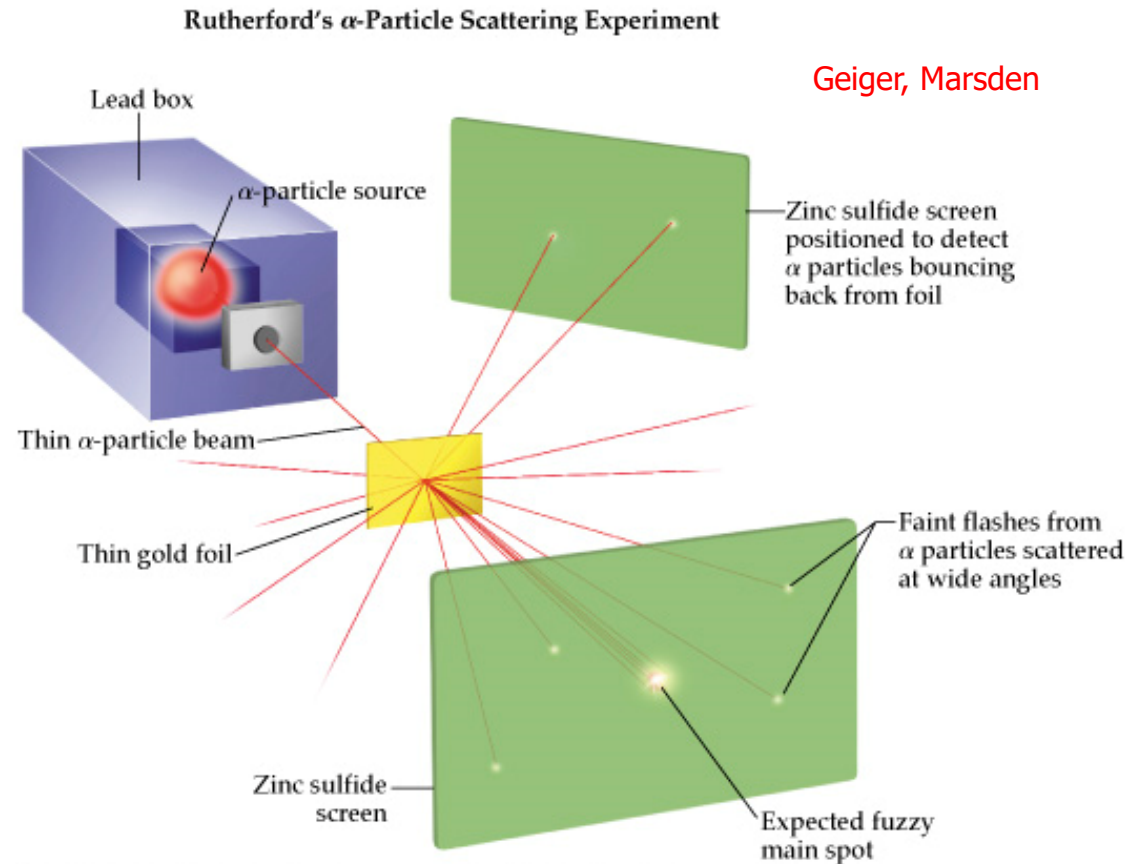
L. de Broglie: $\lambda_B = hc / E_{\text{kin}}$ (NN 1929)

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

Sipanje delcev α na Au foliji

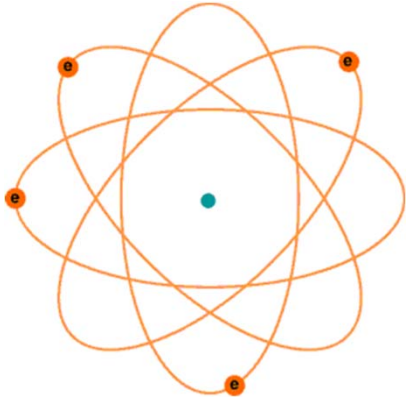


Rutherford, Geiger



Pozitivni naboj enakomerno porazdeljen po atomu? \rightarrow vsi delci α se morajo sipati 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

$$m_{\pi} c^2 \sim 0,1 \text{ GeV}$$

(NN 1949)

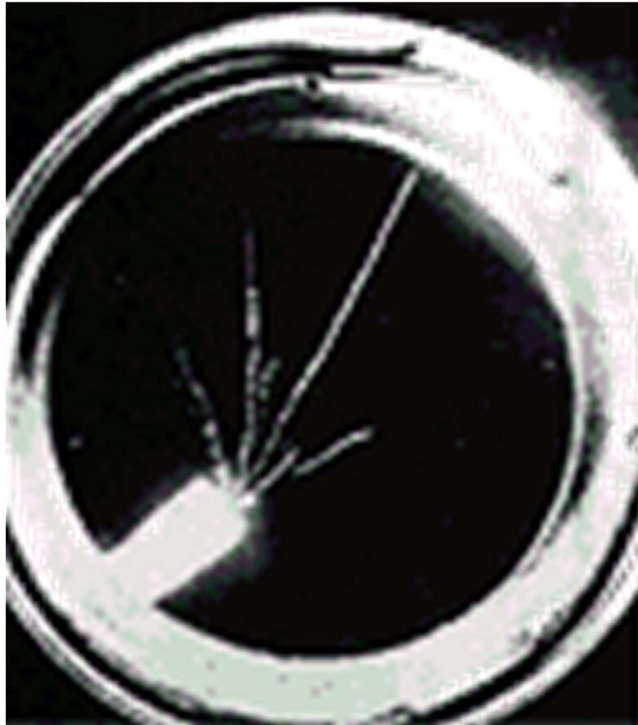
$$V(r) \propto \frac{e^{-r/a}}{r}$$

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

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

a : doseg interakcije

Detekcija delcev



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').

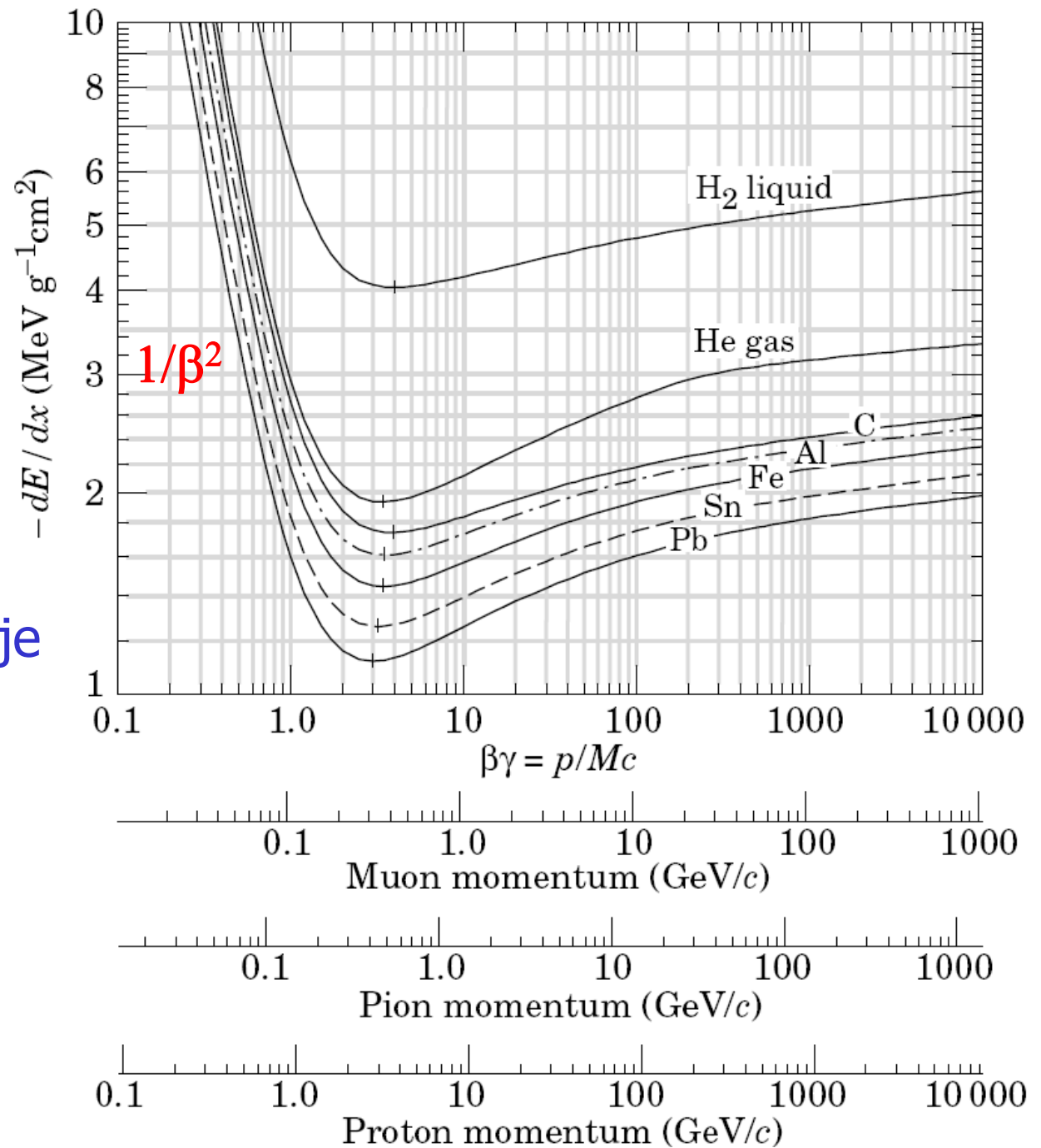
Energijske izgube na enoto poti: formula Betheja in Blocha

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

Detekcija delcev 2

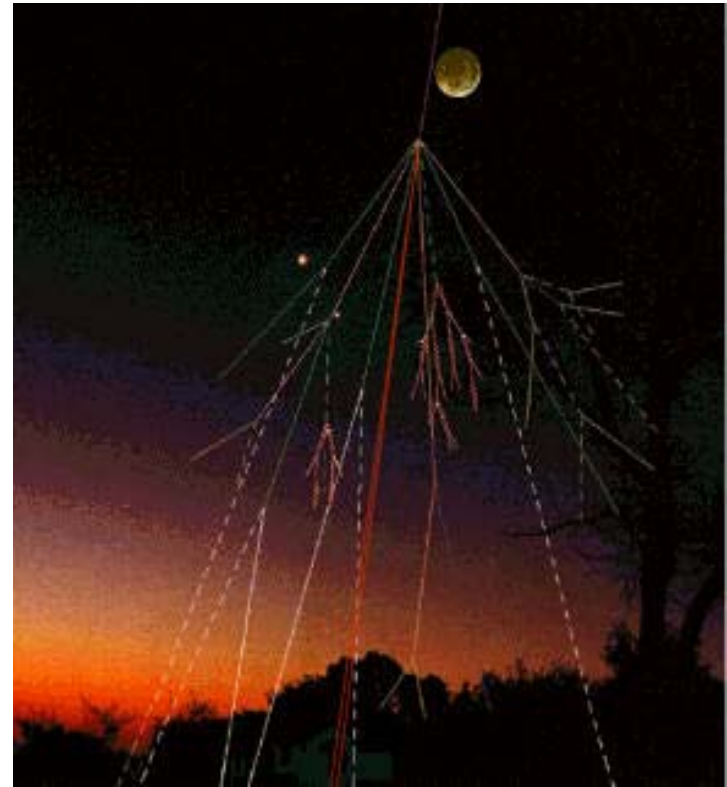
Energijske izgube na enoto poti: formula Betheja in Blocha

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



Izvori delcev

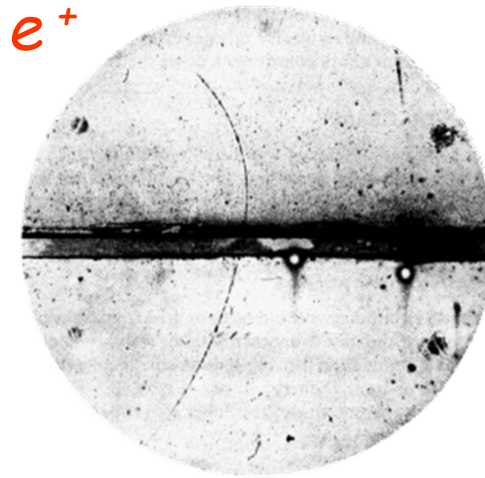
- Radioaktivni izotopi
- Kozmični delci
- Pospeševalniki



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

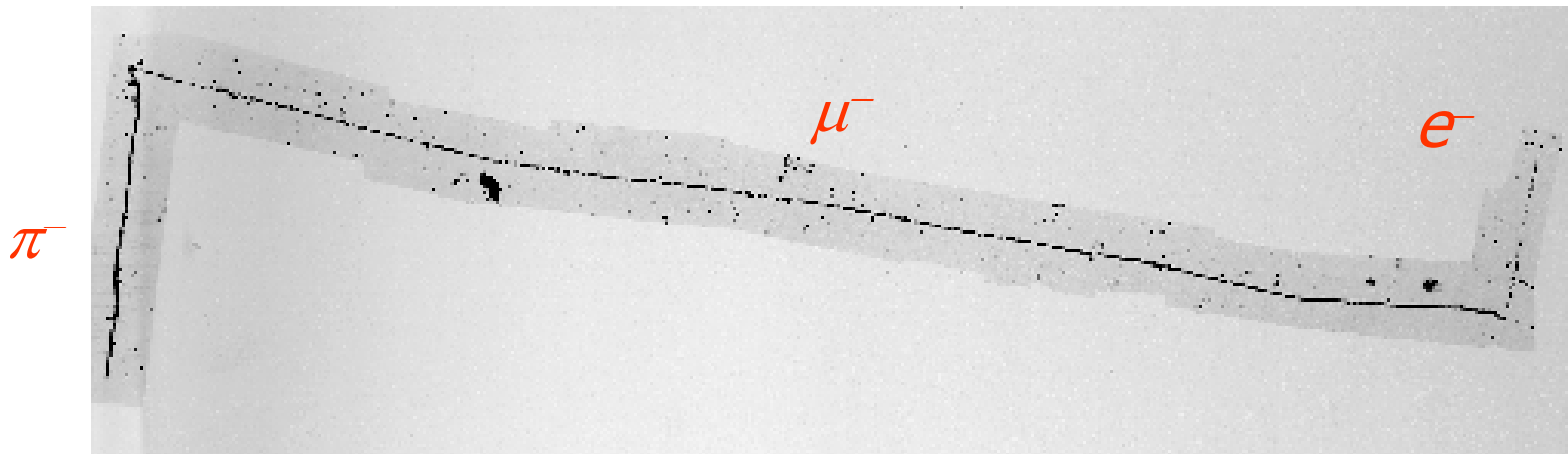


C. Anderson (1936):

- 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**)

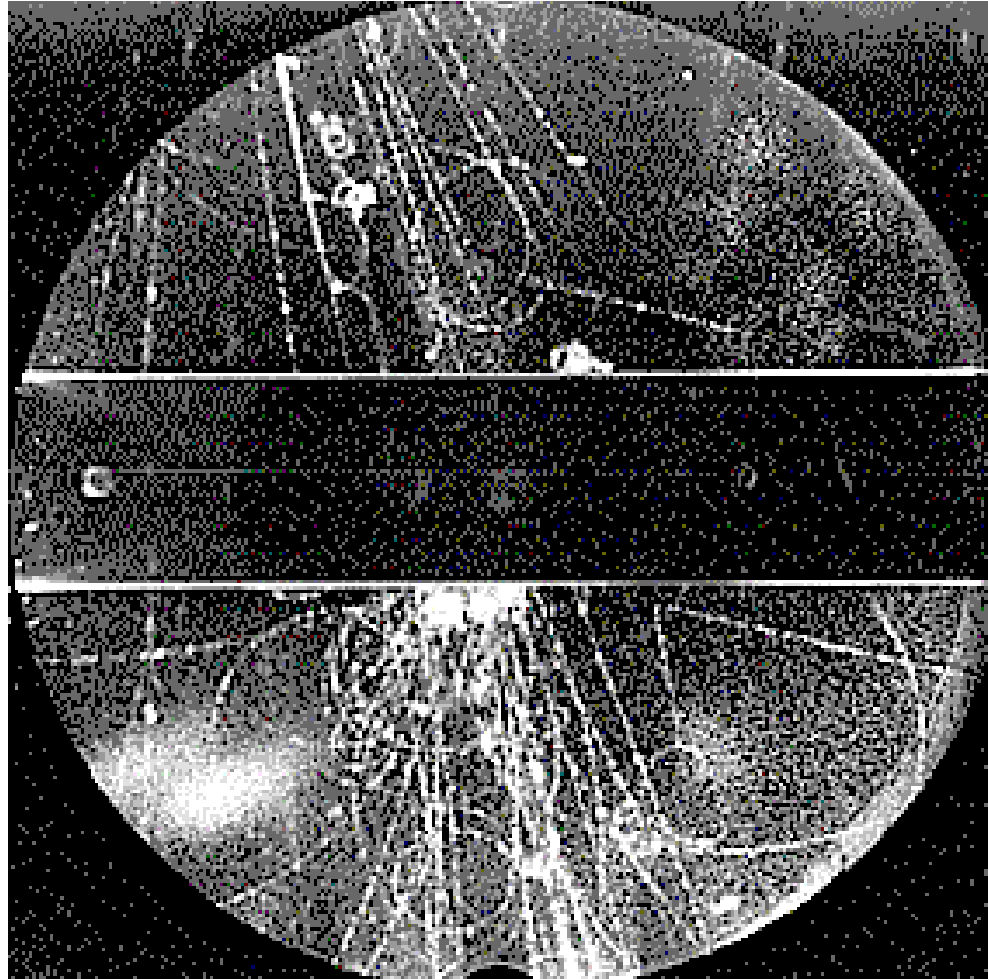
Odkritje piona

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



Pravilno zaporedje: počasnejši delci izgubljajo več energije → puščajo debelejšo sled

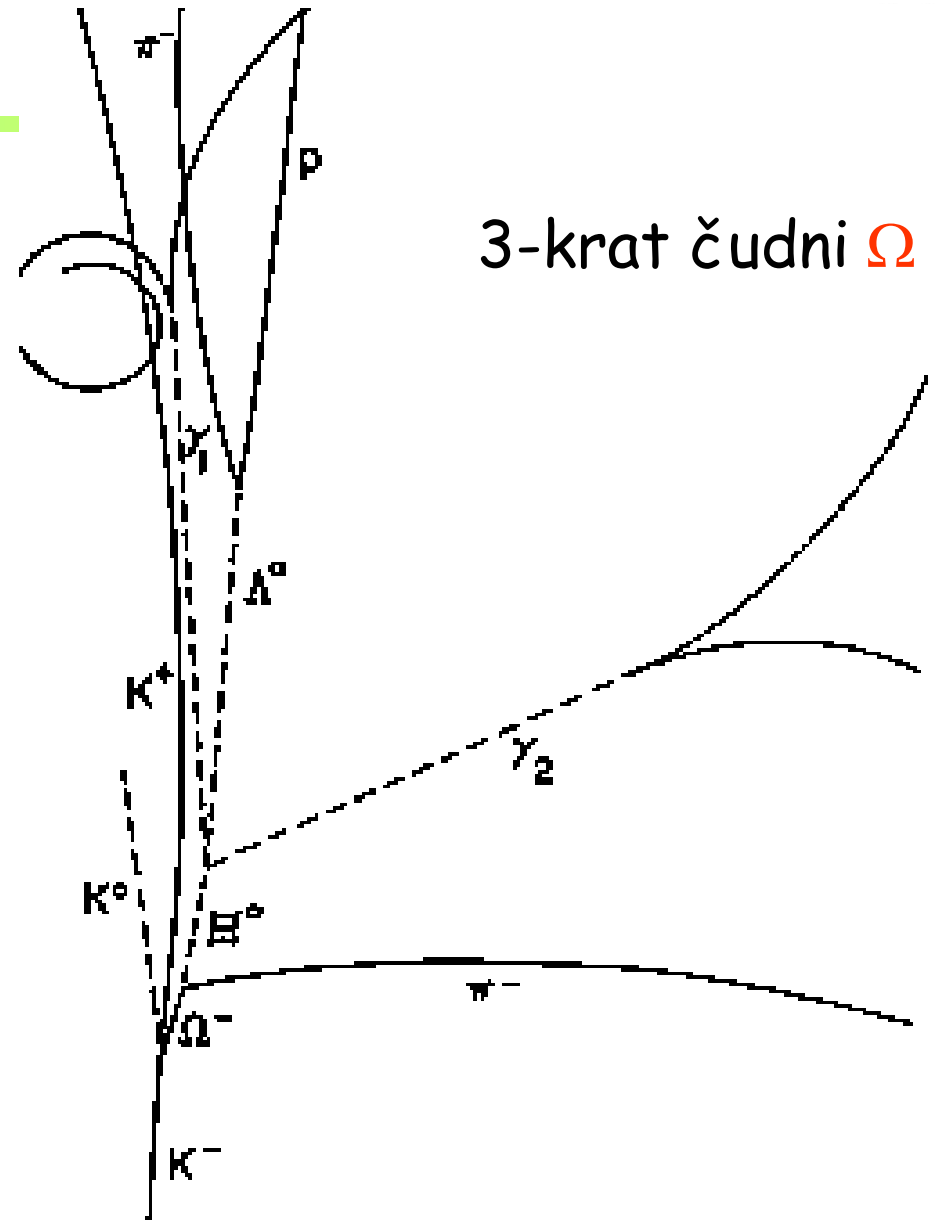
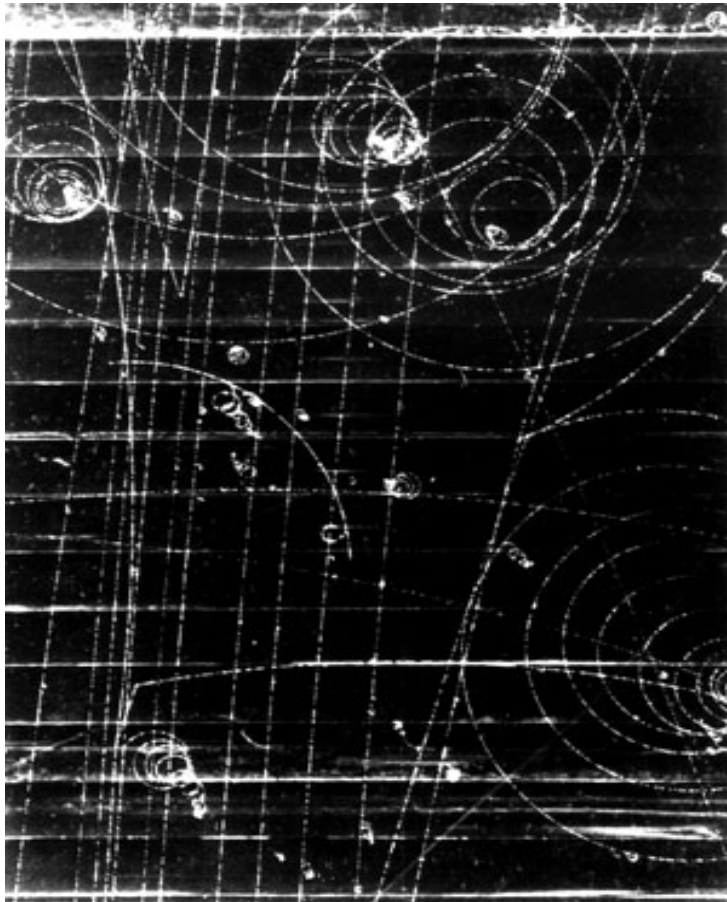
Odkritje kaonov



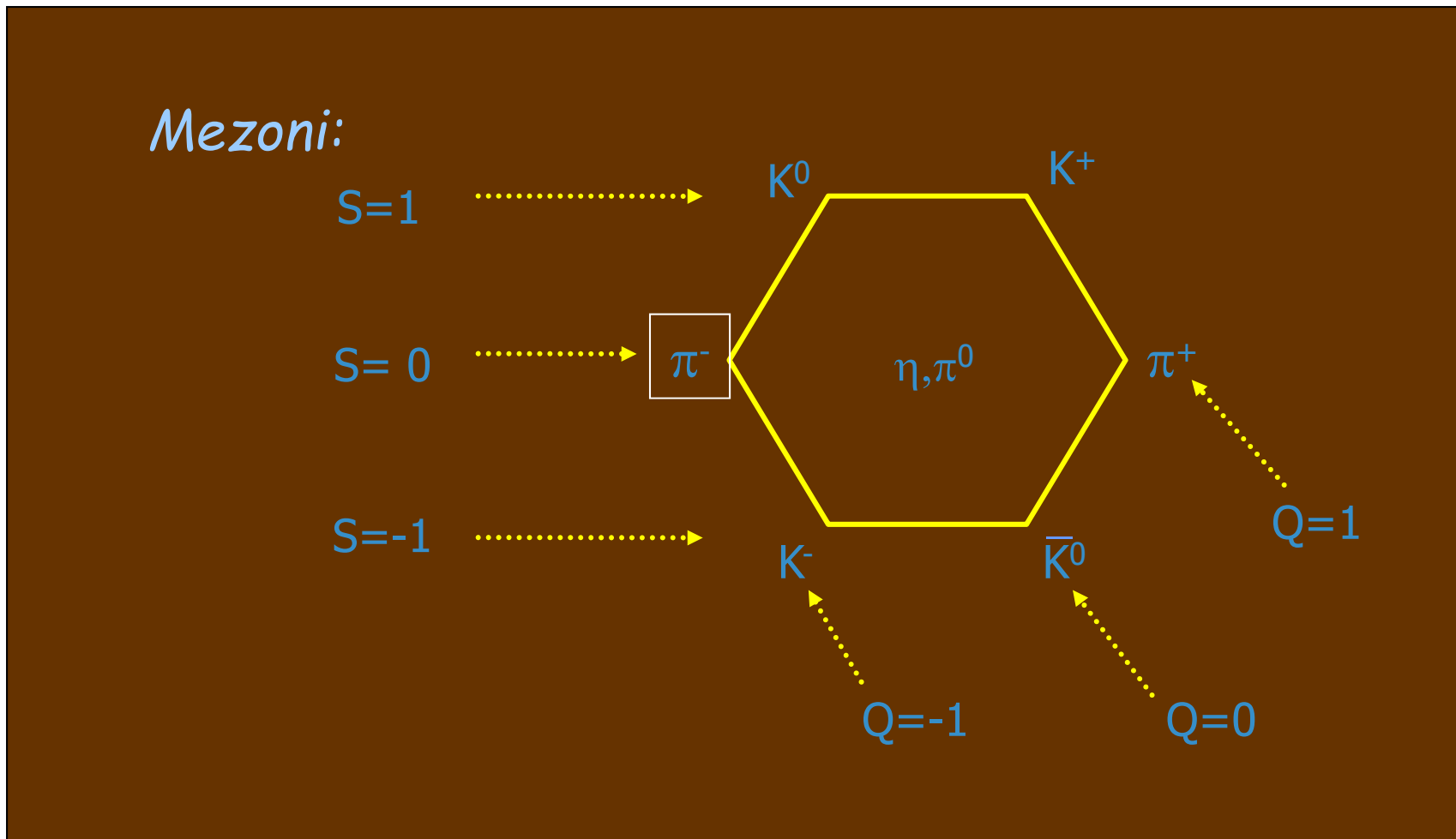
svinčena plošča



Rochester, Butler (1947)

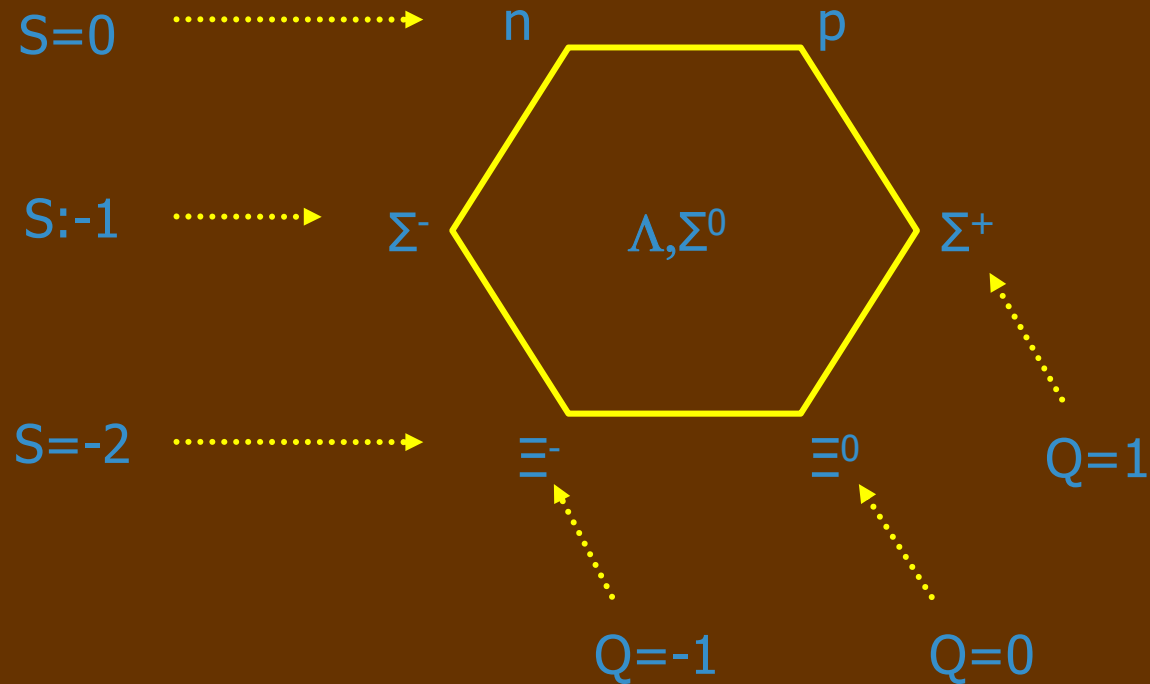


Periodni sistem: naboj in čudnost



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: $Q=+2/3$

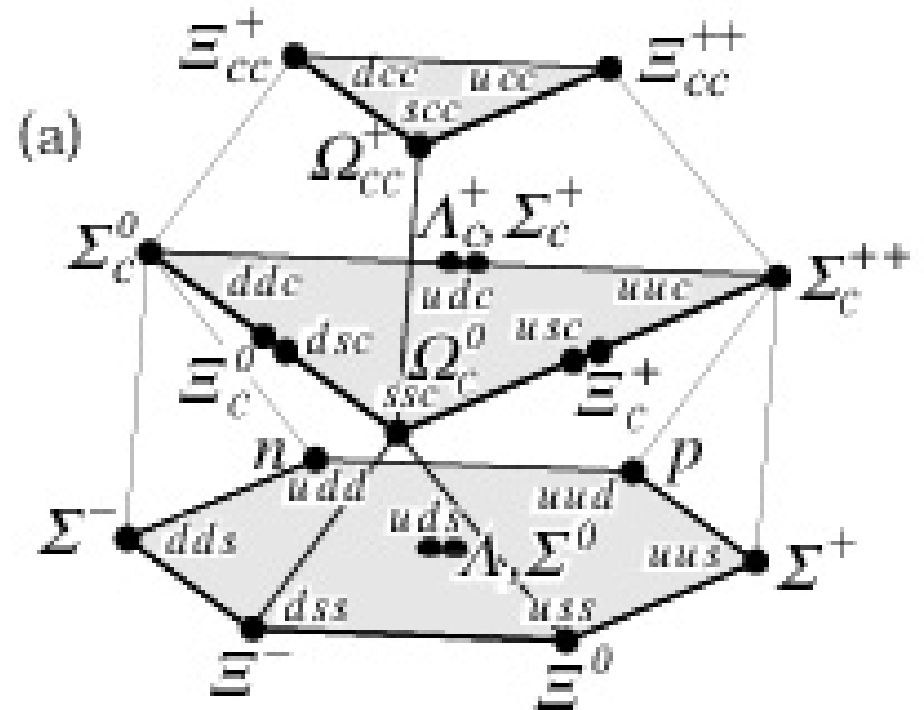
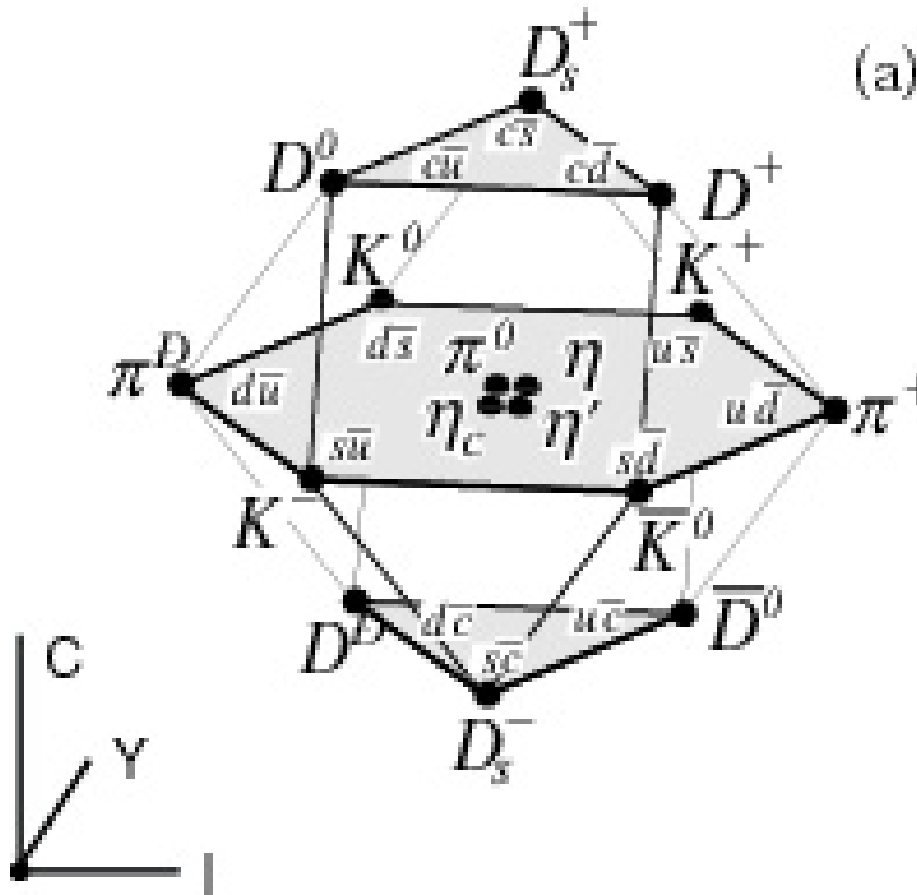
d: $Q=-1/3$

s: $Q=-1/3$

Hadroni: sestavljeni iz kvarkov

Mezoni: kvark + anti-kvark

barioni: trije kvarki

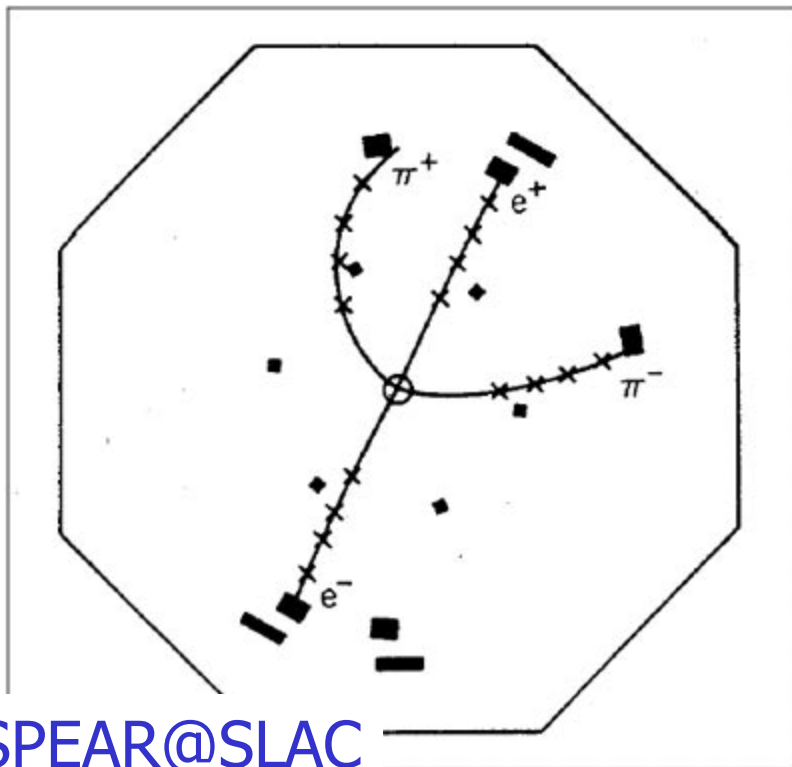


Še več kvarkov: najprej kvark c

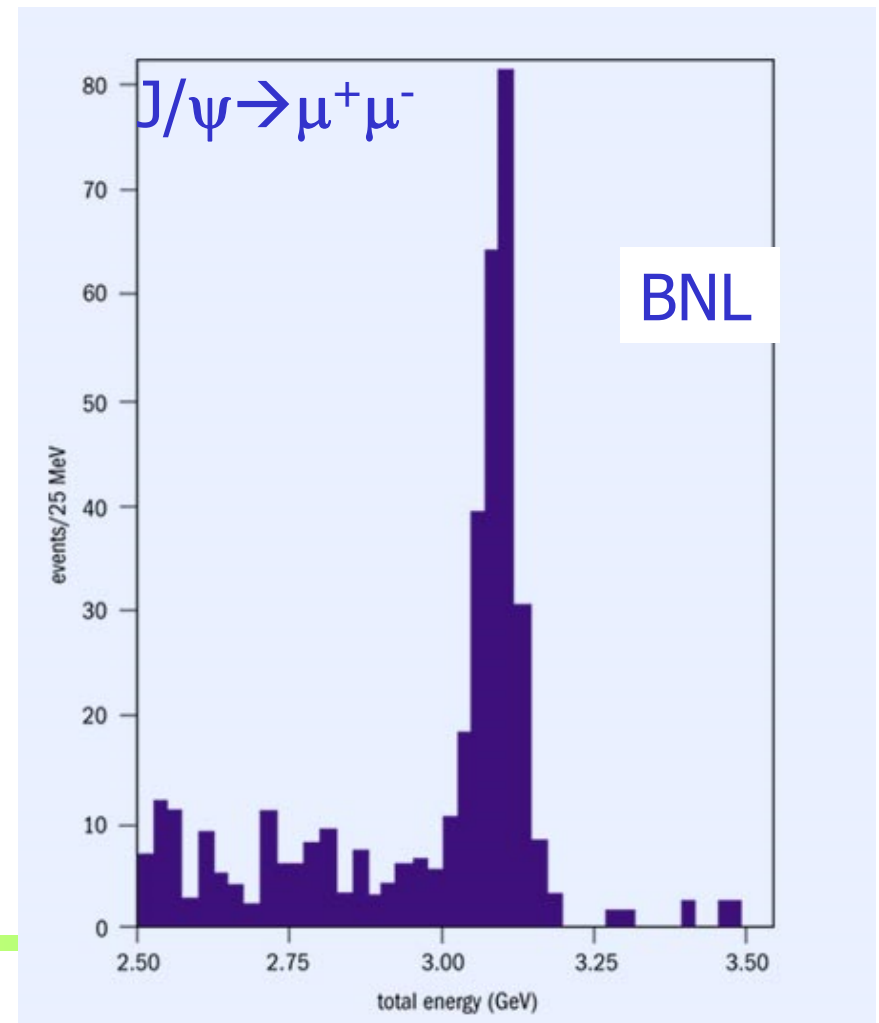
November 1974: odkritje delca J/ψ – vezano stanje **kvarka c** in **anti-kvarka c** pri $3,1 \text{ GeV}/c^2$ (\rightarrow NN Sam Ting in Burt Richter)

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

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



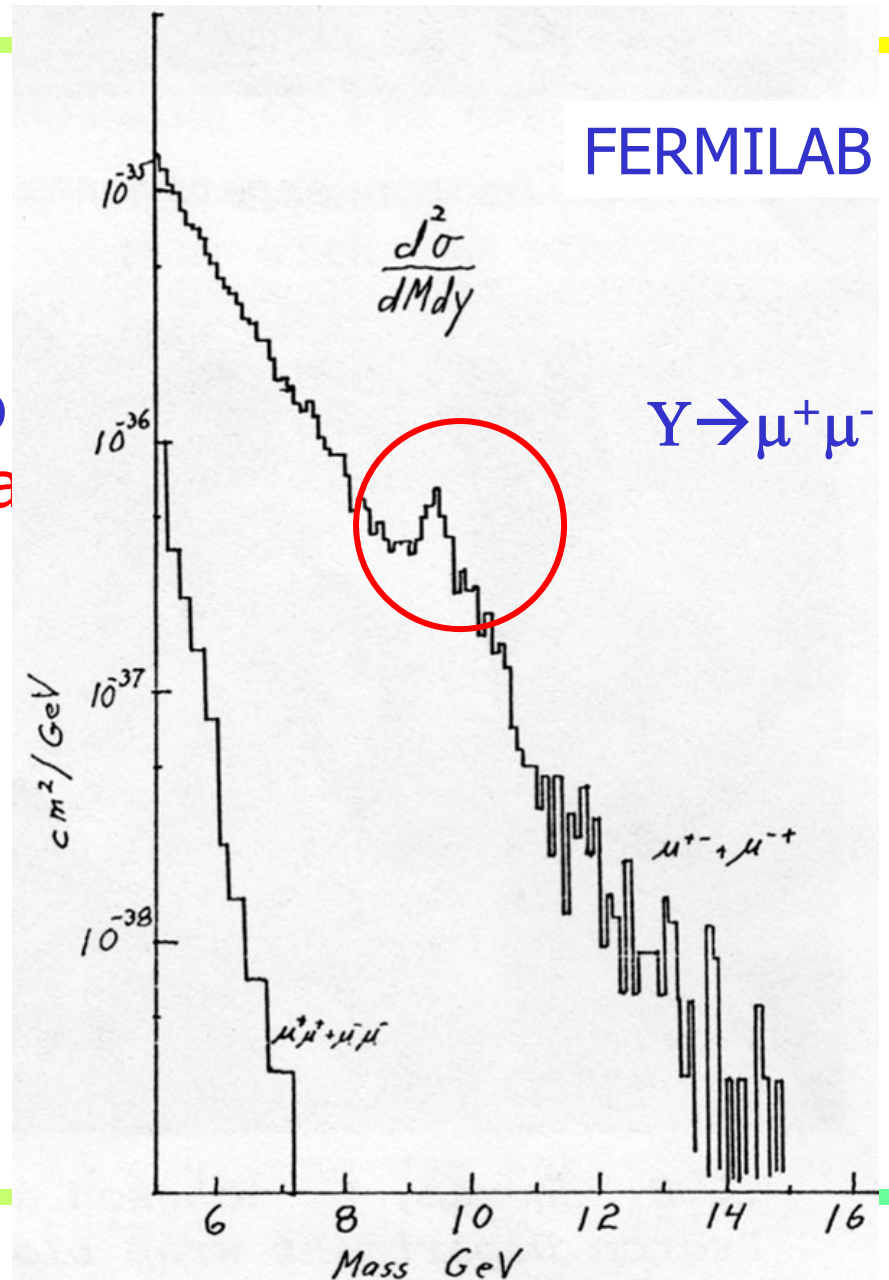
SPEAR@SLAC



Še več kvarkov: nato kvark b

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

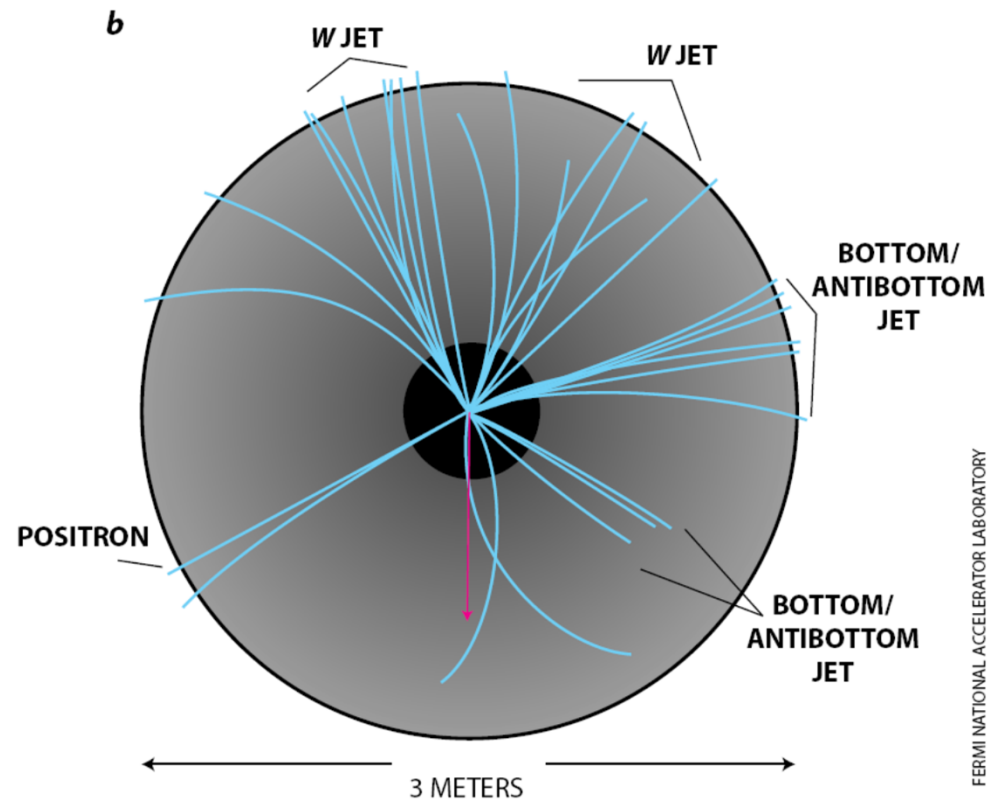
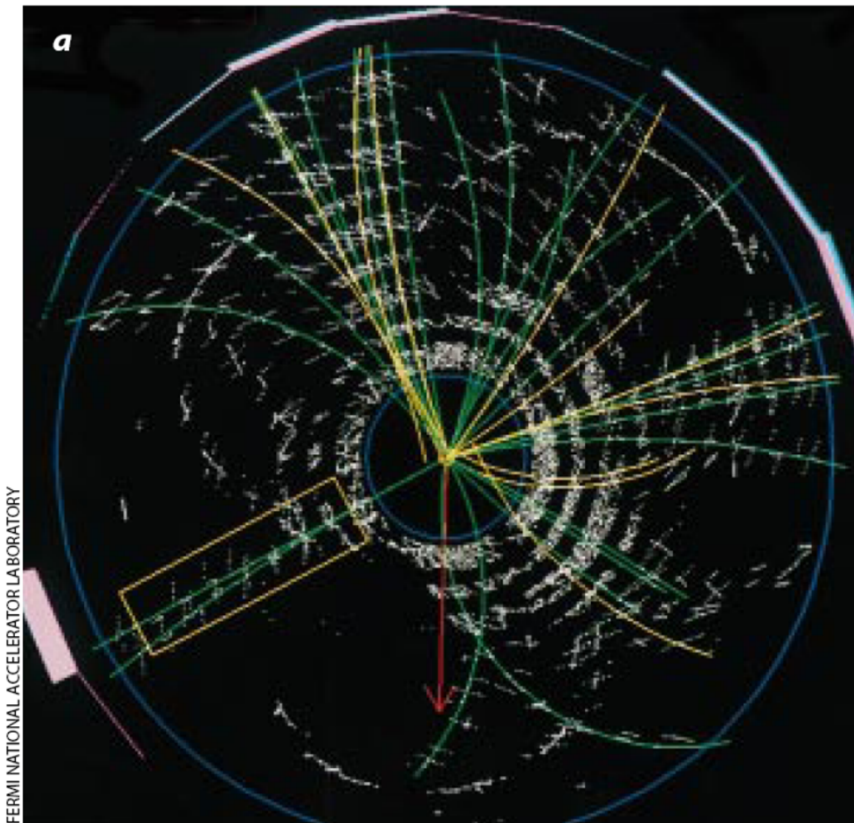
→ Masa kvarka $b \sim 5 \text{ GeV}/c^2$



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

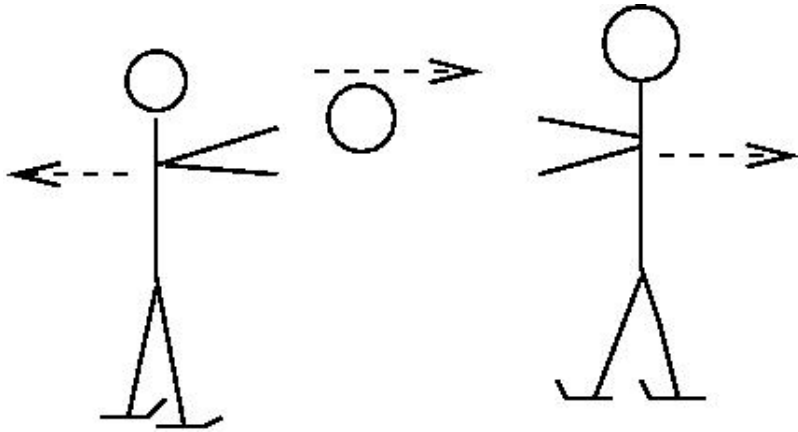
Standardni model

Standardni model:

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

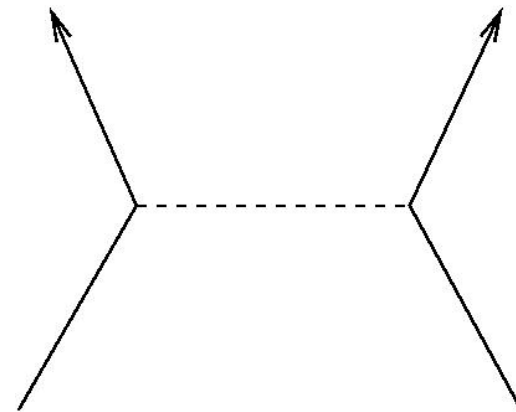
- delec, ki poskrbi za maso vseh ostalih (Higgs)

Sile med osnovnimi delci: izmenjava nosilcev sile



Drsalca 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^- , 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

Barioni in mezoni: vezana stanja kvarkov in anti-kvarkov

Barioni: proton: uud , nevtron: udd

Mezoni:	masa
π^+ : 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}	$1/2 m_p$
ϕ : kvark s + antikvark \bar{s}	$1.1 m_p$
J/ψ : 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:

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

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

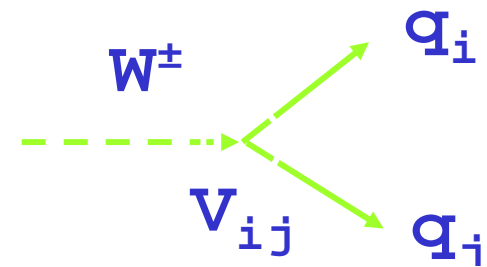
$t \leftrightarrow d, t \leftrightarrow s, t \leftrightarrow b$

Vsi prehodi niso enako verjetni!

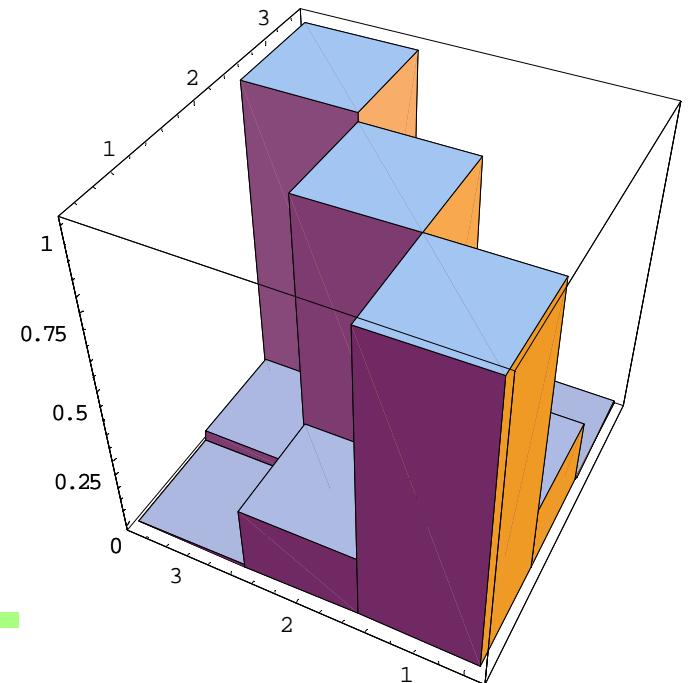
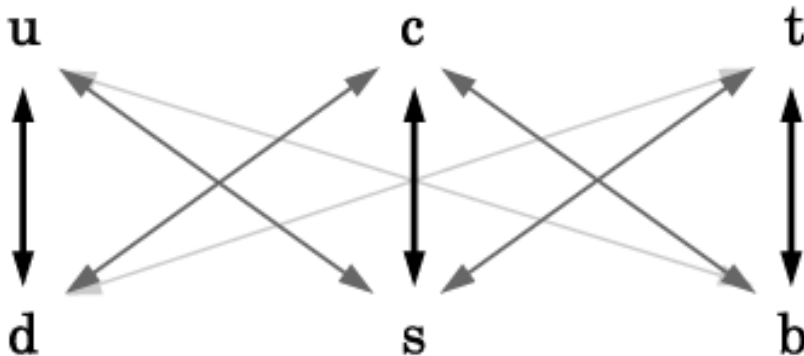
Matrika CKM

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

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



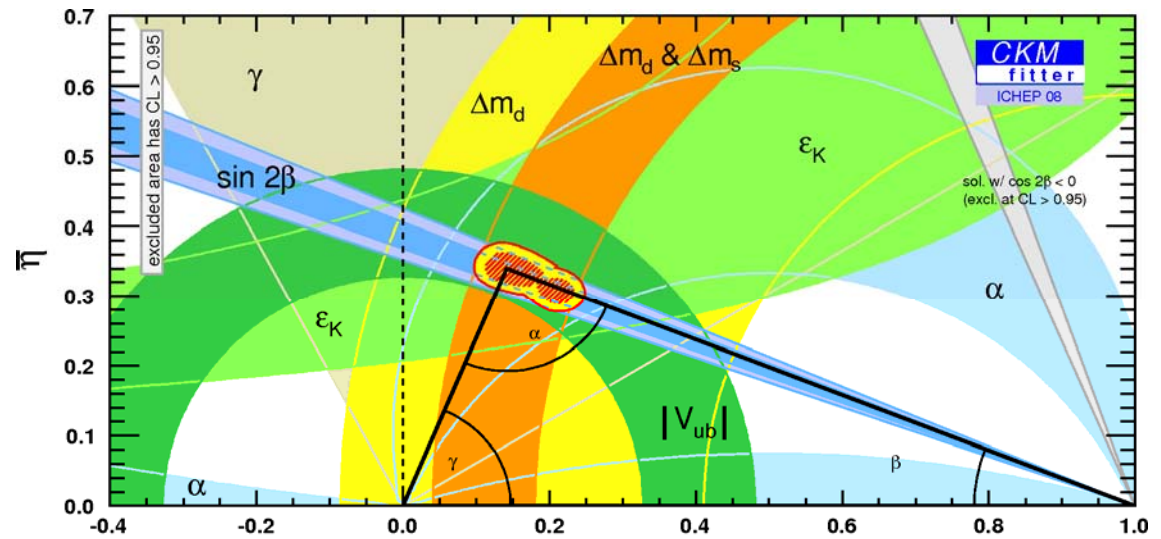
Prehodi med kvarki iste družine so bistveno bolj verjetni (=debelejše črte)



Kršitve simetrije med delci in anti delci (CP)

Kompleksnost matrike CKM \rightarrow kršitev simetrije CP

Razlika med delci in antidelci, kot smo jo izmerili s spektrometroma Belle in BaBar, se ujema z napovedjo japonskih fizikov M. Kobayashija in T. Maskawe



Nobelova nagrada 2008



Meritve različnih parametrov Standardnega modela potrjujejo napoved Kobayashija in Maskawe

Ohranitveni zakoni

Pri vseh (do sedaj znanih) interakcijah se ohranjajo:

- četverec energije in 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)*

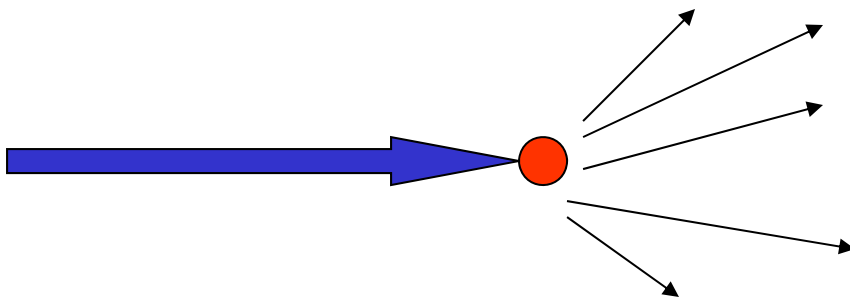
* razen pri propagaciji nevtrinov

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

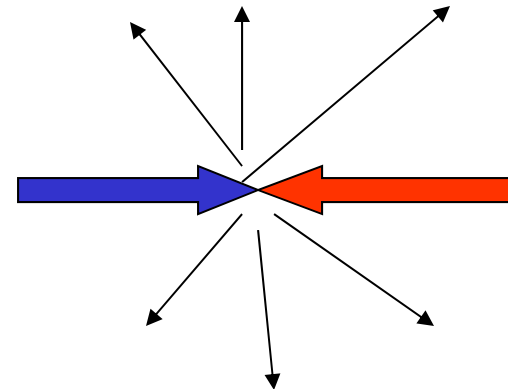
Pospešimo osnovne delce, pri trku se sprosti energija, ta se pretvori v materijo – delce, od katerih so nekateri neobstojni.

Dva načina trkanja:

Poskusi s fiksno tarčo

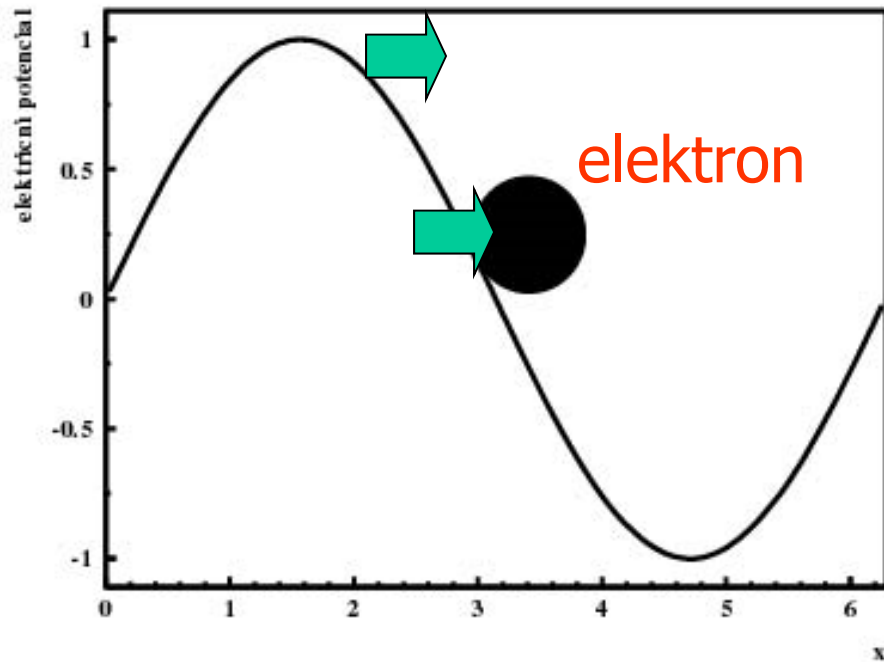


Trkalnik



Kako pospešujemo nabite delce?

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

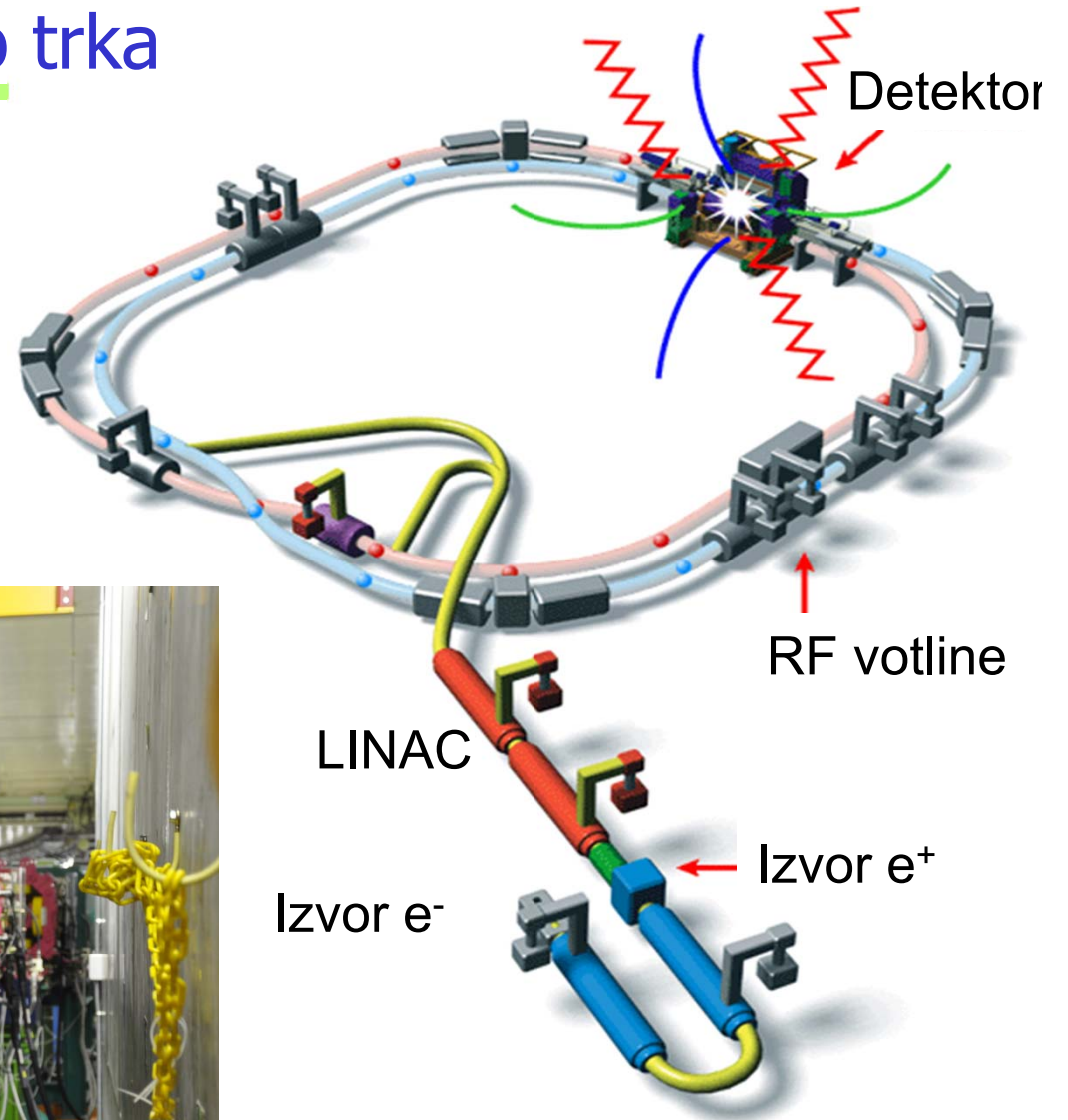


... podobno deskanju na valovih

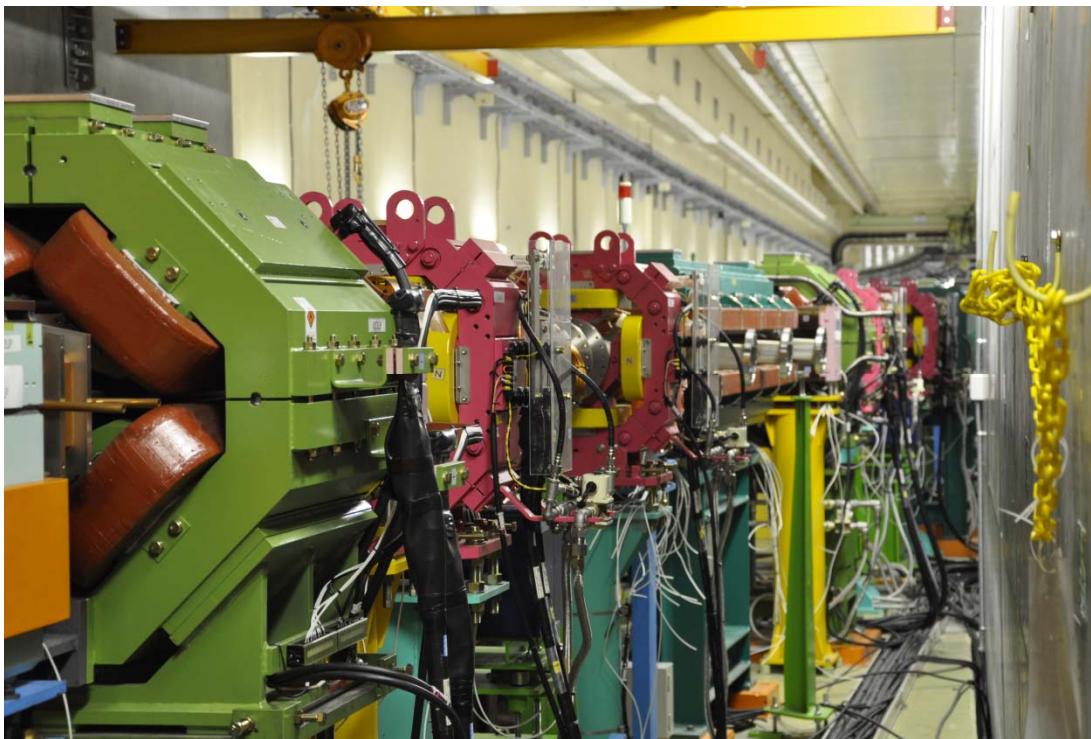
Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



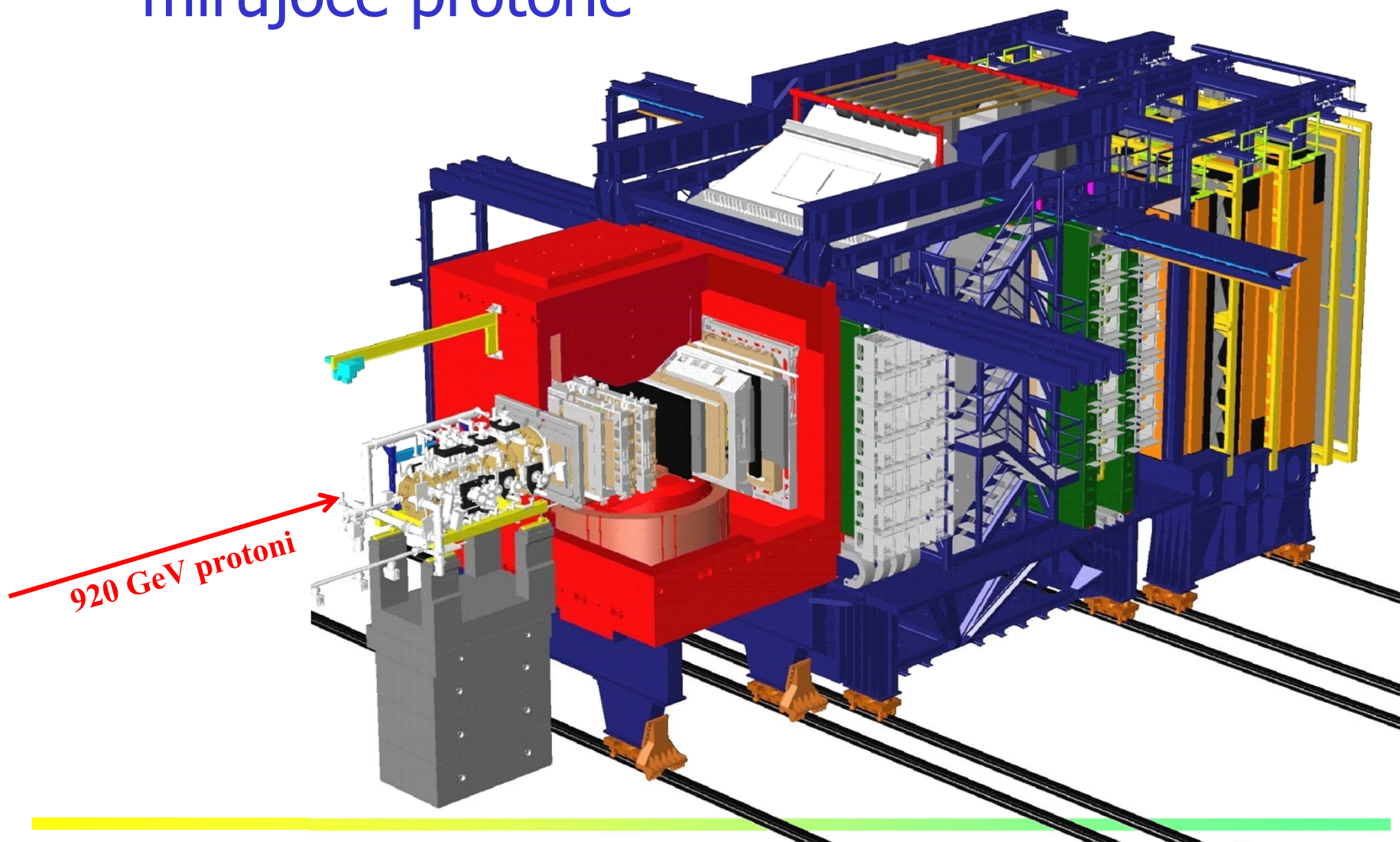
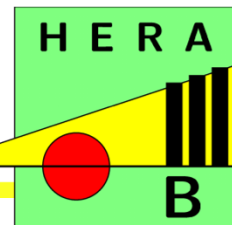
Trkalnik KEK-B pospešuje elektrone in pozitrone do trka



Del obroča trkalnika: magneti in pospeševalni elementi



Poskus HERA-B: trki pospešenih protonov v mirujoče protone



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

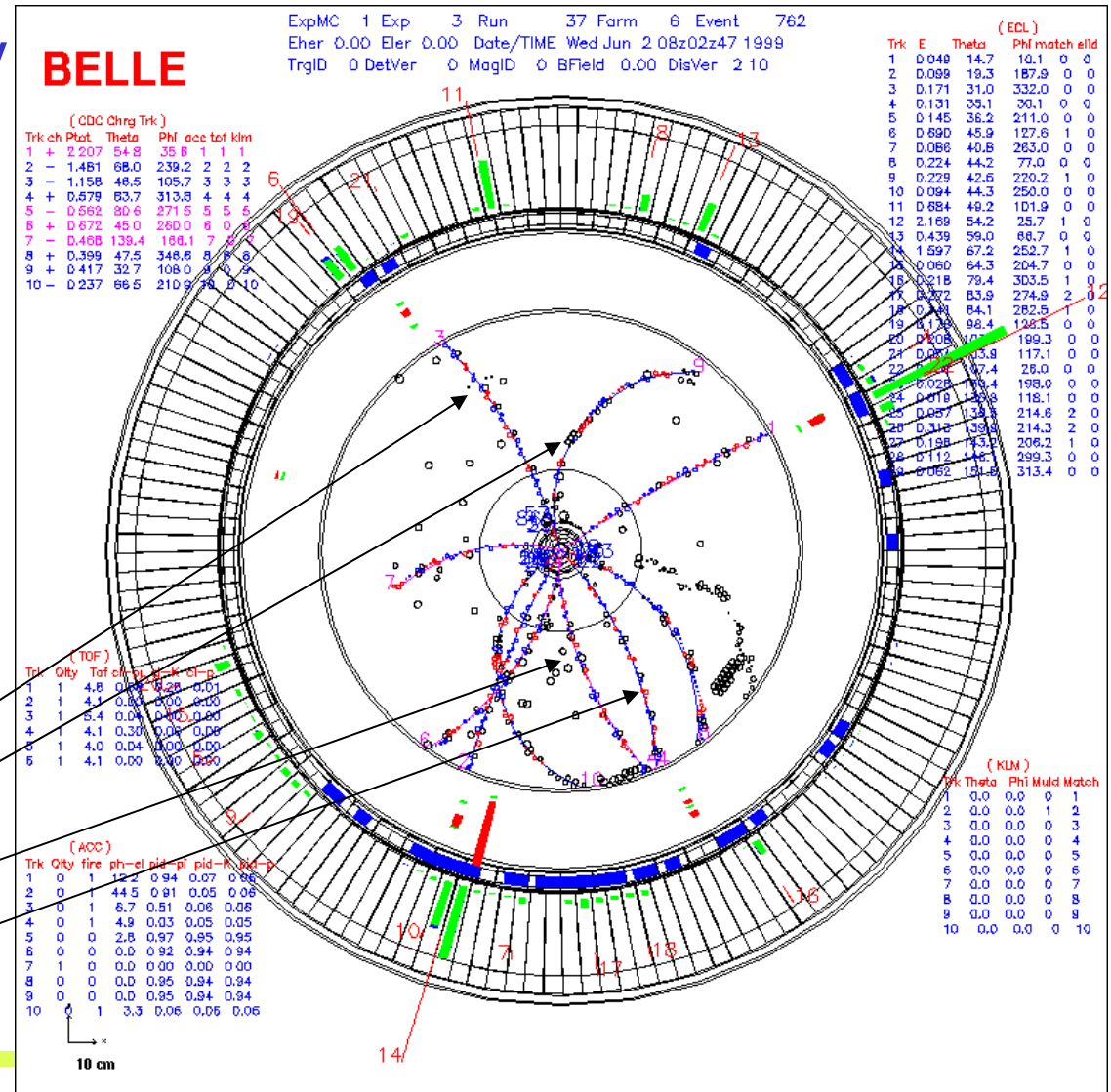
Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

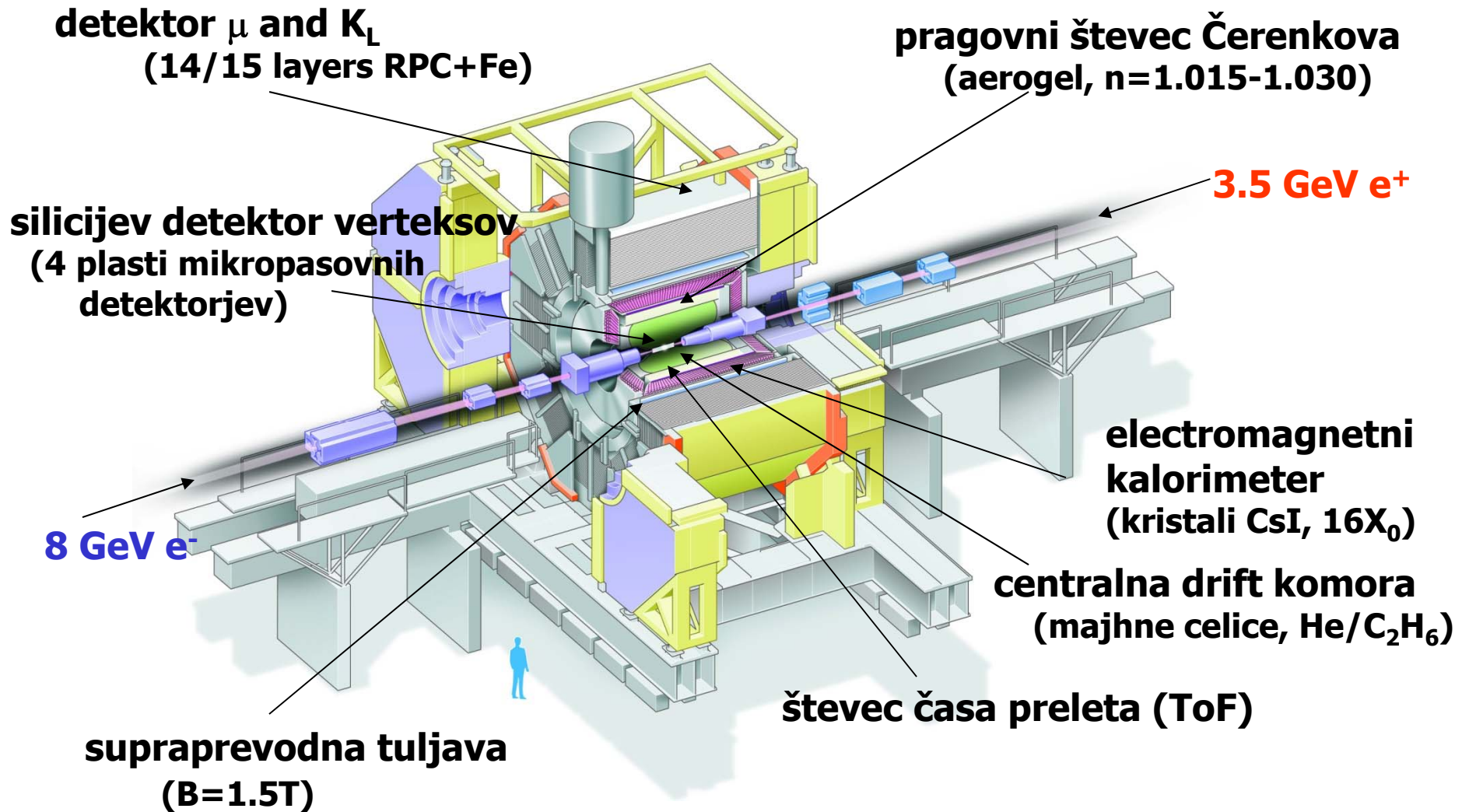
$$B^0 \rightarrow K^0_S J/\psi$$

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

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

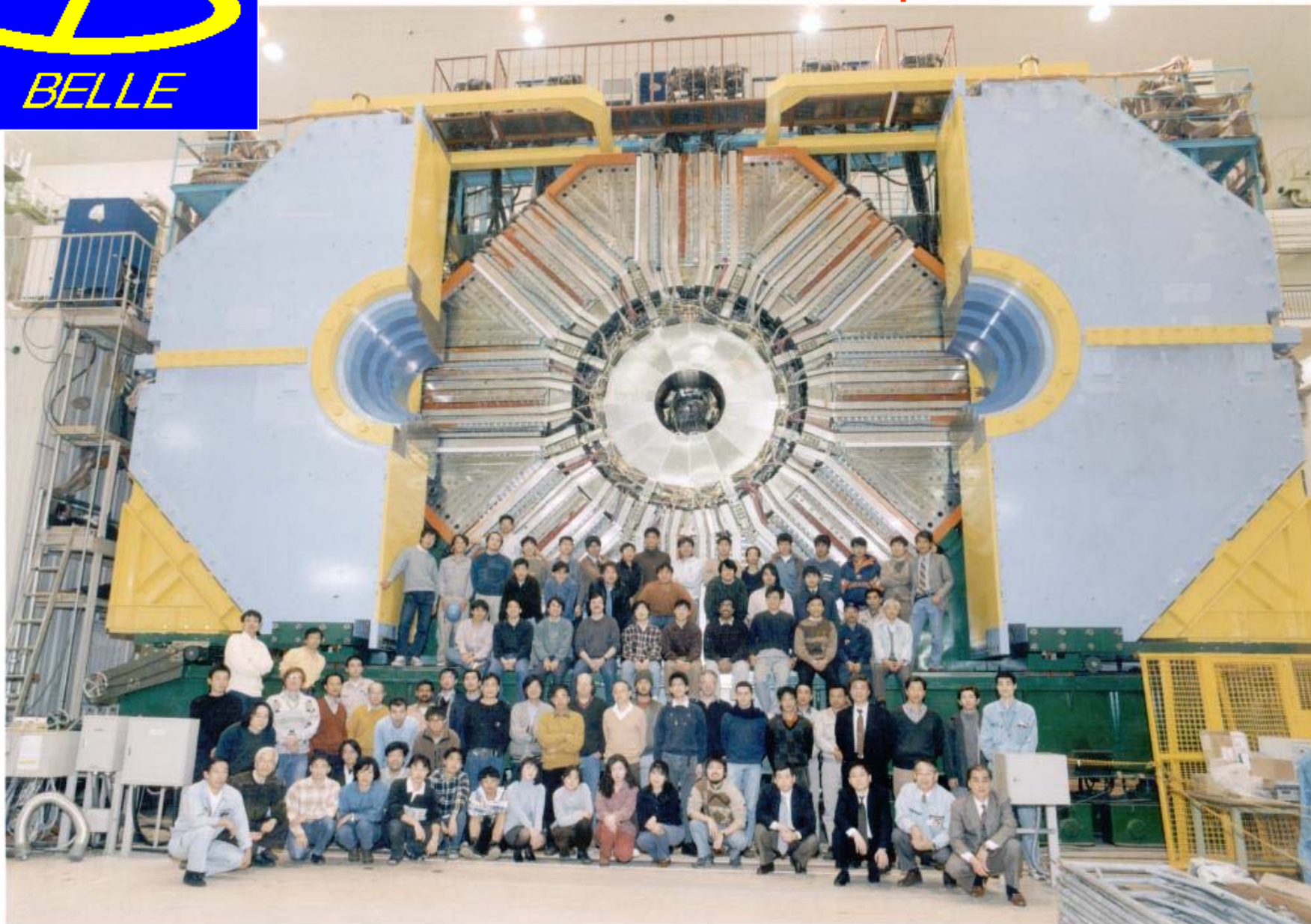


Spektrometer Belle





Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine

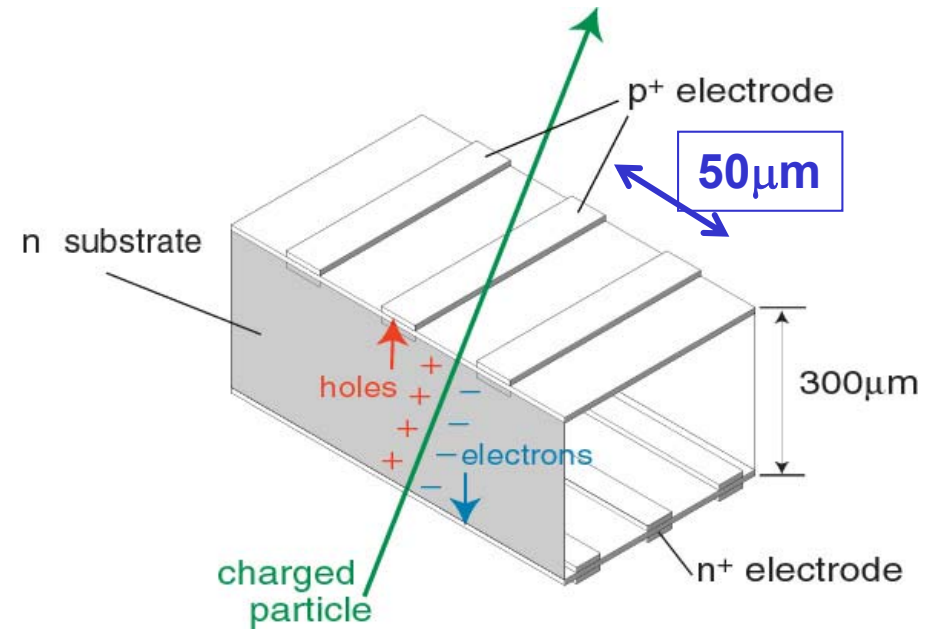
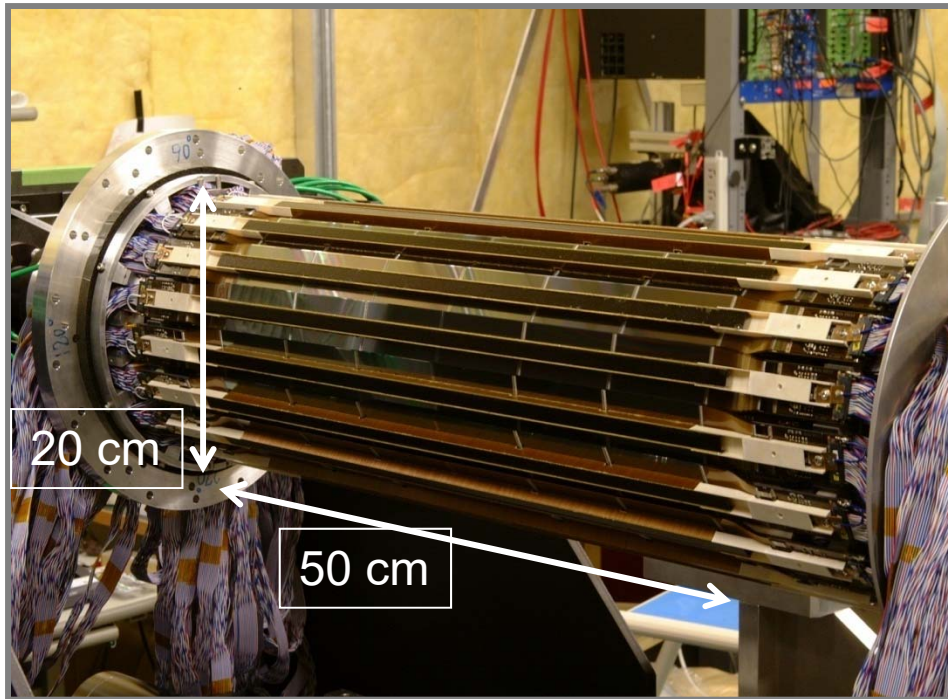


Detektor verteksov

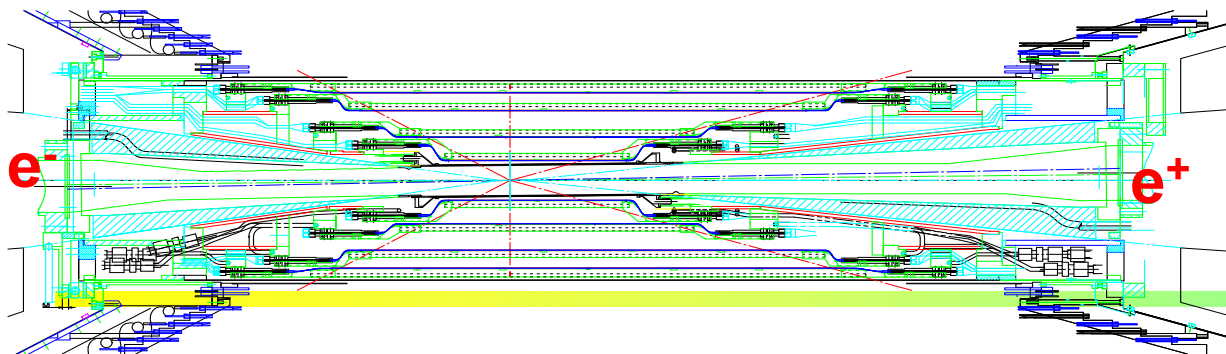
- Eden bistvenih elementov detektorja je detektor verteksa, točke, kjer je mezon B razpadel.
- Zelo občutljiv kos aparature iz $300\mu\text{m}$ debelih silicijevih plošč z gosto nanešenimi elektrodami: natančnost meritve mesta preleta nabitega delca: $10\mu\text{m}$!



Silicijev detektor verteksov



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



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

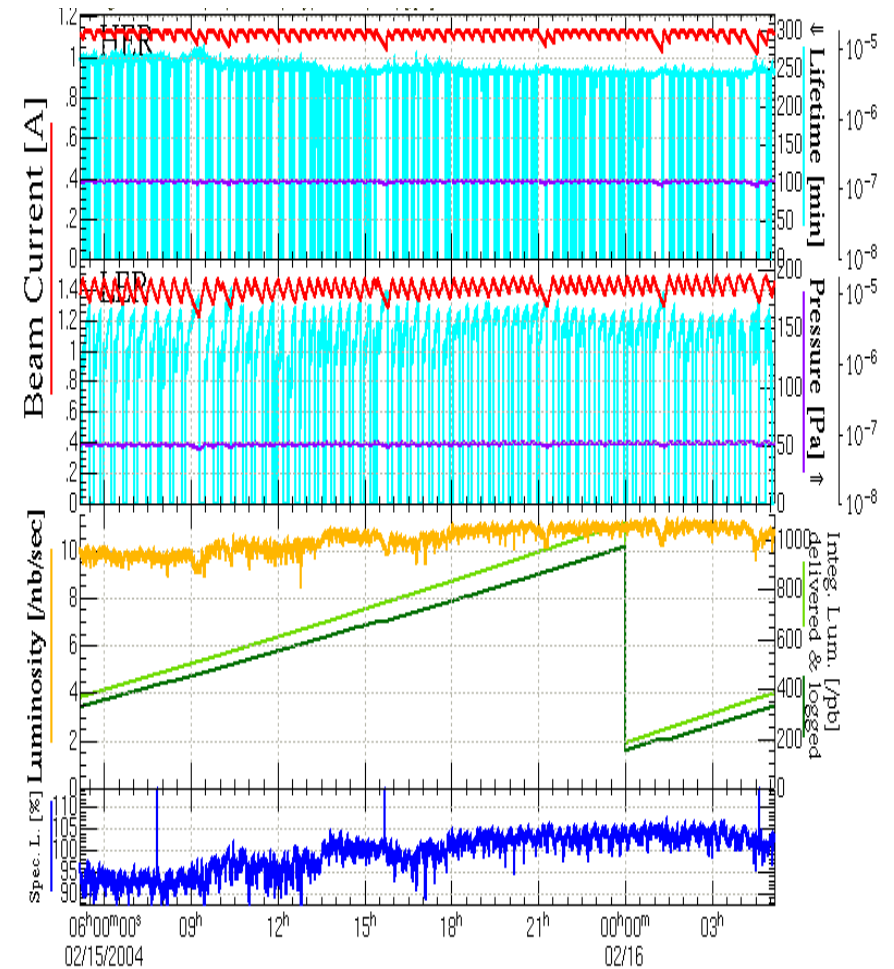
Če se delec in anti-delec ne obnašata vedno enako – torej če na primer različno razpadata, je to kršitev simetrije CP.

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.

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

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



Časovna odvisnost parametrov pospeševalnika

2001, rezultat meritve: CP je kršena!

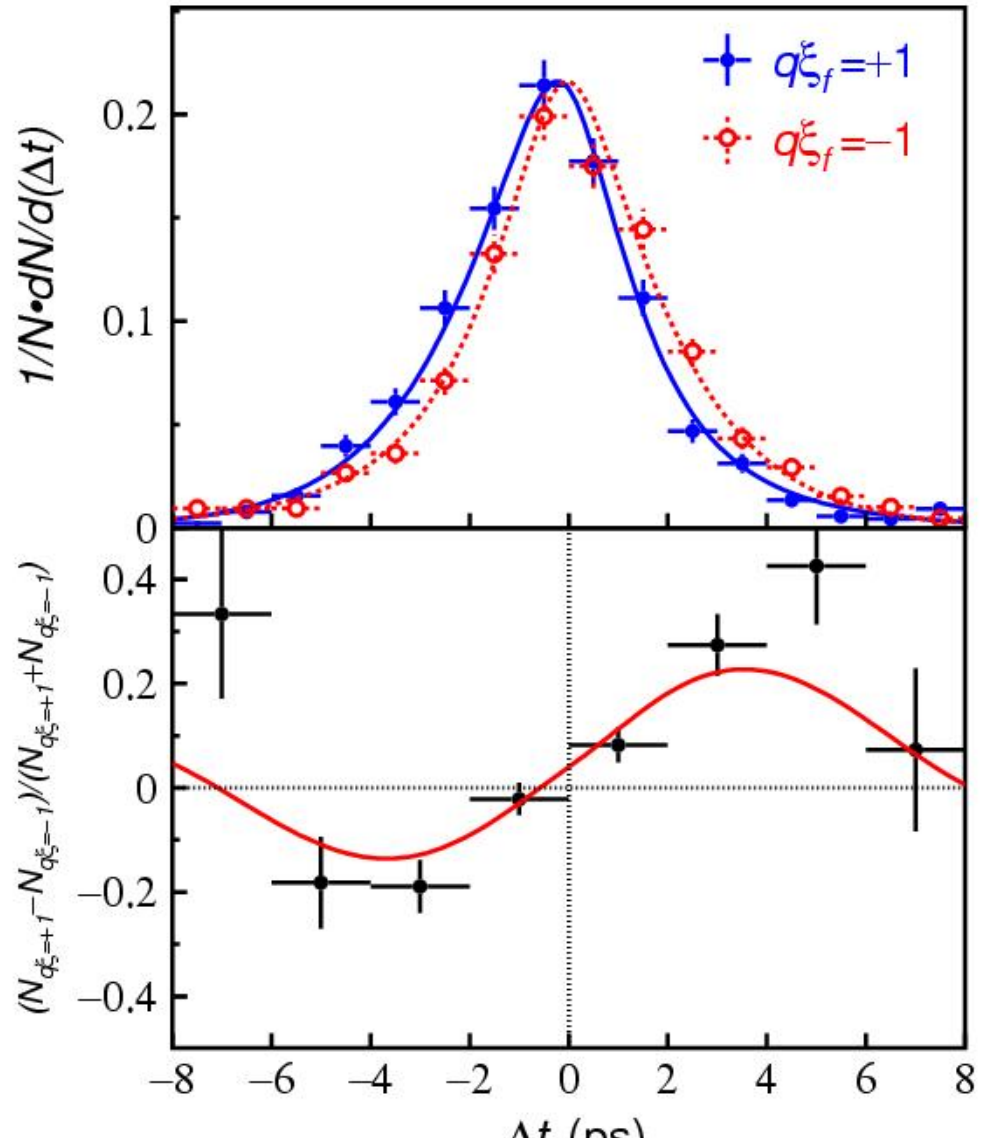
Razlika med delci in antidelci:

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

Razlika med obema porazdelitvama

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



Nobelova nagrada 2008 za Kobayashija in Maskawo

Meritev nevtrinske mase

Maso nevtrinov določimo posredno: če bi bili nevtrini brez mase, bi ne bili možni prehodi enega nevtrina (recimo ν_e : elektronski nevtrino) v drugega (recimo ν_μ : 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,

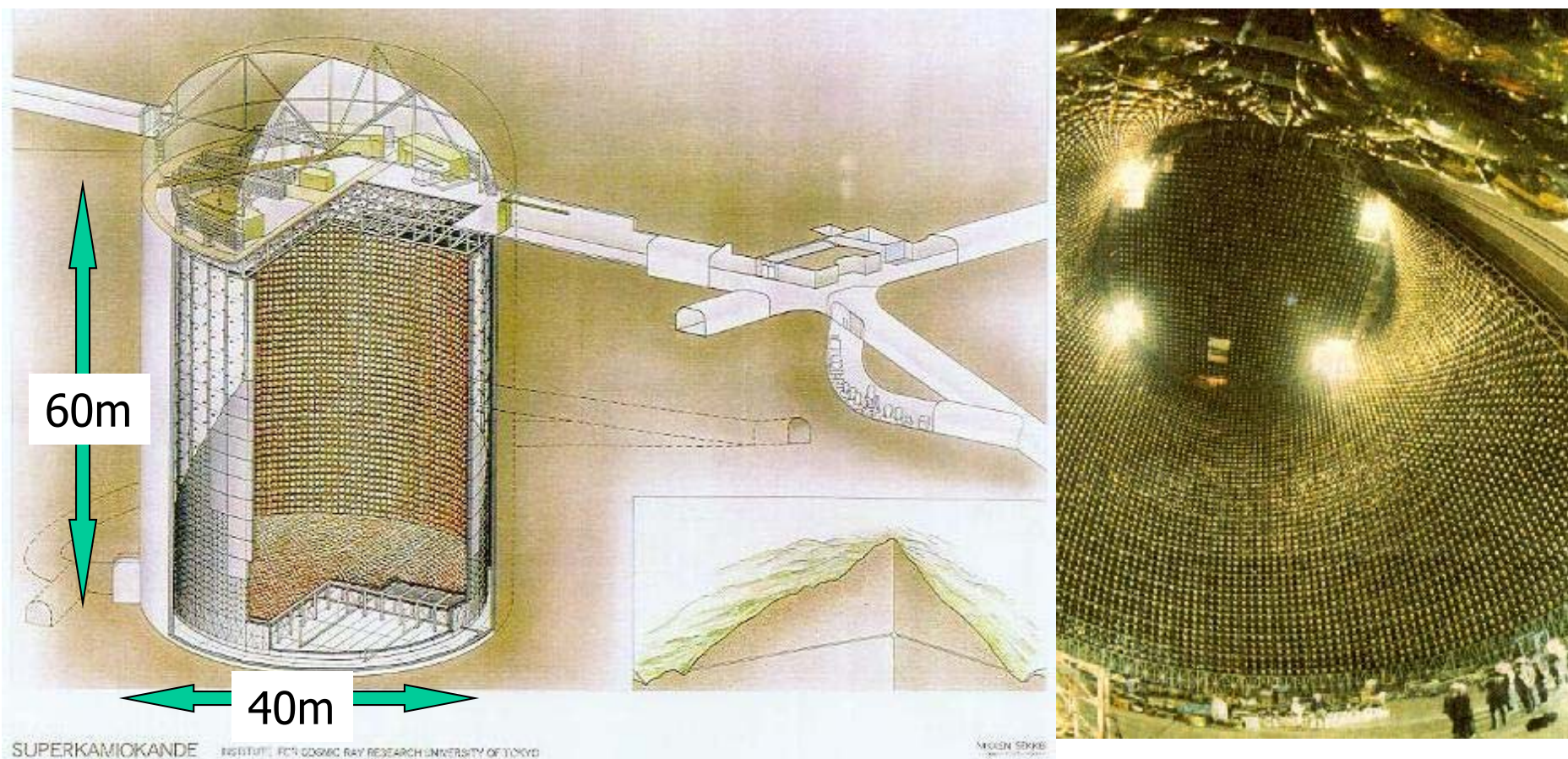


Toda: verjetnost za tako reakcijo v 100m vode je samo $4 \cdot 10^{-16}$

Potrebujemo velikanski detektor in zopet nekaj let za meritve!

Superkamiokande: primer nevtrinskega detektorja

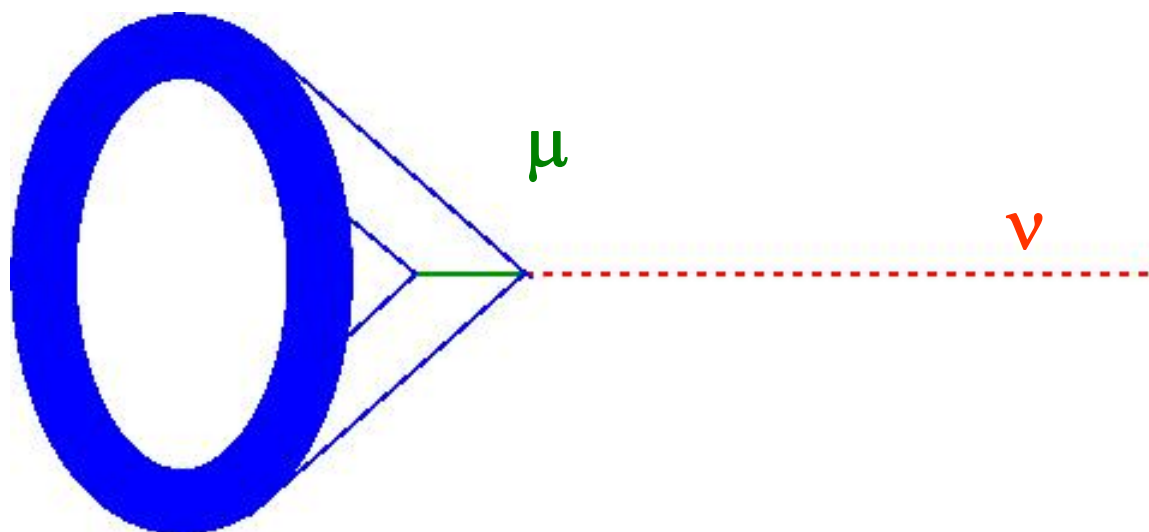
Tudi v tem primeru uporabimo Čerenkovo sevanje



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.

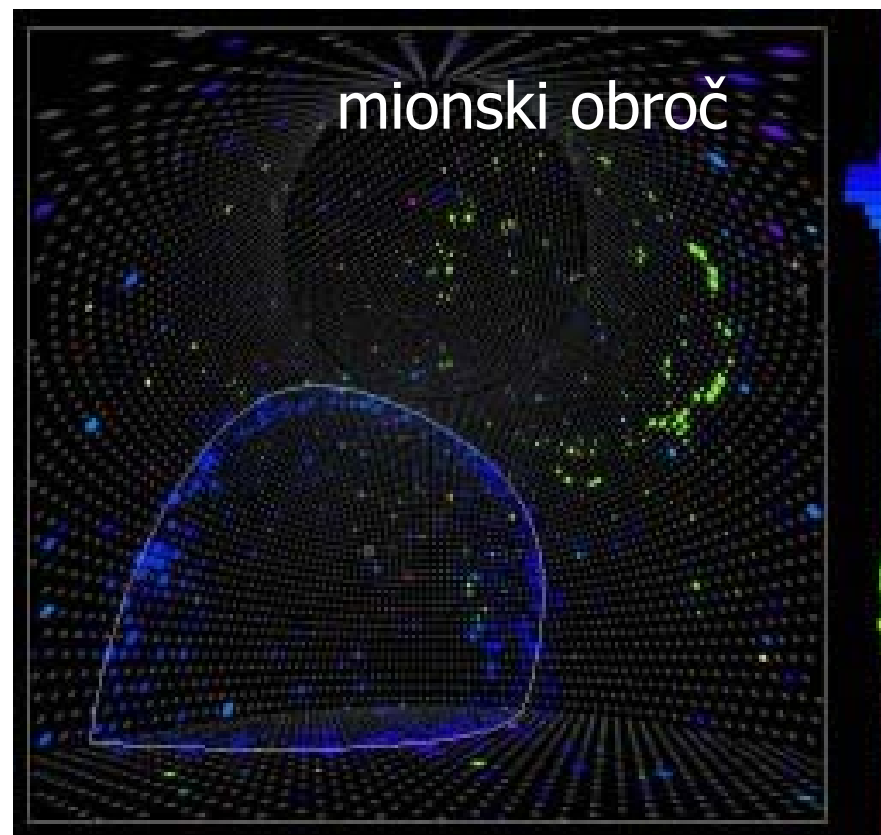
- mionski obroč: ostri robovi
- elektronski: razmazan (zavorno sevanje).

Superkamiokande: zaznavanje elektronov in mionov

Detektorji svetlobe: zelo zelo velike fotopomnoževalke



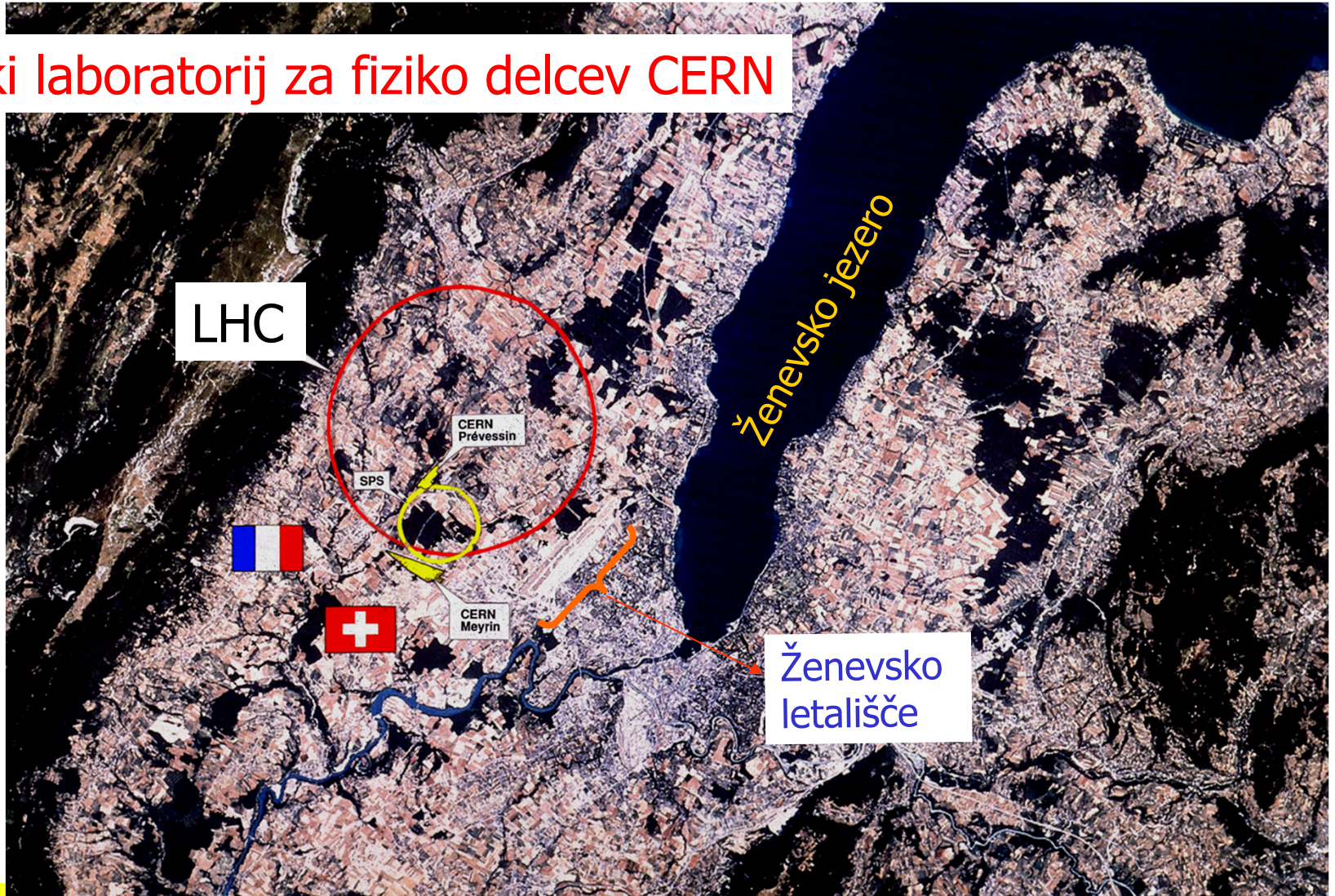
M. Koshihara (NN2002)



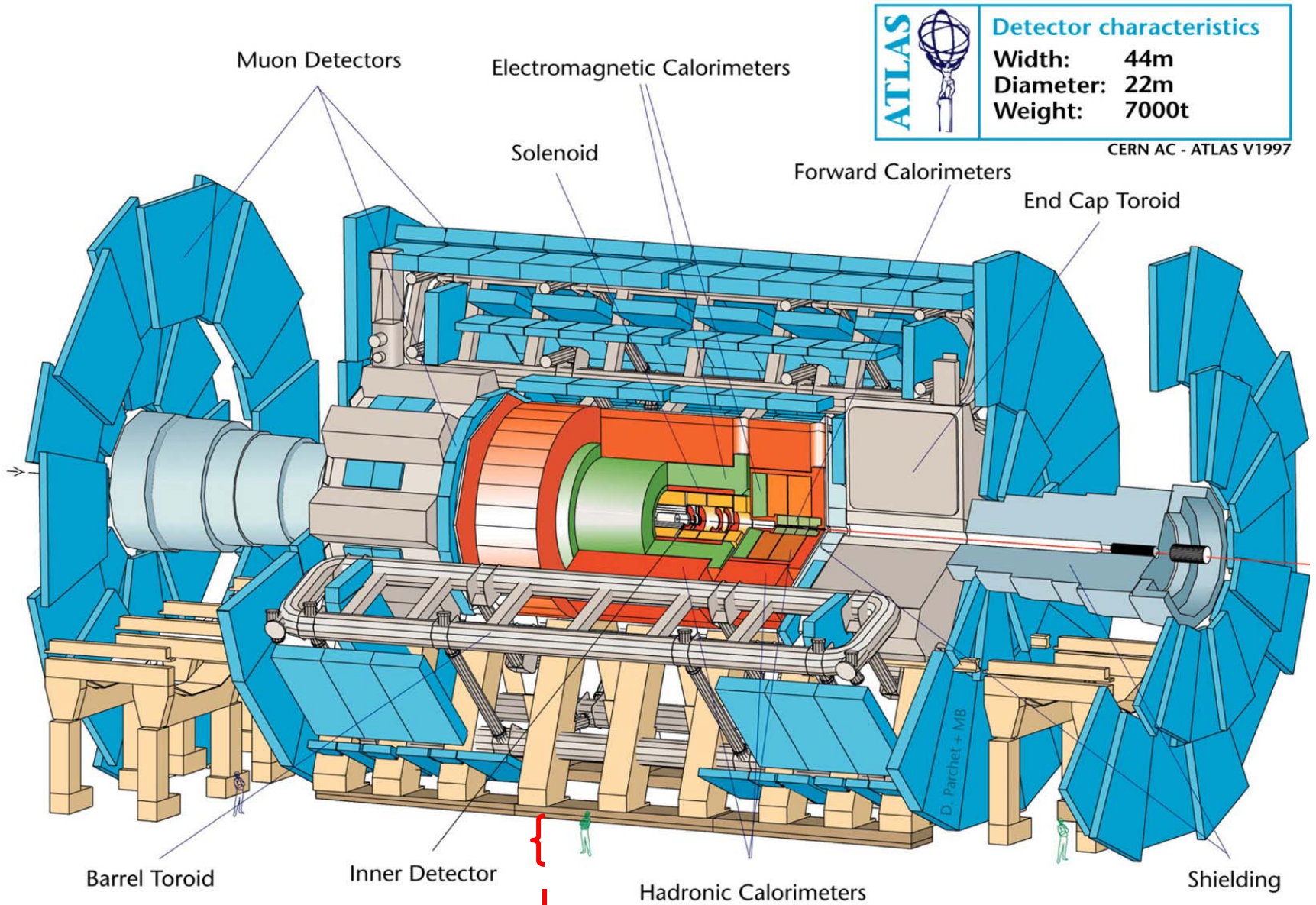
Elektrone ločimo od mionov po vzorcu na detektorju svetlobe.


Na lovu za Higgsovimi delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



Detektor ATLAS ob LHC – v pripravi



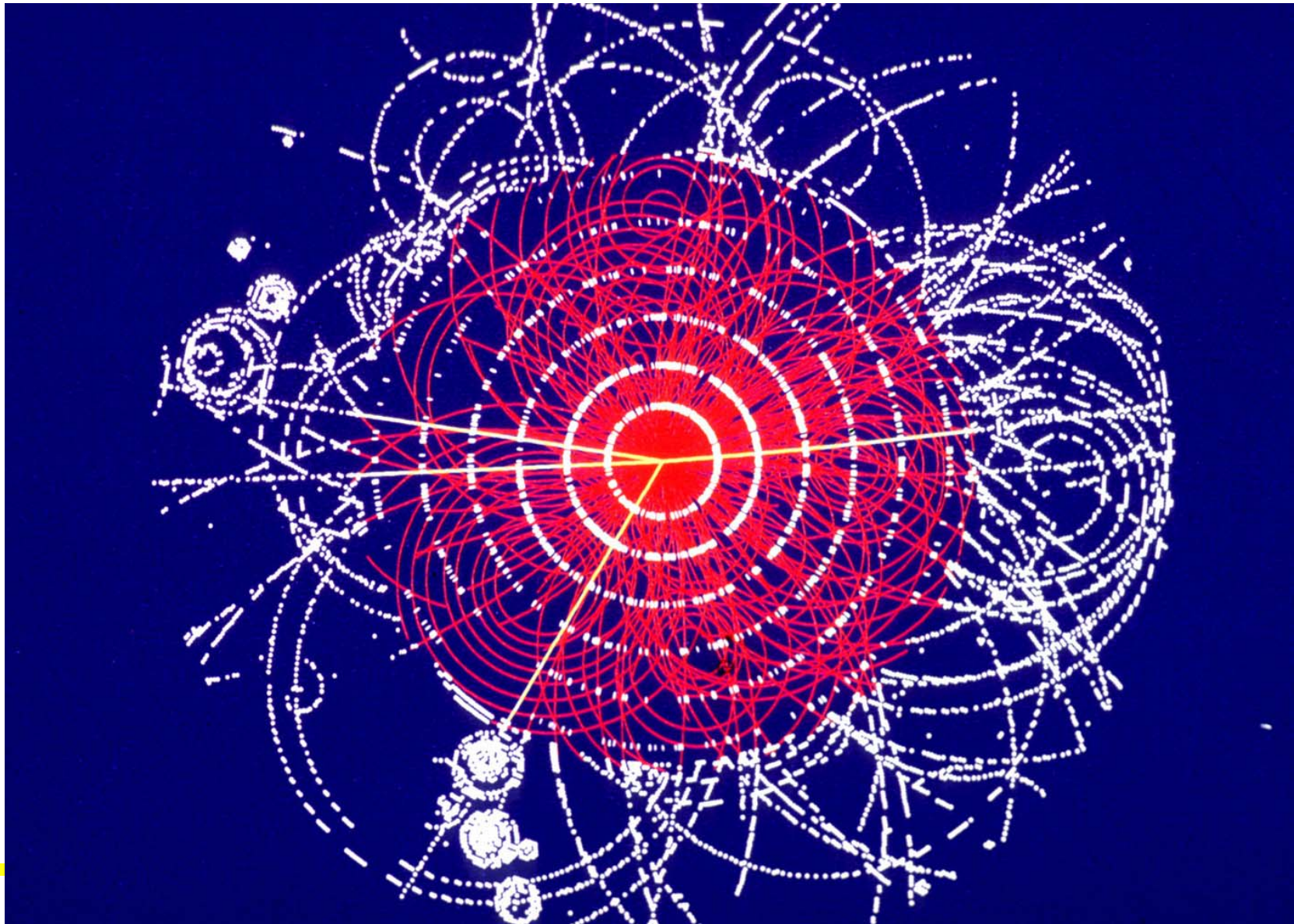
	Detector characteristics
	Width: 44m
	Diameter: 22m
	Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

možak..tukaj...

Peter Križan

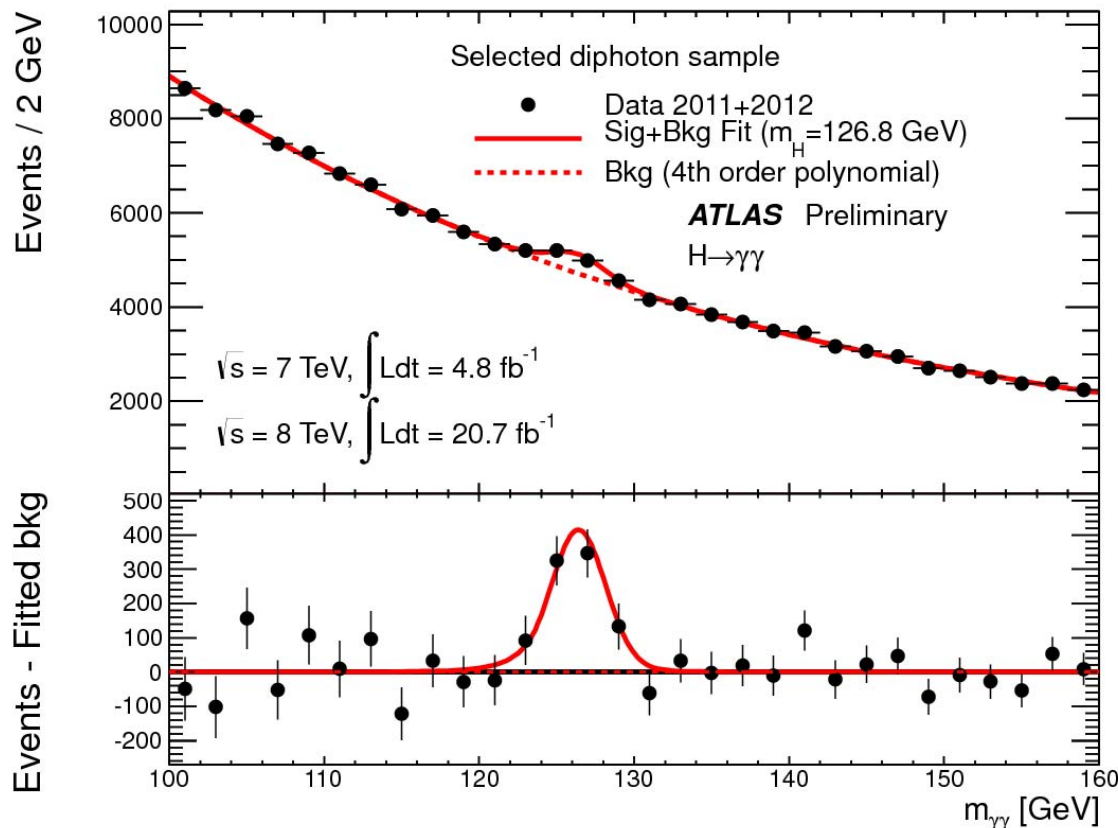
Računalniška simulacija: $H \rightarrow 4 \mu$ (ATLAS)



Iskanje Higgsove delca z detektorjema ATLAS in CMS ob LHC

- Trkalnik in oba velika detektorja, ATLAS in CMS odlično delujejo od konca leta 2009
- Julij 2012: ATLAS in CMS objavita odkritje Higgsovega bozona – pravzaprav delca, za katerega zaenkrat je vse kazalo, da ima take lastnosti, kot jih pričakujemo od Higgsovega delca ('Higgs-like particle').
- Na dokončno potrditev je bilo treba počakati še eno leto, da so nabrali dovolj velik vzorec podatkov in opravili dodatne meritve.

Rezultat meritve: meritev razpada Higgsovega bozona v dva žarka gamma, $H \rightarrow \gamma\gamma$



Masa vsake zabeležene kombinacije dveh visokoenergijskih žarkov gama:

– veliko večino predstavljajo naključne kombinacije
- vrh pri energiji 126 GeV
ustreza razpadom $H \rightarrow \gamma\gamma$

Izmerjena porazdelitev minus ozadje \rightarrow signal!

Odkritje Higgsovega delca

Dokončno potrditev leta 2013 z večjim vzorcem in dodatnimi meritvami:

- Primerjava števila razpadov Higgsovega bozona v različnih razpadnih kanalih
- Kotne porazdelitve delcev v končnem stanju – določanje lastnosti tega delca (spin – vrtilna količina).

→ Novi delec ima take lastnosti, kot jih predvideva Standardni model

Nobelova nagrada 2013!



Francois Englert in Peter W. Higgs

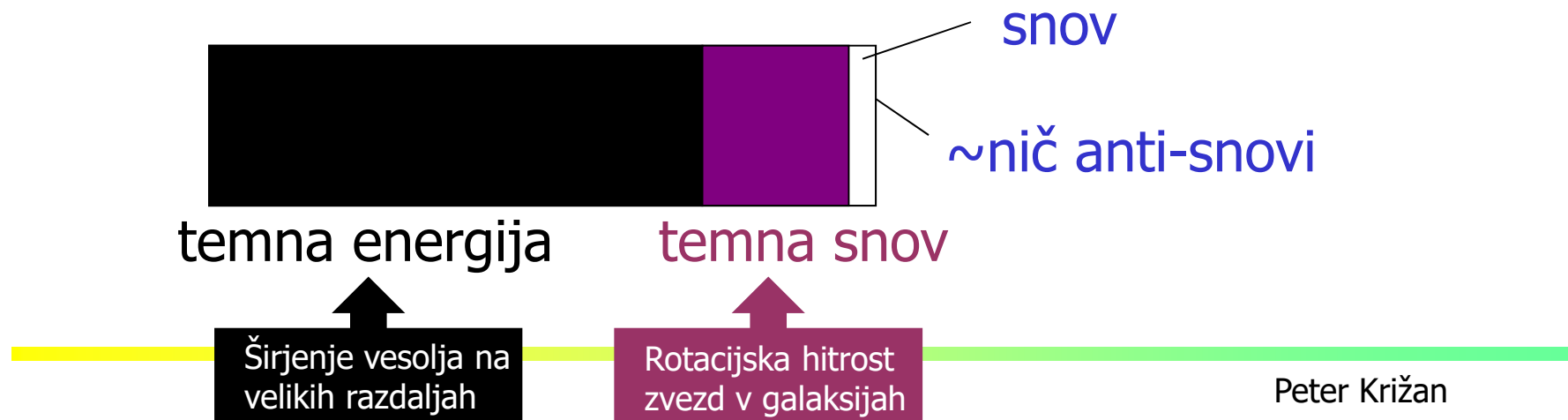
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

Žal ne...

Izmerjena kršitev simetrije med delci in antidelci je za 10 redov velikosti premajhna, da bi pojasnila razliko med količinama snovi in anti snovi v vesolju!

Standardni model ne vsebuje četrte interakcije - gravitacije

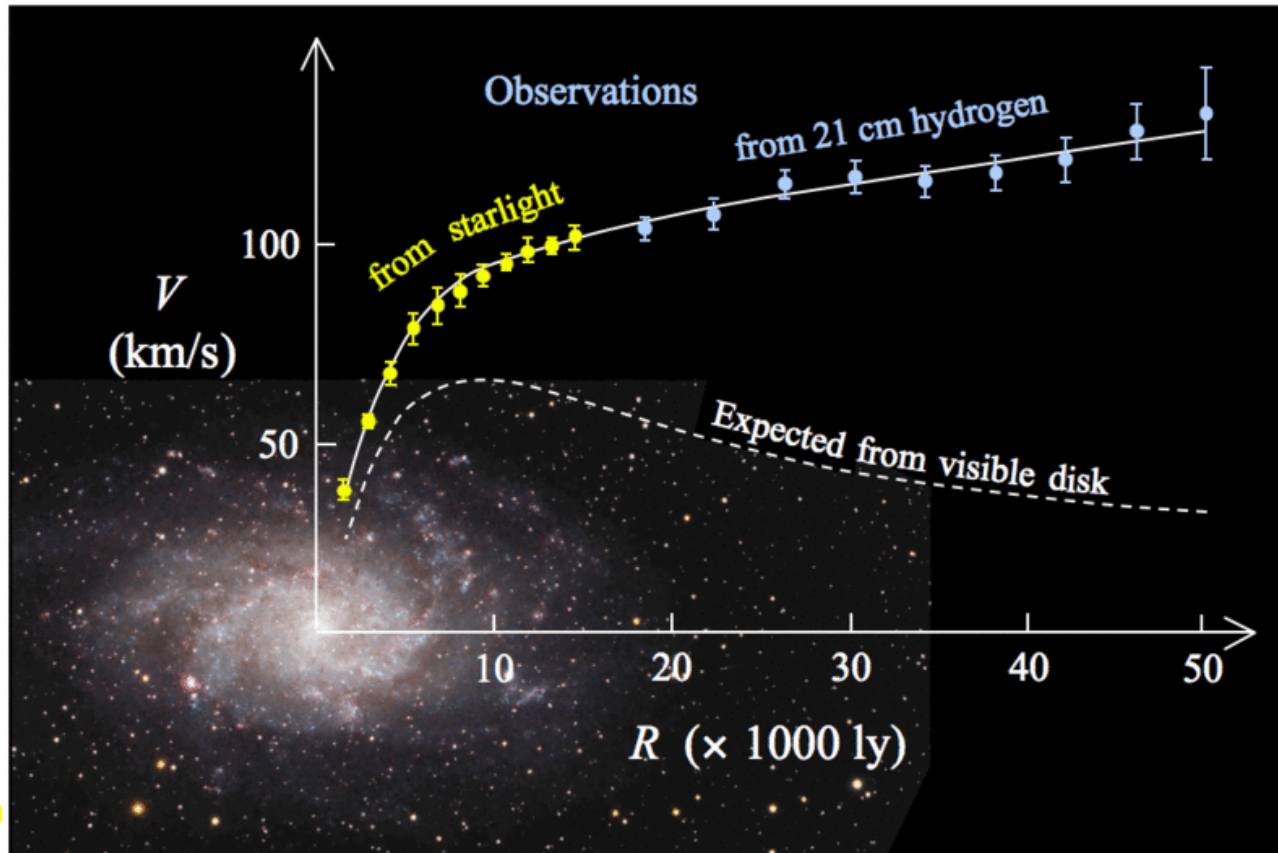
In nenazadnje: večina vesolja je narejena iz delcev, ki jih ne poznamo...



Rotacijske krivulje galaksij

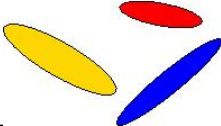
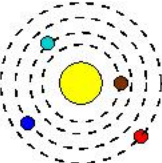
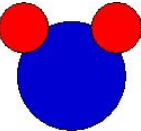
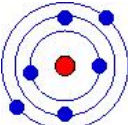
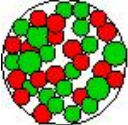
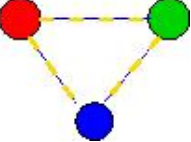

Izmerjena hitrost gibanja zvezd v galaksijah je precej večja kot pričakovana (glede na opaženo gostoto zvezd in prahu)

→ večino mase galaksije prispeva temna snov, delci, ki jih ne poznamo!



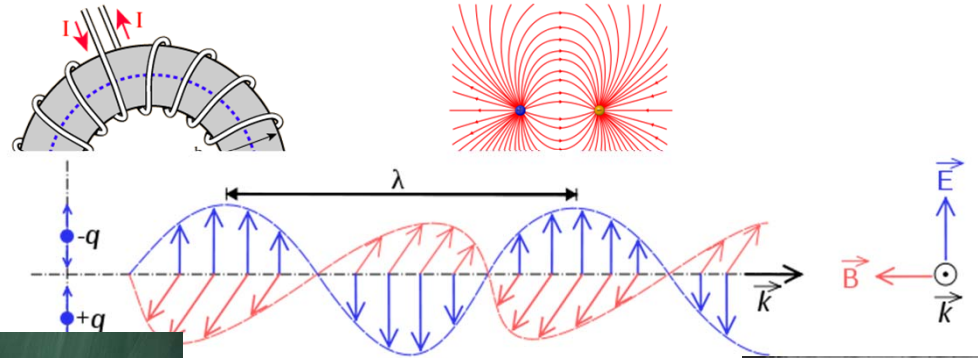
→ Dovolj zanimivih vprašanj za prihajajočo generacijo raziskovalcev!

Program predavanj

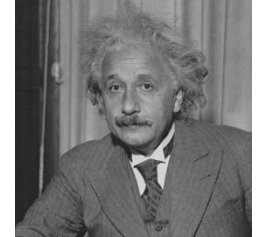
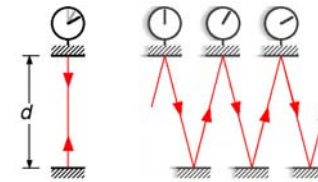
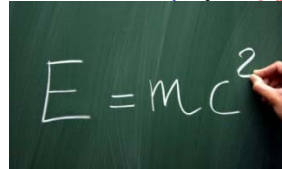
Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
10^{21} →	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
10^{14}	galaksije zvezde planeti				astronom, astrofizik
1					
10^{-8} →	molekule		elektro- magnetna	pestrost svetlobe, življenja energija	kemik, atomski fizik,
10^{-10} →	atomi				atomski fizik
10^{-14} →	jedra		jedrsko	kemijski elementi, sonce, reaktor	jedrski fizik
10^{-15} →	nukleoni		močna, šibka	moja plača	fizik osnovnih delcev
10^{-18} →	kvarki		?	?	

Vsebina

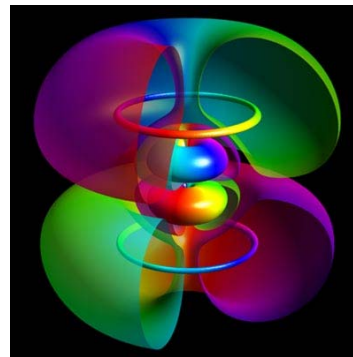
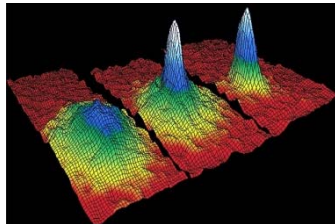
Elektromagnetno polje



Posebna teorija relativnosti

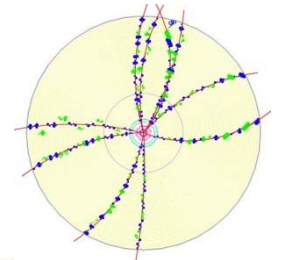
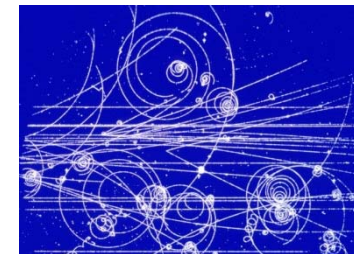


Kvantna fizika



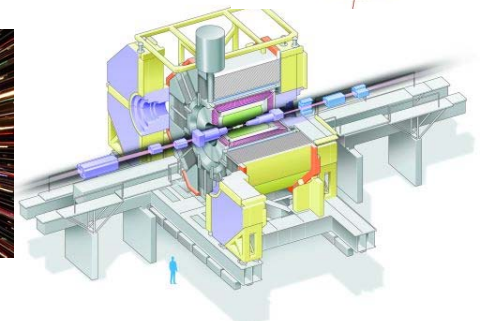
$$|\alpha\rangle = \sum_{n=0} \alpha^n \frac{e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}}}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

Relativistična kvantna fizika



Fizika osnovnih delcev: leptoni in kvarki, interakcije.

Fizika osnovnih delcev in razvoj vesolja.



Vsebina predmeta

Elektromagnetno polje:

- Elektrostatika, multipolni razvoj;
- Magnetno polje, indukcija;
- Integralska in diferencialna oblika Maxwellovih enačb;
- Elektromagnetno valovanje;
- Polje v snovi.

Posebna teorija relativnosti:

- Zapis enačb v splošni teoriji relativnosti;
- Kovariantni zapis Maxwellovih enačb;

Kvantna fizika:

- Valovne lastnosti delcev;
- Schroedingerjeva enačba in probabilistična interpretacija;
- Načelo korespondence, lastne vrednosti operatorjev;
- Postulati kvantne fizike, Heisenbergove relacije;
- Harmonski oscilator;
- Vodikov atom;

Relativistična kvantna fizika

- Klein-Gordonova enačba, Diracova enačba;

Standardni model osnovnih delcev: leptoni in kvarki; elektromagnetna, šibka in močna interakcija.

Fizika osnovnih delcev in razvoj vesolja.

Literatura

Spletna stran z podrobnostmi o teh predavanjih je na:

http://www-f9.ijs.si/~krizan/sola/modfiz/moderna_fizika.html

- Program (spored)
- Literatura
- Prosojnice
- Spletne povezave

Literatura:

- J. Strnad, Fizika 3 in 4, DMFA
- Jack Vanderlinde, Classical Electromagnetic Theory, Wiley 1993
- Franz Schwabl, Quantum Mechanics, Springer 2002