



Moderna fizika 2

Uvod* v fiziko jedra in osnovnih delcev

Peter Križan

Vsebina

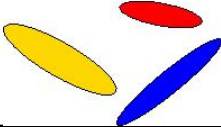
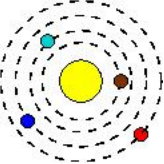
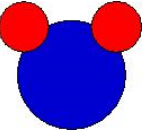
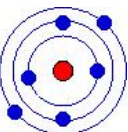
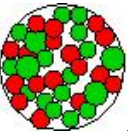
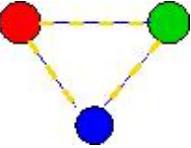

Uvod

Standardni model osnovnih delcev in njihovih interakcij

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

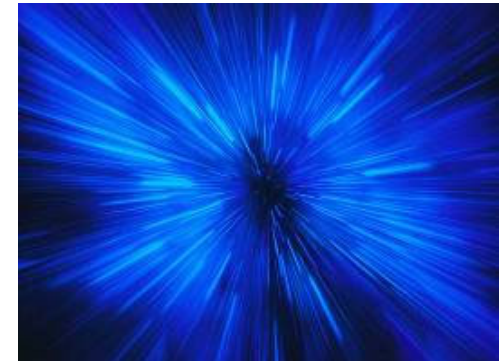
Program predmeta

Pregled literature

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		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		?	?		
					↓ filozof	

Zveza med fiziko osnovnih delcev in zgodnjim razvojem vesolja

Zgodnje vesolje: visoka **temperatura**
(podobno kot plin, ki ga stisnemo)

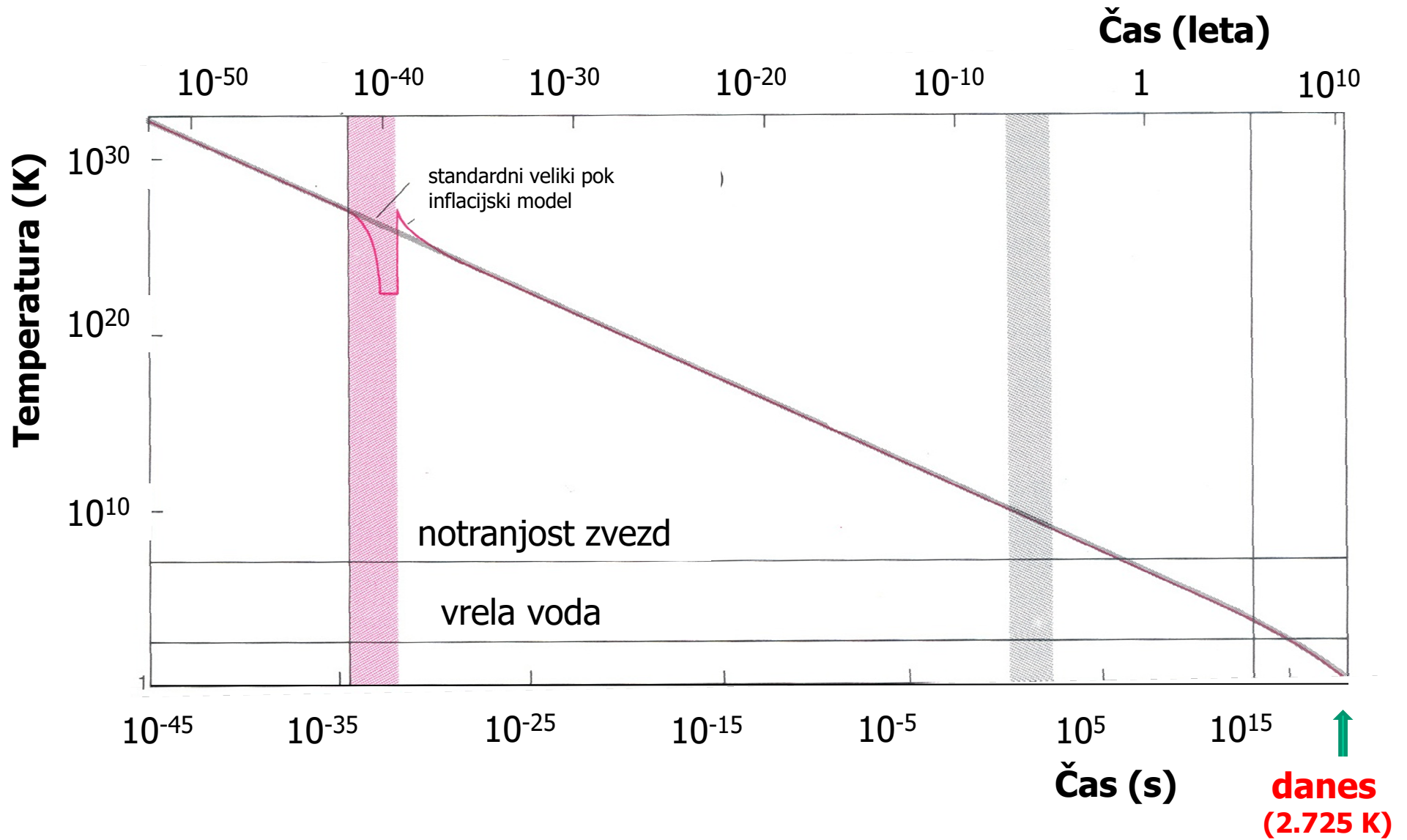


Plin pri visoki temperaturi: **velika hitrost** molekul

Trki med delci v zgodnjem vesolju:
enaki trkom delcev v **pospeševalnikih**



Temperatura vesolja



Kakšen naj bo opis narave?

Dve zahtevi:

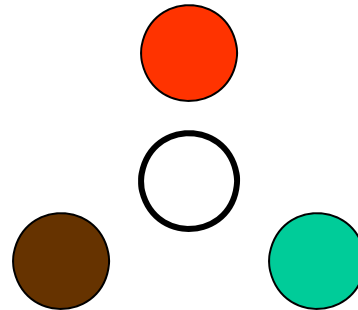
- Preprost
- Pravilen

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:

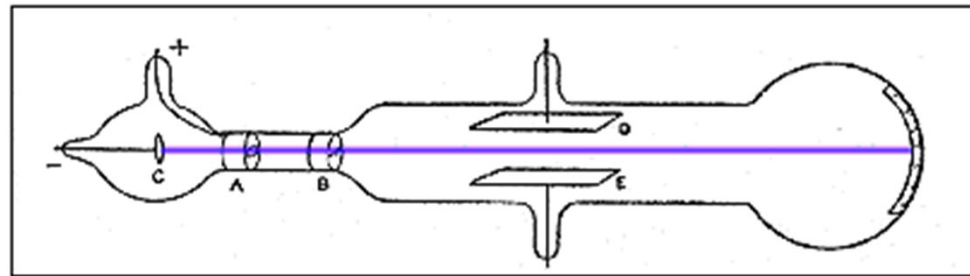
	IA																		0	
1	1 H	IIA																		2 He
2	3 Li	4 Be																		
3	11 Na	12 Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VII	IB	IIB										
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 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)

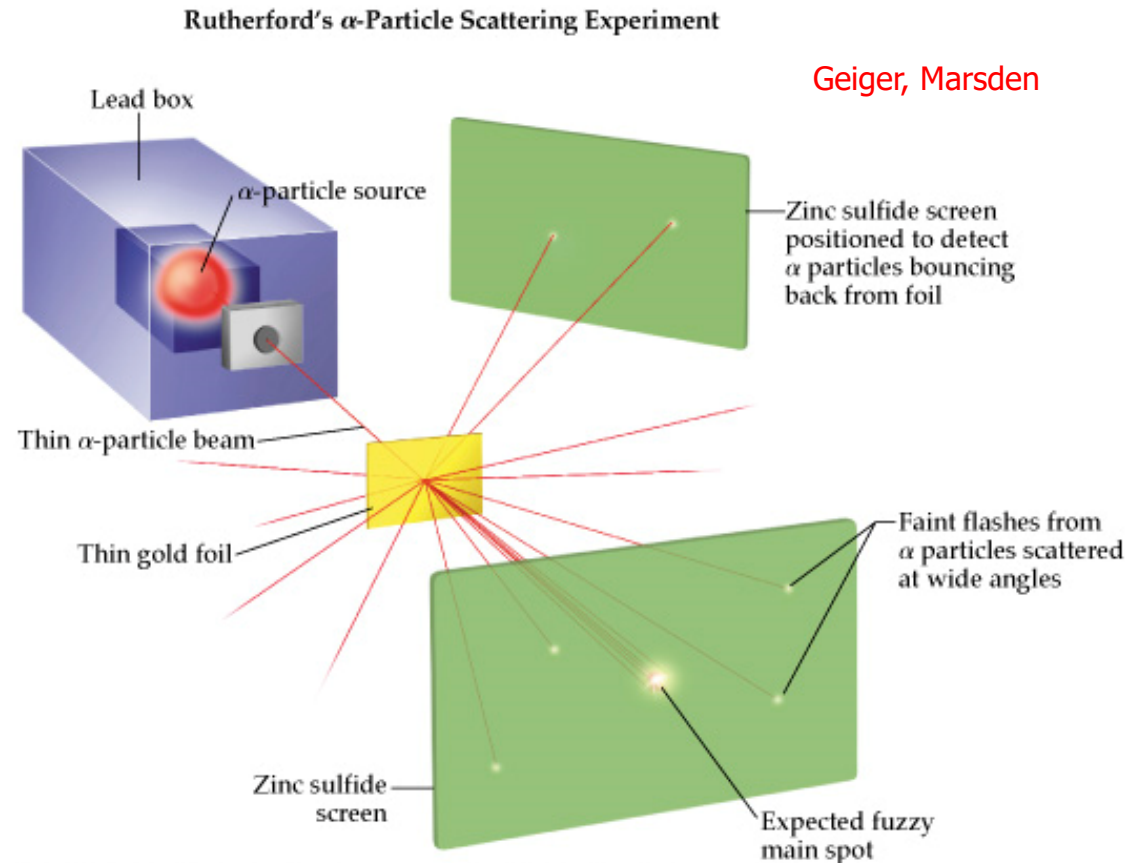
L. de Broglie: $\lambda_B = hc / E_{kin}$ (NN 1929)

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

Sipanje delcev α na Au foliji

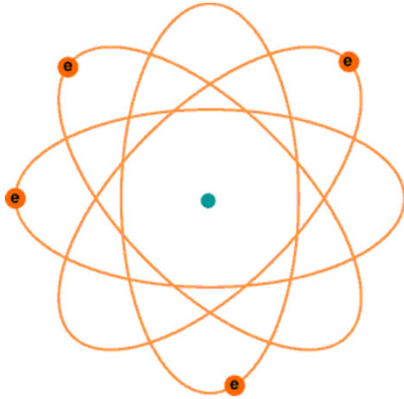


Rutherford, Geiger



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

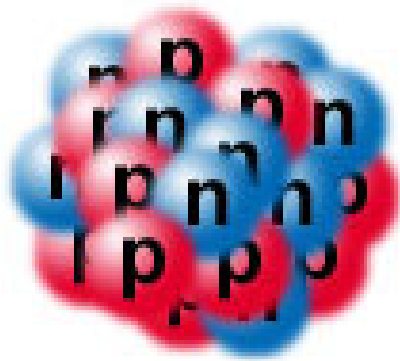
Jedro: $1/1000000000000000000$ prostornine atoma

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 med nukleoni je pion π

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

(NN 1949)

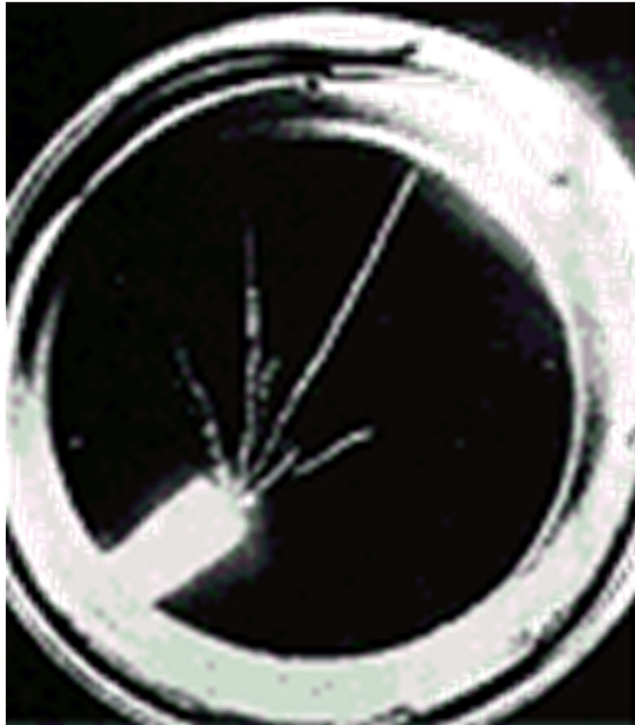
$$V(r) \propto \frac{e^{-r/a}}{r}$$

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

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').

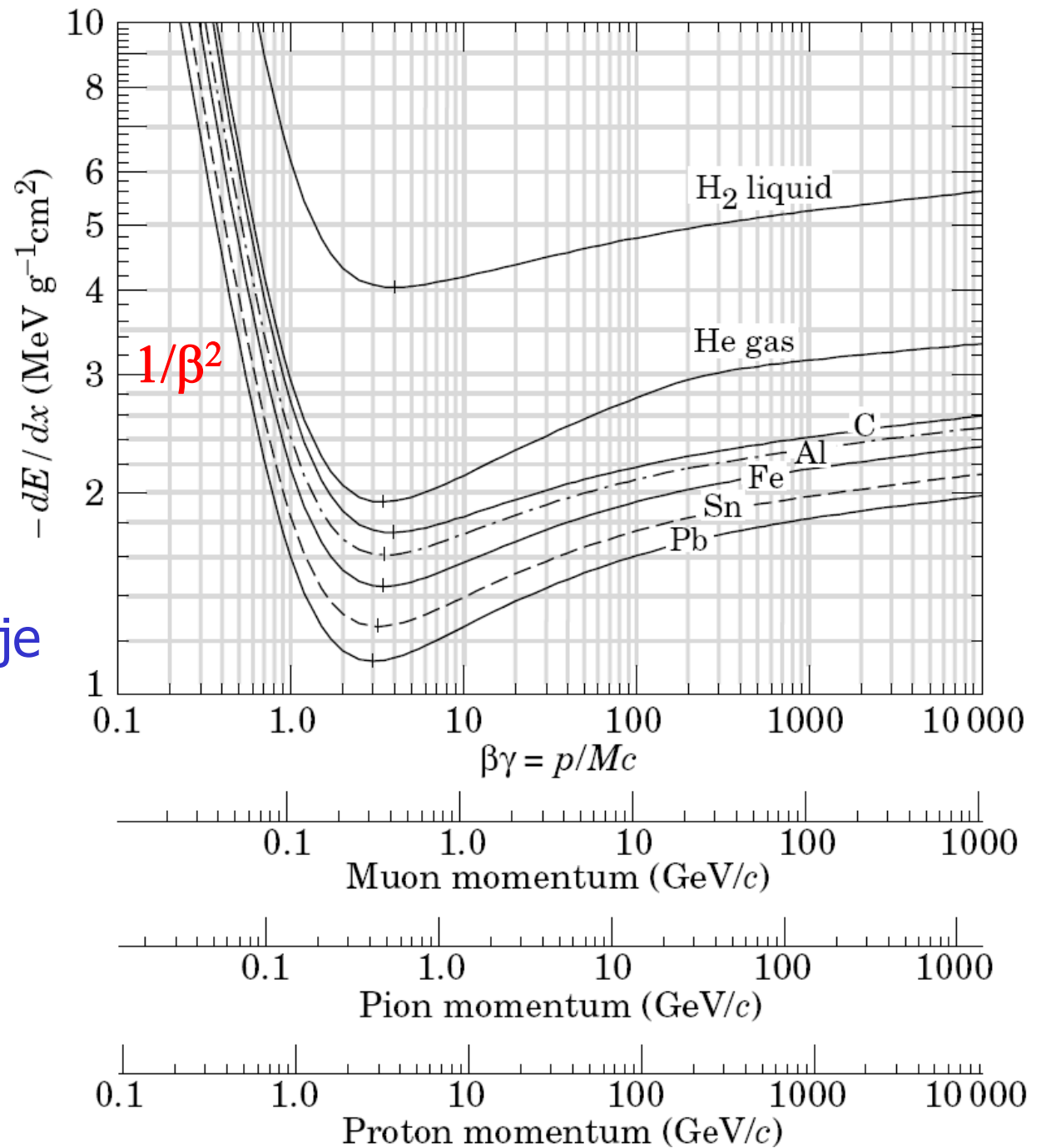
Energijske izgube na enoto poti: formula Betheja in Blocha

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

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

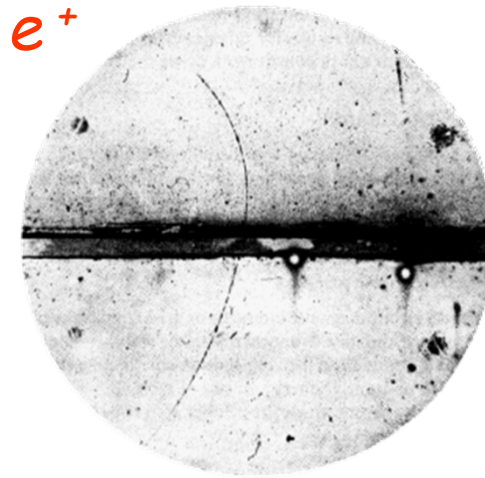
- Radioaktivni izotopi
- Kozmični delci
- Pospeševalniki



Odkritje pozitrona



C. Anderson
(NN 1936)



Nabit delec prečka ploščo iz Pb

Naboj: predznak iz ukrivljenosti v magnetnem polju B
(kaže v sliko)

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

Odkritje miona

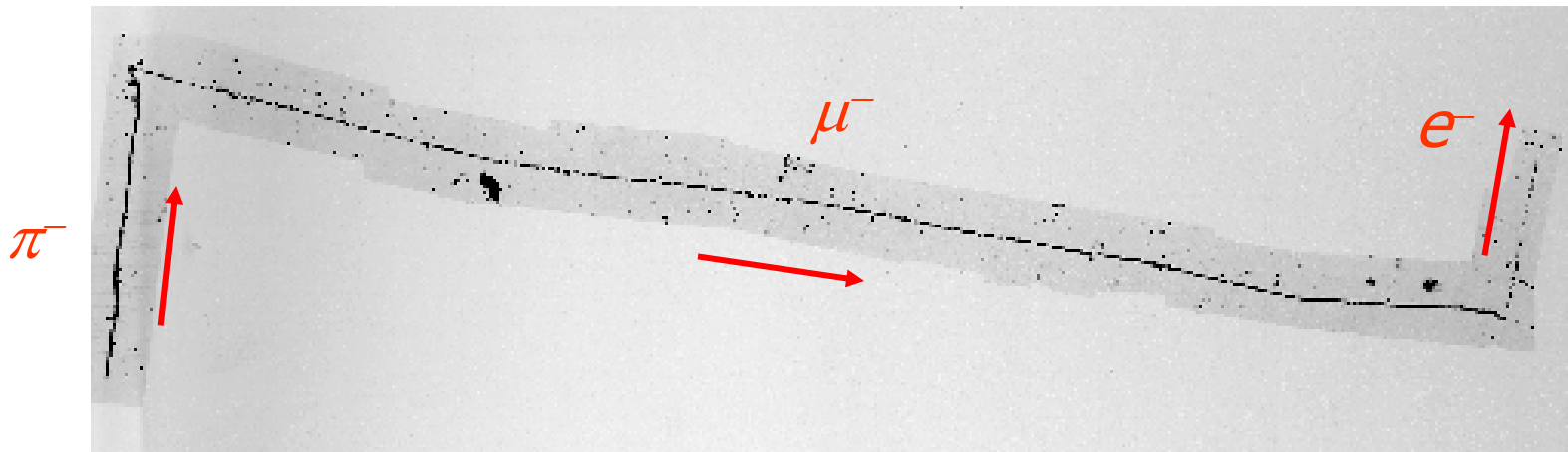


C. Anderson (1936):

- 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**)

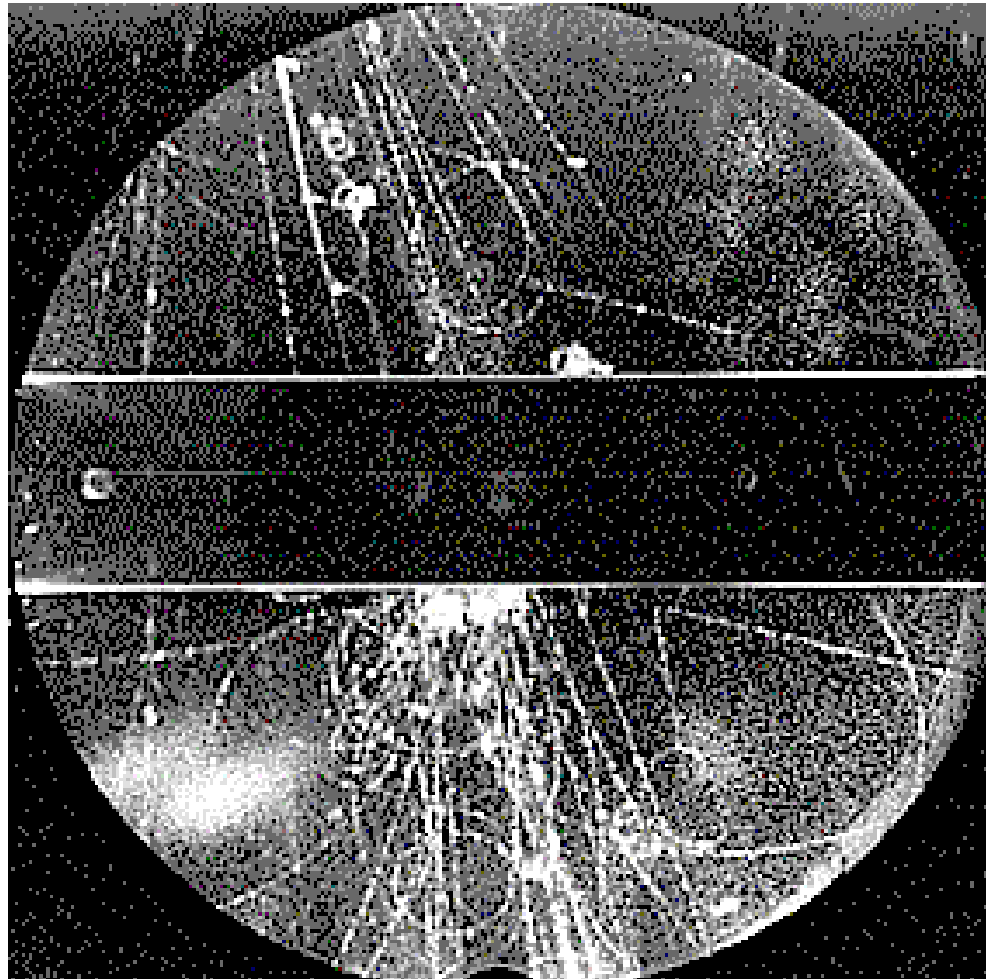
Odkritje piona

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



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

Odkritje kaonov



svinčena plošča



Rochester, Butler (1947)

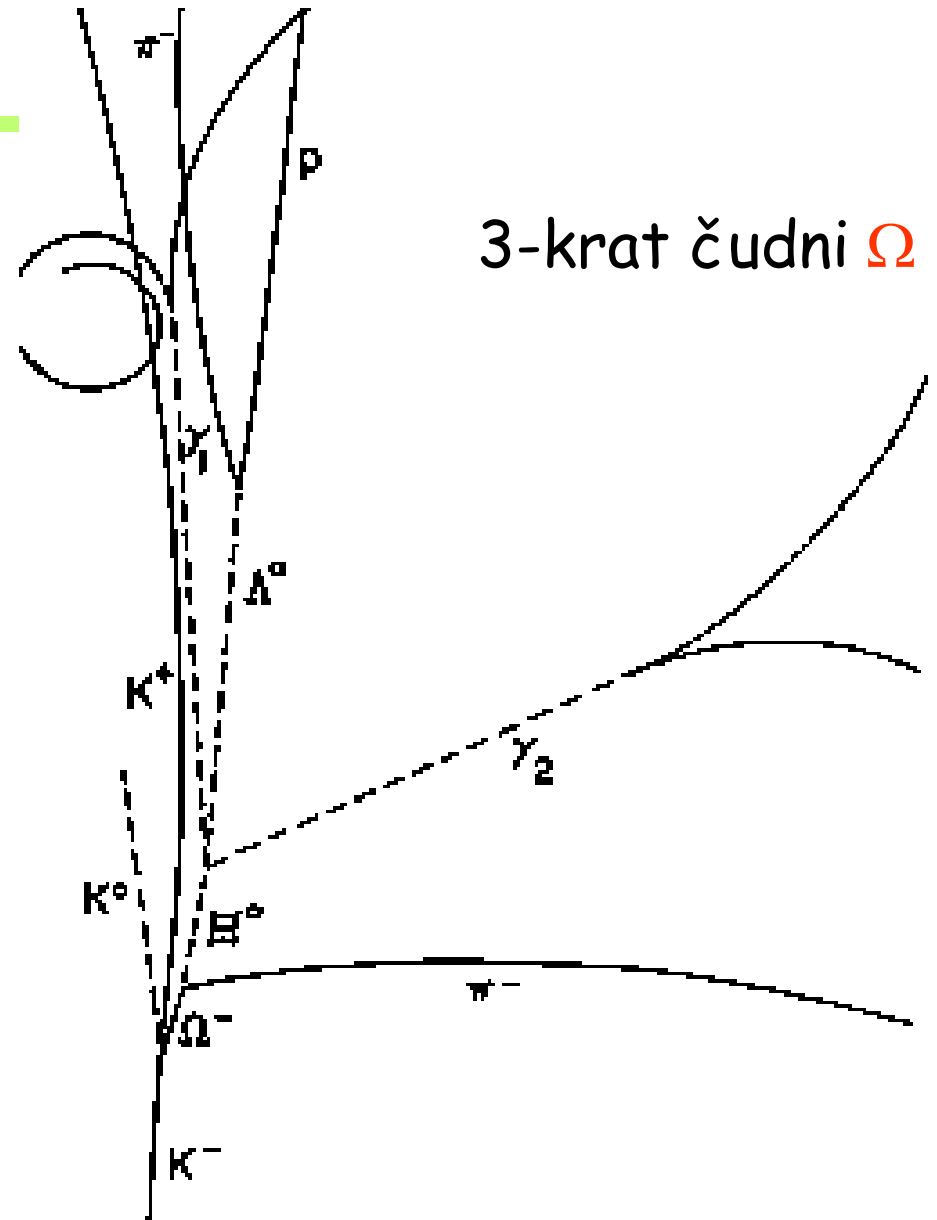
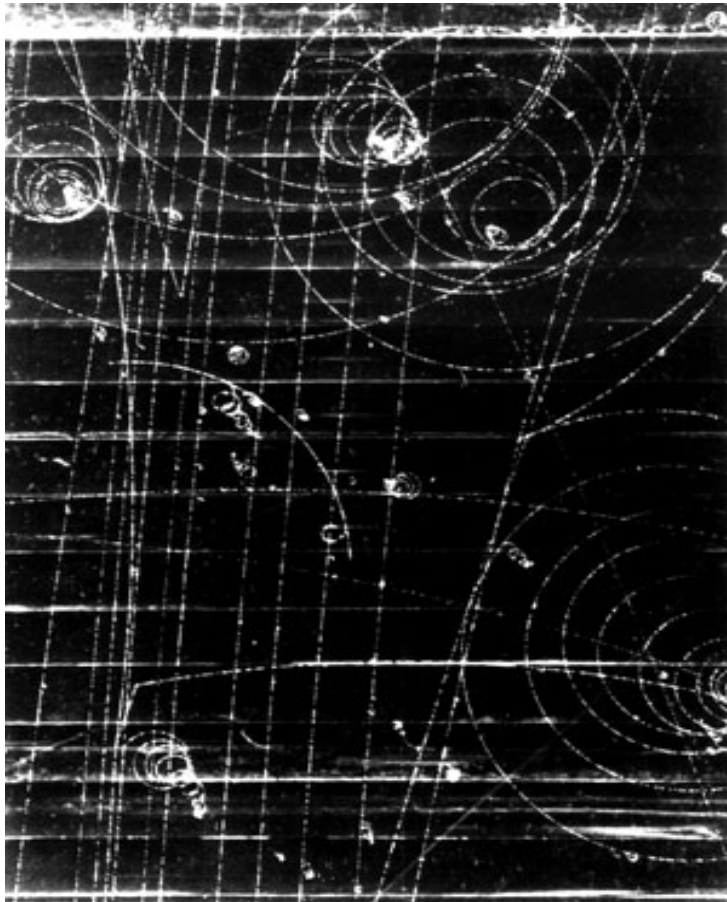
Čudni delci

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

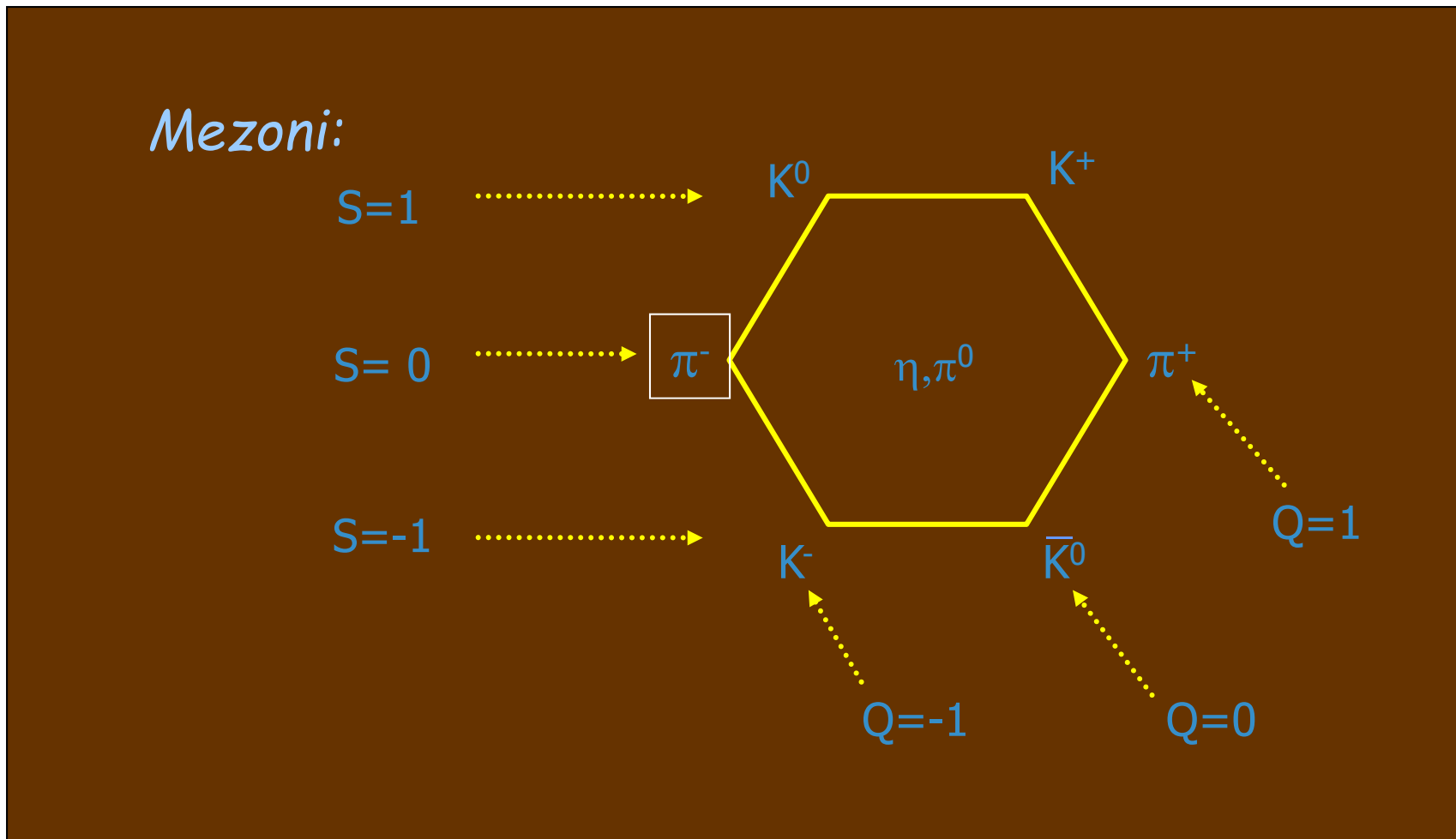
Čudni delci **nastanejo** le **v parih**: recimo
 $p+p \rightarrow p+p+K^++K^-$, ne pa tudi $p+p \not\rightarrow p+p+K^0$
 \rightarrow za nastanek je odgovorna **močna interakcija**, ki ohranja čudnost S (za K^+ $S=+1$, za K^- $S=-1$)

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

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

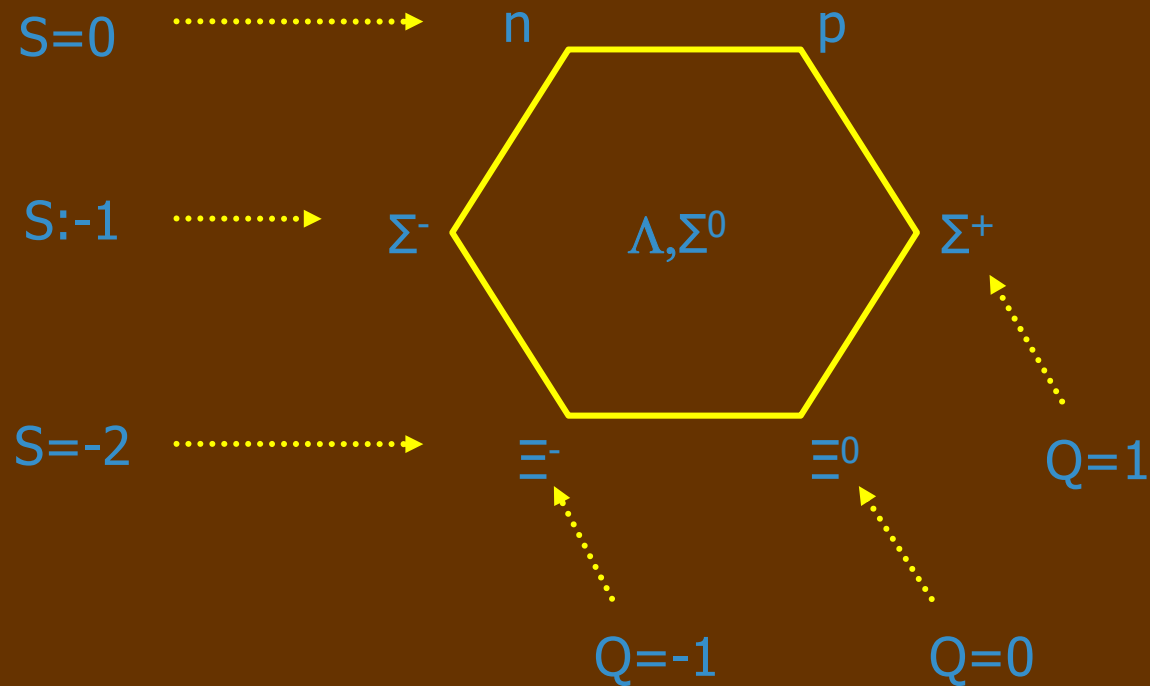


Periodni sistem: naboj in čudnost



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.

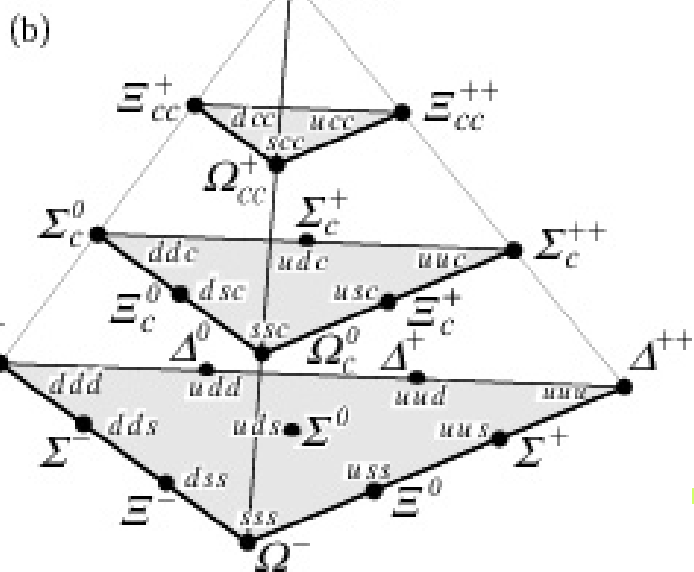
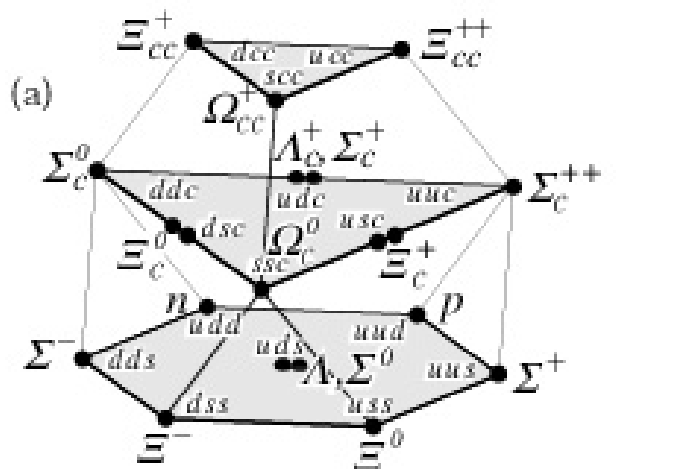
Ali sta torej **p** in **n** osnovna delca?

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

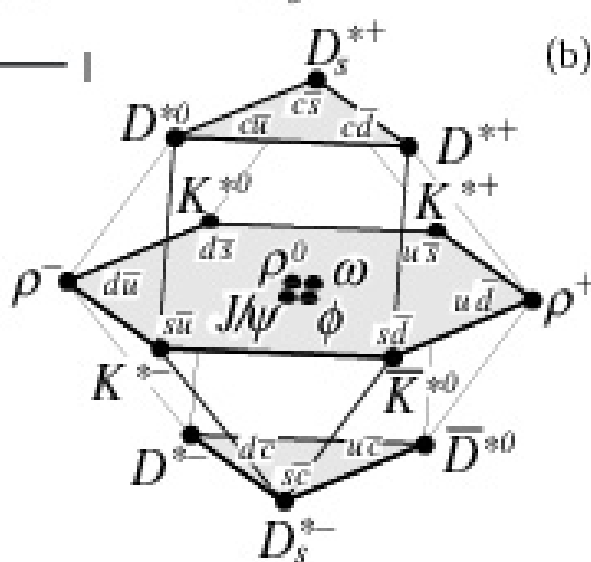
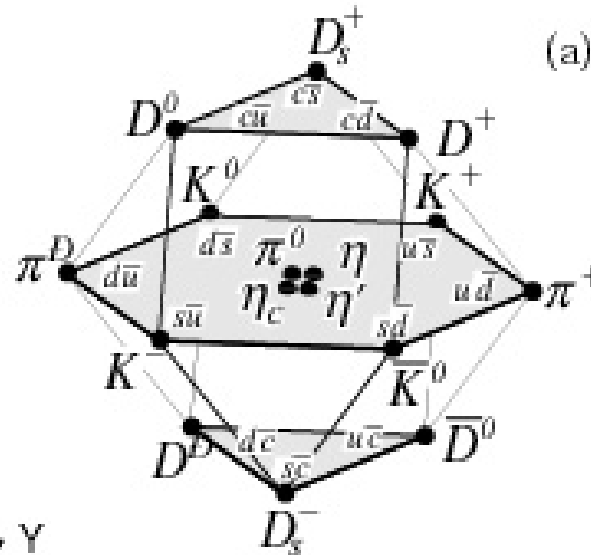
Na poti do osnovnih delcev

Multipleti hadronov \sim periodni sistem.

$J=1/2$



$J=3/2$



$J=0$

$J=1$

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



u: $Q=+2/3$

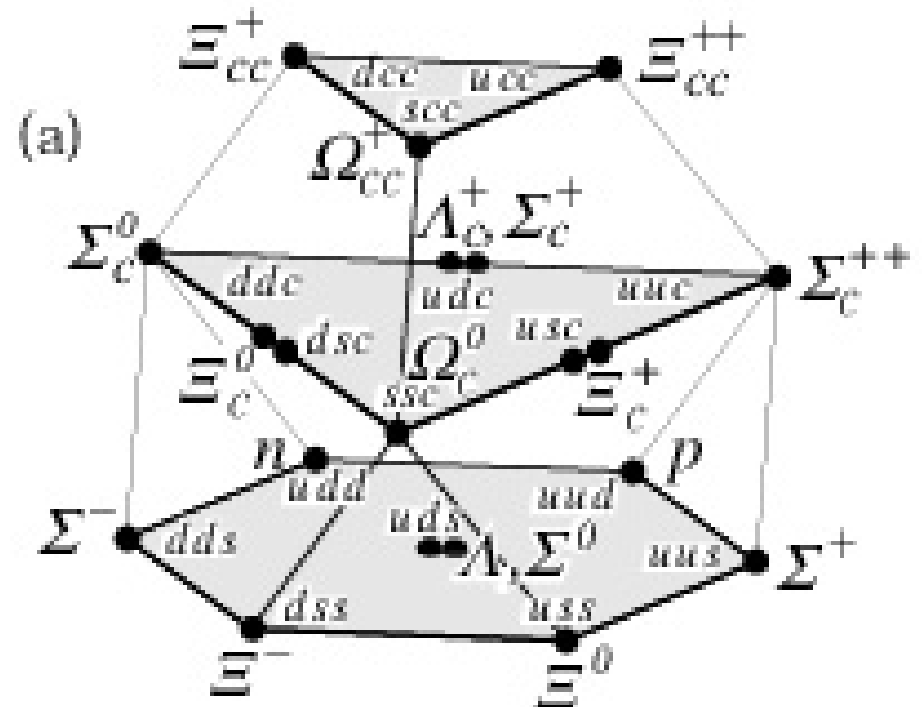
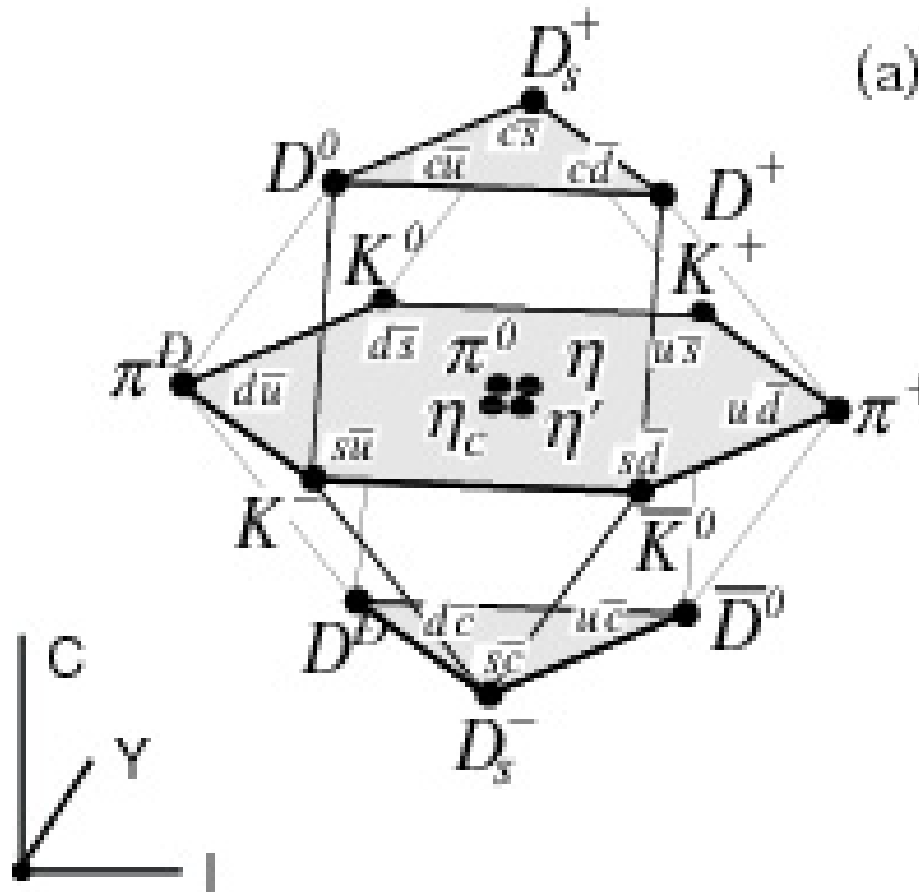
d: $Q=-1/3$

s: $Q=-1/3$

Hadroni: sestavljeni iz kvarkov

Mezoni: kvark + anti-kvark

barioni: trije kvarki

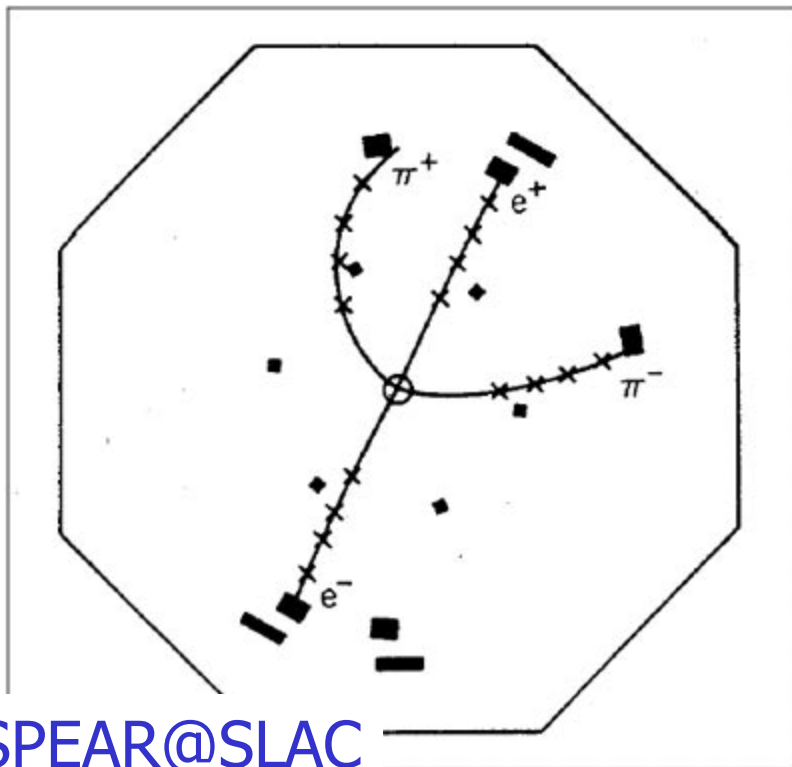


Še več kvarkov: najprej kvark c

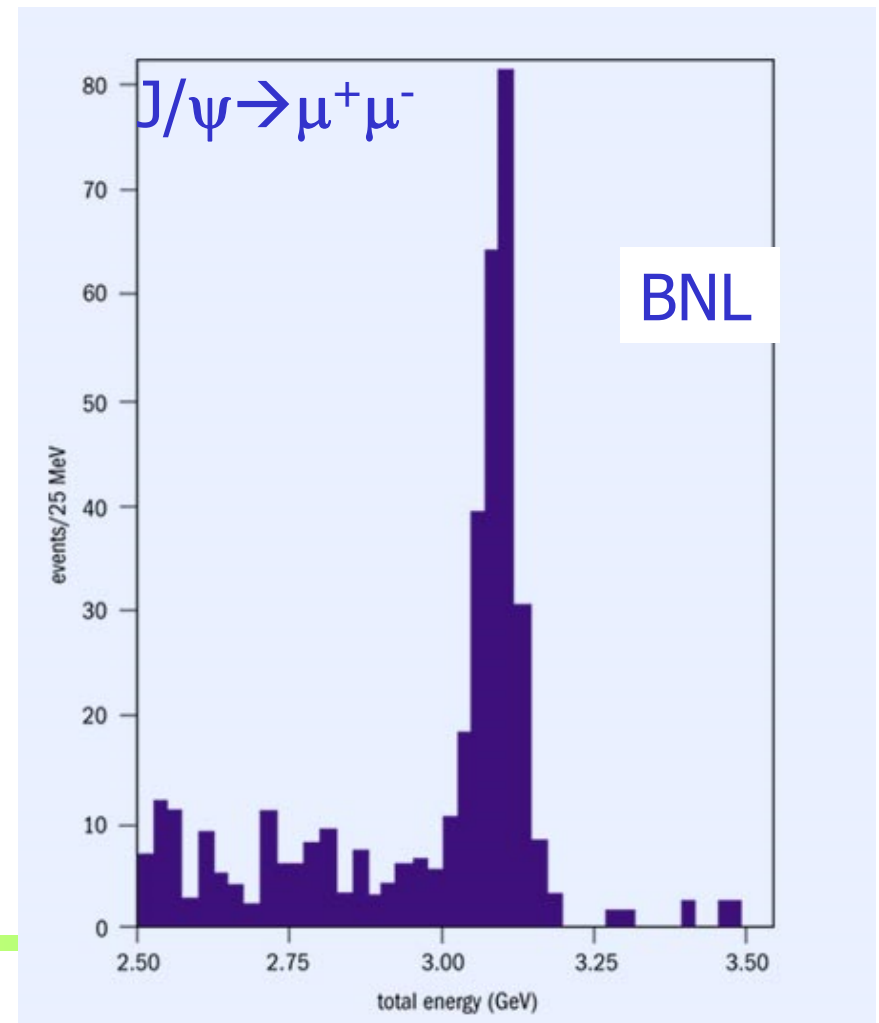
November 1974: odkritje delca J/ψ – vezano stanje **kvarka c** in **anti-kvarka c** pri $3,1 \text{ GeV}/c^2$ (\rightarrow NN Sam Ting in Burt Richter)

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

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



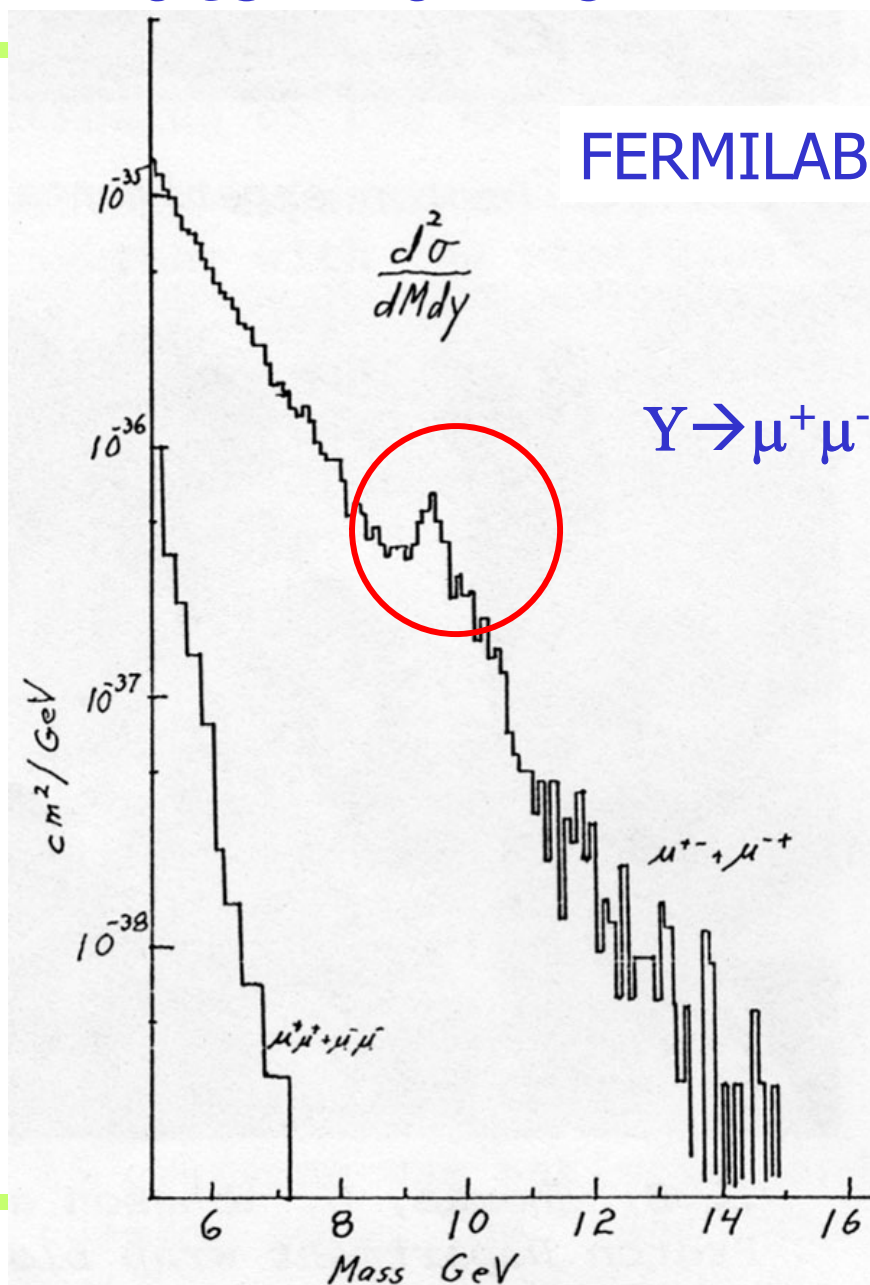
SPEAR@SLAC



Še več kvarkov: nato kvark b

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

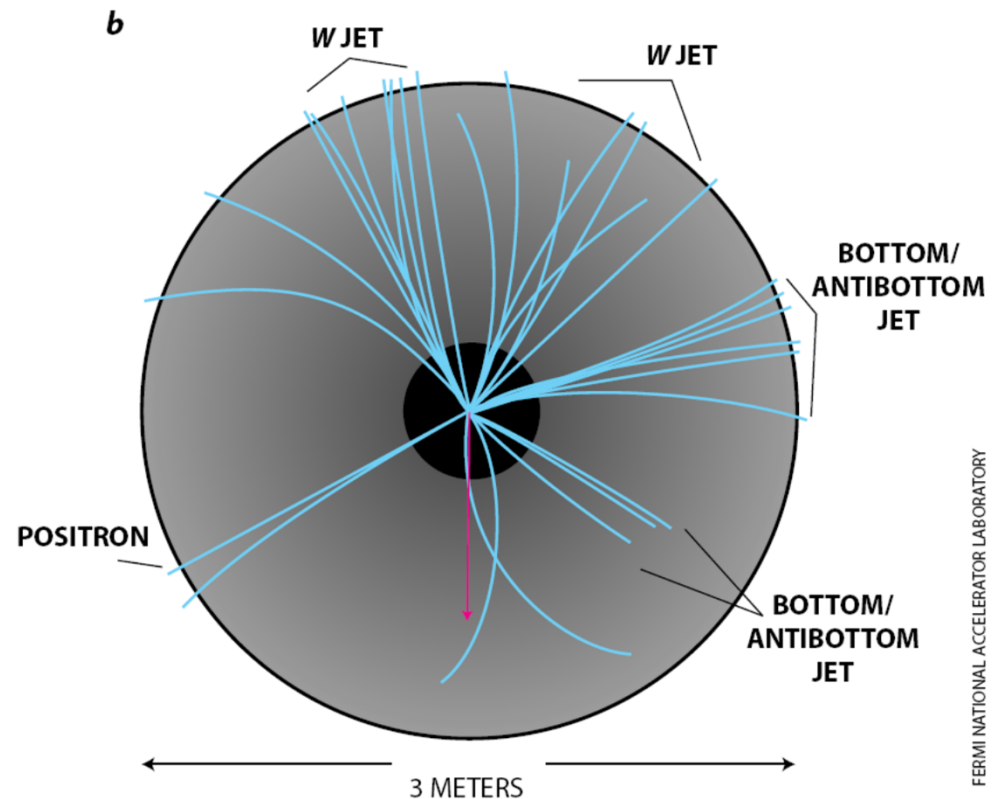
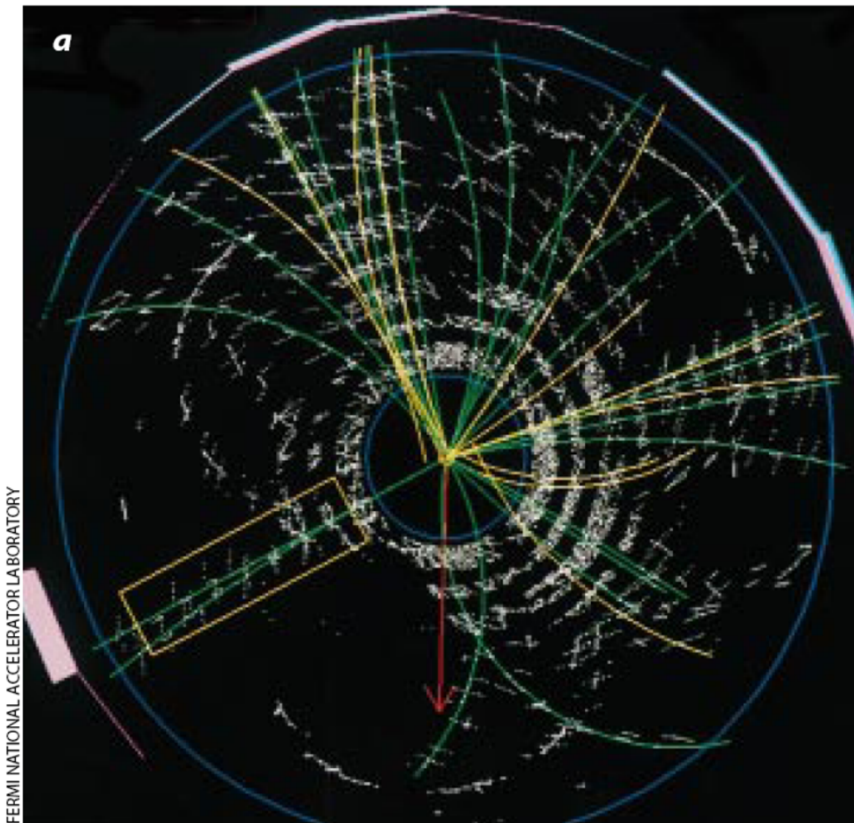
→ Masa kvarka $b \sim 5 \text{ GeV}/c^2$



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)

Standardni model: osnovni delci

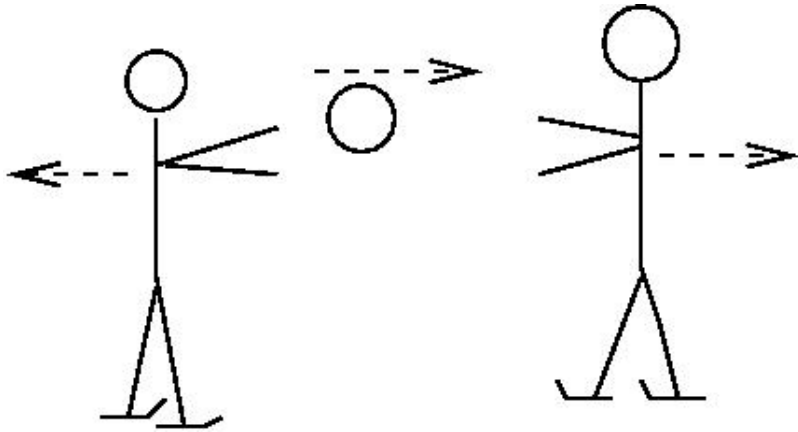
Osnovni delci	1. družina	2. družina	3. družina
kvarki	u,d	s,c	b,t
leptoni	e^- , ν_e	μ^- , ν_μ	τ^- , ν_τ

Barioni in mezoni: vezana stanja kvarkov in anti-kvarkov

Barioni: proton: uud , nevtron: udd

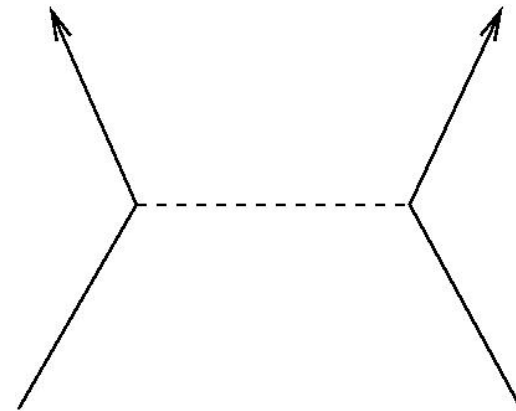
Mezoni:	masa
π^+ : kvark u + antikvark \bar{d}	$1/7 m_p$
K^+ : kvark u + antikvark \bar{s}	$1/2 m_p$
K^0 : kvark d + antikvark \bar{s}	$1/2 m_p$
ϕ : kvark s + antikvark \bar{s}	$1.1 m_p$
J/ψ : kvark c + antikvark \bar{c}	$3 m_p$
B^0 : kvark d + antikvark \bar{b}	$5.5 m_p$

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: 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

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:

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

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

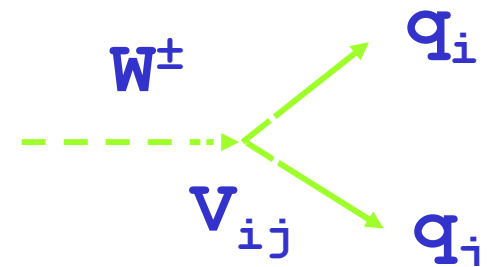
$t \leftrightarrow d, t \leftrightarrow s, t \leftrightarrow b$

Vsi prehodi niso enako verjetni!

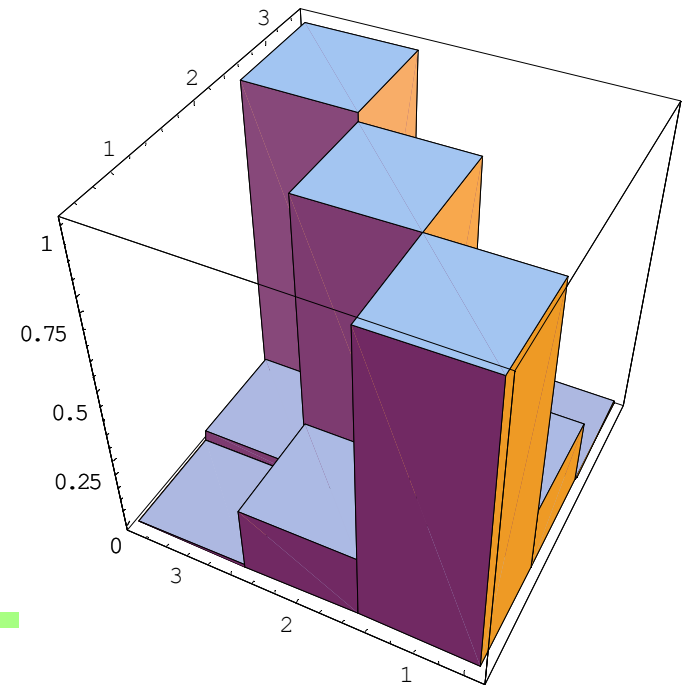
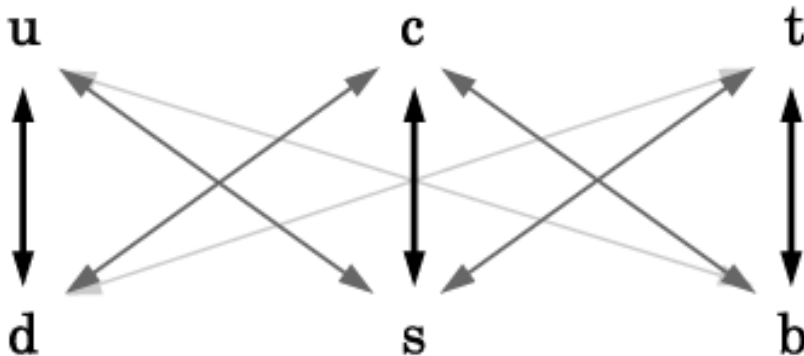
Matrika CKM

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)*

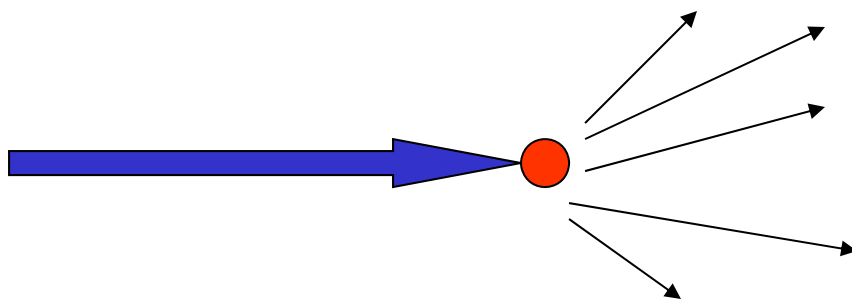
* razen pri propagaciji nevtrinov

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

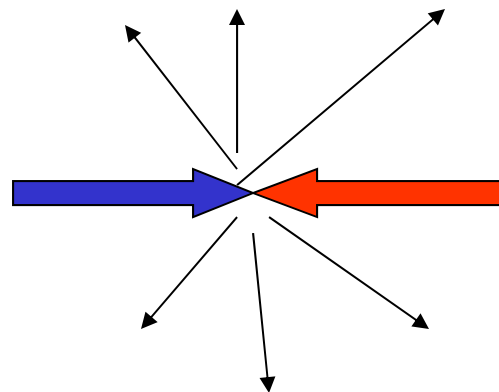
Pospešimo osnovne delce, pri trku se sprosti energija, ta se pretvori v materijo – delce, od katerih so nekateri neobstojni.

Dva načina trkanja:

Poskusi s fiksno tarčo

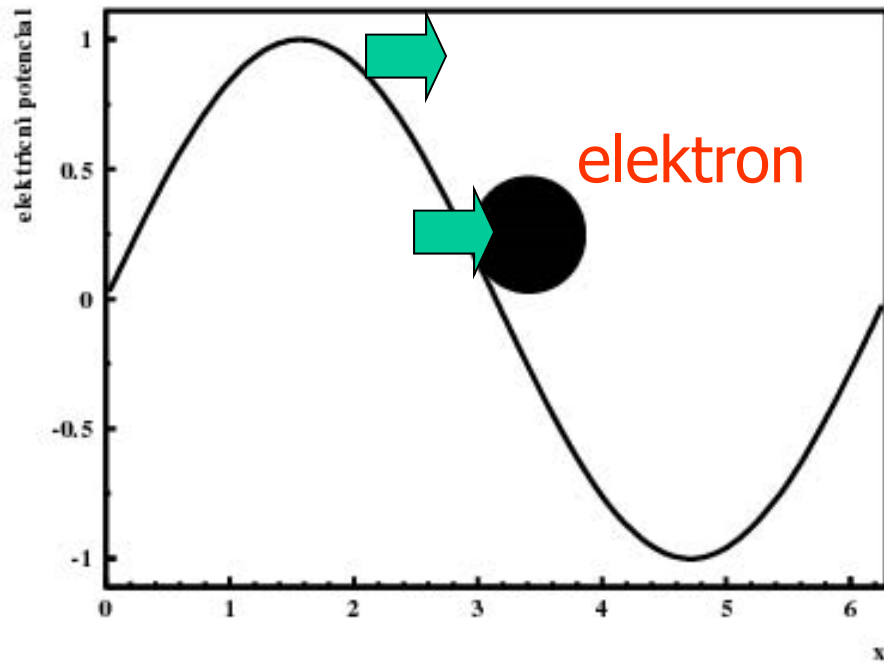


Trkalnik



Kako pospešujemo nabite delce?

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



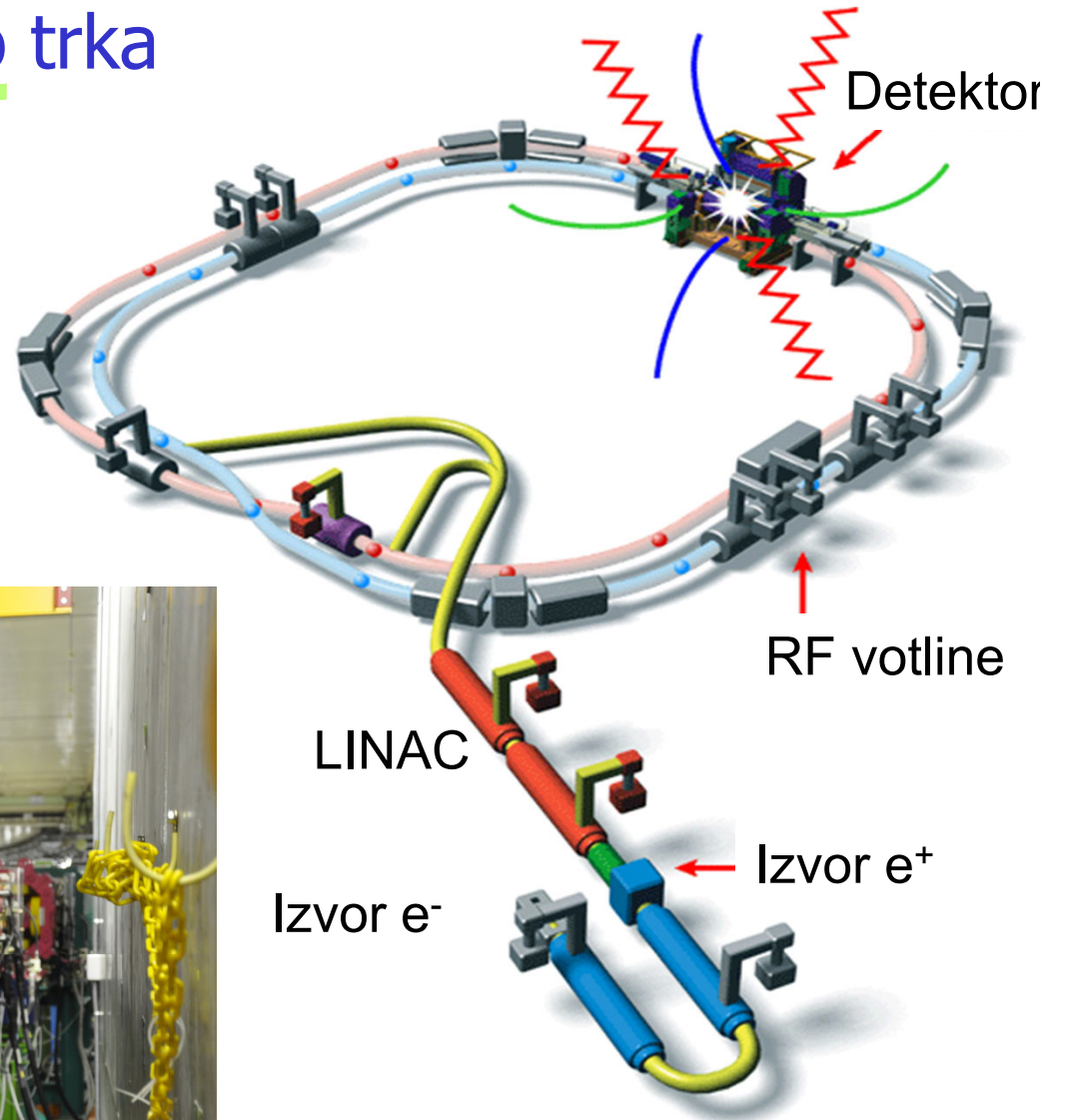
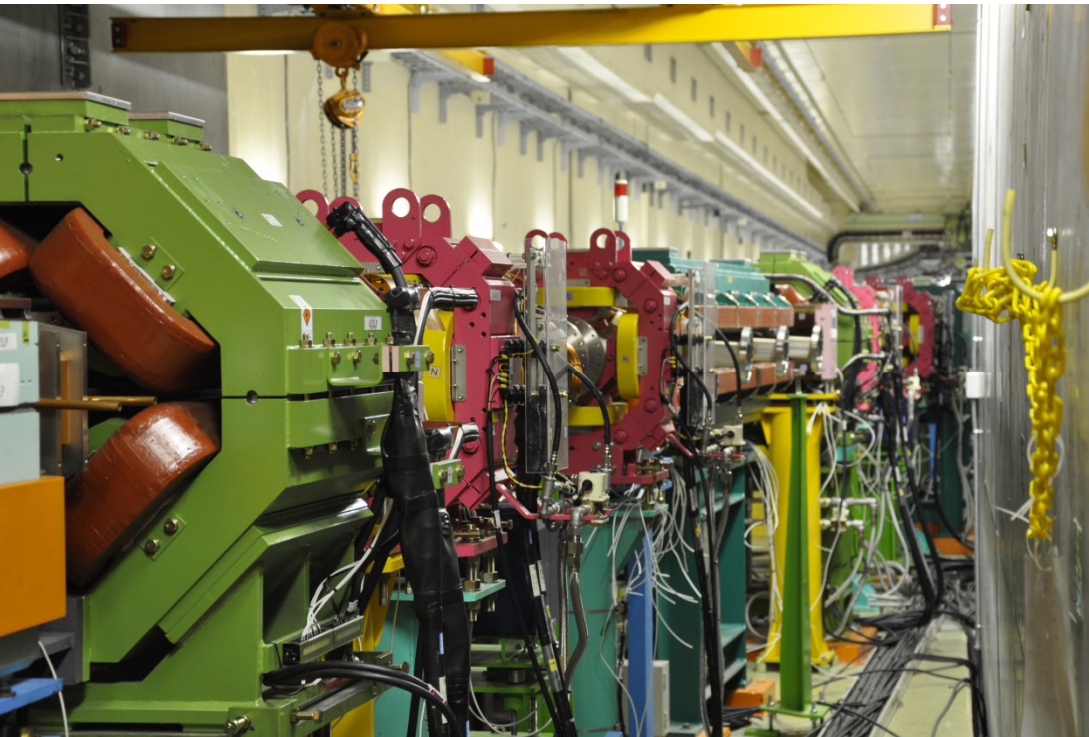
... podobno deskanju na valovih

Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi

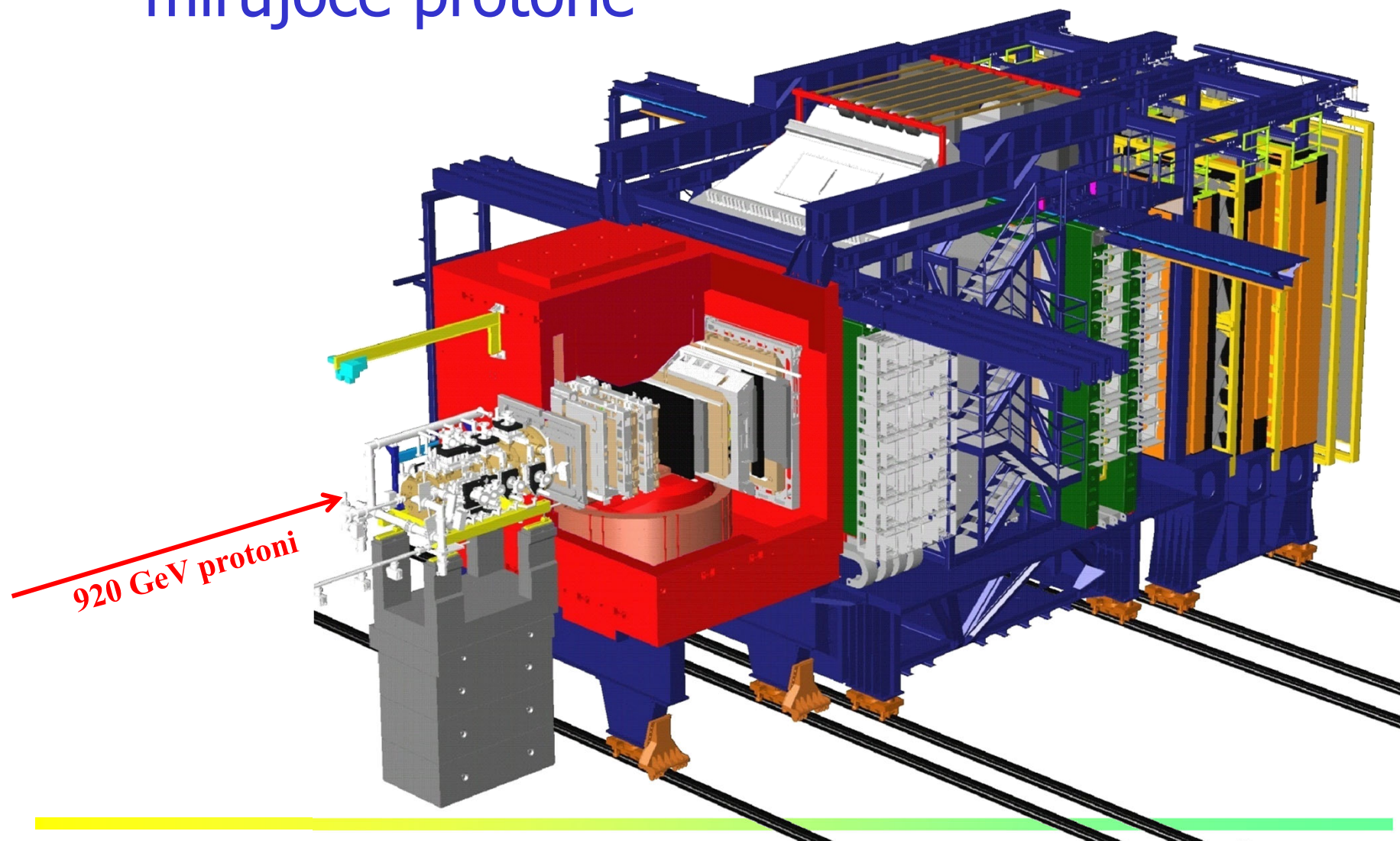
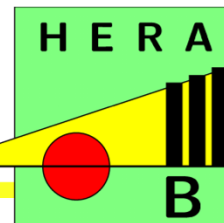


Trkalnik KEK-B pospešuje elektrone in pozitrone do trka

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

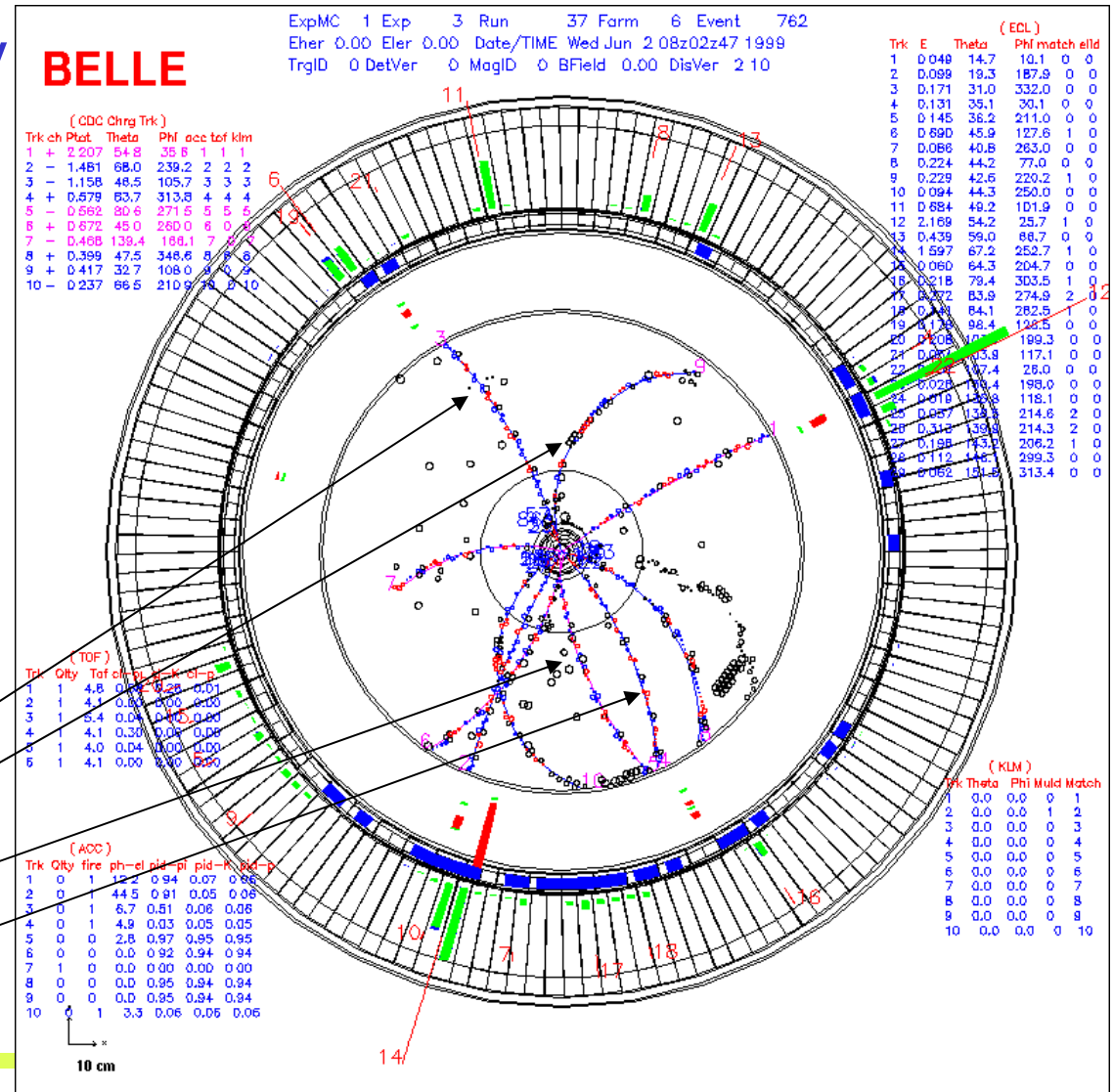
Kaj izmerimo z detektorjem?

- 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

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

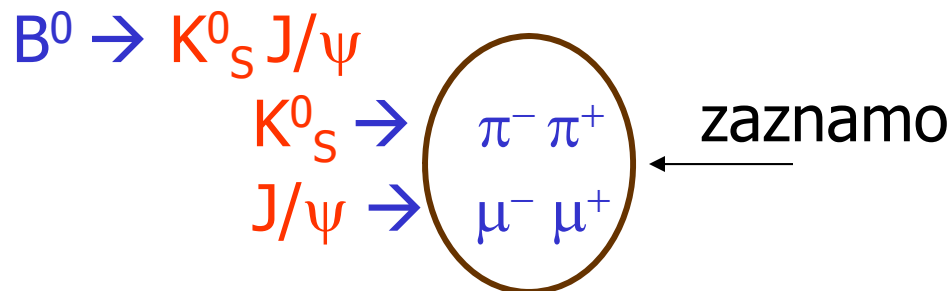
$$K^0_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

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



Kaj izmerimo z detektorjem? -2

Kako vemo, da je potekla spodnja reakcija?

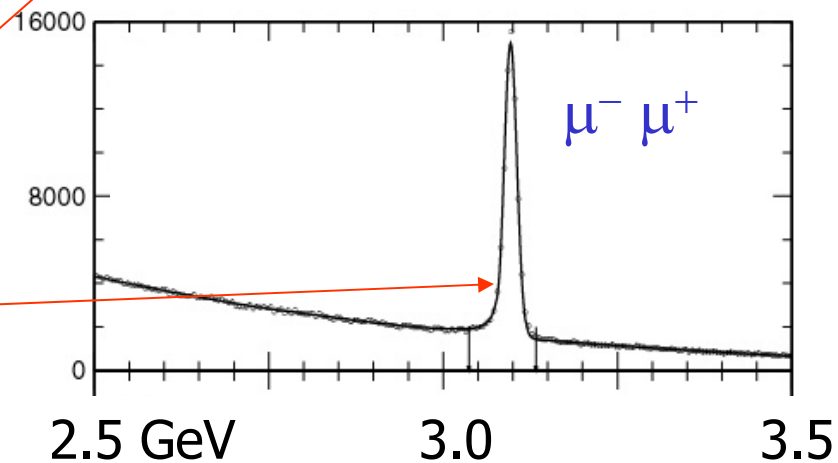
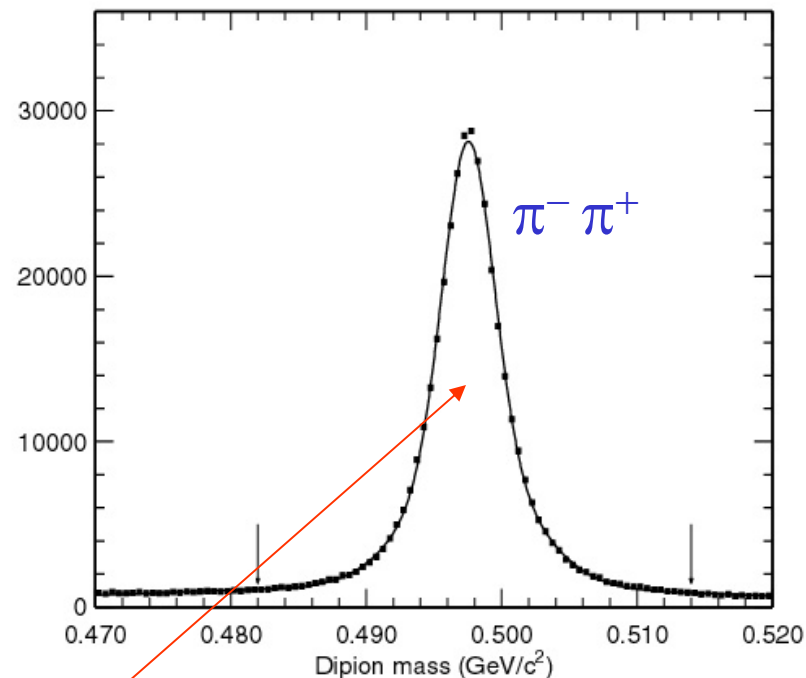


Za pare $\pi^- \pi^+$ in $\mu^- \mu^+$ izračunamo invariantno maso:

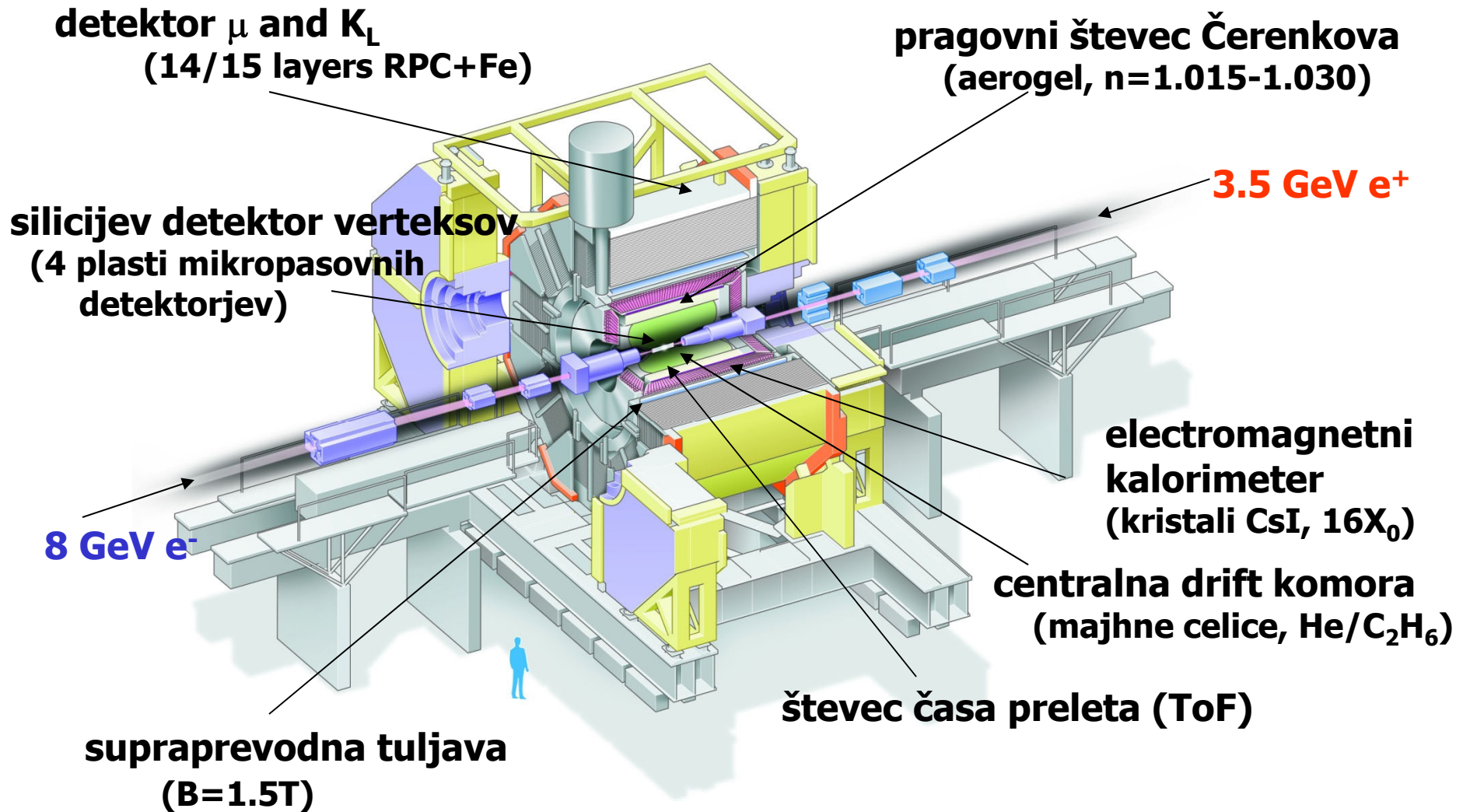
$$M^2 c^4 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$$

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

Ostalo: naključne kombinacije.



Spektrometer Belle

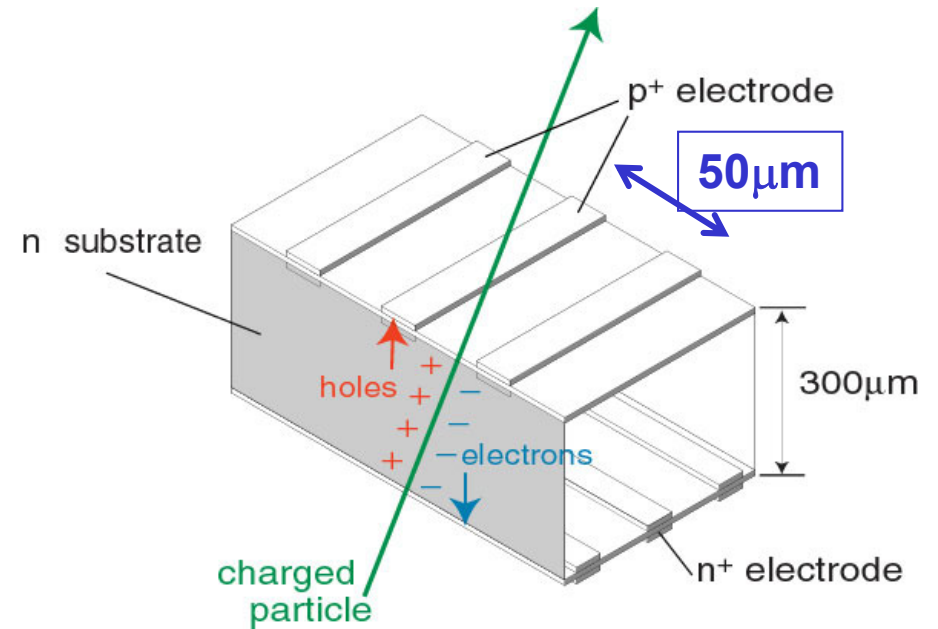
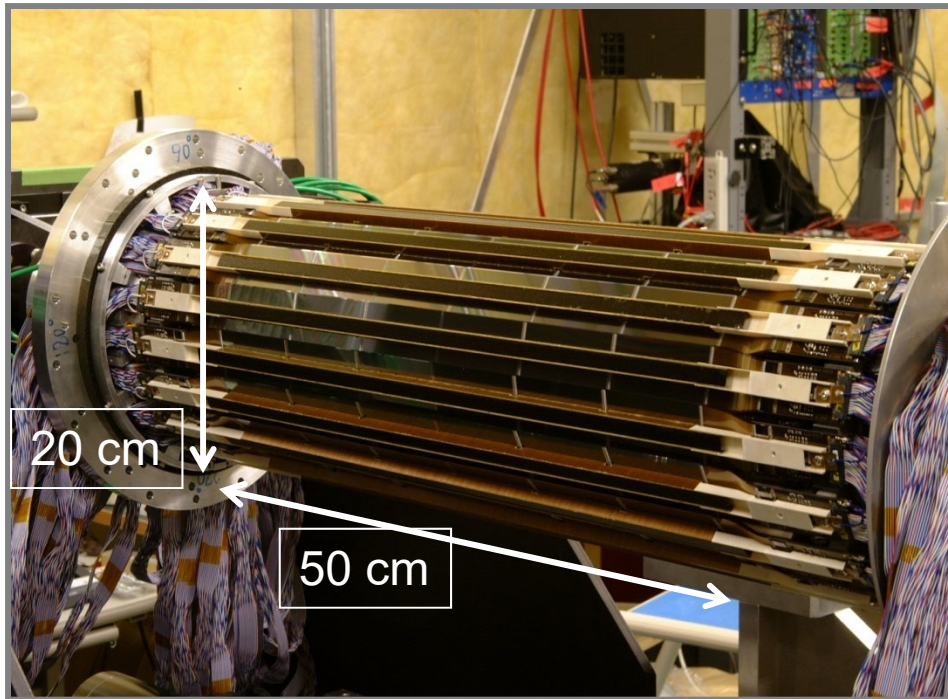


Detektor verteksov

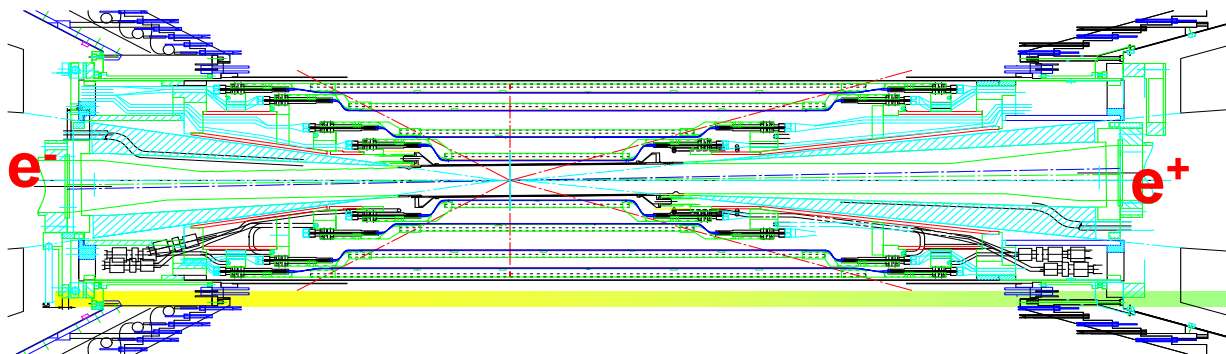
- Eden bistvenih elementov detektorja je detektor verteksa, točke, kjer je mezon B razpadel.
- Zelo občutljiv kos aparature iz $300\mu\text{m}$ debelih silicijevih plošč z gosto nanešenimi elektrodami: natančnost meritve mesta preleta nabitega delca: $10\mu\text{m}$!



Silicijev detektor verteksov



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

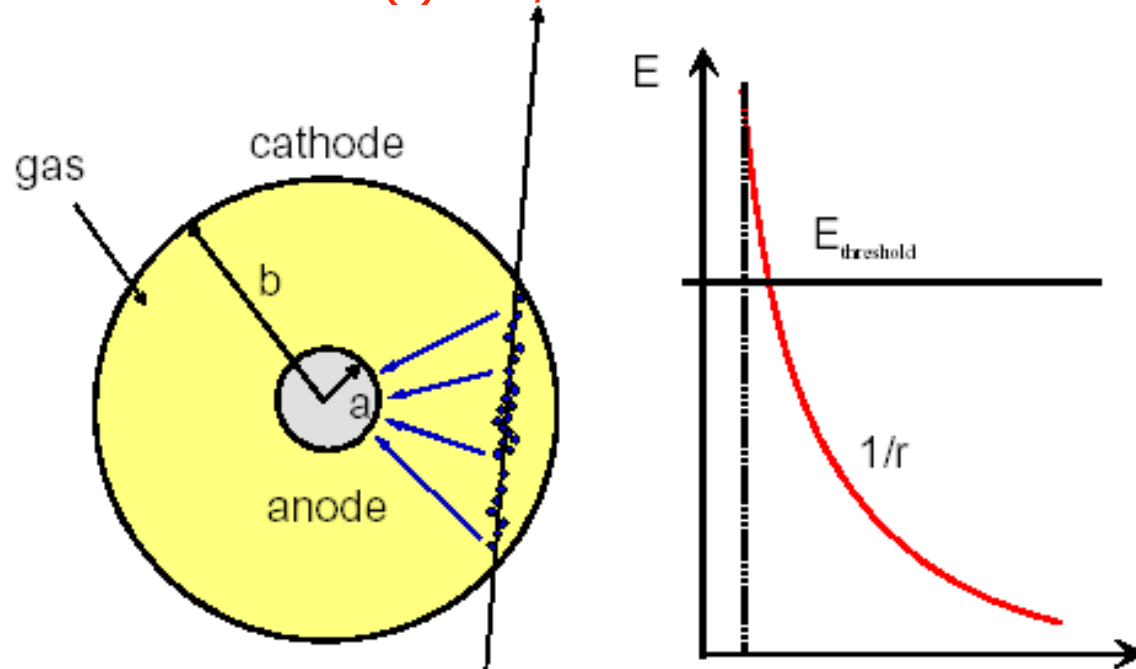


Sledenje delcev v plinu: drift komora

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

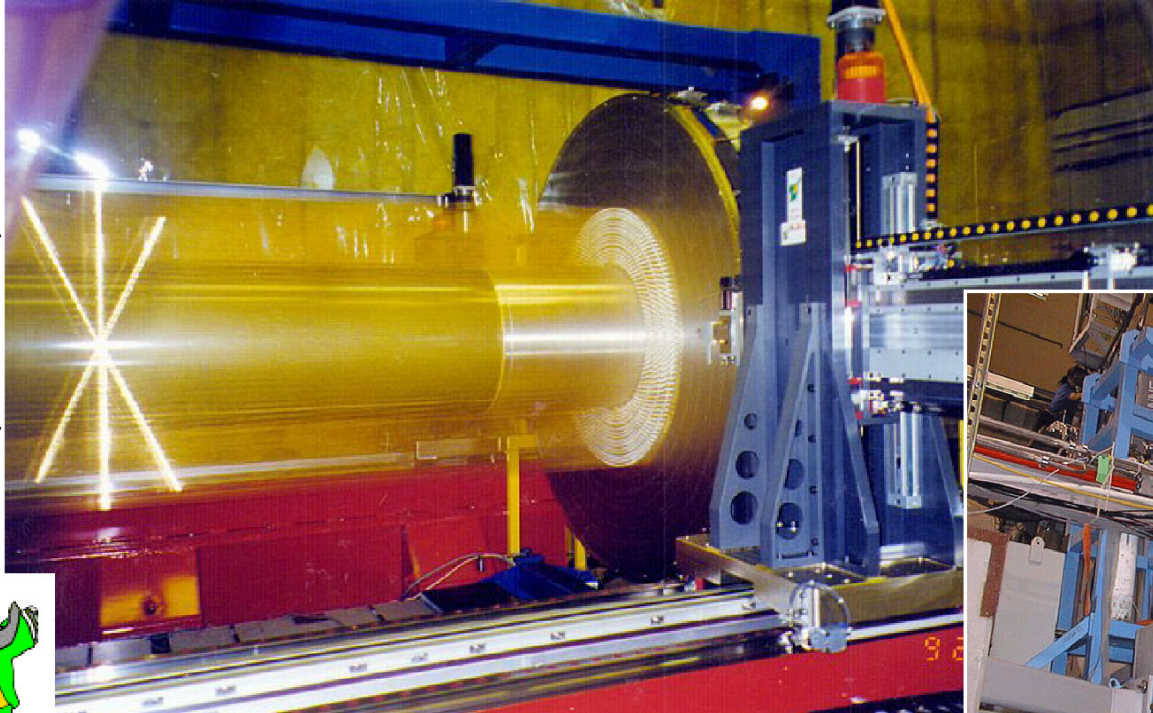
Sledenje delcev: drift komora

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

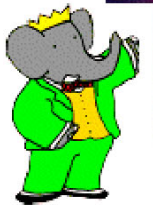
~4m



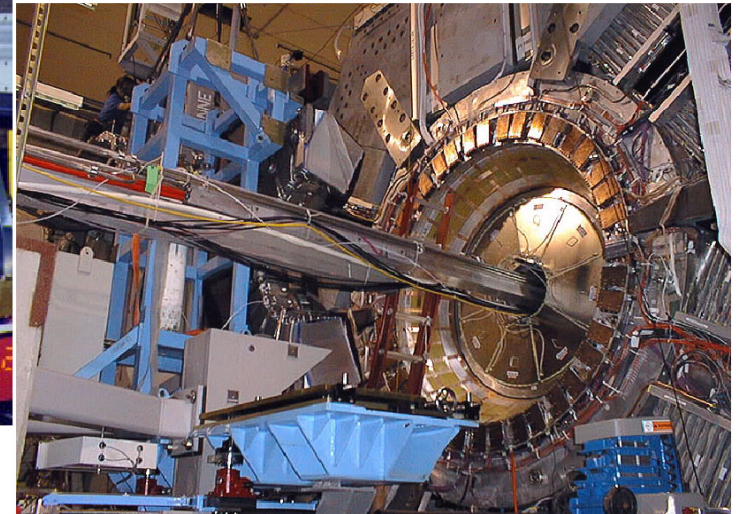
~2m



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



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: $p = \gamma m v$

Ločeno izmerimo

- gibalno količino **p** (ukrivljenost tira v magnetnem polju)
- hitrost **v**

čas preleta (\sim štoparica)

ionizacijske izgube (odvisne od hitrosti) →

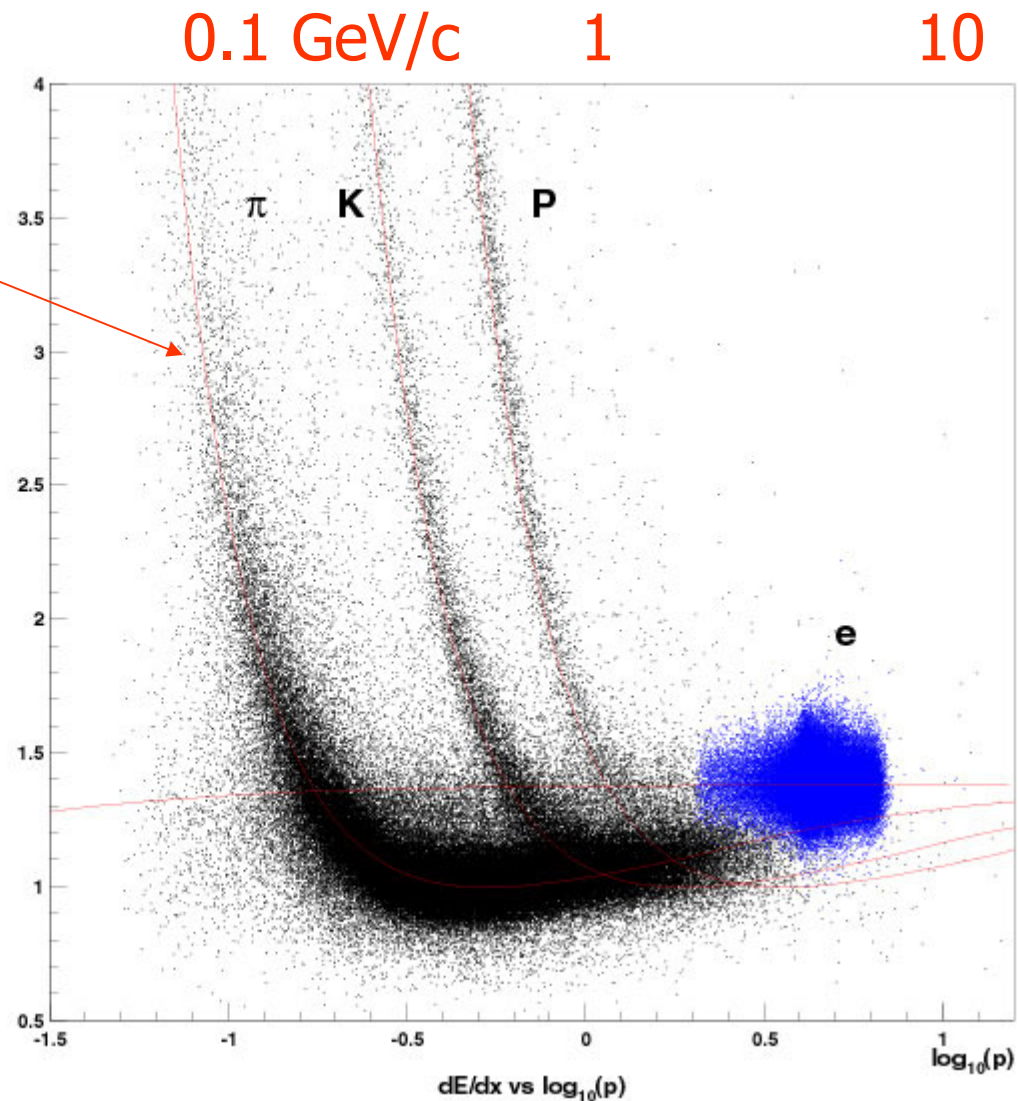
velikost kota Čerenkova →

Identifikacija z meritvijo energijskih izgub (dE/dx)

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

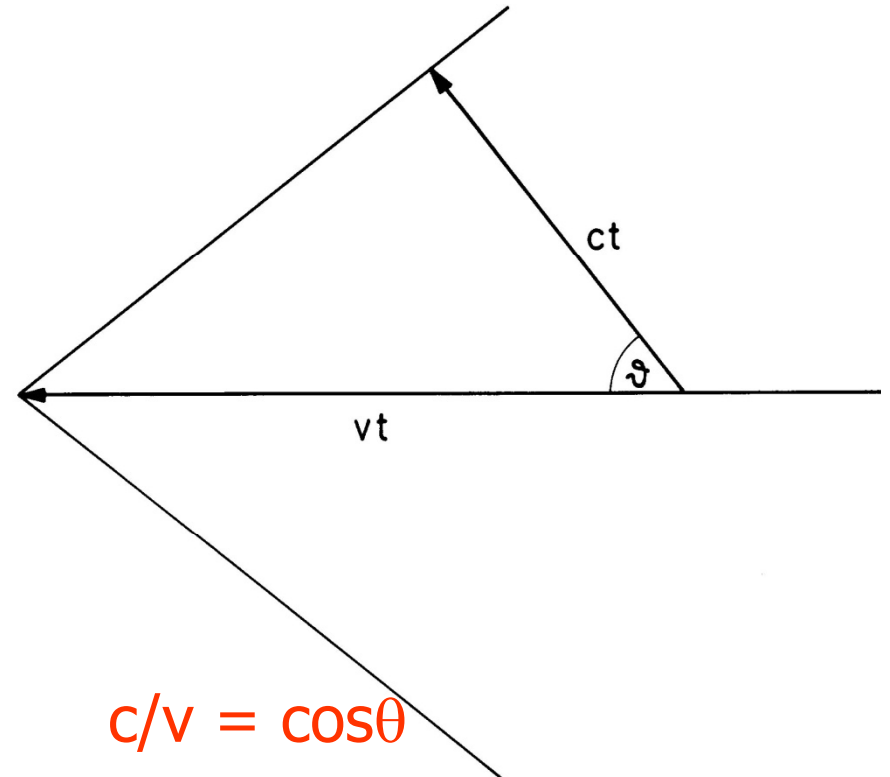
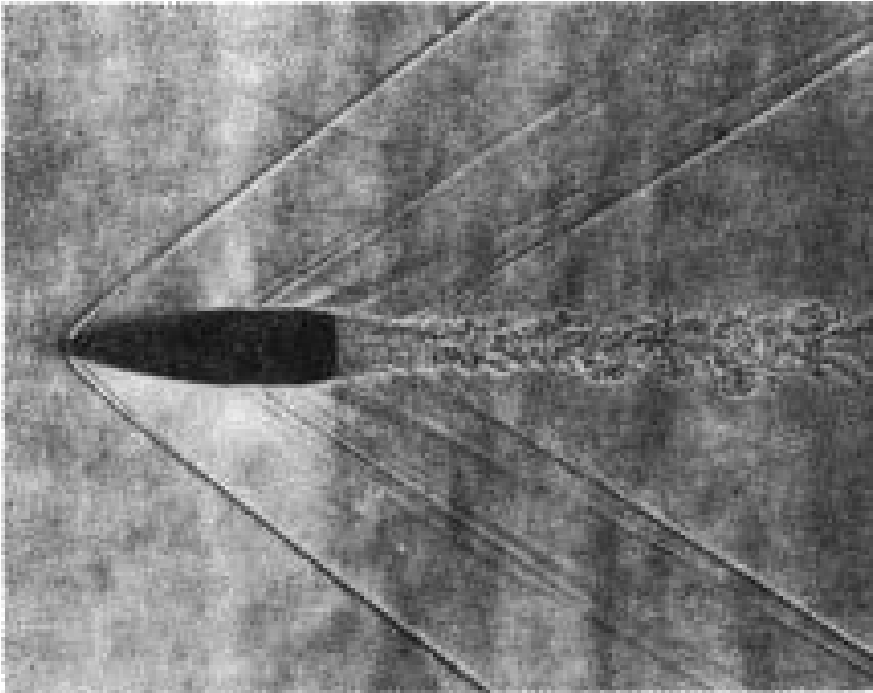
dE/dx izgube v veliki drift
komori \rightarrow

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



Identifikacija preko sevanja Čerenkova

Fronta pri nadzvočnem letu



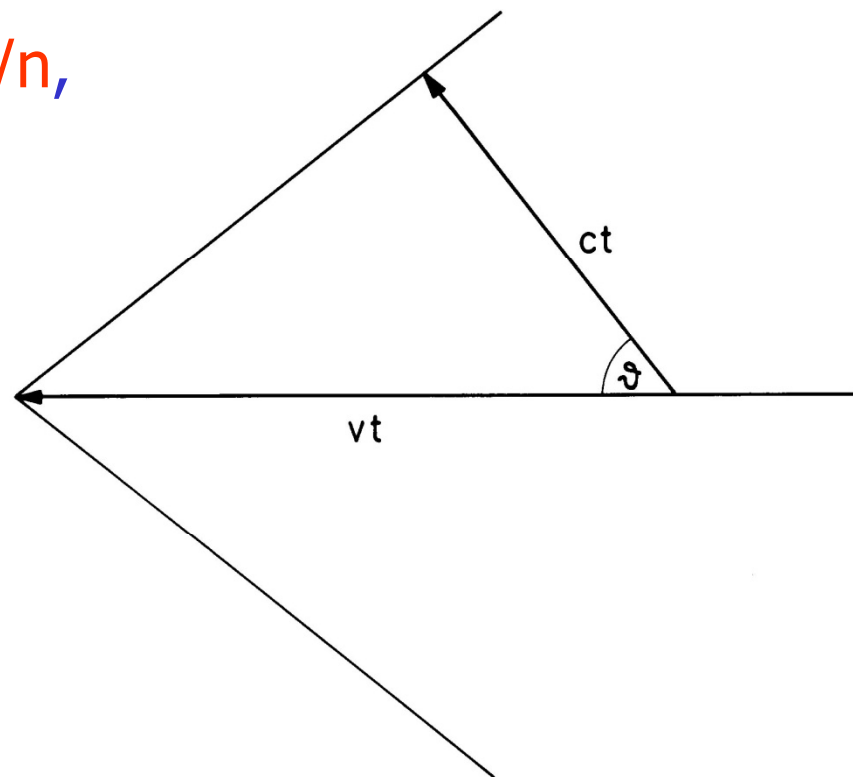
Na sliki: kot 52° , $v = c/\cos\theta = 340\text{m/s} / \cos 52^\circ = 552\text{m/s}$
Iz kota fronte določimo hitrost krogle!

Sevanje delca, ki leti hitreje od svetlobne hitrosti v sredstvu

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

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

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

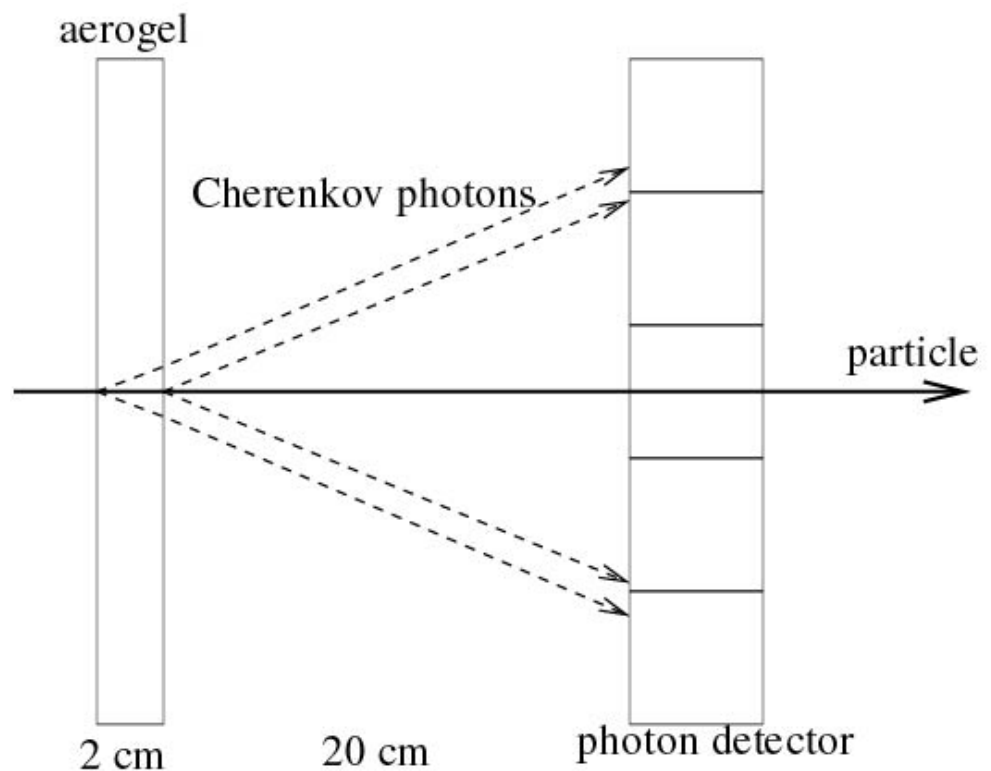


*P.Čerenkov, Nobelova nagrada 1958

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.

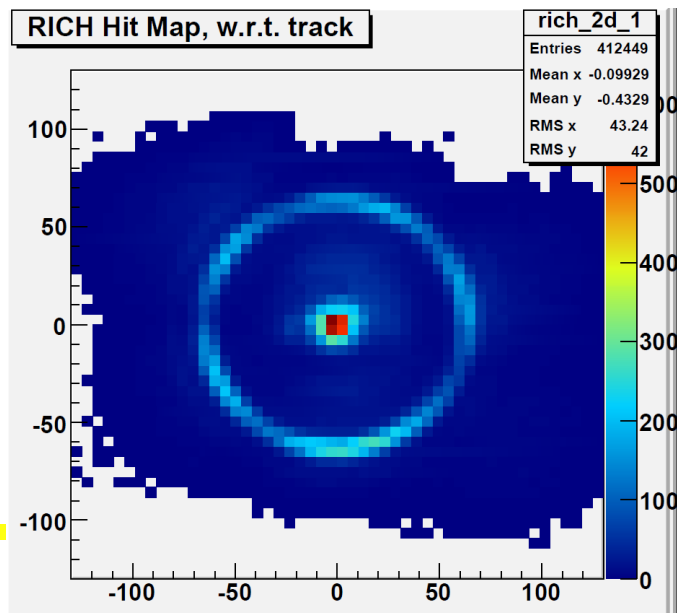
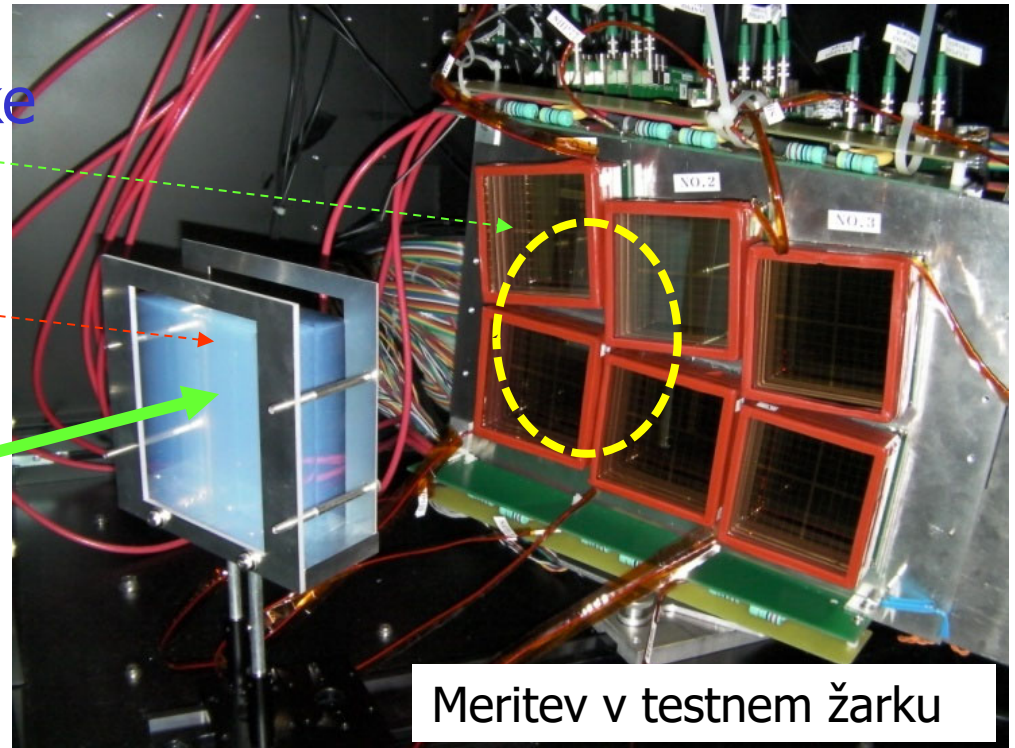


Meritev kota Čerenkova

Hibridne fotopomnoževalke

sevalec – aerogel

pionski žarek



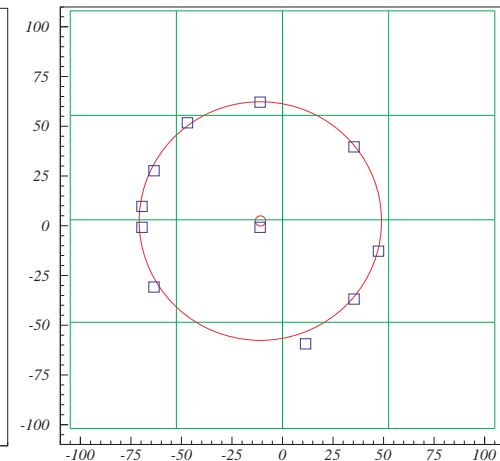
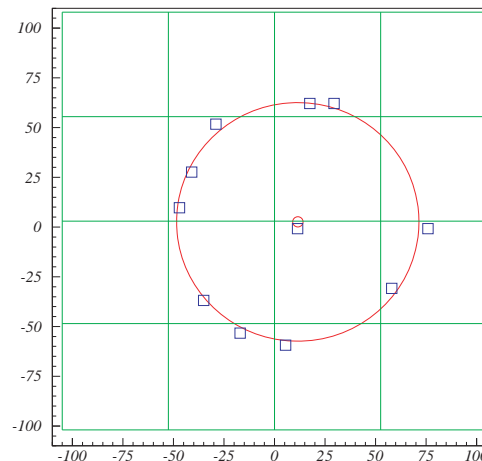
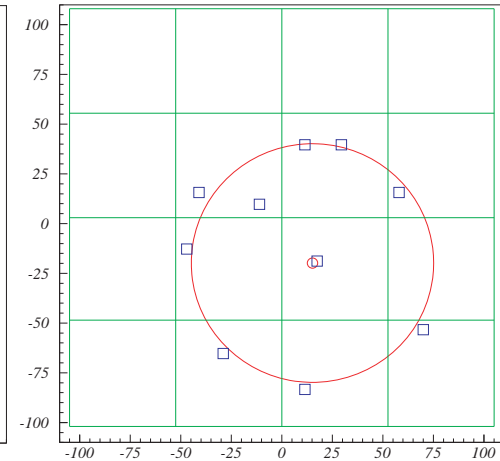
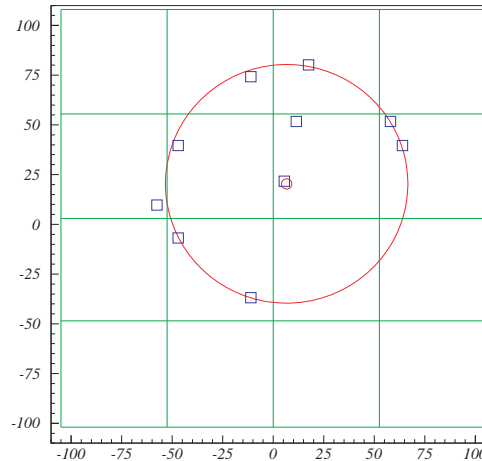
Akumulacija Čerenkovih obročev na fotonem detektorju

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!

Identifikacija nabitih delcev

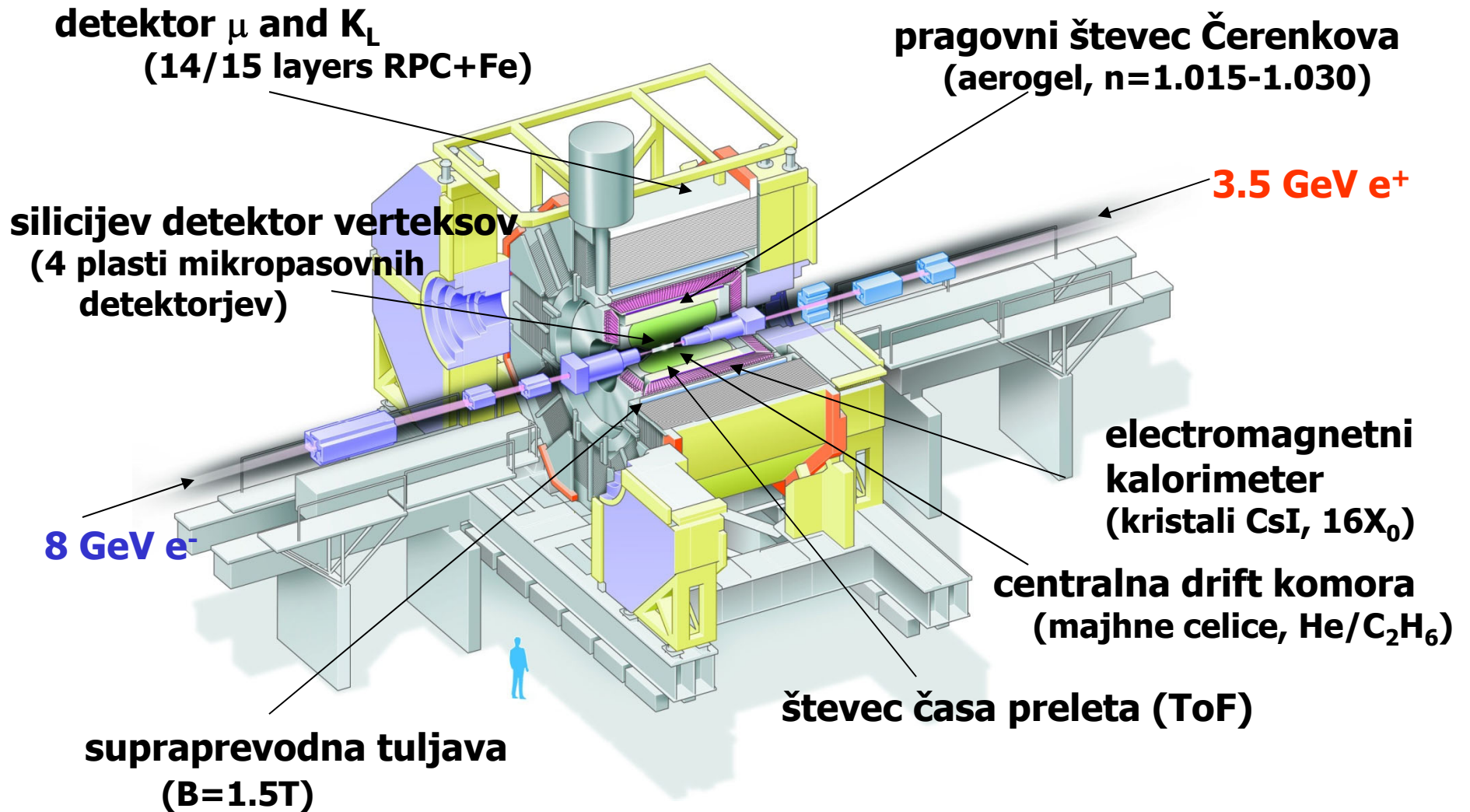
Hadroni (π , K, p):

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

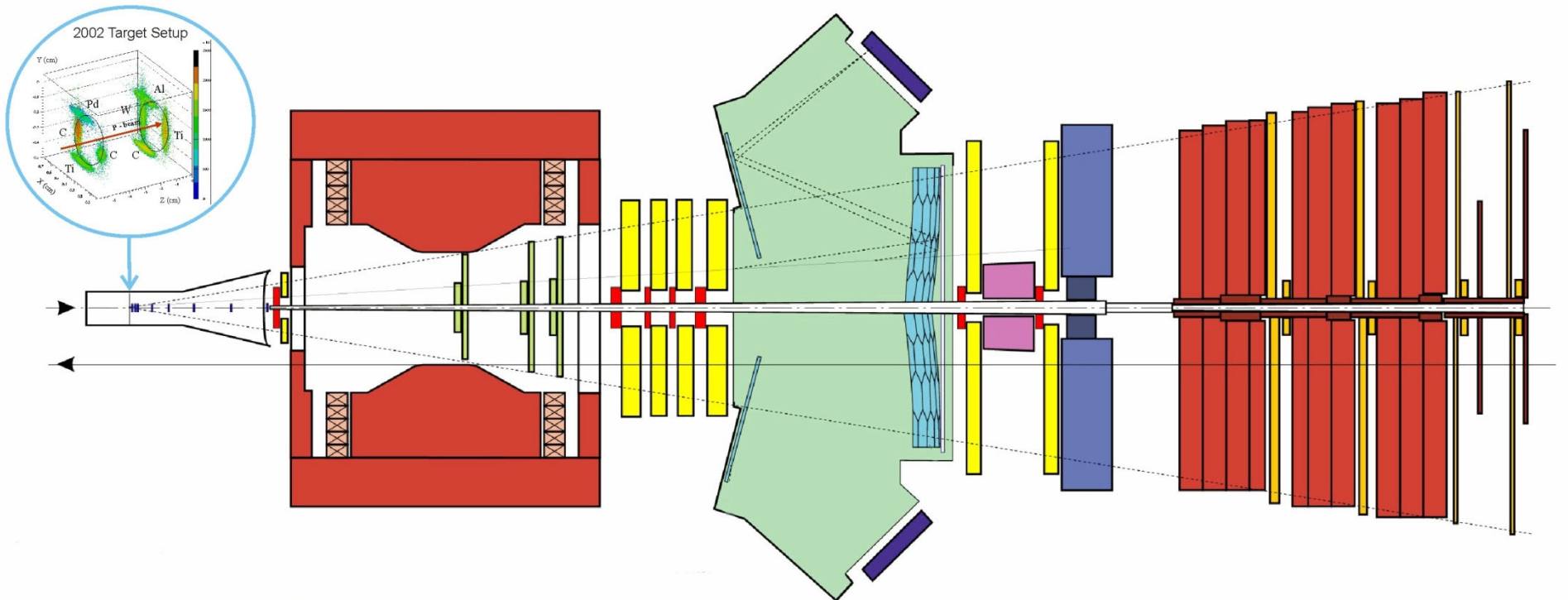
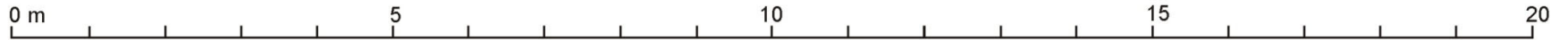
Elektroni: edini zavorno sevajo (dosti manjša masa kot ostali), povzročijo pljusk nabitih delcev v elektromagnetnem kalorimetru (scintilator+fotopomnoževalke)

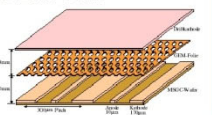
Mioni: interagirajo elektromagnetno, ne sevajo zavorno, preletijo tudi tuljavo magneta in debele železne plošče povratnega jarma.

Spektrometer Belle



HERA-B: detector ob fiksni tarči



<p>Target & Vertex 8 layers of double-sided Si-microstrips, movable on Roman-Pots; 8 wire-target (see above)</p>	<p>High p_T 3 superlayers gas, pixel and pad chambers; pre-trigger for high p_T tracks</p>	<p>Outer Tracker 7 superlayers of honeycomb drift chambers, 5 and 10mm cells</p>	<p>RICH Spherical mirror inside C_4F_{10} radiator, Lens-enhanced multianode PMT focal plane.</p>	<p>Inner Tracker 7 superlayers of Micro Strip Gas Chambers with GEM-foil</p> 	<p>Electromagnetic Calorimeter W/Pb scintillator sandwich, shashlik WLS readout with PMTs; energy-cluster pre-trigger</p>	<p>Muon System 4 superlayers of gas-pixel, tube & pad chambers; pad-coincidence pre-trigger</p>
---	---	---	---	---	--	--

Kaj se da s takimi detektorji izmeriti?

Veliko vprašanje

Zakaj ni v vesolju skoraj nič anti-delcev?

Razlika med količino delcev in antidelcev v zgodnjem vesolju in danes

Na 10 milijard delcev in 10 milijard anti-delcev v zgodnjem vesolju je preživel:

1 sam delec!

10.000.000.000 delcev

10.000.000.000 antidelcev

1 delec

0 antidelcev

→ Delci in anti-delci se obnašajo nekoliko različno

Eksperiment Belle:

Kako se delci razlikujejo od anti-delcev?

Eksperiment Belle: predhodnik eksperimenta Belle II

Najvažnejša meritev: kako se delci (mezoni B) razlikujejo od antidelcev (anti-B)?

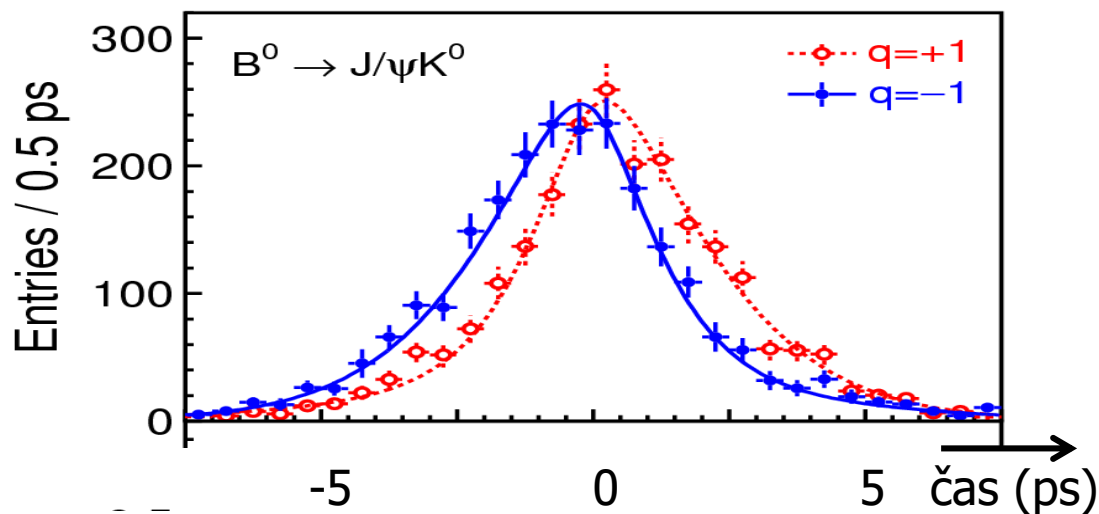
Pri trku elektrona in pozitrona ustvarimo par mezonov, B in anti-B, in nato proučujemo, kako se s časom spreminjajo njune lastnosti.

Ni enostavno: v povprečju razpadeta v lažje delce v bilijoninki sekunde!

Rezultat meritev: zmagoslavje Standardnega modela!

Razlika med delci in antidelci se ujema z napovedjo japonskih fizikov Kobayashija in Maskawe

Nobelova nagrada 2008!



Meritev s spektrometrom Belle:

- Modra: časovni potek razpada za mezone B
- Rdeča: isto za anti-B



Rezultat meritev:

zmagoslavje Standardnega modela!

V utemeljitvi Nobelovega komiteja poudarjena eksperimentalna potrditev teorije → Zmagoslavje tudi za nas!



Peter Križan

Veliko vprašanje

Odkod imajo delci maso?

Zakaj imajo delci maso: Higgsov bozon

Škotski fizik Peter Higgs in belgijski fizik Francois Englert, 1964:
Maso delcev lahko pojasnimo, če predpostavimo, da je prostor napolnjen s poljem – Higgsovim poljem

Elektromagnetno polje → nabit delec (e^-) občuti silo
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

Higgsovo polje → delci imajo maso
velikost mase odvisna od velikosti „Higgsovega naboja“



Higgsov bozon

Škotski fizik Peter Higgs in belgijski fizik Francois Englert, 1964:
Maso delcev lahko pojasnimo, če predpostavimo, da je prostor napolnjen s poljem, seveda – Higgsovim poljem

Elektromagnetno polje → nabit delec (e^-) občuti silo
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

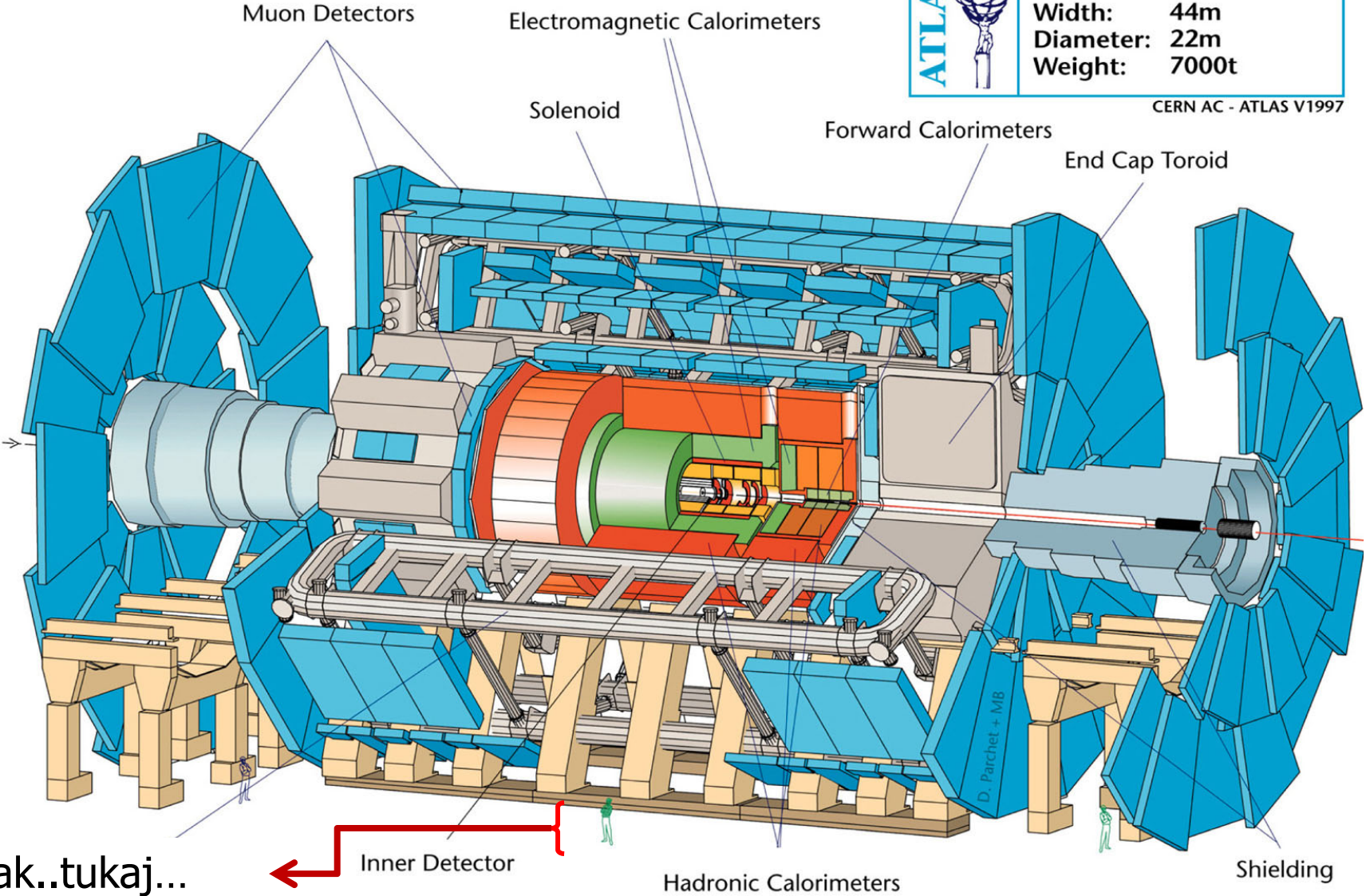
Higgsovo polje → delci imajo maso
velikost mase odvisna od velikosti „Higgsovega naboja“

elektromagnetno polje ima svoje delce – fotone
Higgsovo polje ima svoje delce – **Higgsove bozone**

Detektor ATLAS ob LHC

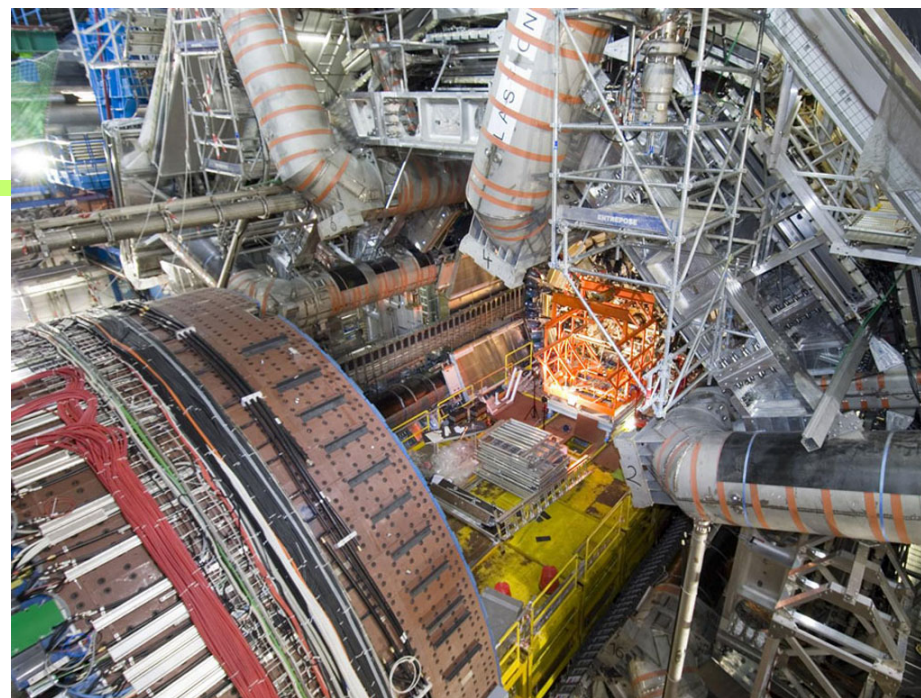
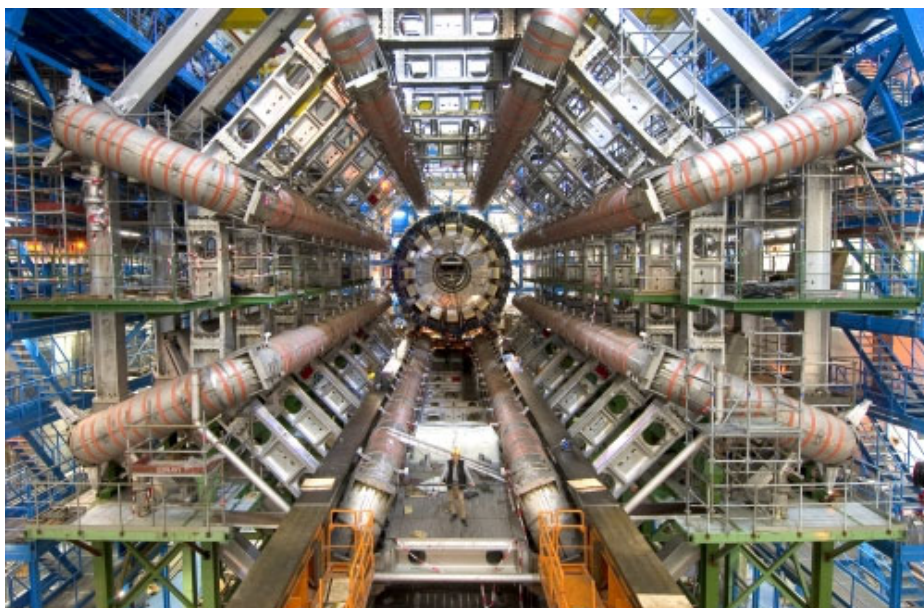
	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997



možak..tukaj...

Detektor ATLAS med gradnjo



Pomemben prispevek slovenske raziskovalne skupine (IJS in FMF UL)

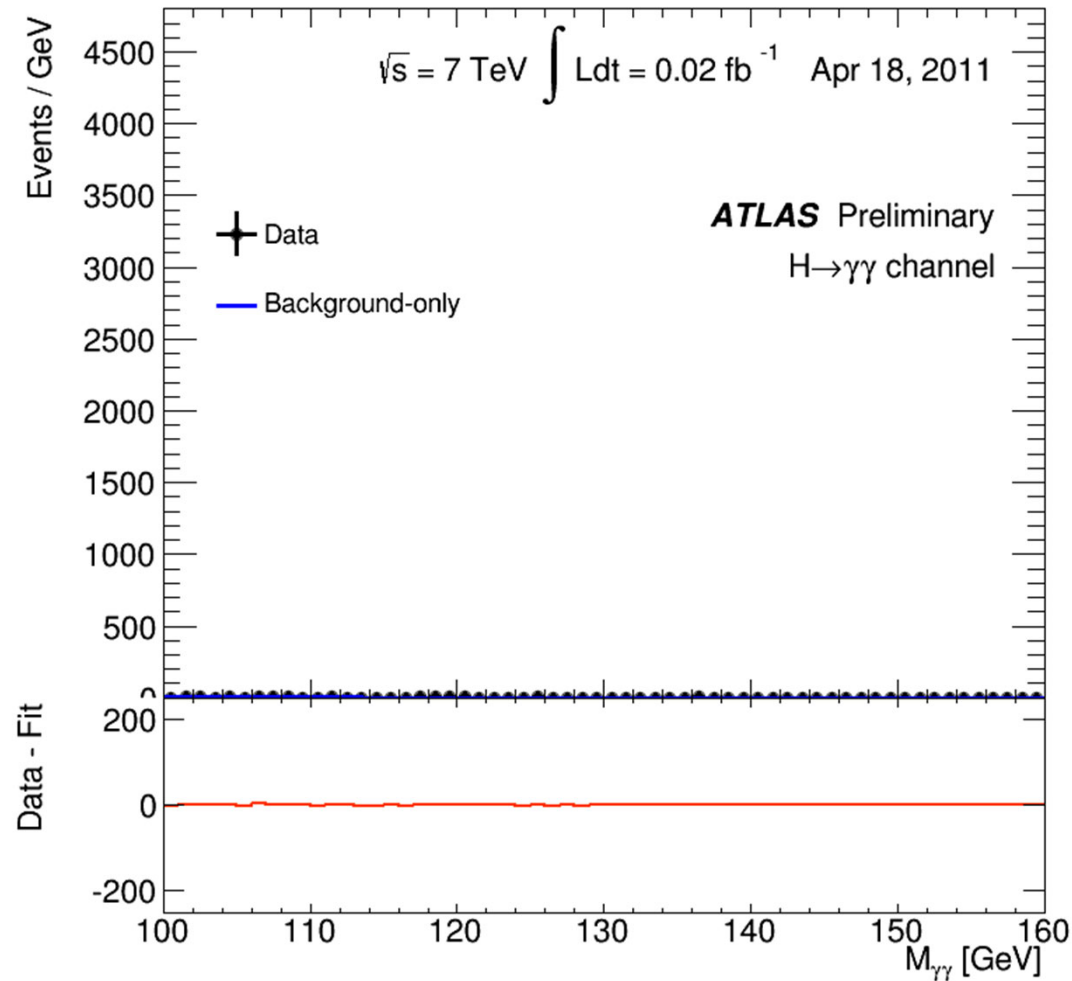


Marko Mikuž

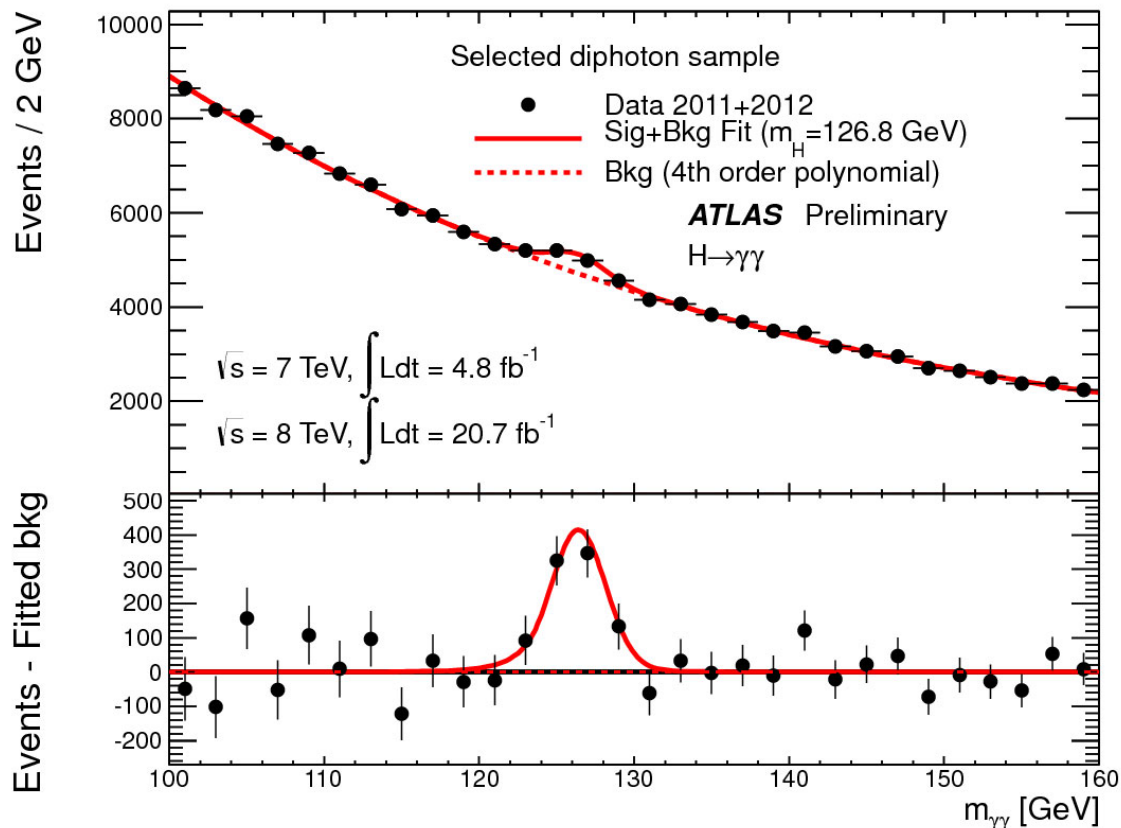
Iskanje Higgsove delca z detektorjema ATLAS in CMS ob LHC

- 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: iskanje razpada Higgsovega bozona v dva žarka gamma, $H \rightarrow \gamma\gamma$



Rezultat meritve: iskanje 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

Na 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

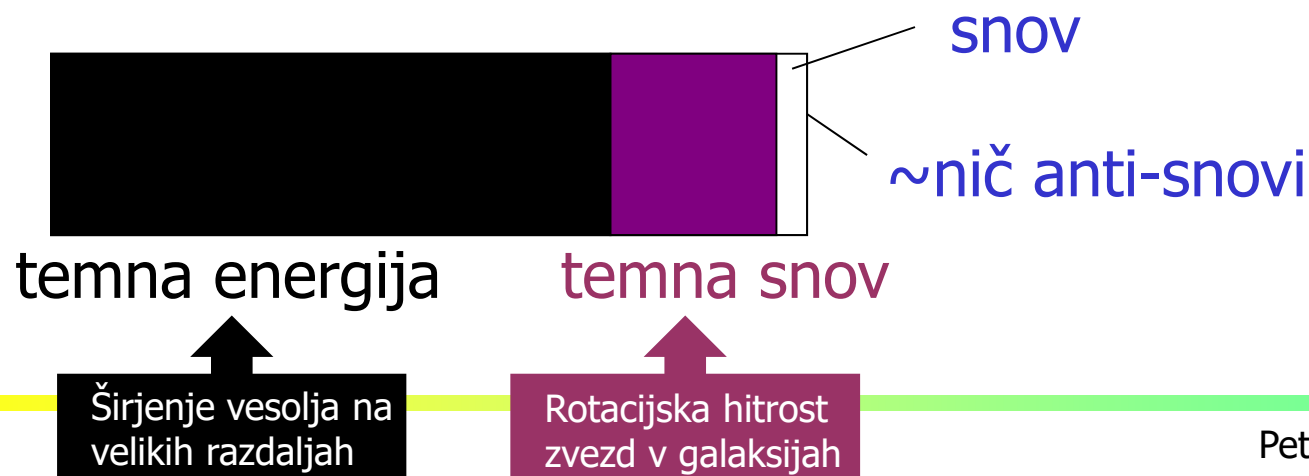
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

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

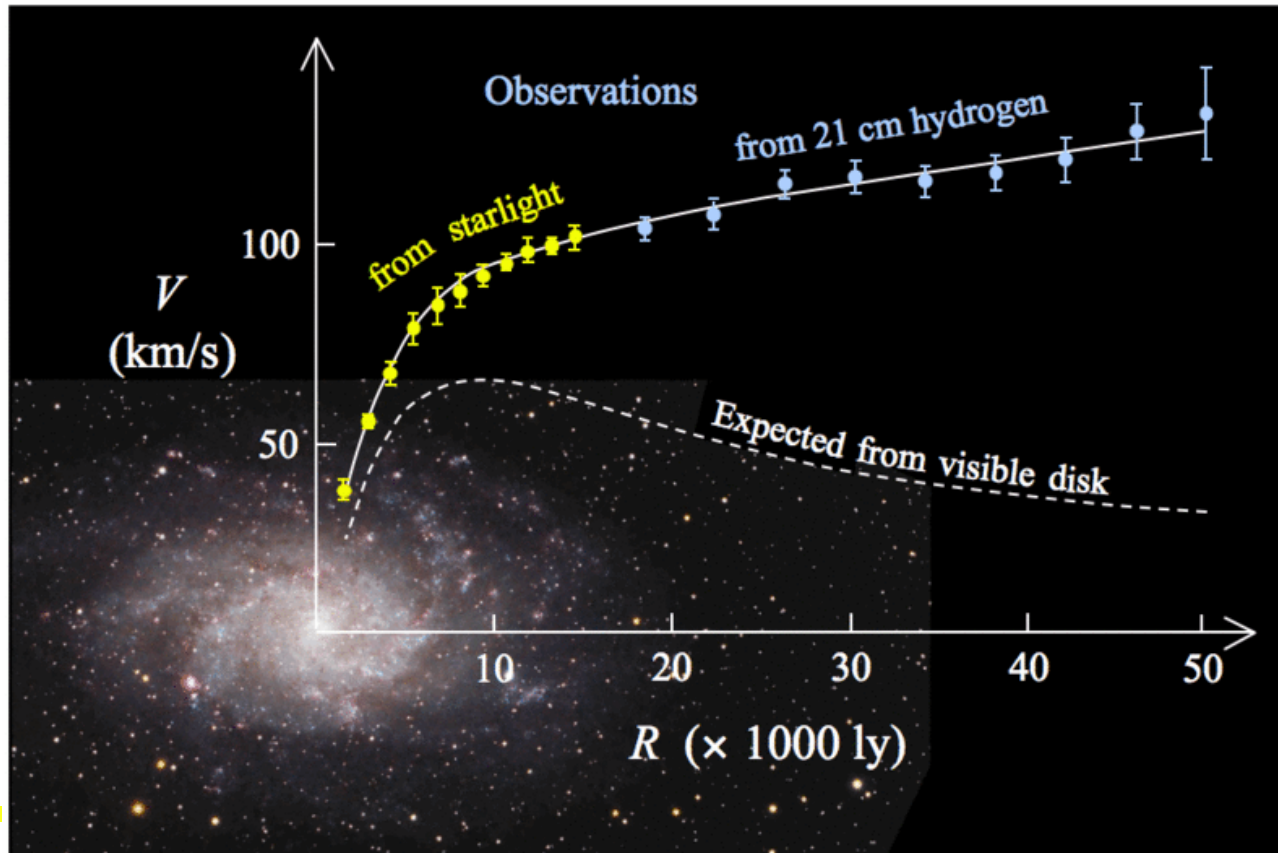
In nenazadnje: večina vesolja je narejena iz delcev, ki jih ne poznamo...



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!

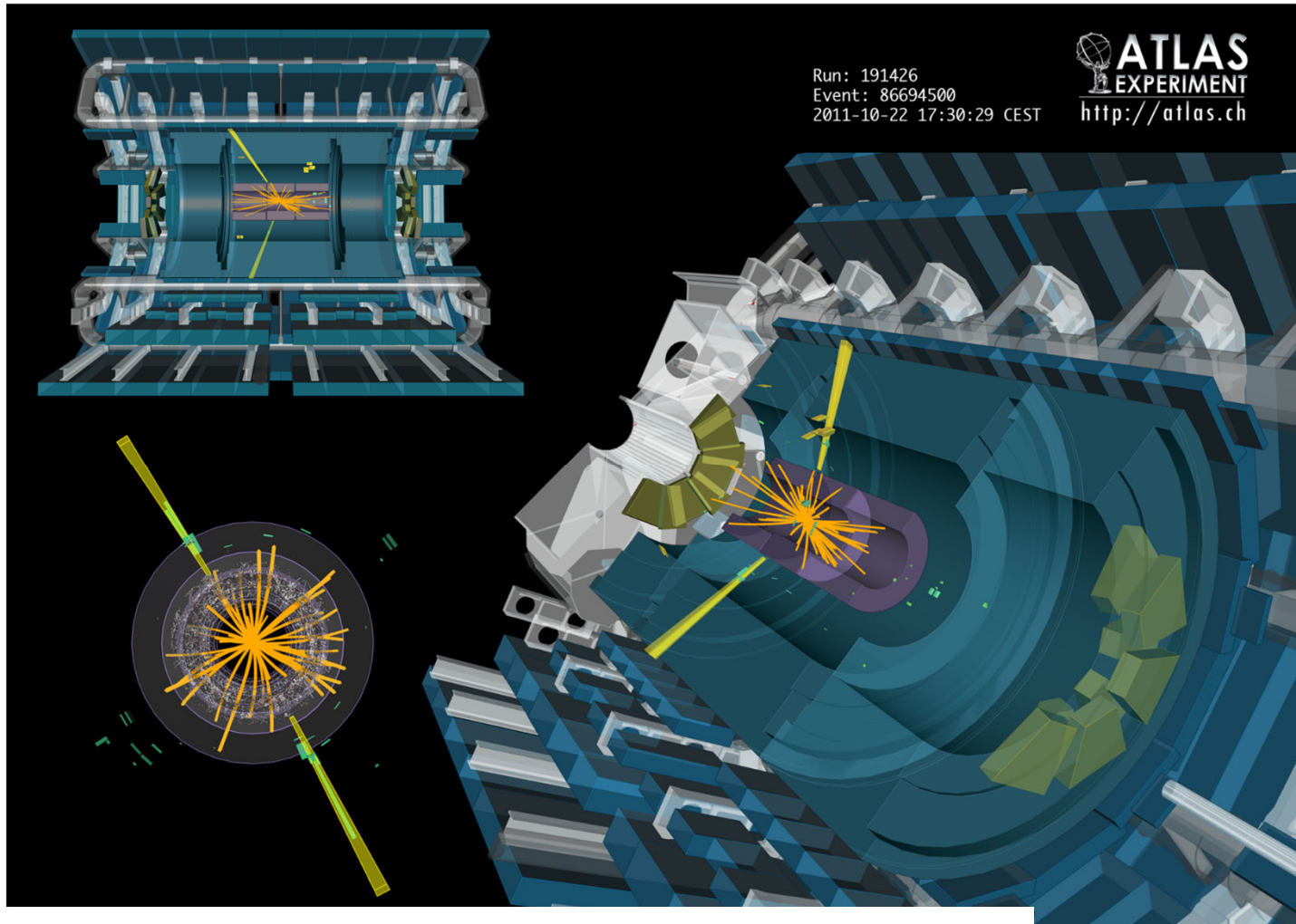


Iskanje popolnejšega opisa narave

Dve možnosti:

- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (LHC)

Neposredno iskanje novih delcev pri velikih energijah v detektorjih ATLAS in CMS na LHC



Primer: iskanje novih delcev, ki razpadajo
v dva visokoenergijska žarka gamma

Iskanje popolnejšega opisa narave

Dve možnosti:

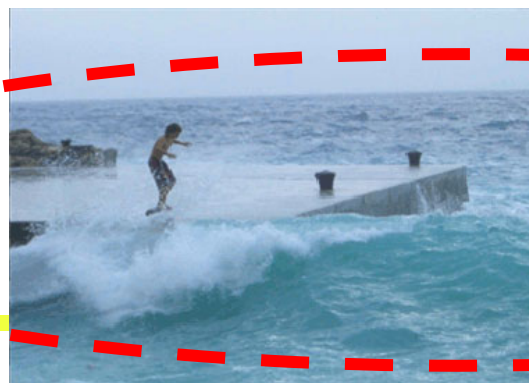
- Neposredno iskanje novih delcev
 - iskanje pri velikih energijah (LHC)
- Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle in Belle II).

→ Oba pristopa se dopolnjujeta
(odkritje in razumevanje novih delcev)

Primerjava obeh pristopov

Če hočemo z morskega obrežja opazovati ladjo daleč od obale, imamo dve možnosti. Uporabimo lahko **zmogljiv daljnogled** ali pa **zelo natančno izmerimo smer in velikost valov**.

LHC



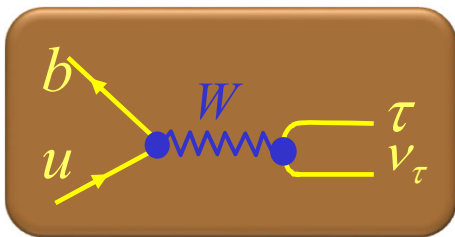
Belle II



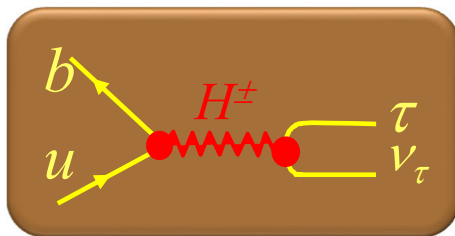
Peter Križan

Primer: lov na **nabit Higgsov delec** v razpadu $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$

Poleg nevtralnega Higgsovega delca, kot ga predvideva Standardni model, bi lahko (v okviru supersimetričnih teorij) obstajal tudi **nabit Higgsov delec**.



Redki razpad $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$ poteka v Standardnem modelu preko **bozona W^-**



V nekaterih supersimetričnih teorijah bi lahko potekal tudi preko **nabitega Higgsovega delca H^\pm** .

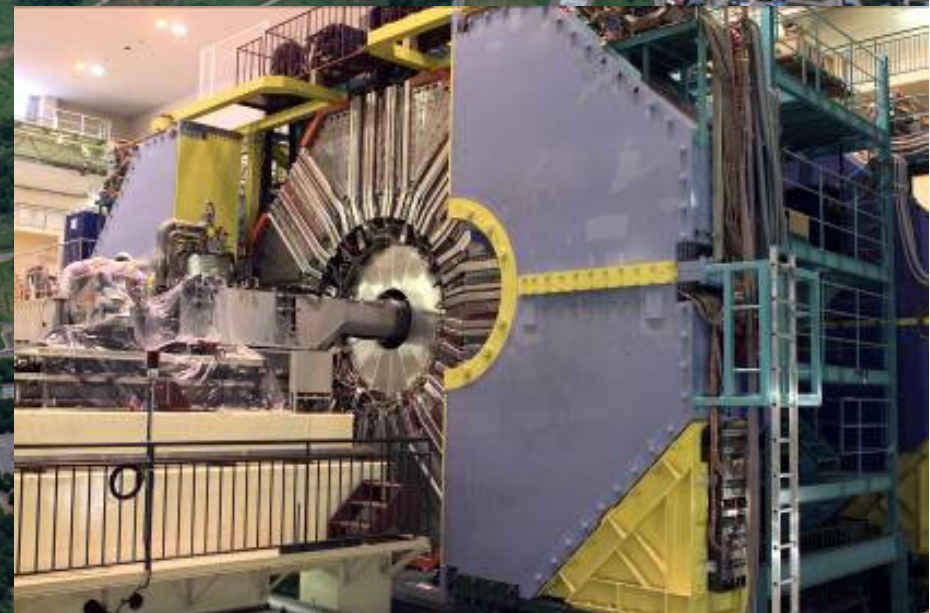
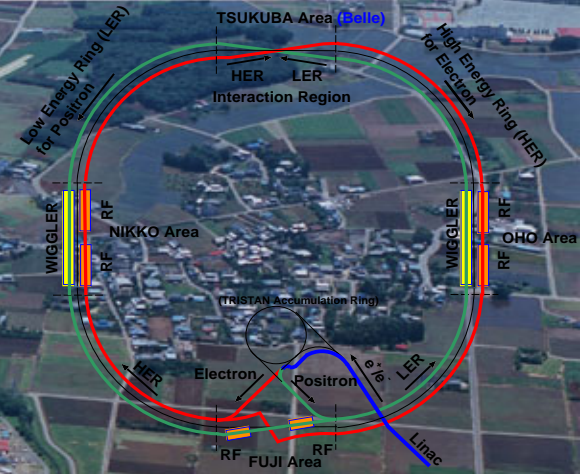
Nabit Higgsov delec bi vplival na razpad mezona B na lepton tau in neutrino, in bi spremenil verjetnost za ta proces.

Če izmerimo verjetnost za tak razpad in jo primerjamo s predvidevanjem Standardnega modela (kjer nabitega Higgsa ni):

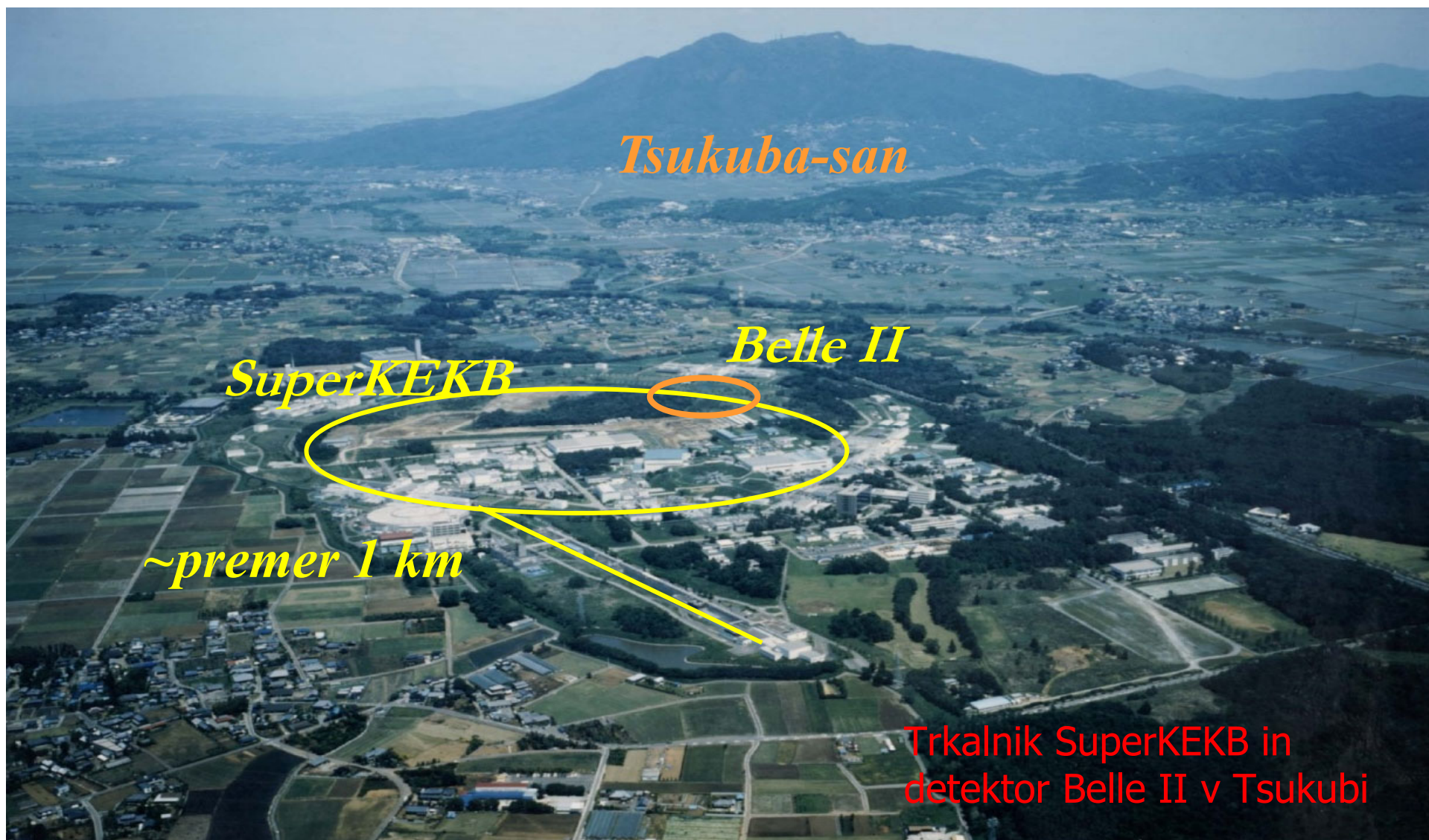
→ **lastnosti nabitega Higgsa (recimo njegova masa)**

Študij redkih prehodov:
Potrebujemo 50x več
trkov elektronov in
pozitronov kot v 10 letih
eksperimenta Belle!

KEKB → SuperKEKB
Belle → Belle II



Trkalnik SuperKEKB: od leta 2010 predelava zelo uspešnega predhodnika KEKB

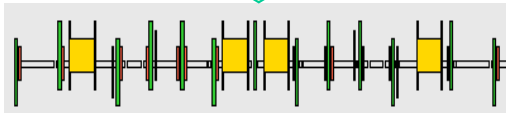
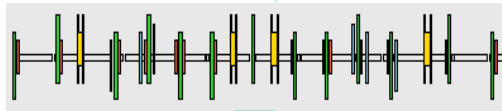


Trkalnik SuperKEKB in
detektor Belle II v Tsukubi

Predelava: KEKB → SuperKEKB

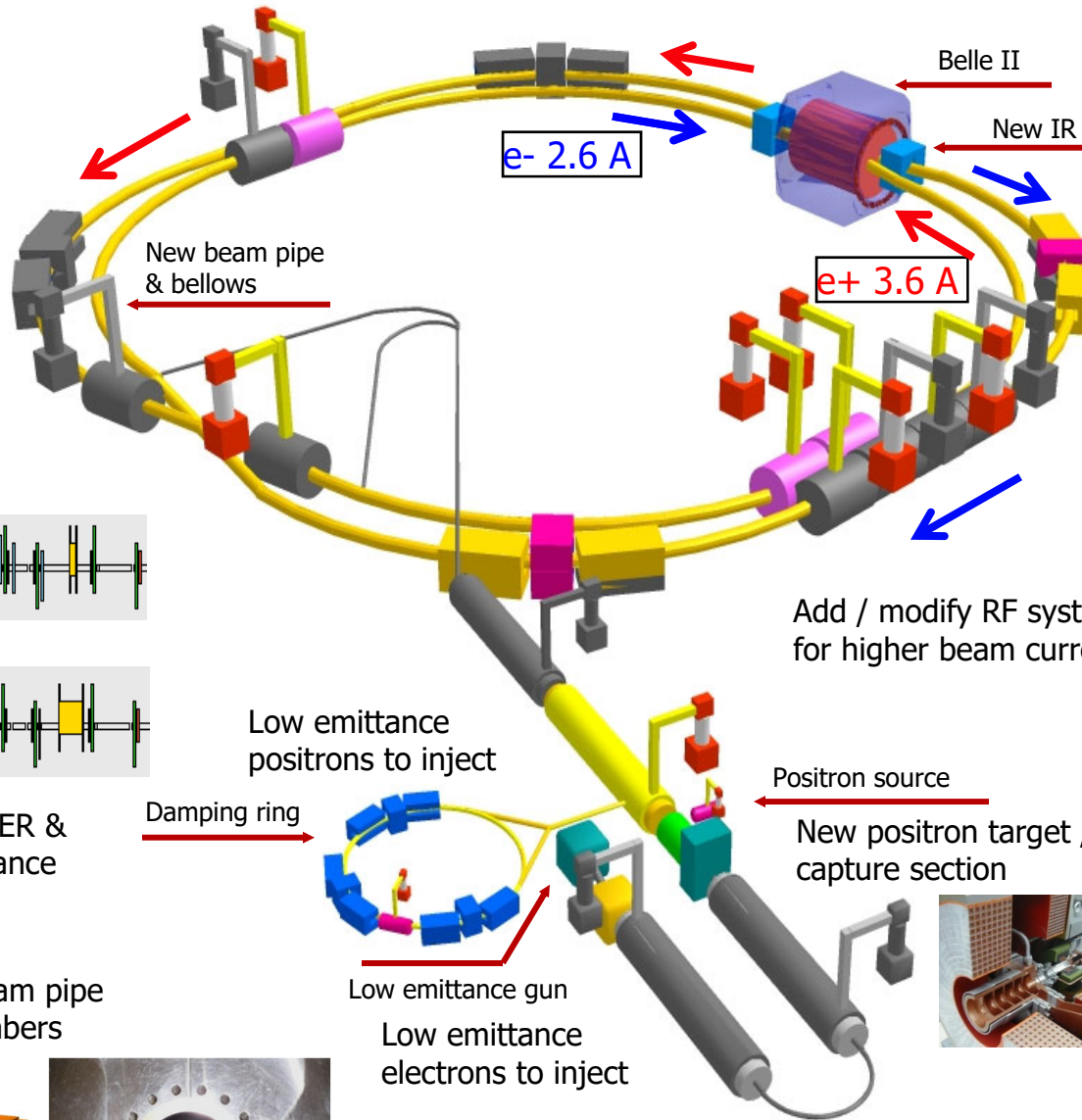
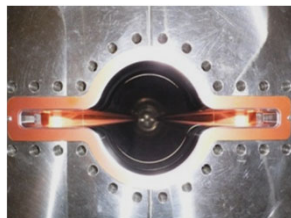
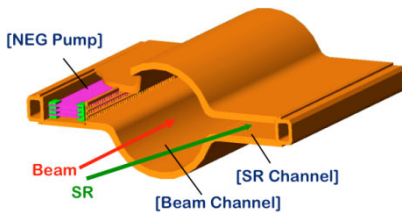


Replace short dipoles with longer ones (LER)



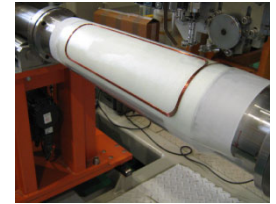
Redesign the lattices of HER & LER to squeeze the emittance

TiN-coated beam pipe with antechambers



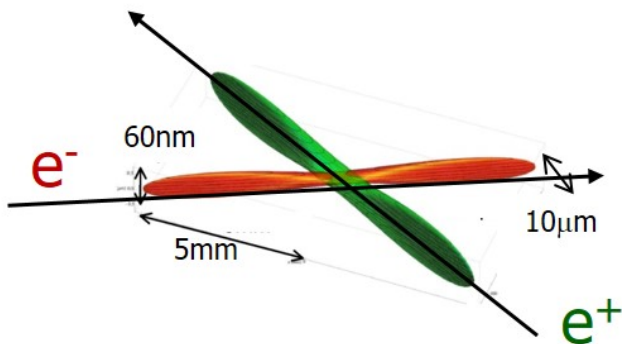
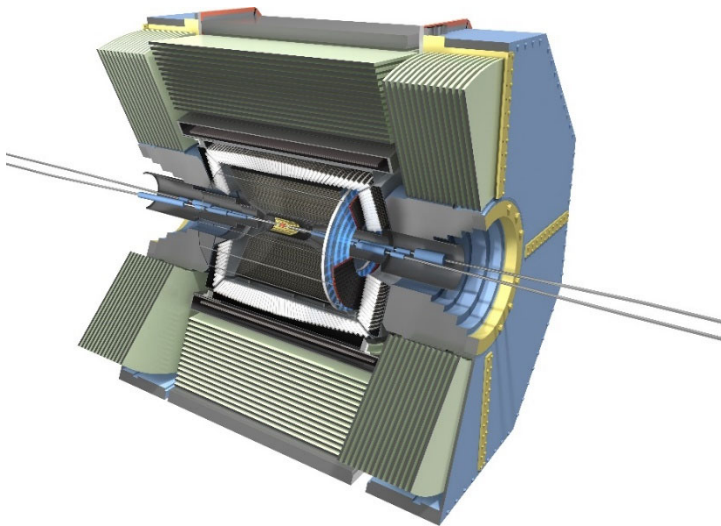
Colliding bunches

New superconducting / permanent final focusing quads near the IP



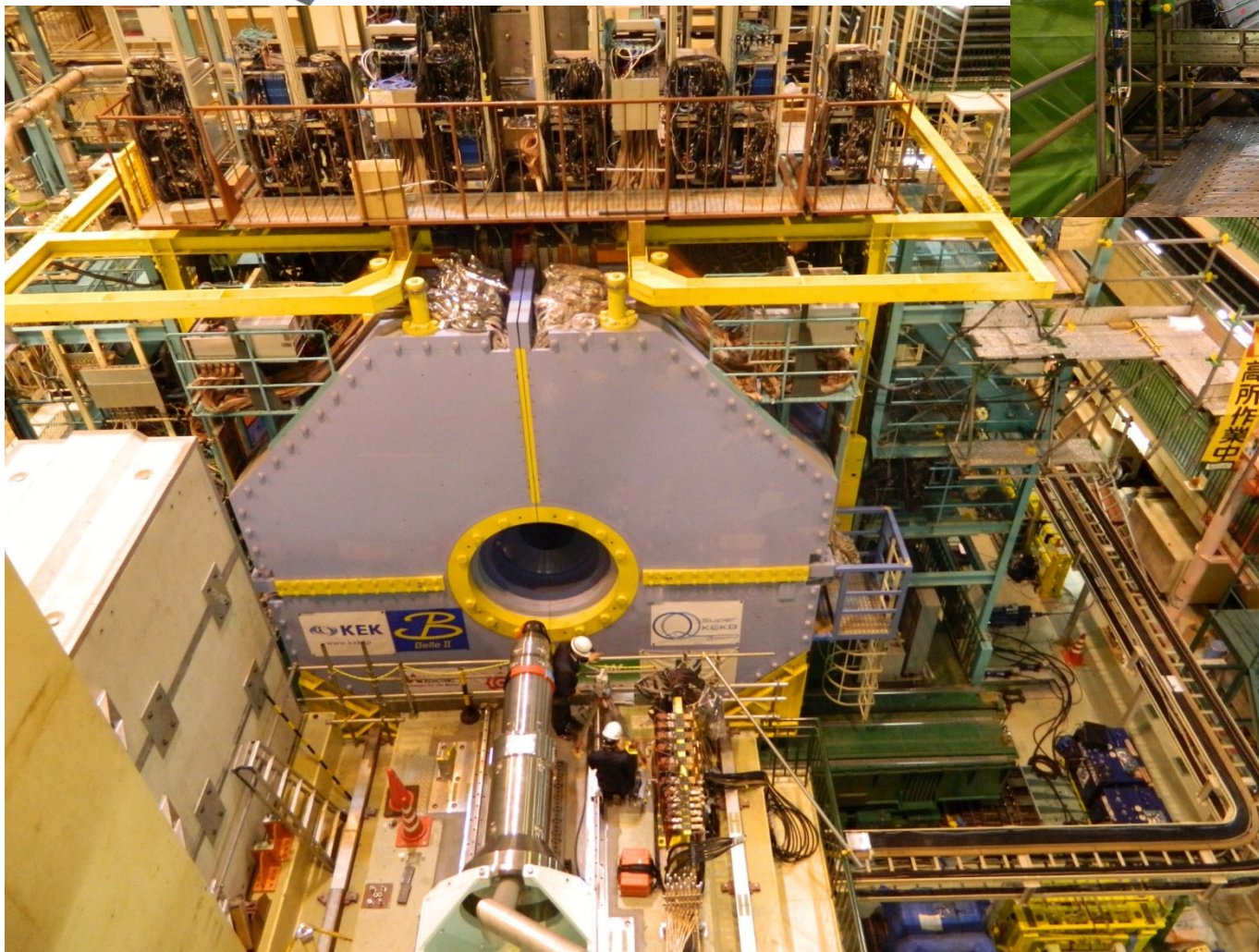
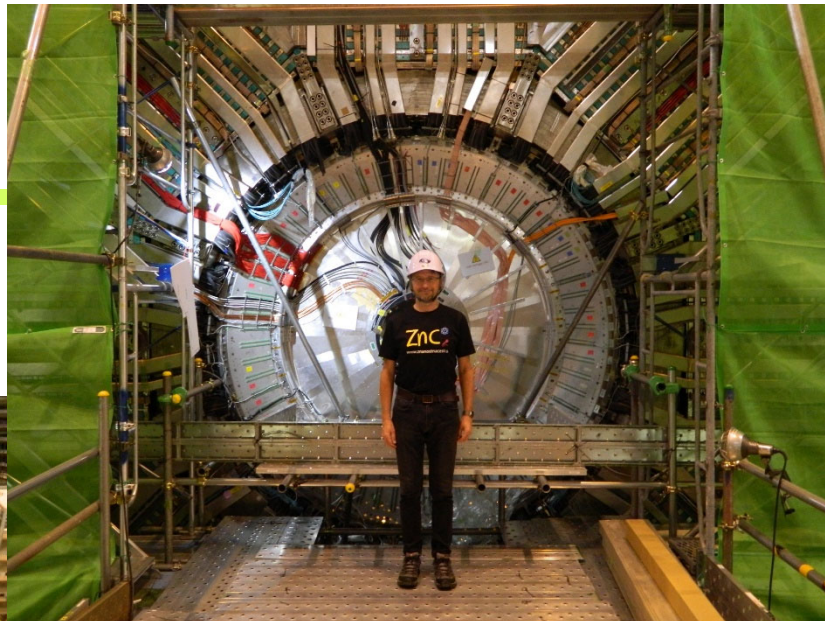
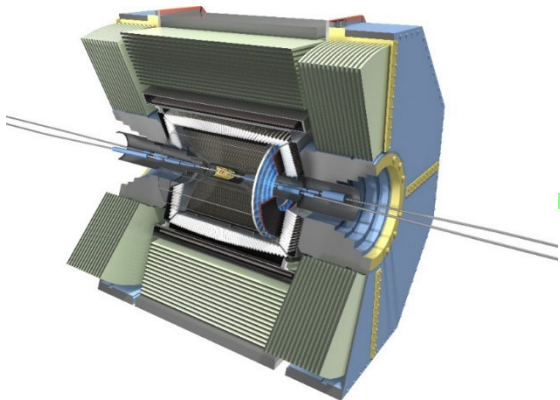
Za x40 bolj zmogljiv pospeševalnik

Fokusiranje elektronskega in pozitronskega žarka v točko trka: dve velikanski elektromagnetni leči



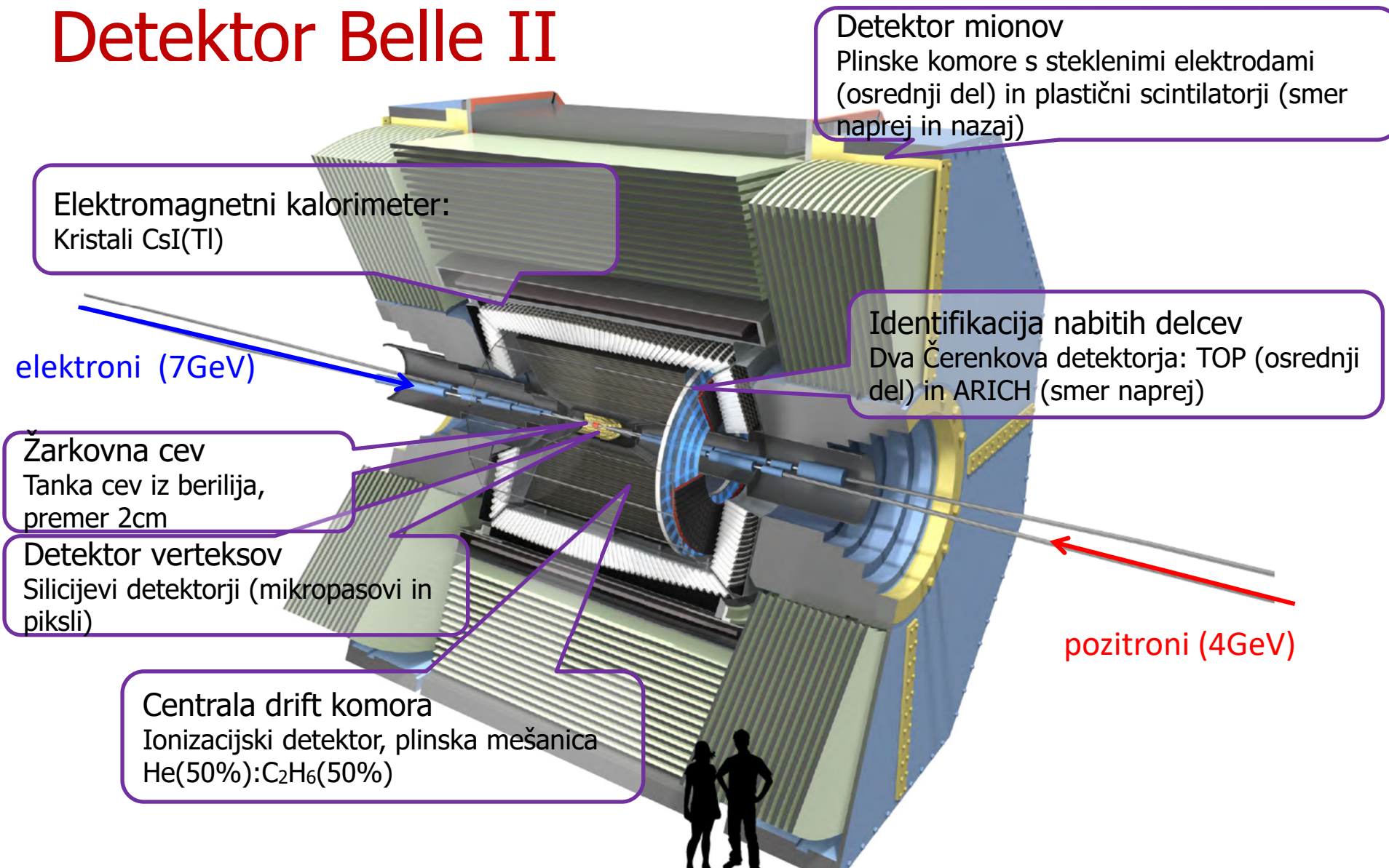
Supraprevodna magnetna leča s 25 magnetnimi navitji (tuljavami), hlajena s tekočim helijem na 4 K (= -269 stopinj Celzija).

Elektronski in pozitronski žarek v točki trka



Peter Križan

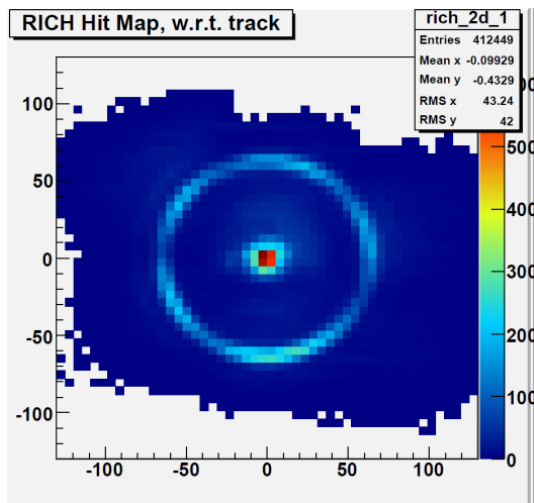
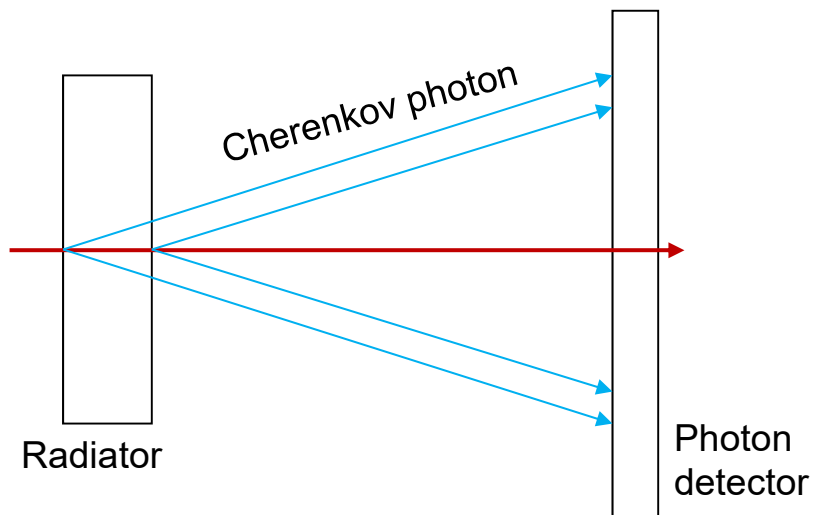
Detektor Belle II



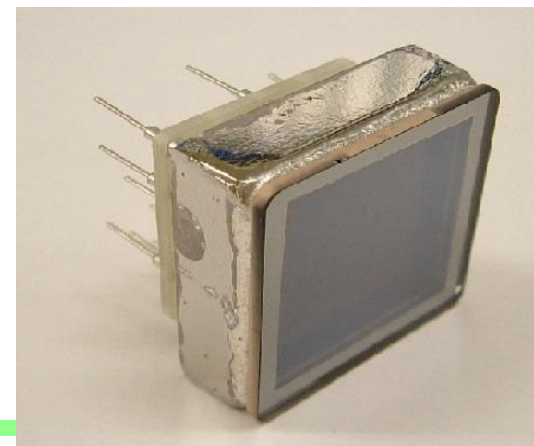
Namen: izboljšati domet meritev za 100x

– **boljši detektor** ob **zmogljivejšem pospeševalniku**

Za identifikacijo delcev uporabimo **pojavn sevanja Čerenkova**: svetloba, ki jo seva delec, ki je **hitrejši kot svetloba** v snovi – podobno kot **udarni val nadzvočnega letala!**

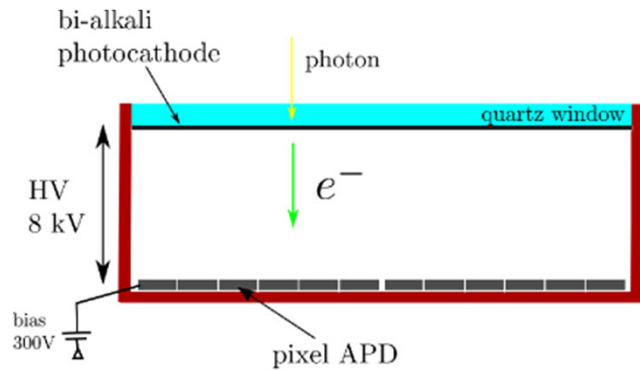


Identifikacija nabitih delcev z dvema detektorjema Čerenkovega sevanja

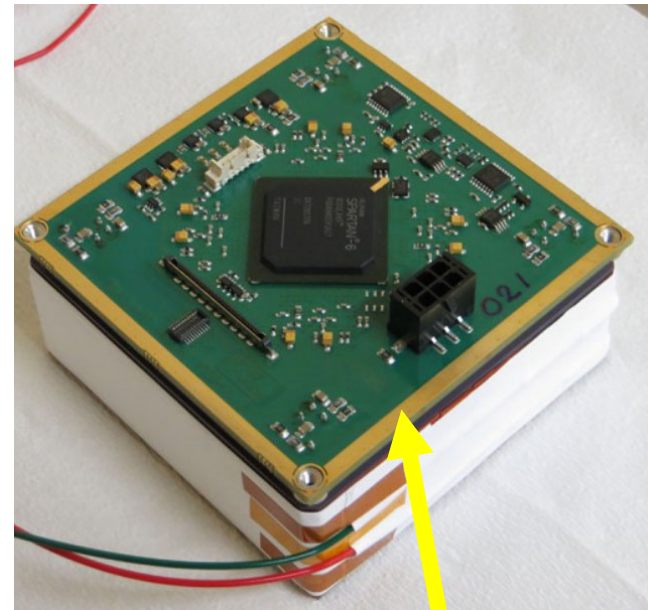
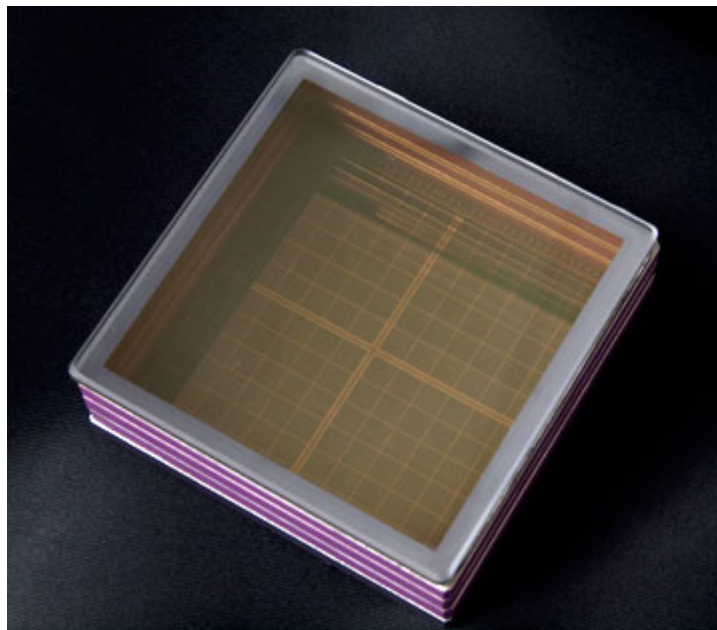


Peter Križan

Zaznavanje fotonov Čerenkova: potrebujemo zelo občutljiv svetlobni senzor

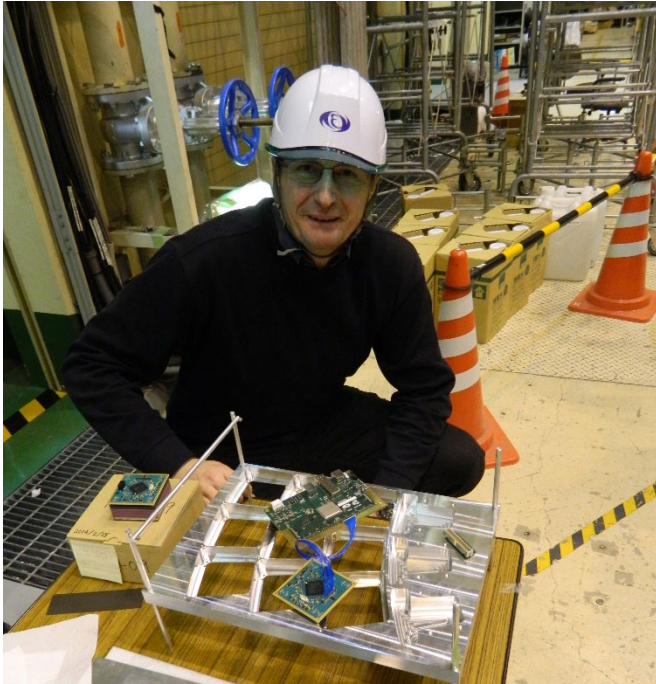


Zaznavanje posameznih fotonov z novim tipom detektorja, hibridnih fotonских detektorjem, Hibrid Avalanche Photo Detector (HAPD).

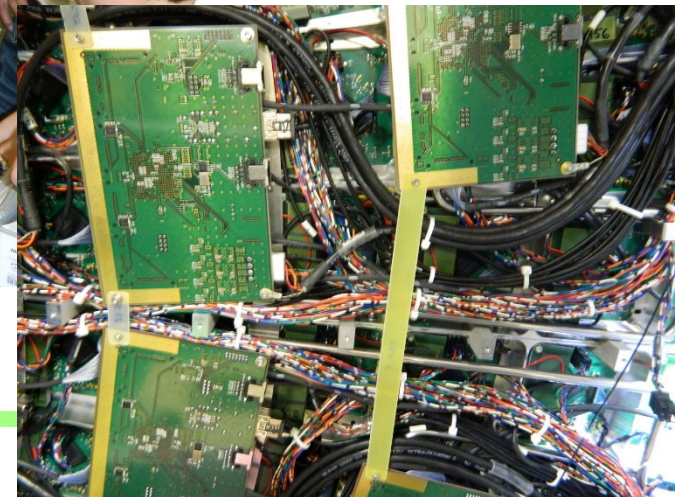
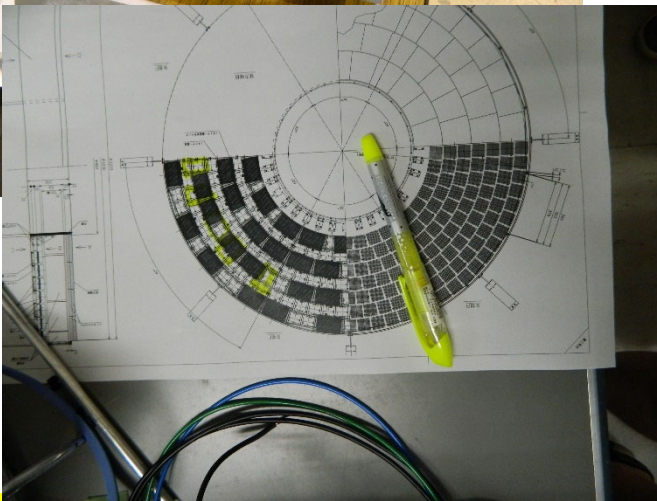


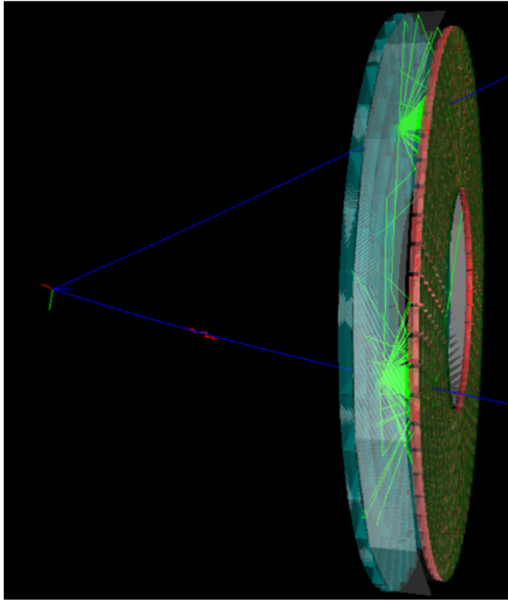
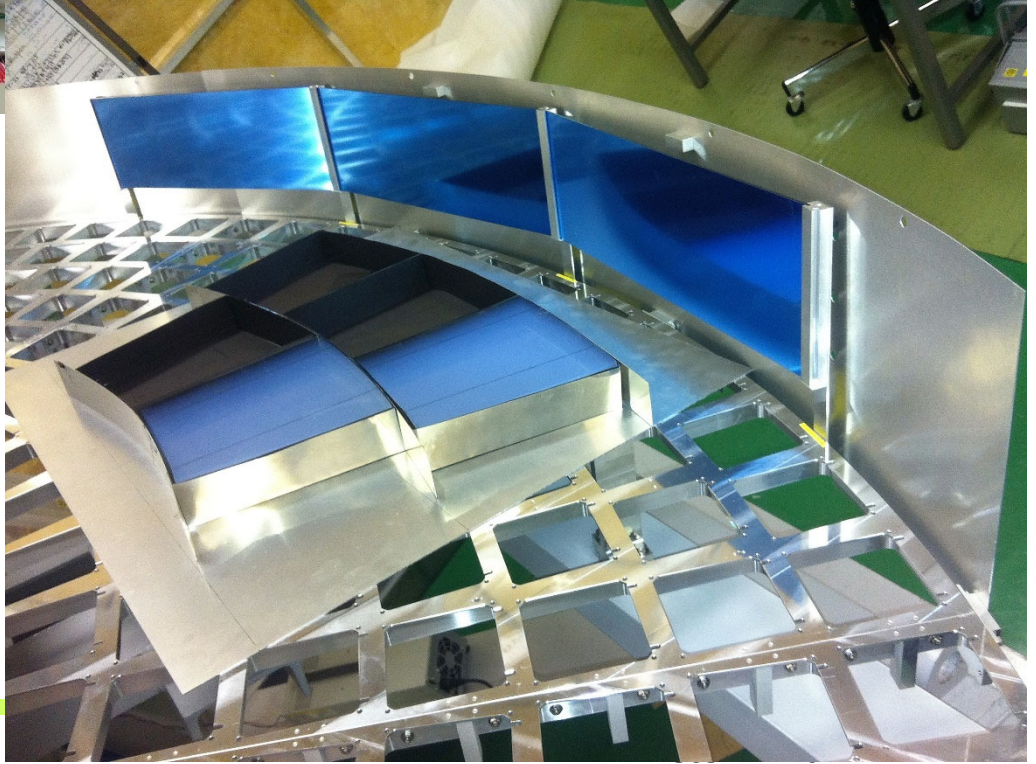
Made in Slovenia

Kako pospraviti senzorje in elektroniko na omejenem prostoru?

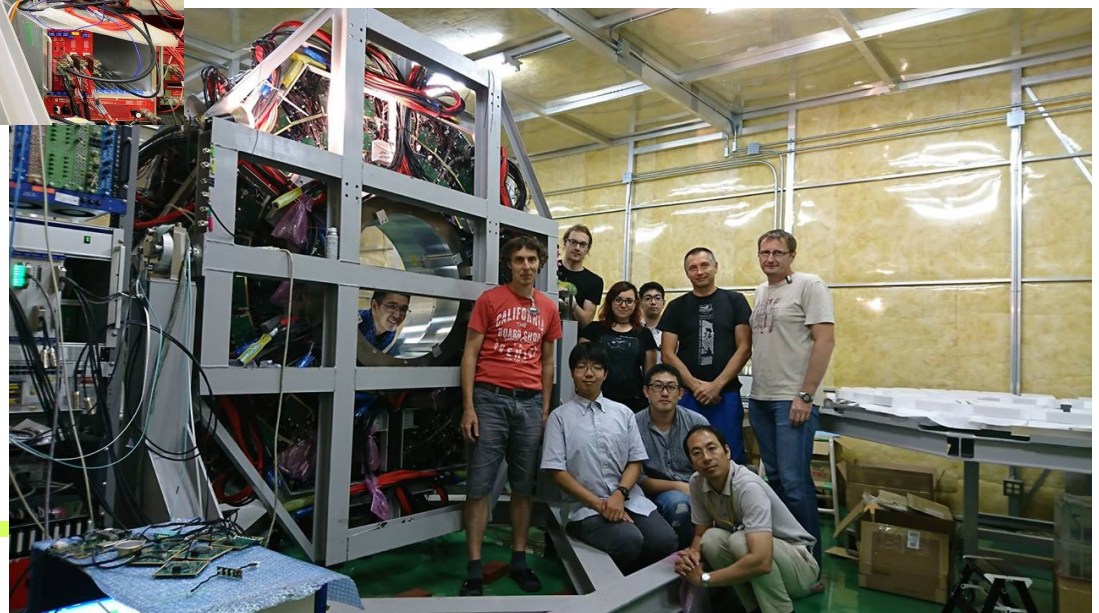
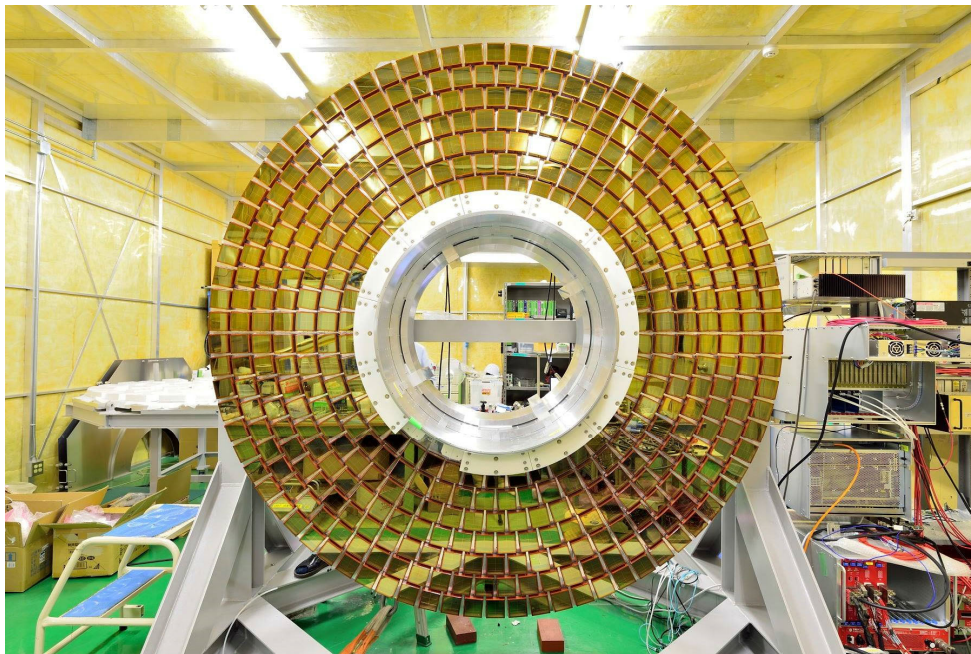


Samo Korpar (UM in IJS), vodja tega detektorskega sklopa, s sodelavci med enim od t.i. sestankov ‚gemba‘ (=na mestu eksperimenta)

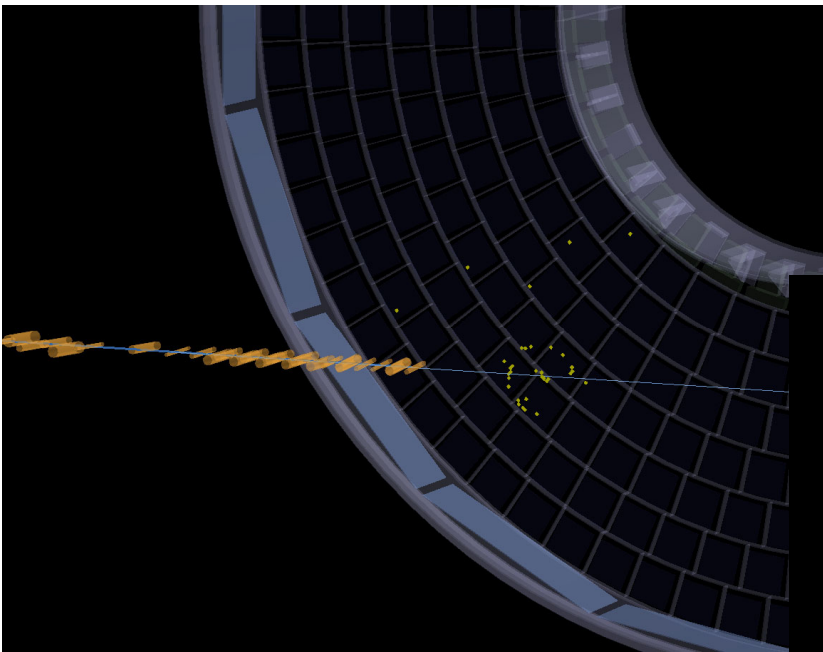




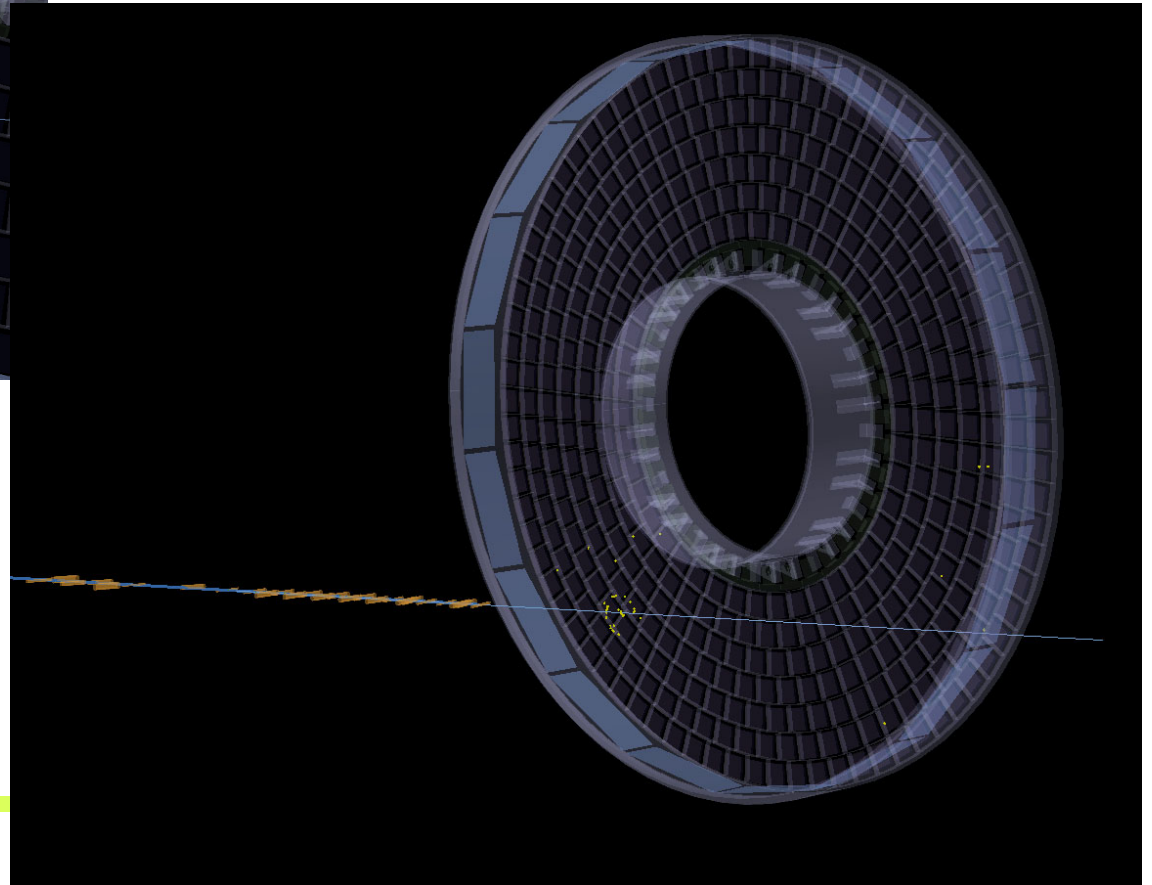
Detektor je po mnogih letih raziskav, razvoja in sestavljanja pripravljen za meritve!



Prvi Čerenkovi obroči, ki jih je zaznal detektor!



Velik uspeh, dobra popotnica za naprej!



Raziskovalna skupina Belle II



Močna raziskovalna skupina ~ 1000 fizikov s celega sveta

Del raziskovalne skupine Belle II (skupno >1000 fizikov!)

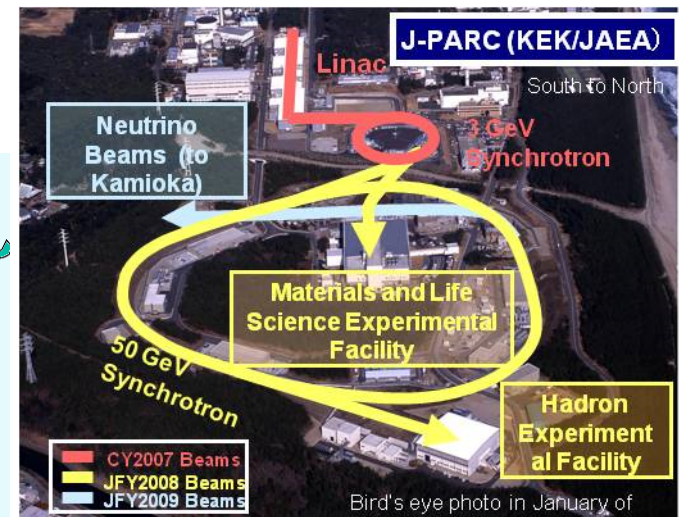
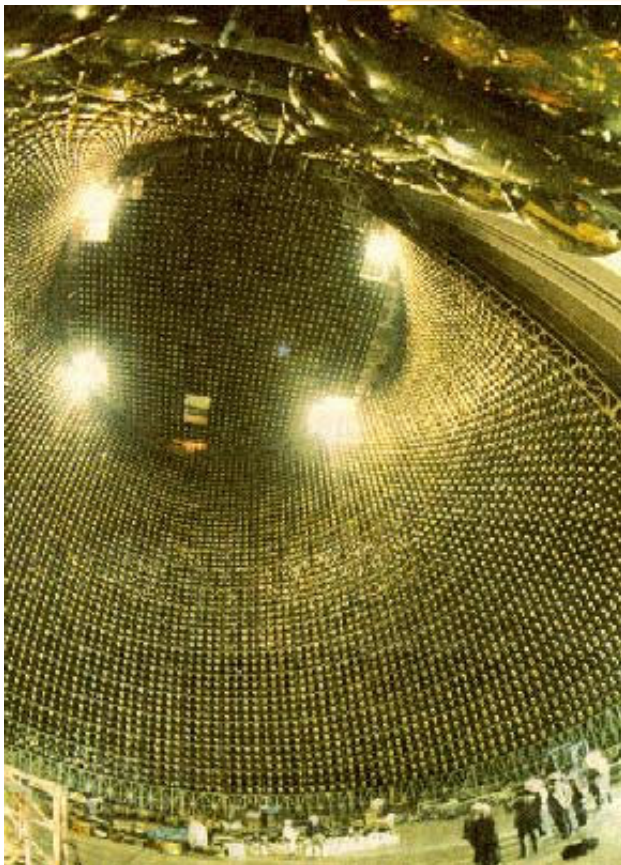
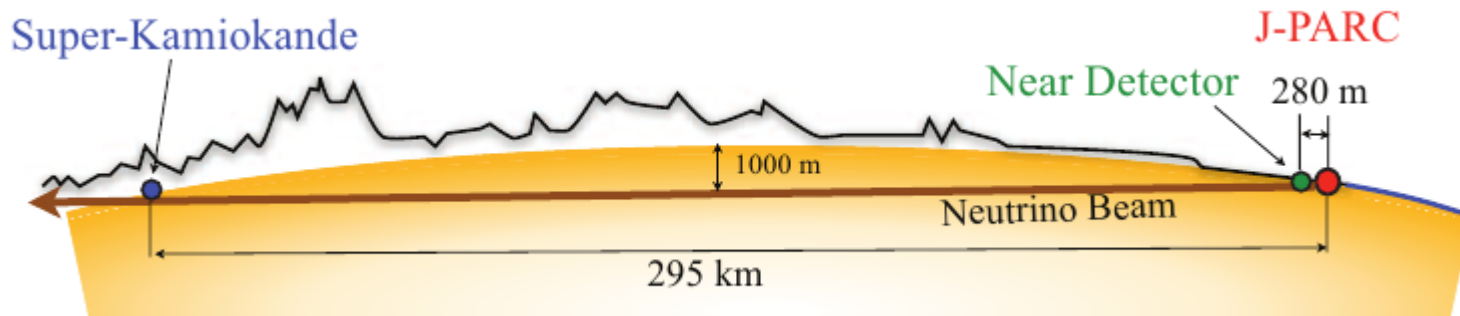


Iskanje 'Nove fizike': usklajen pristop na več frontah

- Neposredno iskanje novih delcev
 - iskanje pri velikih energijah (ATLAS na LHC)
- Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle II)
- Študij lastnosti nevtrinov (nevtralni partner elektrona)
 - meritve mešanja nevtrinov – prehajanja ene vrste nevtrinov v drugo →



Poskusi z nevtrini: ustvarimo jih v pospeševalniku, detektiramo v 295km oddaljenem detektorju



Ponovno je za detekcijo bistven pojav Čerenkova!

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,

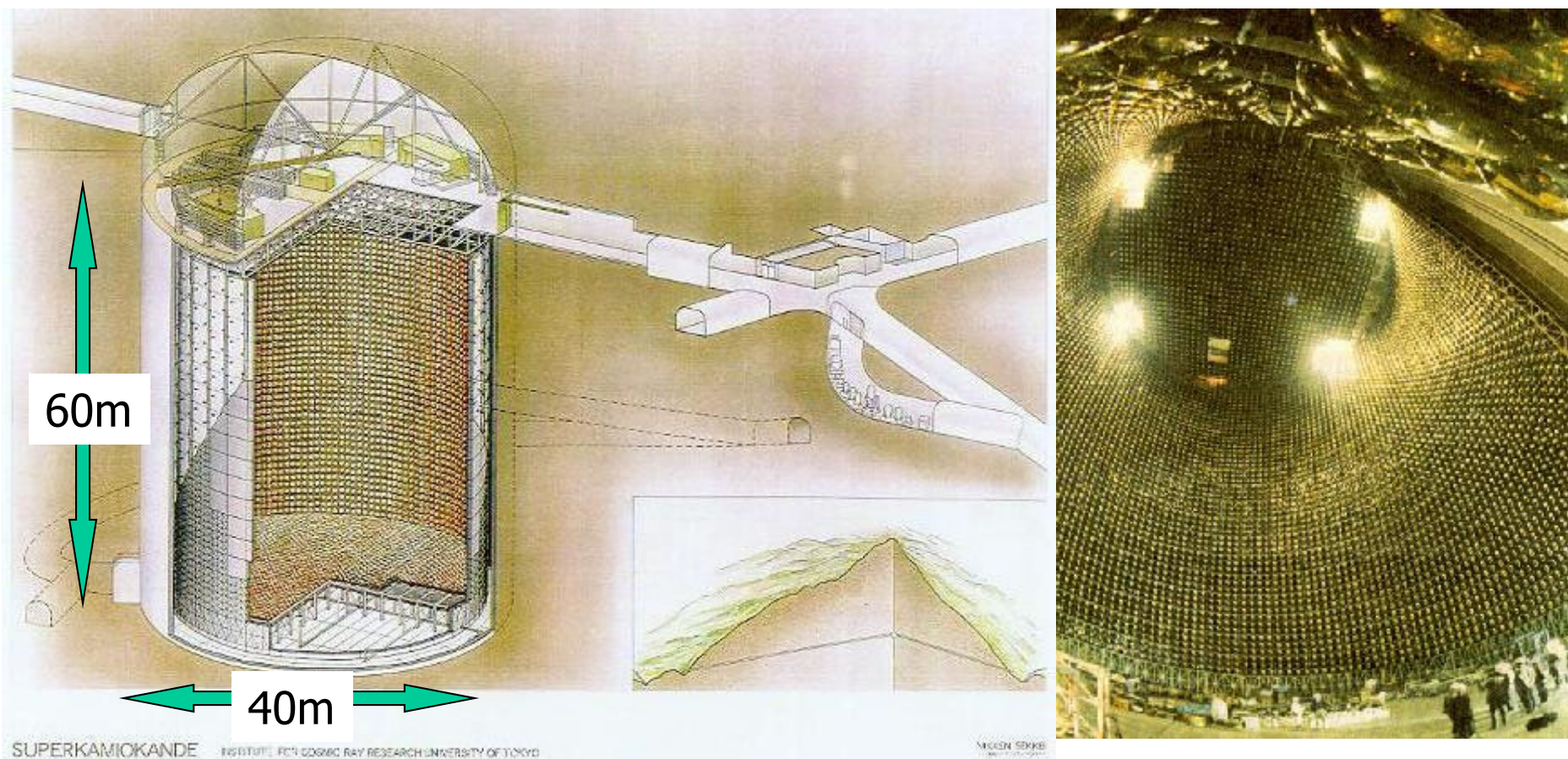


Toda: verjetnost za tako reakcijo v 100m vode je samo $4 \cdot 10^{-16}$

Potrebujemo velikanski detektor in zopet nekaj let za meritve!

Superkamiokande: primer nevtrinskega detektorja

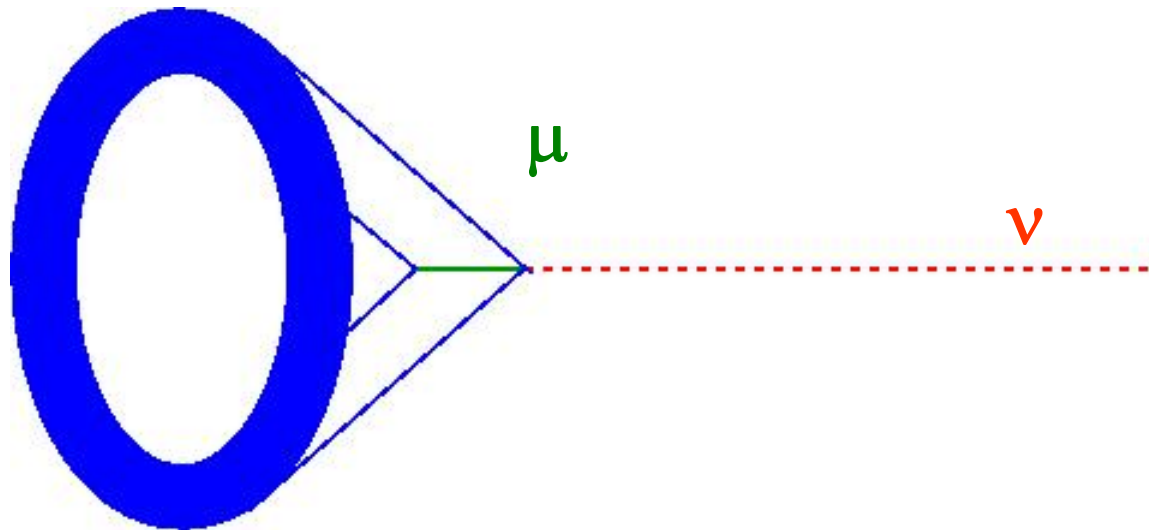
Tudi v tem primeru uporabimo Čerenkovo sevanje



11.000 fotonomnoževalk 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.

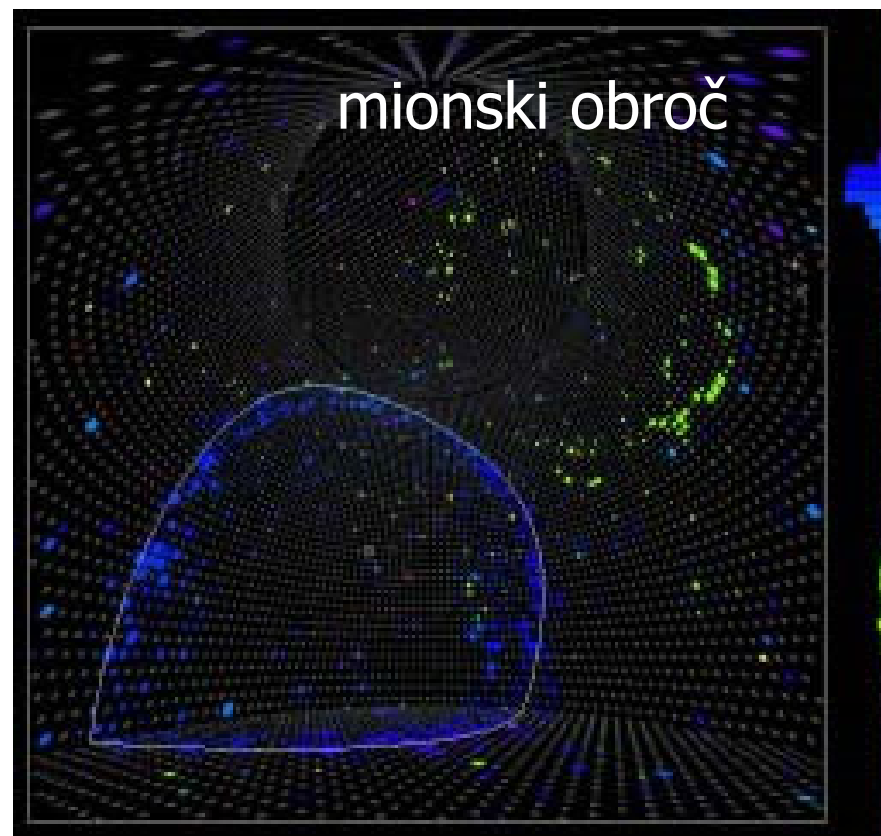
- mionski obroč: ostri robovi
- elektronski: razmazan (zavorno sevanje).

Superkamiokande: zaznavanje elektronov in mionov

Detektorji svetlobe: zelo zelo velike fotopomnoževalke

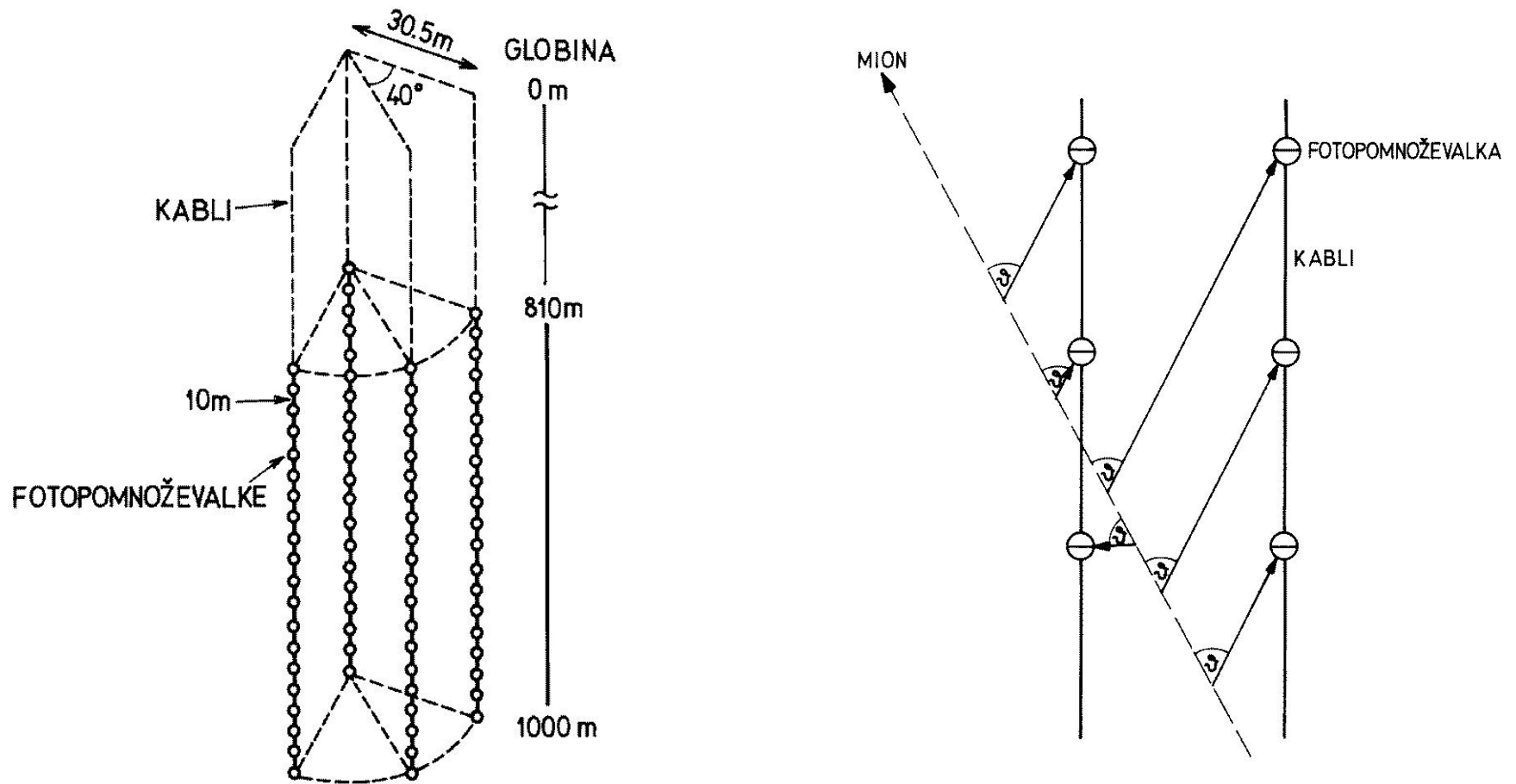


M. Koshihara (NN2002)



Elektrone ločimo od mionov po vzorcu na detektorju svetlobe.

IceCube: uporabimo led na Antarktiki namesto vode



Fotopomnoževalke merijo čas prihoda Čerenkovih fotonov

IceCube

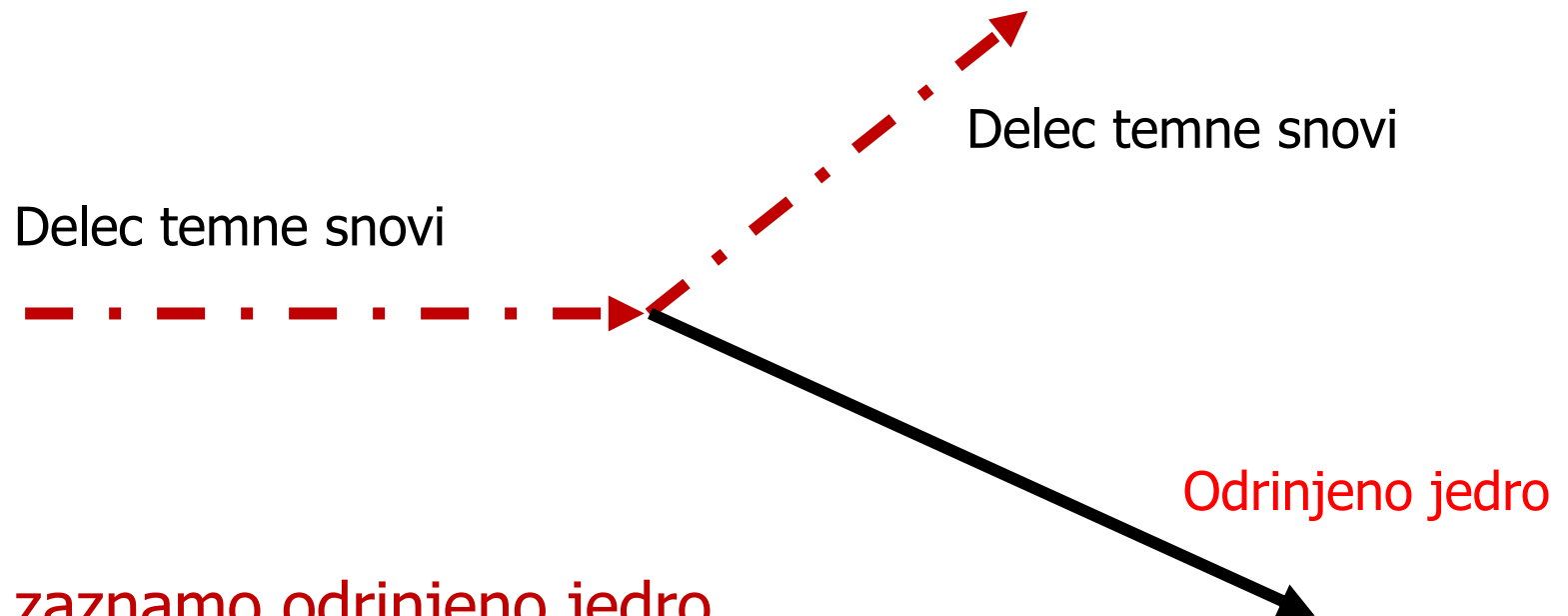
Primer dogodka, ki so ga
zaznale
fotopomnoževalke.

Mion prihaja v detekcijski
sistem od spodaj.

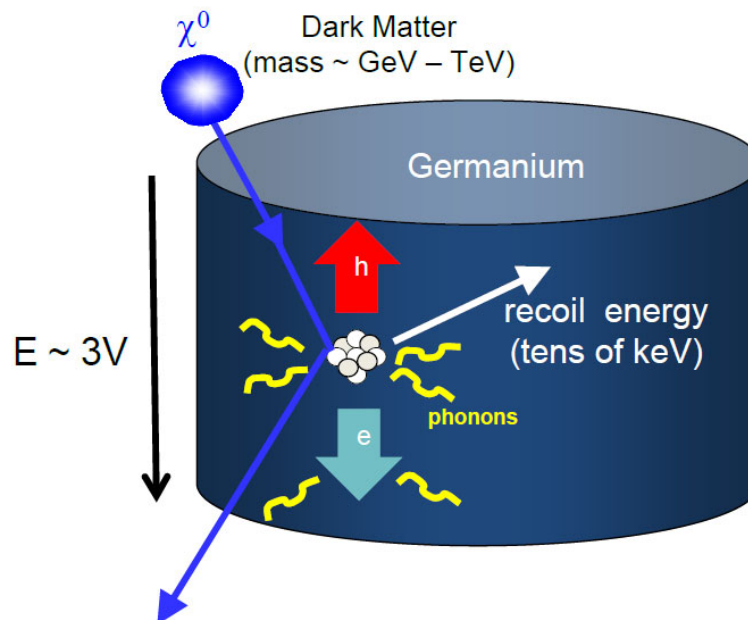
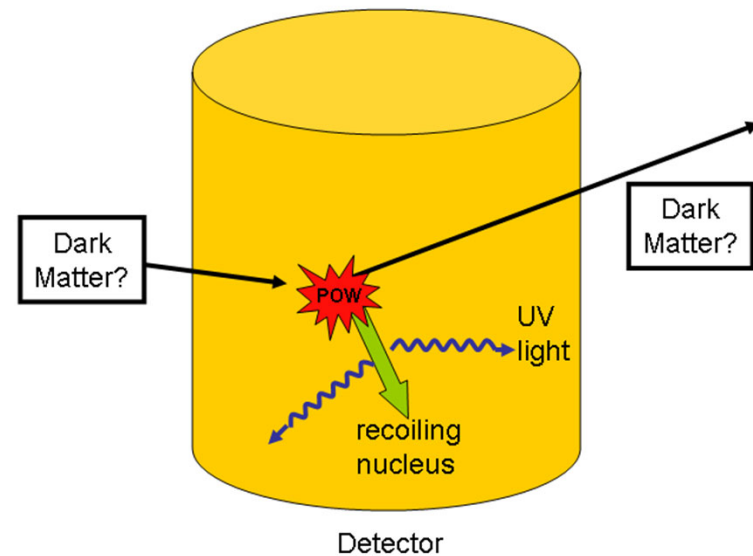
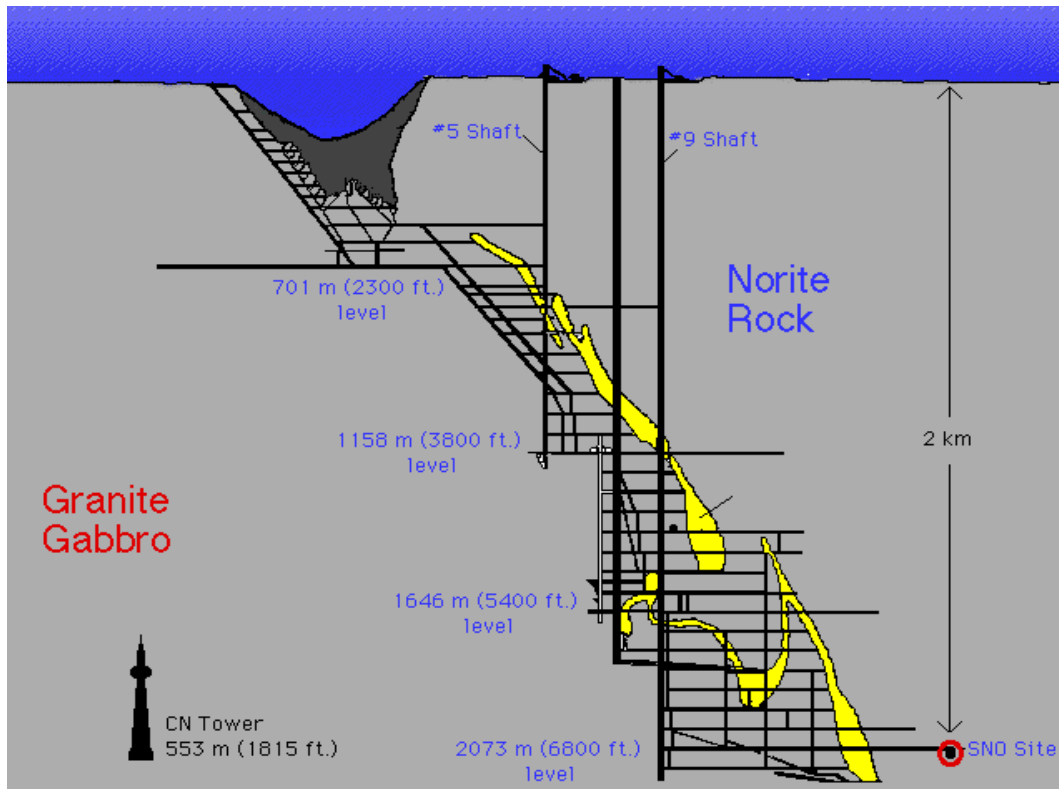
Iskanje 'Nove fizike': usklajen pristop na več frontah

- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (ATLAS na LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov**
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle II)
- **Študij lastnosti nevtrinov (nevtralni partner elektrona)**
 - meritve mešanja nevtrinov – prehajanja ene vrste nevtrinov v drugo →
- **Neposredno iskanje delcev temne snovi**
 - Iskanje pojavov, pri katerih delec temne snovi odrine jedro v detektorju →

Direktna detekcija delcev temne snovi



- Ideja: zaznamo odrinjeno jedro.
- Odrinjeno jedro: detekcija preko pojavov, ki jih nabit delec povroči v snovi (scintilacije, ionizacija)
- Težava: redek proces (...) → motijo procesi iz ozadja → eksperiment postavimo globoko pod zemljo



Iskanje 'Nove fizike': usklajen pristop na več frontah

- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (ATLAS na LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov**
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle II)
- **Študij lastnosti nevtrinov (nevtralni partner elektrona)**
 - meritve mešanja nevtrinov – prehajanja ene vrste nevtrinov v drugo
- **Neposredno iskanje delcev temne snovi**
 - Iskanje pojavov, pri katerih delec trdne snovi odrine jedro v detektorju

V naslednjih desetih letih se bo razjasnilo kup dodatnih vprašanj, ki nam jih je zastavila Narava.

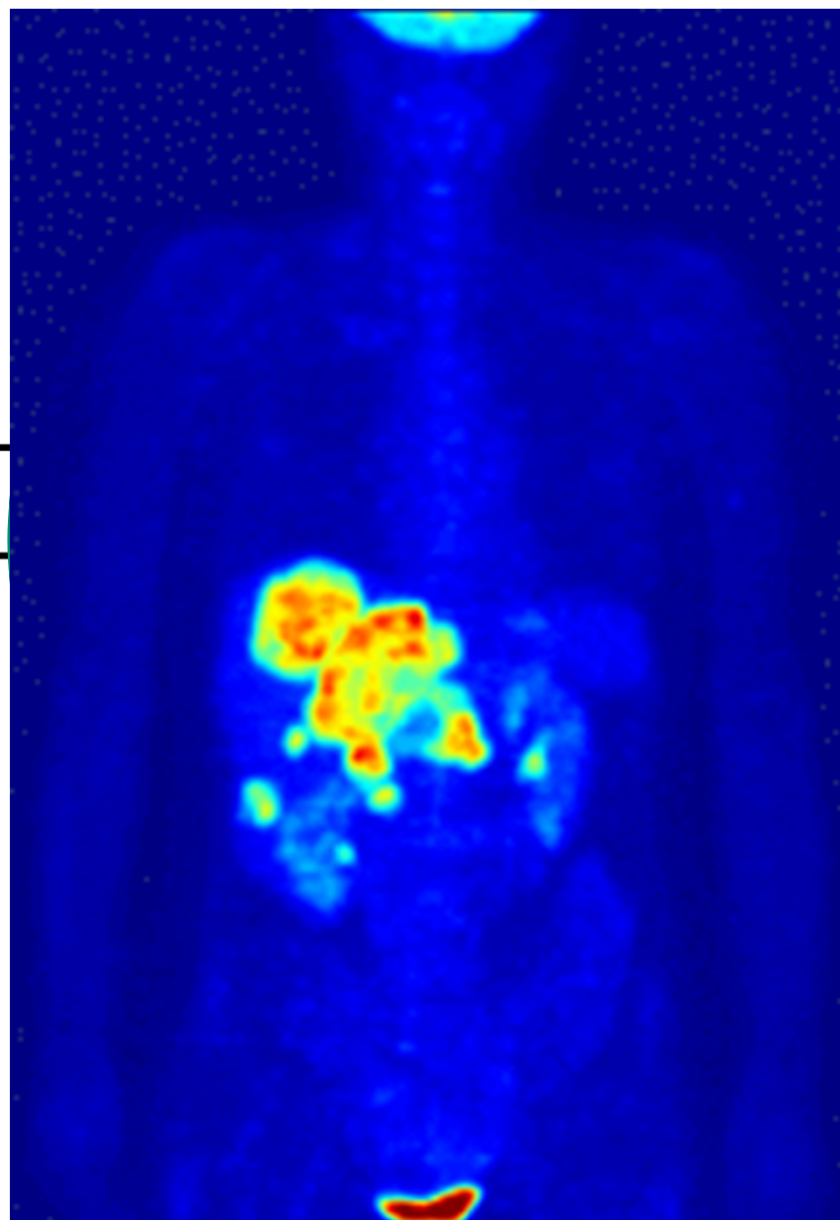
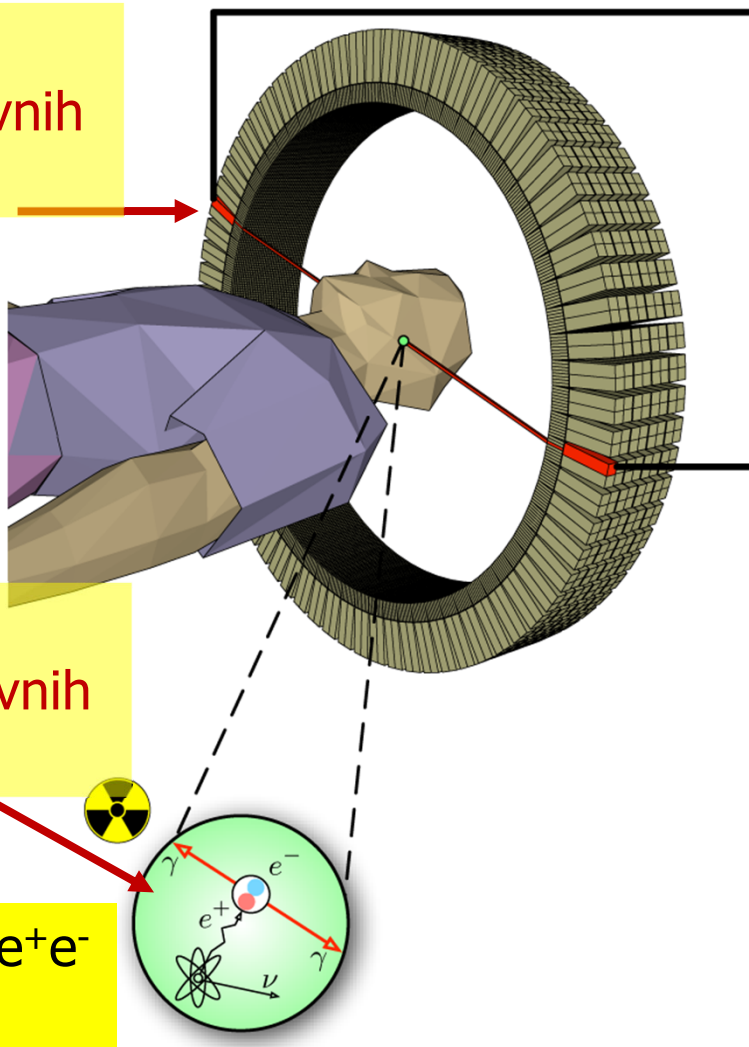
Spin-off osnovnih raziskav – primer 1

PET: pozitronska tomografija

detektor iz fizike osnovnih delcev

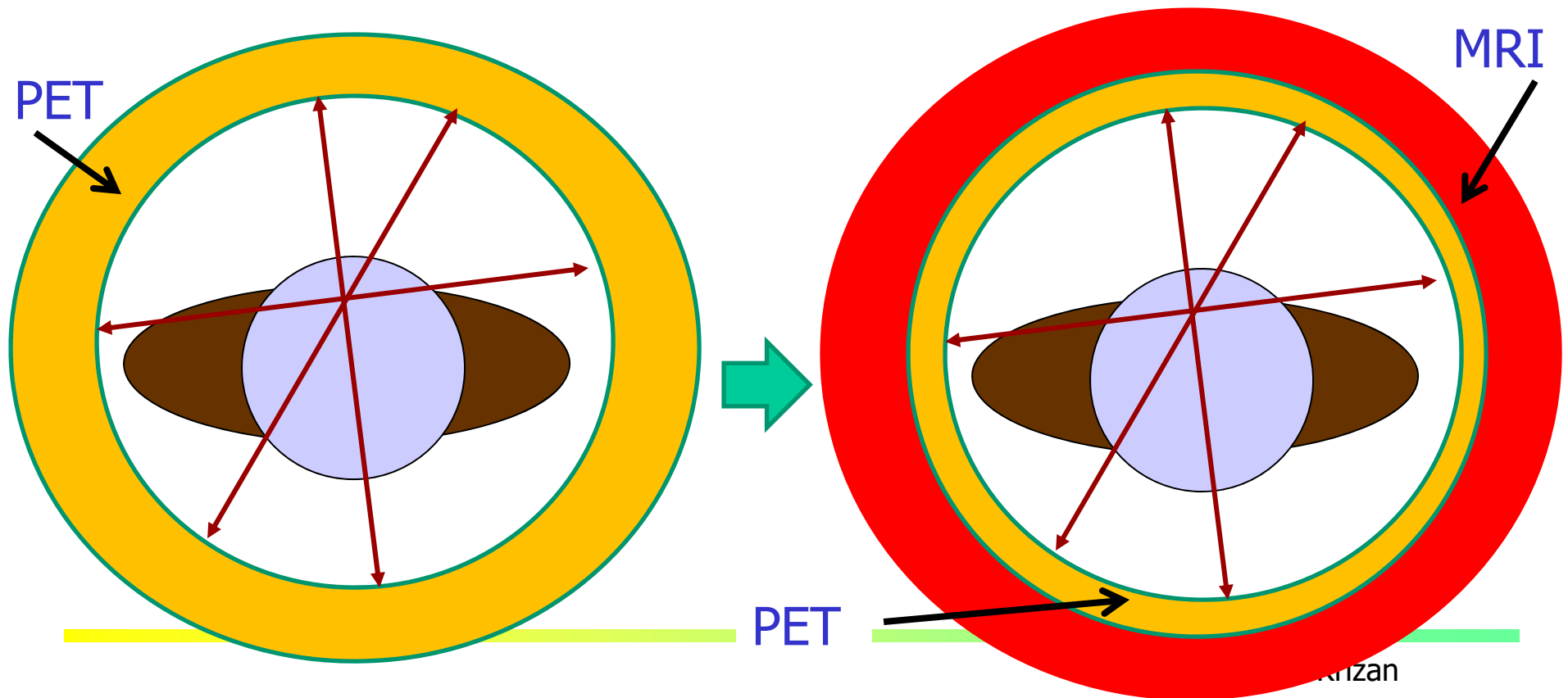
zakonitosti fizike osnovnih delcev

anihilacija e^+e^-



Nova vrsta senzorja, ki smo ga razvili za meritve v fiziki osnovnih delcev: → bistveno manjši od obstoječih detektorjev in deluje v velikih magnetnih poljih.

Omogoča sočasno slikanje z magnetno resonanco in PET – pomembna izboljšava za učinkovito diagnostiko!



Spin-off osnovnih raziskav – primer 2

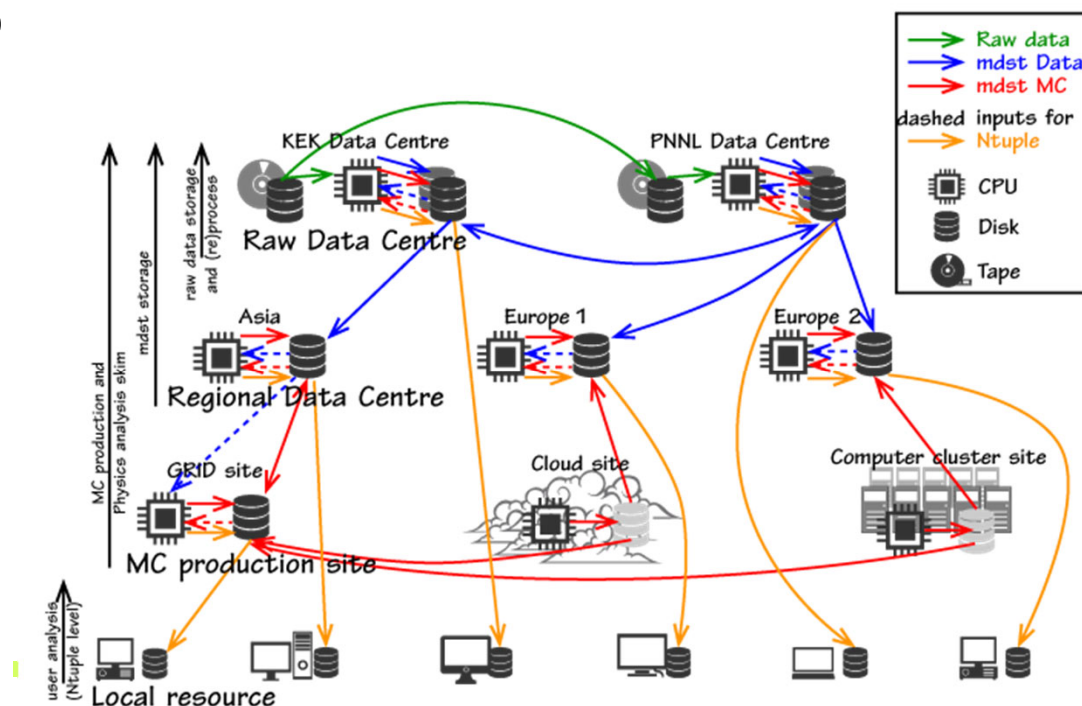
Svetovni splet: izmislili so si ga fiziki osnovnih delcev, ker so potrebovali orodje, ki bi jim omogočalo nemoteno raziskovalno delo tudi takrat, ko ne sedijo ob pospeševalniku.

Grid kot naslednja stopnja razvoja interneta: distribuirane računalniške kapacitete (‘računalnik iz vtičnice’)

Eksperimenti na LHC in Belle II so prvi veliki uporabniki Grida, razvoj in preizkus tehnologije

Na IJS deluje **SiGNET** (>2000 procesorjev, 800 TBy), del LHC Grida in del drugih Grid aplikacij

Obdelava podatkov pri Belle II:
GRID in Cloud



Kontrolni sistemi v pospeševalnikih

Bistveni element pospeševalnika! Merijo lastnosti žarkov (položaj, velikost) in omogočajo računalniško krmiljenje teh zapletenih naprav.

Izkušnje, pridobljene pri razvoju pospeševalnikov v fiziki osnovnih delcev, lahko koristno uporabimo pri načrtovanju pospeševalnikov za **študij materialov** (sinhrotroni) in **hadronsko terapijo** (zdravljenje raka z obsevanjem).

Slovenija igra zelo pomembno vlogo tudi na tem področju, **Instrumentation technologies** (Solkan) in **Cosylab** (Ljubljana) sta eni od vodilnih firm v svetu!

Fizika jedra in osnovnih delcev na FMF

