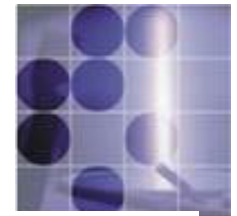


Na lovu za novimi delci

Peter Križan

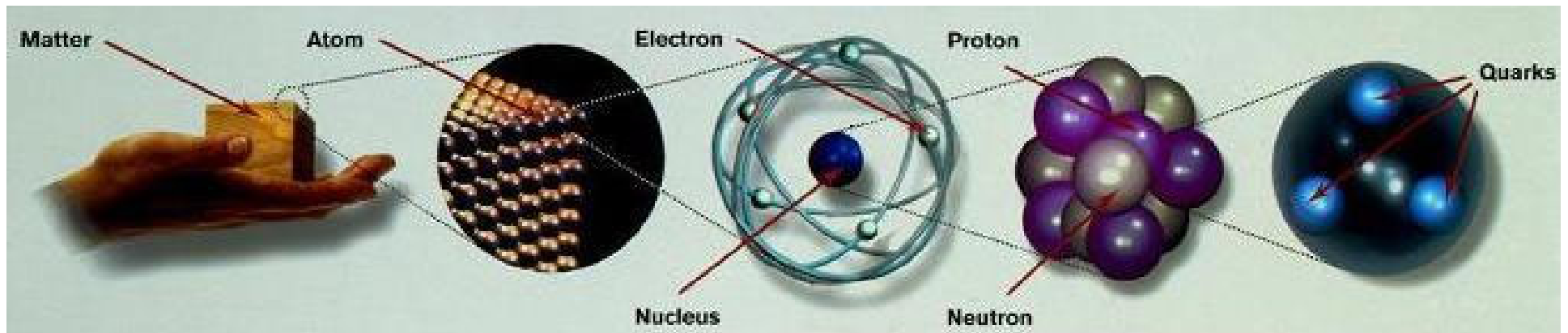
*Fakulteta za matematiko in fiziko UL,
in Institut Jožef Stefan*

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Festival znanosti Maribor 2024, 23.10.2024

DELCI po nadstropjih



snov

atomi

atomska jedra,
elektroni

protoni,
nevtroni

kvarki

'Standardni model': teorija osnovnih delcev

Osnovni delci so

- **kvarki** – na primer kvarka **u** in **d** iz protonov v atomskem jedru
- **leptoni** - na primer **elektron** iz atoma

Vsak **delec** ima svoj **antidelec**:

- vsakemu **kvarku** ustreza **antikvark**
- **elektronu** e^- ustreza **pozitron** e^+

Antidelcev v naravi ni (več), lahko jih ustvarimo v pospeševalnikih

Standardni model

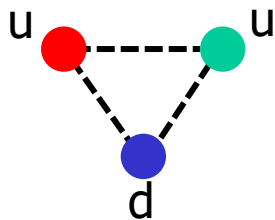
(teorija osnovnih delcev in njihovih interakcij)

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

Delci imajo zelo različne mase: kvark t ima 400.000x večjo maso kot elektron!

Barioni in mezoni: vezana stanja kvarkov in antikvarkov

V naravi **ni prostih kvarkov** – nastopajo samo v povezavi z drugimi kvarki.



proton: uud
nevtron: udd

masa
 $1 m_p$
 $\sim 1 m_p$

...pa še...

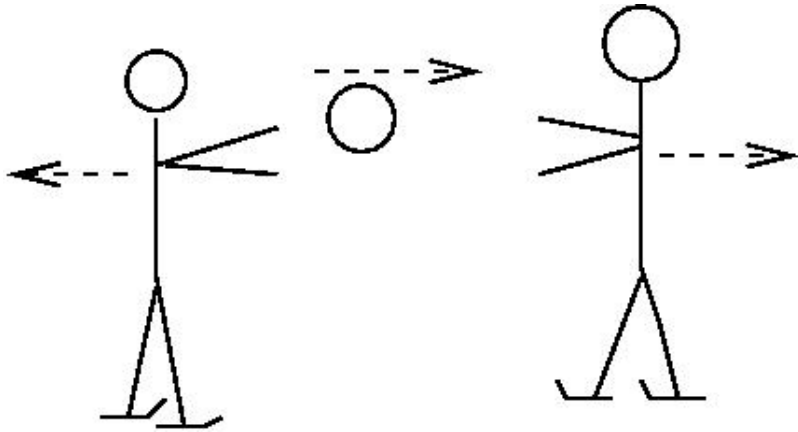
π^+ : kvark u + antikvark \bar{d}

B^0 : kvark d + antikvark \bar{b}

masa
 $1/7 m_p$
 $5.5 m_p$

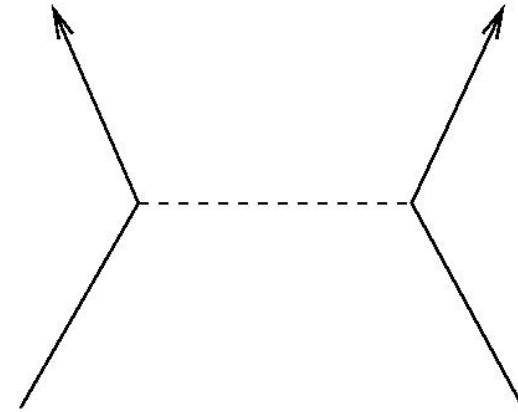
in množica njihovih sorodnikov...

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.

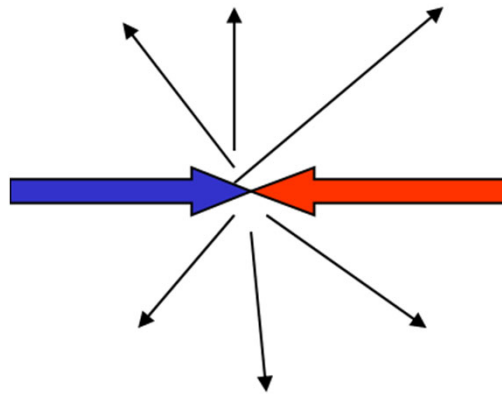


Osnovni delci sodelujejo (interagirajo) med sabo preko nosilcev sile (interakcije)

elektromagnetna	foton γ
šibka	šibki bozoni W^+ , W^- , Z^0
močna	gluoni g

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

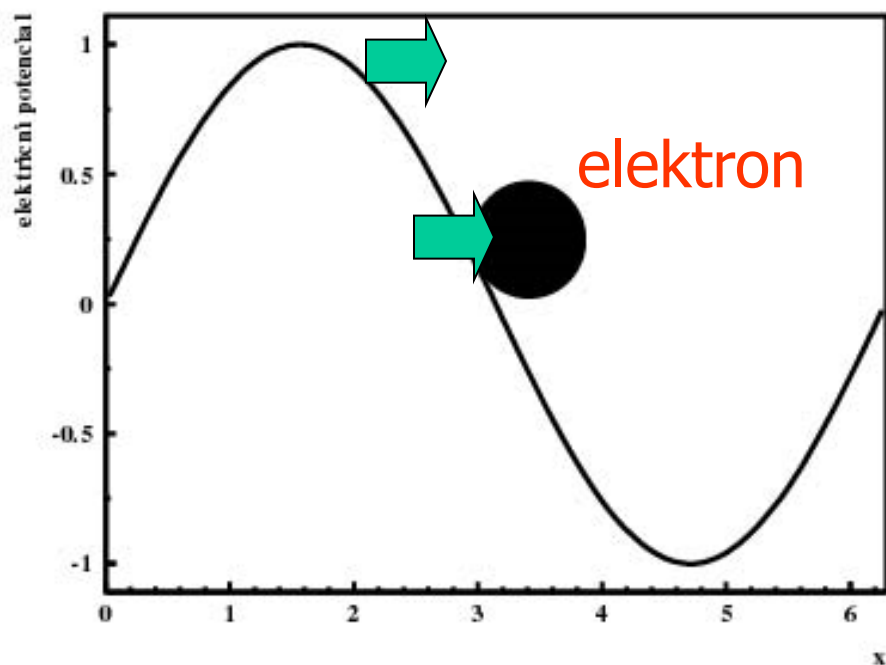
Proučujemo lastnosti masivnih nestabilnih delcev, ki jih ne najdemo v naravi.



Stabilne delce (recimo protone ali elektrone/pozitrone) pospešimo, jih pustimo, da trčijo eni v druge, pri tem pa nastanejo masivnejši nestabilni delci.

Kako pospešujemo nabite delce?

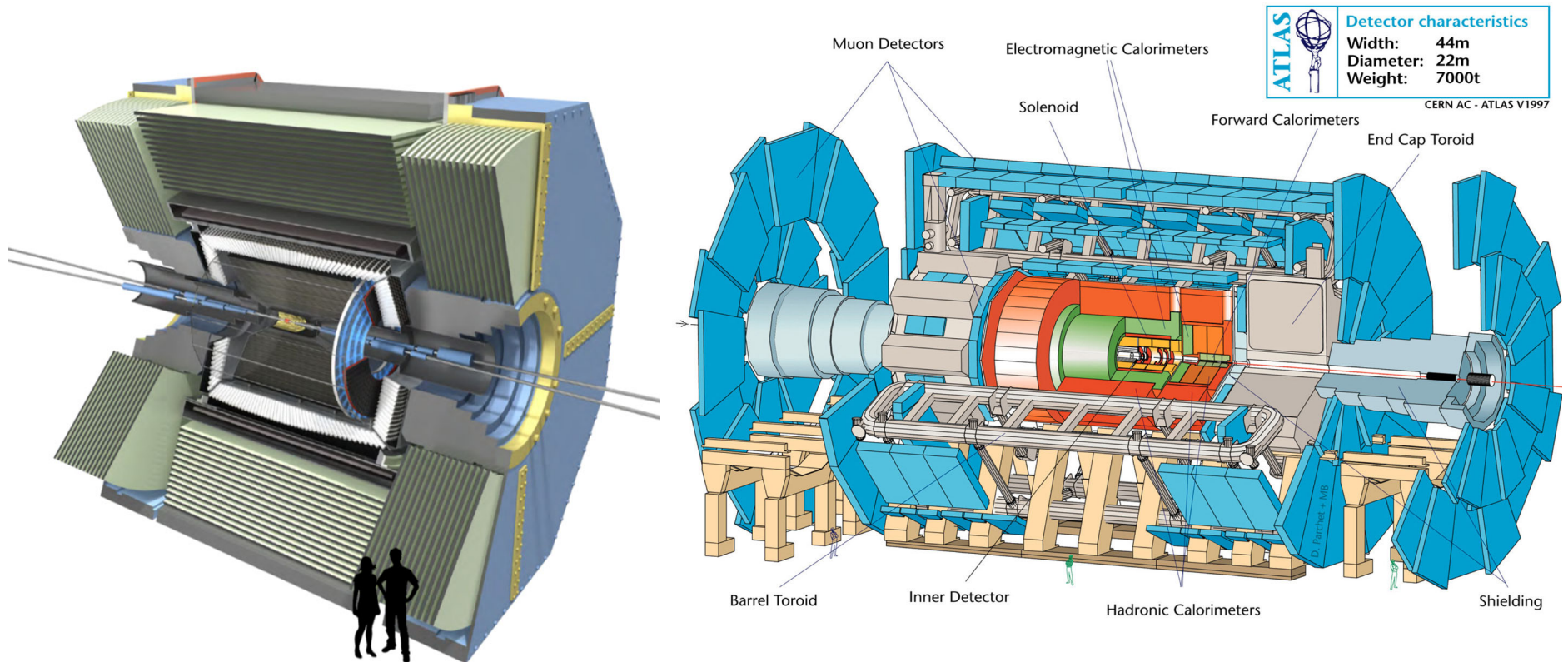
- Pospeševanje z elektromagnetnim valovanjem (tipična frekvenca 500 MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 oz. 1800 MHz)



... podobno deskanju na valovih

→ predavanje dr. Schaefer

Detektorji: stotine kubičnih metrov vrhunske raziskovalne opreme



Dve veliki vprašanji

Zakaj ni v vesolju skoraj nič anti-delcev?

Odkod delcem masa?

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

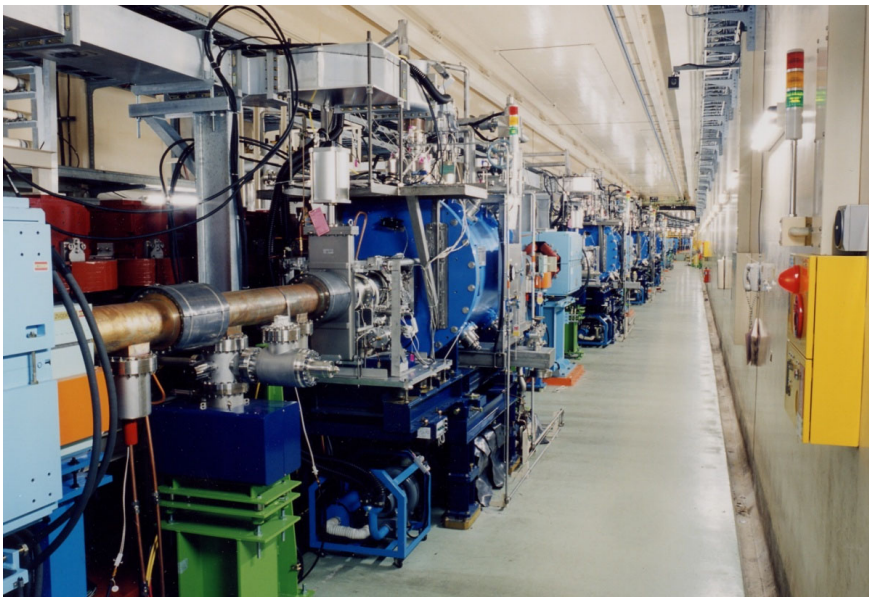
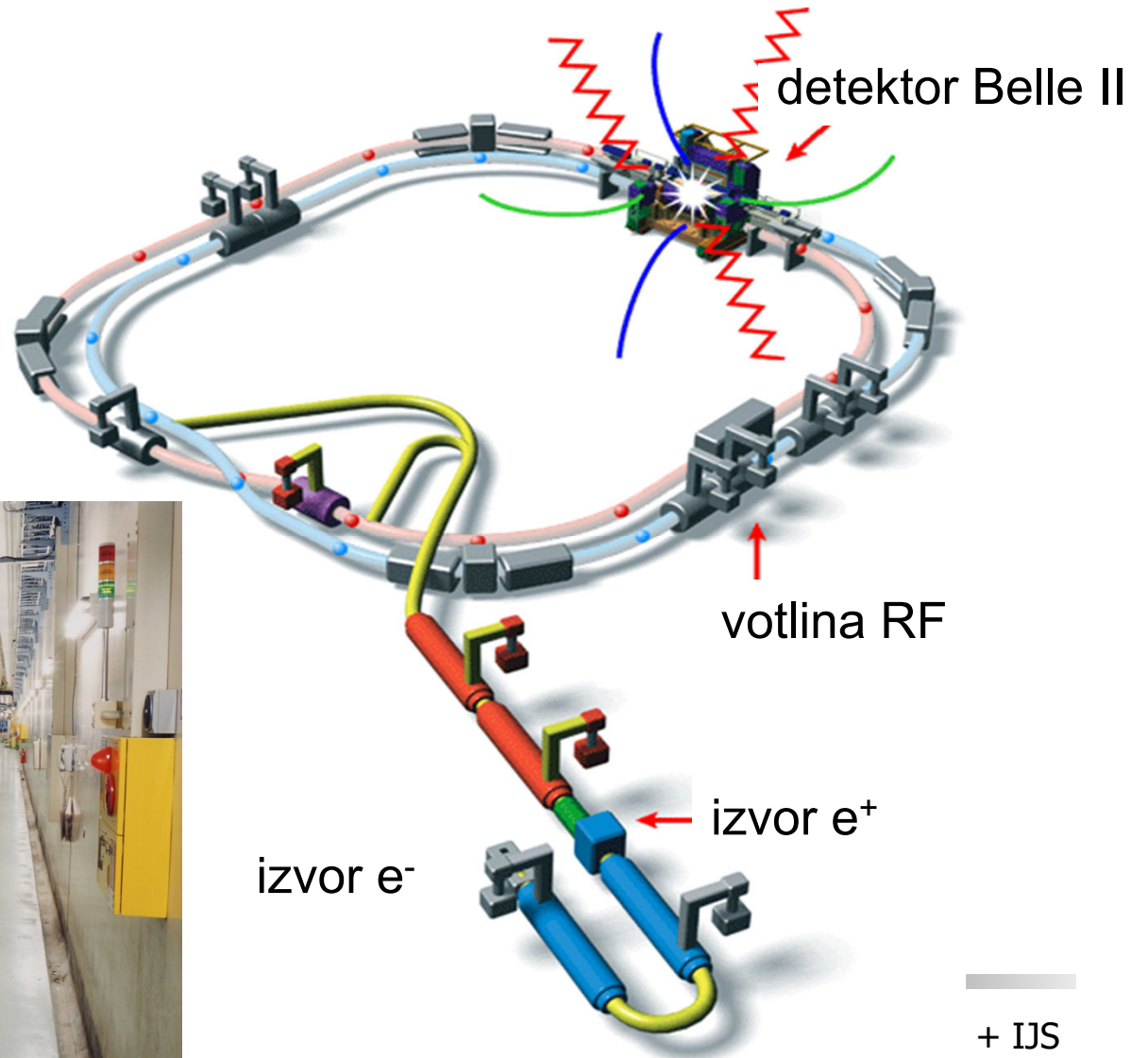
→ Simetrija CP med delci in anti-delci je kršena.

Eksperiment Belle II: Kako se delci razlikujejo od anti-delcev?



Trkalnik SuperKEKB

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



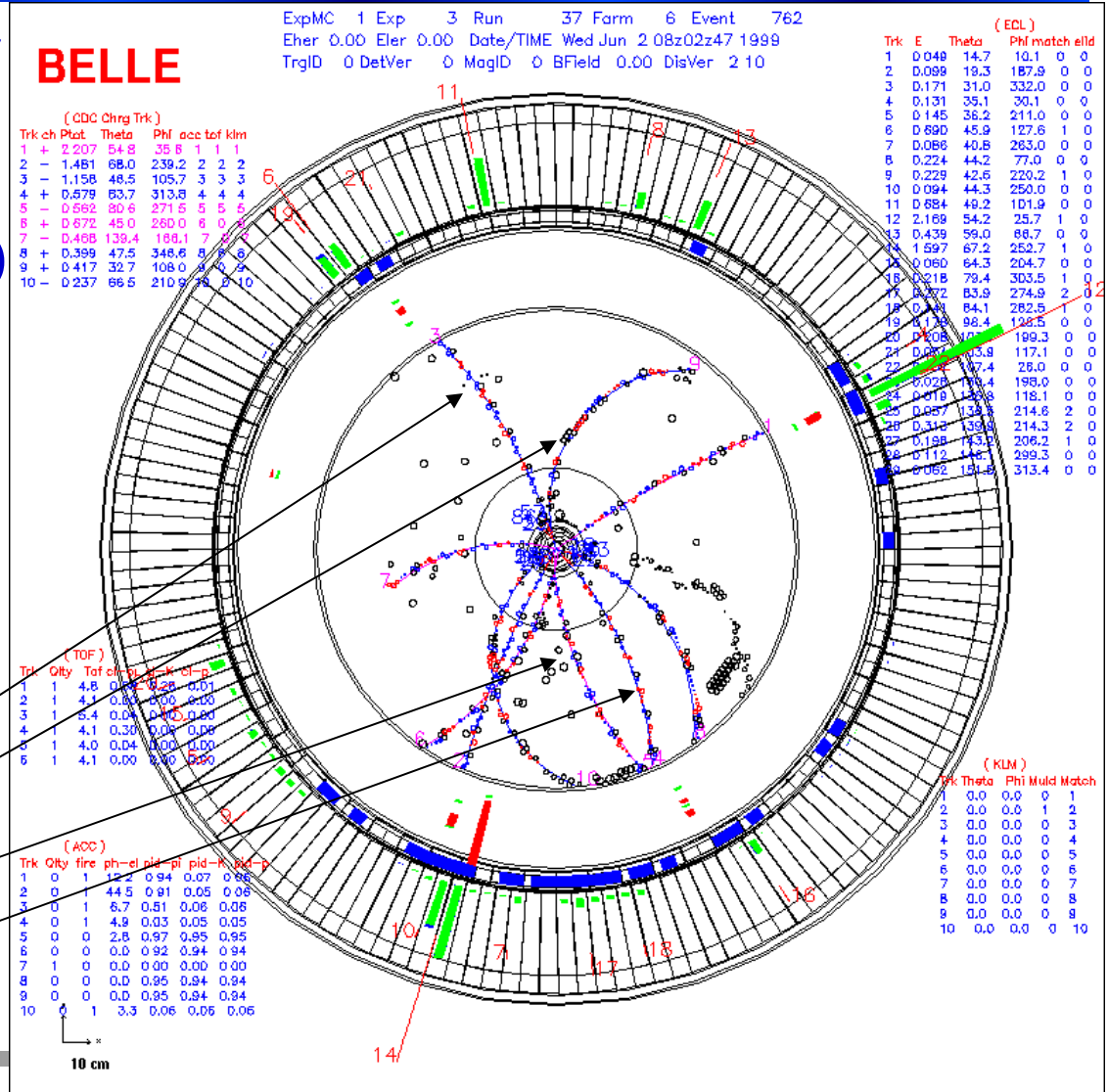
Kaj izmerimo z detektorjem?

- sledi nabitih delcev v magnetnem polju (polmer kroga je odvisen od gibalne količine delca)
- koordinate točke, od koder sledi izhajajo
- vrsto delca

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

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

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



Detektor Belle II

Detector za mione in KL
Resistive Plate Counter
Scintilator + WLSF + SiPM

EM kalorimeter:
CsI(Tl) z vzorčevalno elektroniko

Identifikacija delcev
Time-of-Propagation detektor (sodčasti del)
Aerogel RICH (smer naprej)

Elektroni (7GeV)

Žarkovna cev iz berilija
premer 2cm

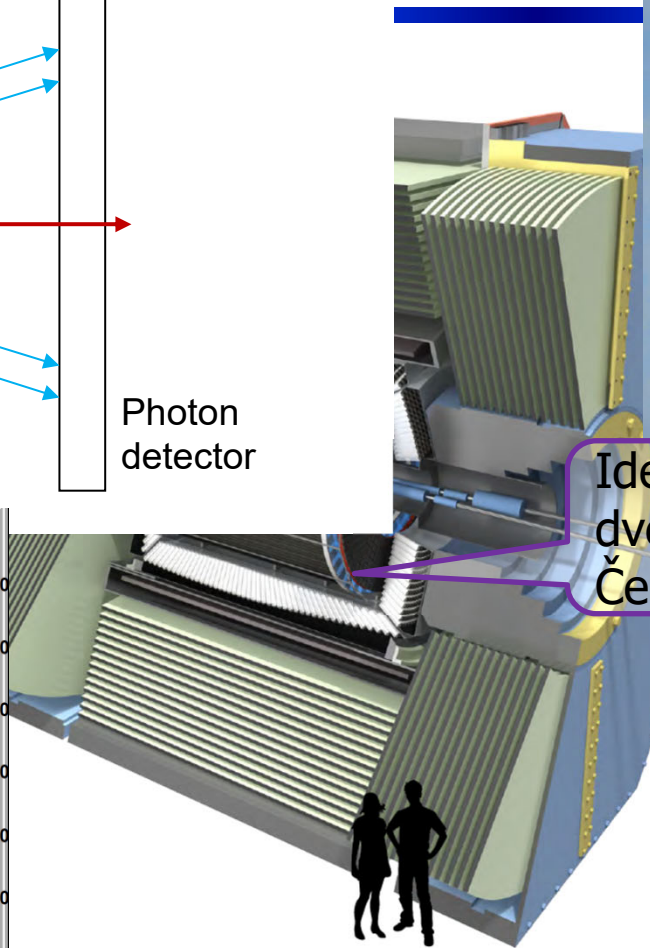
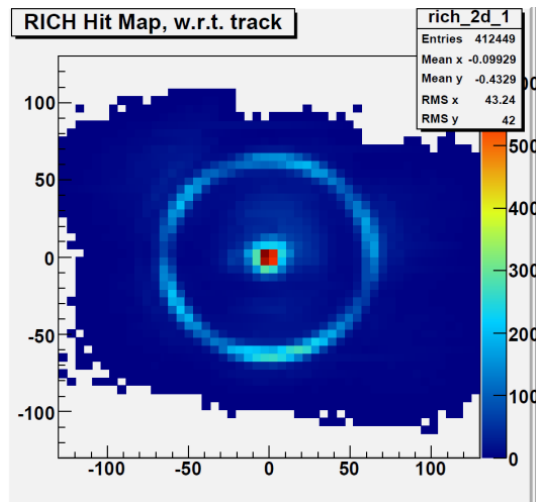
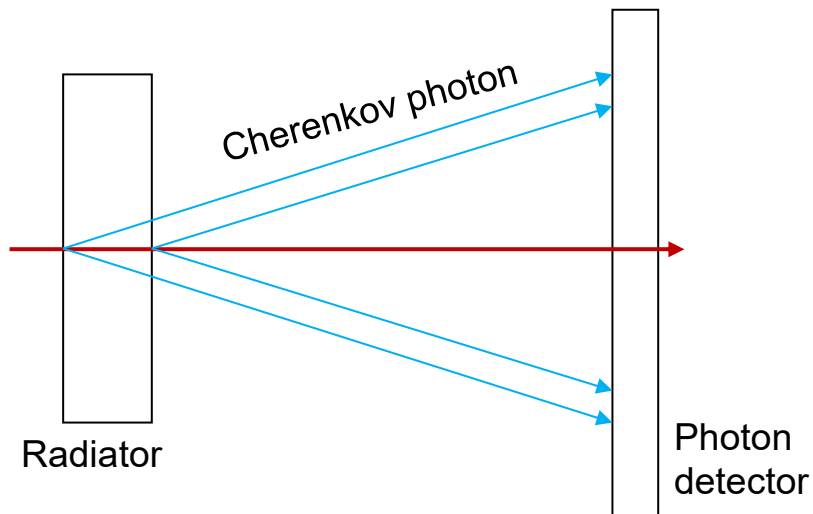
Detektor verteksov
2 plasti DEPFET + 4 plasti DSSD

pozitroni (4GeV)

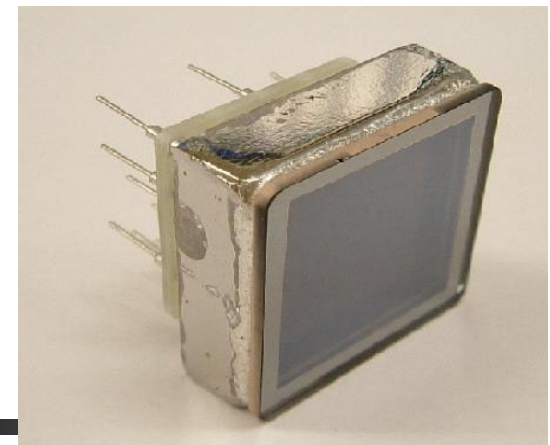
Centralna drift komora
He(50%):C₂H₆(50%), majhne drift
celice, hitra elektronika



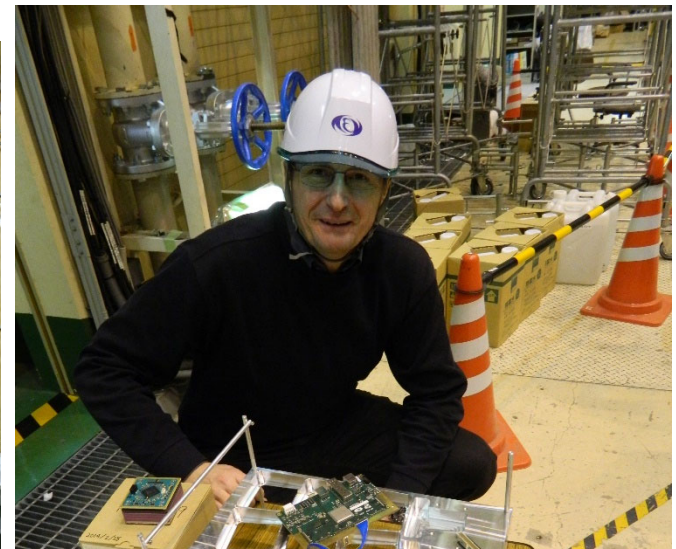
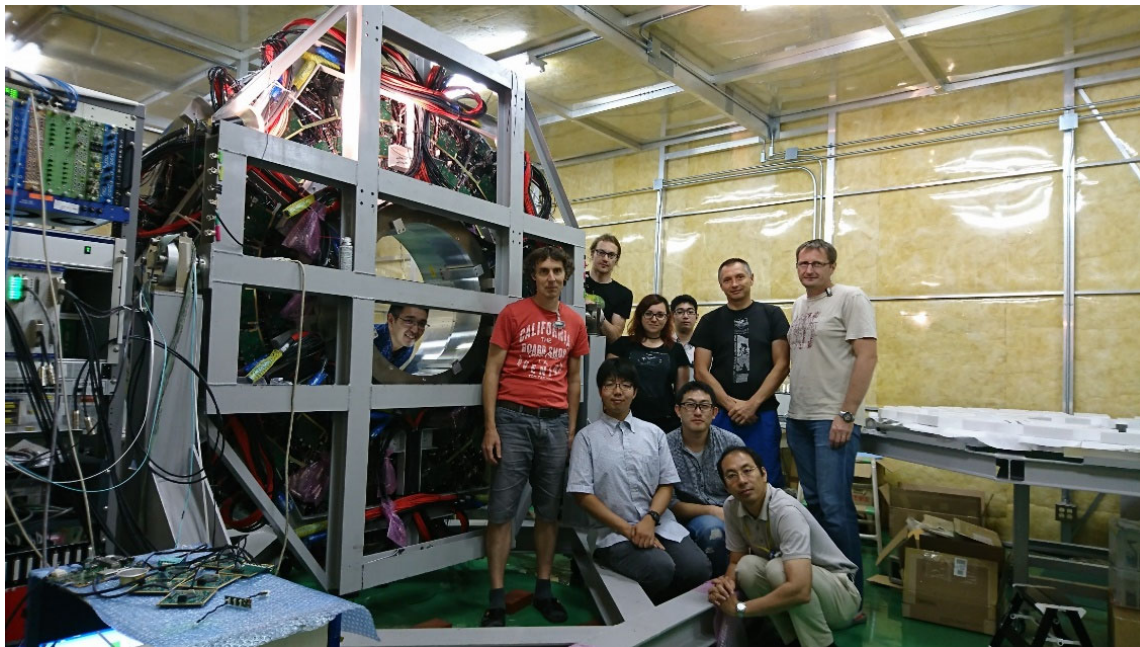
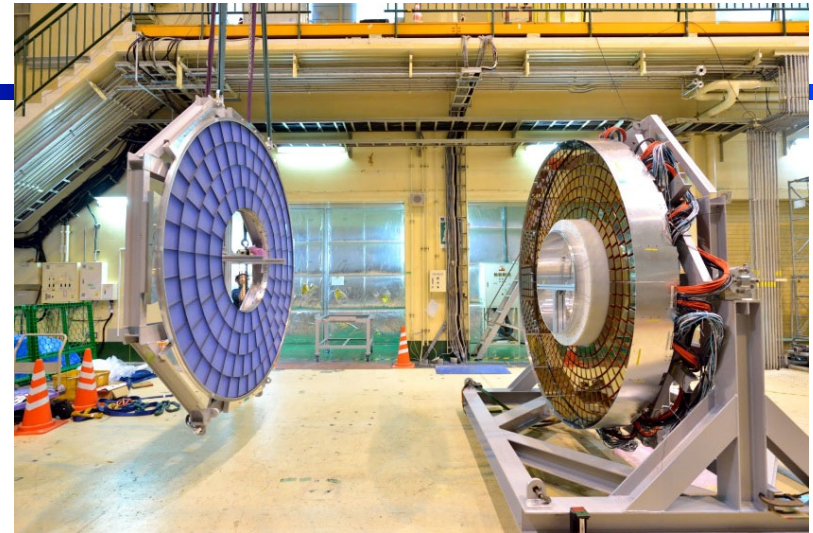
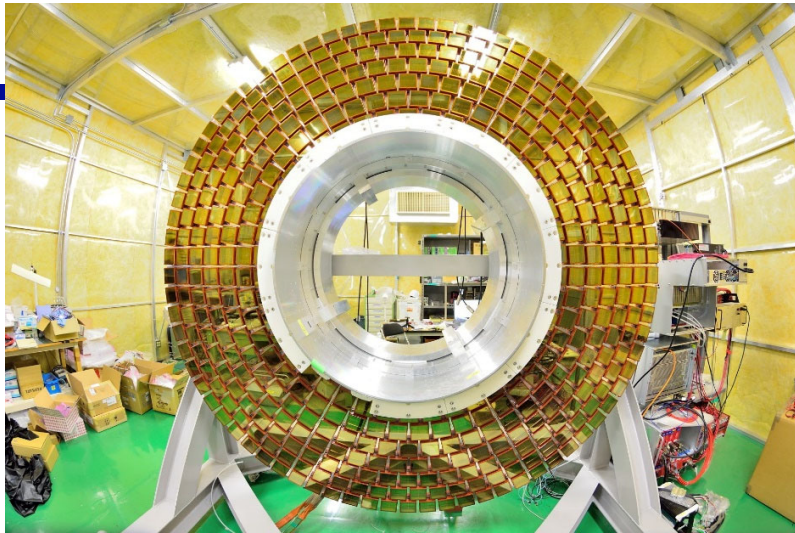
Za identifikacijo uporabimo **pojav sevanja Čerenkova**: svetloba, ki jo seva delec, ki je **hitrejši kot hitrost svetlobe** v snovi – podobno kot **udarni val nadzvočnega letala!**



Identifikacija nabitih delcev z dvema detektorjema Čerenkovega sevanja



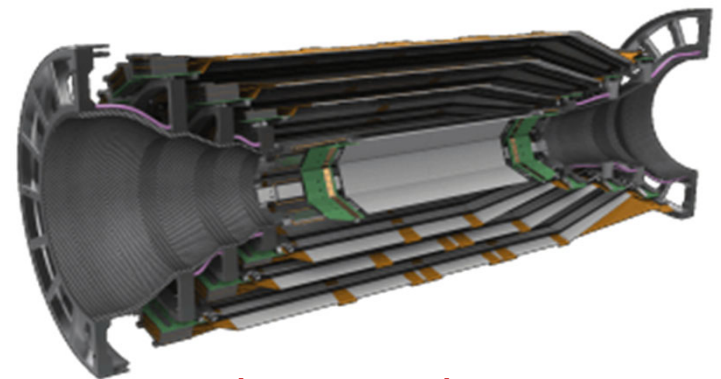
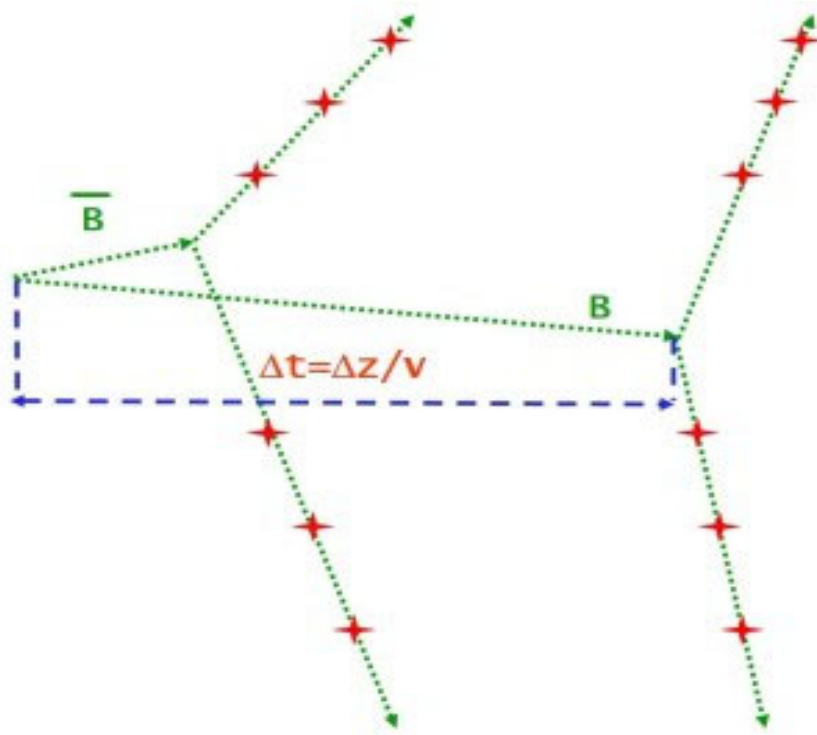
Veliko oko



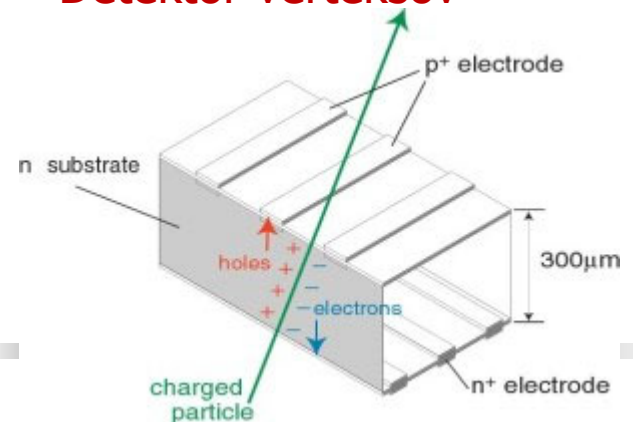
Samo Korpar (FKKT UM), vodja tega detektorskega sklopa

Meritev razlike med delci (mezoni B^0) in antidelci (\bar{B}^0)

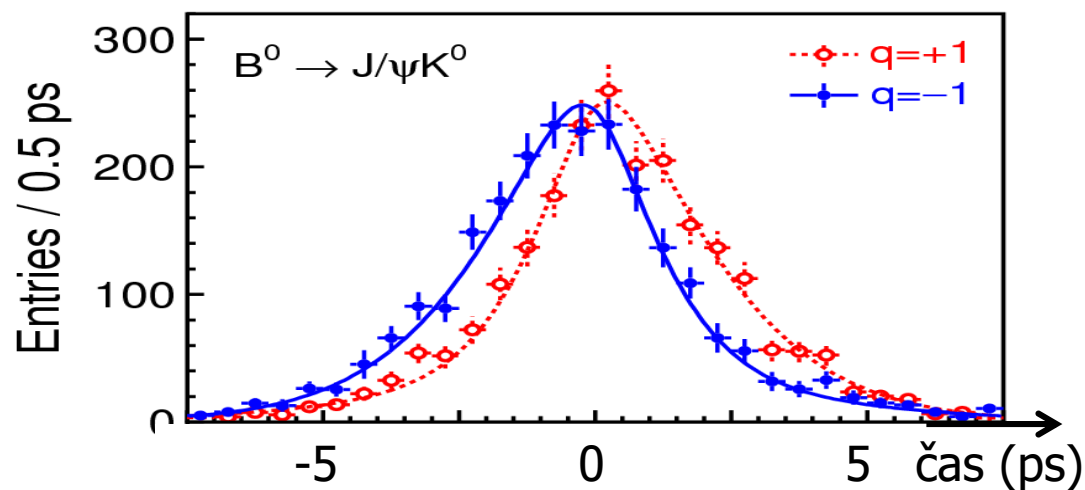
Zanima nas razlika v časovnem razvoju pri delcih in antidelcih.
Časi: pikosekunde (10^{-12} s). Namesto meritve časa s 'štoparico' zelo natančno izmerimo dolžino poti, ki so jo mezoni B preleteli z znano hitrostjo, preden so razpadli.



Detektor verteksov



Rezultat meritev



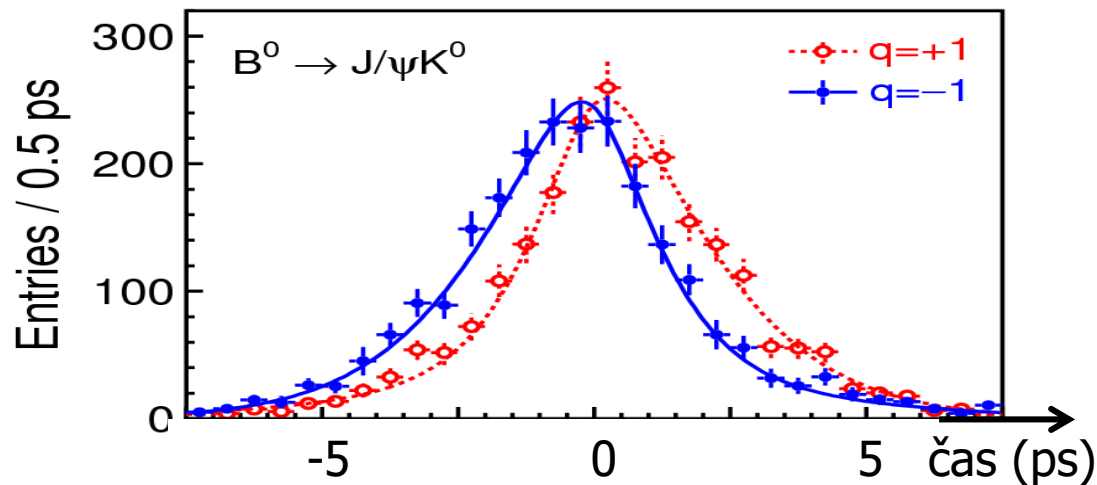
Modra: časovni potek razpada za mezone B
Rdeča: isto za anti-B

→ **Delci se razlikujejo od antidelcev!**

Rezultat meritev: zmagoslavje Standardnega modela!

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

Nobelova nagrada 2008!



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!



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

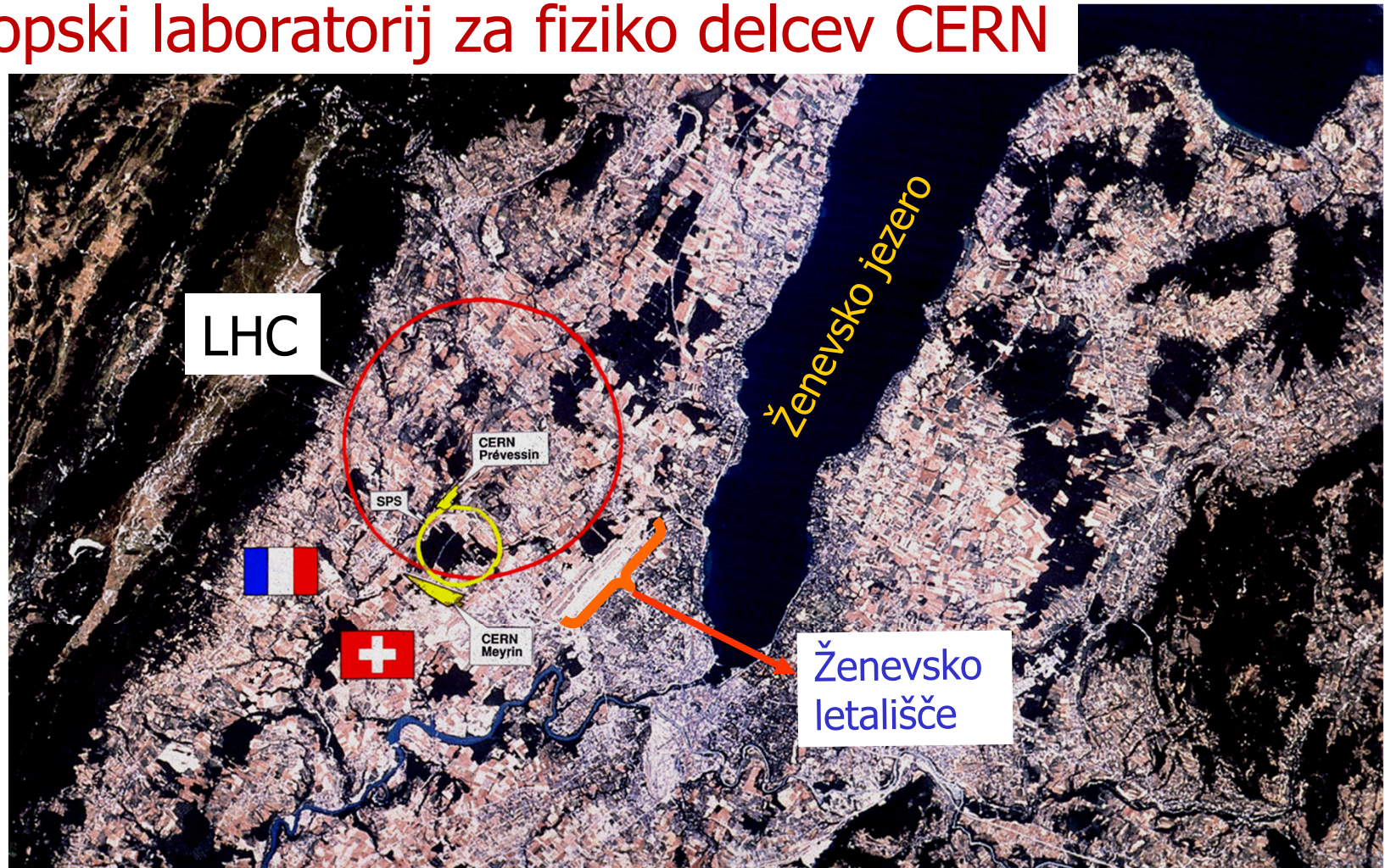
Elektromagnetno polje → nabit delec (e^-) občuti silo
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

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

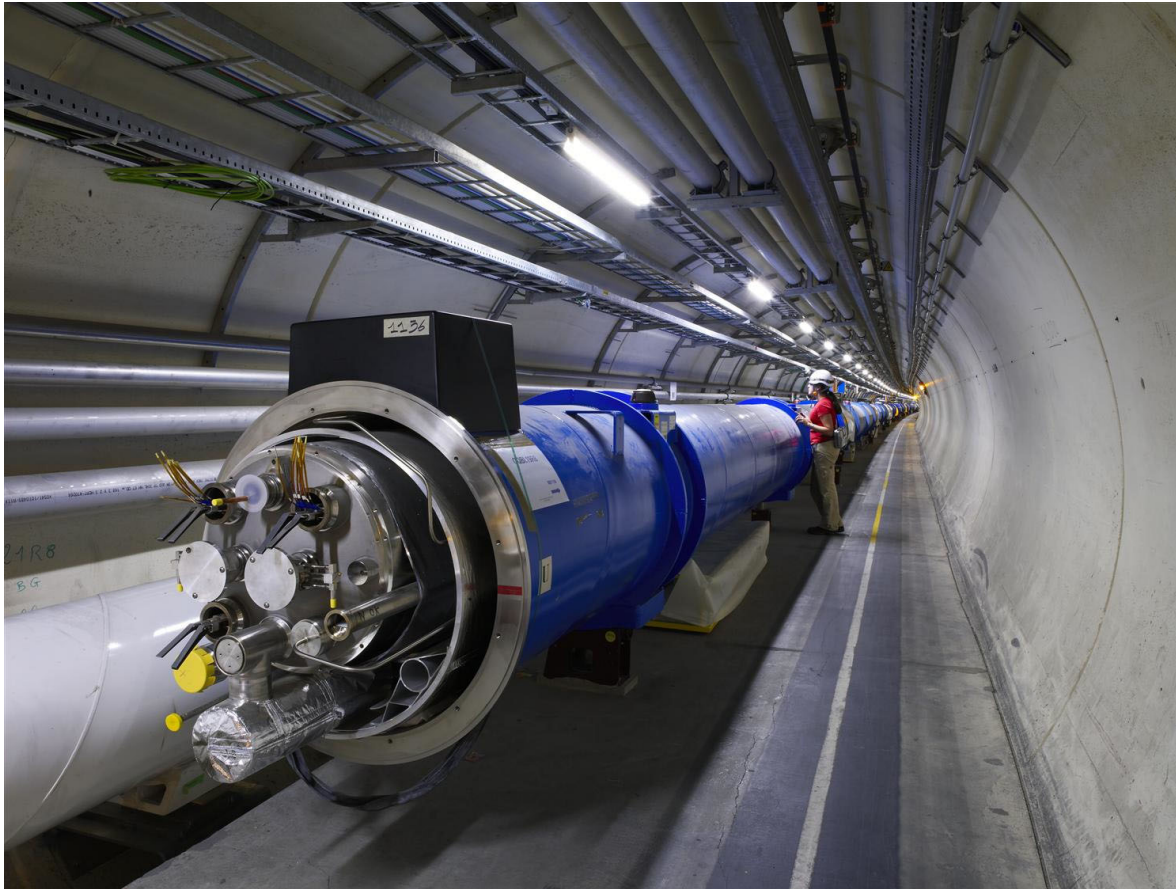
elektromagnetno polje ima svoje delce – fotone
Higgsovo polje ima svoje delce – **Higgsove bozone**

Na lovu za Higgsovim delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN




LHC = Large Hadron Collider



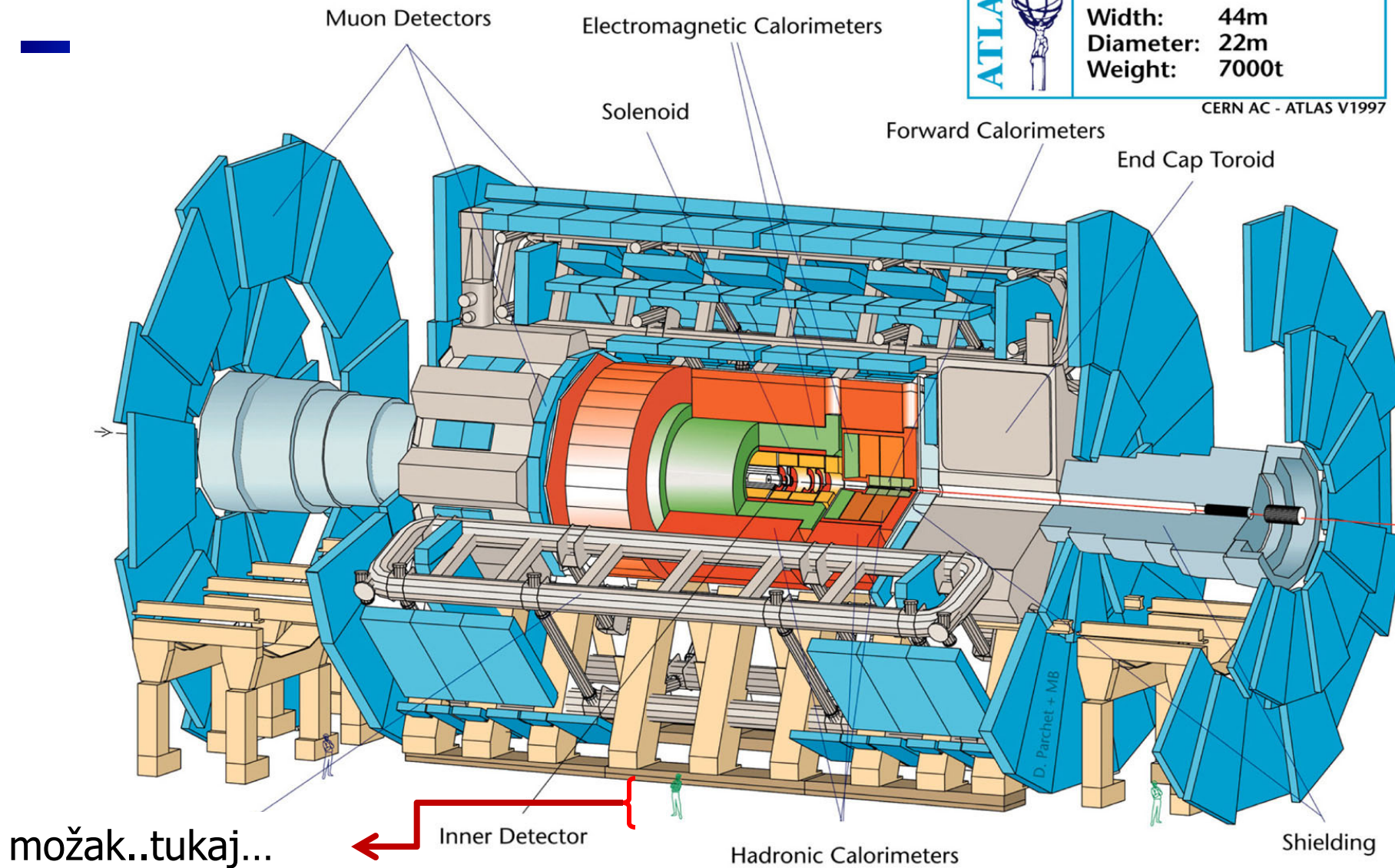
del 27 km dolgega
pospeševalnika



Detektor ATLAS ob LHC

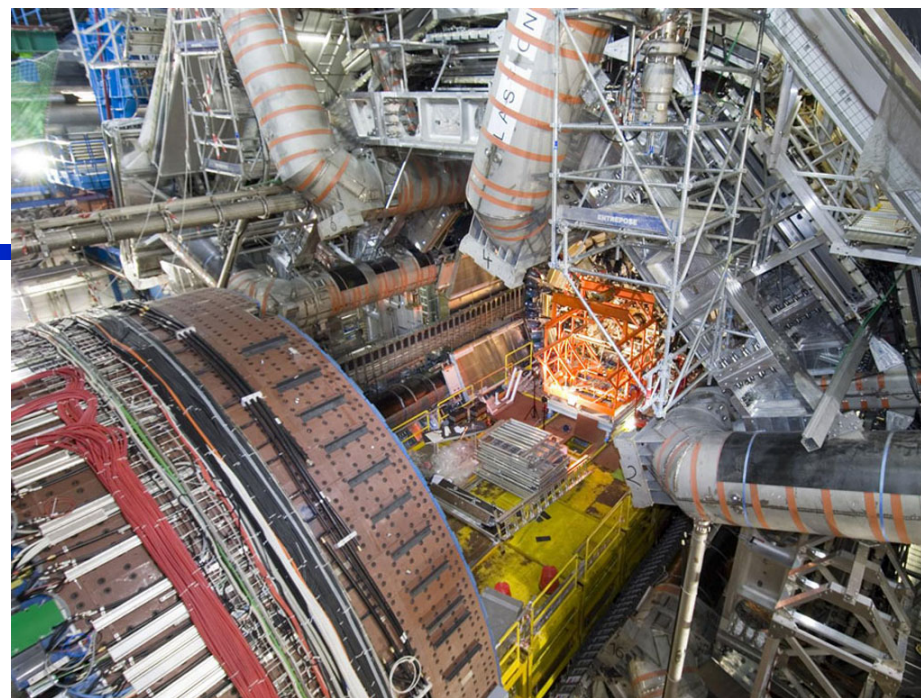
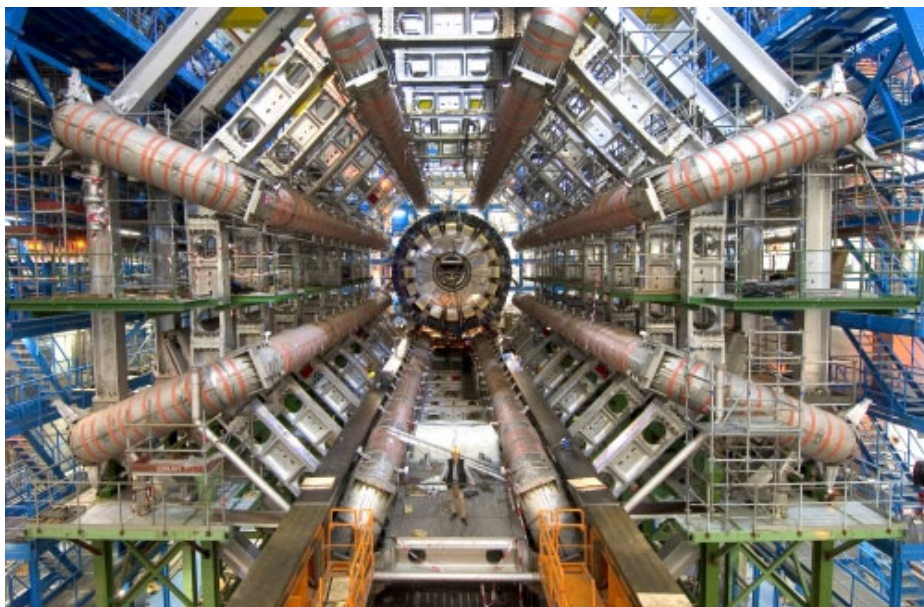
	Detector characteristics
	Width: 44m
	Diameter: 22m
	Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997



možak..tukaj...

Detektor ATLAS med gradnjo



Pomemben delež slovenskih raziskovalcev (IJS in FMF UL)

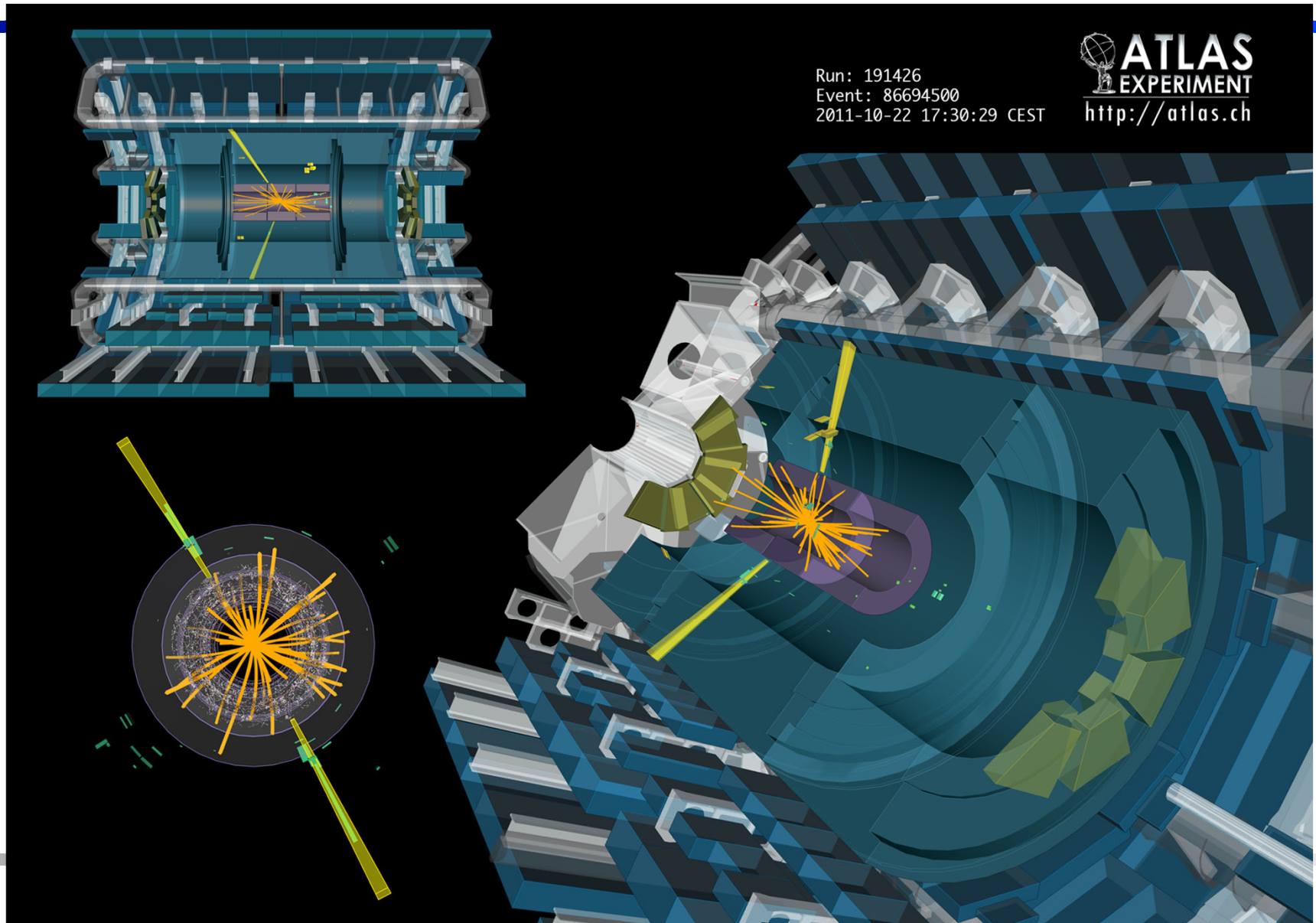


Marko Mikuž

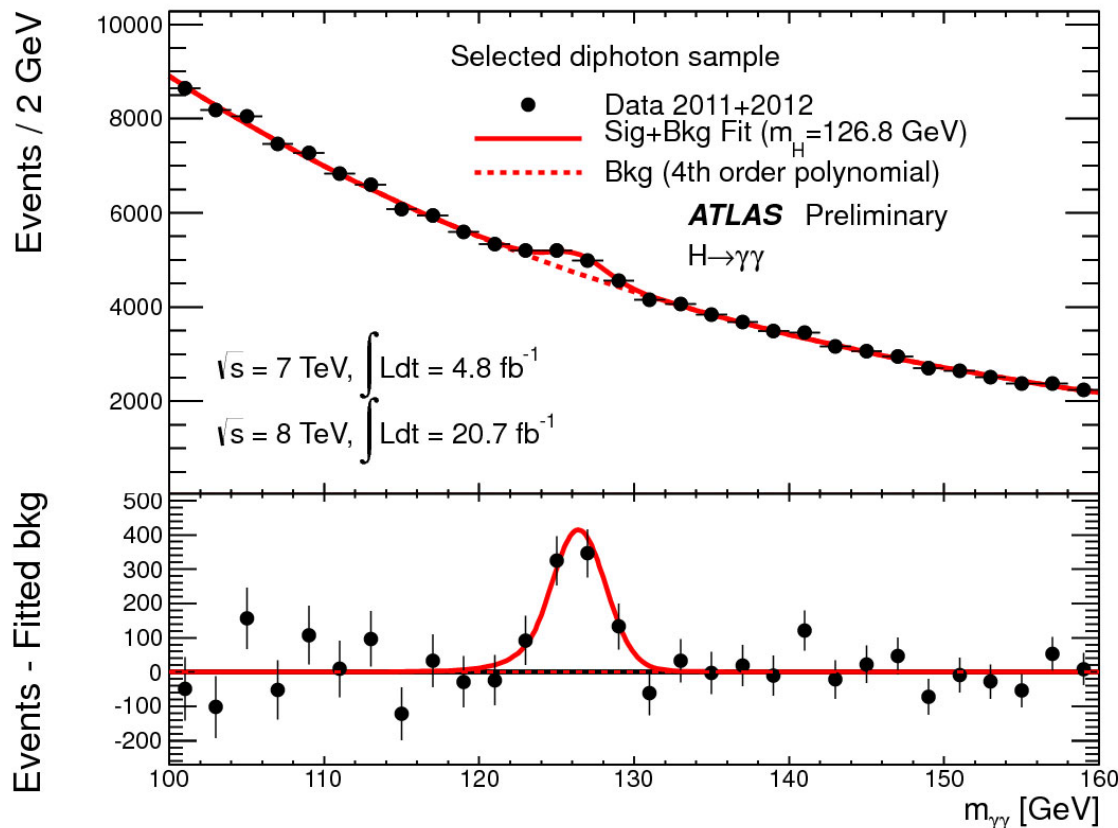


Kontrolna soba med
meritvami...

Razpad Higgsovega delca v dva visokoenergijska žarka gamma, $H \rightarrow \gamma\gamma$, v detektorju ATLAS



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 je bilo treba počakati do 2013, ko so nabrali dovolj velik vzorec podatkov, da so lahko opravili dodatne meritve.

- 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

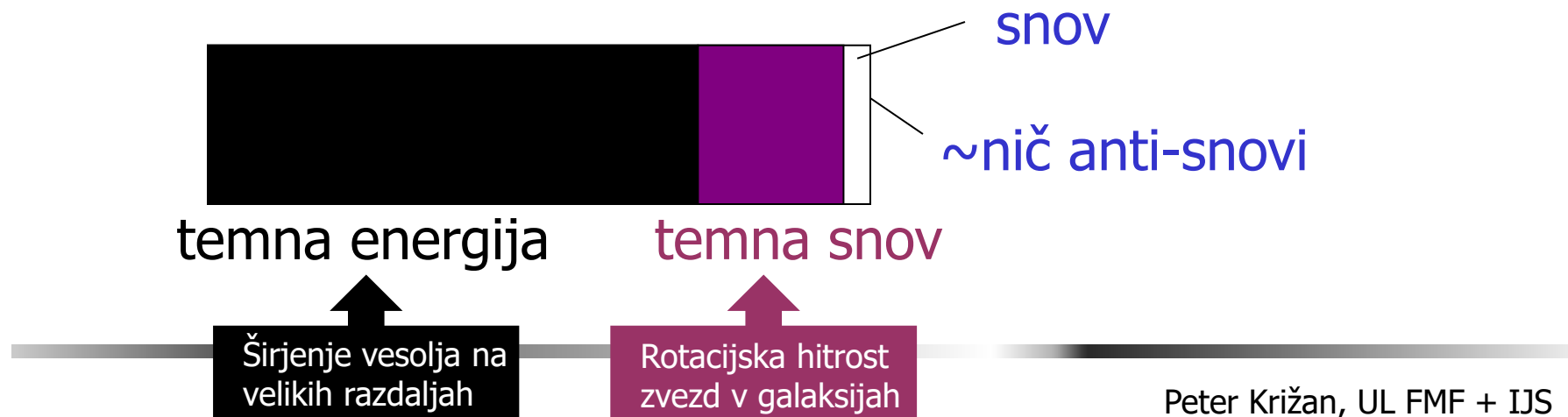
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

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

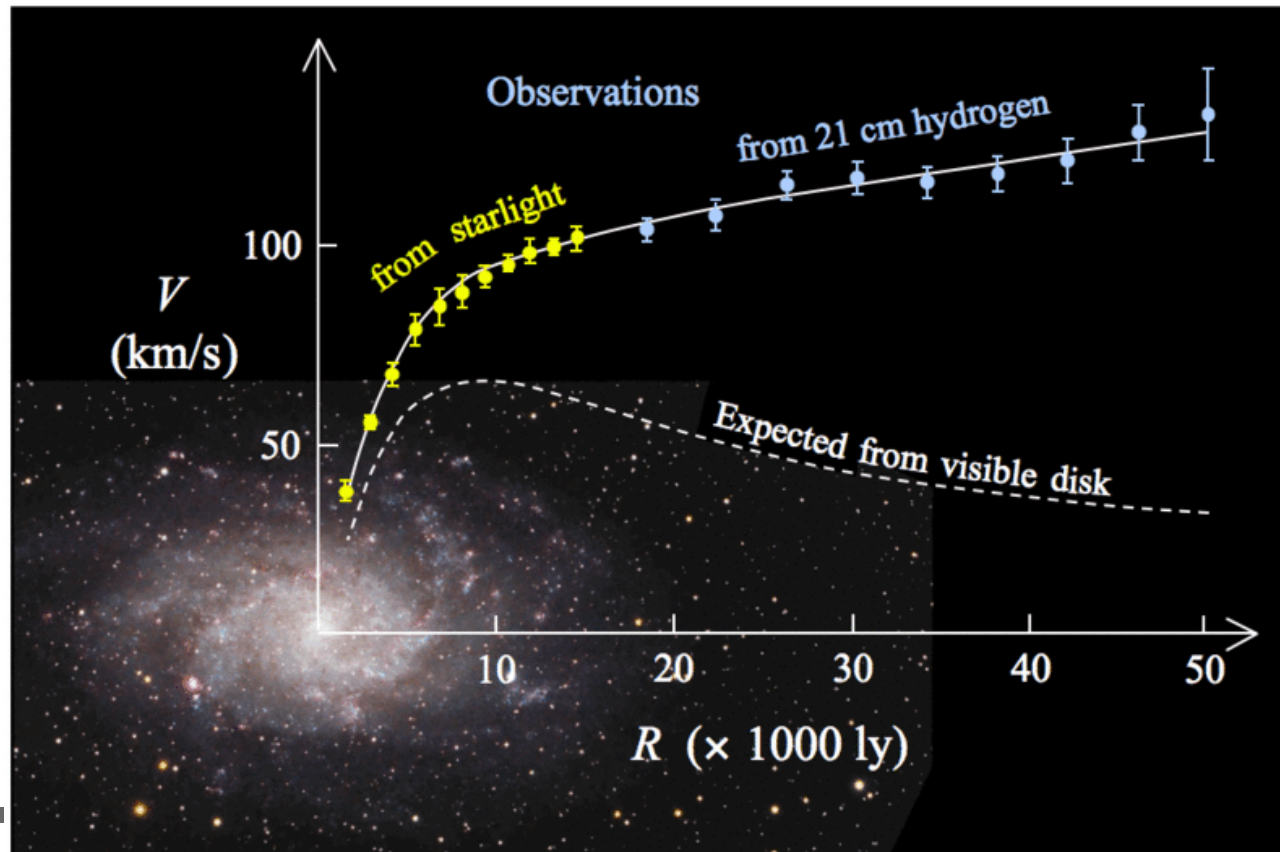
In nenazadnje: večina vesolja je narejena iz delcev, ki jih ne poznamo...



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)
- **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**.

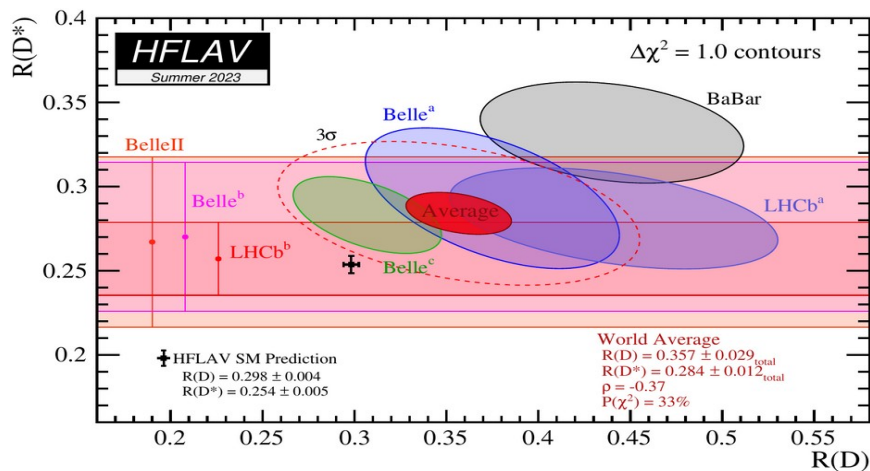
LHC



Belle II

Kje smo trenutno pri iskanju novih fizikalnih pojavov v fiziki delcev?

Nekatere meritve kažejo na odstopanja od napovedi Standardnega modela

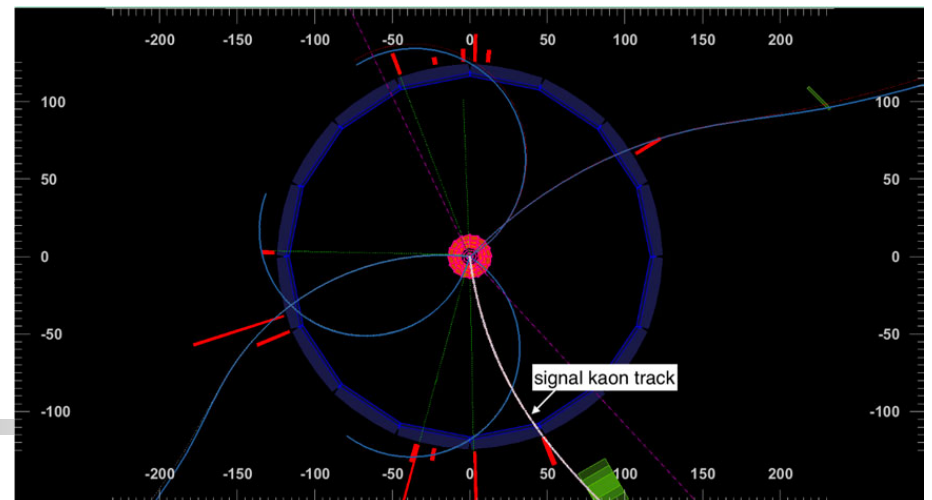


Meritve razmerij verjetnosti $R(D)$ in $R(D^*)$ za posebne razpade mezonov B se ne skladajo z napovedmi – zanimivo, vendar je potrebnih več podatkov

$$R(D, D^*, X) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D, D^*, X\tau\nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D, D^*, X\ell\nu)}$$

with ℓ a light lepton

Ultra redek razpad mezona B v kaon in dva nevtrina: iz meritev sledi, da je verjetnost za ta razpad znatno večja od pričakovanj Standardnega modela → težka meritev, dodatne meritve so v teku



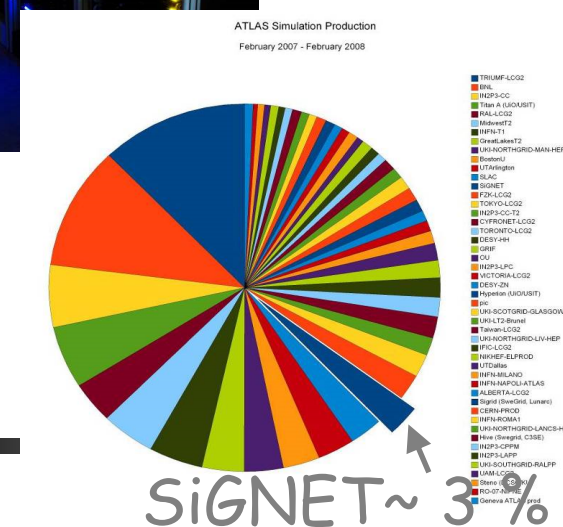
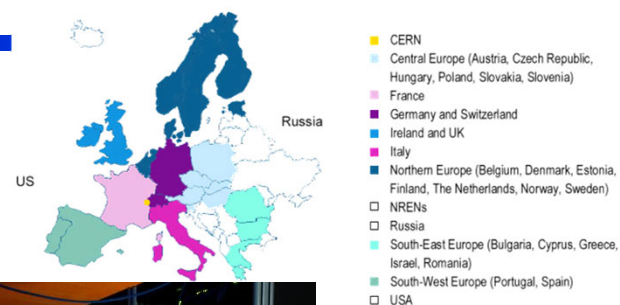
Spin-off osnovnih raziskav – primer 1

Svetovni splet: izmislili so si ga fiziki osnovnih delcev pred natančno **30 leti**, 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’)

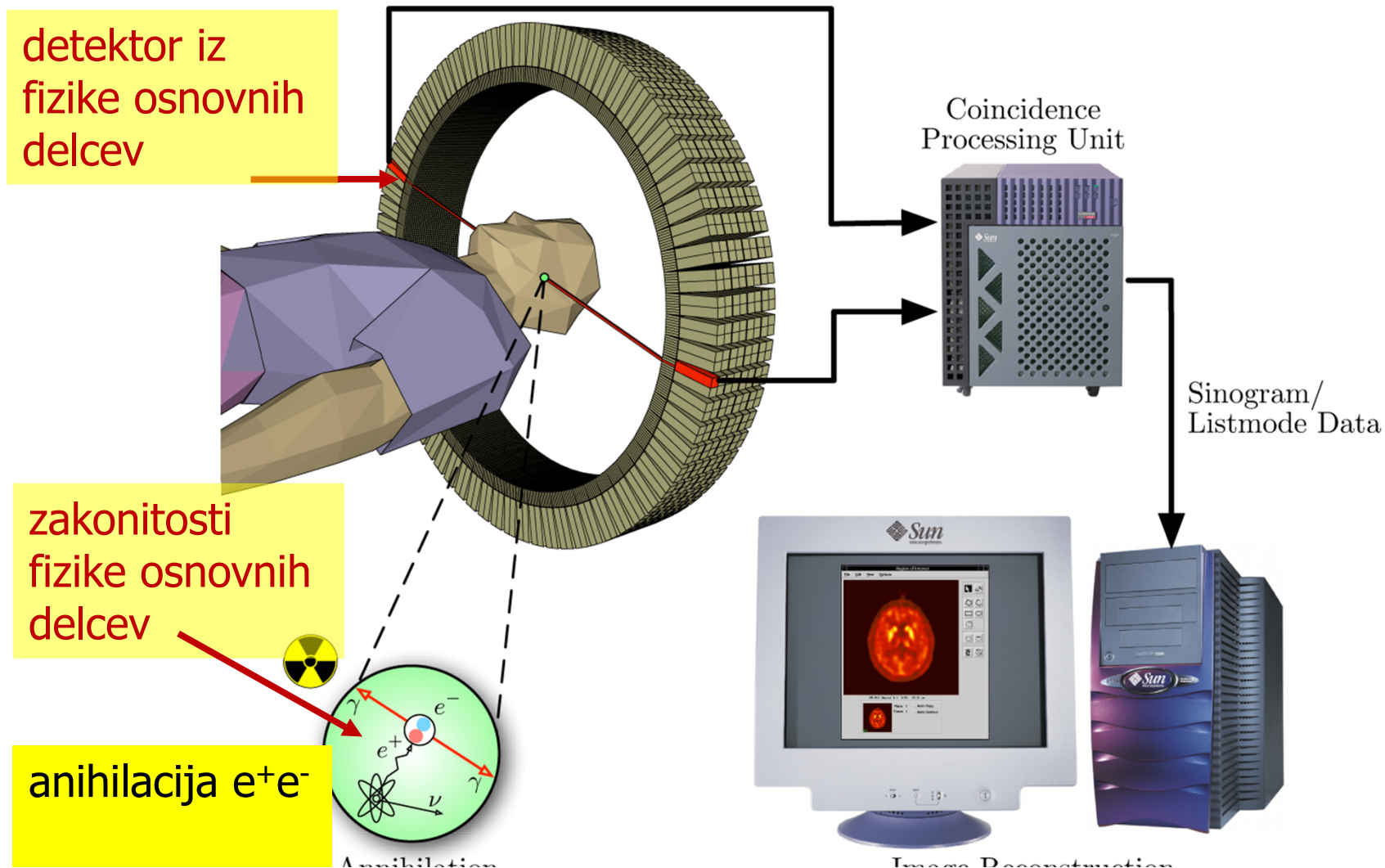
LHC je prvi veliki uporabnik Grida, razvoj in preizkus tehnologije

Na IJS deluje **SiGNET**, del LHC Grida in del drugih Grid aplikacij



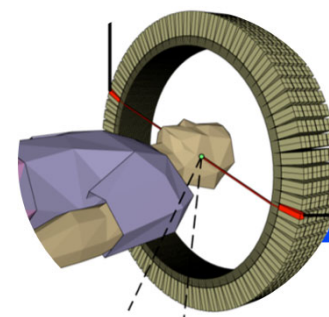
Spin-off osnovnih raziskav – primer 2

PET: pozitronska tomografija

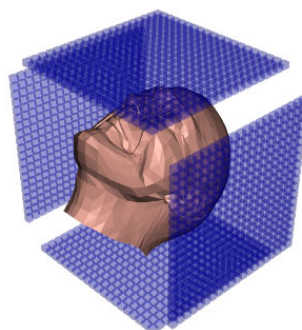


Uporaba rezultatov naših raziskav pri izzivih sodobne družbe

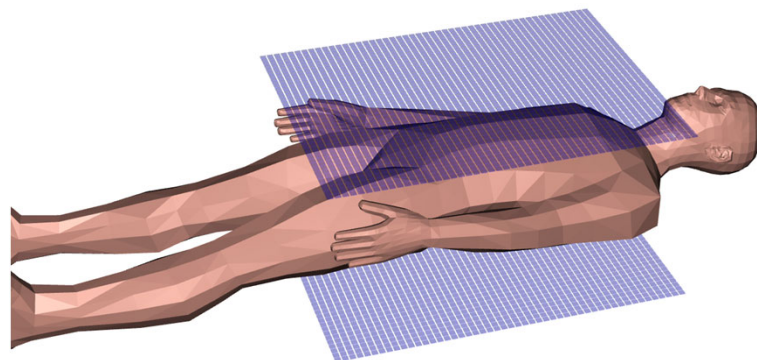
Instrumentacija za napredek v slikanju s PET



- Izzivi: 1) potrebujemo **cenejše** naprave (za pokrivanje manj razvitih regij)
2) potrebujejo naprave za **pokrivanje celotnega telesa** (izboljšana diagnostika)



Drag standardni skener → modularna planarna naprava, prilagodljiva geometrija, preprostejša izdelava – **veliko ceneje z enako zmogljivostjo!**



Ideja: iz modulov velikosti 30 cm x 30 cm sestaviti skener celega/polovičnega telesa. **Izboljšana diagnostika** poprecej **nižji ceni** od trenutne najsodobnejše naprave (~15 MEUR) → Pričakujemo enako zmogljivost!

Zaključek

Fizika osnovnih delcev povezuje lastnosti narave na najmanjših razdaljah z lastnostmi mladega vesolja.

Meritev kršitve simetrije med delci in anti-delci in odkritje Higgsovega bozona sta dokončno utrdila Standardni model.



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

Odkritja novih delcev (in njihova razlaga) bi lahko spremenili dožemanje sveta okoli nas podobno, kot ga je odkritje kvantne mehanike ob pričetku 20. stoletja.

Slovenski fiziki smo v prvih vrstah iskanja odgovorov na nova vprašanja, ki se postavljajo na tem področju.

Posredne rezultate svojih raziskav poskušamo uporabiti pri napredku v medicini in varovanju okolja.