

Moderna fizika: nekaj zanimivosti in predstavitev predmeta

Peter Križan

DELCI**in****SILE****po****nadstropjih**

Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
10^{21}	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
10^{14}	<p>Nadstropja se zelo dobro ločijo med sabo: ko opisujemo pojave v enem od njih, lahko v večini primerov zanemarimo sosednja nadstropja.</p>			ohranitev vrste	kozmiolog, astrofizik, astronom
1					biolog, zdravnik, sociolog...
10^{-8}			magnetna	nestrost svetlobe, življenja	kemik, fizik
10^{-10}	<p>Razen... povezave med najnižjim in najvišjim! Obstaja tesna povezava med fiziko osnovnih delcev in razvojem vesolja.</p>				atomski fizik
10^{-14}					
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)

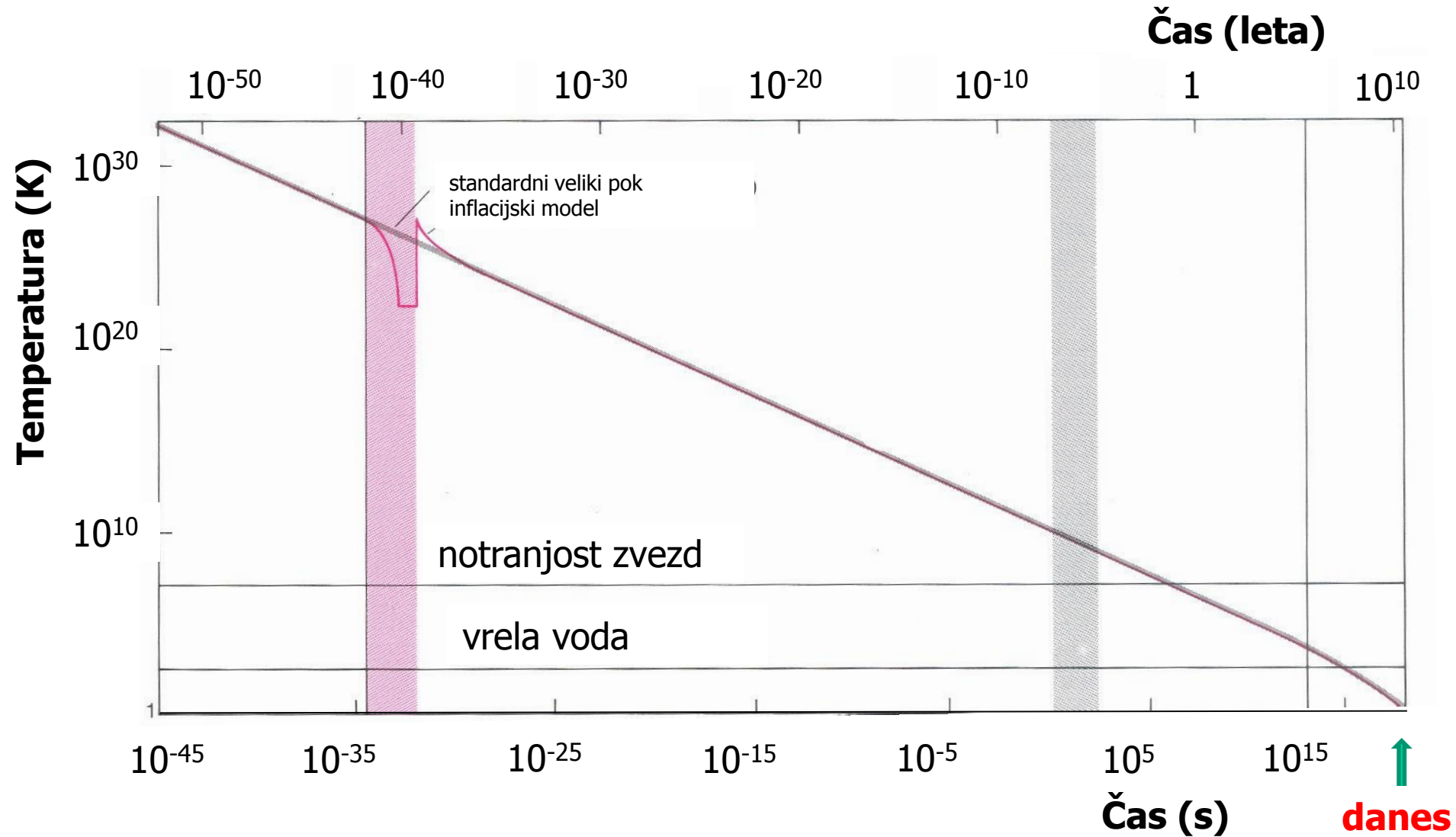


Plin pri visoki temperaturi: **velika hitrost** molekul

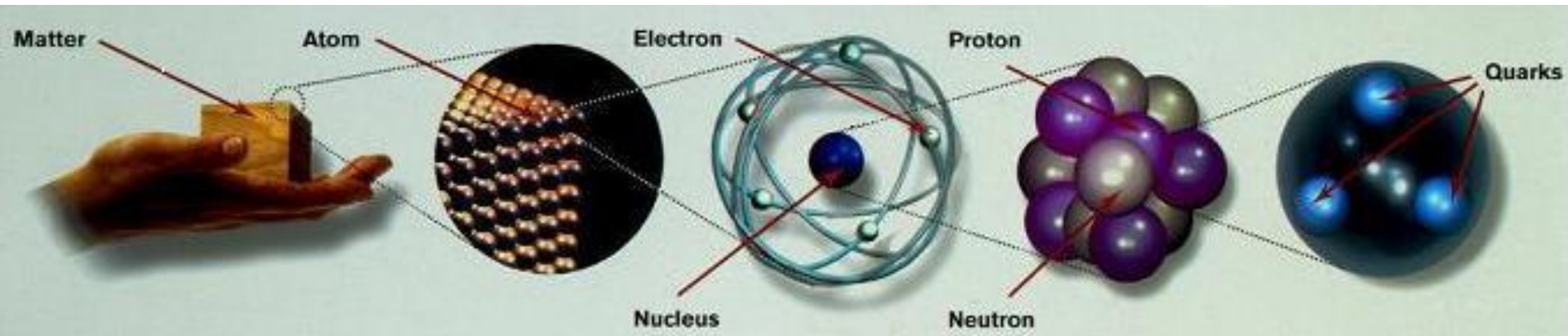
Trki med delci v zgodnjem vesolju:
enaki trkom delcev v **pospeševalnikih**



Temperatura vesolja



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

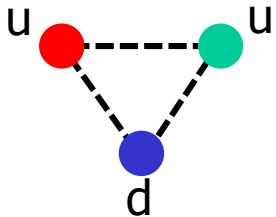
(teorija osnovnih delcev in njihovih interakcij)

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}

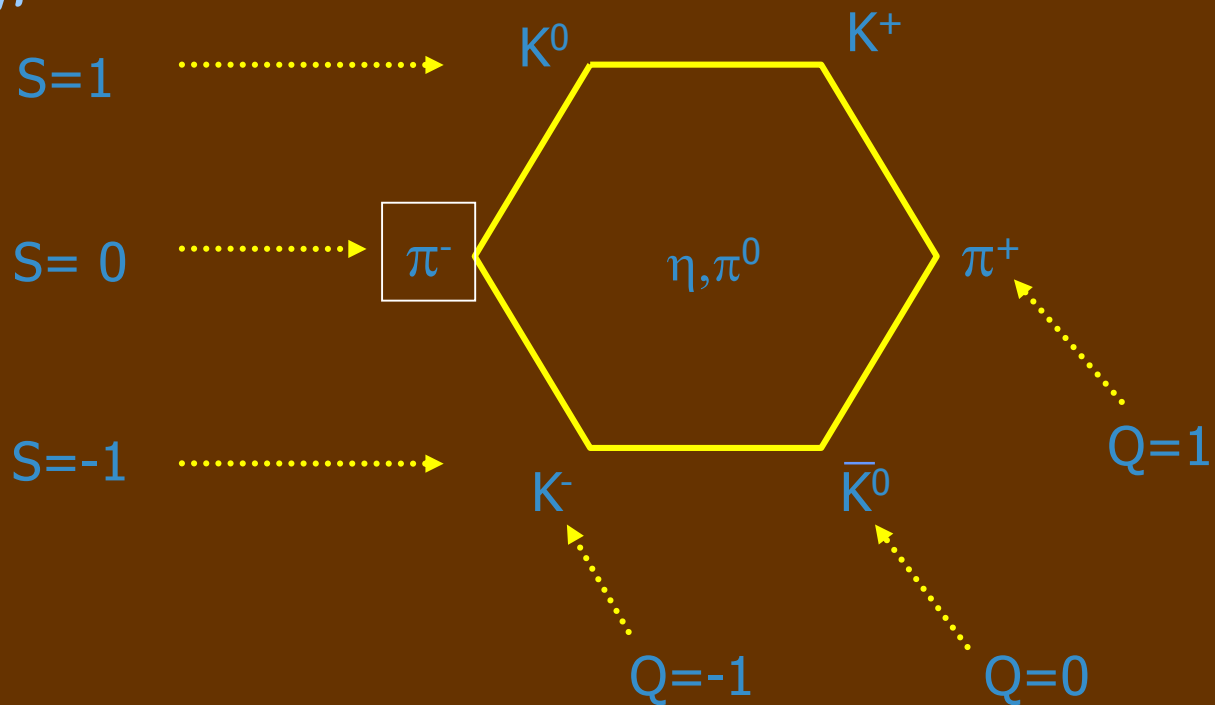
B^0 : kvark d + antikvark \bar{b}

masa
 $1/7 m_p$
 $5.5 m_p$

in množica njihovih sorodnikov...

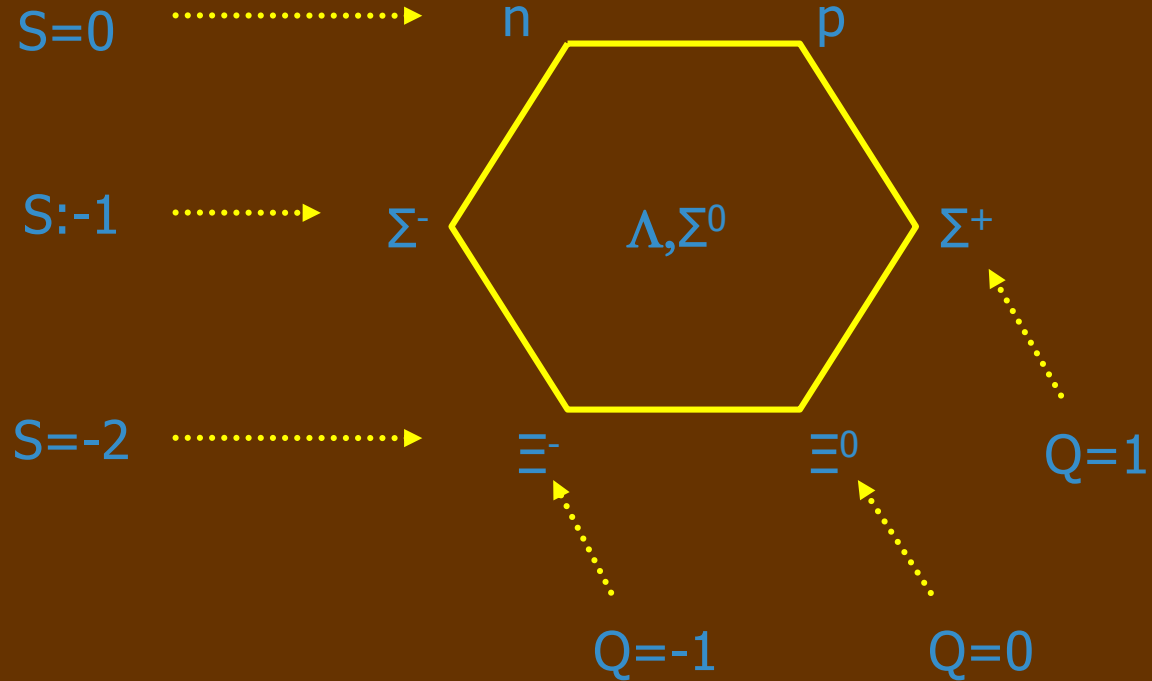
Periodni sistem: naboj in čudnost

Mezoni:



Periodni sistem: barioni

Barioni:



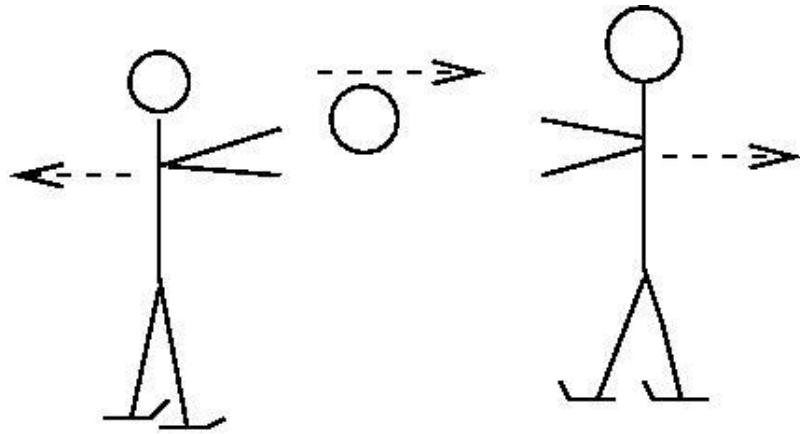
Na poti do osnovnih delcev: pomoč iz matematike

Multipleti **hadronov** \sim periodni sistem: upodobitve
grupe $SU(3)$

→ Kaj pa najbolj enostavna upodobitev?

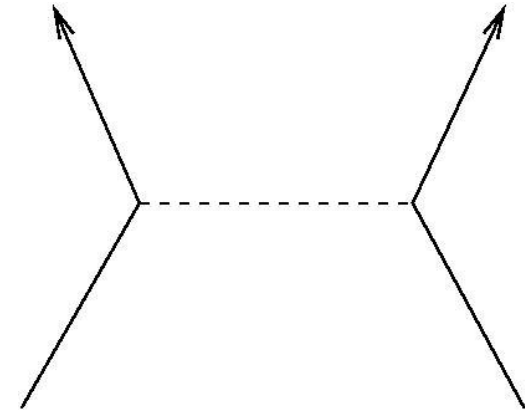
→ Trije kvarki u, d, s

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

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

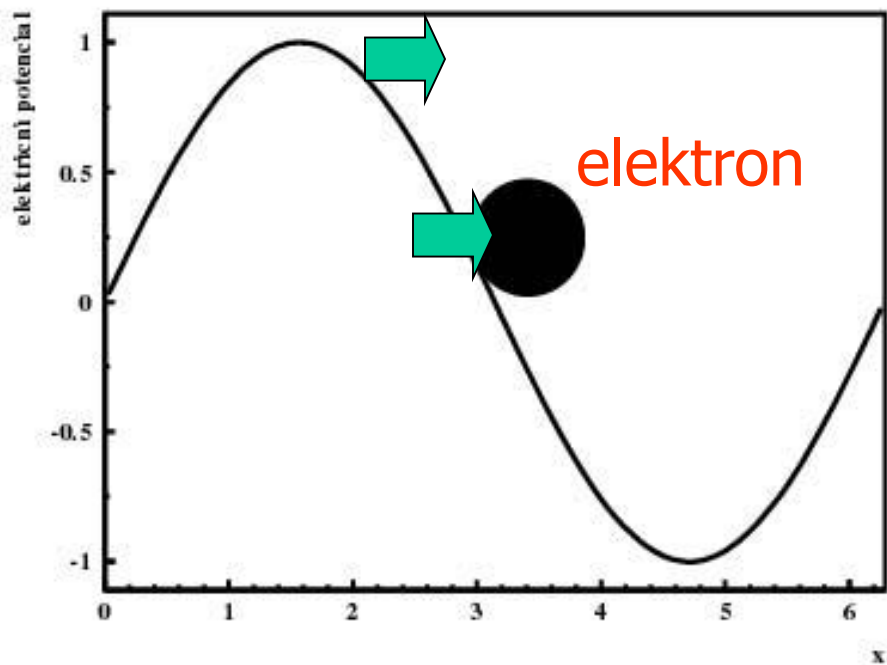
Eksperiment Belle:

Kako se delci razlikujejo od anti-delcev?



Kako pospešujemo nabite delce?

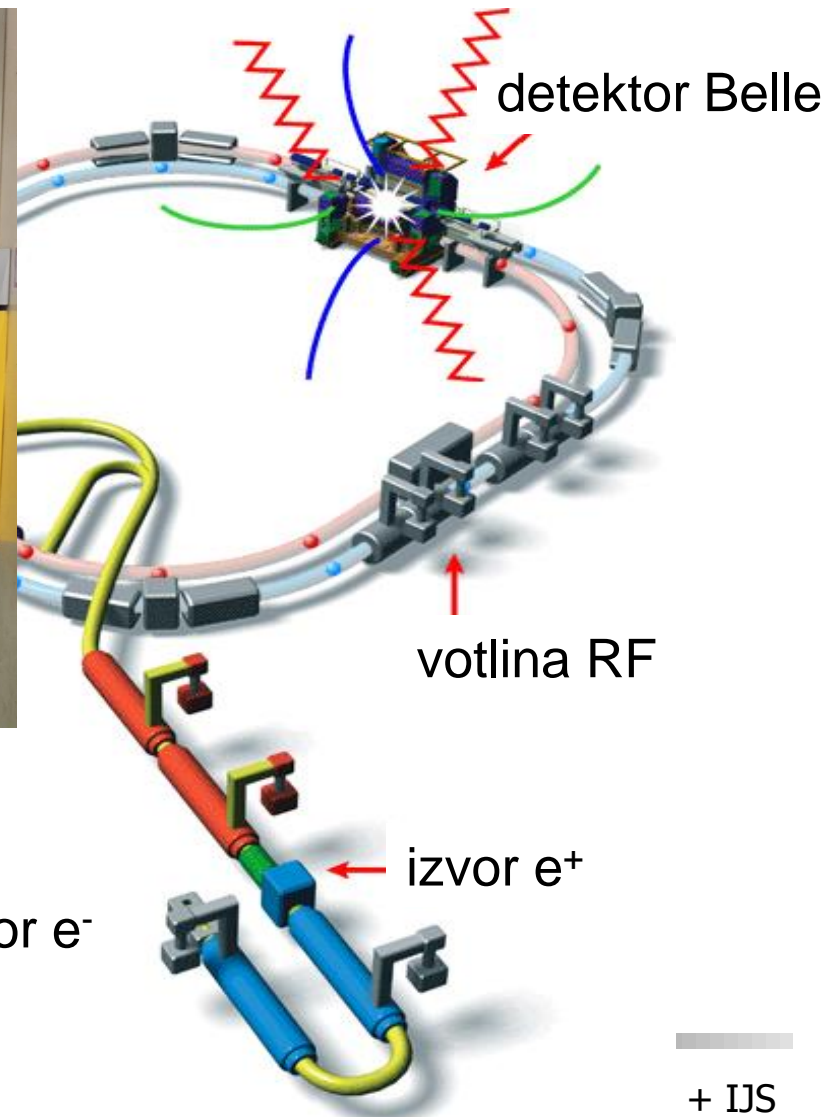
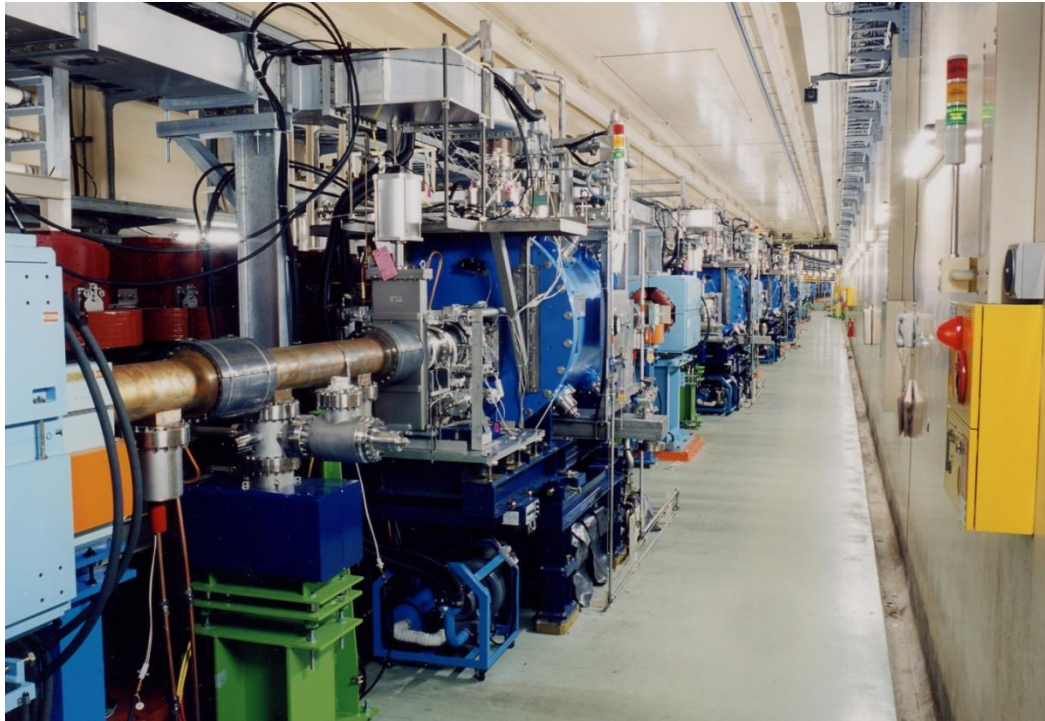
- Pospeševanje z elektromagnetnim valovanjem (tipična frekvenca 500 MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 oz. 1800 MHz)



... podobno deskanju na valovih

Trkalnik KEK-B

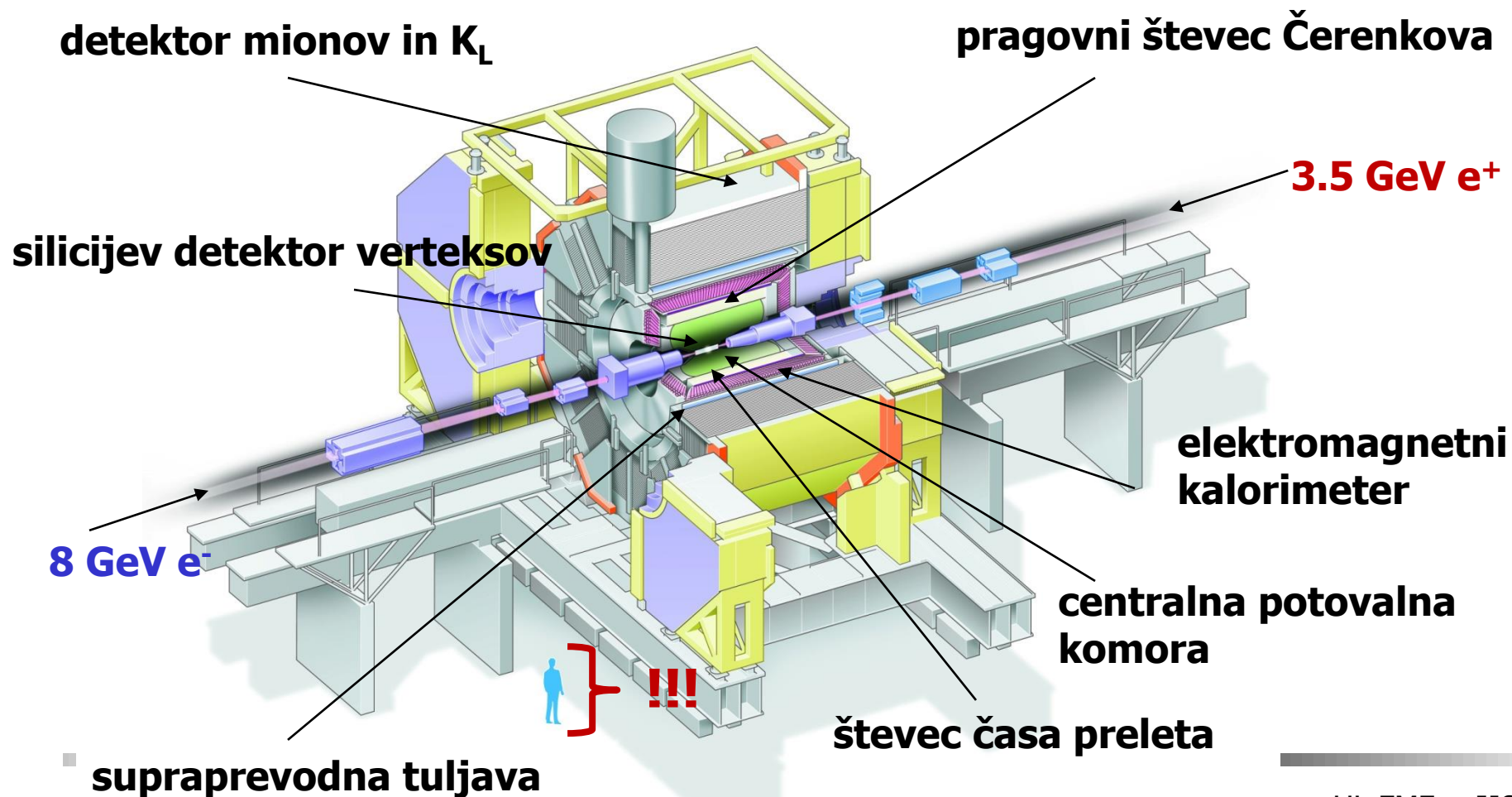
pospešuje elektrone in pozitrone do trka



Spektrometer Belle:

originalne tehnične rešitve in vrhunska tehnologija

pospravljeno v $\sim 100 \text{ m}^3$ raziskovalne aparature



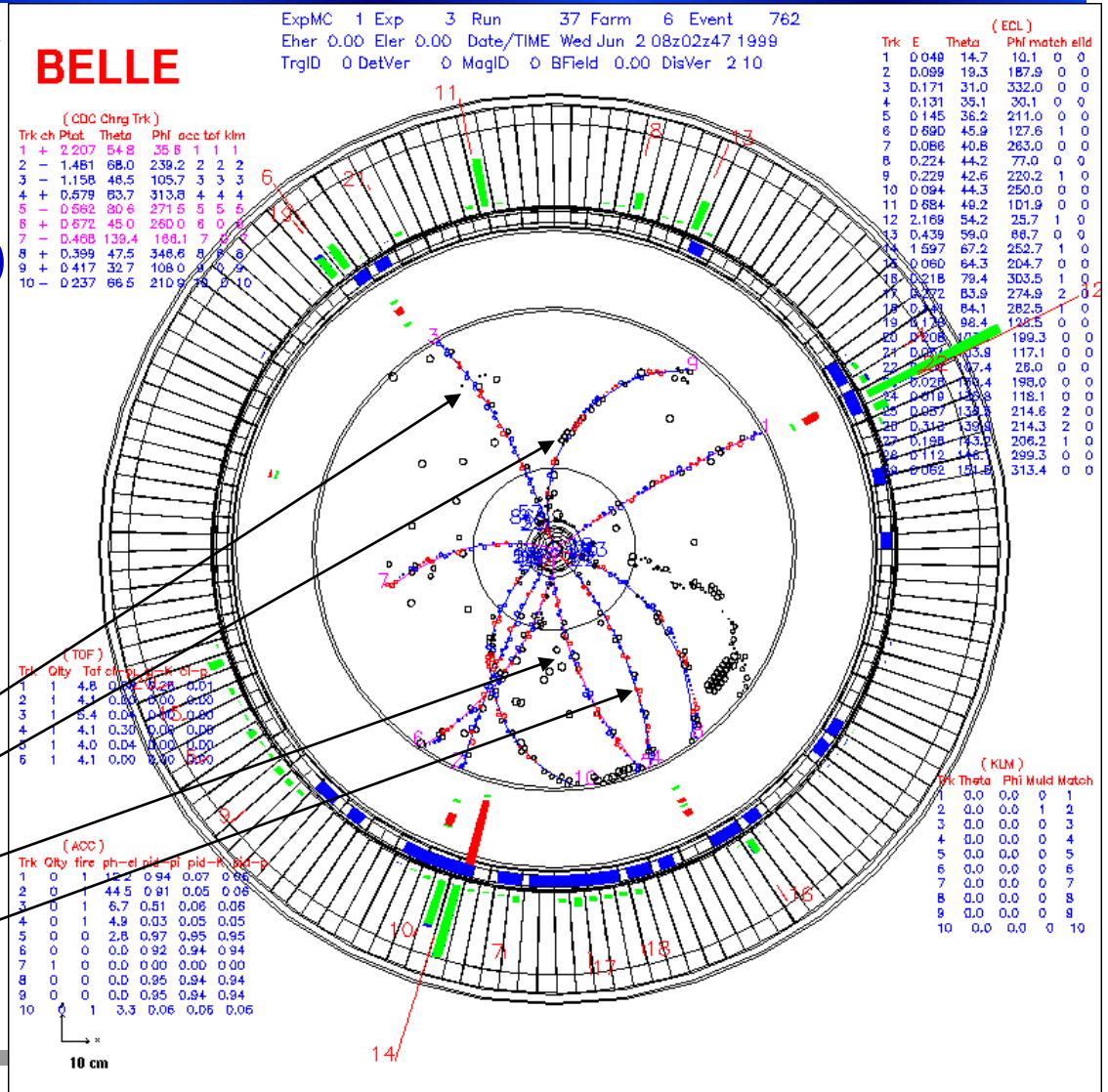
Kaj izmerimo z detektorjem?

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

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

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

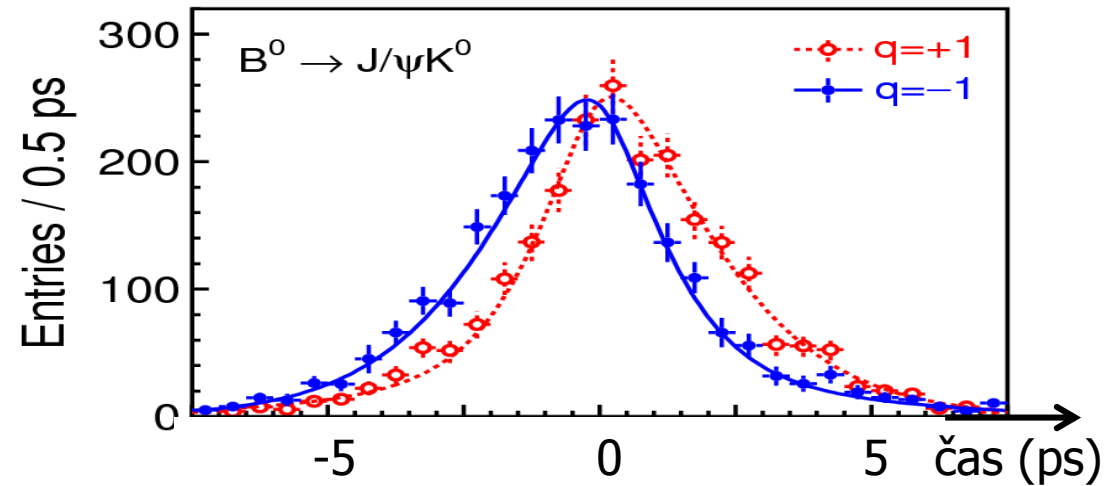
$$J/\psi \rightarrow \mu^- \mu^+$$



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

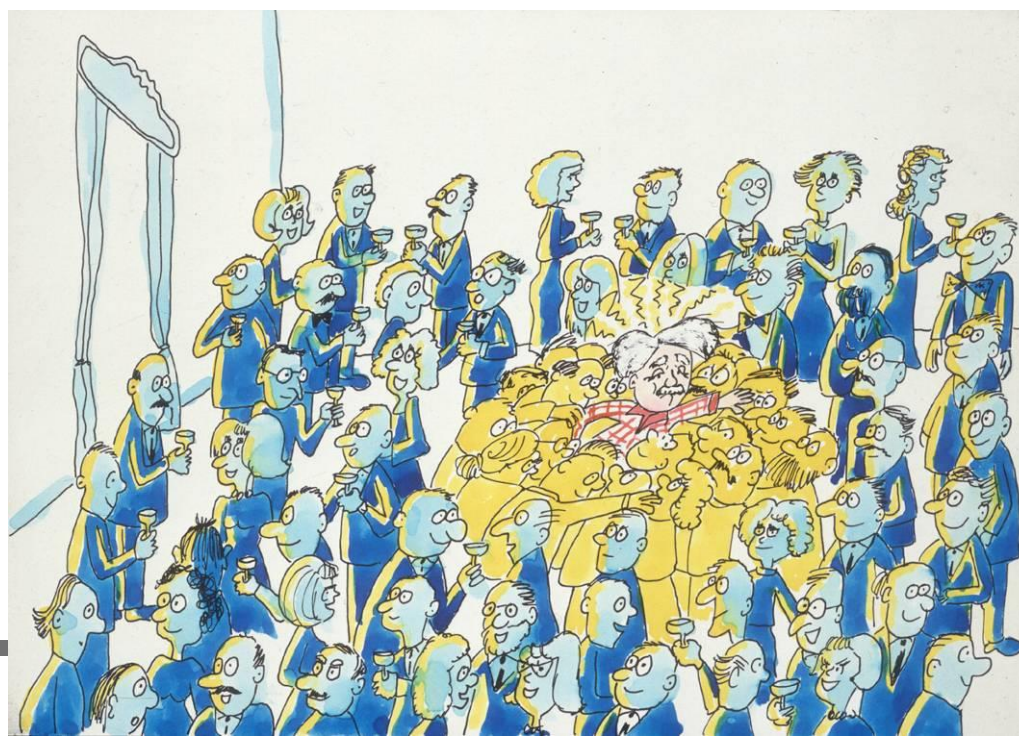
Elektromagnetno polje → nabit delec (e^-) občuti silo
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

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





Kako razumeti
maso delcev,
ki je posledica
Higgsovega polja?



Higgsov bozon

Škotski fizik Peter Higgs, 1964:

Maso delcev lahko pojasnimo, če predpostavimo, da je prostor napolnjen s poljem, seveda – Higgsovim poljem

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

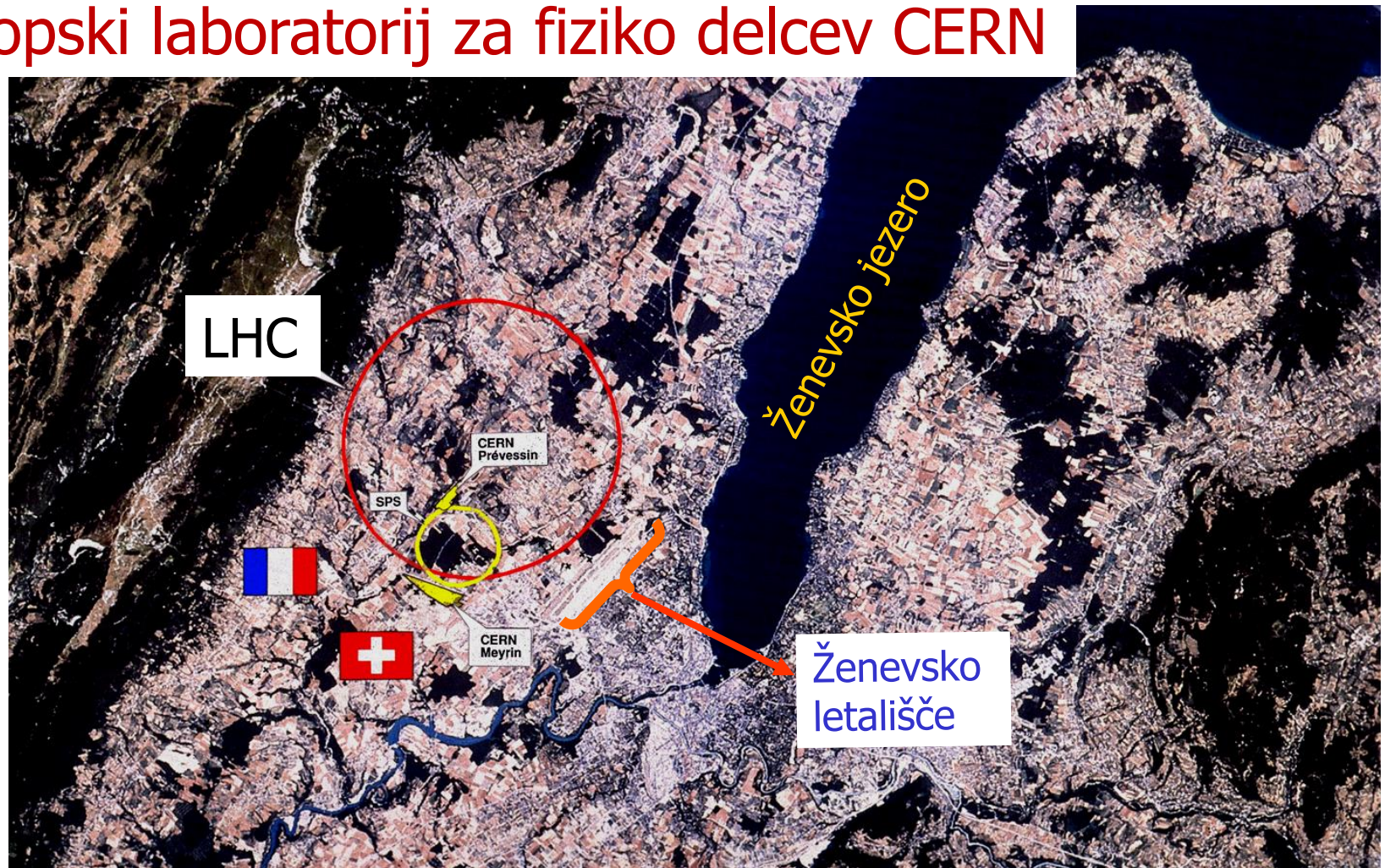
Higgsovo polje \rightarrow delci imajo maso
velikost mase odvisna od velikosti „Higgsovega naboja“

elektromagnetno polje ima svoje delce – fotone

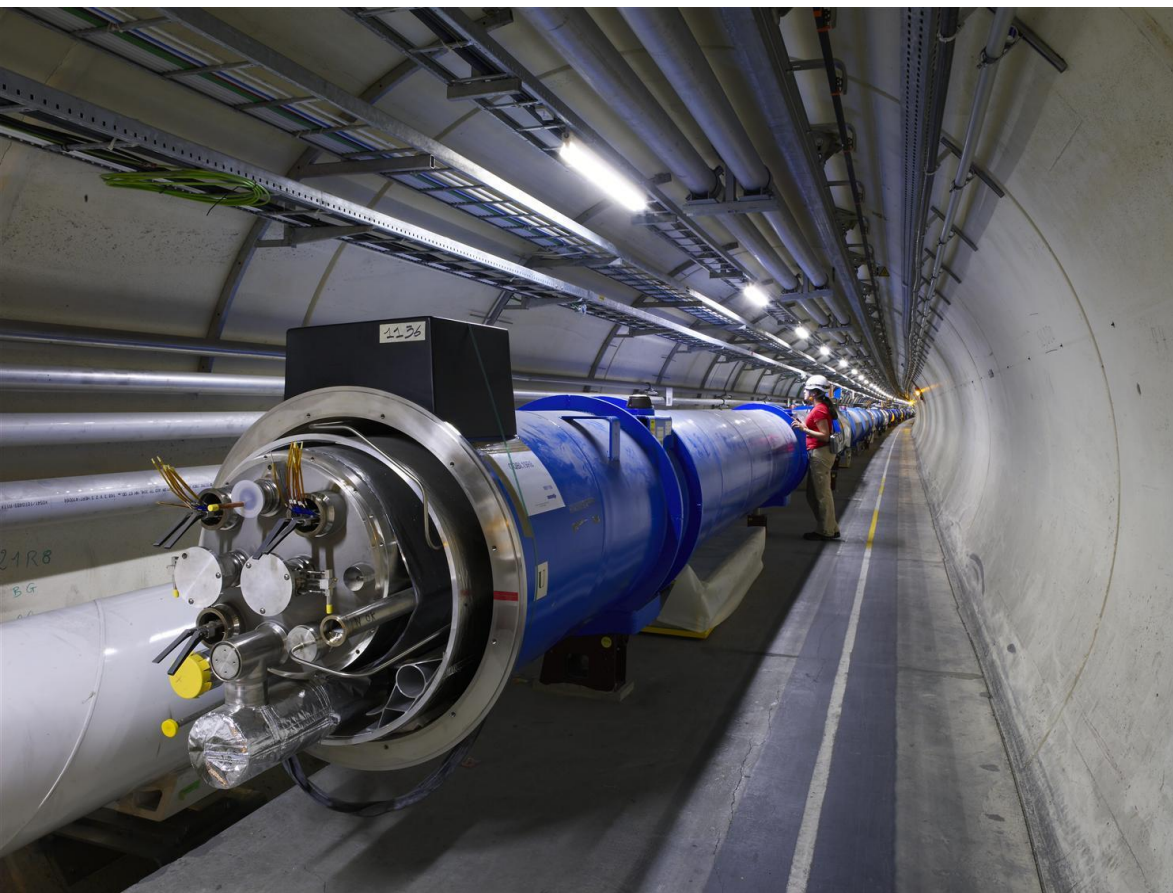
Higgsovo polje ima svoje delce – **Higgsove bozone**

Na lovu za Higgsovimi delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN




LHC = Large Hadron Collider



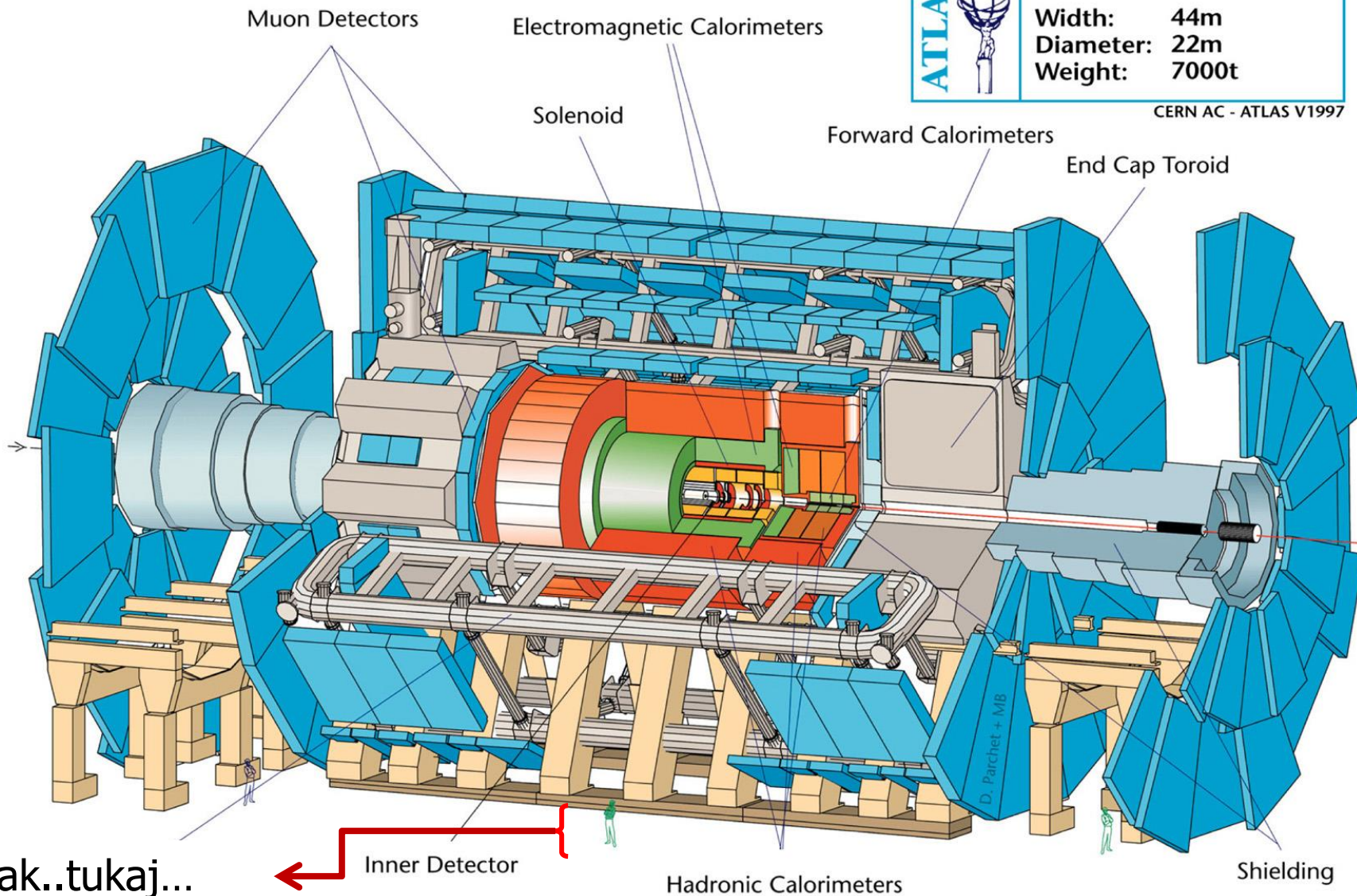
del 27 km dolgega
pospeševalnika



Detektor ATLAS ob LHC

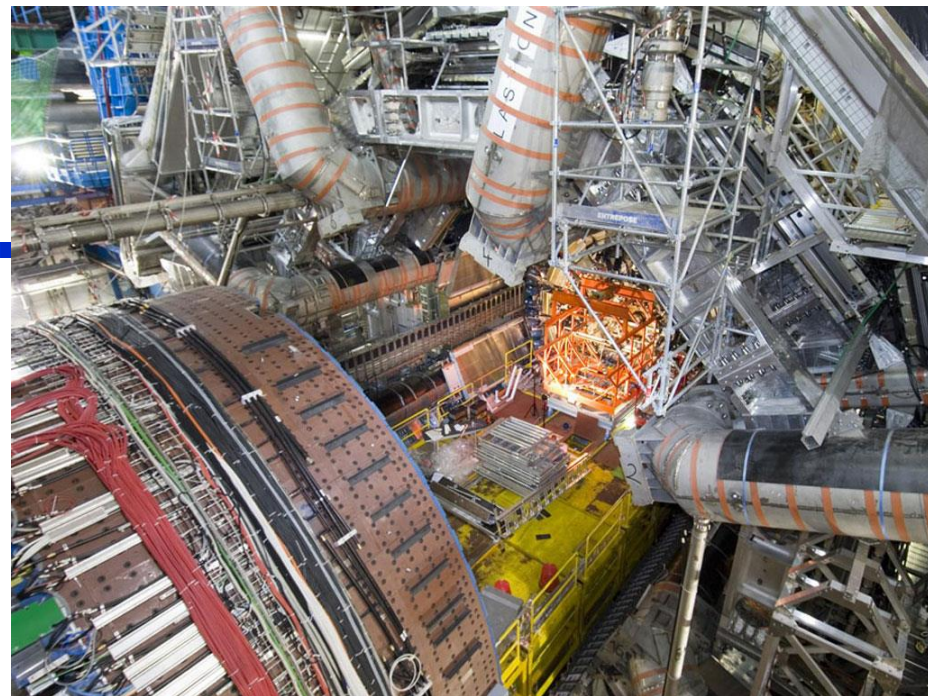
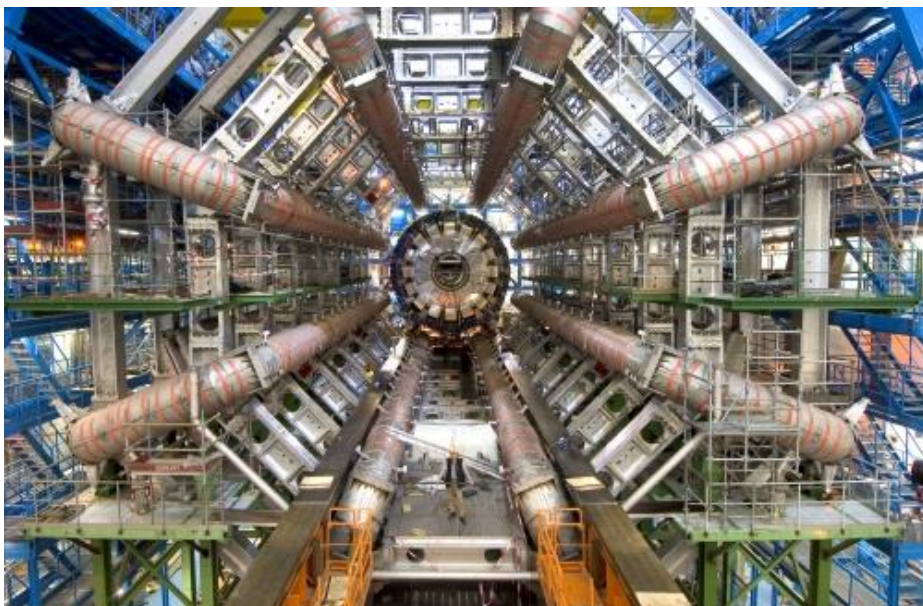
ATLAS 	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997



možak..tukaj...

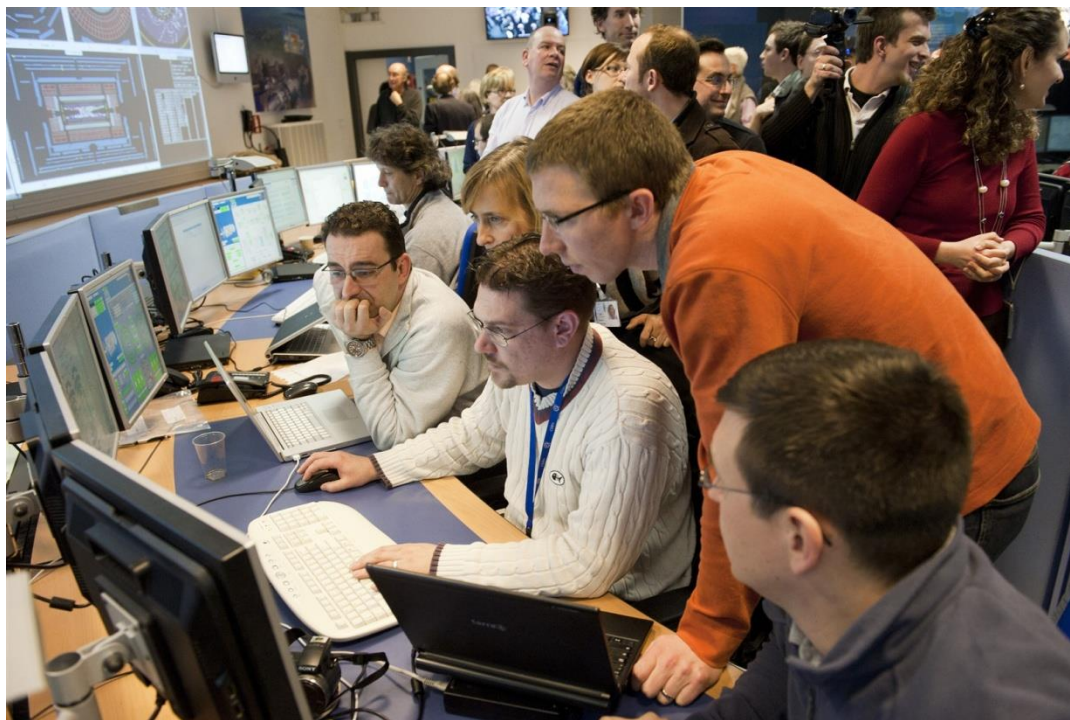
Detektor ATLAS med gradnjo



Viden delež slovenske raziskovalne skupine (IJS in FMF UL)

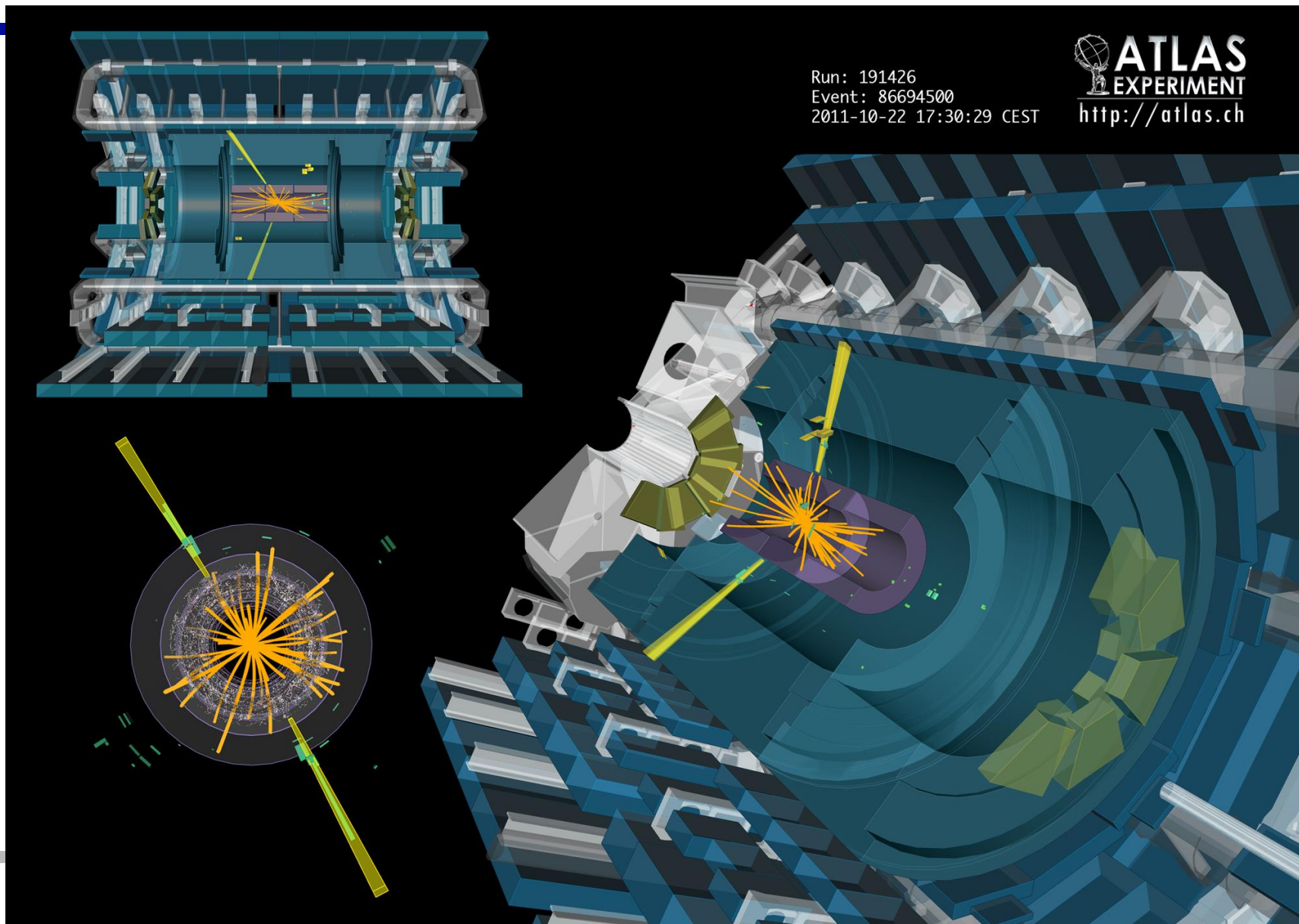


Marko Mikuž



Kontrolna soba med
meritvami...

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

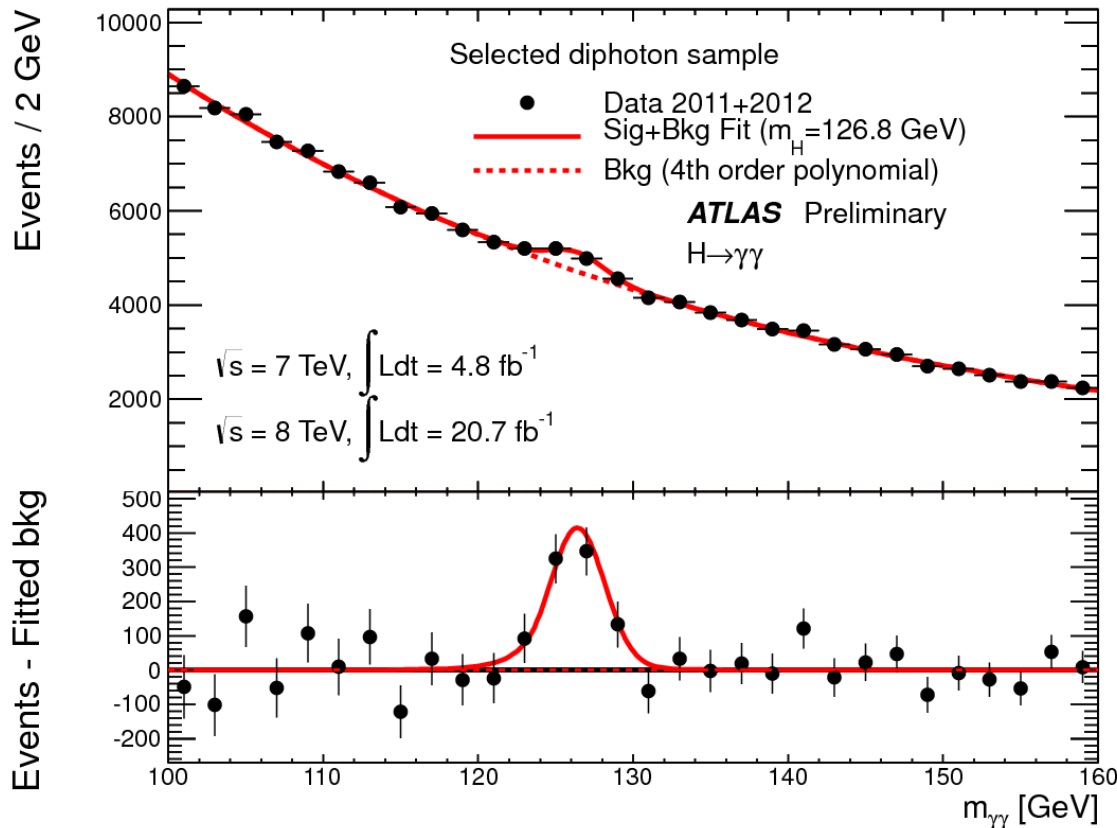


Iskanje Higgsove delca z detektorjema ATLAS in CMS ob LHC

- 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 vse kaže, da ima take lastnosti, kot jih pričakujemo od Higgsovega delca ('Higgs-like particle').
- Na dokončno potrditev je bilo treba počakati do 2013, ko so nabrali dovolj velik vzorec podatkov, da so lahko opravili dodatne meritve.

Viden delež slovenske raziskovalne skupine (IJS in FMF UL) pri eksperimentu ATLAS.

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

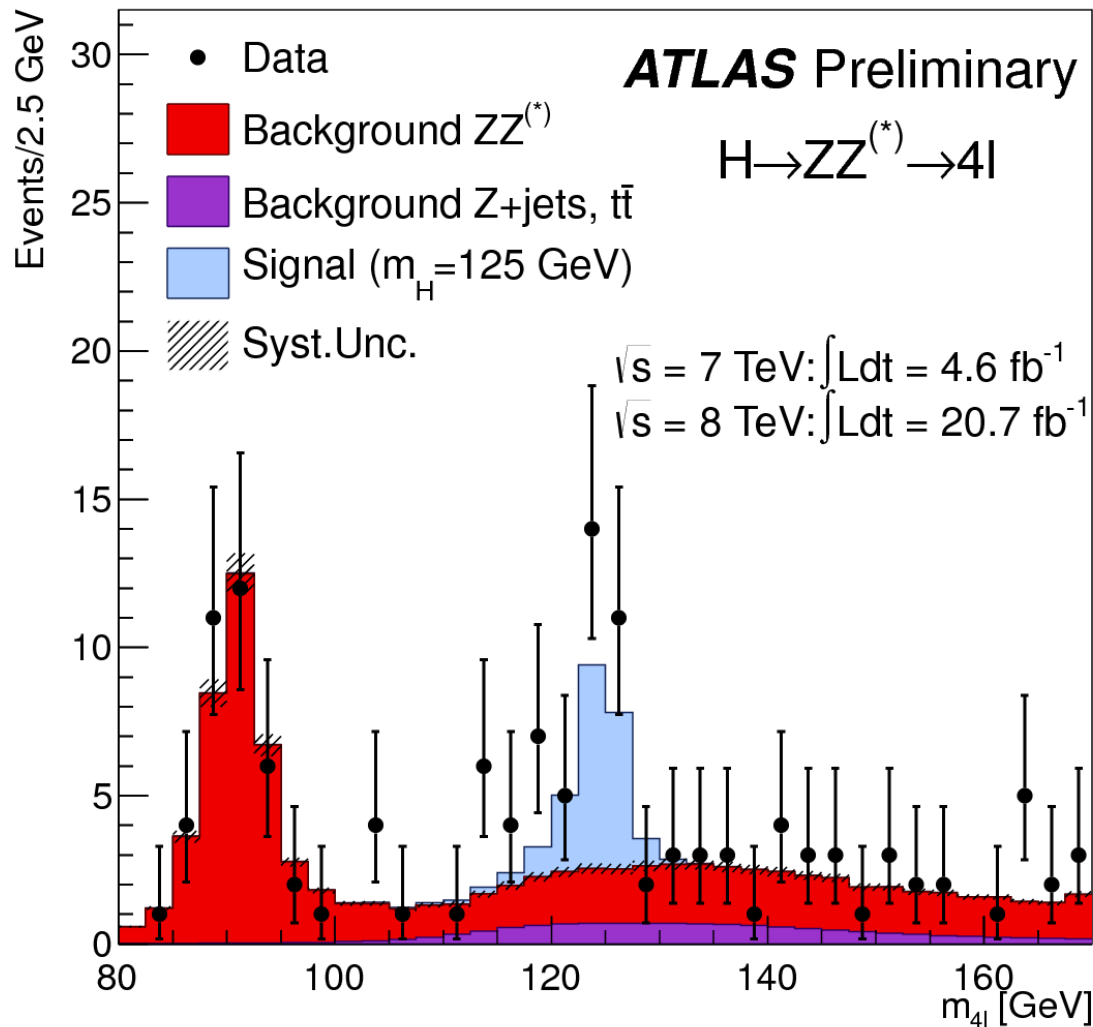


Masa vsake zabeležene kombinacije dveh visokoenergijskih žarkov gama:

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

Izmerjena porazdelitev minus ozadje \rightarrow signal!

Rezultat meritve: iskanje razpada Higgsovega bozona v štiri leptone, $H \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$



Masa vsake zabeležene kombinacije štirih mionov – večinoma kombinacije drugih procesov - ozadja (rdeče in vijolično).

Modro: signal, kot bi ga pričakovali za Higgsov delec

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

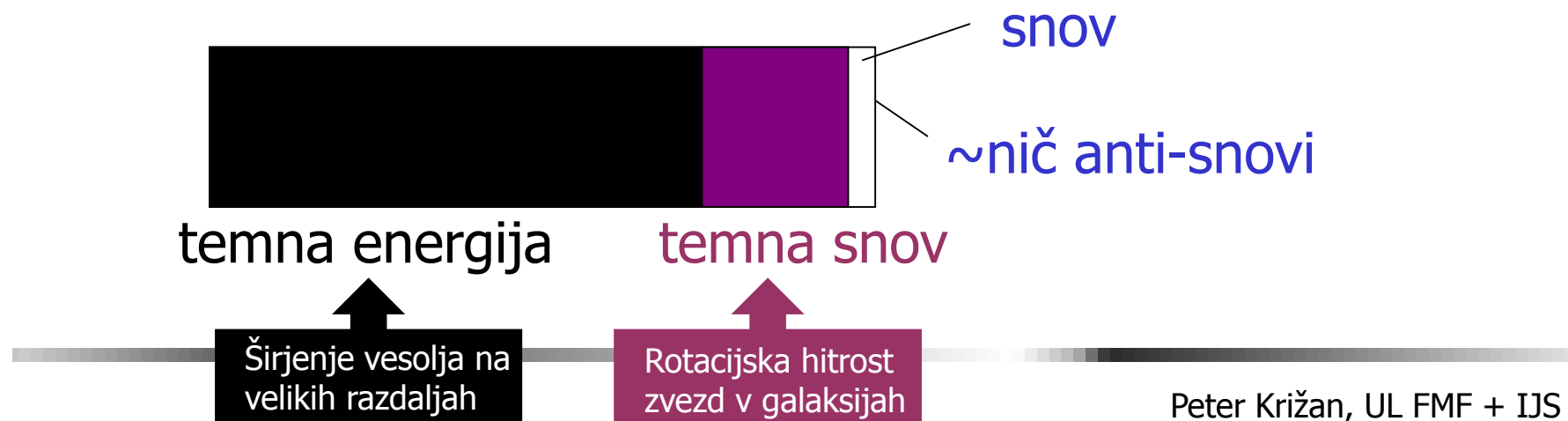
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

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

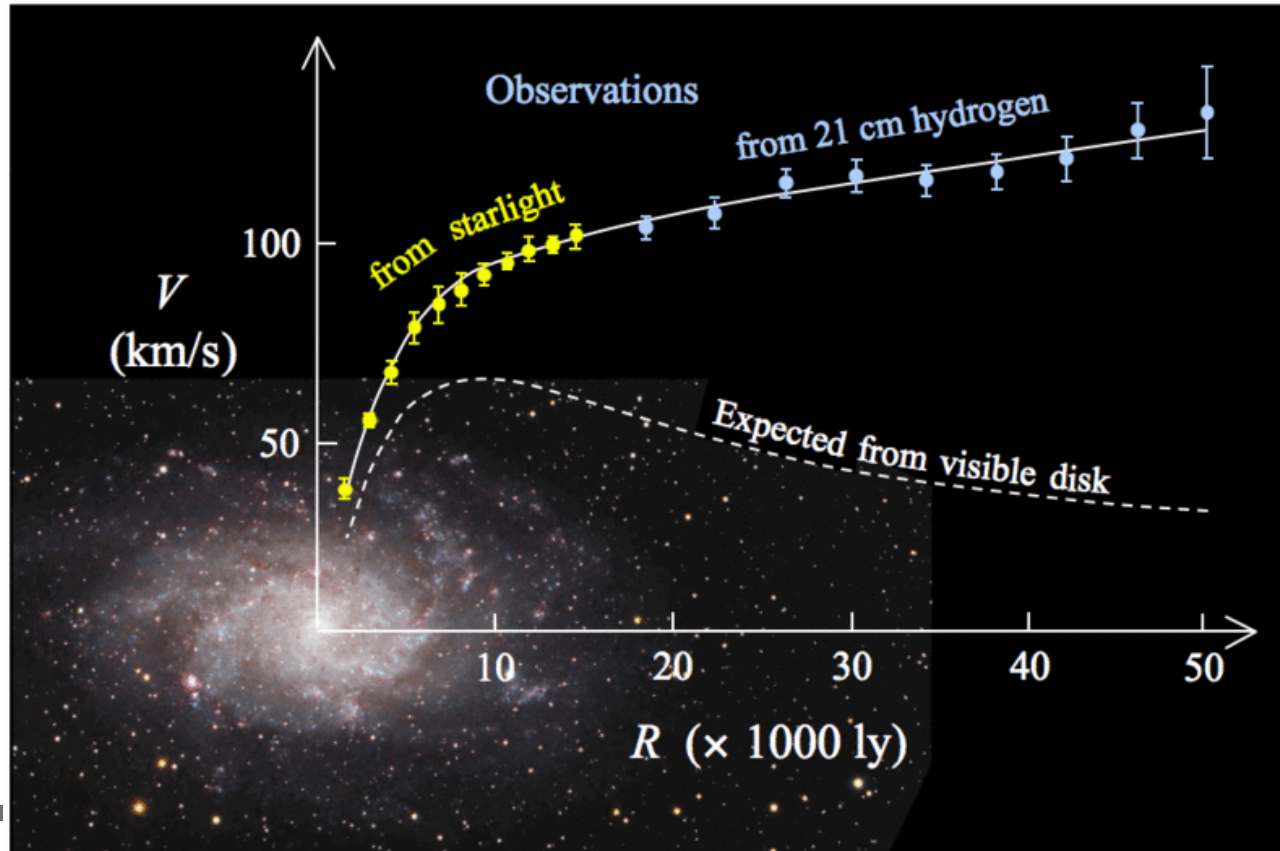
In nenazadnje: večina vesolja je narejena iz delcev, ki jih ne poznamo...



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:

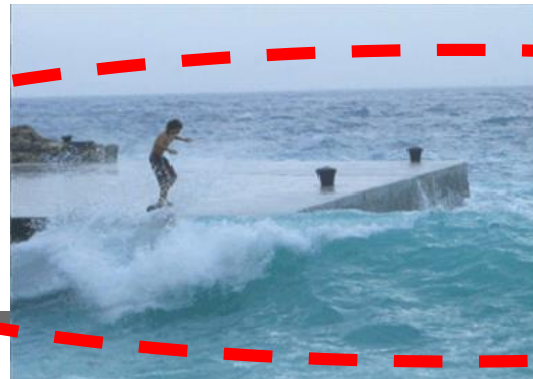
- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov**
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle in Belle II).

→ 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**.

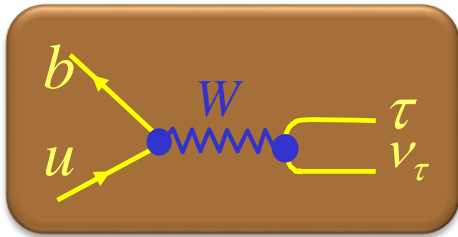
LHC



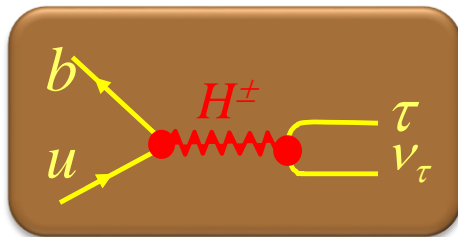
Belle II

Primer: lov na nabiti 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 **nabiti Higgsov delec**.



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



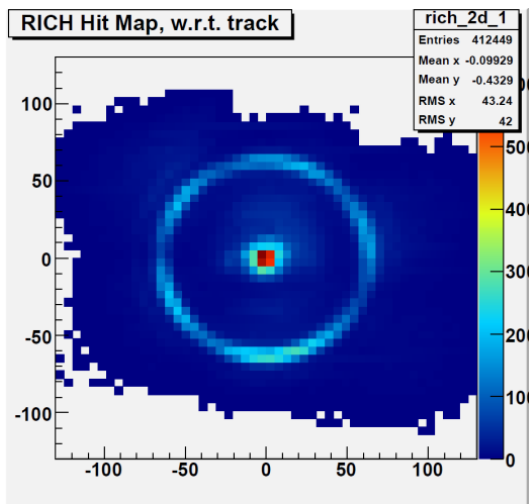
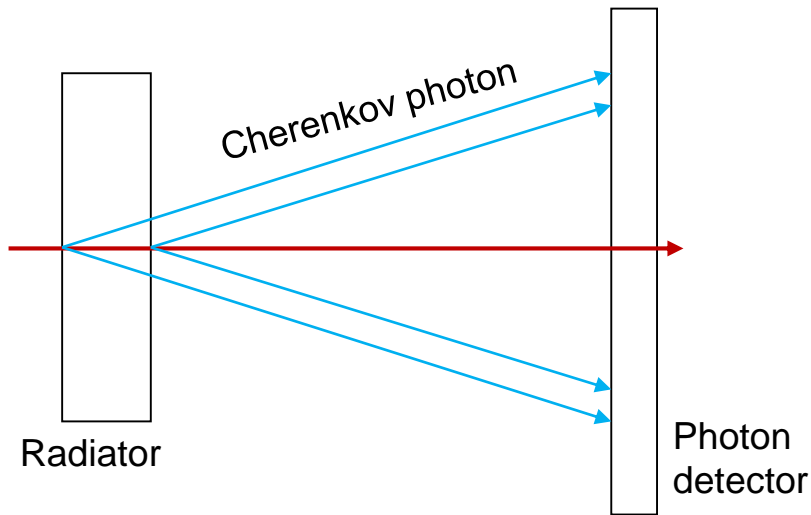
V nekaterih supersimetričnih teorijah bi lahko potekal tudi preko **nabitega Higgsovega delca H^\pm** .

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

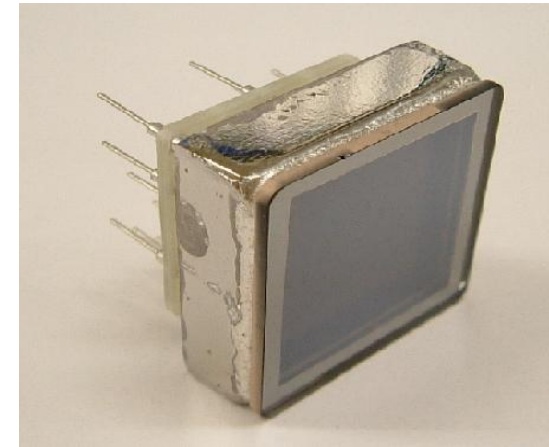
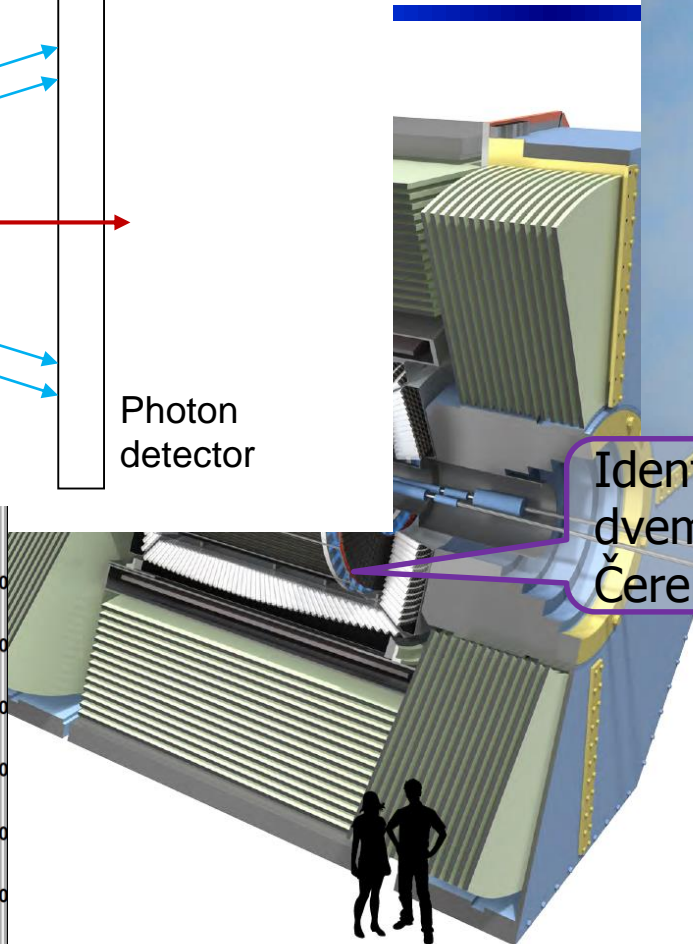
Če izmerimo verjetnost za tak razpad in jo primerjamo s predvidevanjem Standardnega modela (kjer nabitega Higgsa ni):

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

Za identifikacijo uporabimo **pojavnost 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



Namen: izboljšati dometo meritev za 100x – **boljši detektor** in **zmogljivejši pospeševalnik**

Raziskovalna skupina Belle II



Močna raziskovalna skupina ~600 fizikov s celega sveta

Spin-off osnovnih raziskav – primer

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’)

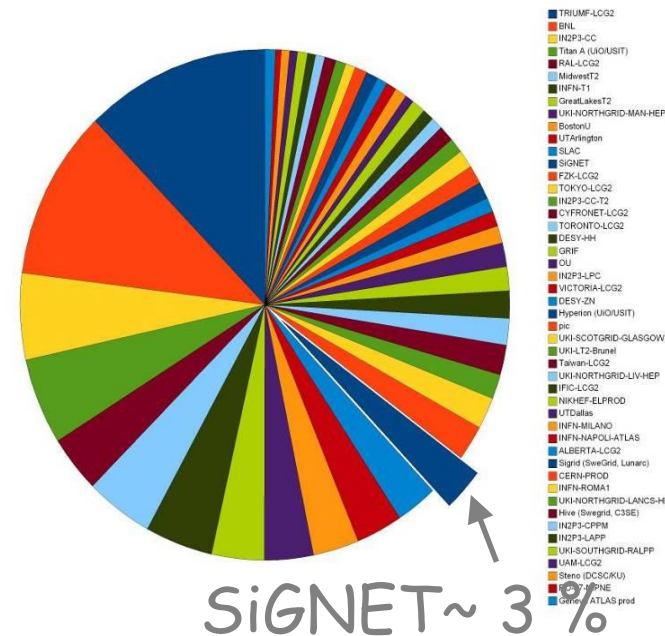
LHC je prvi veliki uporabnik Grida, razvoj in preizkus tehnologije

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

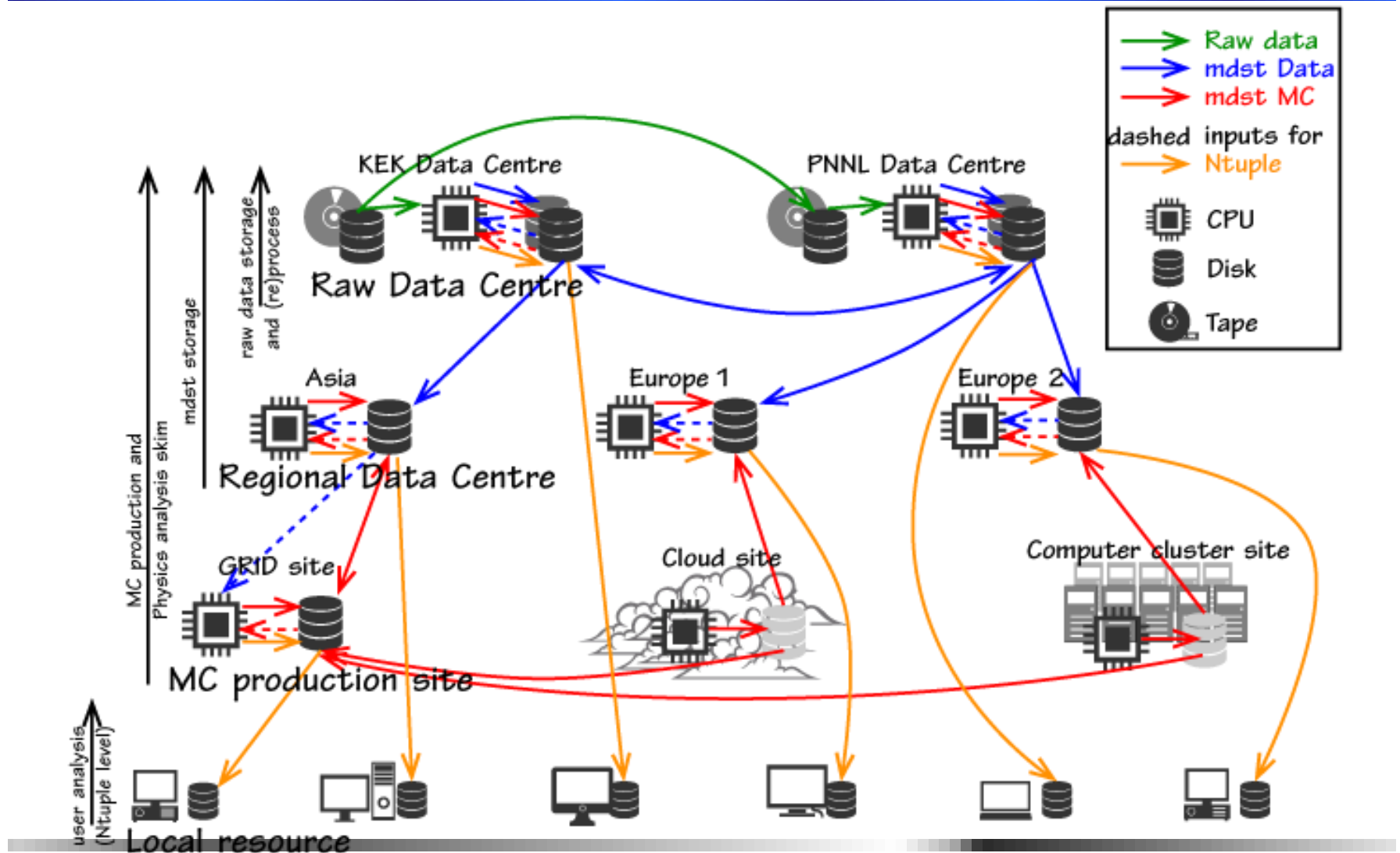


US

ATLAS Simulation Production
February 2007 - February 2008



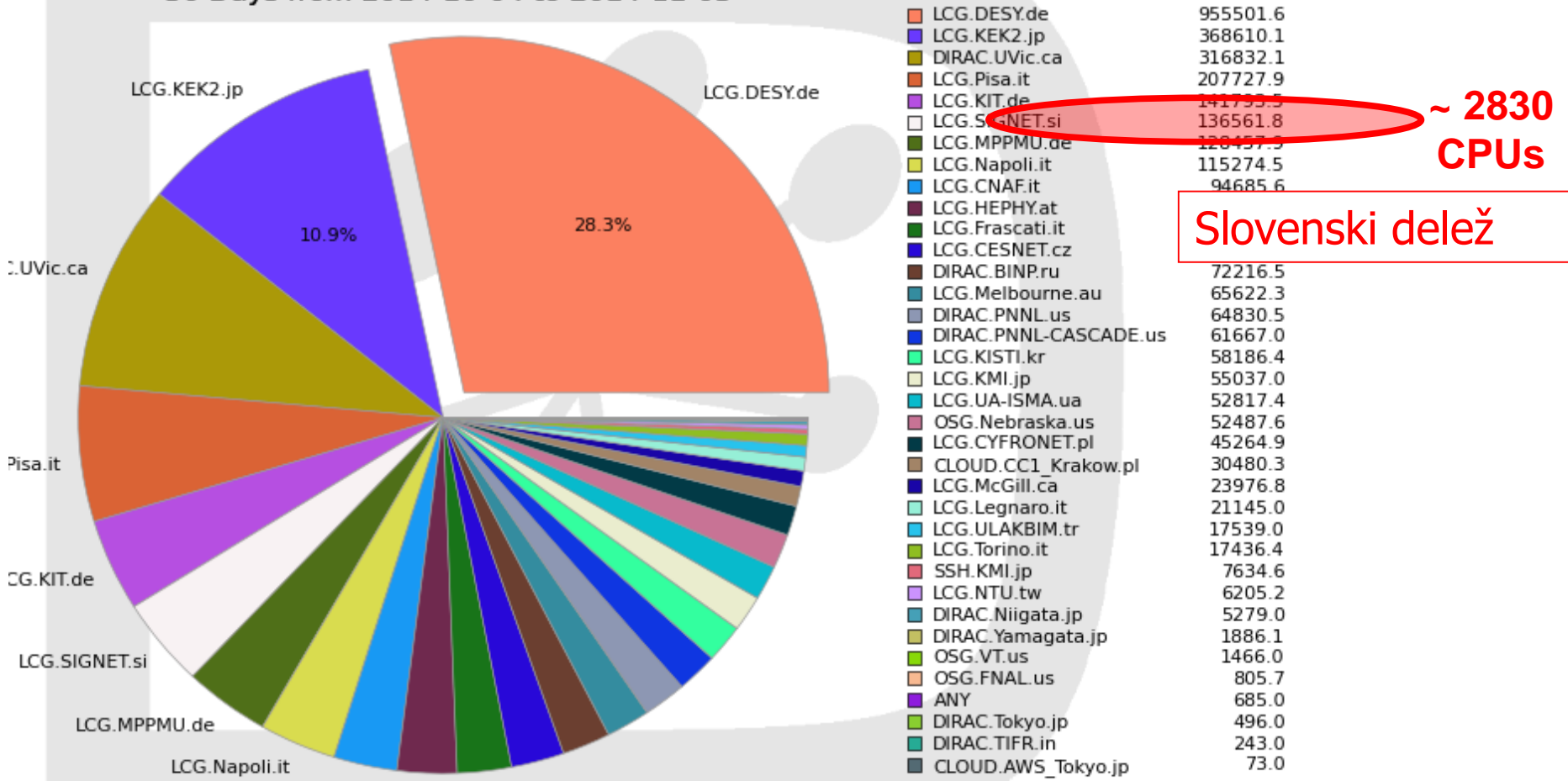
Obdelava podatkov pri Belle II: GRID in Cloud



Primer testne akcije oktobra 2014

Total Number of Jobs by Site

30 Days from 2014-10-04 to 2014-11-03



Slovenski delež

Nekaj stičnih točk med fiziko in matematiko

Eksperimentalna fizika, teoretska fizika in matematika so se vedno prepletale, ena drugo napajale z idejami. Samo nekaj primerov:

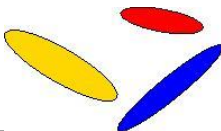
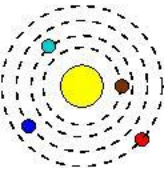

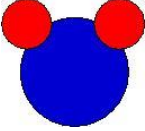
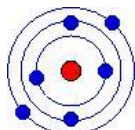
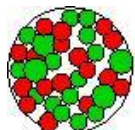
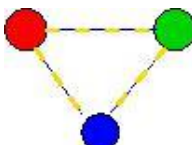

- Ptolemejev opis gibanja planetov – prvi poskus harmonske analize
- Newtonova enačba – infinitezimalni račun
- Prenos toplote, transportni pojavi – parcialne diferencialne enačbe
- Kvantna mehanika – operatorji, Hilbertov prostor
- Simetrije in ohranitveni zakoni
- Vrtilna količina v kvantni mehaniki – upodobitve Liejeve grupe $SU(2)$
- Sistematika hadronov, odkritje kvarkov – upodobitve Liejeve grupe $SU(3)$
- Interakcije med osnovnimi delci, umeritvene teorije – fibre bundles
- Teorija strun

Program

predavanja

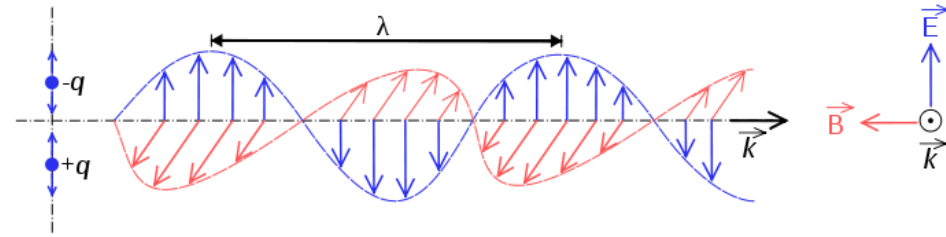
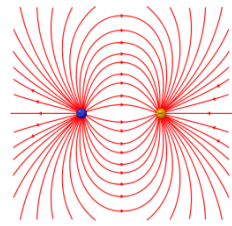
Moderna

fizika

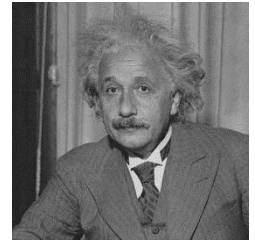
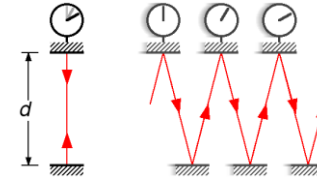
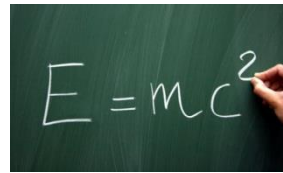
Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
10^{21} →	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
10^{14}	galaksije zvezde planeti				astronom, astrofizik
1	živa bitja		instinkti	ohranitev vrste	biolog, sociolog
10^{-8} →	molekule		elektro- magnetna	pestrost svetlobe, življenja energija	kemik, atomski fizik,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

Vsebina

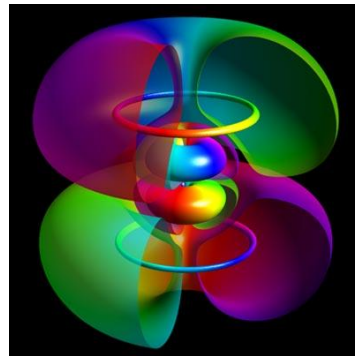
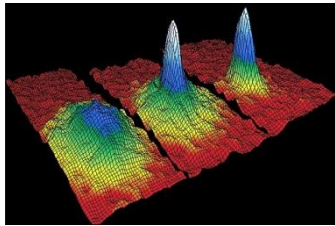
Elektromagnetno polje



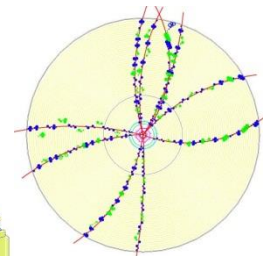
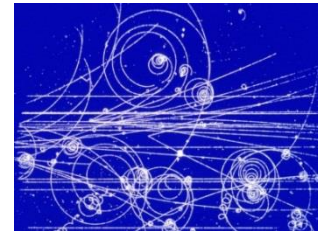
Posebna teorija relativnosti



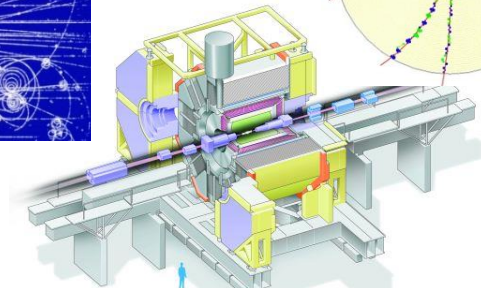
Kvantna fizika



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



Fizika osnovnih delcev: leptoni in kvarki, interakcije.



Fizika osnovnih delcev in razvoj vesolja.



Vsebina predmeta

Elektromagnetno polje:

- Integralna in diferencialna oblika Maxwellovih enačb;
- Elektromagnetno valovanje;
- Polje v snovi.

Posebna teorija relativnosti:

- Transformacija prostora in časa, vektorji četverci;
- Enačba gibanja v posebni 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;
- Vrtilna količina v kvantni mehaniki;
- Vodikov atom.

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

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 dojemanje sveta okoli nas podobno, kot ga je odkritje kvantne mehanike ob pričetku 20. stoletja.

Pri predavanjih iz Moderne fizike bomo obravnavali nekatere zanimive pojave, se naučili uporabljati nekatera orodja in poskusili pogledati v bodočnost.