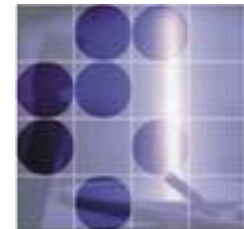


# Lov na osnovne delce

Peter Križan

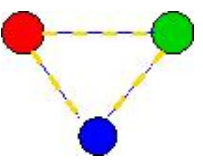
*Fakulteta za matematiko in fiziko UL,  
in Institut Jožef Stefan*

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Gimnazija Koper, 23.9.2015



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

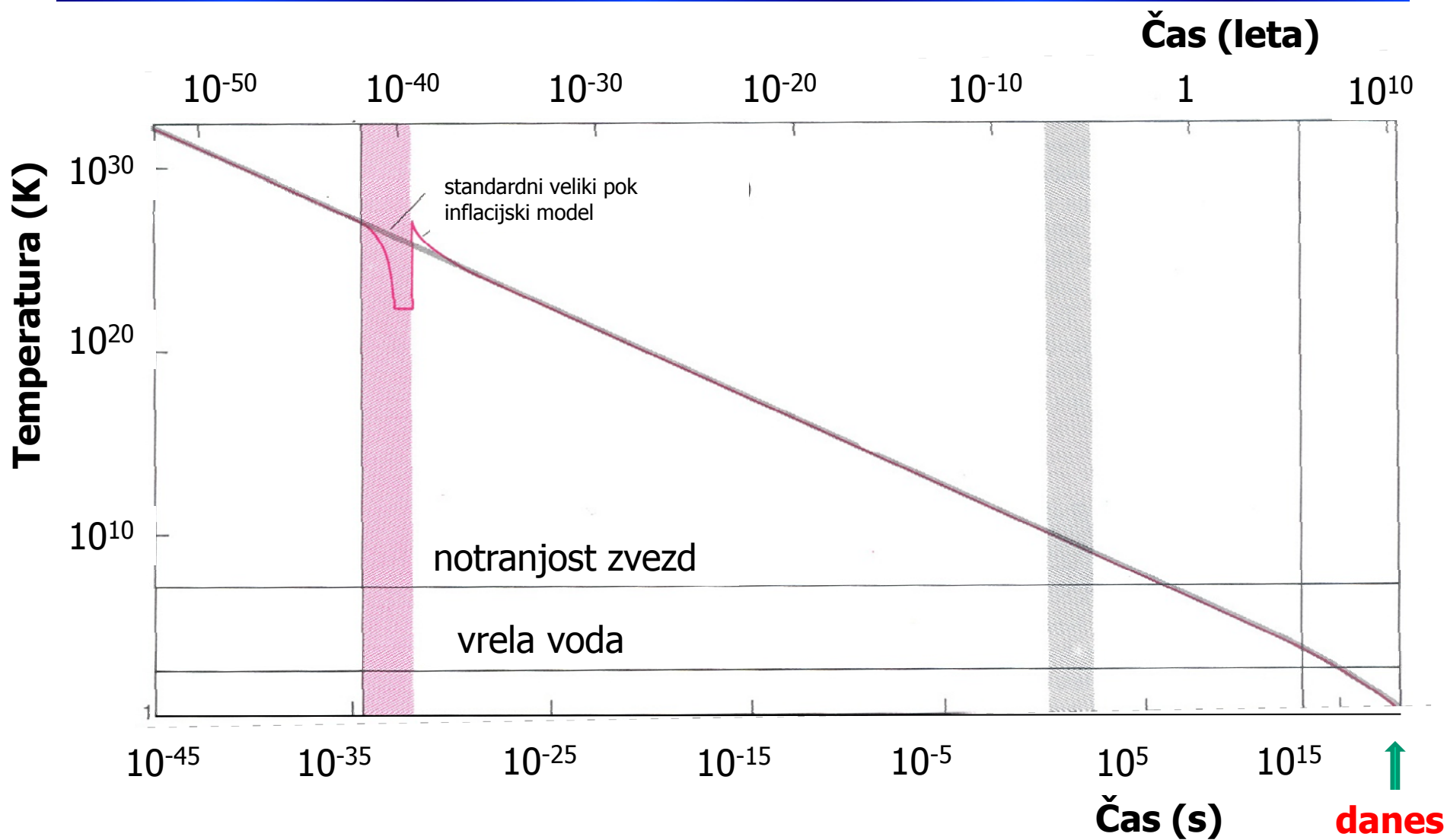


Plin pri visoki temperaturi: **velika hitrost** molekul

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



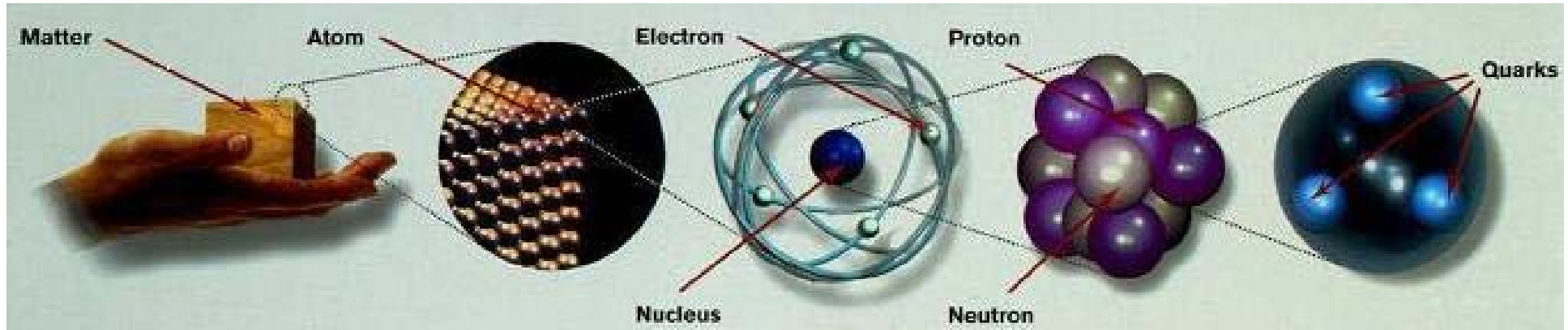
# Temperatura vesolja





# 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)

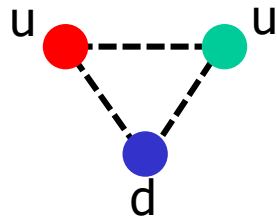
---

| Osnovni delci | 1. družina     | 2. družina           | 3. družina             |
|---------------|----------------|----------------------|------------------------|
| kvarki        | u,d            | s,c                  | b,t                    |
| leptoni       | $e^{-}, \nu_e$ | $\mu^{-}, \nu_{\mu}$ | $\tau^{-}, \nu_{\tau}$ |

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...

$\pi^+$ : kvark  $u$  + antikvark  $\bar{d}$

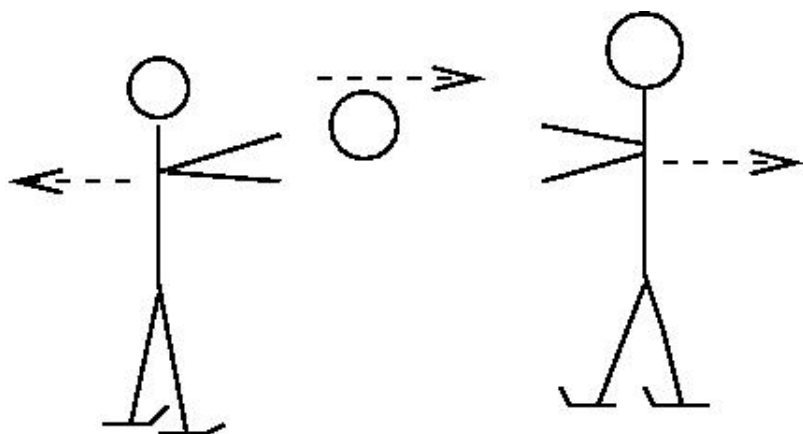
$B^0$ : kvark  $d$  + antikvark  $\bar{b}$

masa  
 $1/7 m_p$   
 $5.5 m_p$

in množica njihovih sorodnikov...

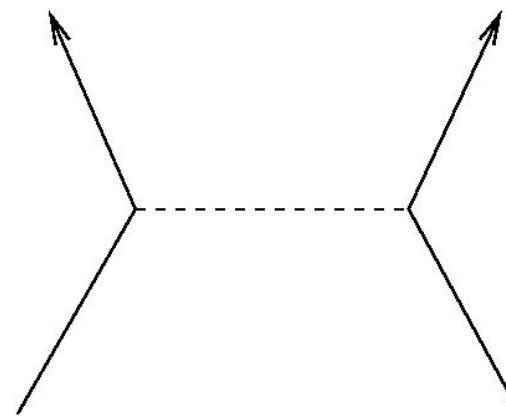
# Sile med osnovnimi delci: izmenjava nosilcev sile

---



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 $\gamma$                     |
| 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

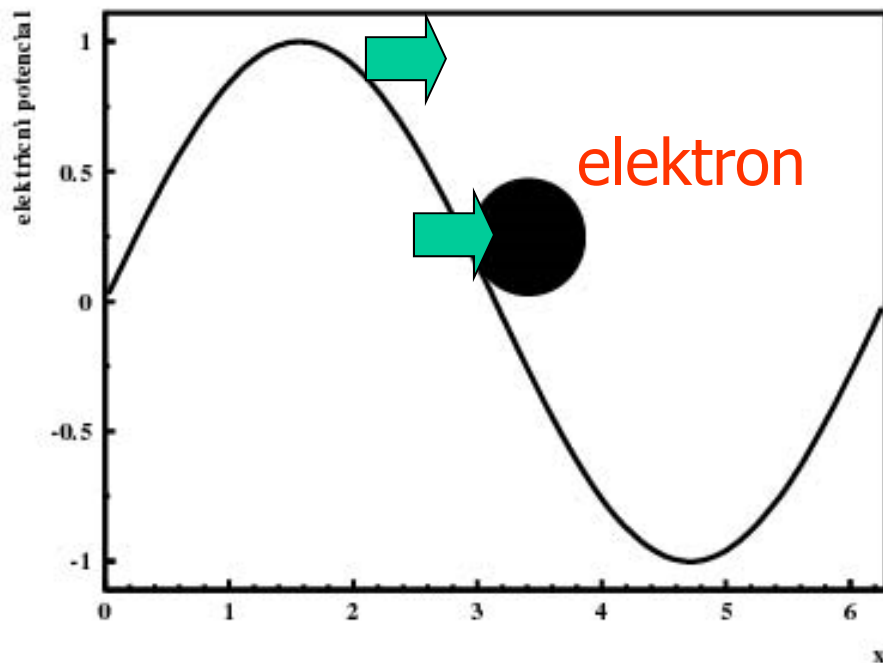
# Eksperiment Belle:

## 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)

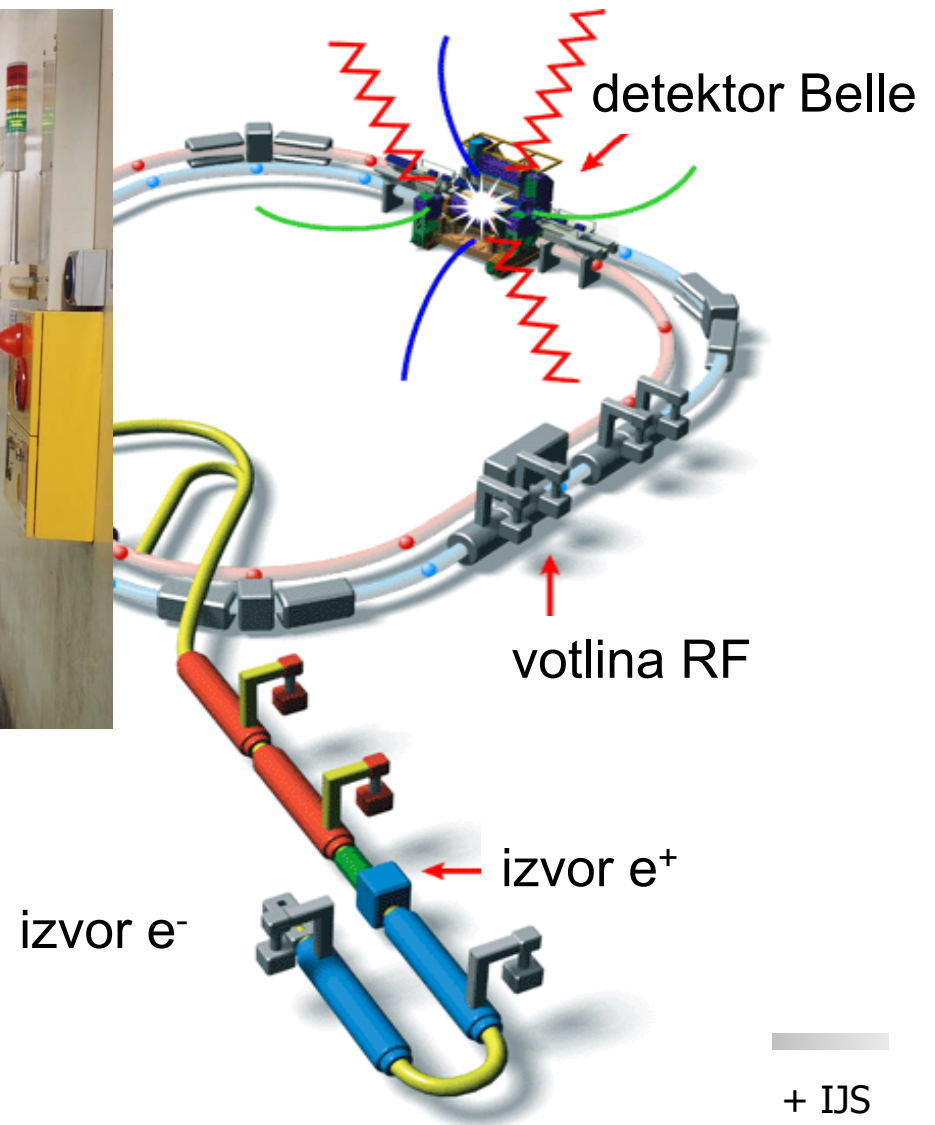
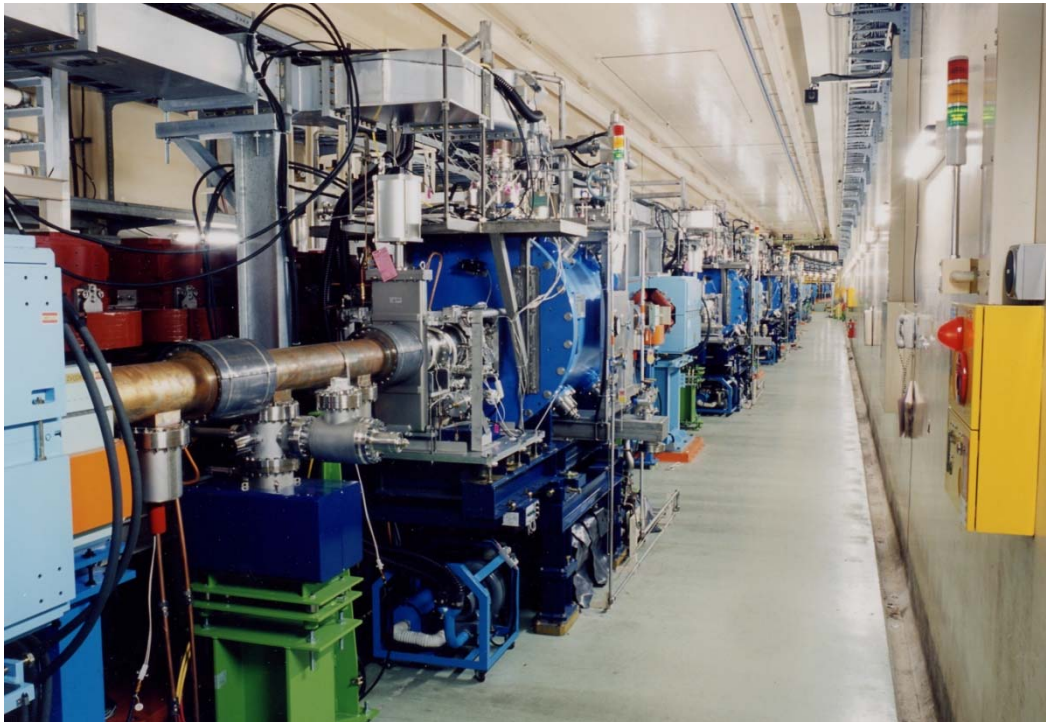


... podobno deskanju na valovih



# Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka

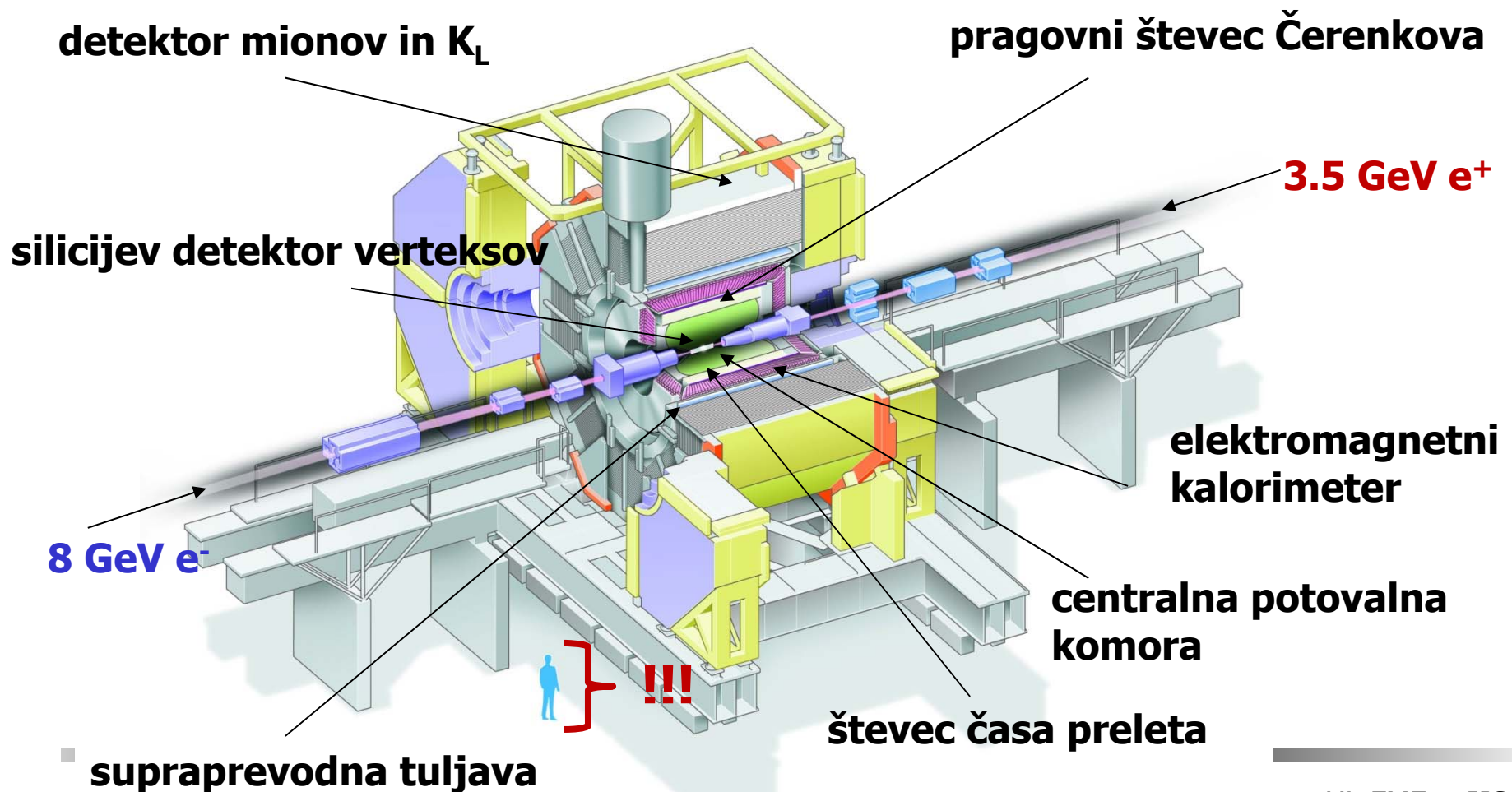




# Spektrometer Belle:

originalne tehnične rešitve in vrhunska tehnologija

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



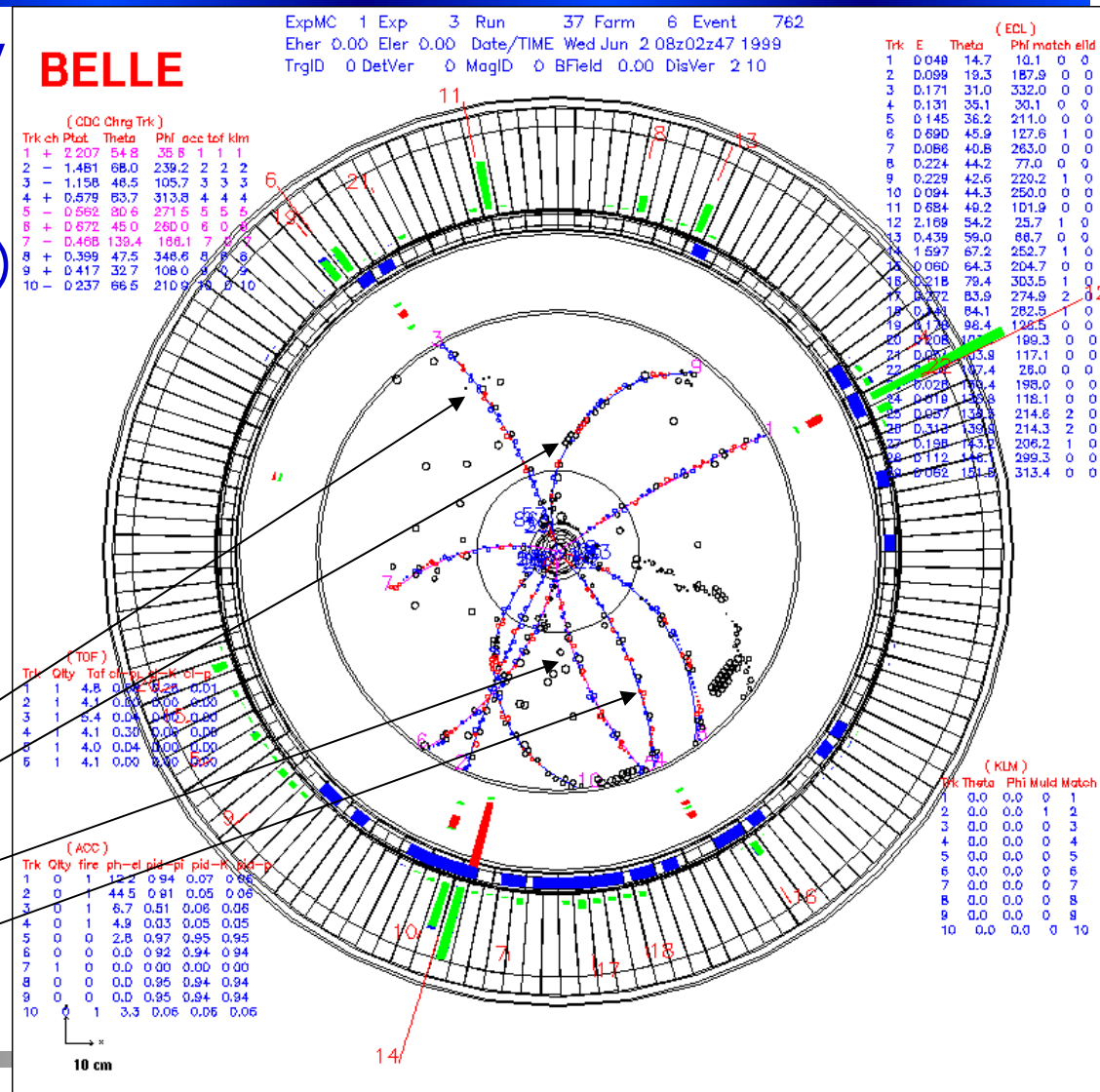
# Kaj izmerimo z detektorjem?

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

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

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

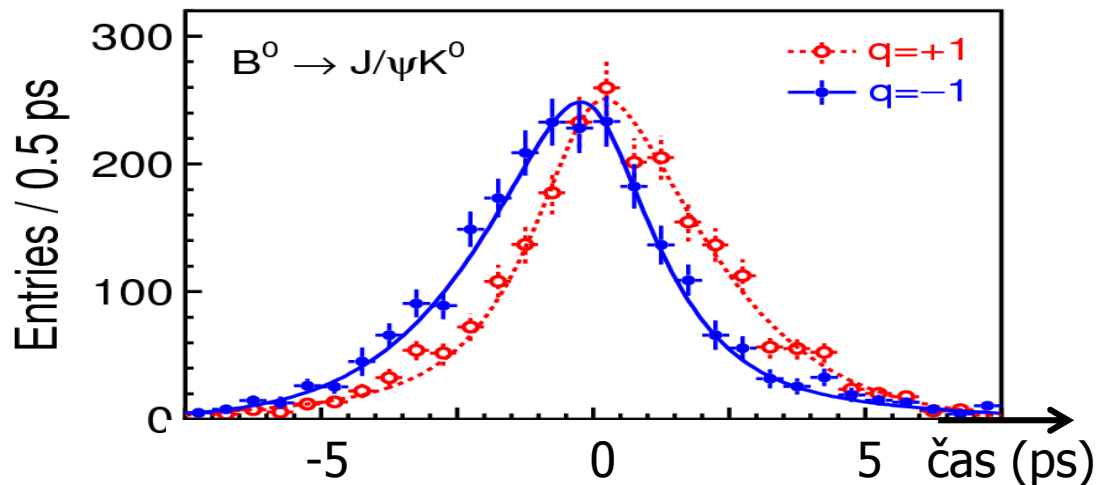
$$J/\psi \rightarrow \mu^- \mu^+$$



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

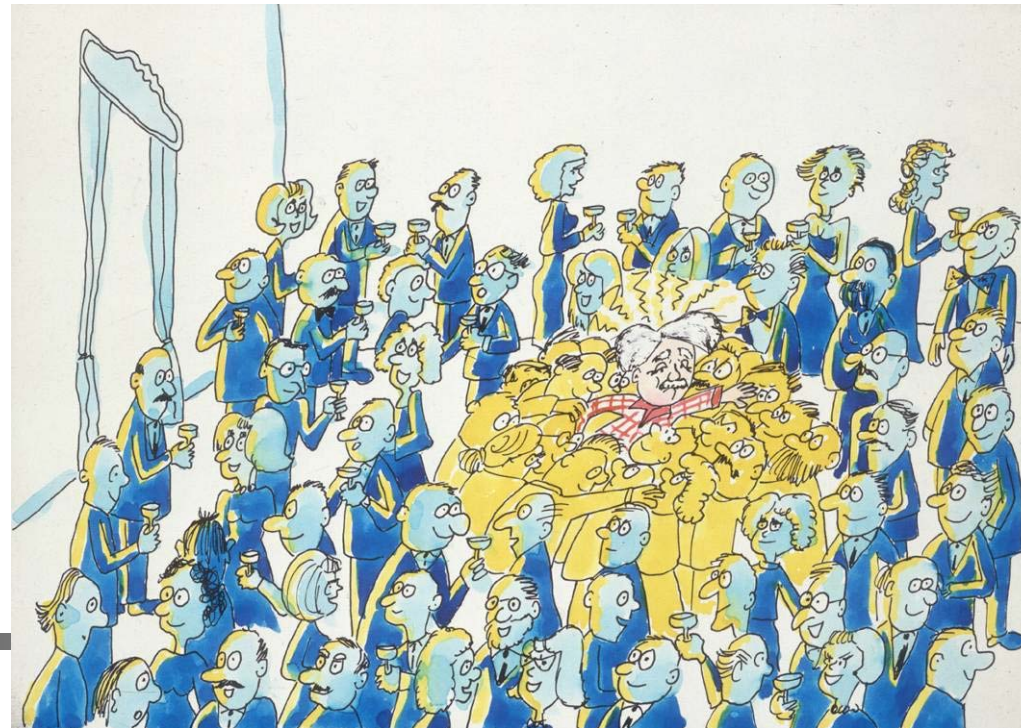
Higgsovo polje  $\rightarrow$  delci imajo maso  
velikost mase odvisna od velikosti „Higgsovega naboja“







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

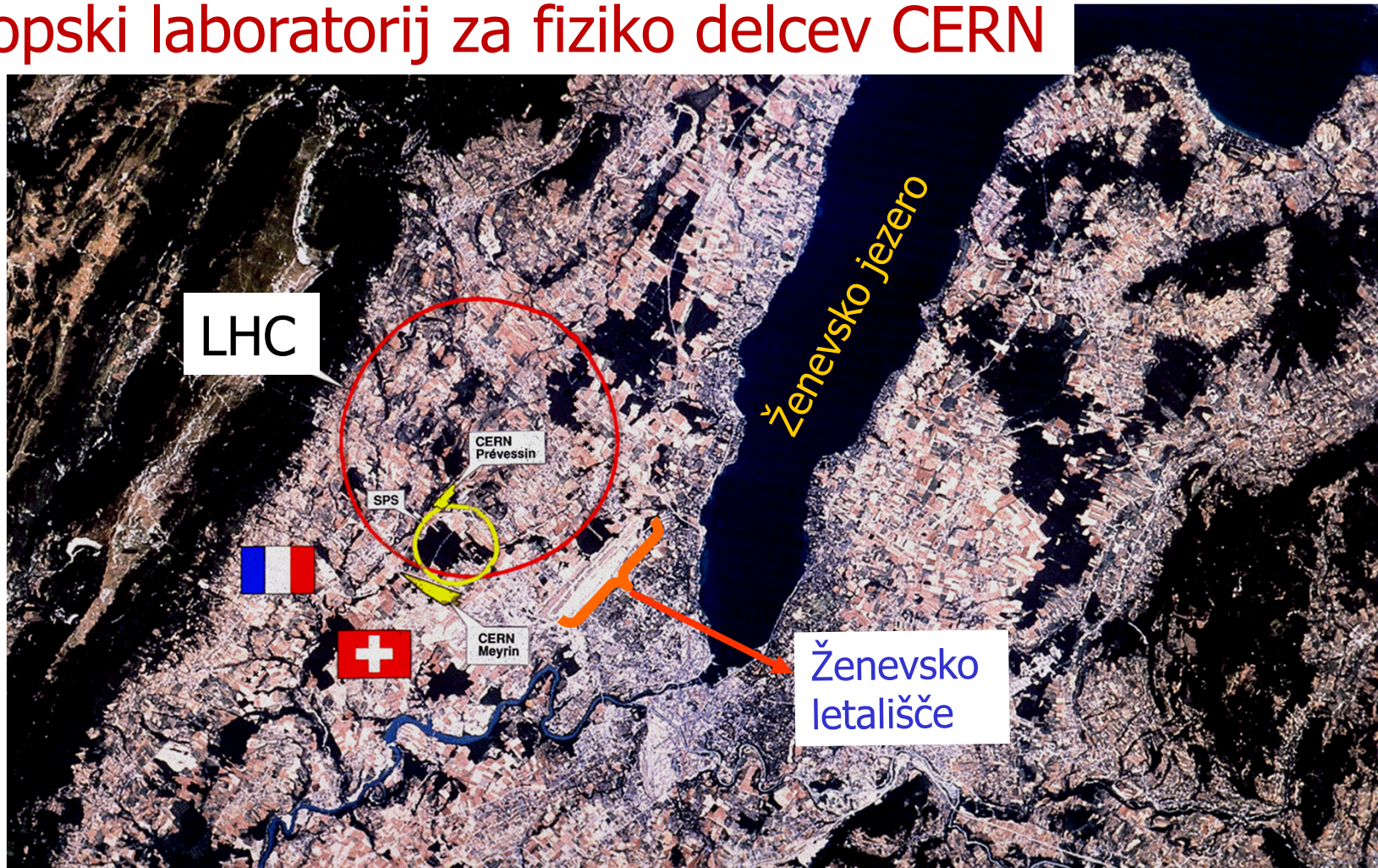
Higgsovo polje → delci imajo maso  
velikost mase odvisna od velikosti „Higgsovega naboja“

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



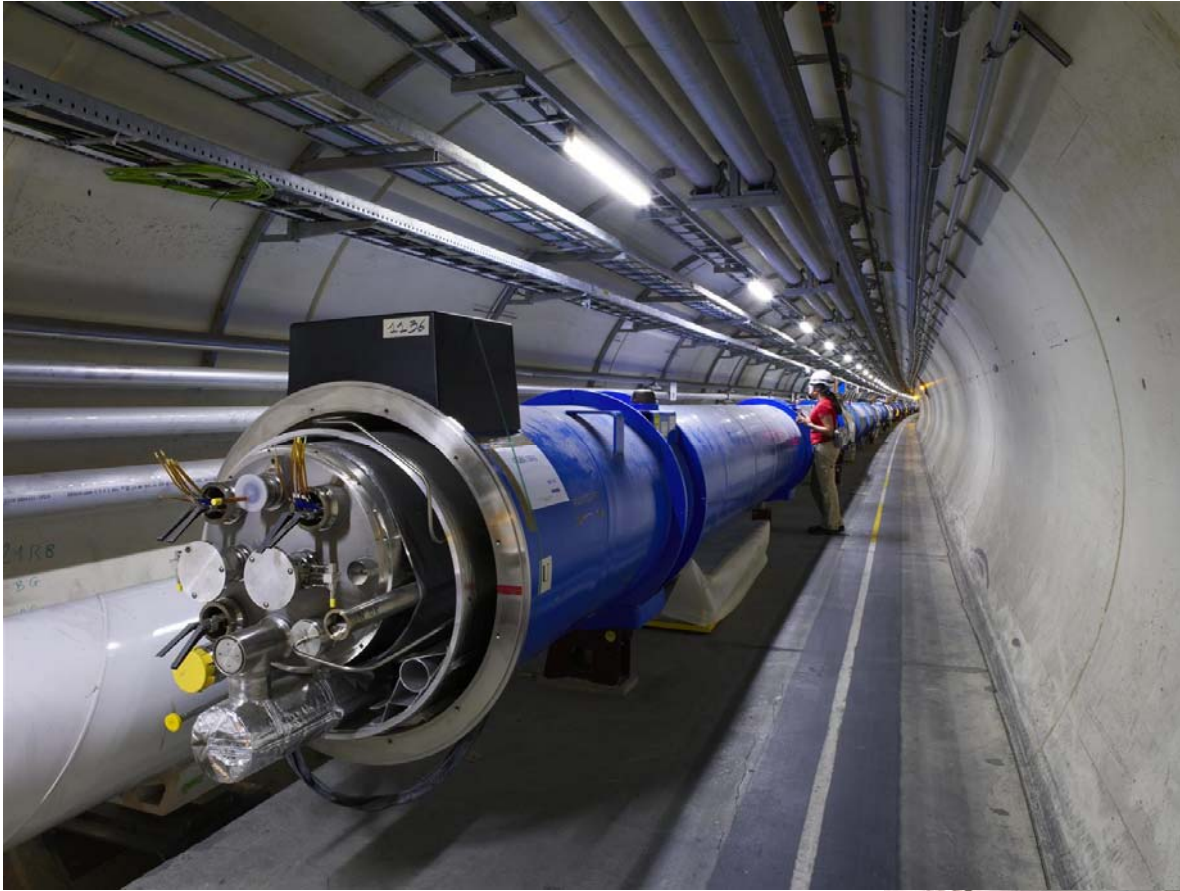
# Na lovu za Higgsovimi delcem

## Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



LHC = Large Hadron Collider






del 27 km dolgega  
pospeševalnika

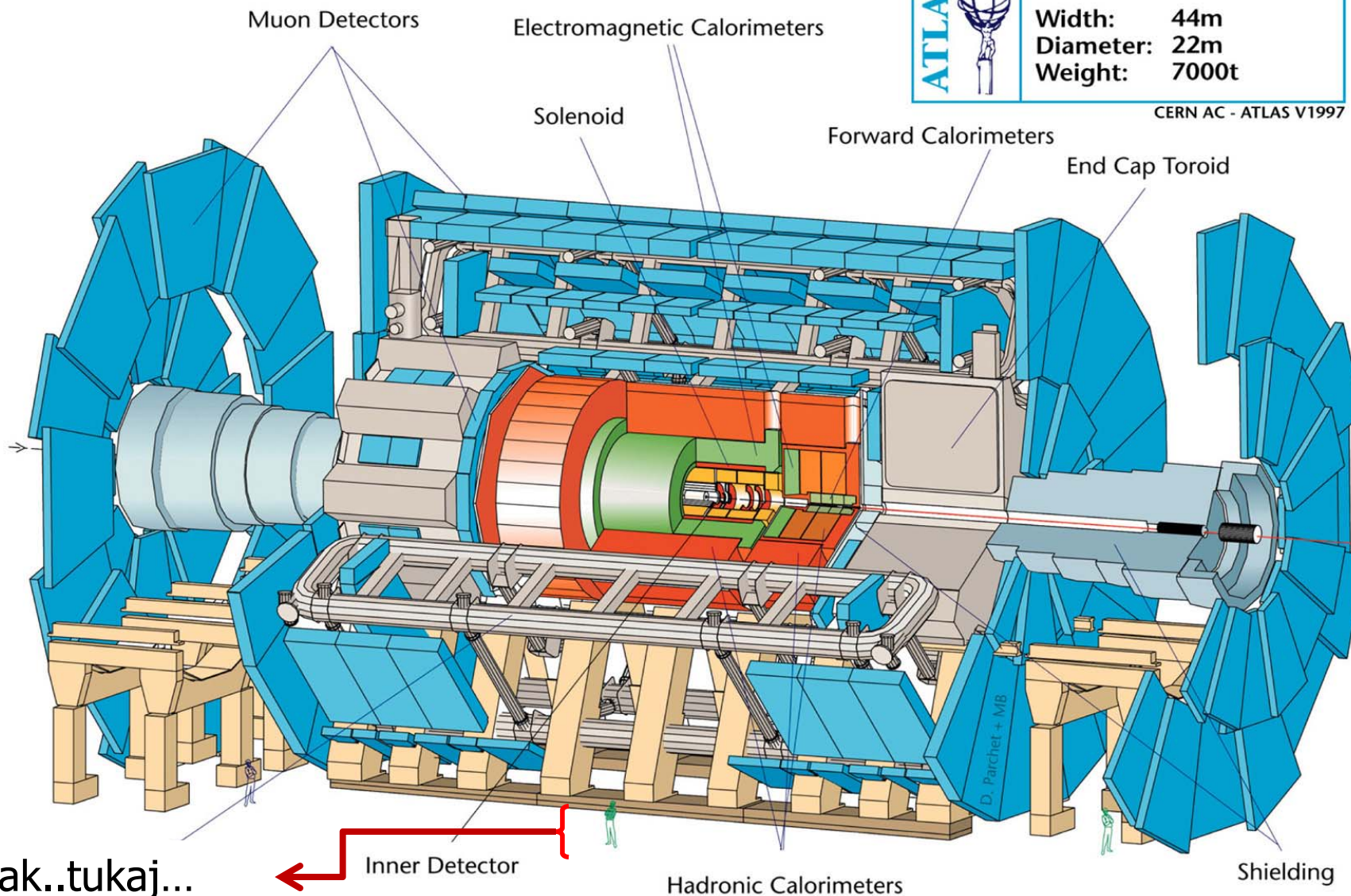


# Detektor ATLAS ob LHC



|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| <b>ATLAS</b><br> | <b>Detector characteristics</b> |
|   | <b>Width:</b> 44m               |
|   | <b>Diameter:</b> 22m            |
|   | <b>Weight:</b> 7000t            |

CERN AC - ATLAS V1997

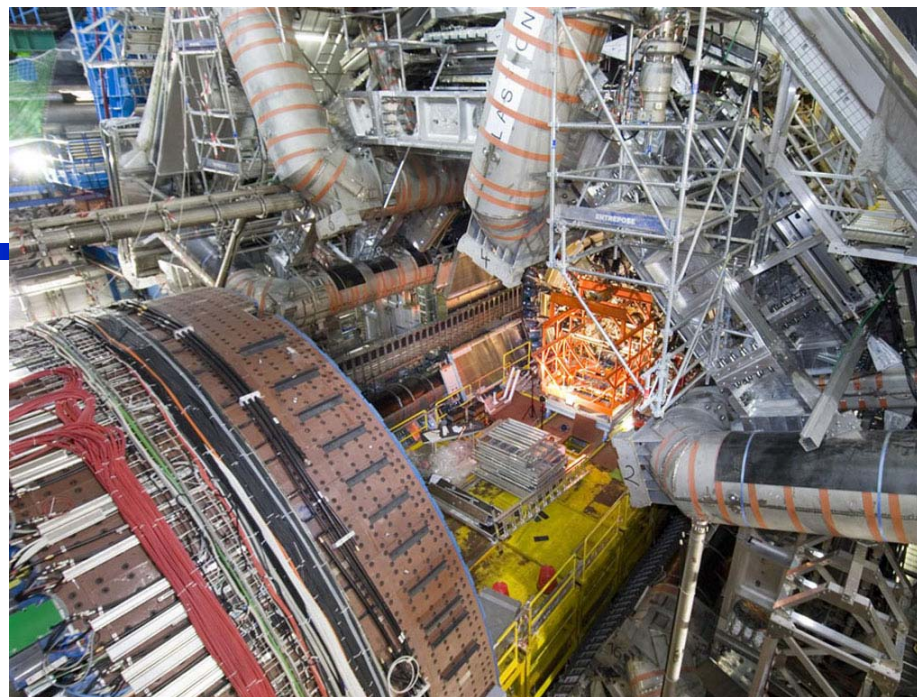
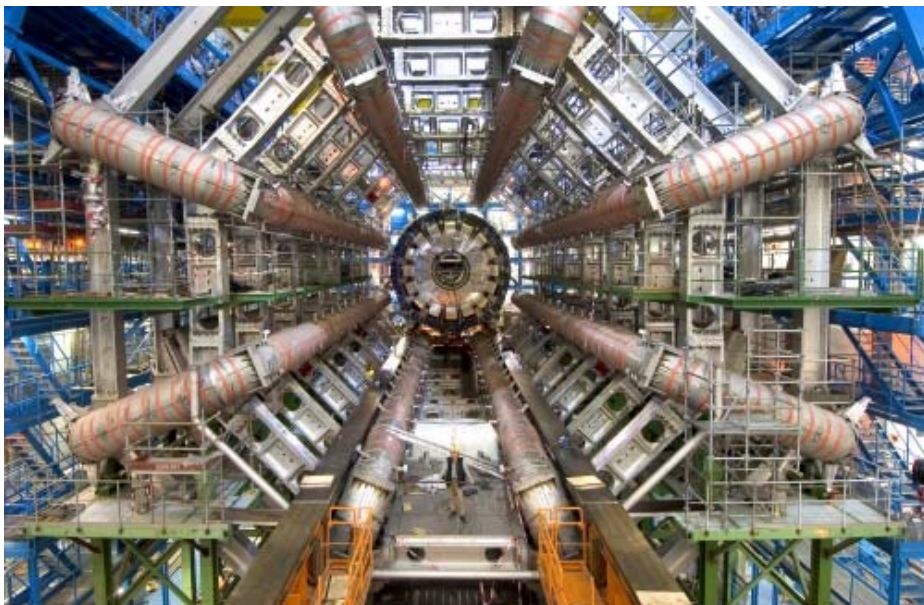


možak..tukaj...





# Detektor ATLAS med gradnjo

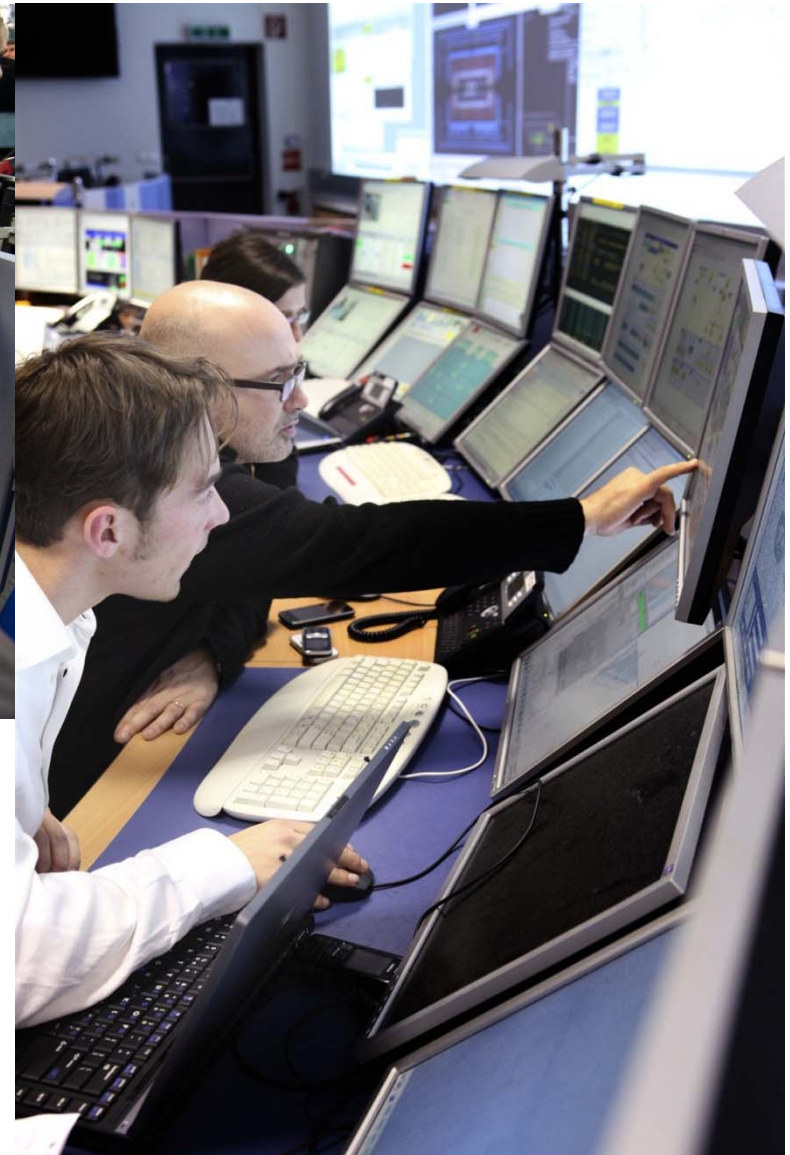
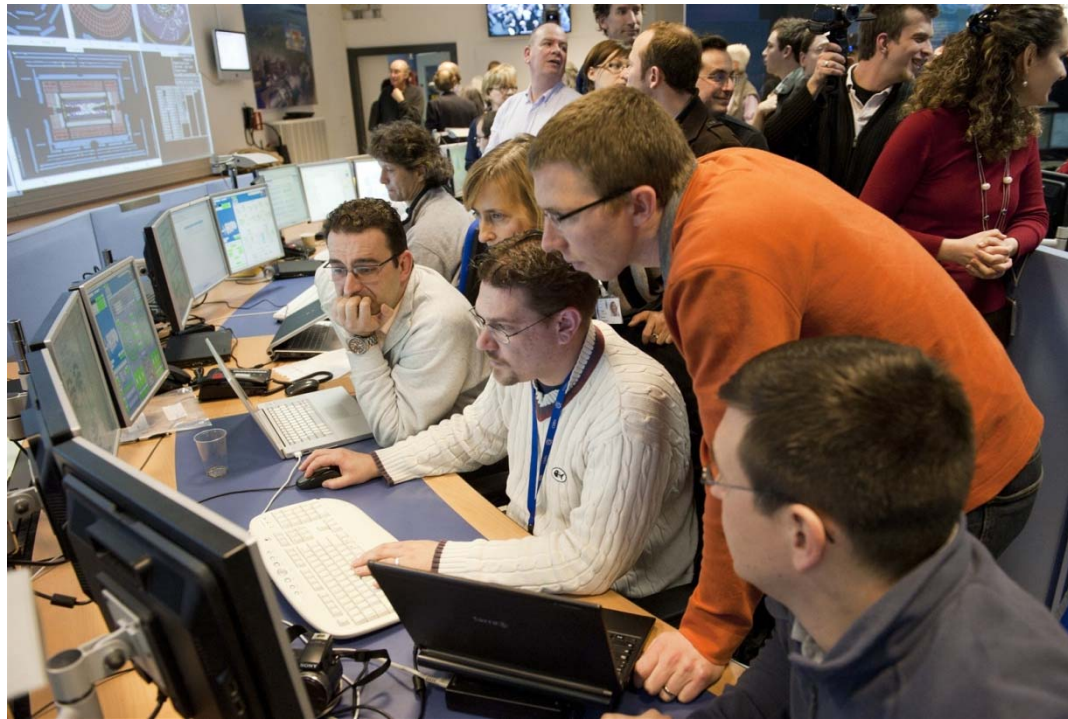


Viden delež slovenske raziskovalne skupine (IJS in FMF UL)



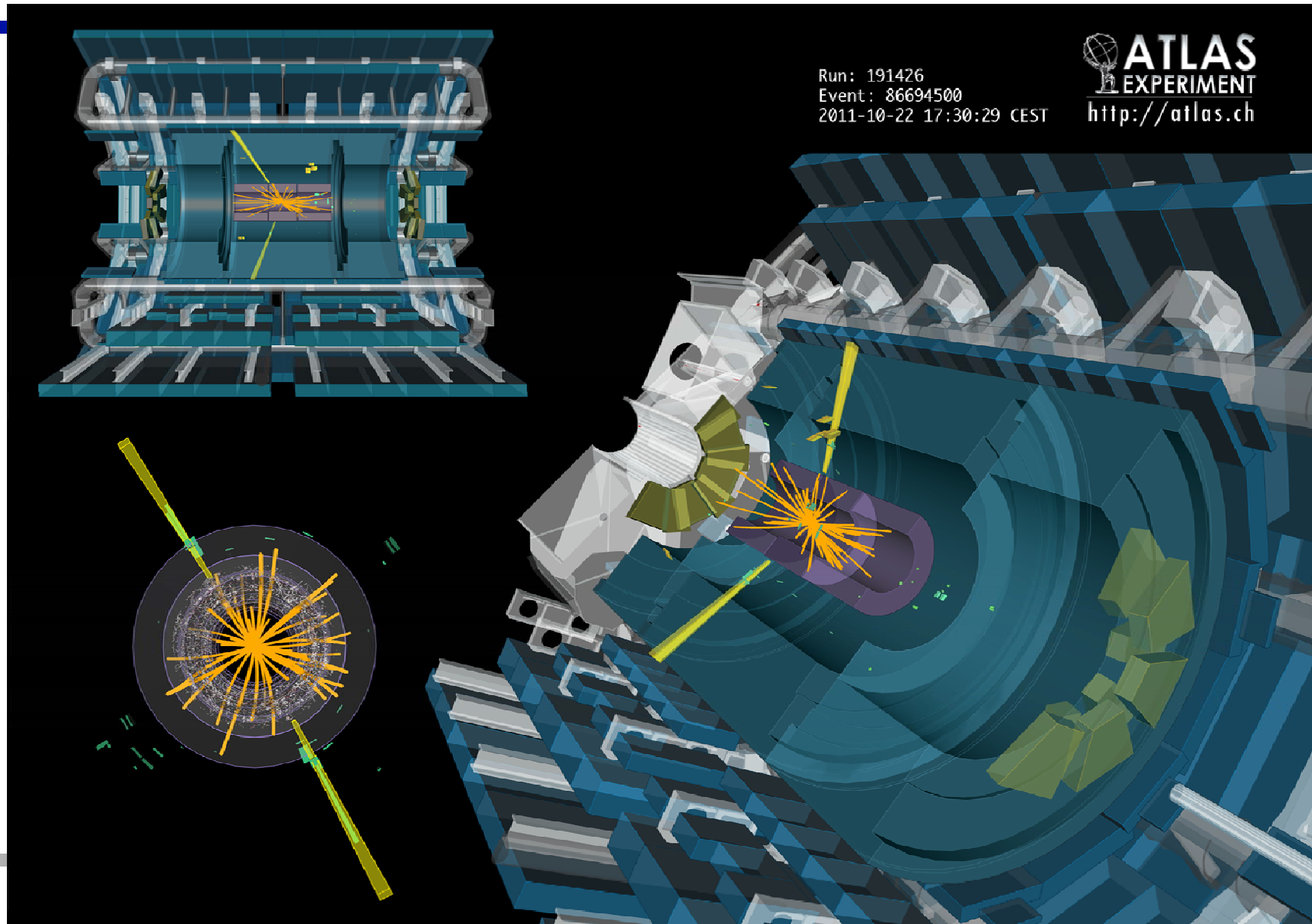
Marko Mikuž





Kontrolna soba med  
meritvami...

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



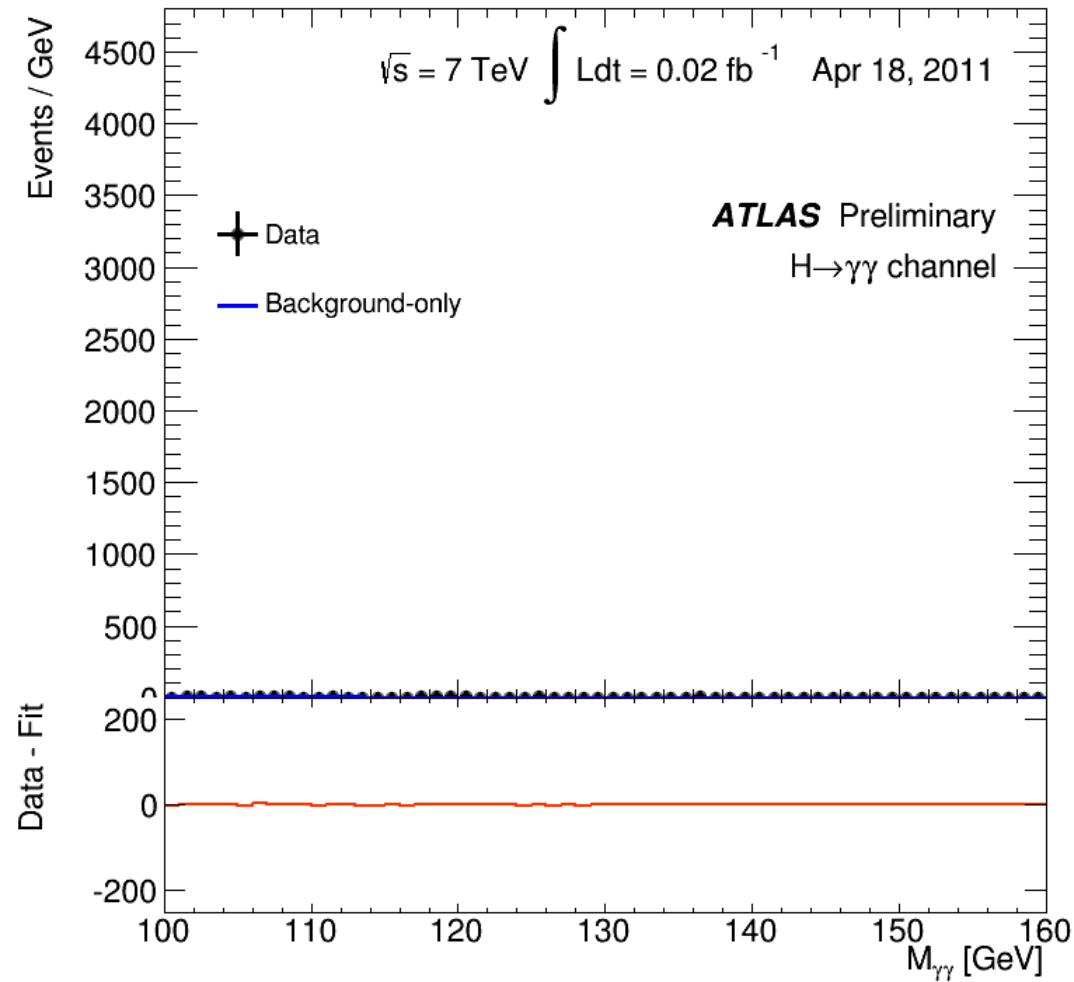
# Iskanje Higgsove delca z detektorjema ATLAS in CMS ob LHC

---

- 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.

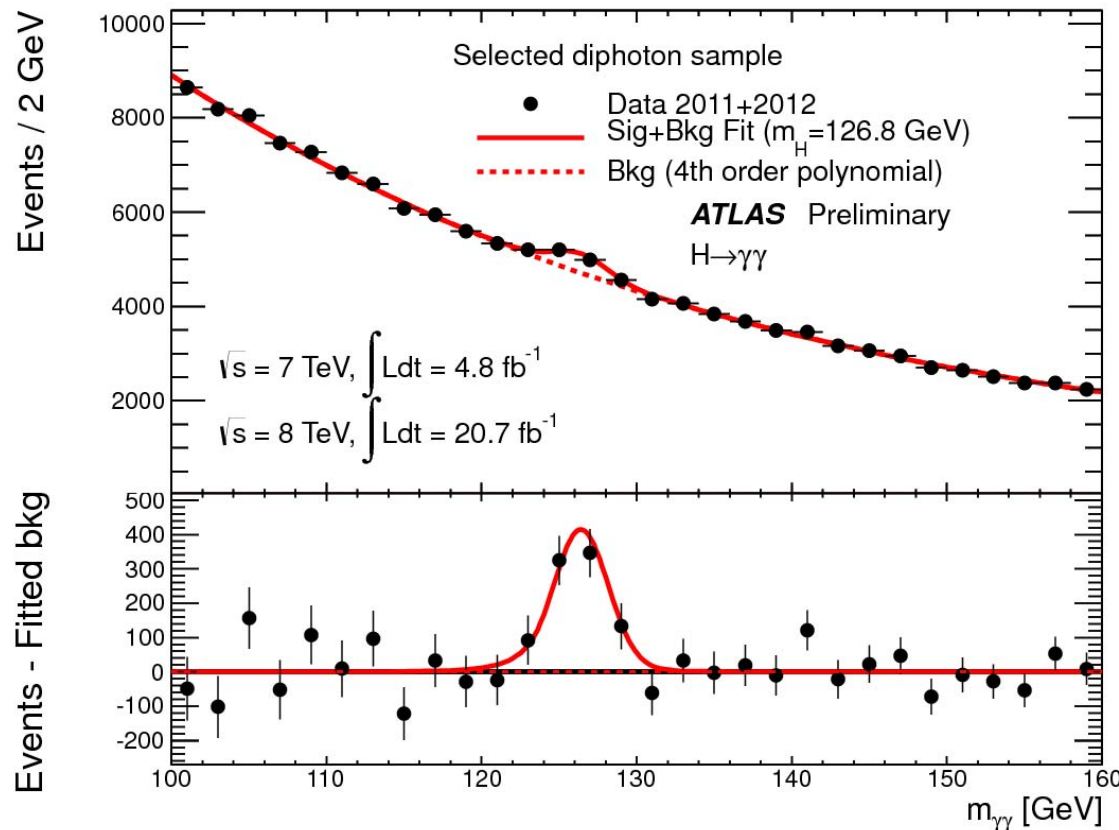
Viden delež slovenske raziskovalne skupine (IJS in FMF UL) pri eksperimentu ATLAS.

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





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

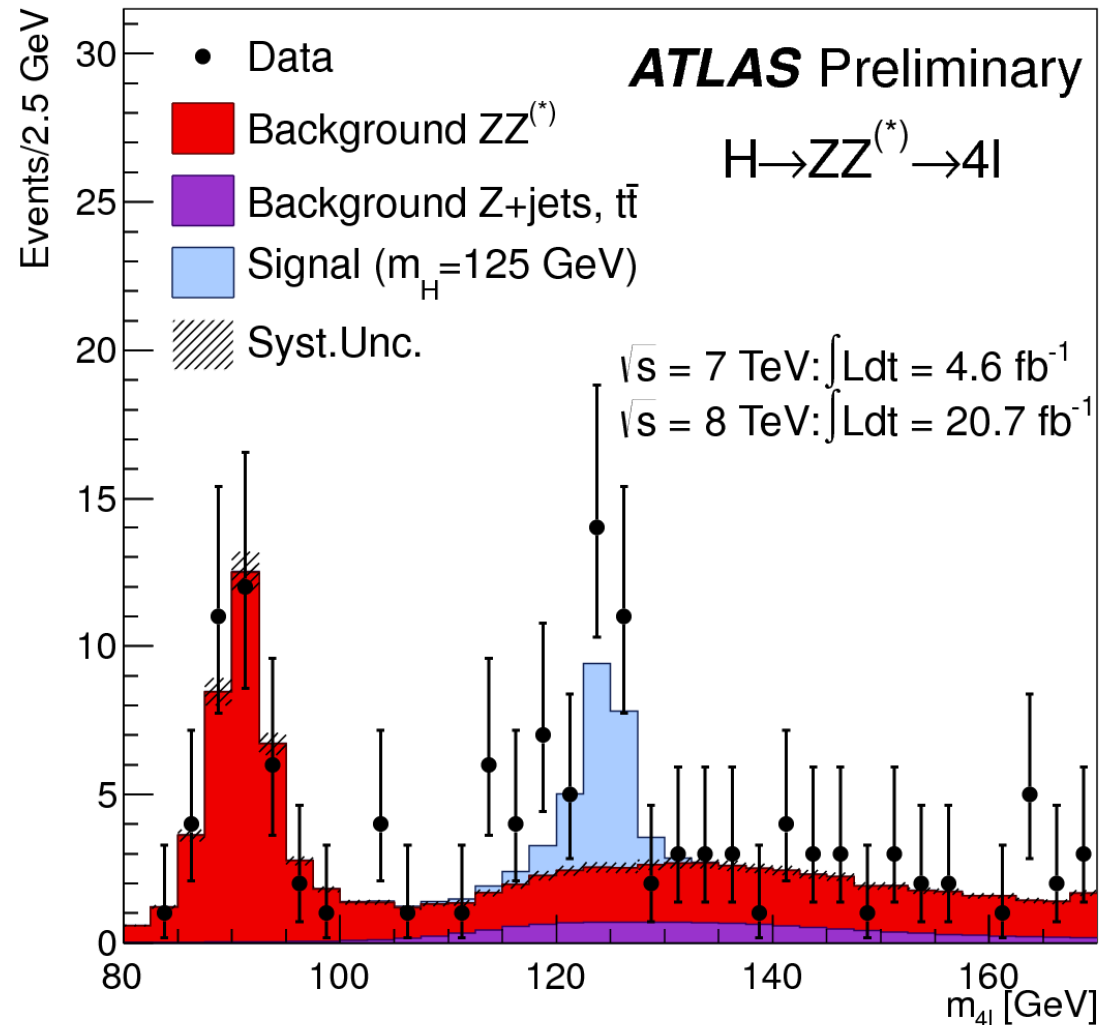


Masa vsake zabeležene kombinacije dveh visokoenergijskih žarkov gama:

- 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

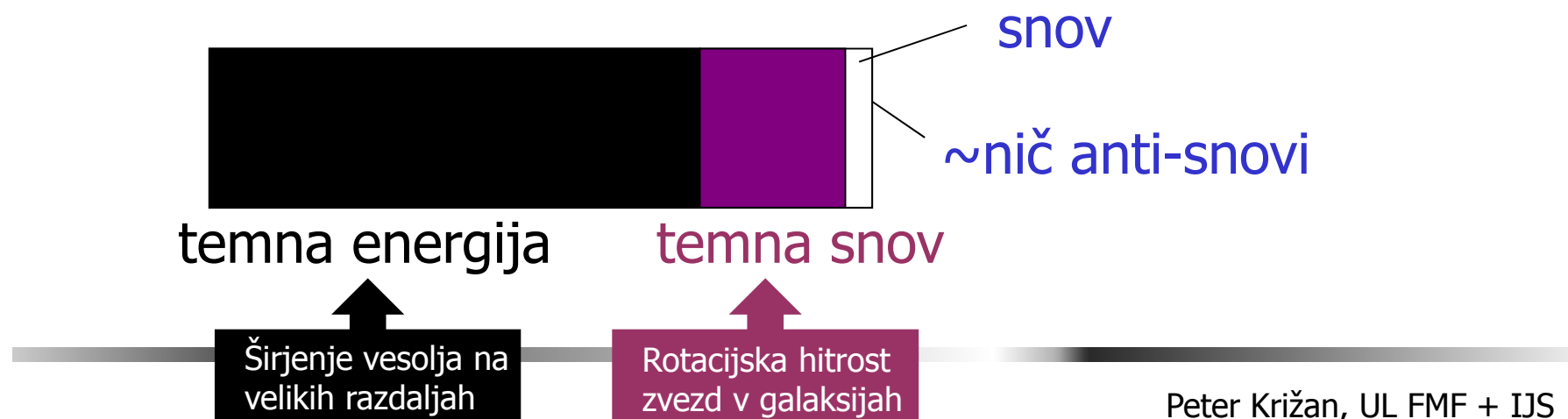
# Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

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

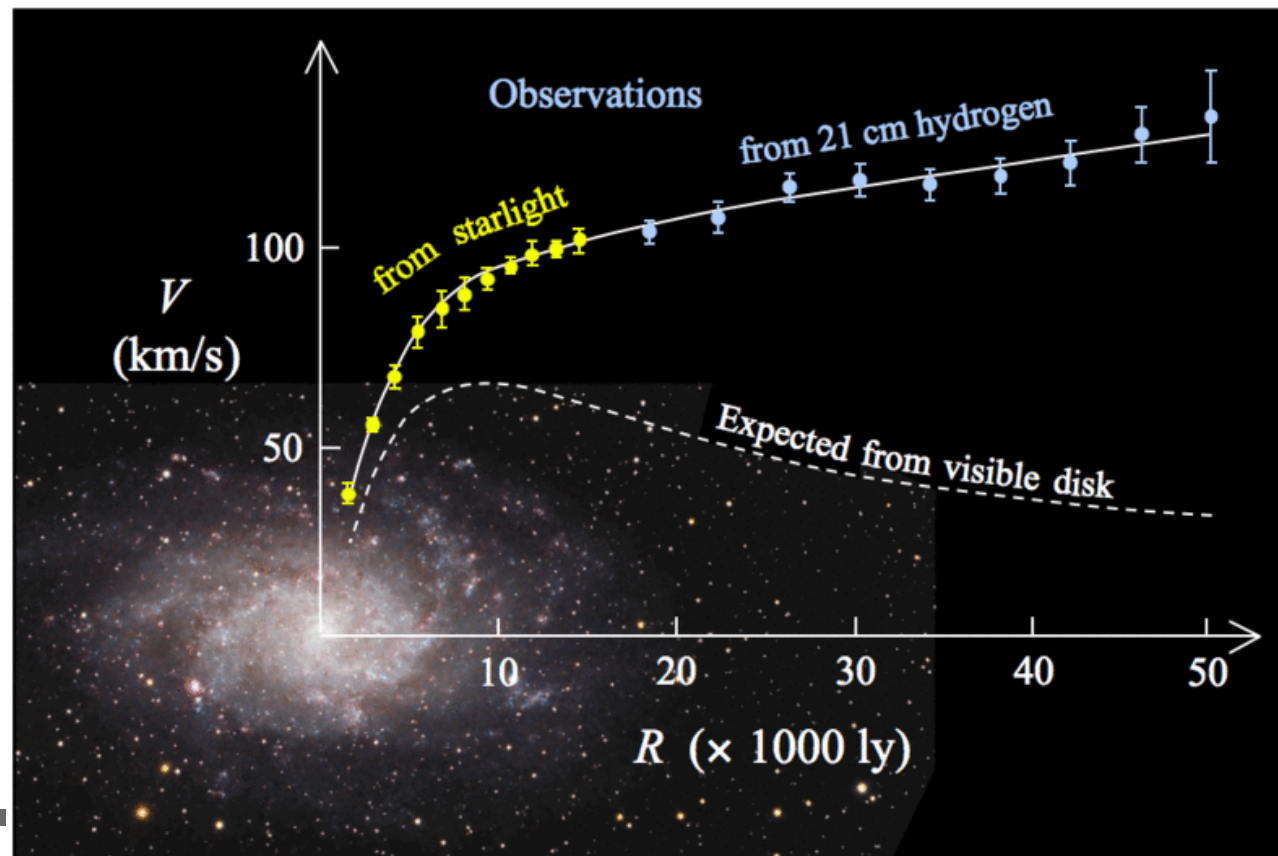
In nenazadnje: večina vesolja je narejena iz delcev, ki jih ne poznamo...



# 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).

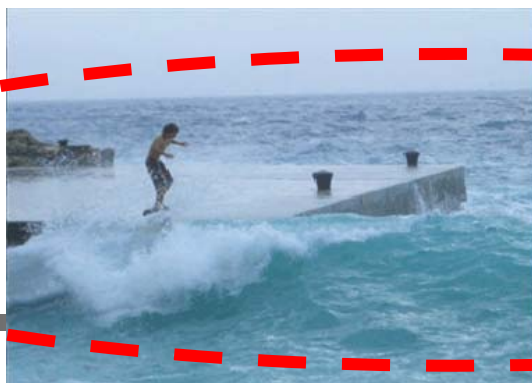
→ Oba pristopa se dopolnjujeta  
(odkritje in razumevanje novih delcev)



# 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

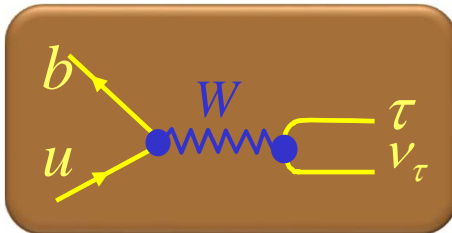


Belle II

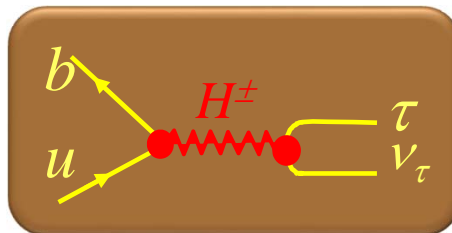


# Primer: lov na **nabit Higgsov delec** v razpadu $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$

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  $W^-$**



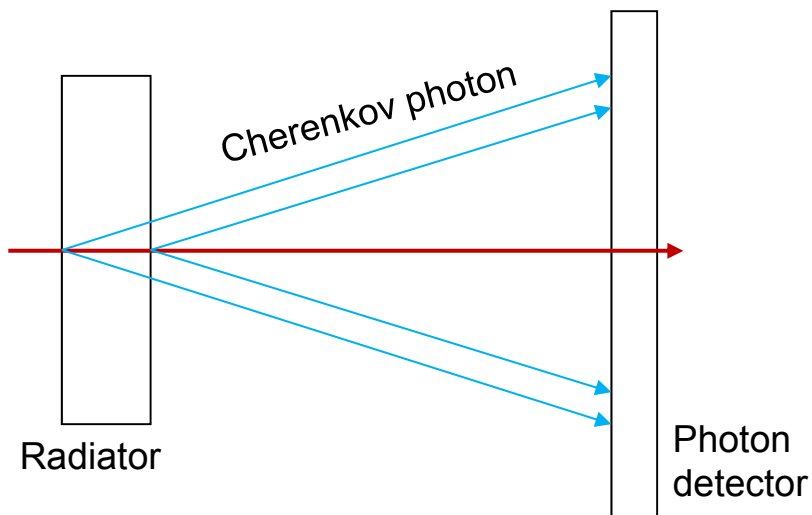
V nekaterih supersimetričnih teorijah bi lahko potekal tudi preko **nabitega Higgsovega delca  $H^\pm$** .

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

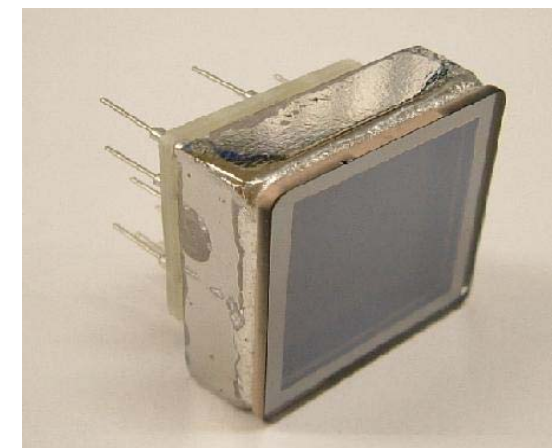
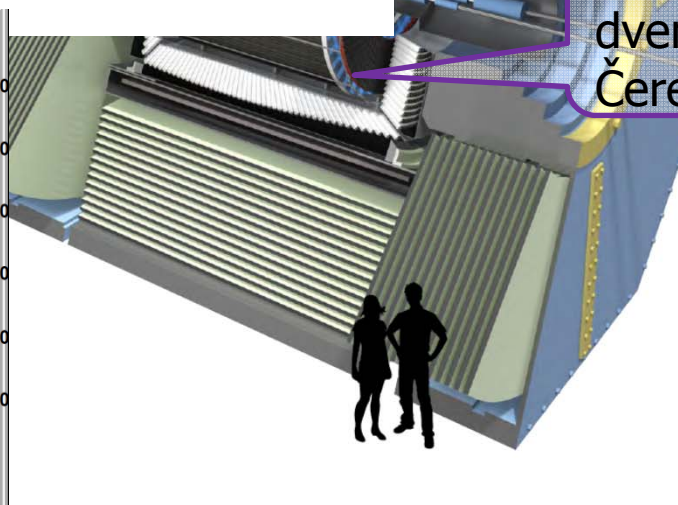
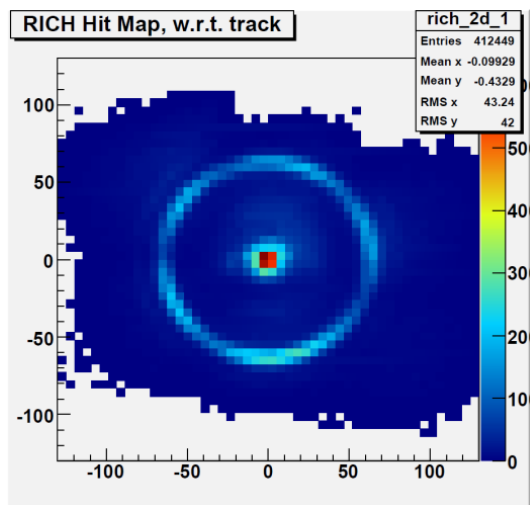
Če izmerimo verjetnost za tak razpad in jo primerjamo s predvidevanjem Standardnega modela (kjer nabitega Higgsa ni):

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

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 domet meritev za 100x – **boljši detektor** in **zmogljivejši pospeševalnik**

# Raziskovalna skupina Belle II



Močna raziskovalna skupina ~600 fizikov s celega sveta



# Zakaj osnovne raziskave?

---

Iskanje odgovorov na vprašanja o svetu okoli nas so bistveni sestavni del naše civilizacije, brez tega je ne bi bilo.

Slovenija mora v to zakladnico prispevati svoj delež. Tudi na ta način je naša država prepoznavna.

Premajhni smo in premalo bogati, da bi si pri velikih projektih lahko privoščili kaj drugega kot **prvorazredne** raziskave!

# Uporabnost osnovnih raziskav

---

Dilema o uporabnosti osnovnih raziskav je stara.

Michael Faraday (angleški fizik, 1791-1867): odkril indukcijo – prava osnovna raziskava v njegovem času (danes pa si brez nje moremo predstavljati življenja: je osnova radiu, televiziji, mobilnim telefonom in računalnikom).

Ko ga je angleški finančni minister vprašal, zakaj so njegove raziskave koristne, je odgovoril:

“Ne vem, zakaj so koristne, prepričan pa sem, da bo vaš naslednik od tega pobiral davke.”

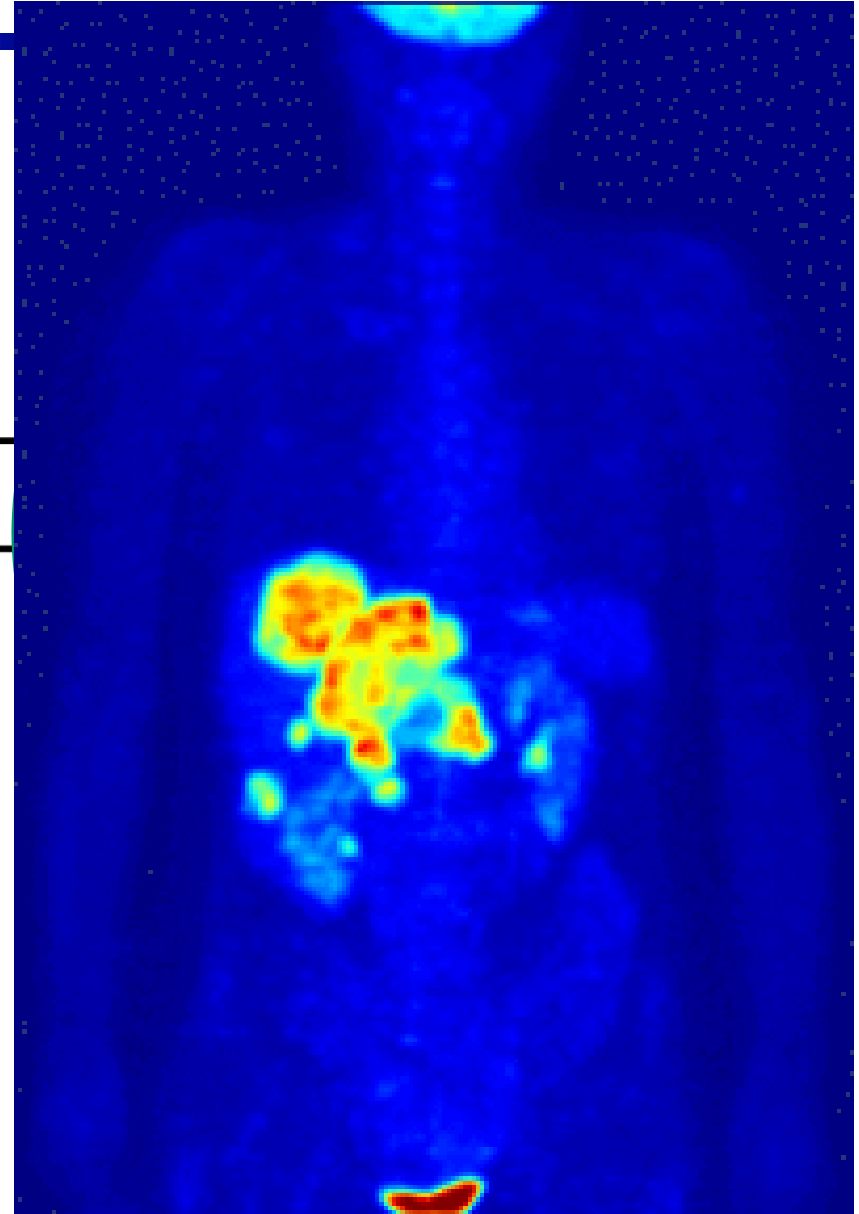
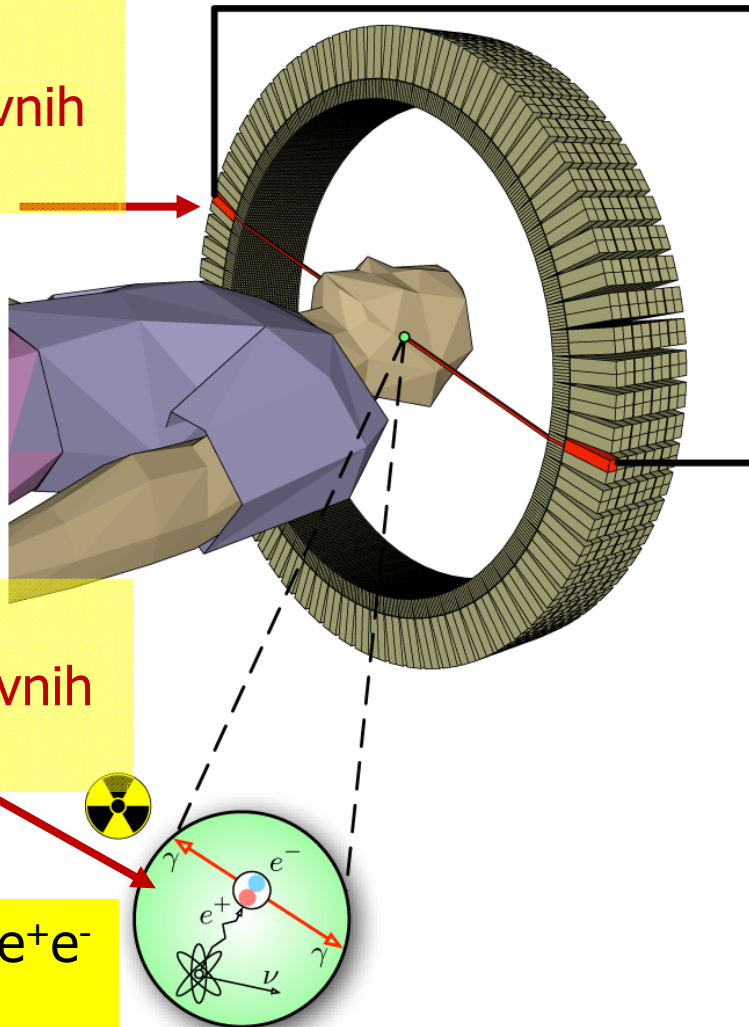
# Spin-off osnovnih raziskav – primer 1

## PET: pozitronska tomografija

detektor iz fizike osnovnih delcev

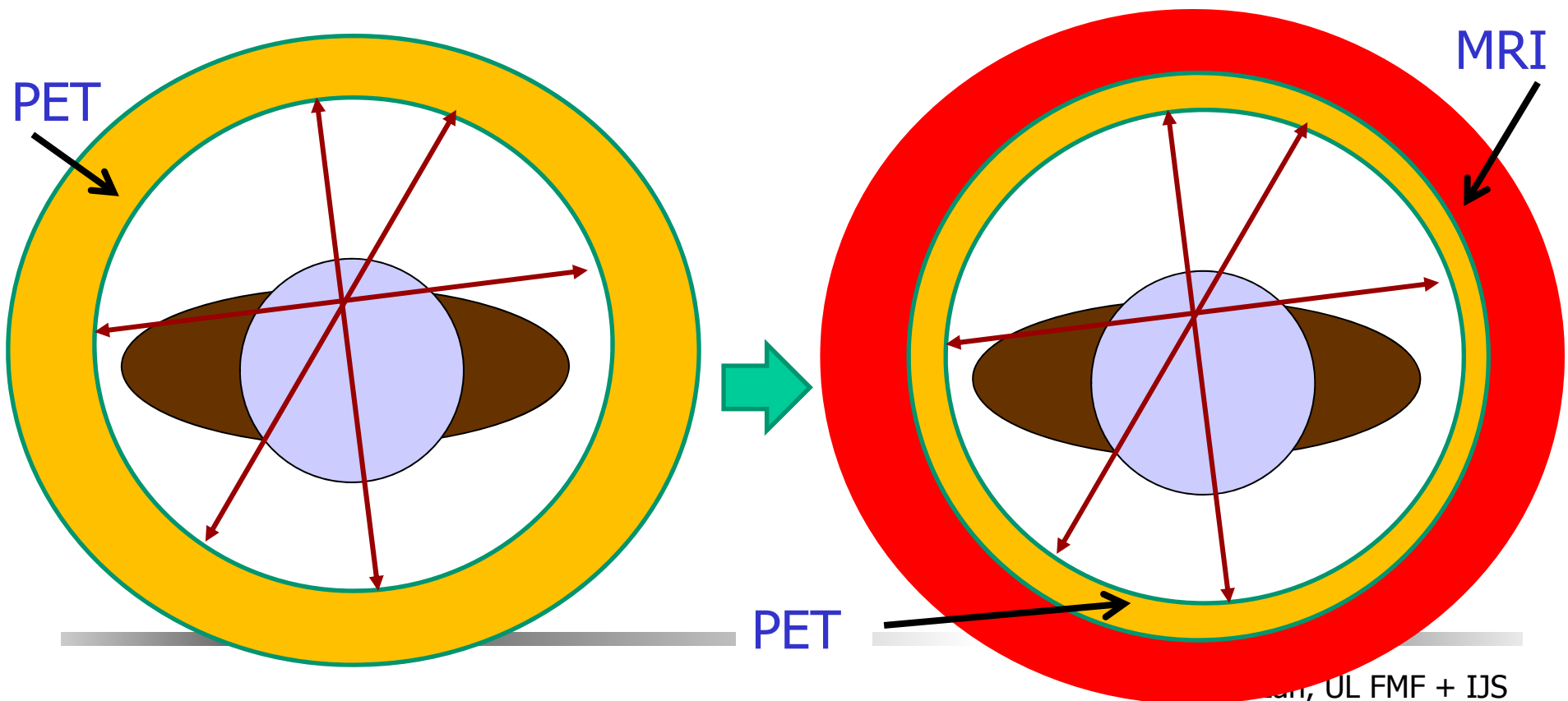
zakonitosti fizike osnovnih delcev

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.

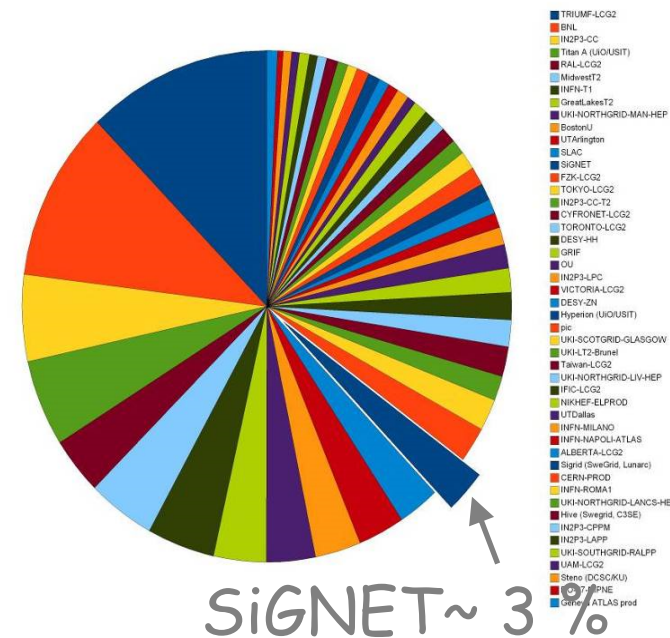
**Grid** kot naslednja stopnja razvoja interneta: distribuirane računalniške kapacitete (‘računalnik iz vtičnice’)

**LHC** je prvi veliki uporabnik Grida, razvoj in preizkus tehnologije

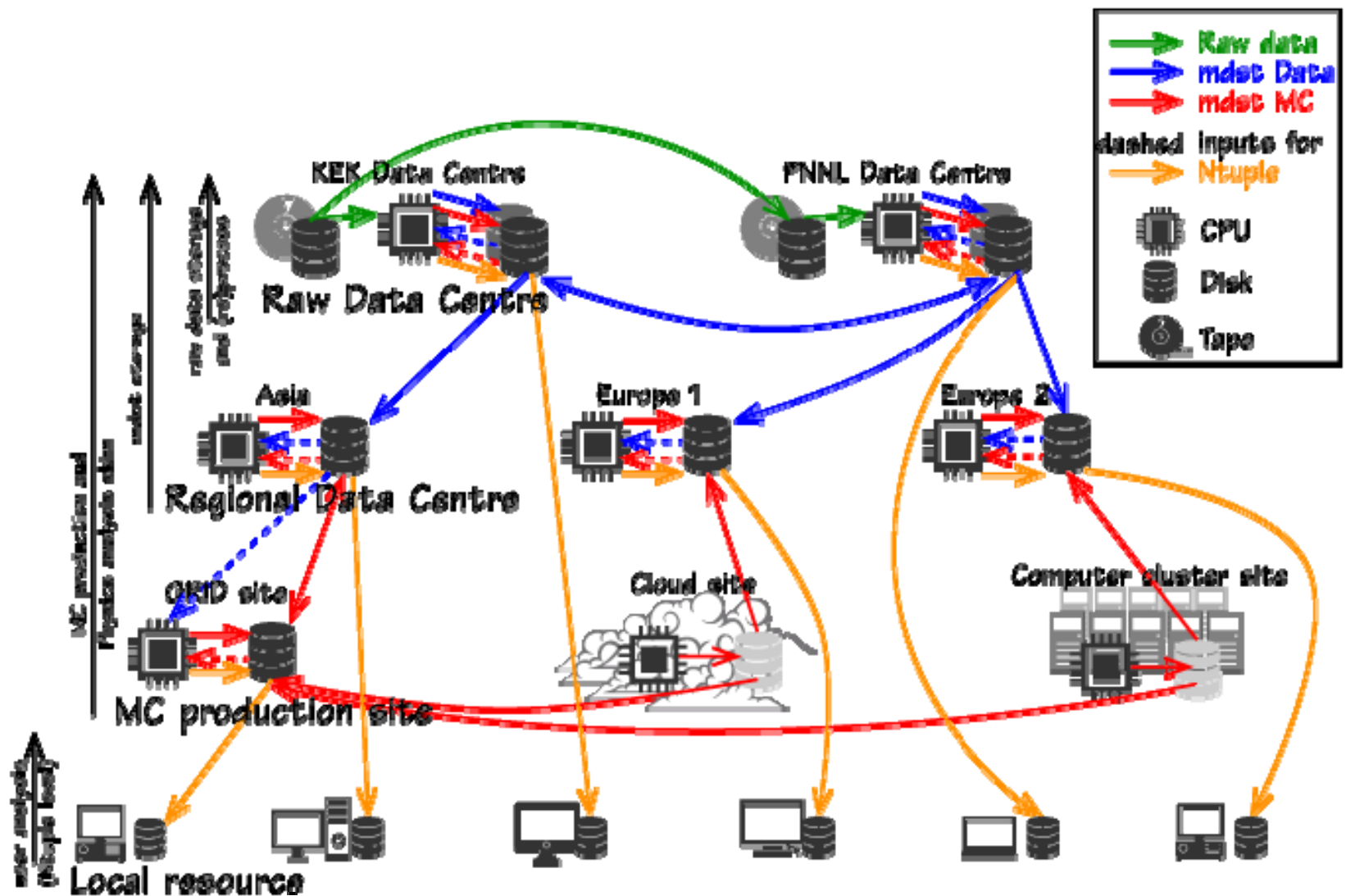
Na IJS deluje **SiGNET** (>2000 procesorjev, **800 TBy**), del LHC Grida in del drugih Grid aplikacij



ATLAS Simulation Production  
February 2007 - February 2008



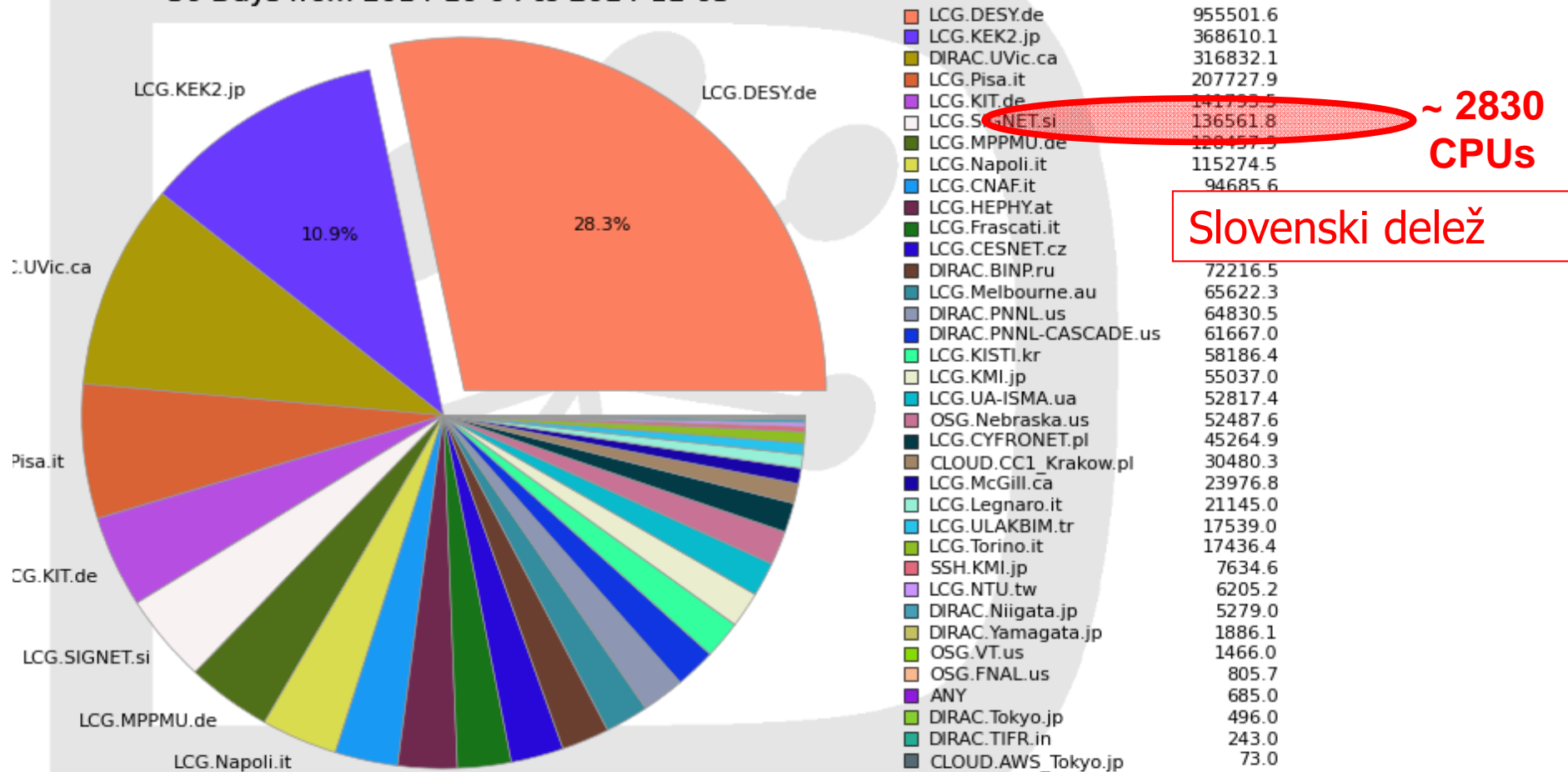
# Obdelava podatkov pri Belle II: GRID in Cloud



# Primer testne akcije oktobra 2014

Total Number of Jobs by Site

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



# 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.

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

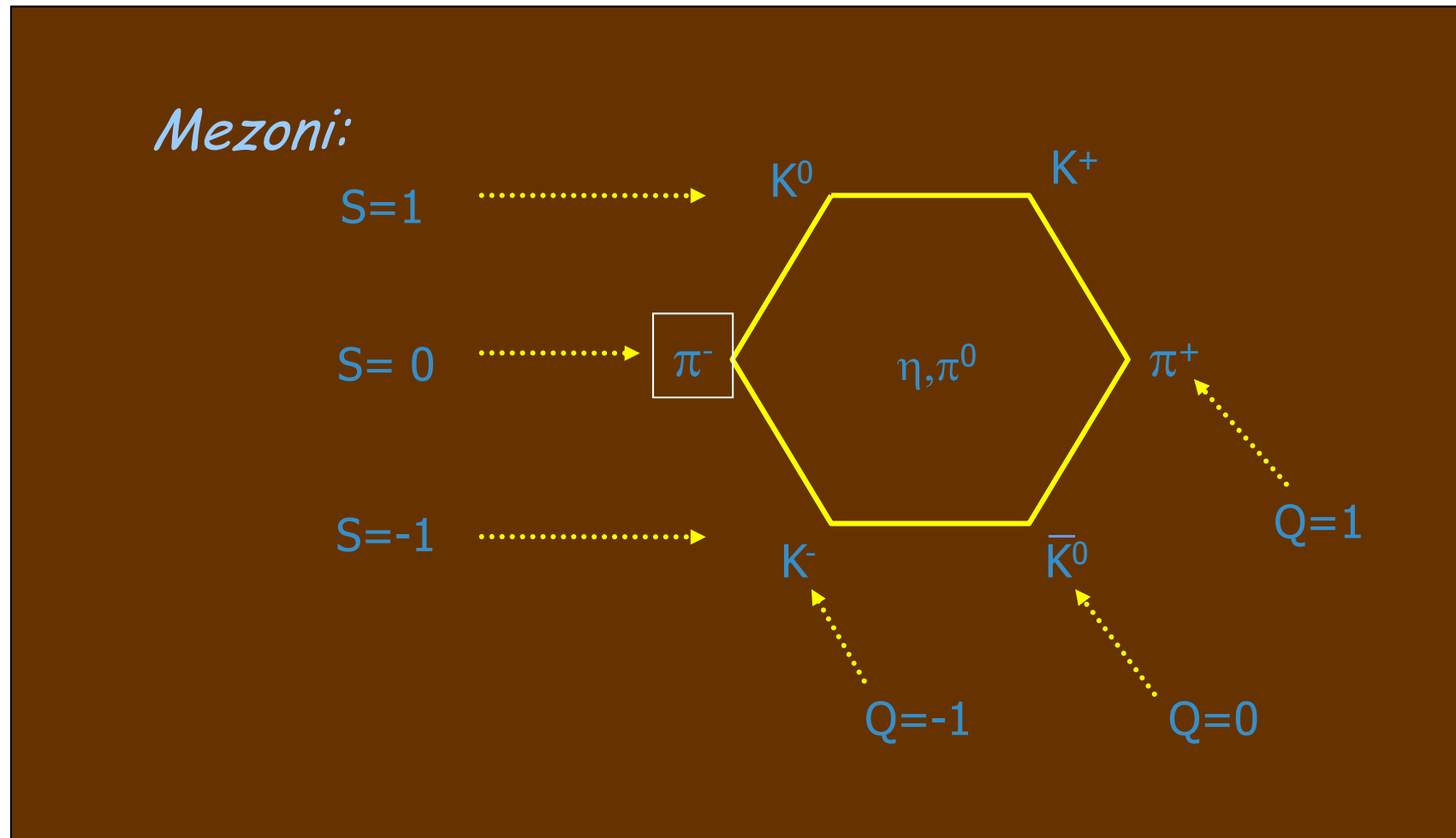
Posredne rezultate svojih raziskav poskušamo uporabiti pri napredku v medicini in varovanju okolja.



# Dodatne prosojnice

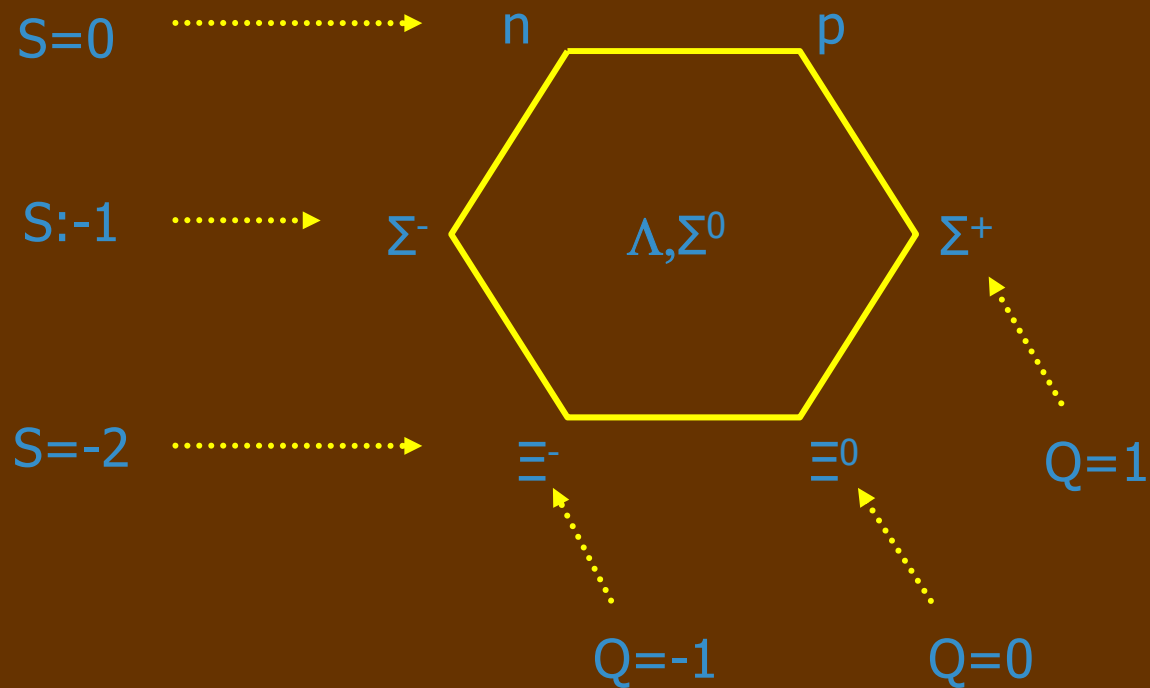
---

# Periodni sistem: delce uredimo v skupine po naboju in „čudnosti“



# 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**