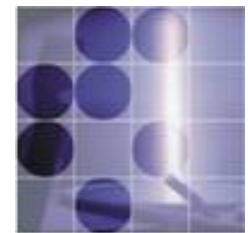
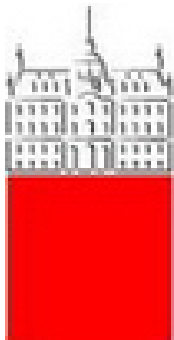


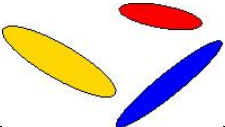
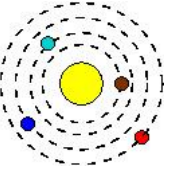
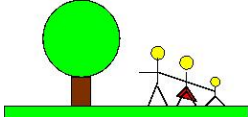
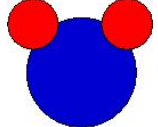
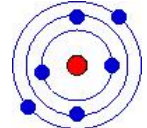
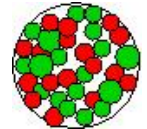
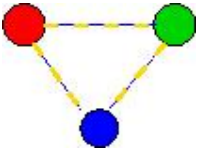

# Lov na Higgsove delce

Peter Križan

*Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani,  
in Institut Jožef Stefan*



2. Gimnazija, Maribor, 9.1.2012

<b>DELCI</b>	<b>in</b>	<b>SILE</b>	<b>po</b>	<b>nadstropjih</b>	
Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
$10^{21}$	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
$10^{14}$	galaksije zvezde planeti				kozolog, astrofizik, astronom
1	živa bitja		instinkti	oхранitev vrste	biolog, sociolog
$10^{-8}$	molekule		elektro- magnetna	pestrost svetlobe, življenja  energija	kemik, 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		?	?	

# Zveza med fiziko osnovnih delcev in zgodnjim razvojem vesolja

---

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

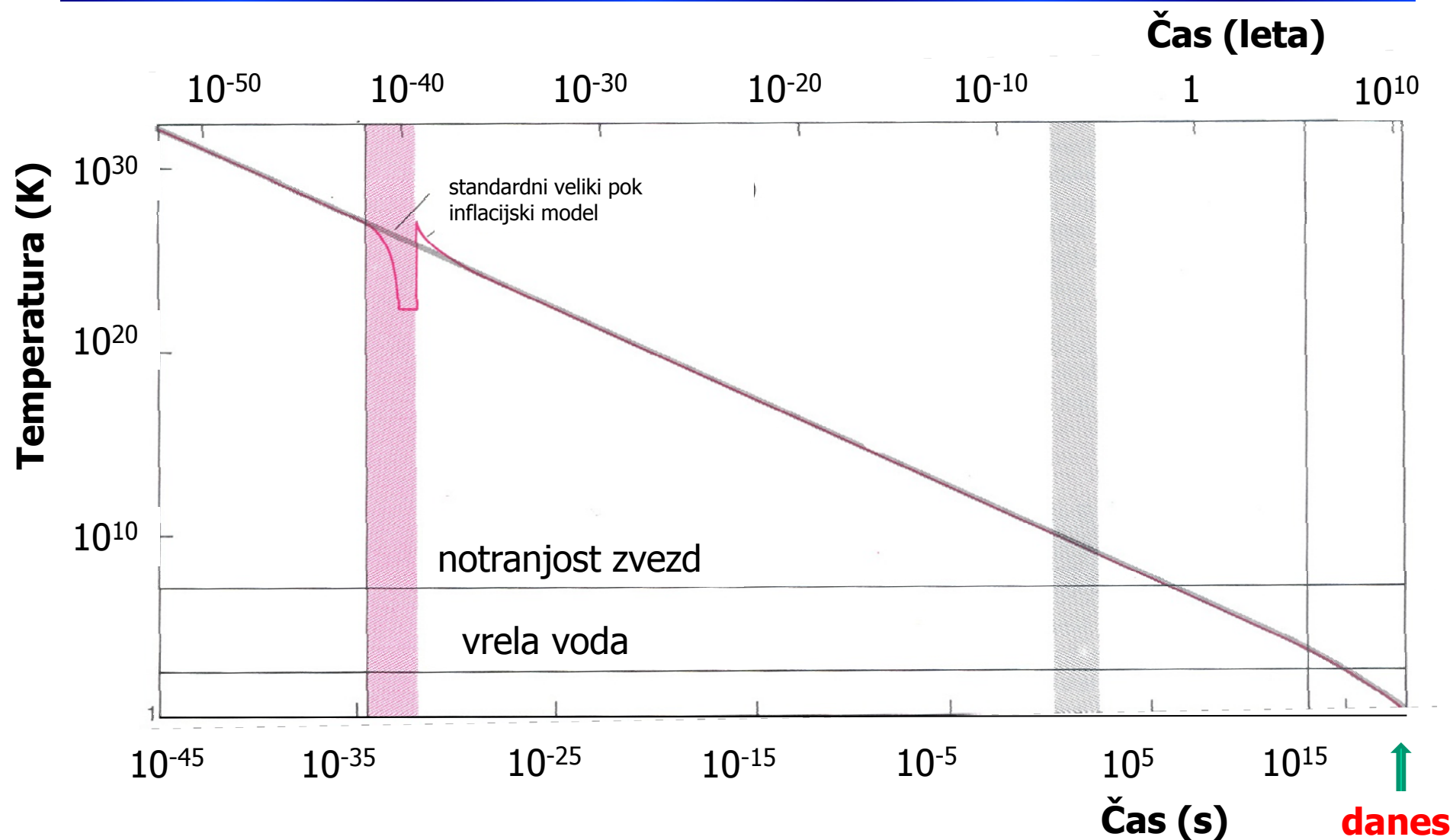


Plin pri visoki temperaturi: **velika hitrost** gradnikov

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



# Temperatura vesolja



# Kakšen naj bo opis osnovnih gradnikov narave?

---

Dve zahtevi:

- **Preprost**

- majhno število osnovnih gradnikov snovi

- **Pravilen**

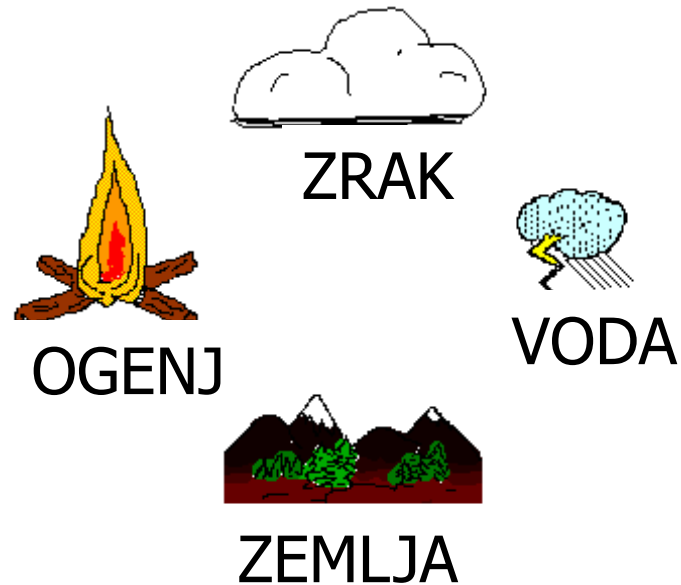
# Opis narave po Anaksimenesu

---

Anaksimenes iz Mileta:

Narava je sestavljena iz štirih elementov:

- zrak
- ogenj
- voda
- zemlja



→ Preprost, a napačen...

# Opis narave po D.I. Medeljejevu

## Periodni sistem elementov:

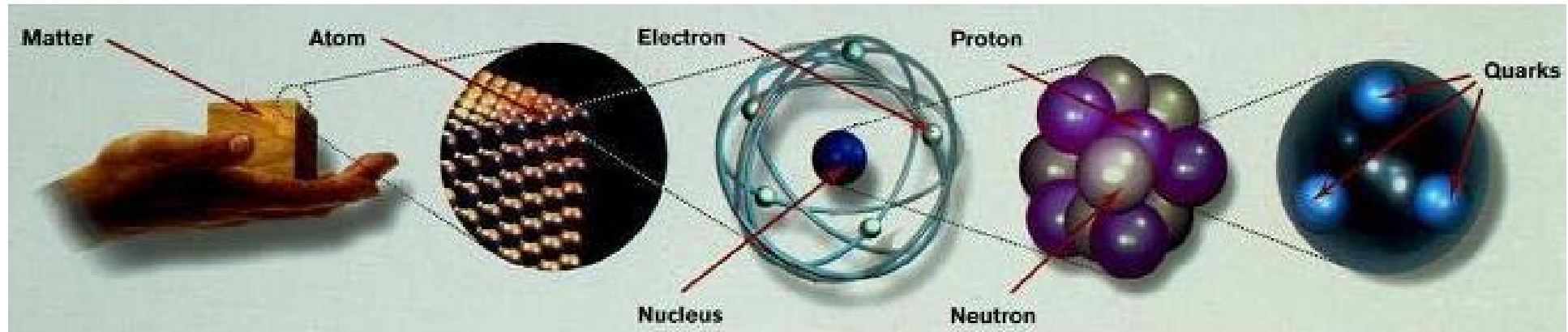
	1A													IIIA	IVA	VIA	VIA	VIA	0
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110	111	112	113						

* Lanthanide Series	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
+ Actinide Series	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

~100 elementov → Pravilen, a zapleten

# DELCI po nadstropjih



snov

atomi

elektroni,  
atomska jedra

protoni,  
nevtroni

kvarki



# Standardni model 1

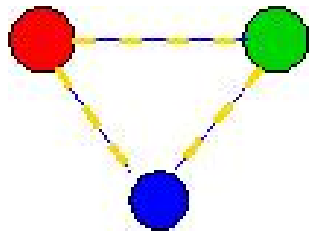
Osnovni delci	1. družina	2. družina	3. družina
kvarki	u,d	s,c	b,t
leptoni	$e^-, \nu_e$	$\mu^-, \nu_\mu$	$\tau^-, \nu_\tau$

Vsak delec ima svoj antidelec: vsakemu kvarku ustreza antikvark  
elektronu  $e^-$  ustreza pozitron  $e^+$

Antidelcev v naravi ne najdemo (več), lahko jih ustvarimo v pospeševalnikih

# Barioni in mezoni: vezana stanja kvarkov in antikvarkov

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

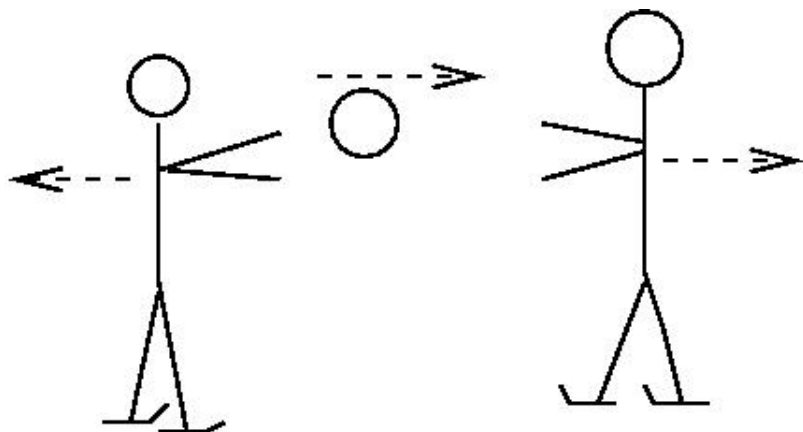


Barioni	masa
proton: $uud$	$1 m_p$
nevtron: $udd$	$\sim 1 m_p$
$\Lambda$ : $uds$	$1.2 m_p$

Mezoni	masa
$\pi^+$ : kvark $u$ + antikvark $\bar{d}$	$1/7 m_p$
$K_S$ : kvark $d$ + antikvark $\bar{s}$	$1/2 m_p$
$J/\psi$ : kvark $c$ + antikvark $\bar{c}$	$3 m_p$
$B^0$ : kvark $d$ + antikvark $\bar{b}$	$5.5 m_p$

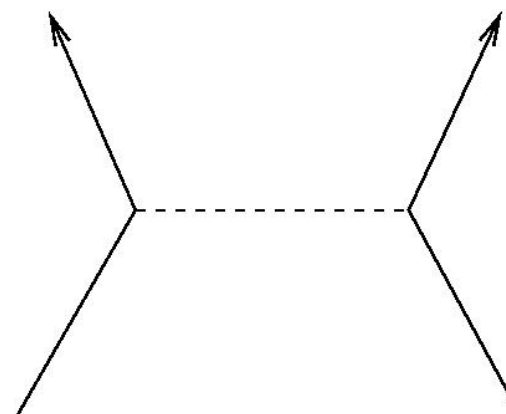
# Sile med osnovnimi delci: izmenjava nosilcev sile

---



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 2

---

<i>Sila - interakcija</i>	<i>nosilci sile</i>	<i>doseg</i>
elektromagnetna	foton $\gamma$	neskončen
šibka	šibki bozoni $W^+, W^-, Z^0$	zelo kratek
močna	gluoni $g$	kratek

# Asimetrija med snovjo in antisnovjo

---

## Današnje vesolje:

skoraj izključno snov, nič antisnovi.

Kam so izginili vsi antidelci iz Velikega poka?

## Delci in anti-delci se obnašajo nekoliko različno:

drugače razpadajo v stabilne delce →

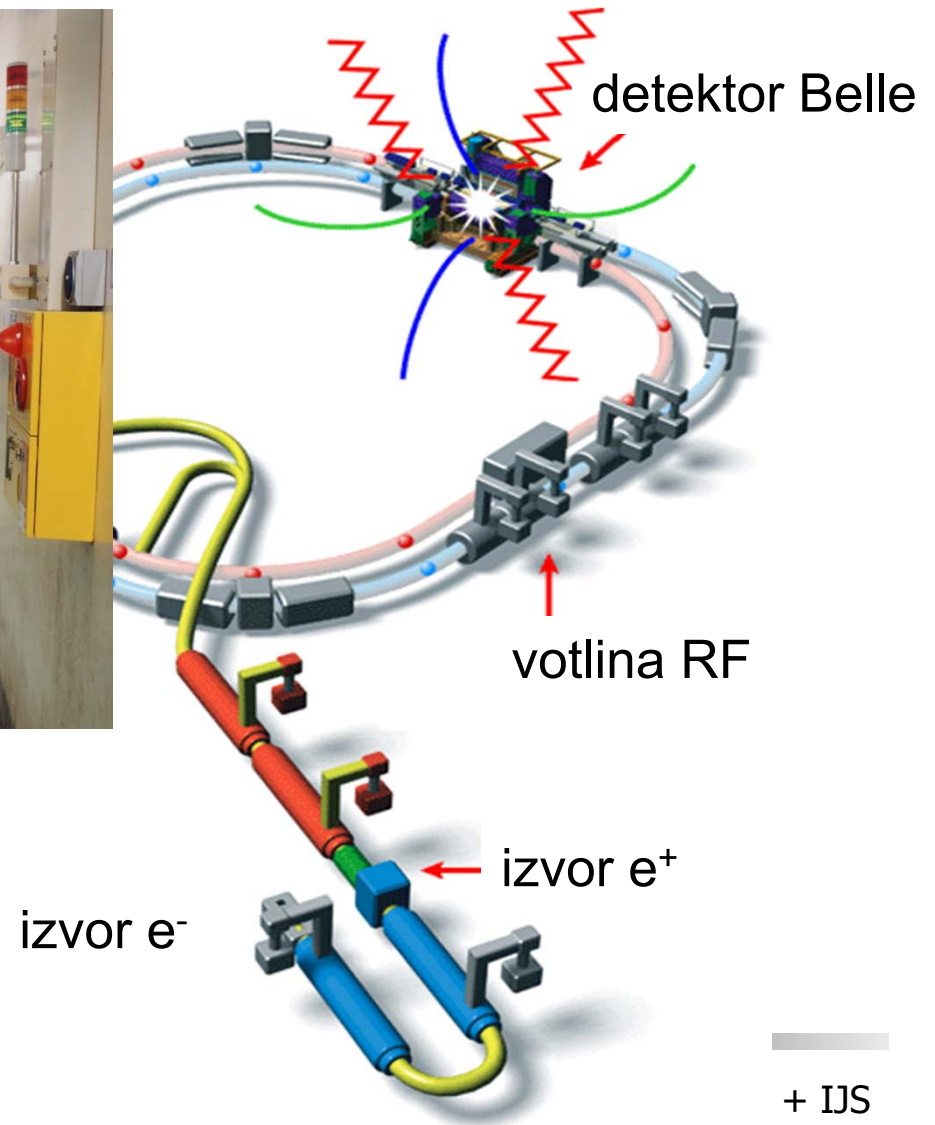
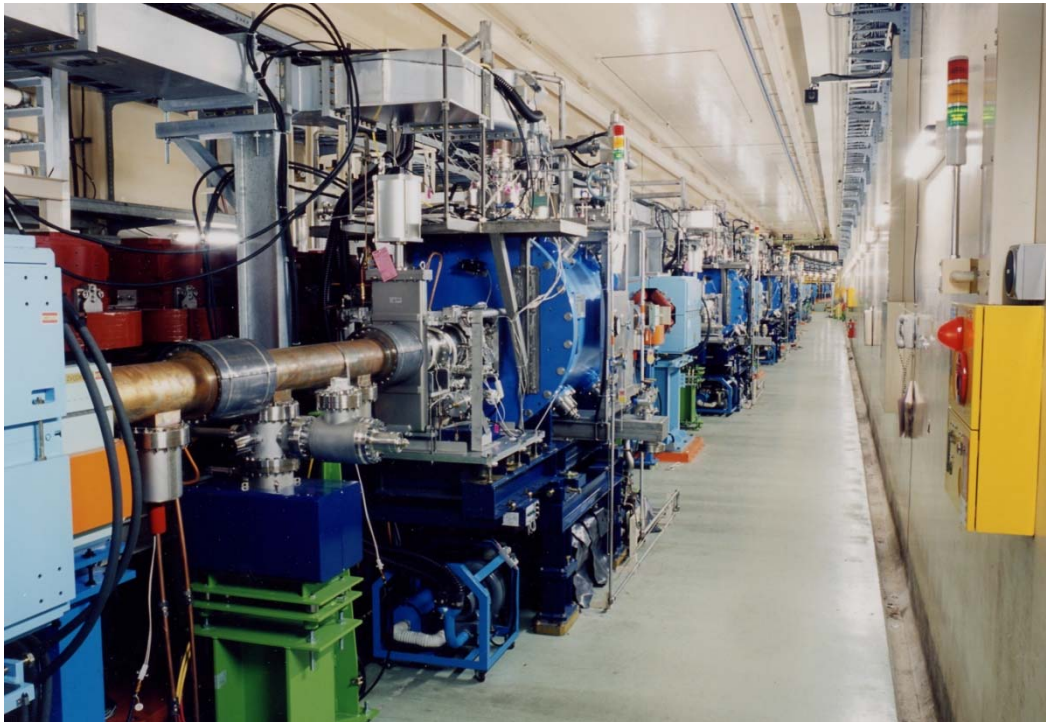
v dolgem razvoju vesolja je obstalo malo delcev in nič anti-delcev

## Eksperiment Belle:

Kako se delci razlikujejo od anti-delcev?

# Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



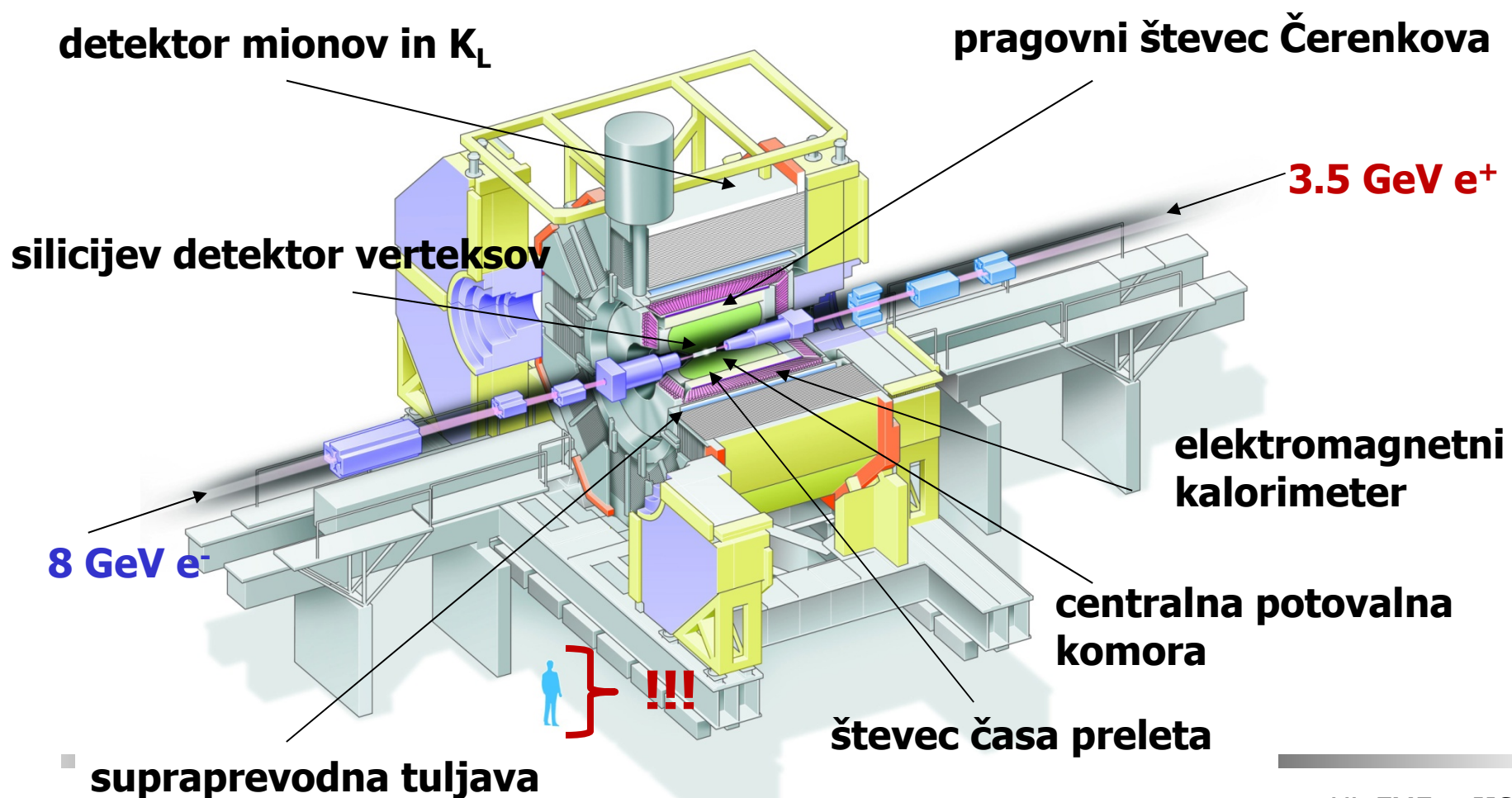
# Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



# Spektrometer Belle:

originalne tehnične rešitve in vrhunska tehnologija

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

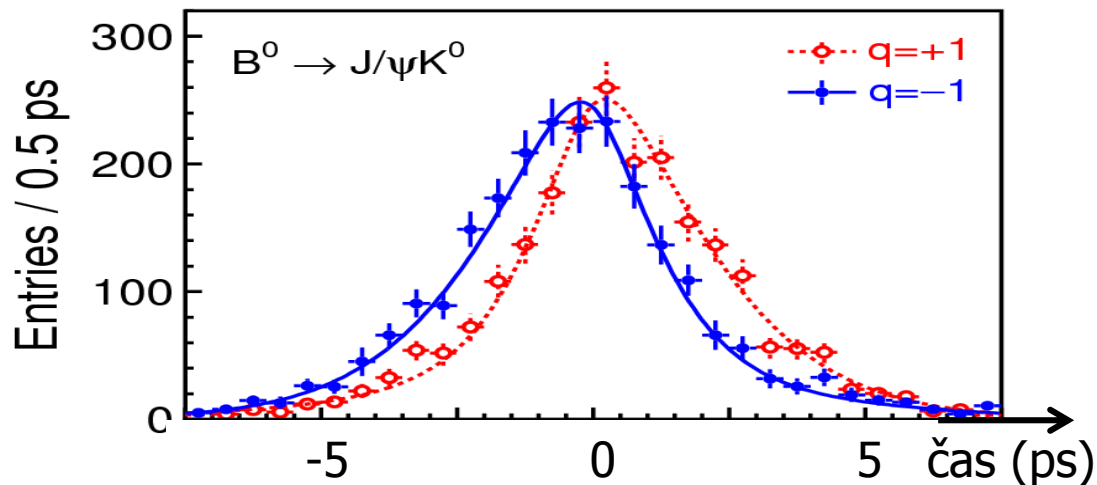




# Rezultat meritev: zmagoslavje Standardnega modela!

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, 1964:

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

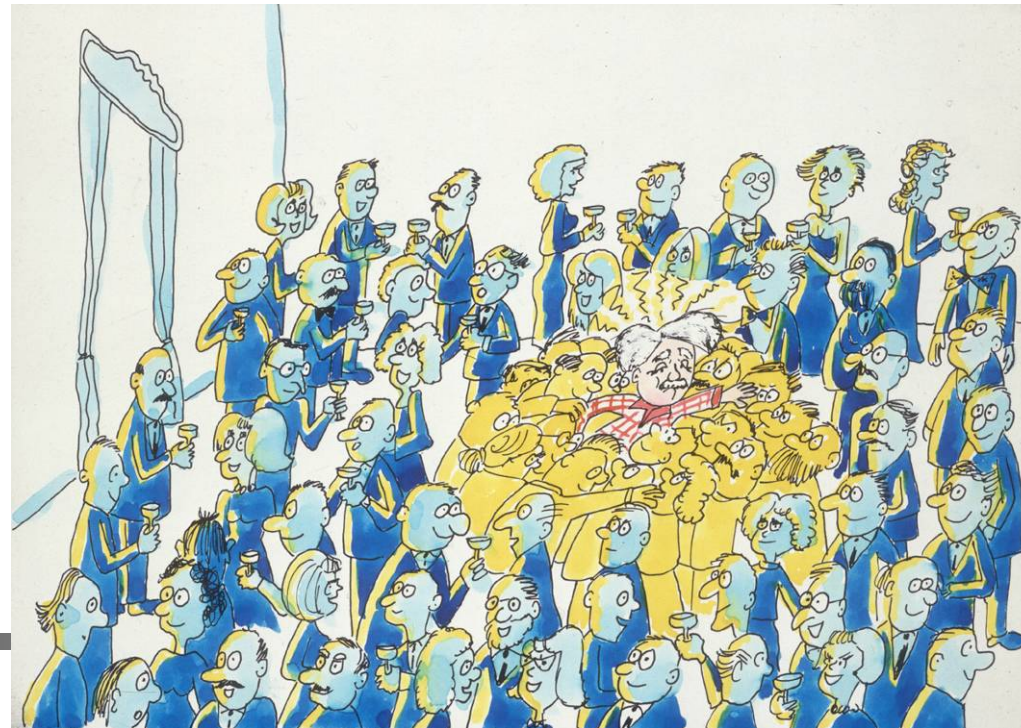
Elektromagnetno polje → nabit delec ( $e^-$ ) občuti silo  
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

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





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

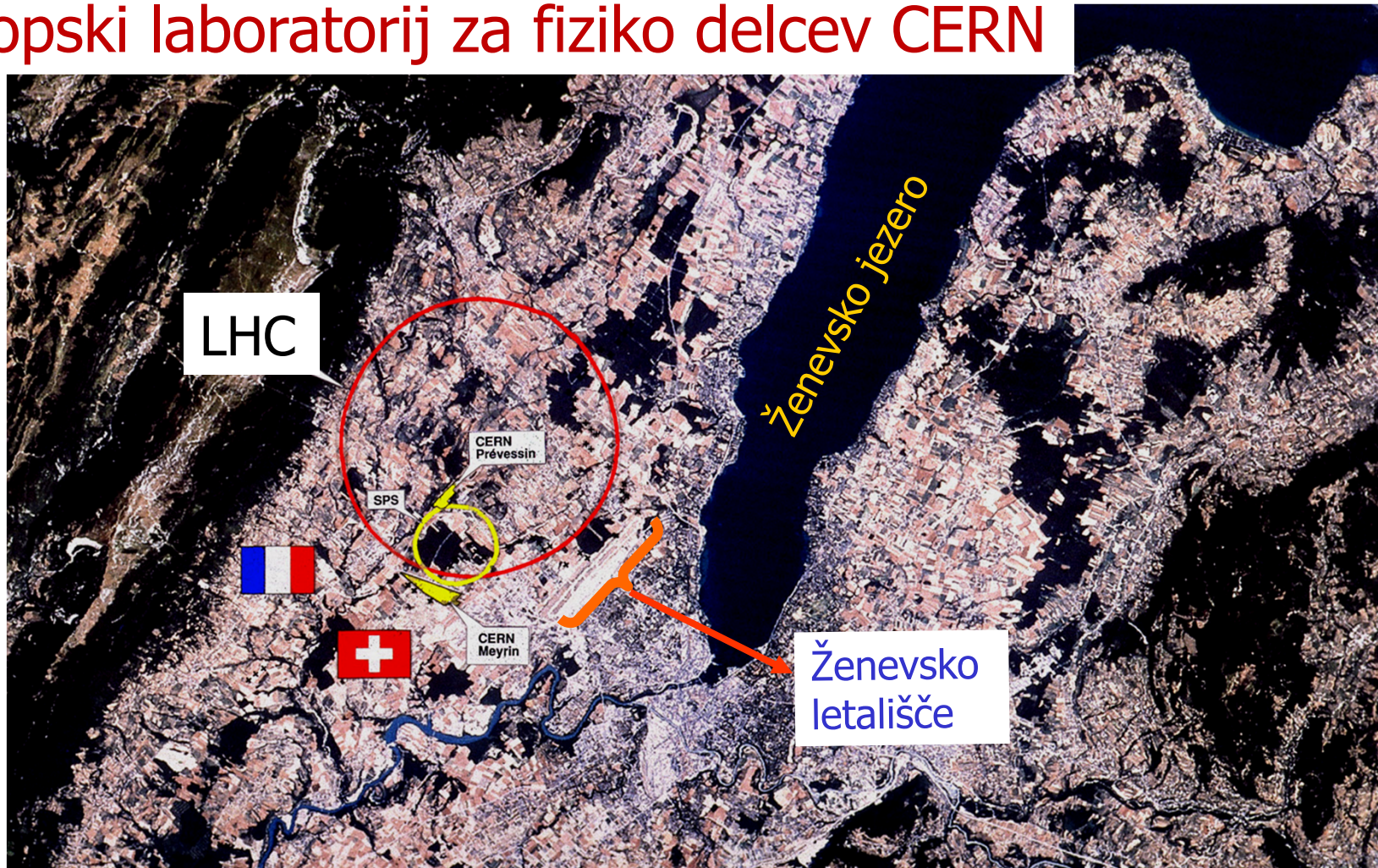
Elektromagnetno polje → nabit delec ( $e^-$ ) občuti silo  
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

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

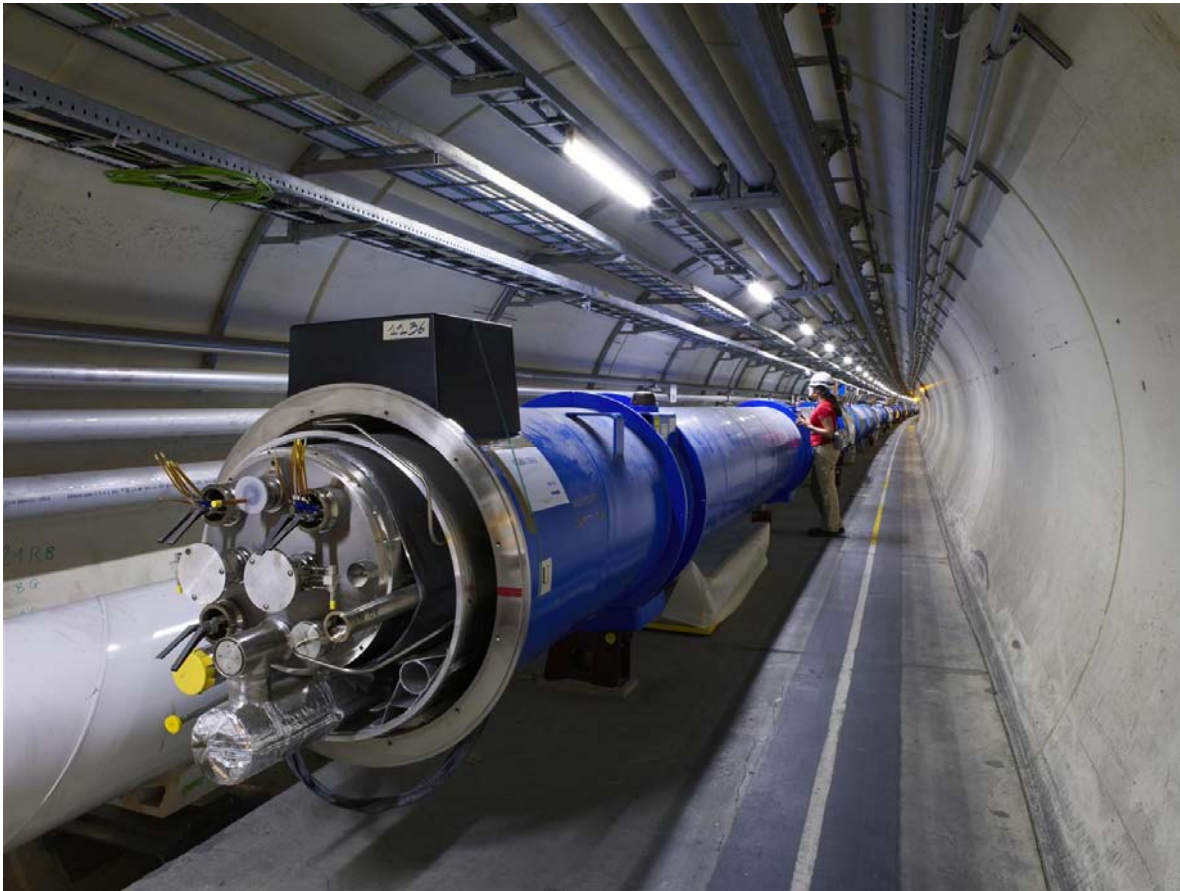
elektromagnetno polje ima svoje delce – fotone  
Higgsovo polje ima svoje delce – **Higgsove bozone**

# Na lovu za Higgsovimi delcem

## Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



LHC = Large Hadron Collider




del 27 km dolgega  
pospeševalnika

9. januar 2012

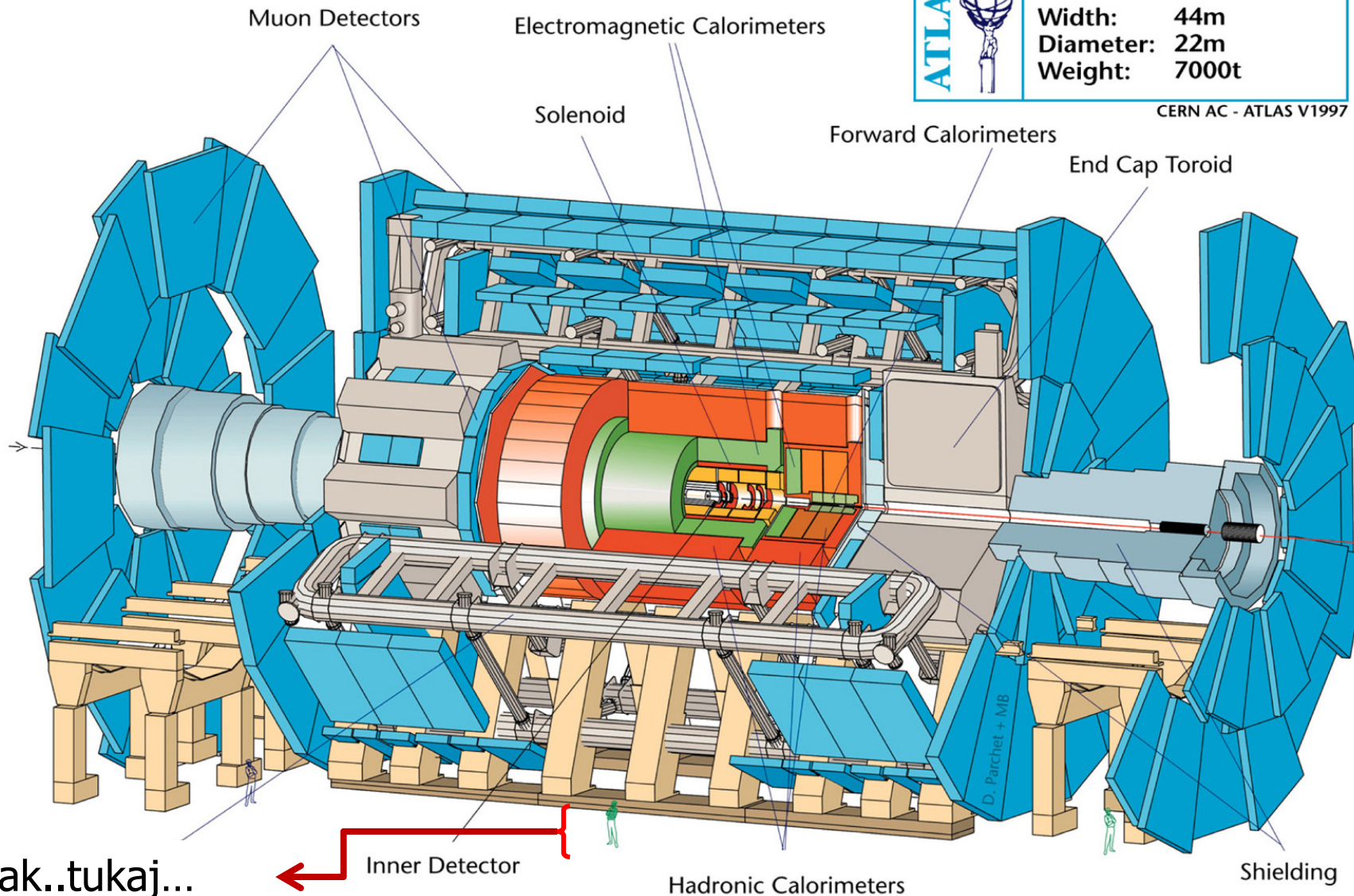


# Detektor ATLAS ob LHC



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

CERN AC - ATLAS V1997

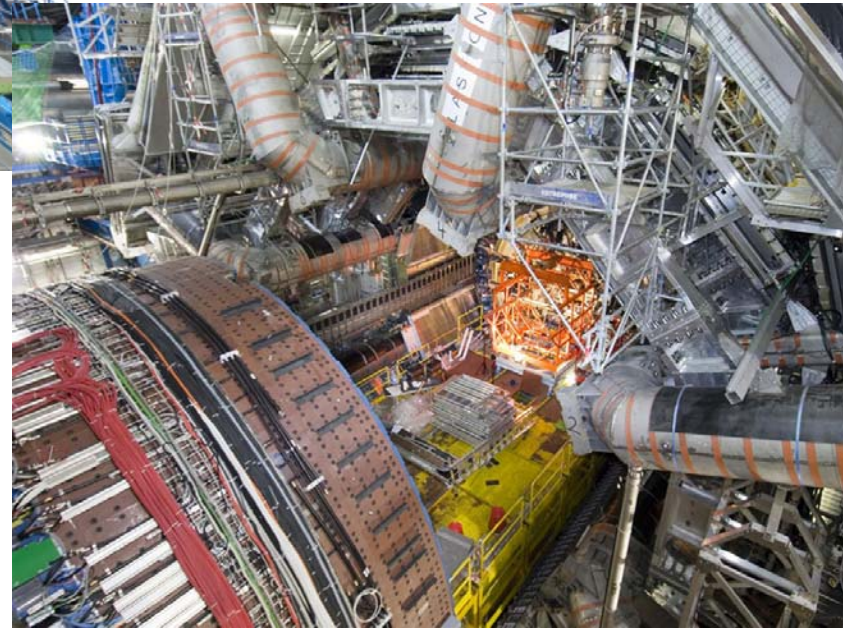
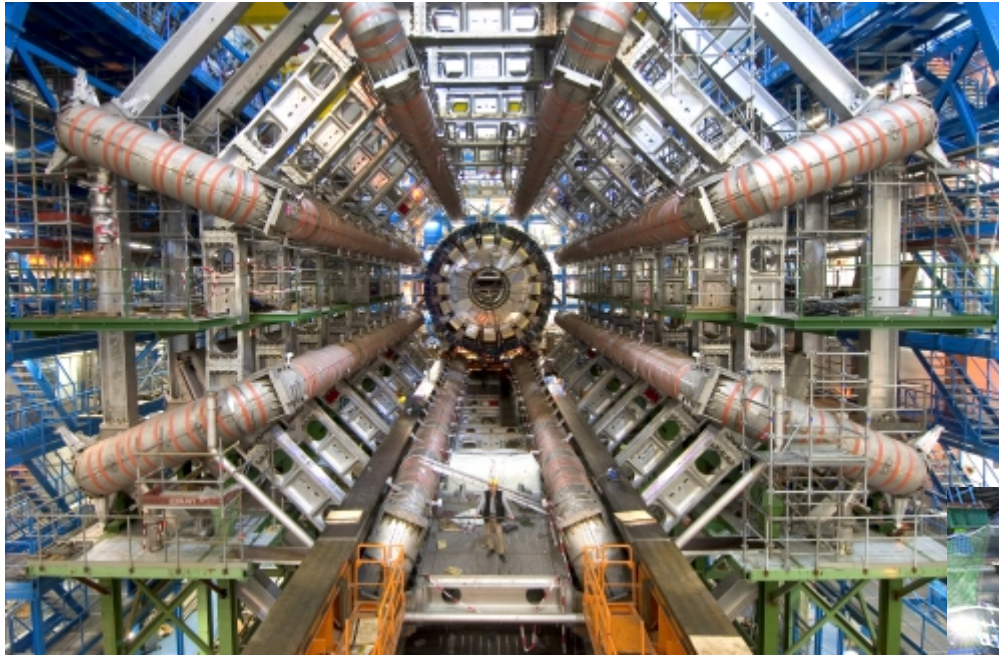


možak..tukaj...

9. januar 2012

Peter Križan, UL FMF + IJS





## detektor ATLAS med izgradnjo

9. januar 2012

Peter Križan, UL FMF + IJS



## Kontrolna soba med meritvami

9. januar 2012

Peter Križan, UL FMF + IJS

# Detektor ATLAS ob LHC

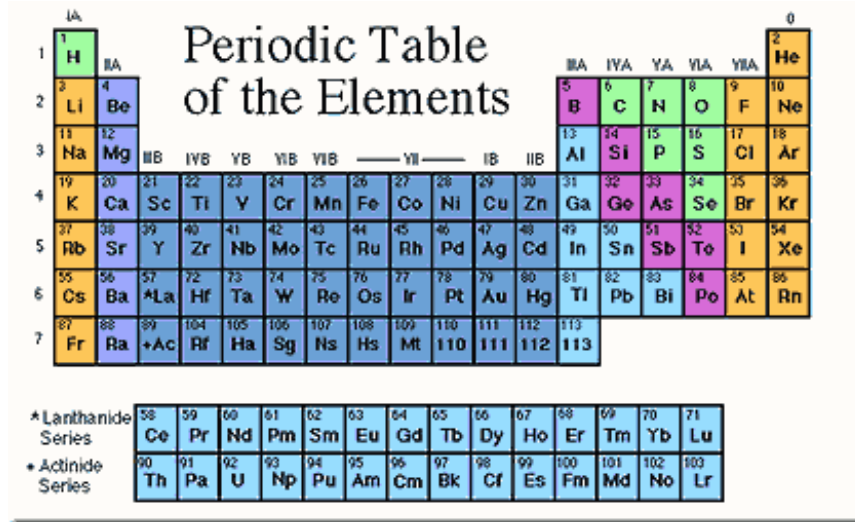
---

- Trkalnik in oba velika detektorja, ATLAS in CMS odlično delujejo od konca leta 2009
  - December 2011: objava prvih rezultatov, ki kažejo na to, da Higgsov delec najbrž res obstaja.
  - Na dokončno potrditev bo treba počakati do konca tega leta, ko bo na razpolago dovolj velik vzorec podatkov.
- 
- Prepričati se moramo, da ne gre za slučajne kombinacije delcev, v katere naj bi Higgsov delec razpadel....

# Standardni model: dokončna teorija?

12 osnovnih delcev, 3 vrste sil (gravitacija ni vključena) in Higgsov delec

→ Pravičen, a s preveč osnovnimi delci?



Periodic Table of the Elements

1	2											10					
H	He											He					
3	4											10					
Li	Be											Ne					
11	12											18					
Na	Mg											Ar					
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113					
Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113					

\* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

\* Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

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

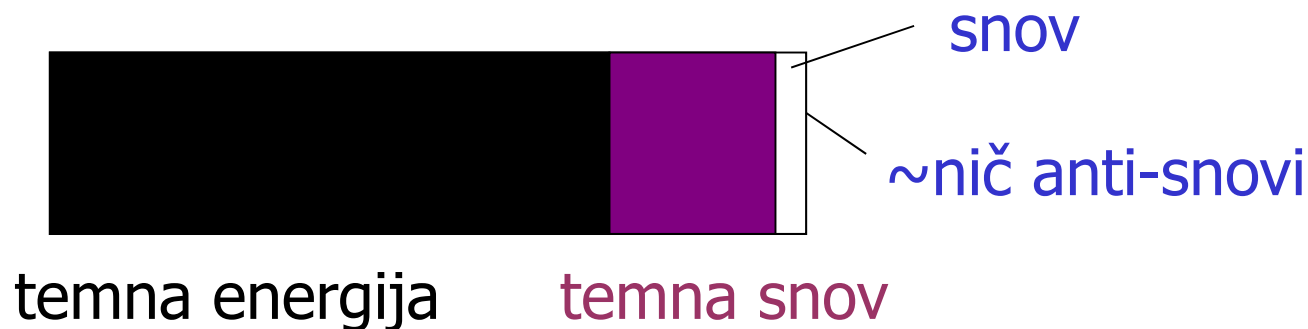
---

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...





Из эссе А. Д. Сахарова  
при большой температуре  
для Вселенной симметрия между  
но ее кривой фигуре

НАРУШЕНИЕ CP-ИНВАРИАНТНОСТИ, C-АСИММЕТРИЯ  
И БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

А. Д. Сахаров

Теория расширяющейся Вселенной, предполагающая сверхплотное начальное состояние вещества, по-видимому, исключает возможность макроскопического разделения вещества и антивещества; поэтому следует

Izmerjena kršitev simetrije med delci in antidelci je za 10 redov velikosti premajhna....



# Kako naprej?

---

- Kako je izginila vsa anti-snov?
- Ali živimo v prostor-času z več kot štirimi dimenzijami?
- Ali je Higgs samo eden? Ali obstajajo supersimetrični delci?

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

# 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 brega opazovati ladjo daleč od obale, imamo dve možnosti. Uporabimo lahko **fotoaparata z zelo močnim teleobjektivom** ali pa **zelo natančno izmerimo smer in velikost valov**.

LHC



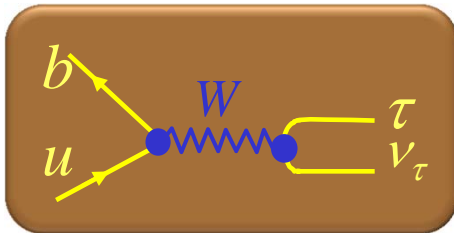
**Belle II**

9. januar 2012

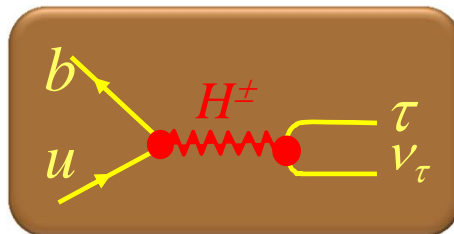
Peter Križan, UL FMF + IJS

# 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 **nabit Higgsov delec**.



Redki razpad  $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$  poteka v SM preko bozona W

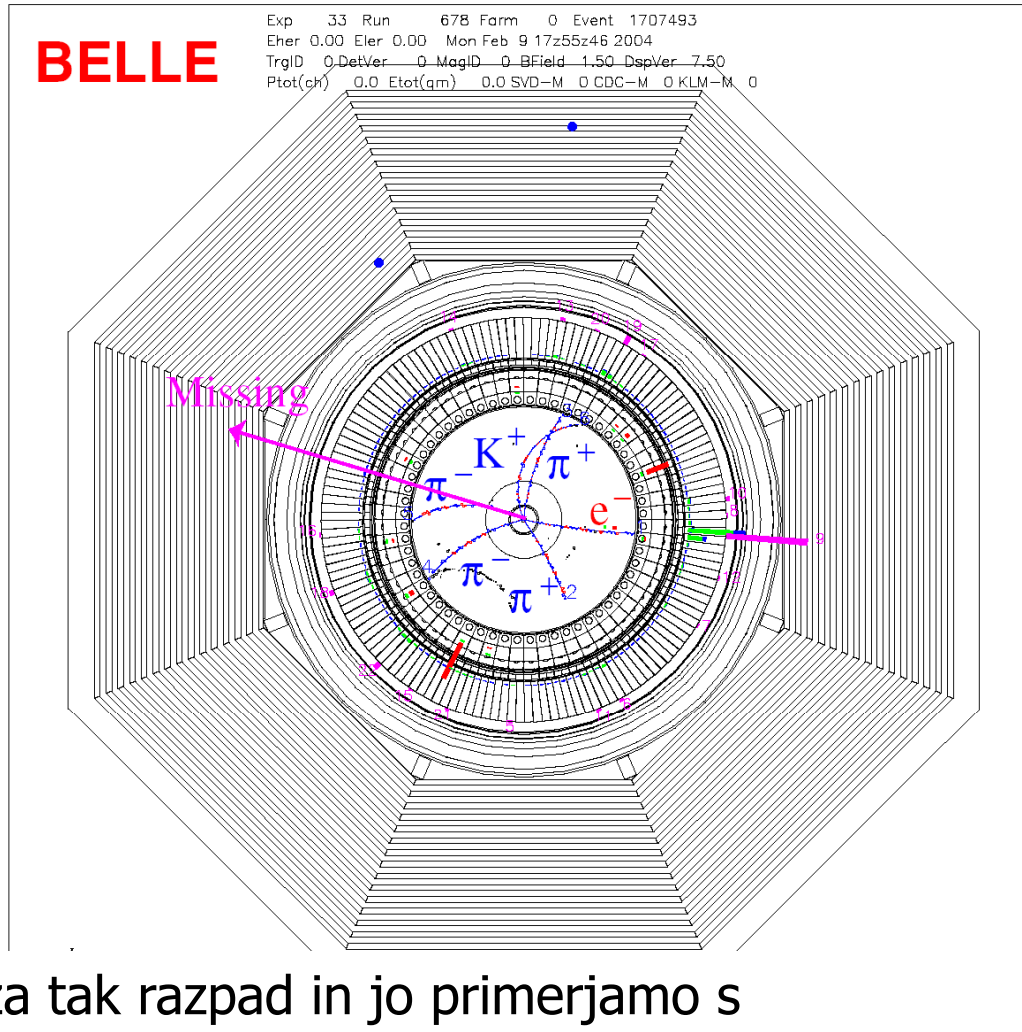


V nekaterih supersimetričnih teorijah bi lahko potekal tudi preko **nabitega Higgsovega delca**.

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

# Primer razpada $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$

$$B^+ \rightarrow D^0 \pi^+ \\ (\rightarrow K \pi^- \pi^+ \pi^-) \\ B^- \rightarrow \tau (\rightarrow e \nu \bar{\nu}) \nu$$



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

→ Lastnosti nabitega Higgisa (recimo njegova masa)

# Projekt Belle II

---

Namen:

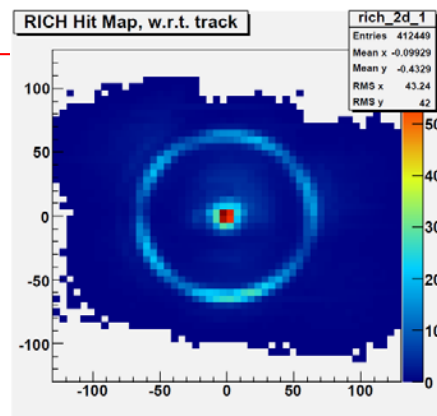
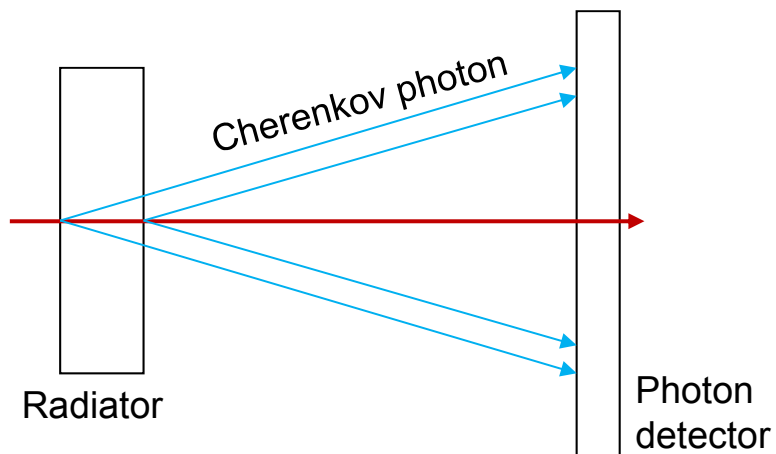
izboljšati domet meritev za 100x

– **boljši detektor** in **zmogljivejši pospeševalnik**

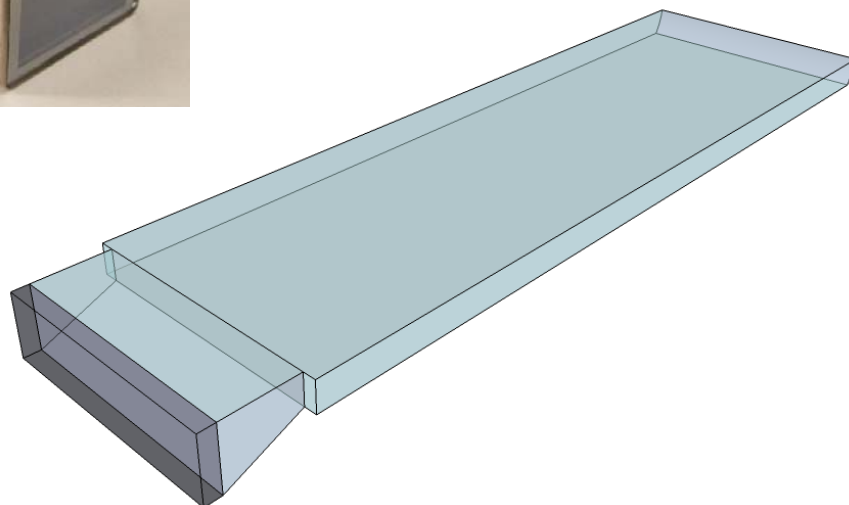
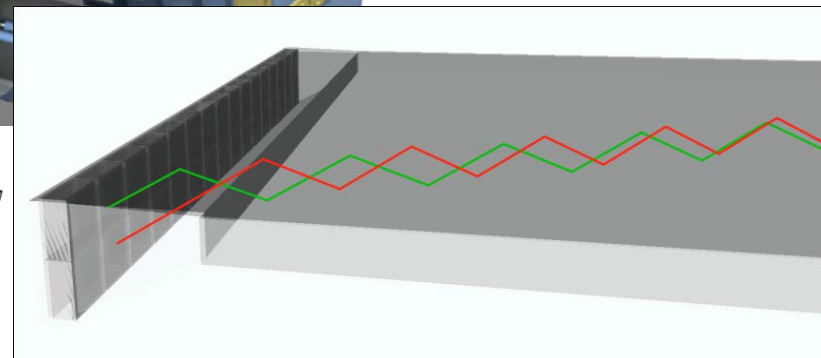
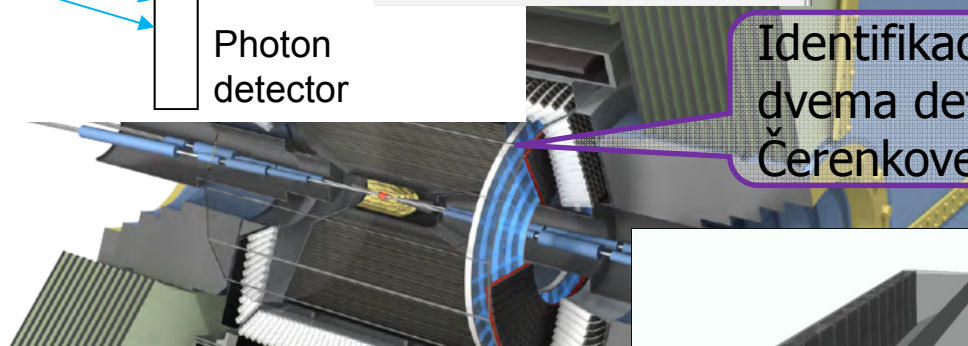
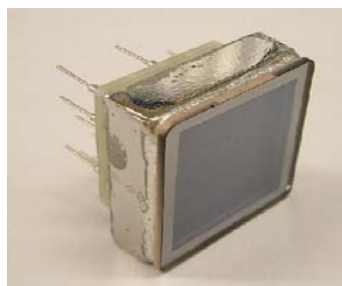
Nove meritve od leta 2015 dalje

**Slovenska raziskovalna skupina je med nosilci tega projekta, zasedamo nekaj ključnih pozicij**

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



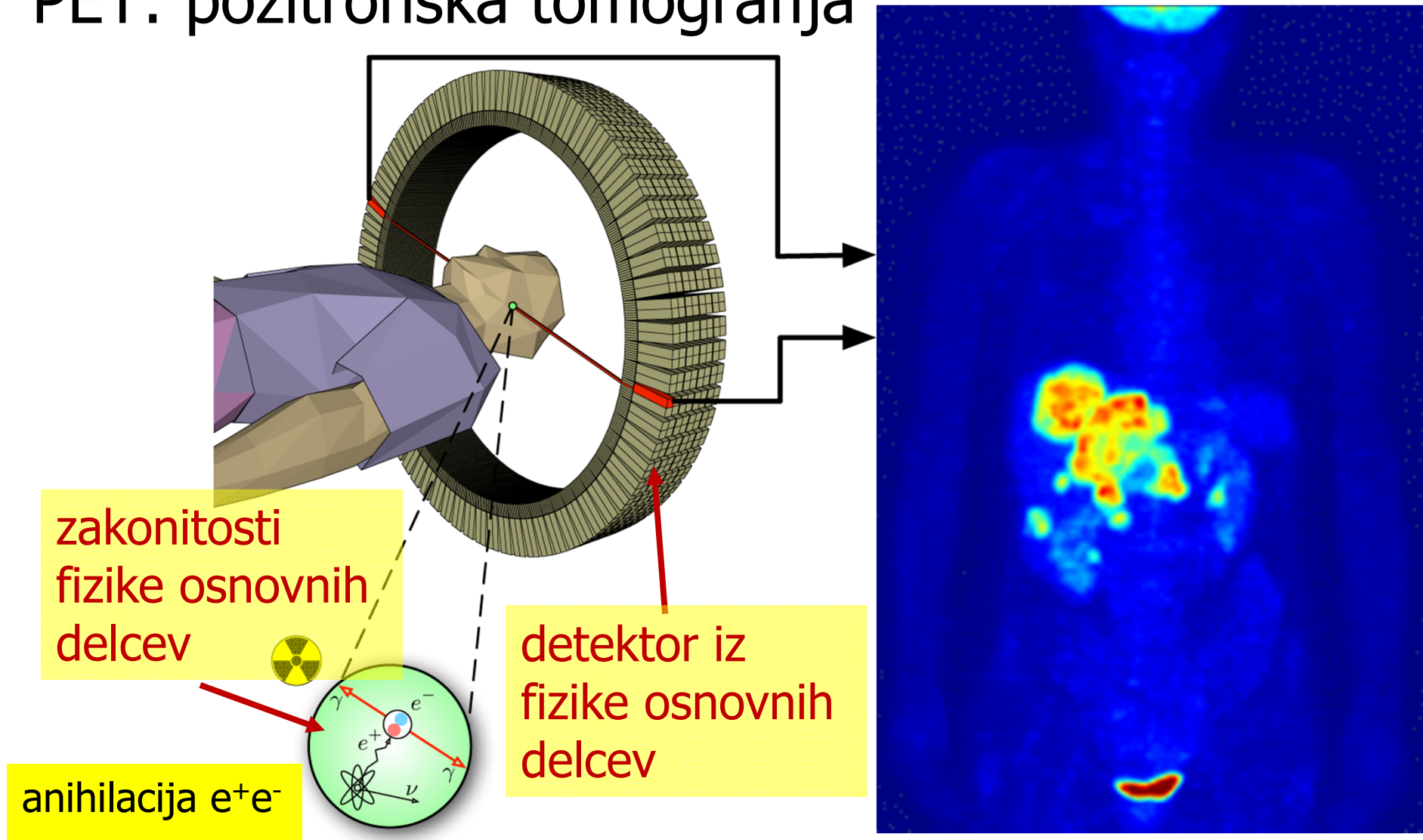
# Raziskovalna skupna Belle II



Močna raziskovalna skupina ~400 fizikov s celega sveta

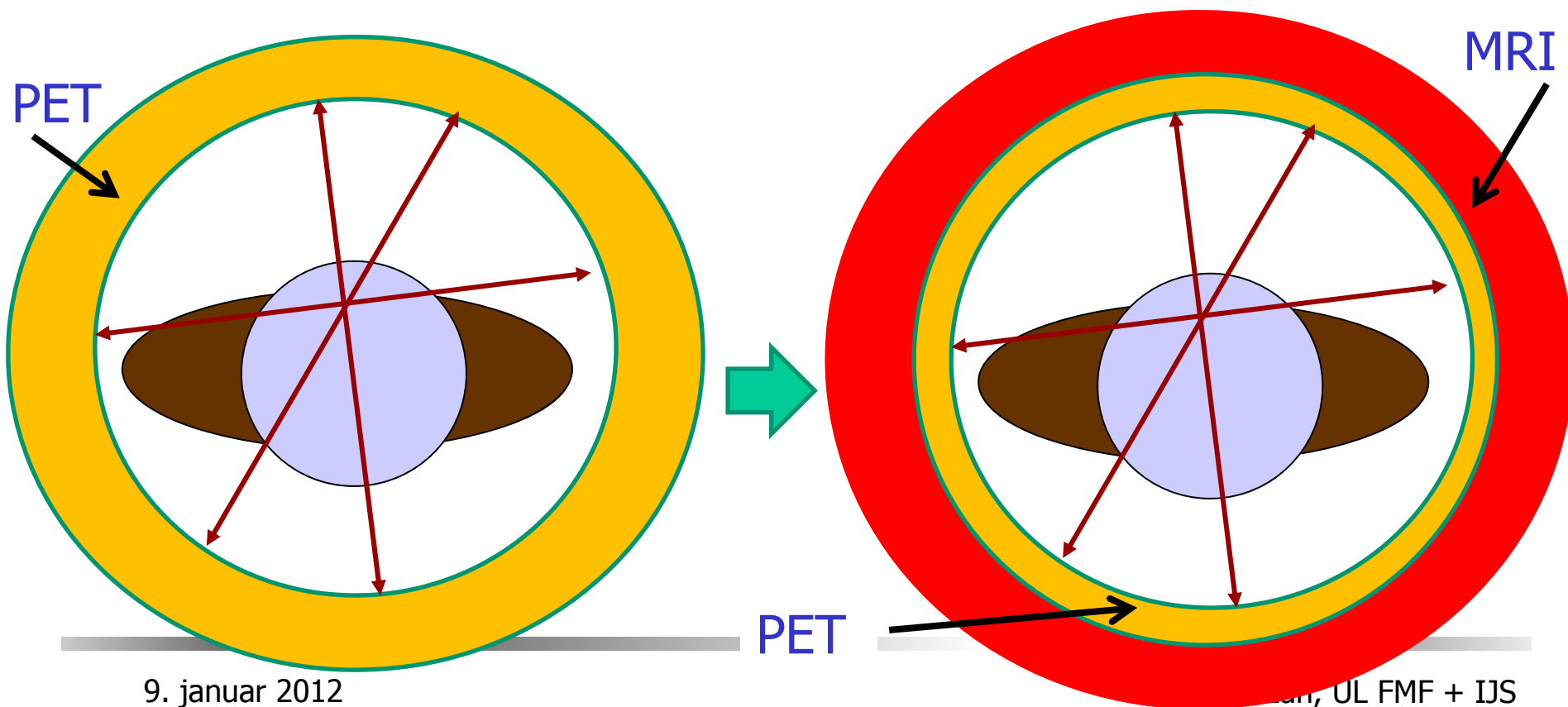
# Spin-off osnovnih raziskav – primer 1

## PET: pozitronska tomografija



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 traziškovalno 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

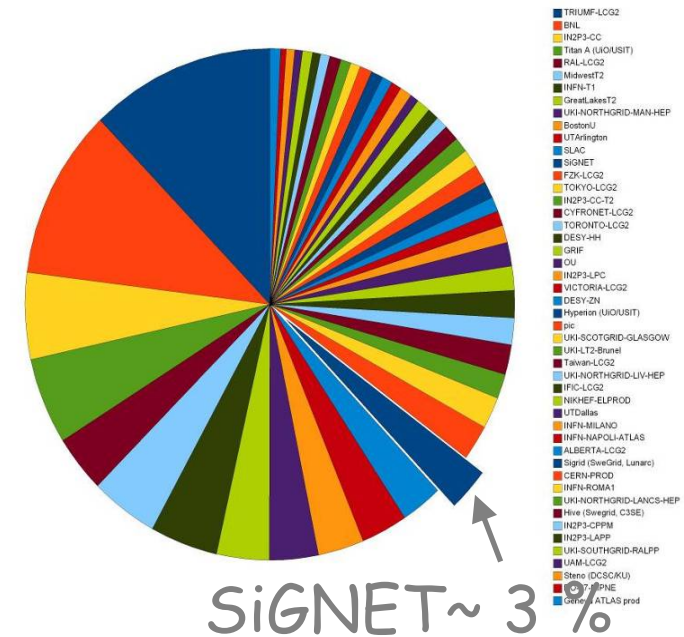
Na IJS deluje **SiGNET** (2000 procesorjev, 800 TBy), del LHC Grida in del drugih Grid aplikacij

21. januar 2012



US

ATLAS Simulation Production  
February 2007 - February 2008



# Zaključek

---

Fizika osnovnih delcev je živahna veda o svetu pri najmanjših in največjih razdaljah in je ob tem trdno zasidrana v vsakdanjem svetu.

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

Slovenski fiziki smo v prvih vrstah iskanja odgovorov na nova vprašanja, ki se postavljajo v fiziki in sorodnih interdisciplinarnih področjih.

Posredne rezultate svojih raziskav uporabljamo pri razvoju novih tehnologij, napredku v medicinskem slikanju in pri varovanju okolja.

## 2. Gimnazija in fizika osnovnih delcev

---

- Mirjam Cvetič, profesor na U. Pennsylvania, med vodilnimi teoretiki na področju teorije strun
- Peter Križan, profesor na U. v Ljubljani in raziskovalec v KEK in na IJS, vodja ene od velikih raziskovalnih skupin v fiziki osnovnih delcev
- dr. Jernej Kamenik, IJS, eden od najbolj prodornih teoretikov mlajše generacije v svetovnem merilu
- Maruša Bradač, profesor na UCSD, astrofizik, raziskuje vpliv temne snovi na razvoj galaksij
- dr. Boštjan Maček, IJS, išče Higgso pri eksperimentu ATLAS (skupina prof. M. Mikuža)
- Marko Petrič, IJS, išče odstopanja od Standardnega modela pri Belle in Belle II
- Sašo Grozdanov, U. Oxford, teorija strun

→ 2. Gimnazije ima na tem področju v svetu zelo spodobno vlogo!