

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za *matematiko in fiziko*

  
*ALUMNI 2007*

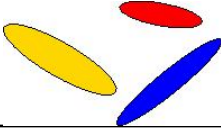
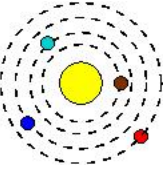
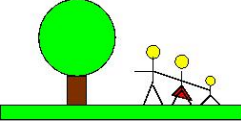
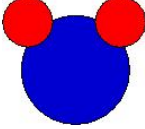
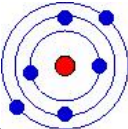
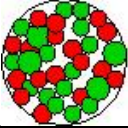
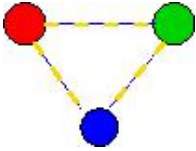



# Od supersimetrije do supermaterialov

P. Križan in R. Podgornik  
II. del

Oddelek za fiziko  
Fakultete za matematiko in fiziko  
Univerze v Ljubljani

19.5.2007

<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				kozmiolog, astrofizik, astronom
1	živa bitja		instinkti	ohranitev vrste	biolog, sociolog
$10^{-8}$	molekule		elektro- magnetna	pestrost svetlobe, življenja  energija	kemik, 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		?	?	



Univerza v Ljubljani

# Kakšen naj bo opis osnovnih gradnikov narave?

Dve zahtevi:

- **Preprost** (majhno število osnovnih gradnikov snovi)
- **Pravilen**

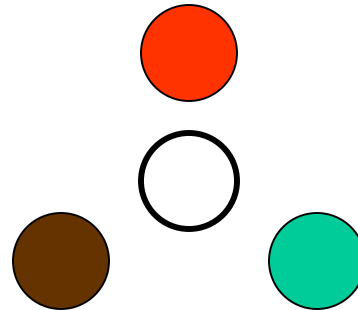


# Opis narave po Anaksimenesu

Anaksimenes iz Mileta:

Narava je sestavljena iz štirih elementov:

- zrak
- zemlja
- voda
- ogenj



→ Preprost, a napačen...



# Opis narave po D.I. Medeljejevu

## Periodni sistem elementov:

	1A																		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...



Univerza v Ljubljani

# Opis osnovnih gradnikov narave danes

## Osnovni delci

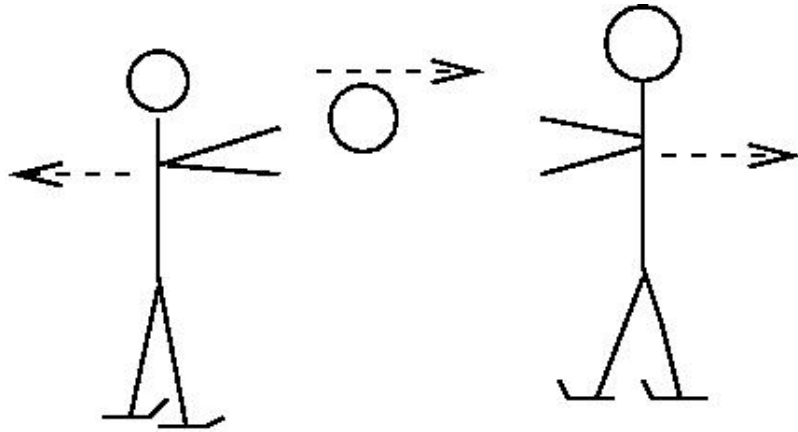
### Sile (interakcije) med njimi

- gravitacija
- elektromagnetna interakcija
- šibka interakcija (razpad beta)
- močna interakcija (veže kvarke v jedru)



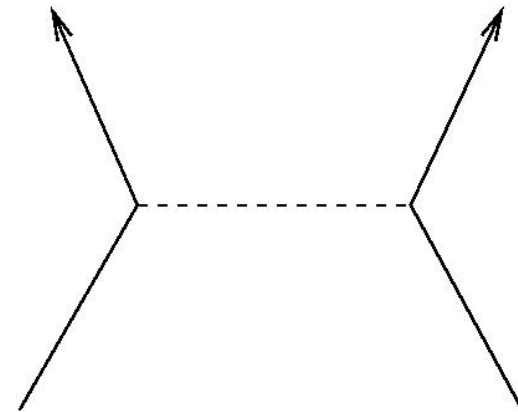
Univerza v Ljubljani

# Sile med osnovnimi delci: izmenjava nosilcev sile



Drstalca 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 1

<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





## Standardni model 2

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 ima delec svoj anti-delec:

Kvarku  $u$  ustreza anti-kvark  $\bar{u}$

Elektronu  $e^-$  ustreza pozitron  $e^+$



# Barioni in mezoni: vezana stanja kvarkov in antikvarkov

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 $\bar{b}$	$5.5 m_p$



# Odprta vprašanja fizike osnovnih delcev (in kozmologije)

- Zakaj je v vesolju predvsem snov, anti-snovi pa je le za vzorec?  
→ meritev kršitve simetrije CP med delci in anti-delci
- Odkod imajo delci maso?  
→ iskanje Higgsovega bozona
- Zakaj imajo delci različne mase, zakaj je več generacij?  
→ iskanje supersimetričnih partnerjev in njihovih interakcij

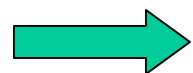


# Simetrija CP

Simetrijska operacija CP: pretvori delec v anti-delec

Če se delec in anti-delec ne obnašata vedno enako – torej če na primer različno razpadata, je to kršitev simetrije CP.

Ker je bilo ob nastanka vesolje sestavljeno iz enakega števila delcev in anti-delcev, danes pa je sestavljeno skoraj izključno iz snovi (=delcev), in ne iz anti-snovi, je ta simetrija očitno kršena!



Zelo pomembno: razumeti kako in zakaj je ta simetrija kršena.



## Meritev kršitve simetrije CP pri mezonih B

Kako izmeriti kršitev CP pri mezonih B?

Najprej jih moramo **ustvariti**: uporabimo reakcijo pri trku elektrona in pozitrona z dovolj veliko energijo:  $e^- e^+ \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

Nato izberemo primeren **tip razpada**:  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ ,  
razpadna produkta pa naprej razpadeta

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

$$K_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

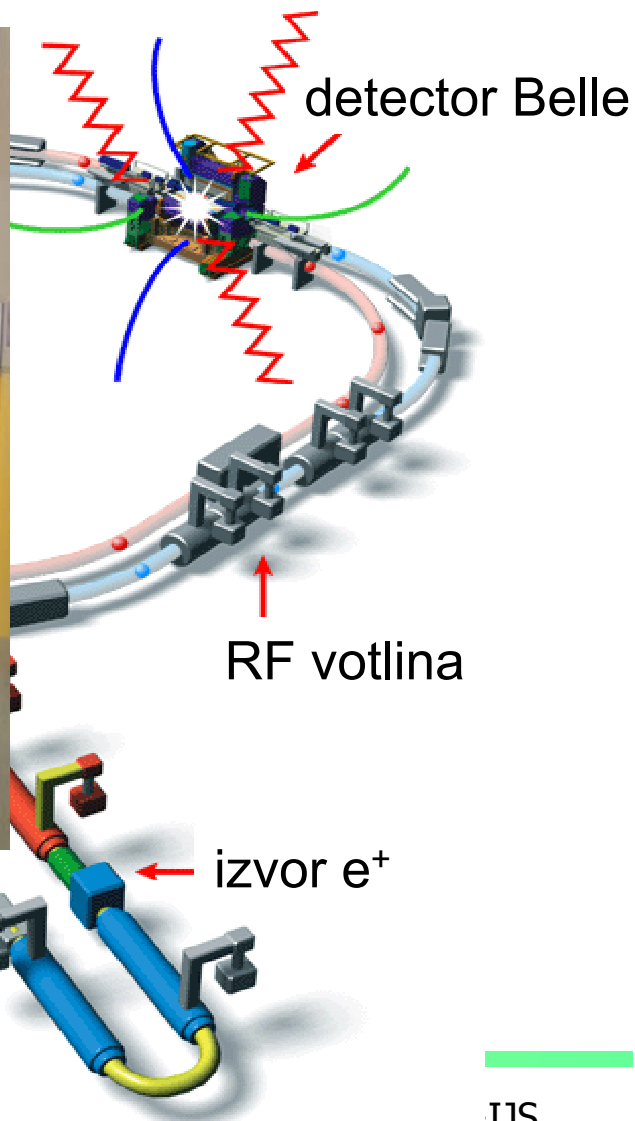
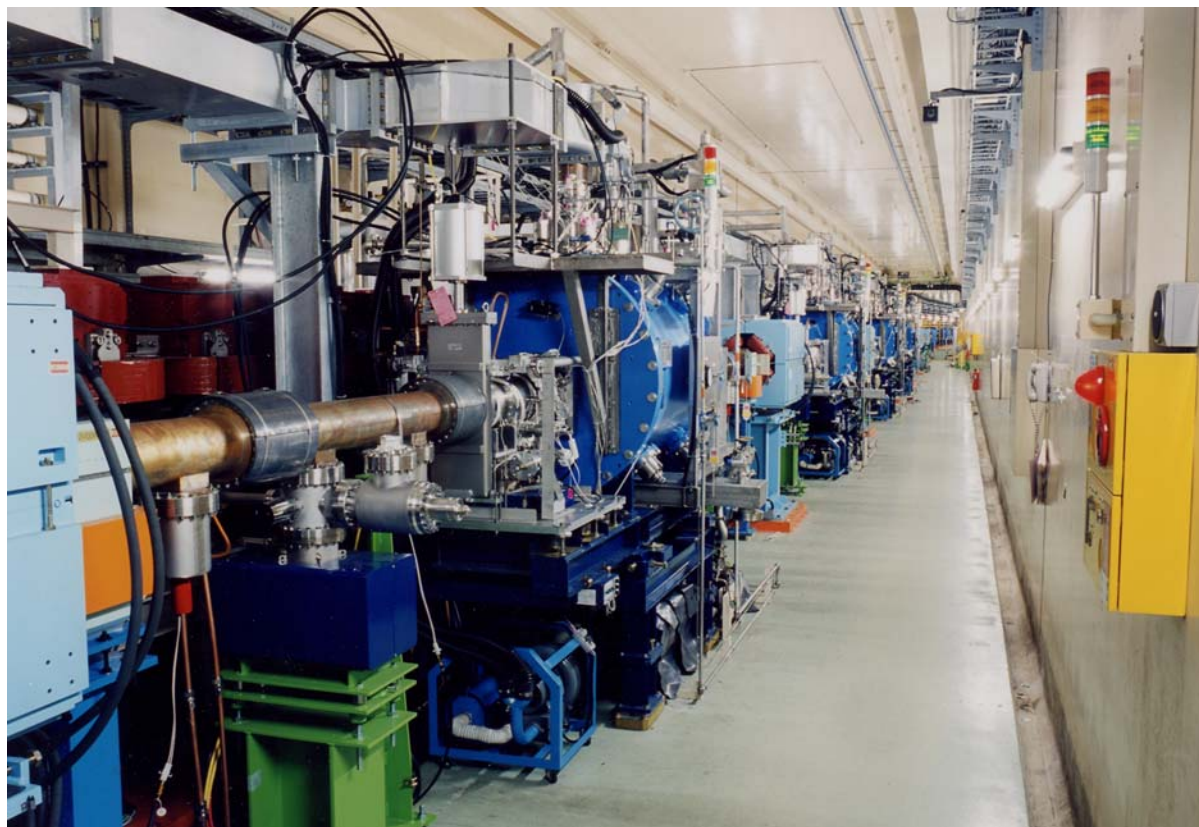
Izmerimo moramo, **kje** se je to zgodilo, in ugotoviti, ali je v končno stanje  $J/\psi K_S$  razpadel  $B^0$  ali njegov **anti-delec**  $\bar{B}^0$ .



Univerza v Ljubljani

# Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



19. maj 2007

IJS



Univerza v Ljubljani

# Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



19. maj 2007

Alumni2007

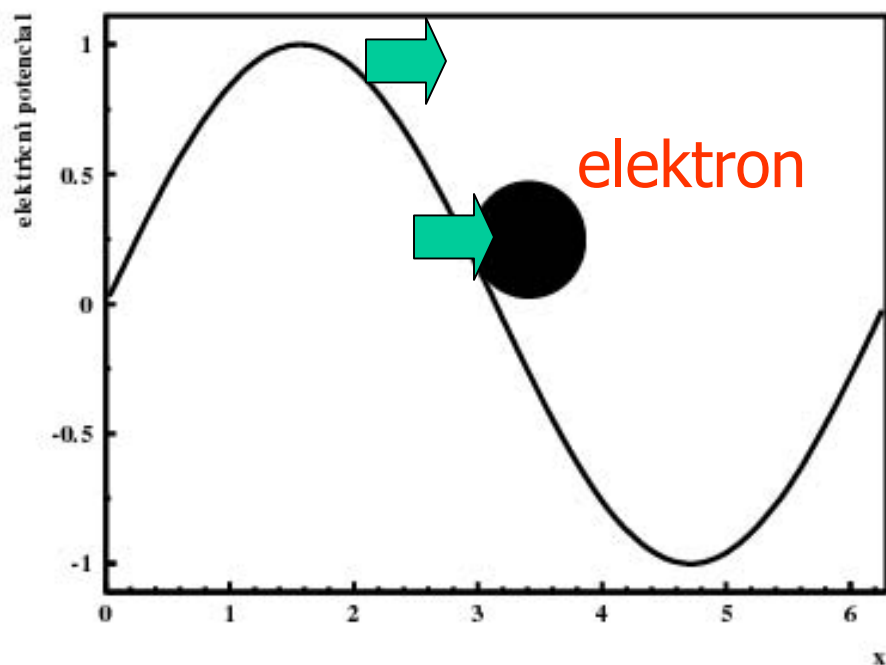
Peter Križan, FMF+IJS



# Kako pospešujemo nabite delce?

Univerza v Ljubljani

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



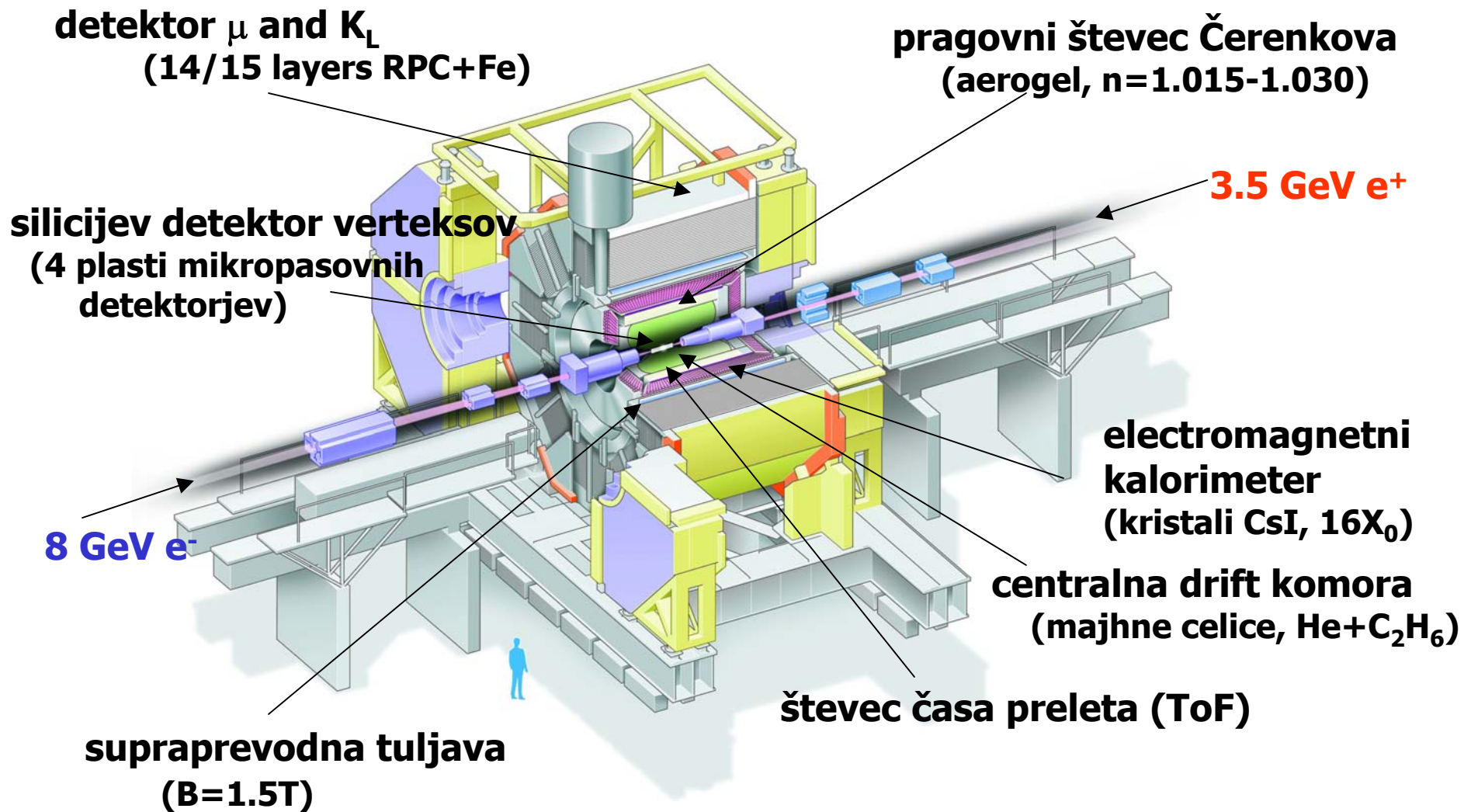
... podobno deskanju na valovih





Univerza v Ljubljani

# Spektrometer Belle





Univerza v Ljubljani

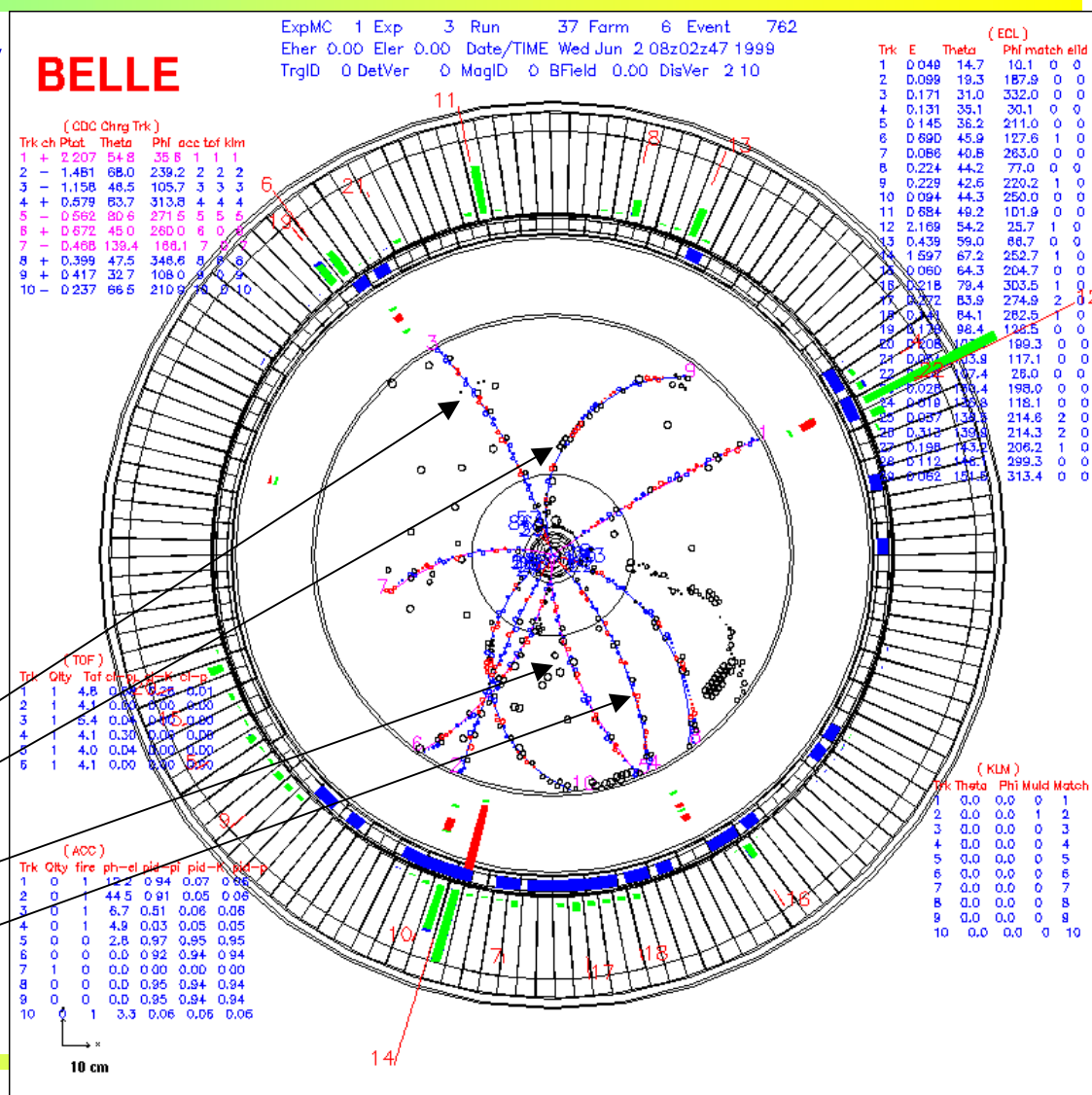
# Kaj izmerimo z detektorjem?

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

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

$$K_S \rightarrow \pi^- \pi^+$$

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



19. maj 2007

Alumni2007

Peter Krizan, FMF+IJS



# Detektor verteksov (točke razpada)

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





## Spektrometer Belle in del raziskovalne skupine



Po nekaj letih trdega dela, priprav detektorja in  
pospeševalnika, in po dolgotrajnih meritvah z njima →



Univerza v Ljubljani

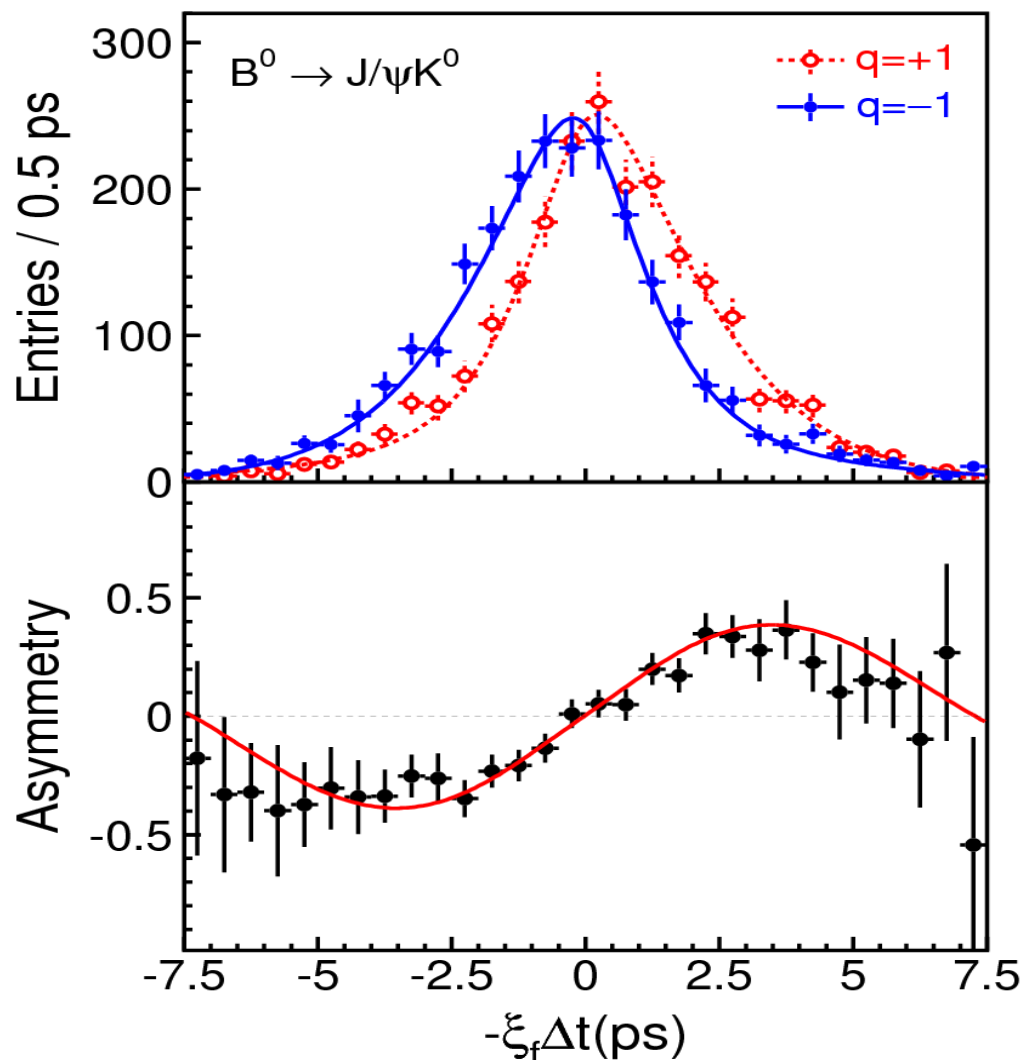
# Rezultat meritve: simetrija CP je kršena!

Razlika med delci in antidelci:

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

Relativna razlika med obema porazdelitvama



Zmagoslavje Standardnega modela!

Peter Križan, FMF+IJS



# Izvor mase v Standardnem modelu

Standardni model je zelo natančno preverjena teorija.

Manjkajoči člen, edini delec, ki ga Standardni model napoveduje, nam pa ga še ni uspelo odkriti:

→ Higgsov bozon

Higgsov bozon je odgovoren za maso: masa delca je odvisna od tega, kako močno je sklopljen s Higgsovim delcem.

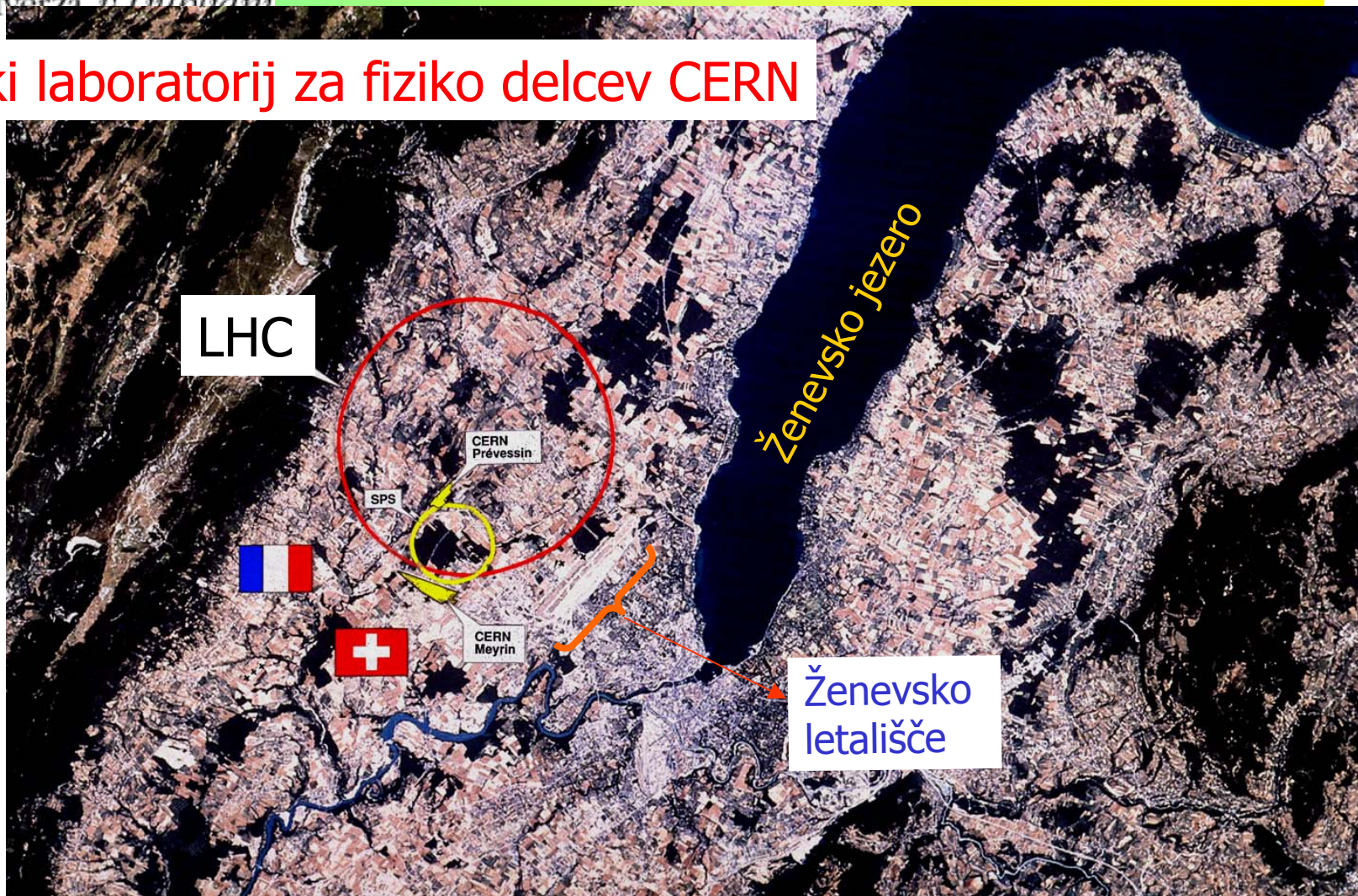
Zelo masiven:  $m_{\text{Higgs}} > 120 m_p$



Univerza v Ljubljani

# Na lovu za Higgsovimi delcem


## Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



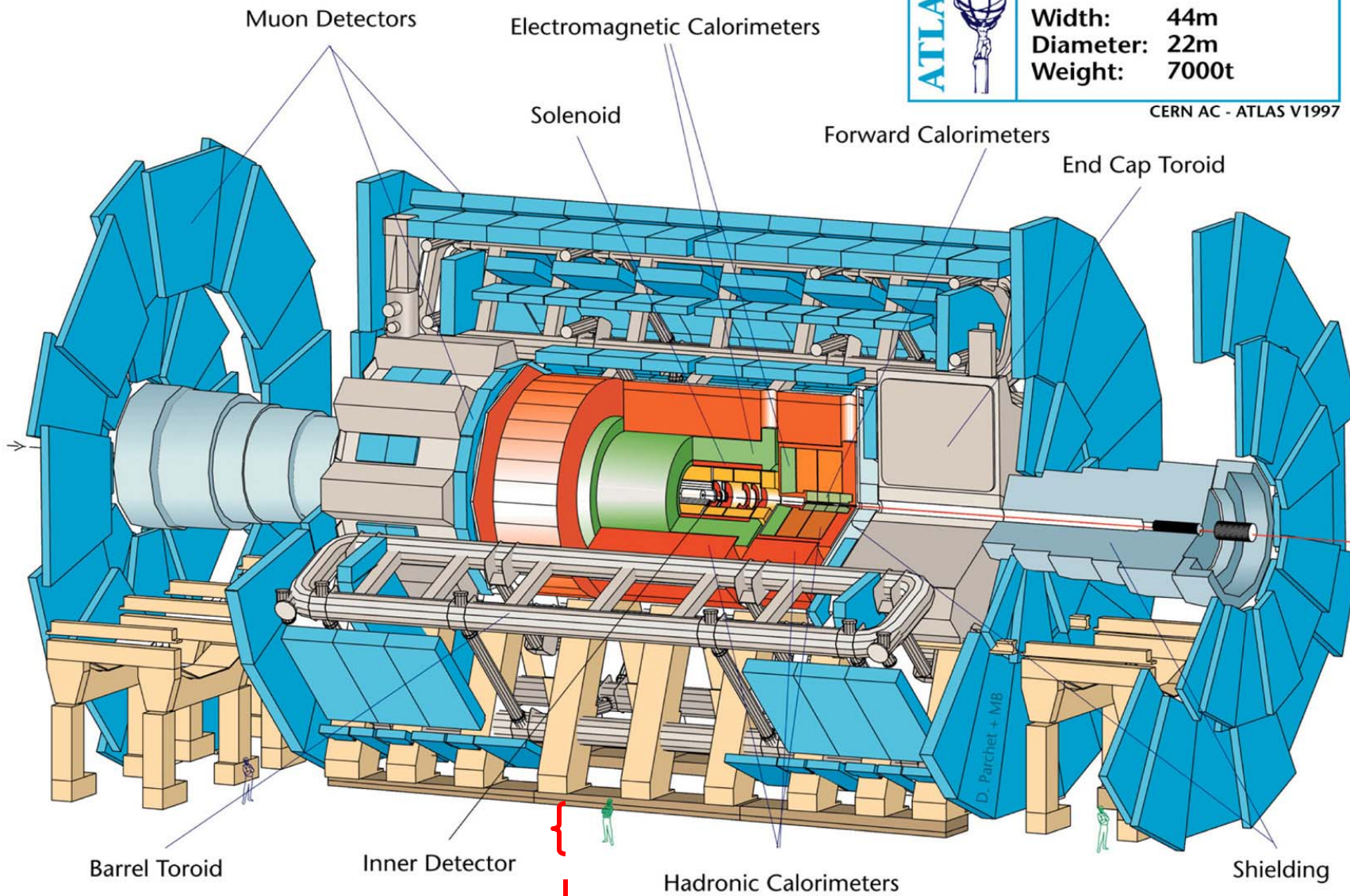
LHC = large hadron collider



# Detektor ATLAS ob LHC – v pripravi

<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...**

17. maja 2007

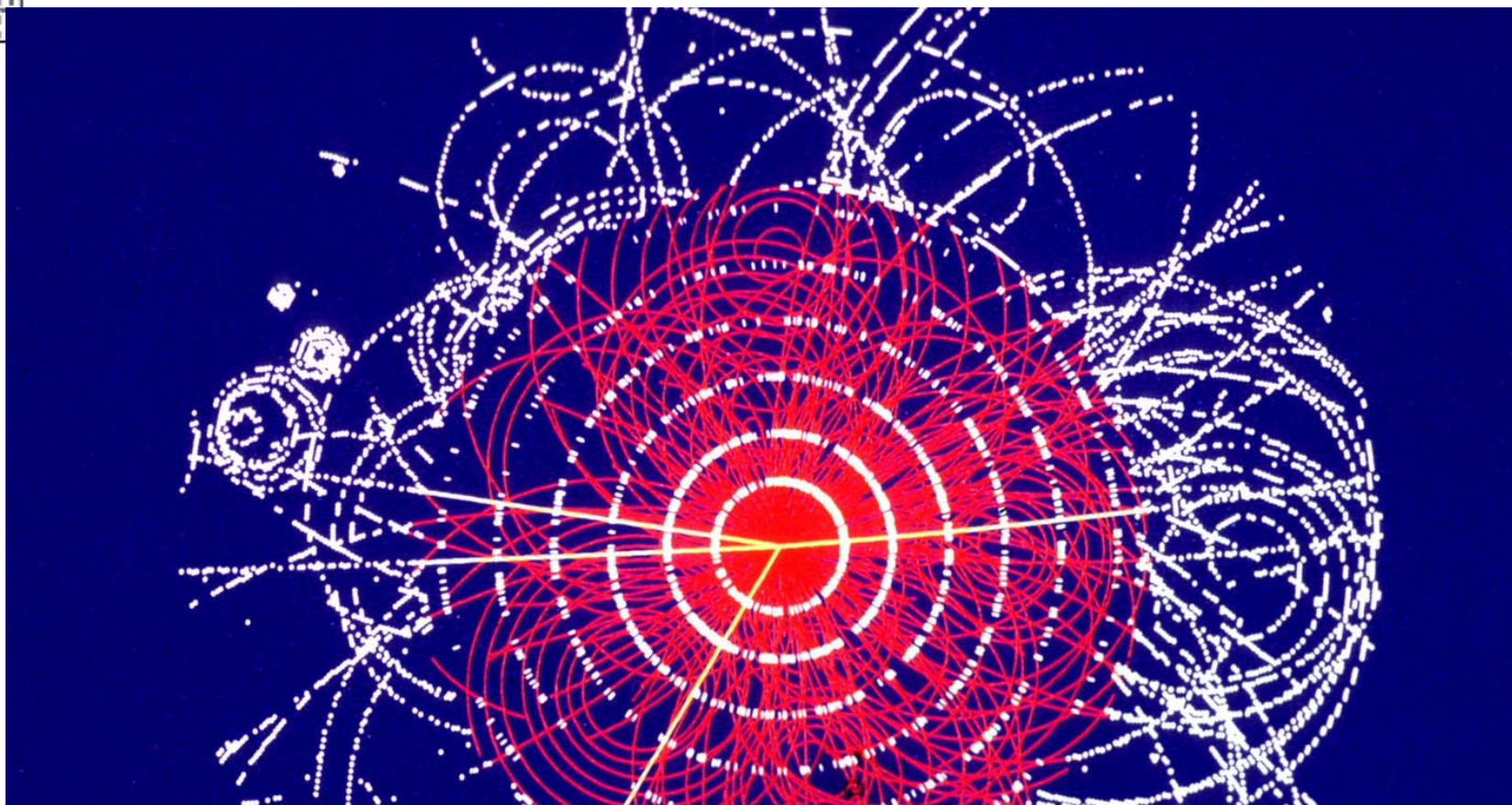
Alumni2007

Peter Križan, FMF+IJS





## Računalniška simulacija: $H \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ (ATLAS)



- Trkalnik je že skoraj pripravljen
- Oba velika detektorja (ATLAS, CMS) pospešeno sestavljajo
- Prvi trki naslednje leto
- V pričakovanju velikih presenečenj...



# Standardni model: dokončna teorija?

Standardni model:

- 12 osnovnih delcev
- 3 vrste interakcij, 1+3+8 nosilcev sile
- delec, ki poskrbi za maso vseh ostalih (Higgs)

→Pravilen, a s preveč osnovnimi delci?

Poleg tega...

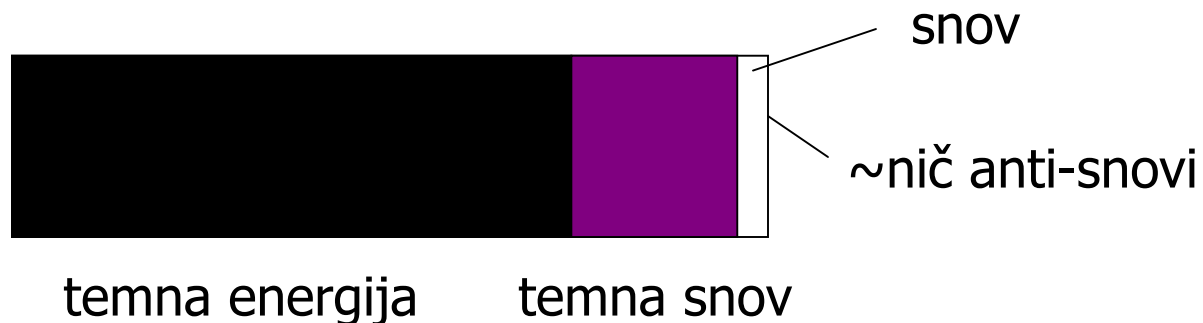


Univerza v Ljubljani

# Standardni model ni dokončna teorija

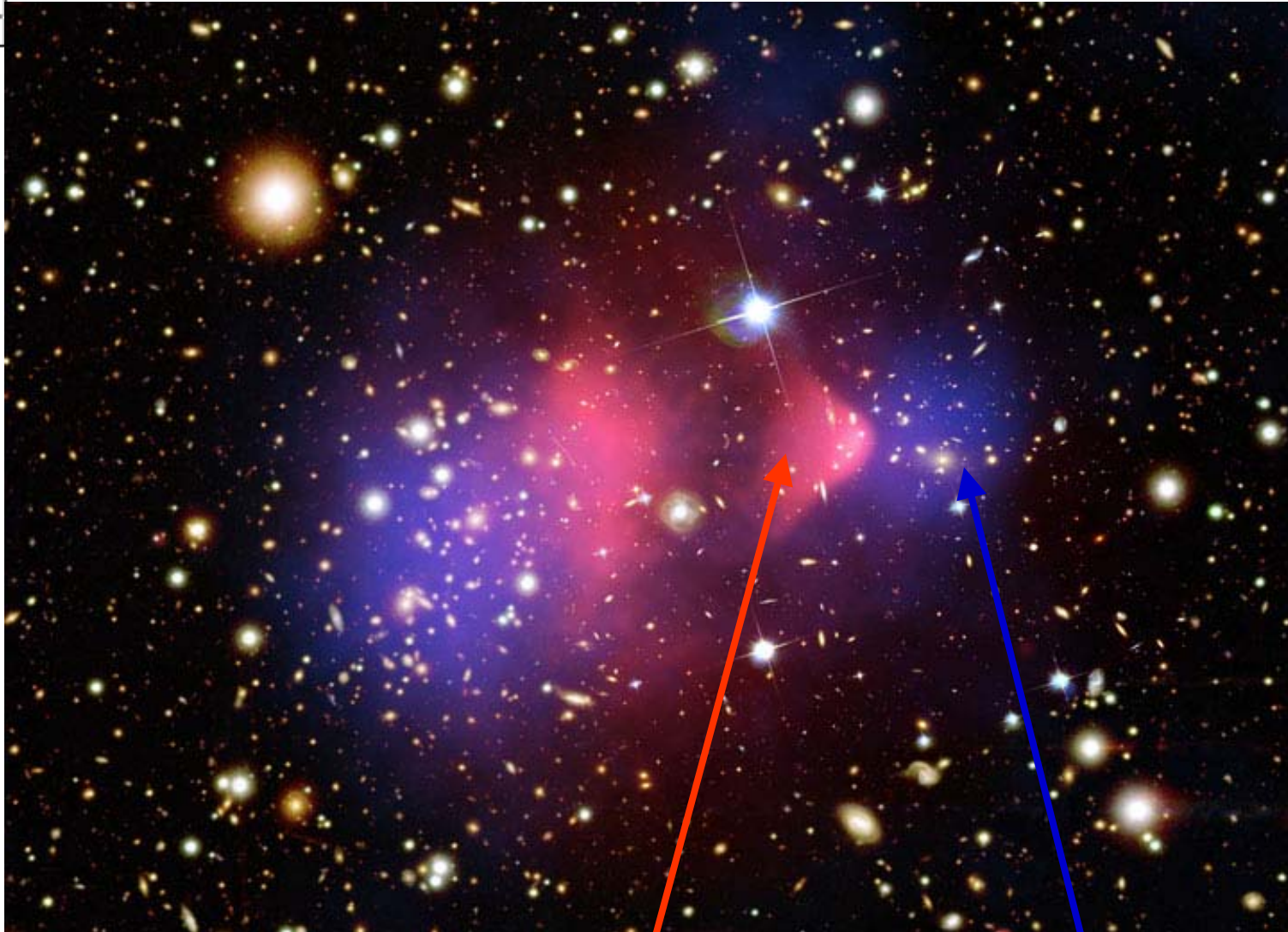
... poleg tega:

- Nevtrini imajo (majhno) maso
- Izmerjena kršitev CP je premajhna, da bi pojasnila asimetrijo med snovjo in anti-snovjo v vesolju
- Gravitacija še ni vključena
- Večina vesolja je iz nam neznane snovi....





# Direktni dokaz za obstoj temne snovi



Po trku dveh gruč galaksij se **običajna materija** upočasni, **temna snov** pa ne.



Univerza v Ljubljani

# Standardni model ni dokončna teorija

Ena od možnosti: **supersimetrija**. V tej teoriji vsakemu delcu in nosilcu sile ustreza **supersimetrični partner**.

elektron  $e$       selektron  $\tilde{e}$

kvark  $b$       skvark  $\tilde{b}$

foton  $\gamma$       fotino  $\tilde{\gamma}$

Do sedaj nismo videli še nobenega supersimetričnega partnerja...



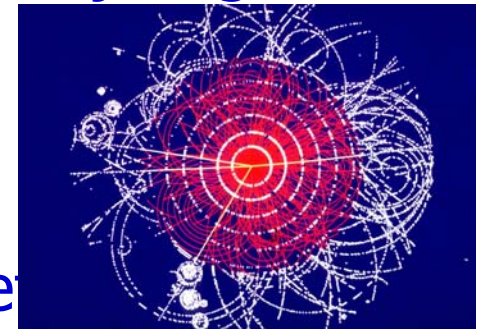
# Iskanje fizike izven Standardnega modela

Univerza v Ljubljani

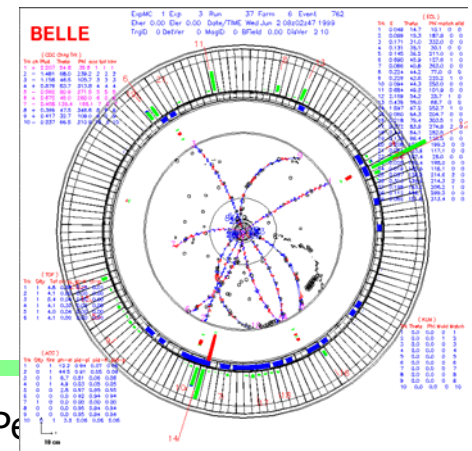
... Zato več raziskovalnih skupin na različne načine išče odstopanja od sicer izjemno natančno preverjenega Standardnega modela.

Dve možnosti:

- **Direktno iskanje** novih delcev, supersimetričnih partnerjev: delci morajo biti masivni → iskanje pri velikih energijah (LHC)
- **Iskanje odstopanj od verjetnosti za procese** (recimo pri redkih razpadih mezonov B) pri nižjih energijah (Belle).



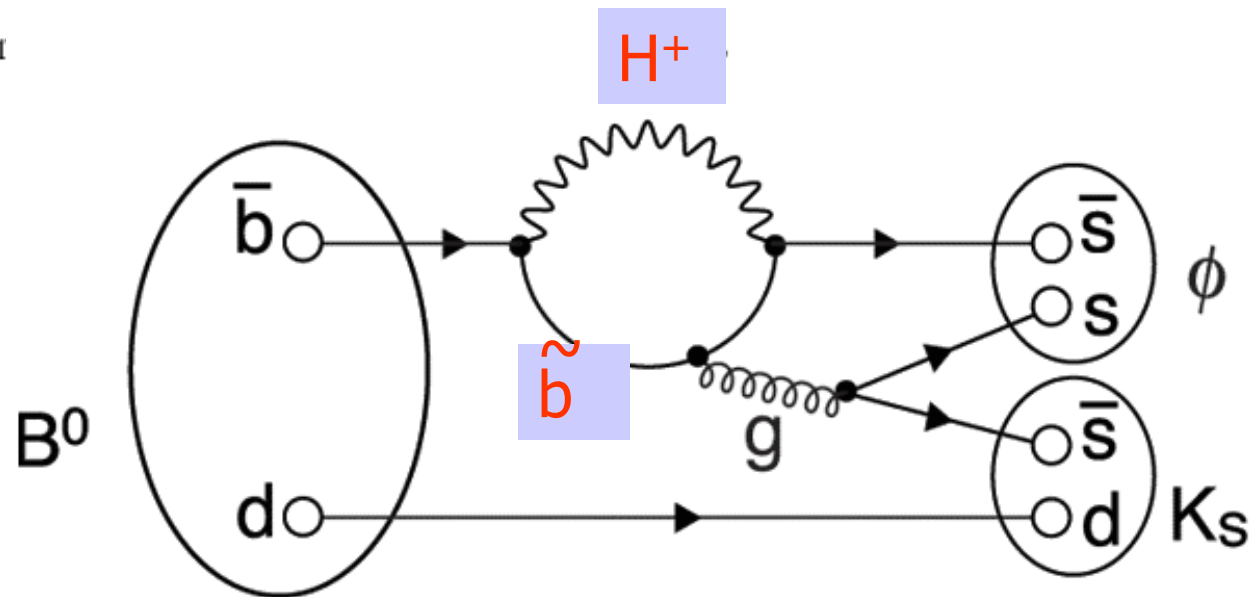
Oba pristopa se dopolnjujeta.





Univer

# Iskanje supersimetričnih delcev v zankah



Nekateri procesi potekajo preko "kvantnih fluktuacij": kvark  $b$  se za zelo kratek čas pretvori v bistveno težji kvark  $t$  in bozon  $W$ , nato pa konča kot kvark  $s$  in par antikvarkov anti- $s$ .

Možnost: namesto kvarka  $t$  ali bozona  $W$  se bi pri taki kvantni fluktuaciji lahko pojavile nove vrste delcev, ki jih sicer Standardni model ne predvideva in jih do sedaj še nismo odkrili (recimo supersimetrični partnerji).



Univerza v Ljubljani

---

# Kaj nam bo prinesla prihodnost?

Ne vemo zares – če bi, raziskave ne bi bile potrebne ...

Na vsak način pa v naslednjih petih letih pričakujemo zelo zanimive rezultate v fiziki osnovnih delcev!





# Prenos znanja: primer izboljšave pri slikanju v medicinski diagnostiki

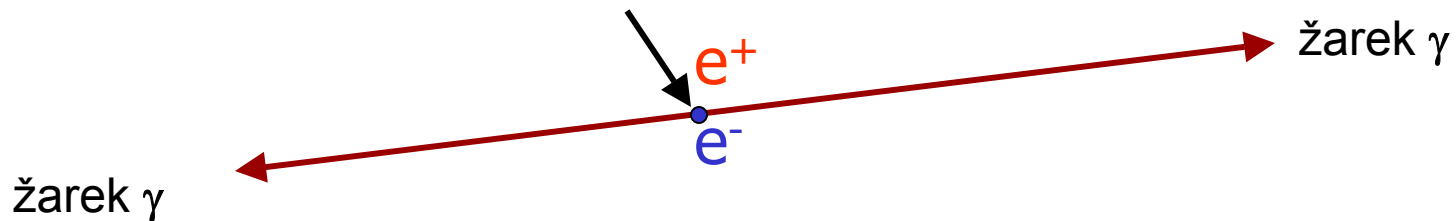
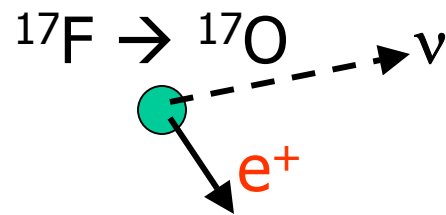
Merske metode fizike osnovnih delcev se včasih posreči predelati tako, da so uporabne na drugih področjih, recimo v medicinski diagnostiki.

- Uporaba detektorjev, ki smo jih razvili za naše poskuse
- Uporaba metod za rekonstrukcijo slike iz podatkov, zaznanih na detektorju



# Primer: izboljšava pri pozitronski tomografiji (PET)

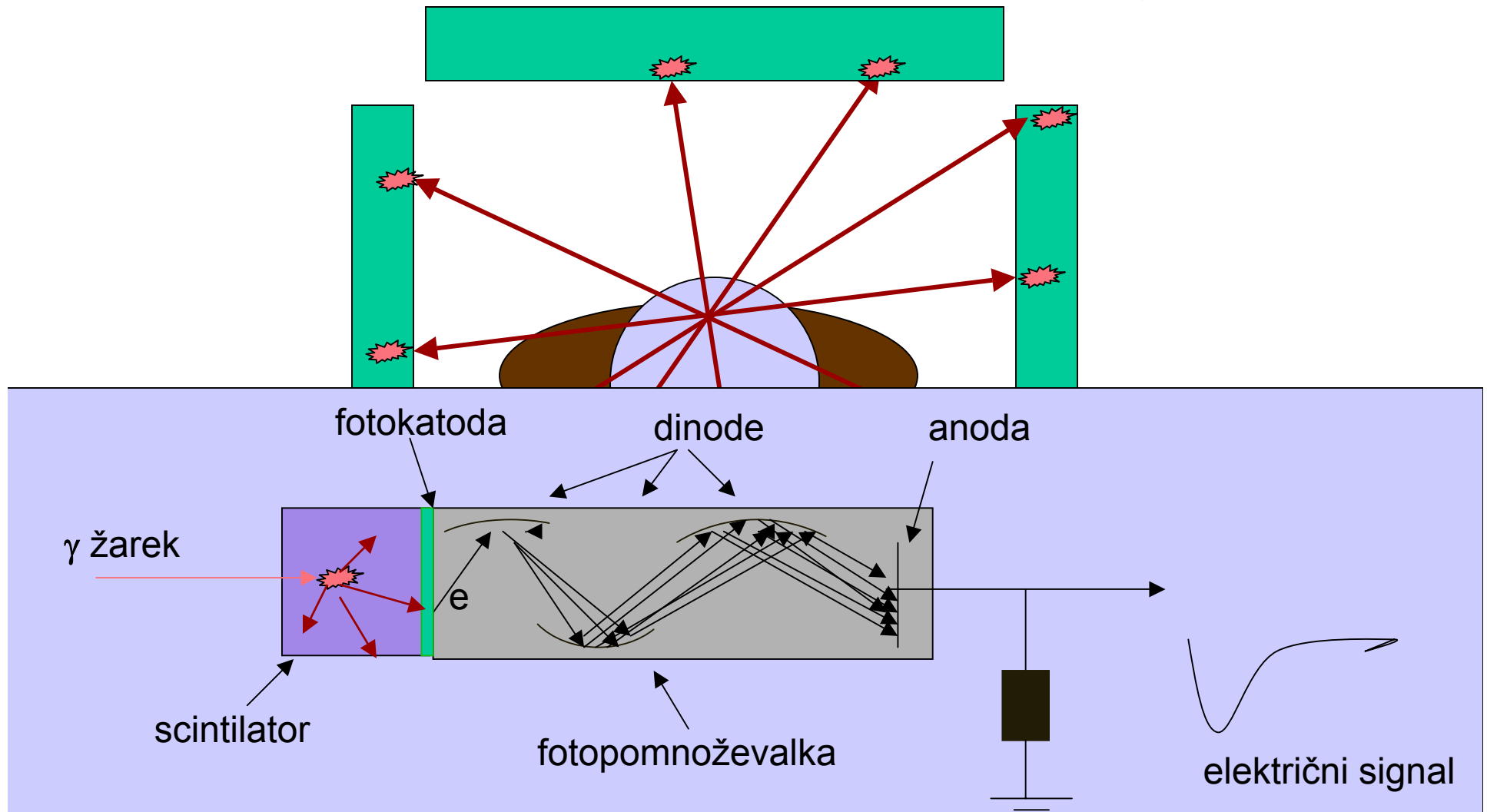
Radioaktivni fluor razpade z beta+ razpadom na kisik, pozitron in nevtrino



Pozitron se anihilira z elektronom v okoliški snovi, nastaneta dva žarka  $\gamma$ , ki odletita v nasprotnih smereh.

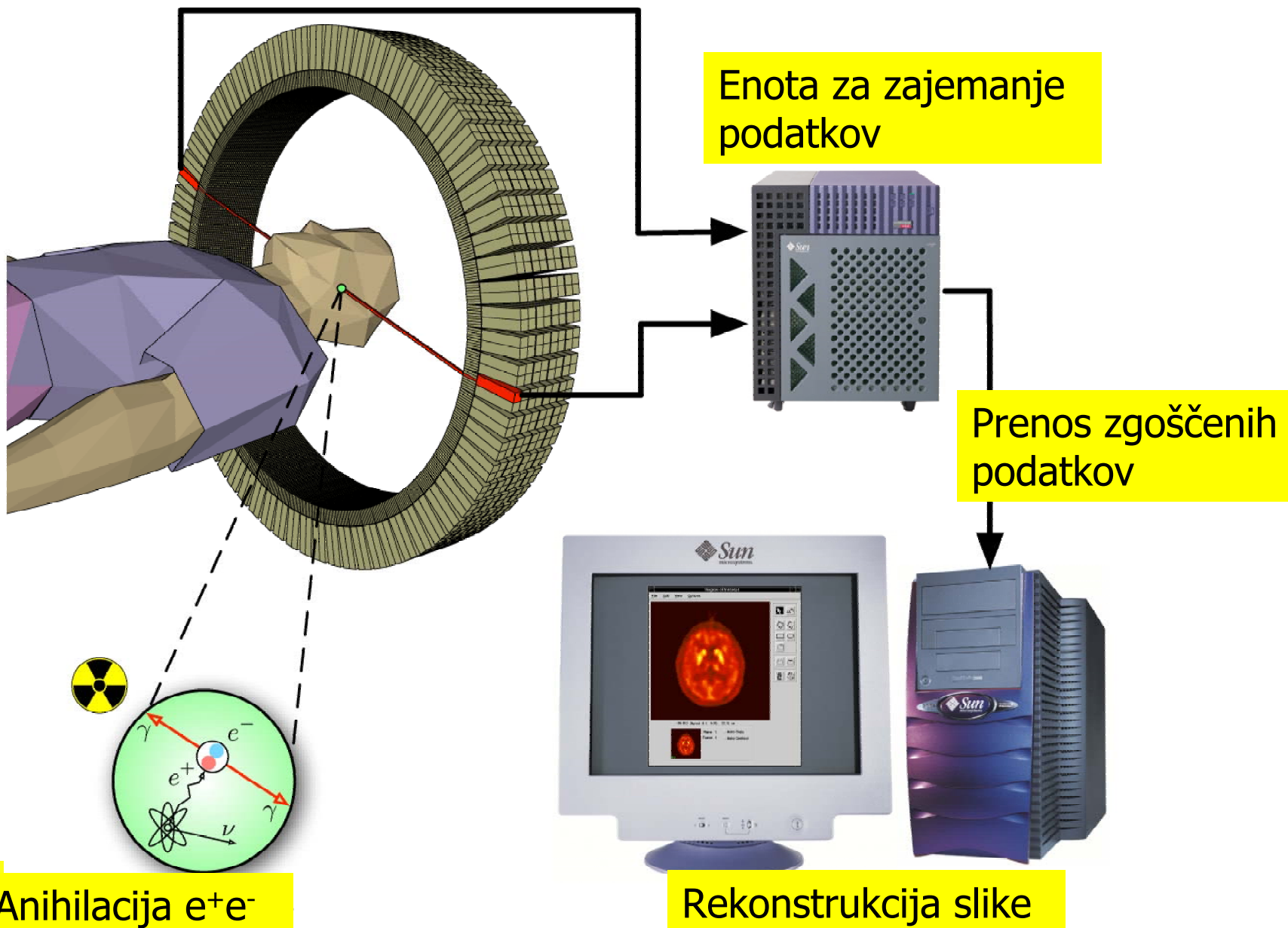
# PET: pozitronska tomografija

Pacientu vbrizgamo v kri snov, v katero smo vgradili **radioaktivni fluor** (recimo fluorodeoksiglukoza). Na mestih, kjer se bo nabralo več krvi s to snovjo, bo nastajalo več parov žarkov  $\gamma$ .





# PET: pozitronska tomografija

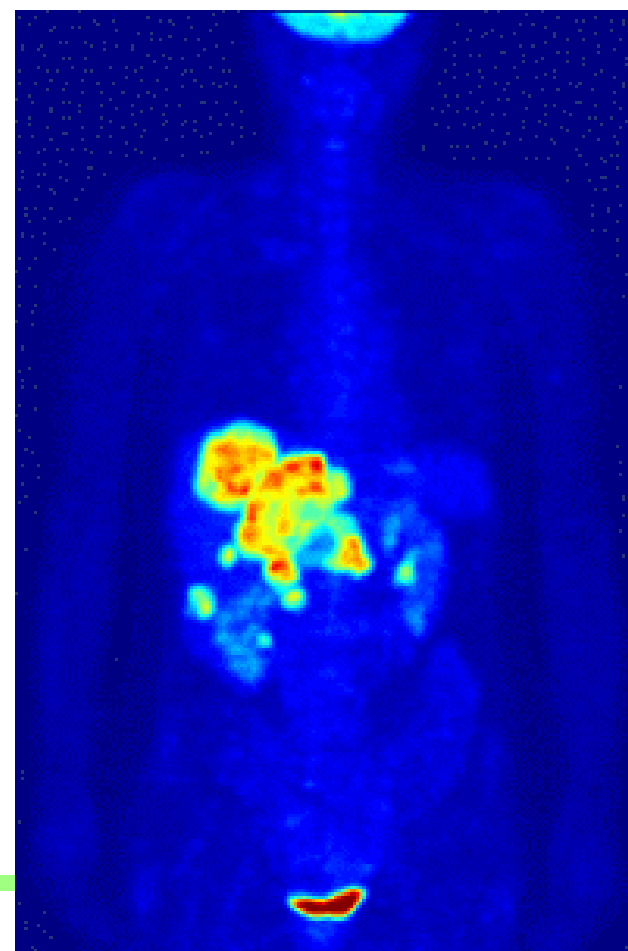
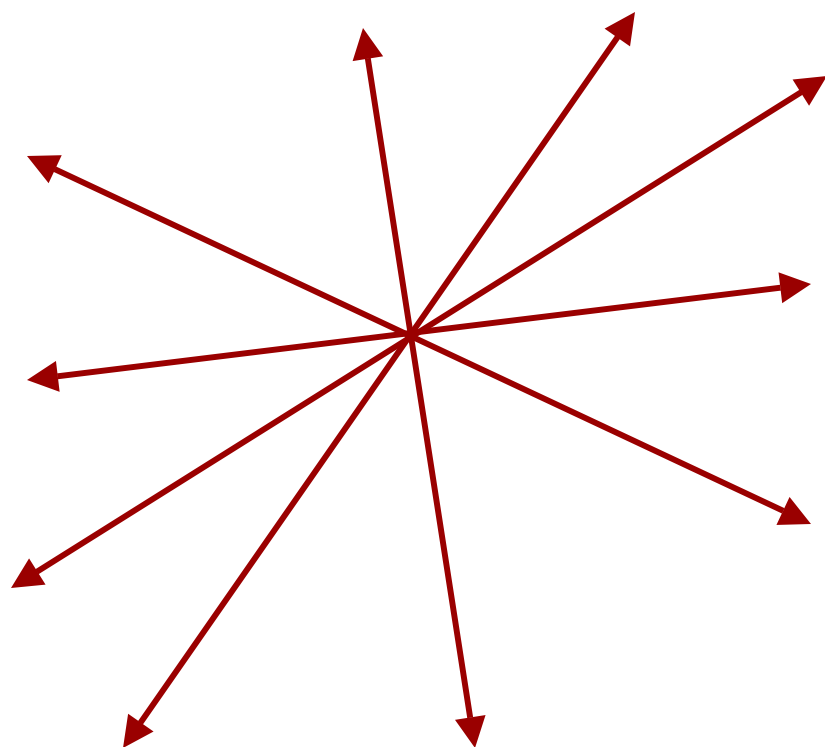


# PET: pozitronska tomografija



Univerza v Ljubljani

Rekonstrukcija slike: iz smeri premic določiti porazdelitev radioaktivnega fluora v telesu – podobno rekonstrukciji reakcij v fiziki osnovnih delcev.

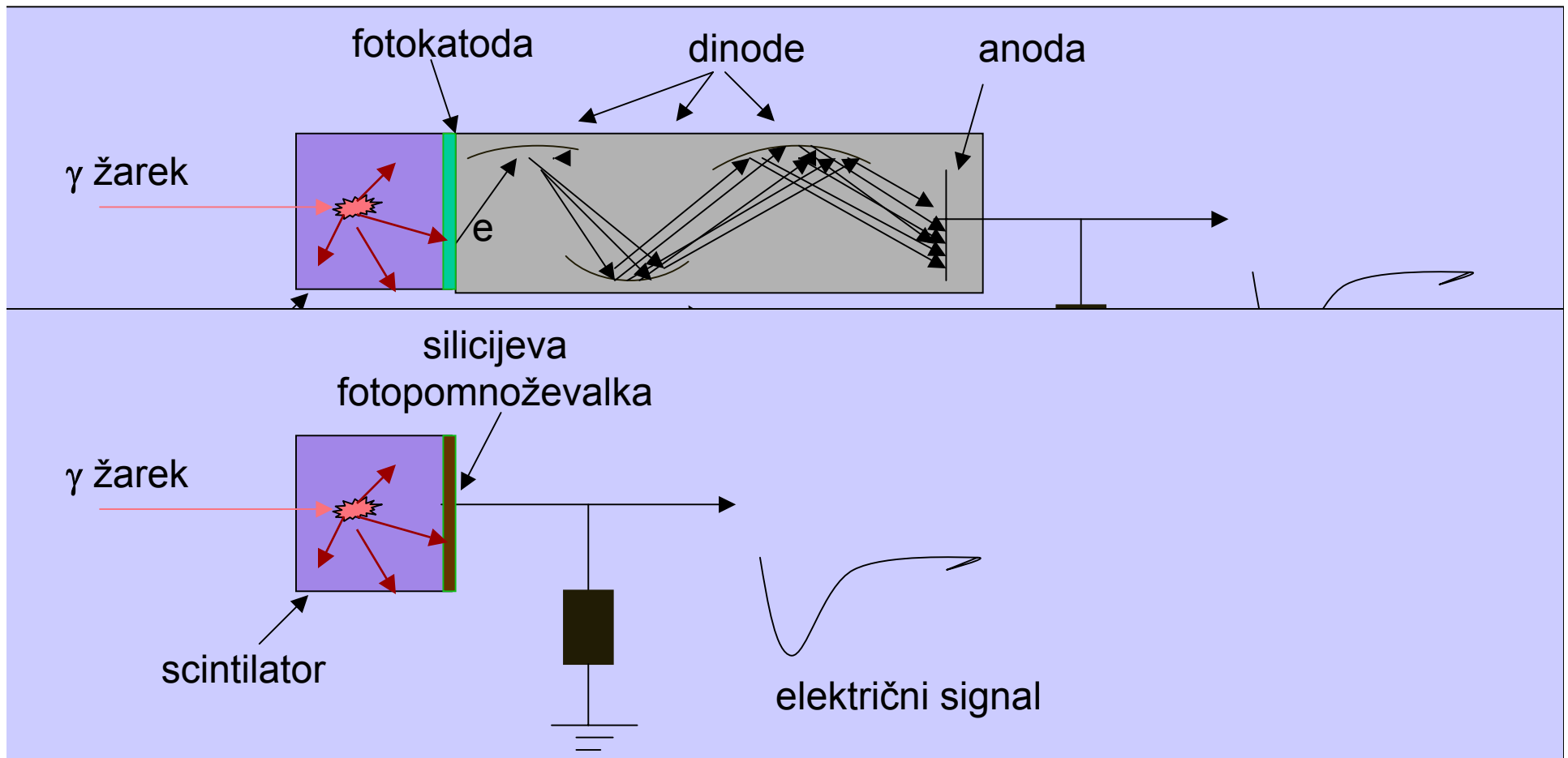


19. maj 2007

Alumni2007

# PET z novo vrsto detektorja

Fotopomnoževalko nadomestimo z novo vrsto detektorja scintilacijskih fotonov: silicijevo fotopomnoževalko → **bistveno manjša, ne potrebuje visoke napetosti, deluje v magnetnih poljih ~nekaj T.**





# Zaključek

Fizika ostaja živahna veda o veda svetu okoli nas, sega od največjih do najmanjših razdalj, in je ob tem trdno zasidrana v vsakdanjem svetu.

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

Posredne rezultate svojih raziskav poskušamo uporabiti pri razvoju novih materialov, napredku v medicini in varovanju okolja.