



Univerza v Ljubljani

---

# O razliki med delci in anti-delci

Peter Križan

*Fakulteta za matematiko in fiziko*

*Univerza v Ljubljani*

*in*

*Institut Jožef Stefan*



# Spored

- Kaj počnejo fiziki?
- Raziskave v fiziki osnovnih delcev
- Slikanje v medicini



Univerza v Ljubljani

---

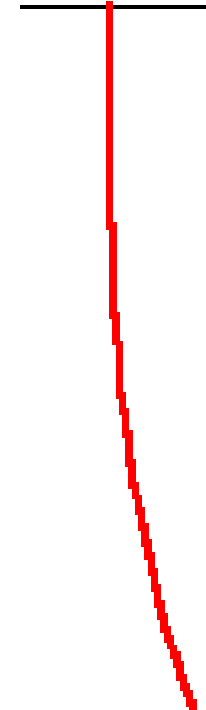
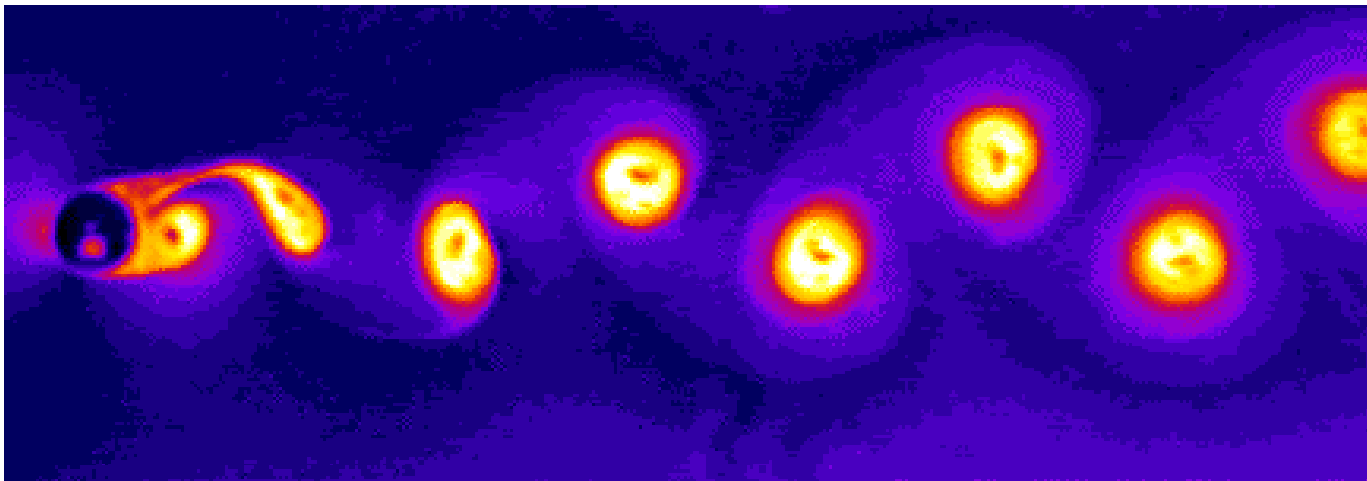
# Kaj je pravzaprav fizika?

Fizika je veda za radovedne.



## Zanima nas na primer:

- Kako niha prostoviseča vrv?
- Kako za oviro v toku nastanejo vrtinci?

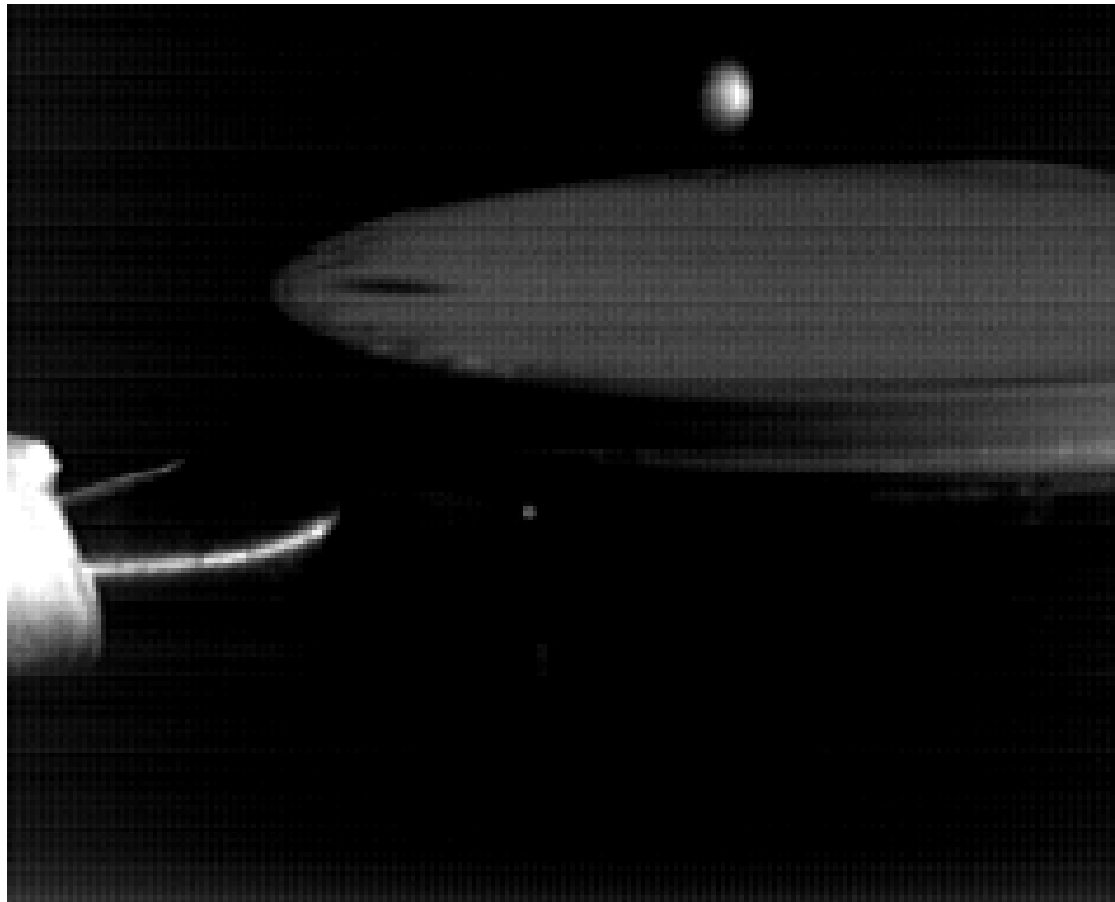




Univerza v Ljubljani

## Zanima nas na primer:

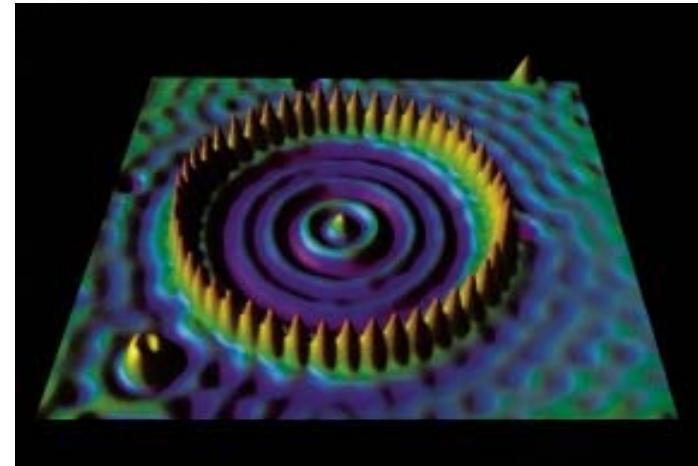
- Kaj se dogaja s kapljico, ki pade v tekočino?





## Zanima nas na primer:

- Kaj se dogaja z elektronom v kvantnem loncu?



- Kakšno je bilo vesolje sekundo po nastanku?
- Kakšne so sile med osnovnimi delci?
- Zakaj so supraprevodniki supraprevodni?



Univerza v Ljubljani

## Kaj se je zgodilo pri preletu nadzvočnega reaktivca?





Univerza v Ljubljani

## Zanima nas na primer:

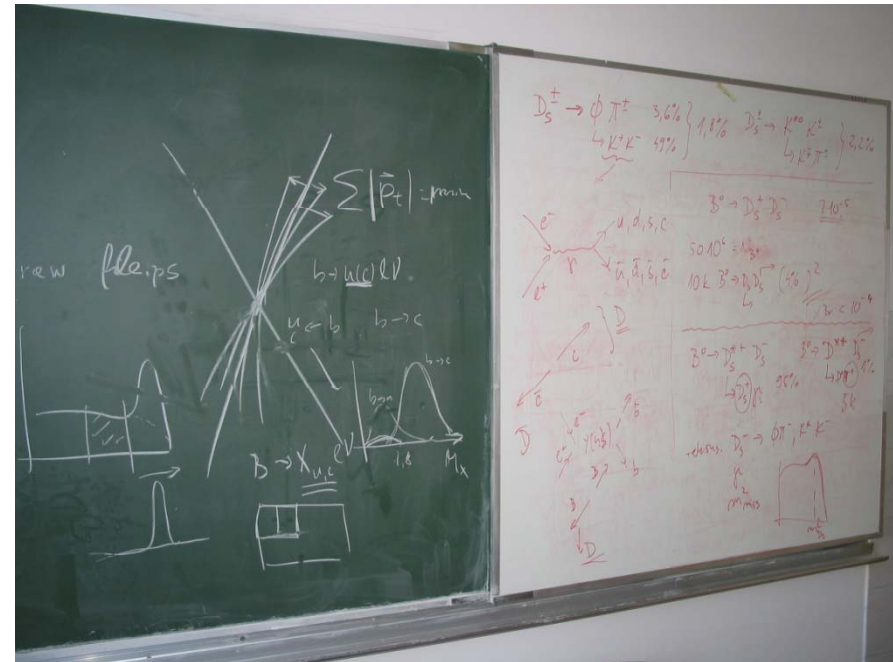
- Kako izmerim pospešek v letalu?
- Kako sestavim aparaturo, ki bo zajemala podatke iz senzorjev, in na podlagi rezultata usmerjala proces?
- Kako slikati notranjost človeškega telesa?
- Kako v pospeševalniku pospešimo nabite delce, kako zaznamo reakcijske produkte interakcij med osnovnimi delci?
- Ali znamo narediti chip iz nanocevk?





## Kako poteka študij?

- Predavanja: spoznamo se z novo snovjo
- Vaje: snov ponazorimo s primeri, prediskutiramo odprta vprašanja s predavanj

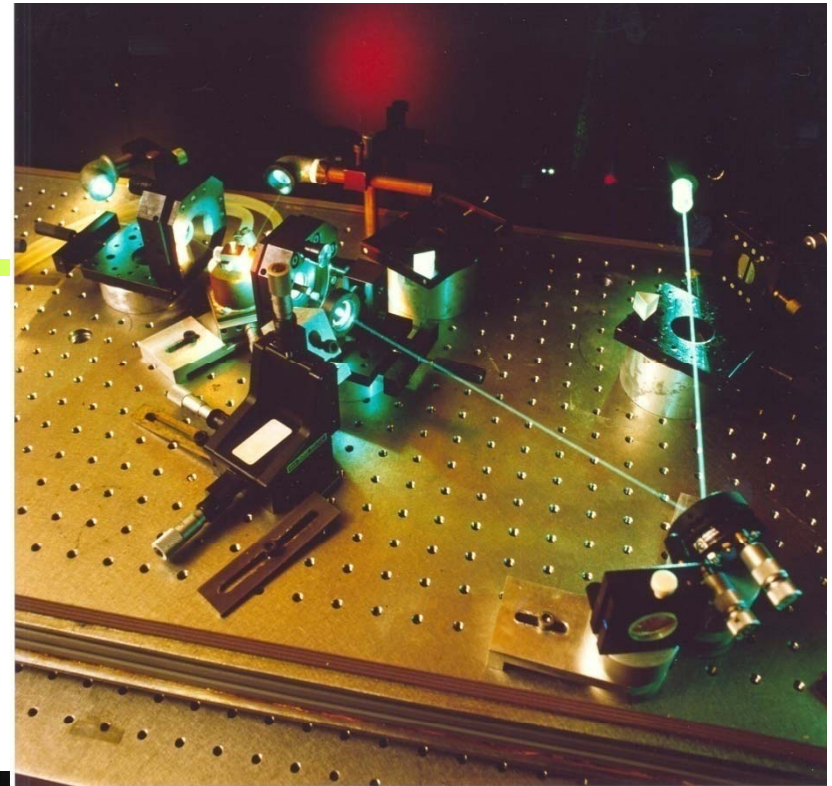




Univerza v Ljubljani

## Kako poteka študij?

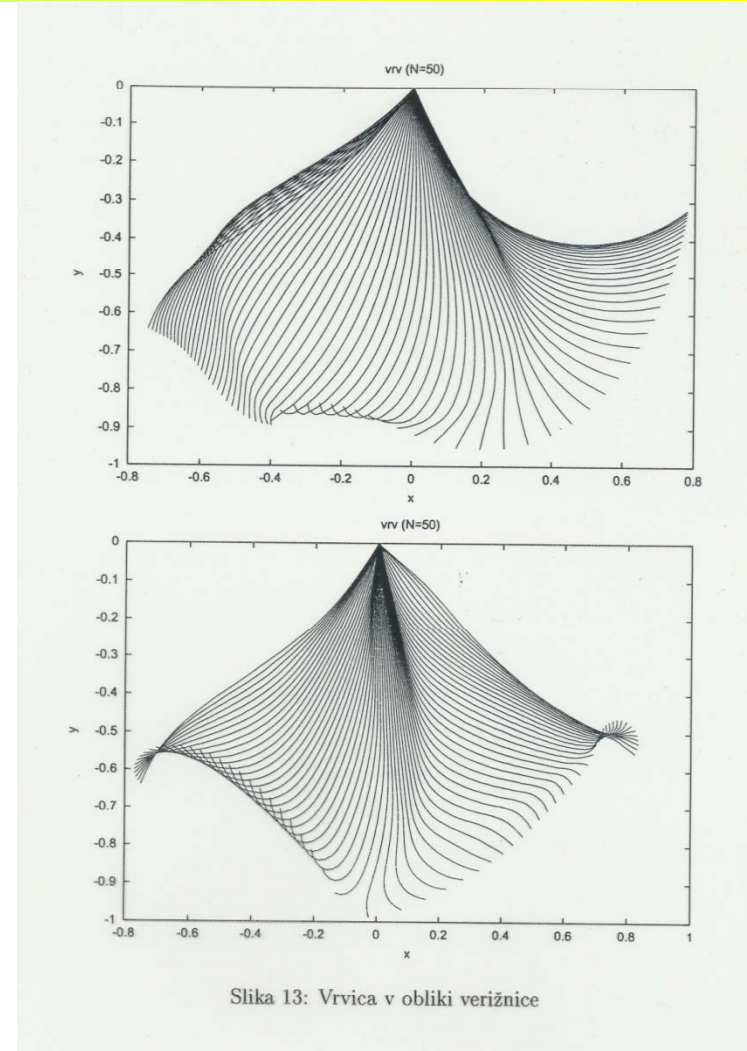
- **Praktikumi:** sami naredimo poskus, ga analiziramo in ga povežemo s snovjo na predavanjih.
- **Naučimo se načrtovati** meritev, pripraviti podatke in jih obdelati.





## Kako poteka študij?

- Računski praktikumi: zapletene pojave obravnavamo z matematičnimi orodji
- Primer: nihanje prostoviseče vrvi (rezultat domače naloge)



# ... in končno konec študija!



Univerza v Ljubljani

Slavnostna podelitev diplom v  
zbornični dvorani Univerze.

17. december 2008





## Kam po študiju?

Fiziki smo na dobrem glasu, da lahko po končanem študiju počnemo marsikaj.

Eden od direktorjev Siemens je v intervjuju izjavil:

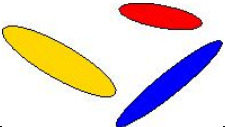
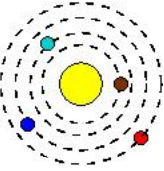

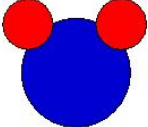
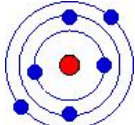
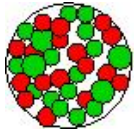
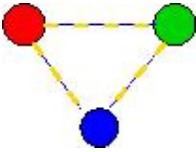

V službo najraje jemljem fizike. Ti so se pri svojem študiju in raziskovalnem delu soočili s problemi, za katere niso obstajale standardne rešitve, in so jih premagali. Nekako takšni so kot mačke, zmeraj pri padcu pristanejo na nogah.



Univerza v Ljubljani

# Kam po študiju?



<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				?	?			↓ filozof



Univerza v Ljubljani

# Kakšen naj bo opis osnovnih gradnikov narave?

---

Dve zahtevi:

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



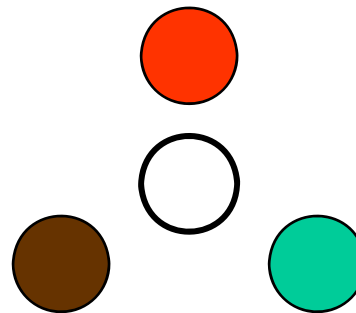


# Opis narave po Anaksimenesu

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																	2																
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									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
4	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																
5	55 Cs	56 Ba	57 La	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																	
6	87 Fr	88 Ra	89 Ac	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																	
7	111 Mt	110 Ds	109 Nh	108 Hs	107 Bh	106 Hr	105 Mt	104 Lr	103 Nh	102 Fl	101 Mc	100 Lv	99 Ts	98 Og																				

\* 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

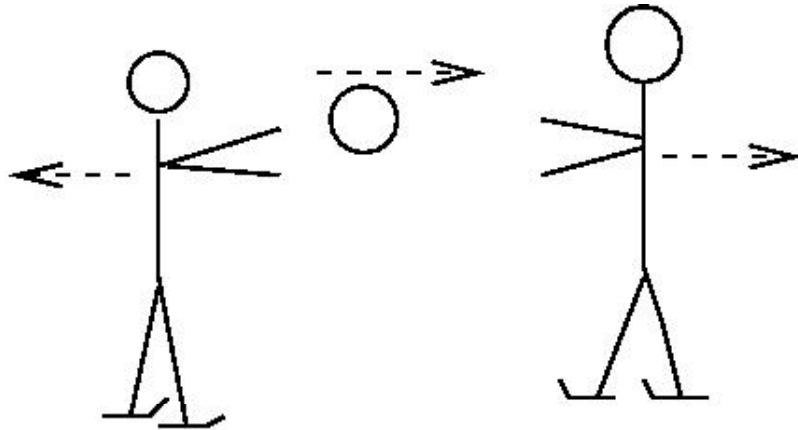
### Sile (interakcije) med njimi

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



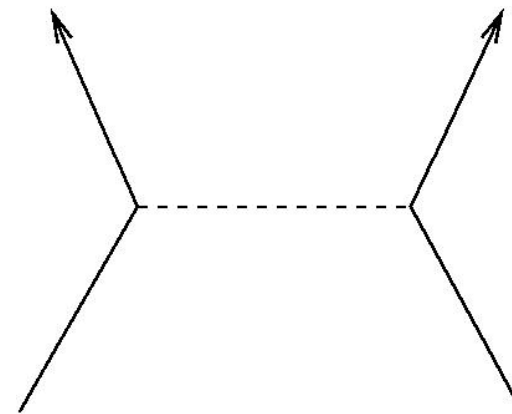
Univerza v Ljubljani

# 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	$e^-, \nu_e$	$\mu^-, \nu_\mu$	$\tau^-, \nu_\tau$

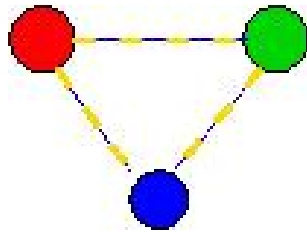
Vsak ima **delec** svoj **anti-delec**:

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

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

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

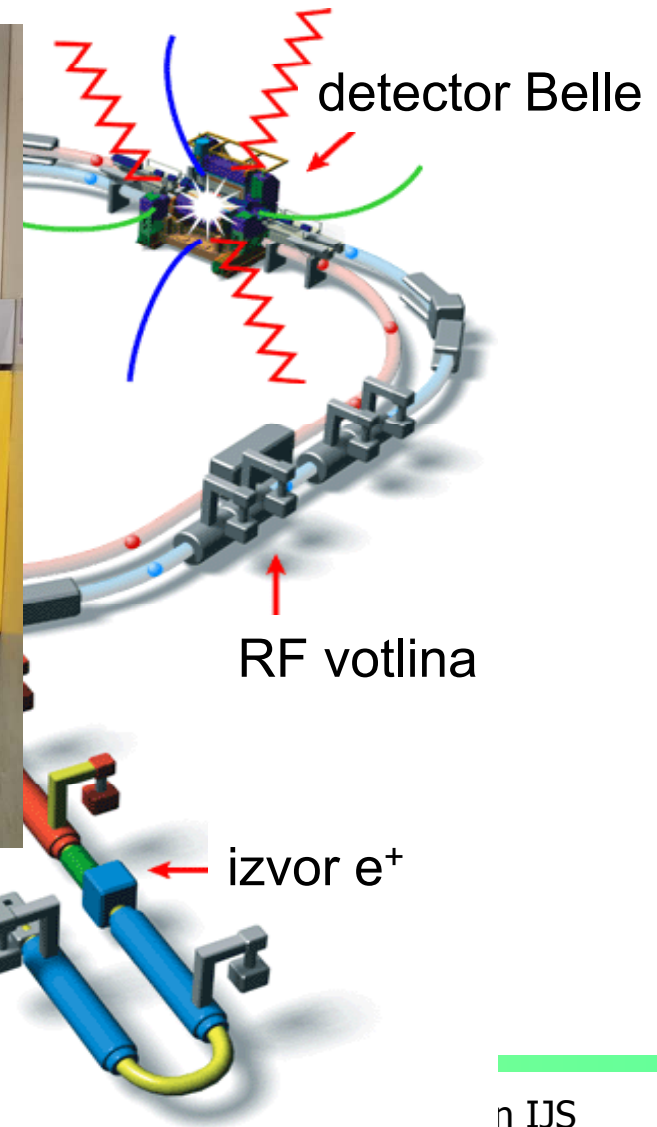
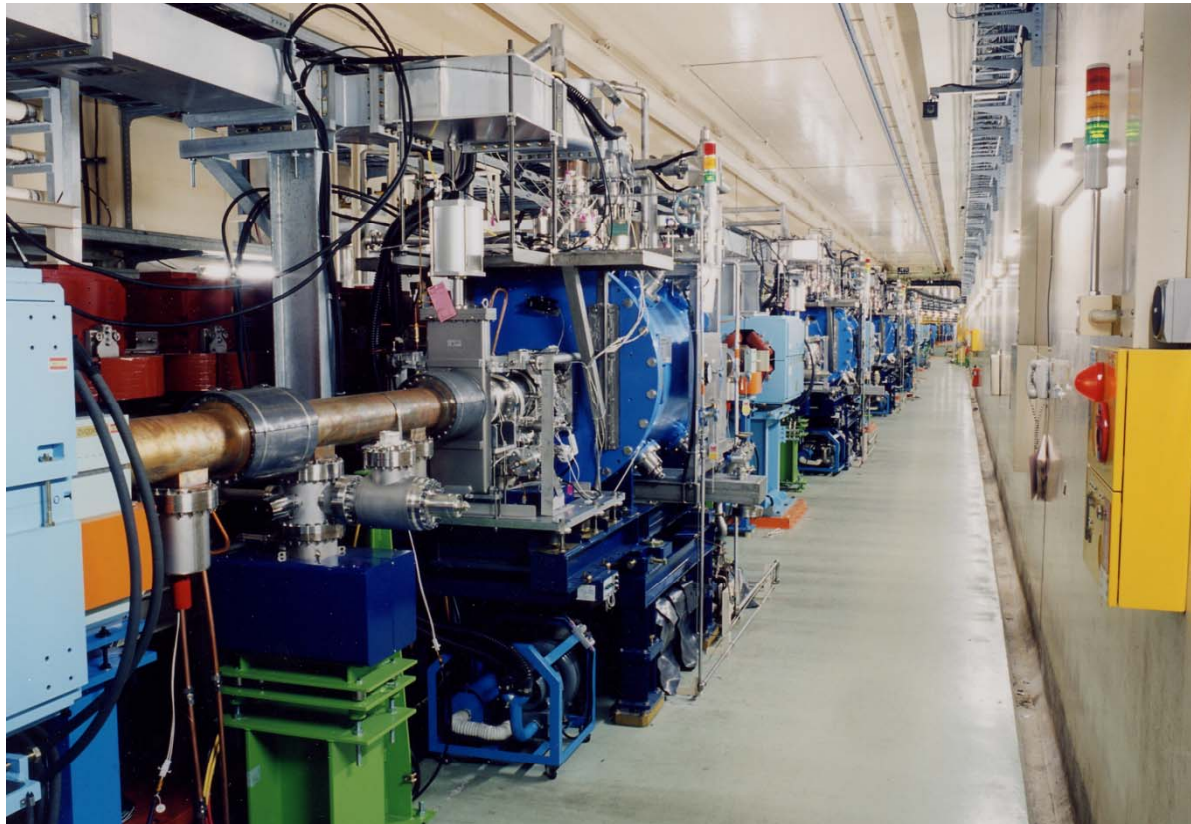
Izmerimo moramo, **kje** se je to zgodilo, in ugotoviti, ali je v končno stanje  $J/\psi K_S$  razpadel  $B^0$  ali njegov **anti-delec**  $\bar{B}^0$ .



Univerza v Ljubljani

# Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



17. december 2008

n IJS



Univerza v Ljubljani

# Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



17. december 2008

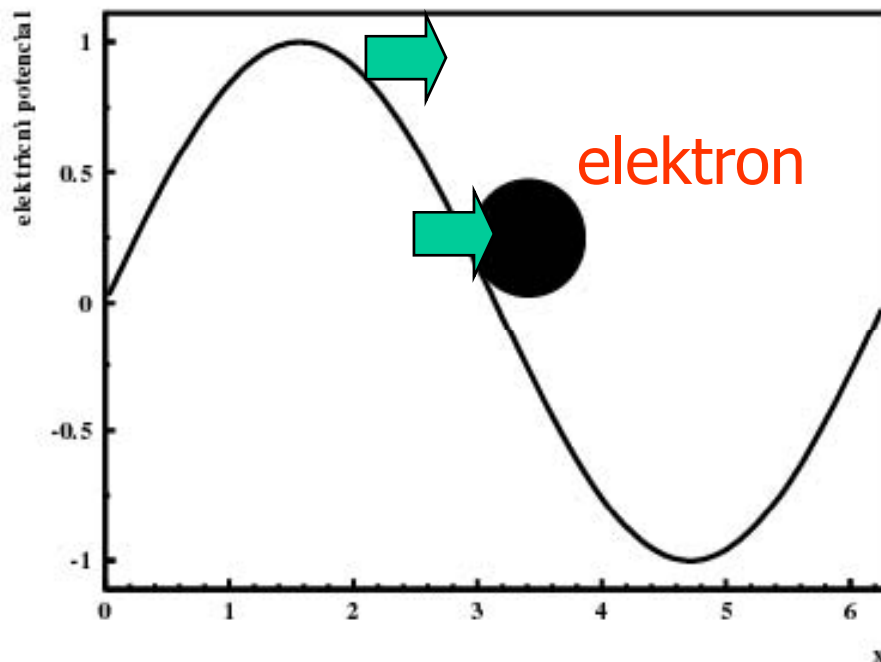
Peter Križan, FMF in IJS



Univerza v Ljubljani

# Kako pospešujemo nabite delce?

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

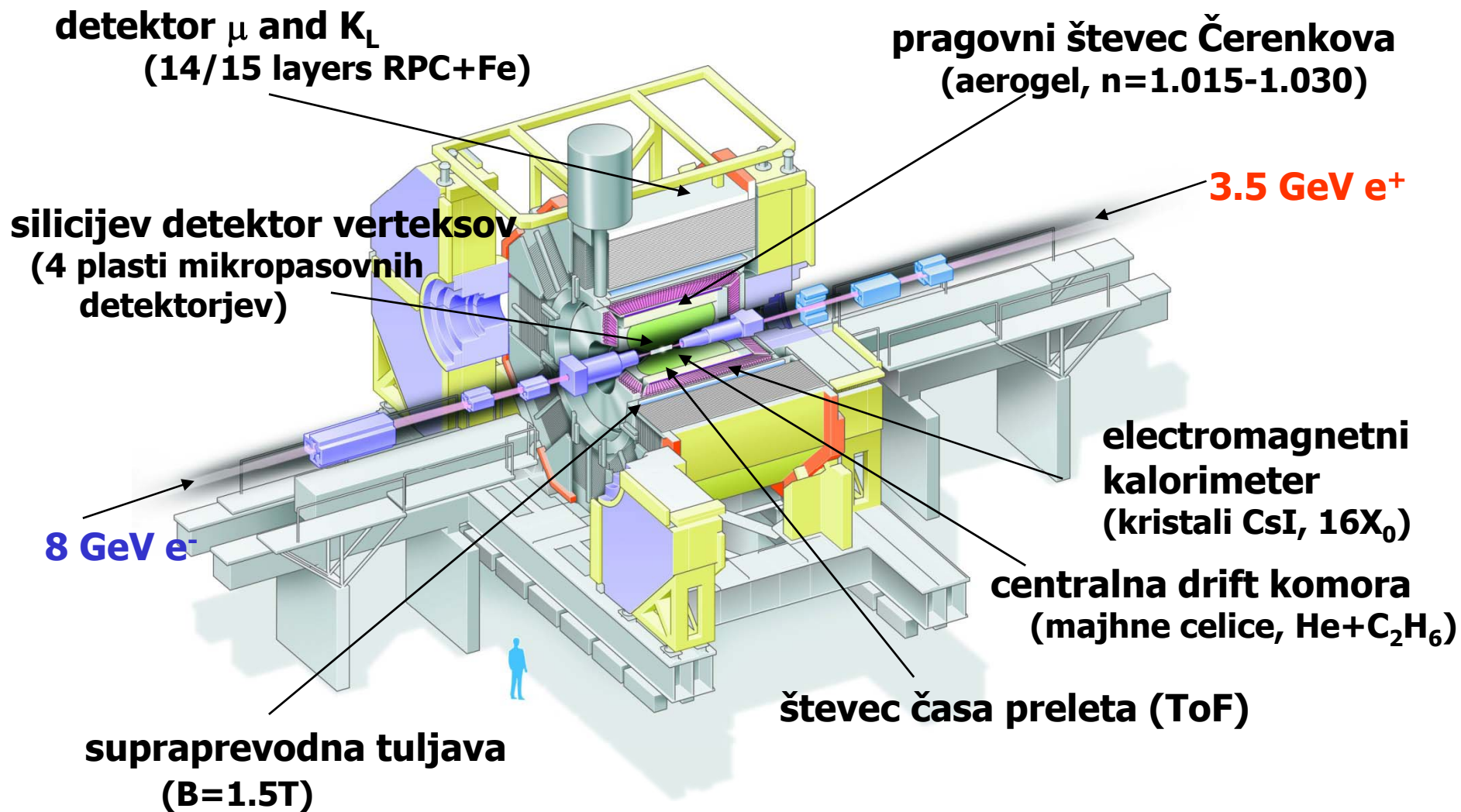


... podobno deskanju na valovih



Univerza v Ljubljani

# Spektrometer Belle





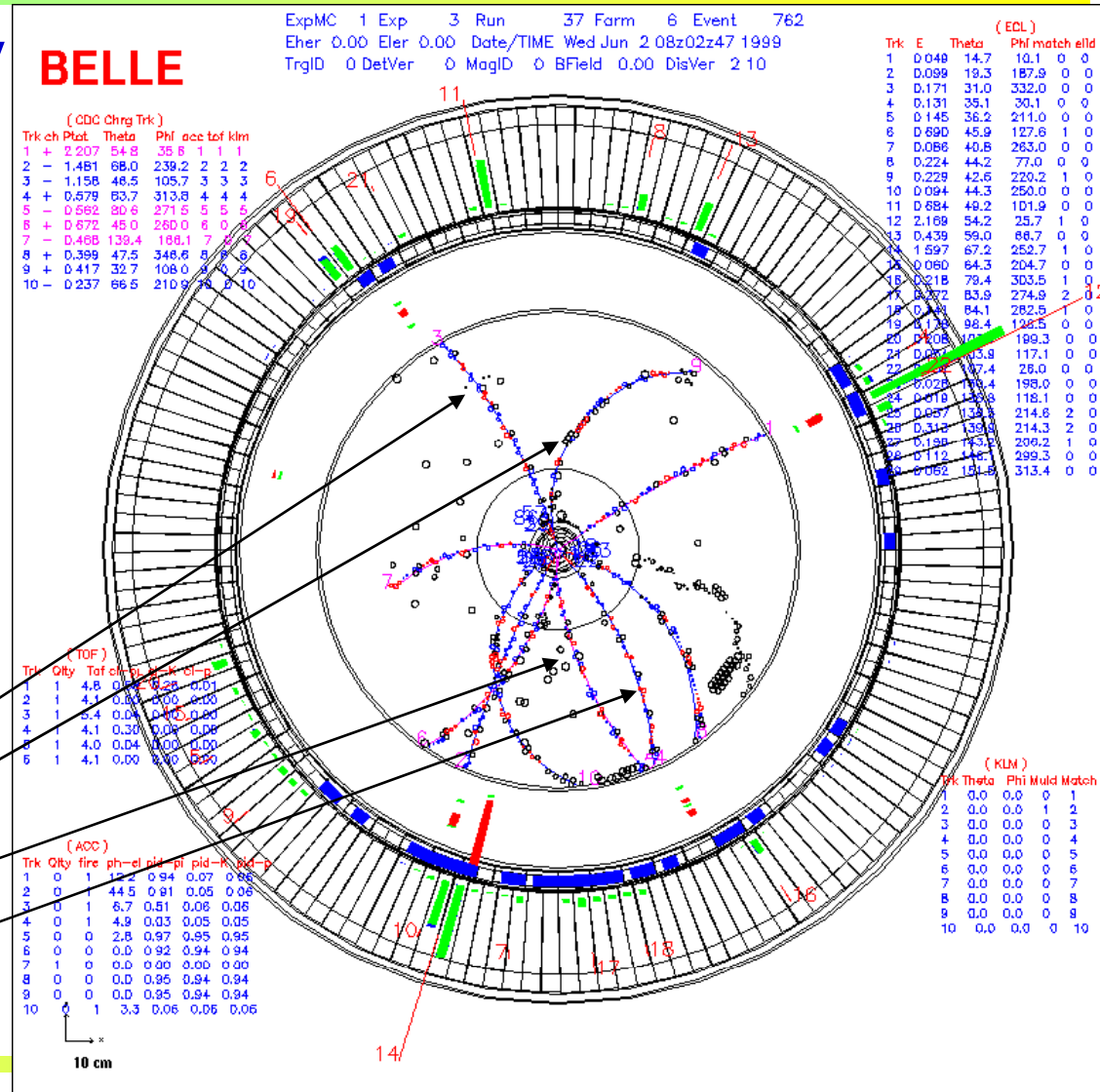
# Kaj izmerimo z detektorjem?

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

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

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

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





Univerza v Ljubljani

# 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

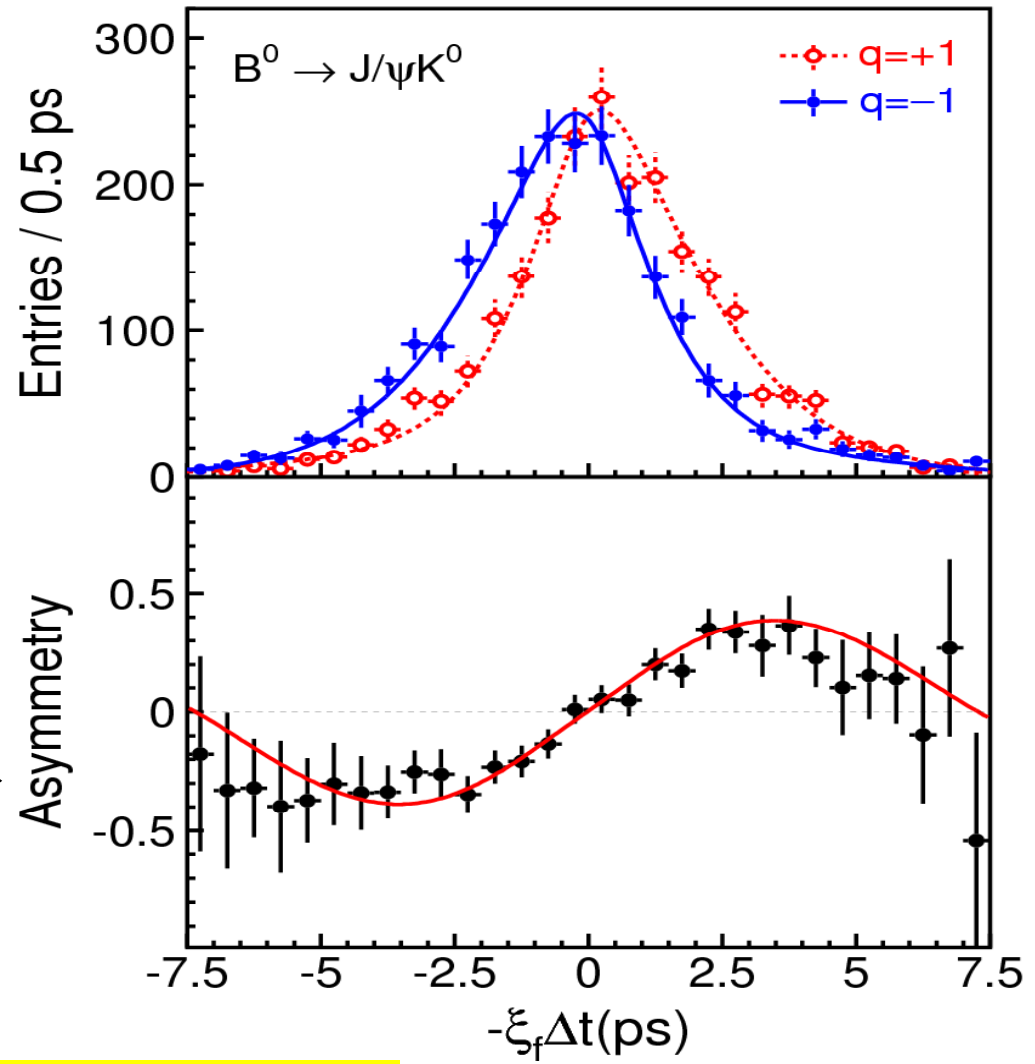
# Rezultat meritve: simetrija CP je kršena!

Razlika med delci in antidelci:

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

Relativna razlika med obema porazdelitvama 



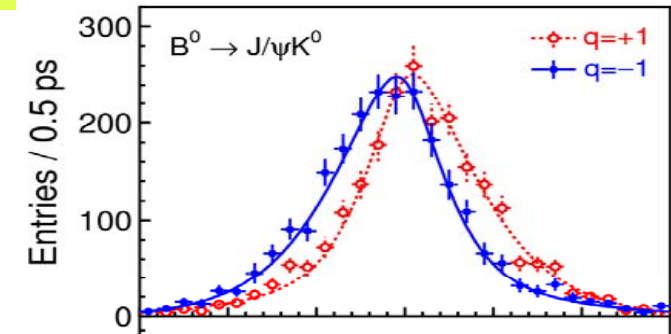
Zmagoslavje Standardnega modela!



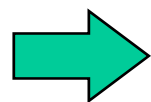
Univerza v Ljubljani

# Rezultat meritve kršitve simetrije CP: zmagoslavje Standardnega modela!

Razlika med delci in antidelci je taka,  
kot sta jo leta 1973 napovedala  
japonska fizika Kobayashi in  
Maskawa



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



**Nobelova nagrada 2008!**

17. december 2008

Peter Križan, FMF in 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



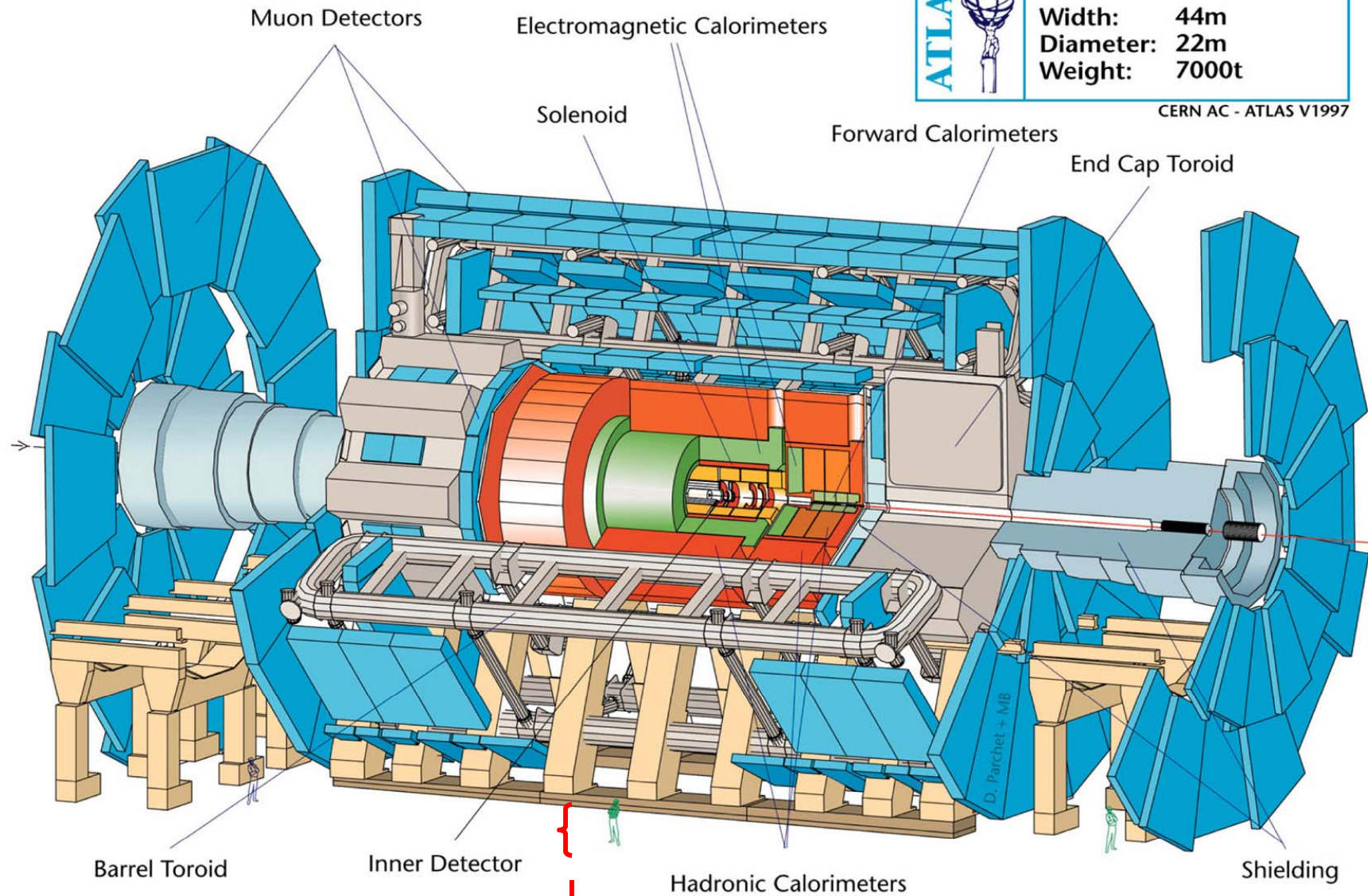
# Detektor ATLAS ob LHC – v pripravi



## Detector characteristics

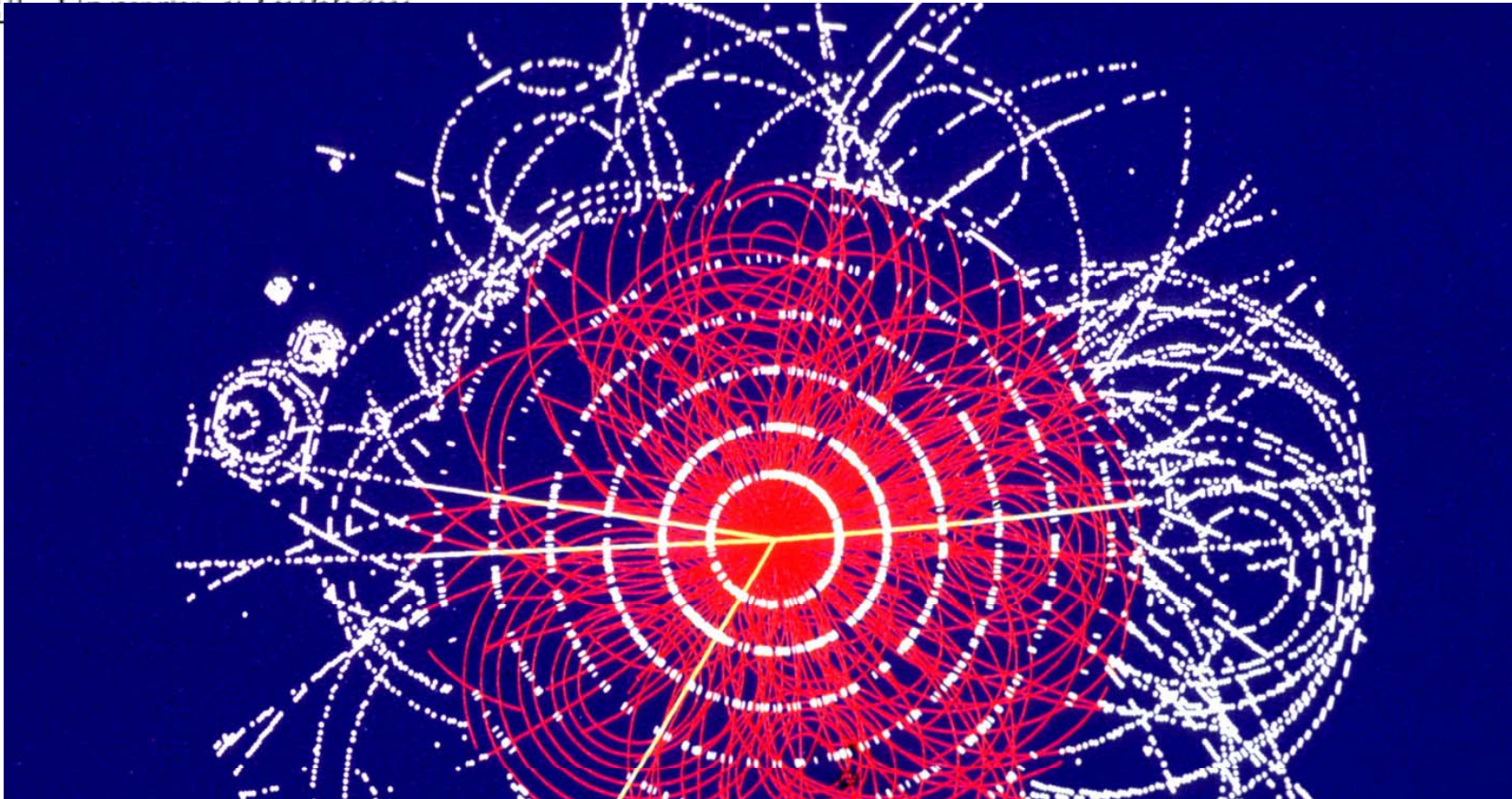
**Width:** 44m  
**Diameter:** 22m  
**Weight:** 7000t

CERN AC - ATLAS V1997





# Računalniška simulacija razada Higgsovega delca: $H \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ v detektorju ATLAS



- Trkalnik so prvič pognali letos septembra, tehnične težave
- Oba velika detektorja (ATLAS, CMS) sta nared
- 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?

Periodic Table of the Elements

1	2											10					
H	He											He					
3	4											10					
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	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	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
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

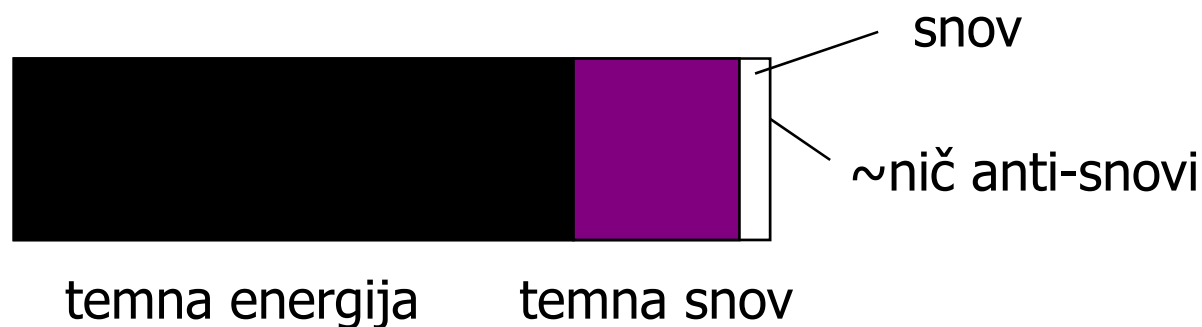
Poleg tega...





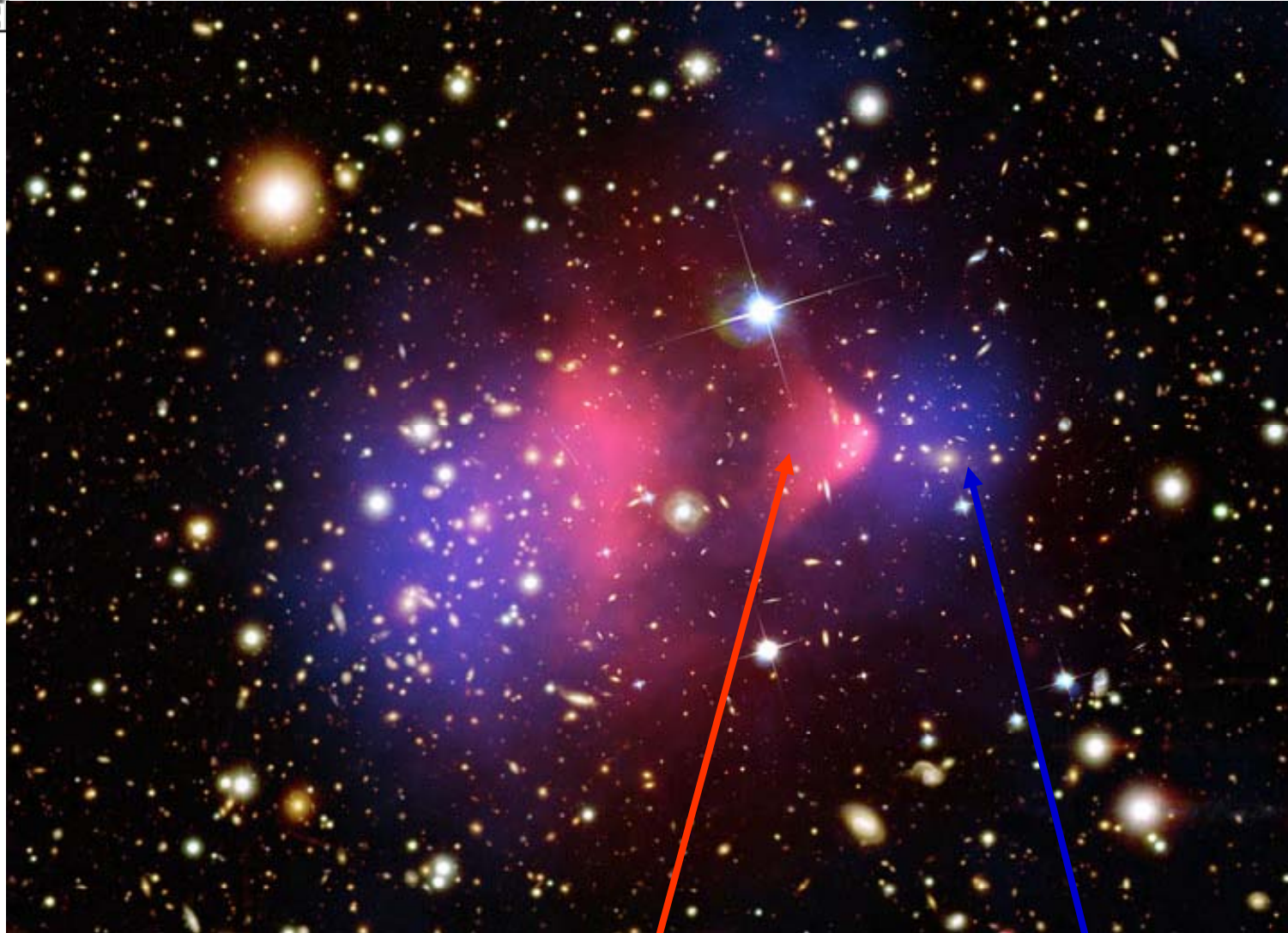
# Standardni model ni dokončna teorija

- Nevtrini imajo (majhno) maso
- Izmerjena kršitev CP je premajhna, da bi pojasnila asimetrijo med snovjo in anti-snovjo v vesolju
- Ne vključuje četrte interakcije - gravitacije
- Večina vesolja je iz nam neznanе 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

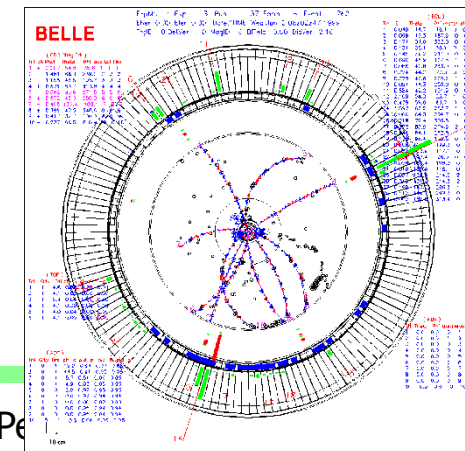
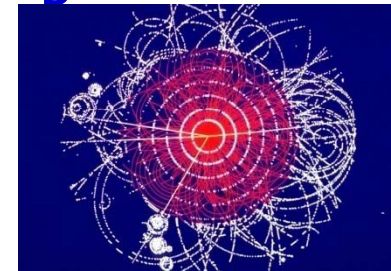
Univerza v Ljubljani

... 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 pričakovanih značilnosti procesov** - recimo pri redkih razpadih mezonov B - pri nižjih energijah (Belle).

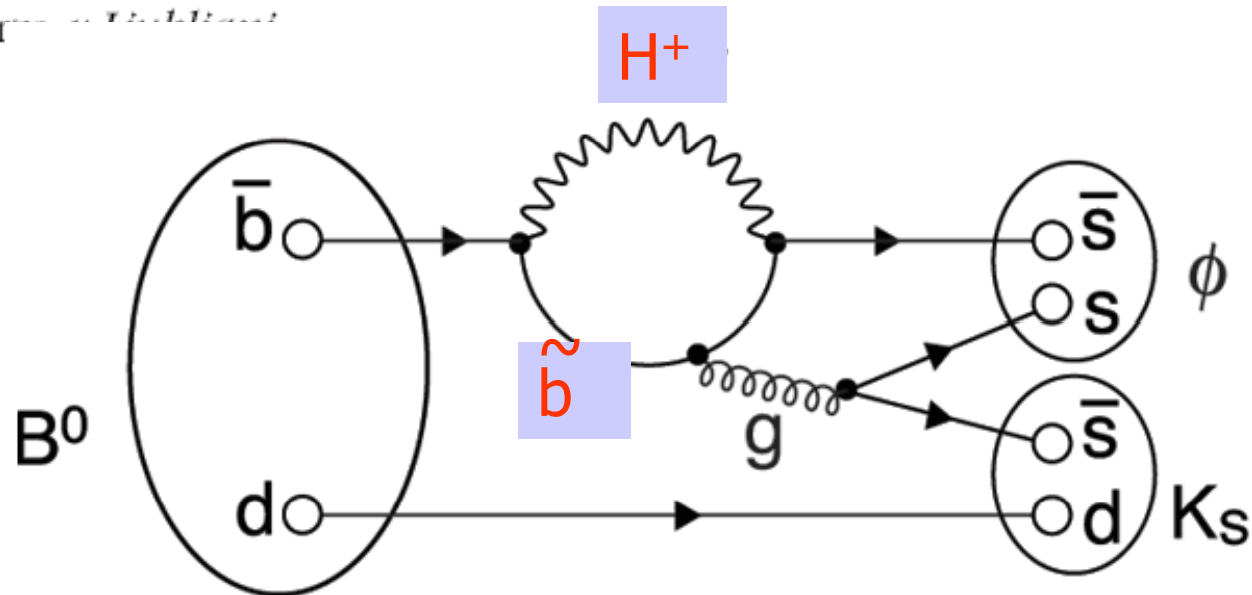
Oba pristopa se dopolnjujeta.





# Iskanje supersimetričnih delcev v zankah

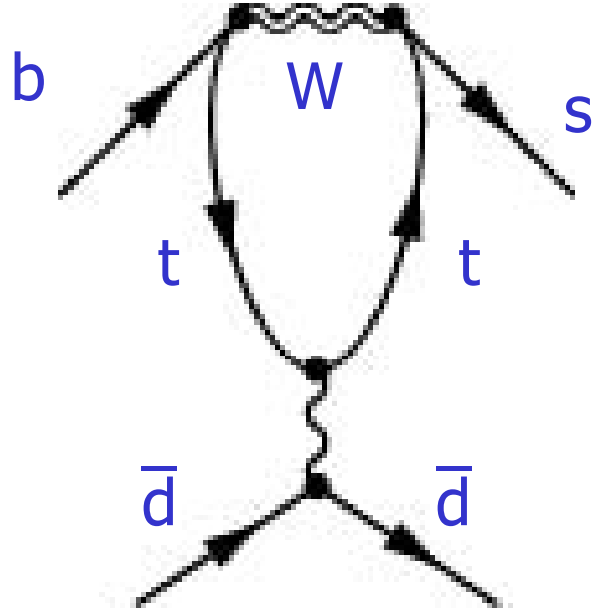
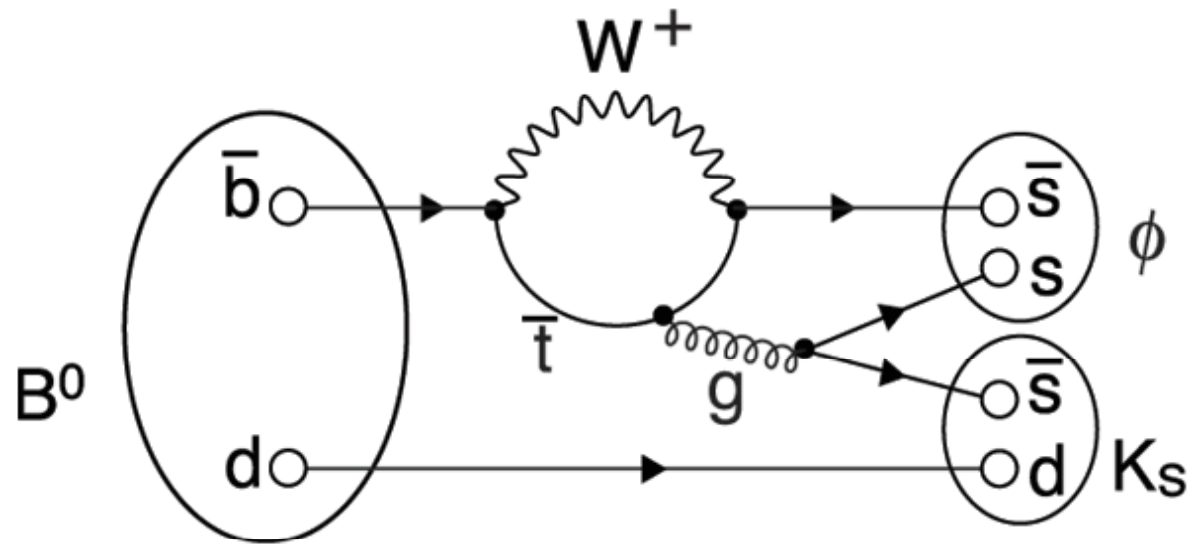
Univerza na Ljubljani



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  $\text{anti-}s$ .

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).

# Pingvinski diagrami





Univerza v Ljubljani

# Našli smo neskladje pri razpadih $B^0 \rightarrow K^- \pi^+$ in $B^- \rightarrow K^- \pi^0$ !

Primer pingvinskega razpada sta tudi  $B^0 \rightarrow K^- \pi^+$  in  $B^- \rightarrow K^- \pi^0$ .  
Oba procesa bi morala imeti zelo podobne rastnosti.  
Naše odkritje: **znatna razlika!**

Rezultat smo objavili letos spomladi v elitni naravoslovni  
reviji **Nature**.

To še ni znak, da smo zares odkrili delce izven  
Standardnega modela, je pa del mozaika, ki kaže na to.



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!





# Zakaj take raziskave?

- Fundamentalna vprašanja povezana z razvojem vesolja – presenetljivo, da je v vesolju kmalu po njegovem nastanku ostalo ravno toliko snovi, da je je tudi za nas dovolj...
- Vzgoja strokovnjakov, ki se lahko zelo dobro znajdejo v novih pogojih; doktoranti in diplomanti iz naše raziskovalne skupine so med drugimi: podjetnik na področju telekomunikacij, eden od direktorjev največje slovenske zavarovalnice, profesor na Princetonu...
- Spin-off: prenos tehnologij, ki so potrebne za izvedbo poskusov, na druga področja, n.pr. v industrijo in v medicinsko diagnostiko.



# Prenos znanja: primer izboljšave pri slikanju v medicinski diagnostiki

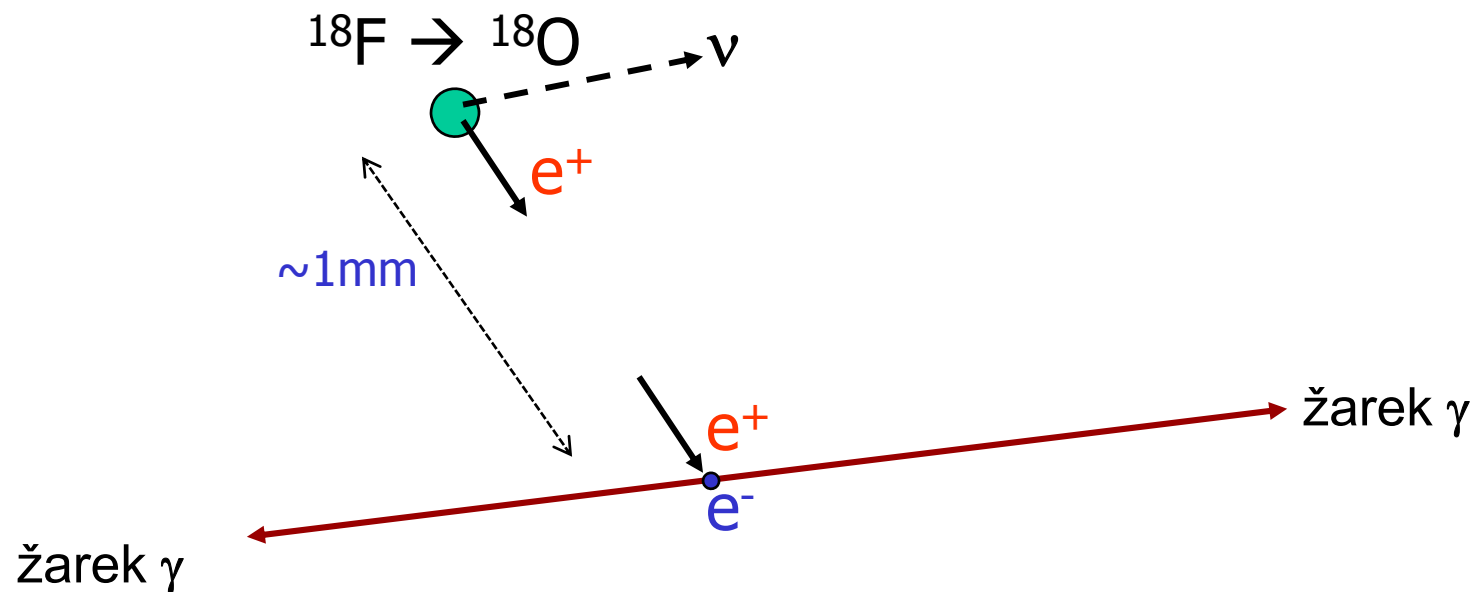
Merske metode fizike osnovnih delcev se včasih posreči predelati tako, da so uporabne na drugih področjih, recimo v medicinski diagnostiki.

- 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)

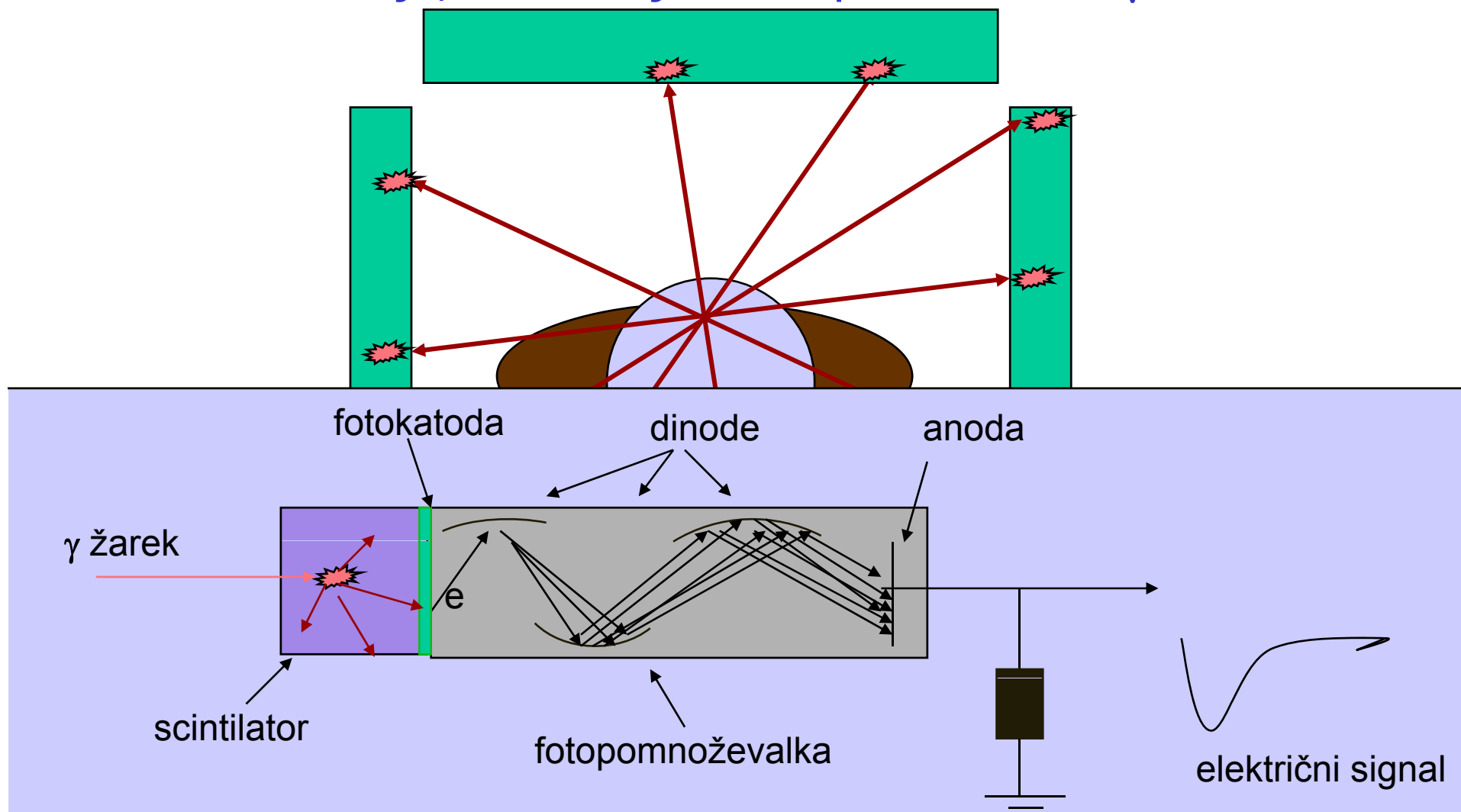
Radioaktivni fluor razpade z beta+ razpadom na kisik,  
pozitron in nevtrino



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

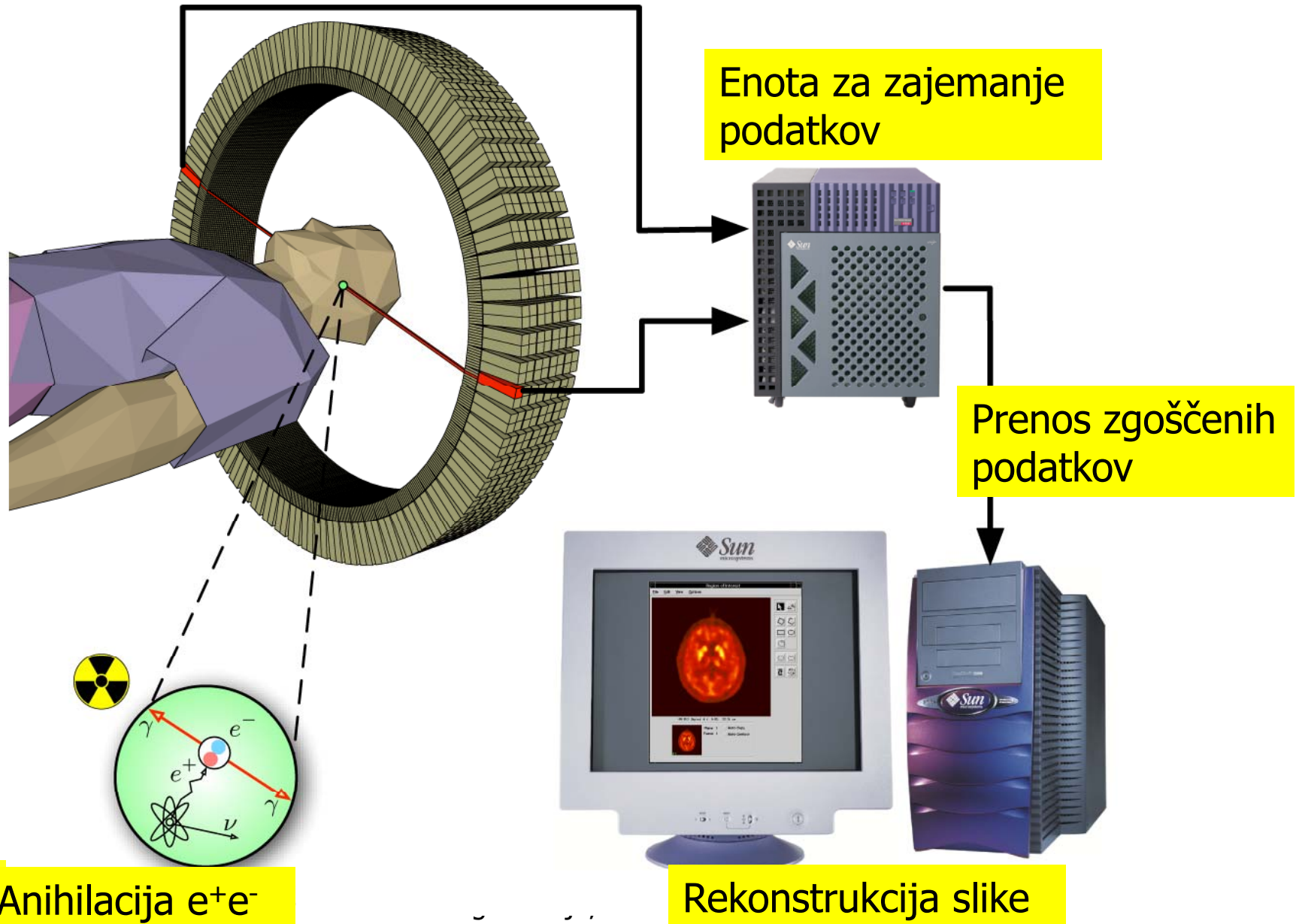
# PET: pozitronska tomografija

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

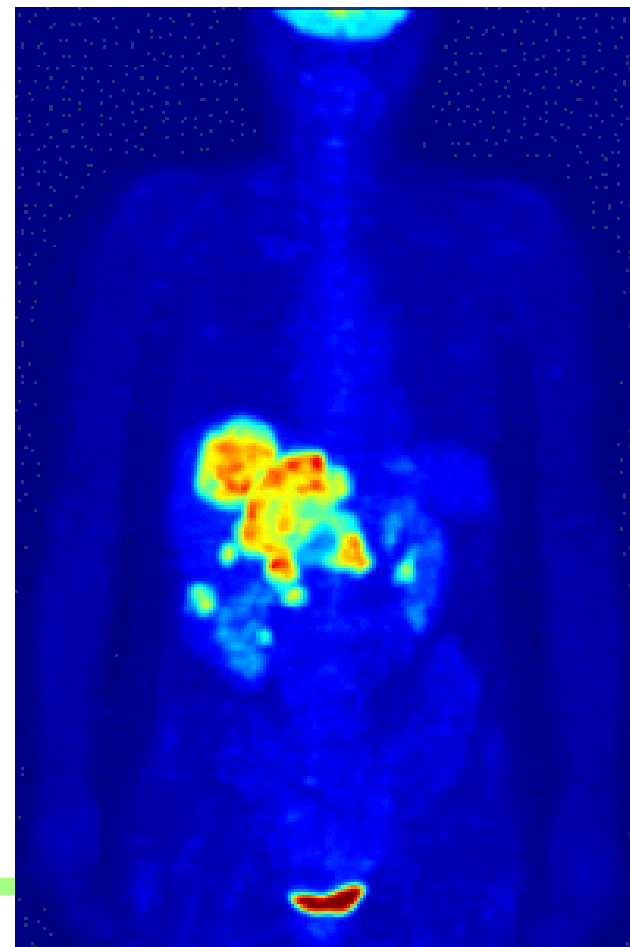
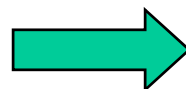
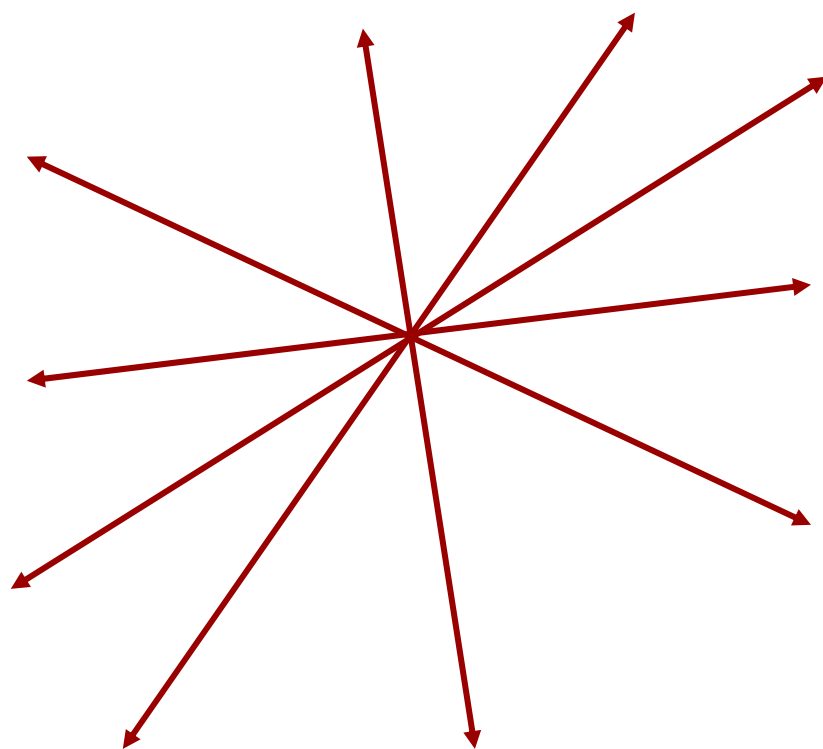


# PET: pozitronska tomografija



Univerza v Ljubljani

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

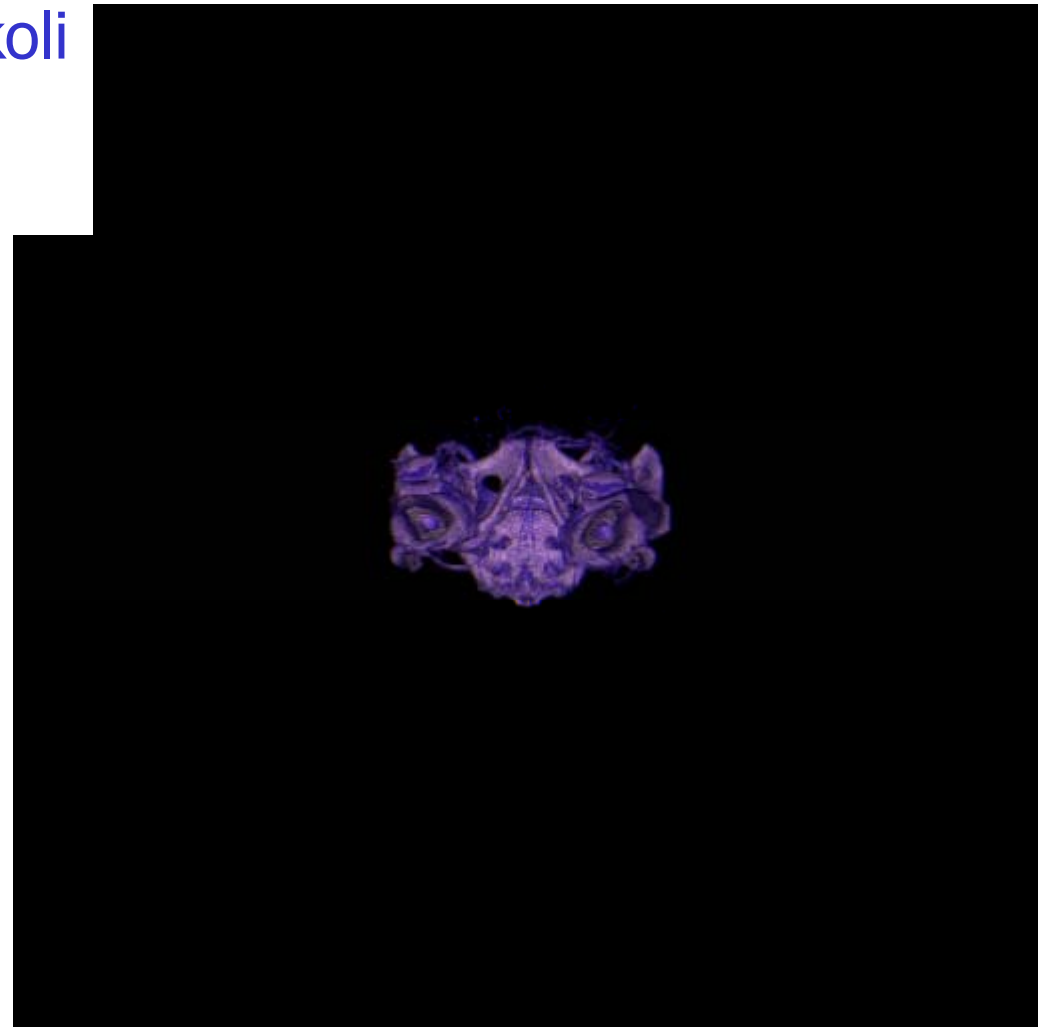
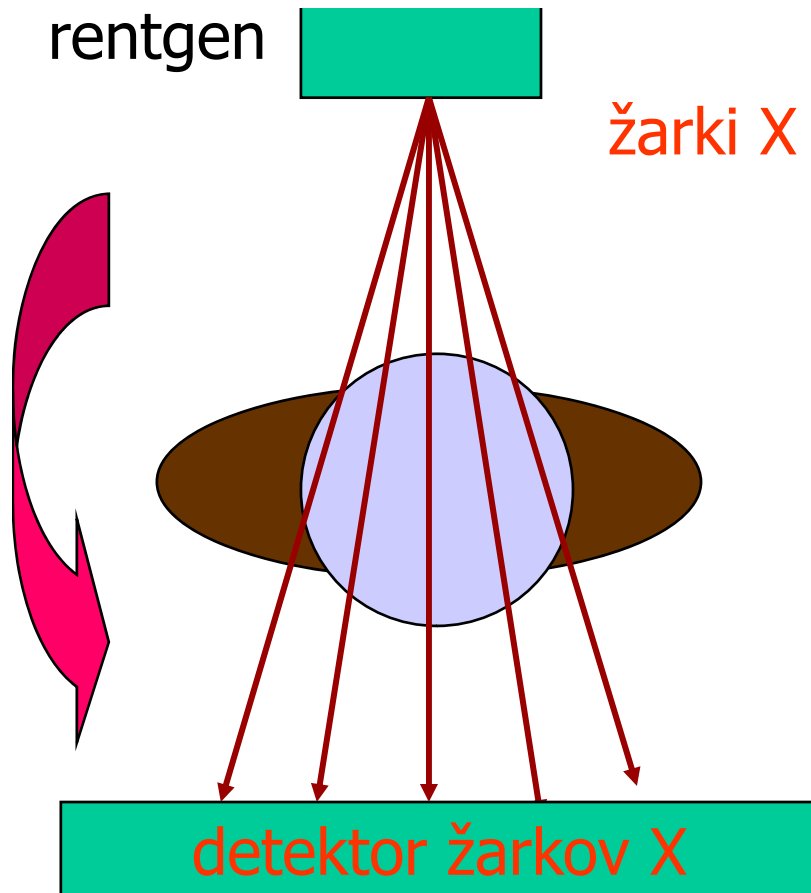


17. december 2008



# CT: tomografija z rentgenom

Telo slikamo iz večih smeri  
(rentgen in detektor vrtimo okoli  
pacienta), v računalniku  
sestavimo slike - tomografija  
rentgen





# 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.

Fizika je veda za tiste, ki jih zanima svet okoli nas, in za tiste, ki bi radi delali na področju tehnike z globljim predznanjem.

Zlepa ne bomo ostali brez odprtih vprašanj...

Če vas zanima kaj več, pogledajte na [www-f9.ijs.si/~krizan/pk\\_slo.html](http://www-f9.ijs.si/~krizan/pk_slo.html) in [www.fmf.uni-lj.si/si/](http://www.fmf.uni-lj.si/si/) ali pa se oglasite osebno ali po e-pošti [peter.krizan@ijs.si](mailto:peter.krizan@ijs.si).





Univerza v Ljubljani

# Dodatne prosojnice

---

# 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  $\sim$ nekaj T**.

