

Kam je šla antisnov?

Peter Križan

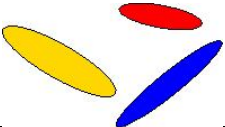
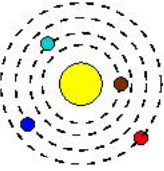

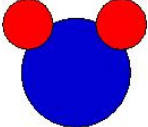
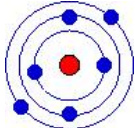
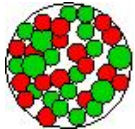
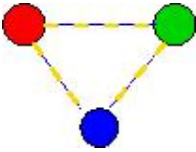

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

in

Institut Jožef Stefan

Stefanovi dnevi, IJS, 24. marec 2009

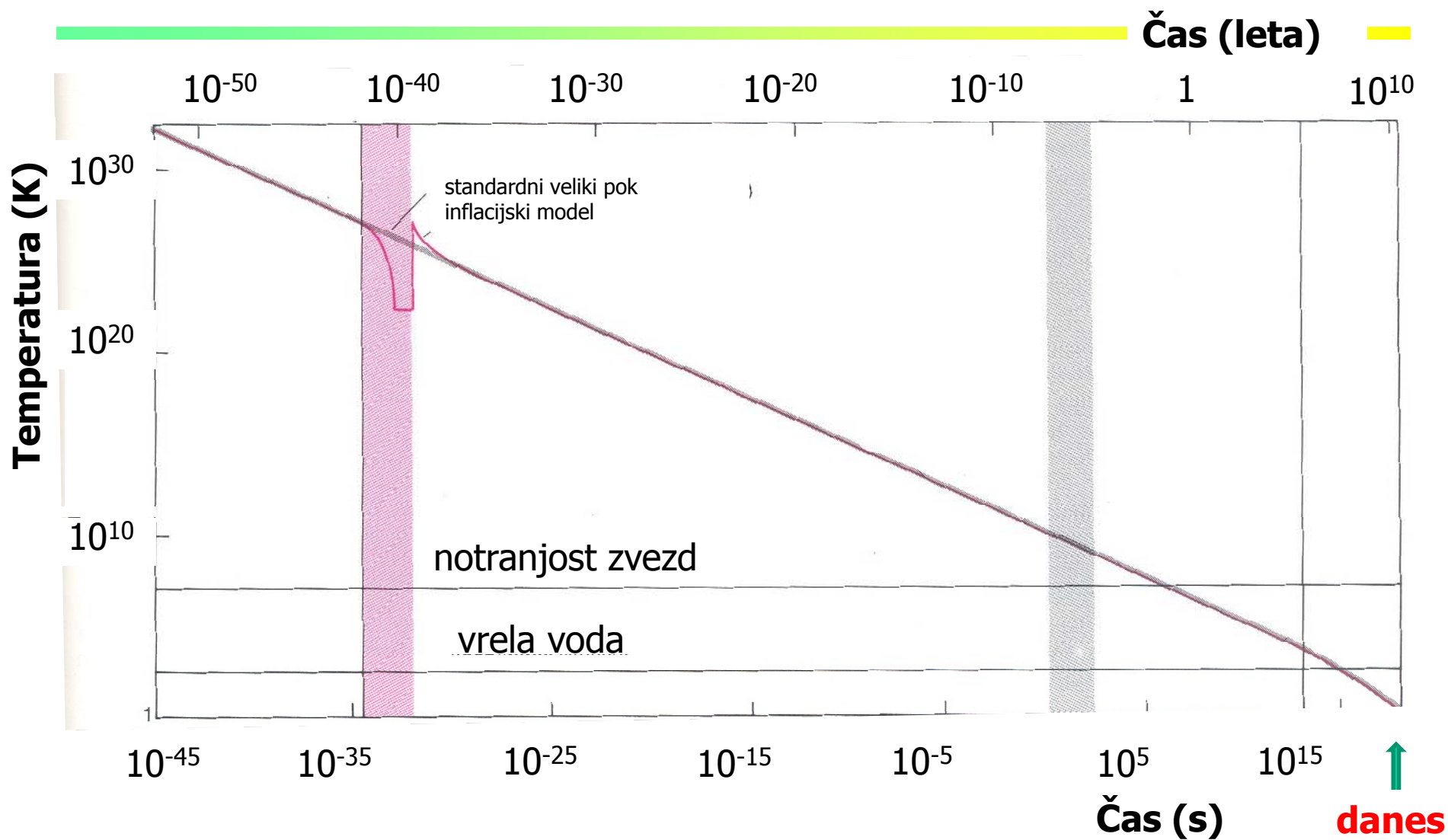
DELCI	in	SILE	po	nadstropjih	
Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
10^{21}	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
10^{14}	galaksije zvezde planeti				kozolog, astrofizik, astronom
1	živa bitja		instinkti	oхранitev vrste	biolog, sociolog
10^{-8}	molekule		elektro- magnetna	pestrost svetlobe, življenja energija	kemik, fizik
10^{-10}	atomi				atomski fizik
10^{-14}	jedra		jedrsko	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: zelo gosto → izredno visoka temperatura (podobno kot plin, ki ga stisnemo – recimo v valju motorja na notranje izgorevanje)



Temperatura vesolja



Zveza med fiziko osnovnih delcev in zgodnjim razvojem vesolja

Zgodnje vesolje: zelo gosto → izredno visoka temperatura (podobno kot plin, ki ga stisnemo – recimo v valju motorja na notranje izgorevanje)



Plin pri visoki temperaturi: molekule in atomi imajo veliko hitrost

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

→ Podobni so tudi procesi, ki so pri tem potekali

Kakšen naj bo opis osnovnih gradnikov narave?

Dve zahtevi:

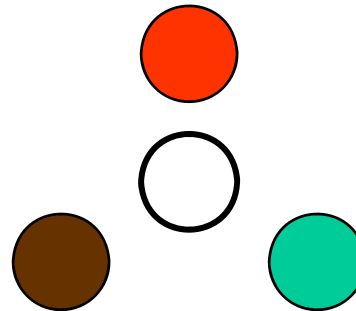
- **Preprost** (majhno število osnovnih gradnikov snovi)
- **Pravilen**

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:

	IA																	0
1	1 H	IIA										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
2	3 Li	4 Be										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
3	11 Na	12 Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII			IB	II B						
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...

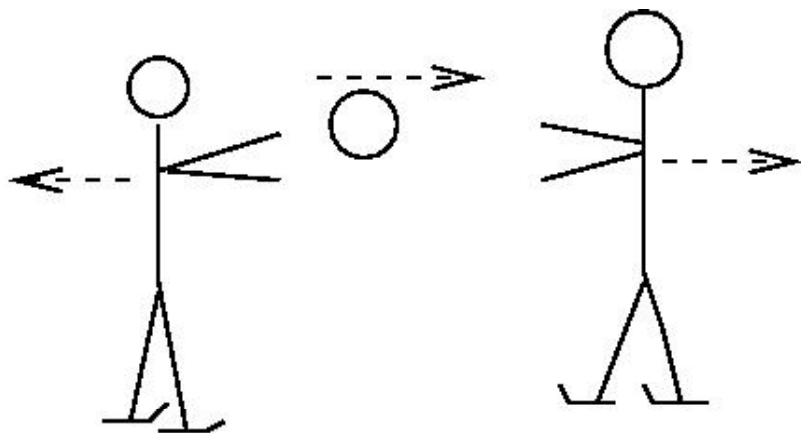
Opis osnovnih gradnikov narave - danes

Osnovni delci

Sile (interakcije) med njimi

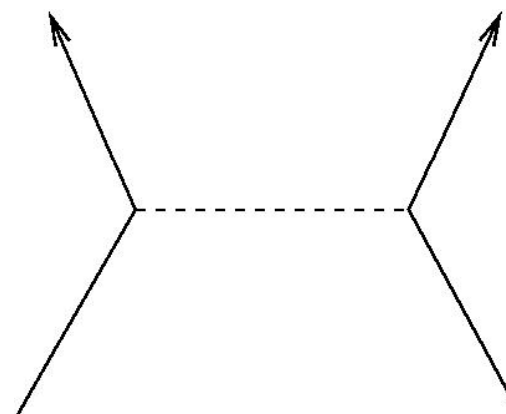
- gravitacija
- elektromagnetna interakcija
- šibka interakcija (razpad beta)
- močna interakcija (veže kvarke v jedru)

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 γ	neskončen
šibka	šibki bozoni W^+, W^-, Z^0	zelo kratek
močna	gluoni g	kratek

Standardni model 2

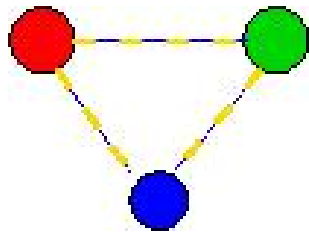
Osnovni delci	1. družina	2. družina	3. družina
kvarki	u,d	s,c	b,t
leptoni	e^-, ν_e	μ^-, ν_μ	τ^-, ν_τ

Vsak delec ima 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	$\sim 1 m_p$
Λ : uds	$1.2 m_p$

Mezoni	masa
π^+ : kvark u + antikvark \bar{d}	$1/7 m_p$
K_S : kvark d + antikvark \bar{s}	$1/2 m_p$
J/ψ : 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 družin?
→ iskanje supersimetričnih partnerjev in njihovih interakcij

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

Simetrija CP in njena kršitev

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 nastanku 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.

Simetrija CP in njena kršitev

1964: Fitch, Cronin s sodelavci odkrijeta kršitev simetrije CP pri nevtralnih kaonih

1973: Kobayashi in Maskawa: smiselna razlaga merskih rezultatov je možna samo, če obstaja **šest vrst kvarkov**. V času, ko so poznali zgolj **tri** vrste kvarkov, ki sestavljajo protone in nevtrone, je bila to drzna hipoteza.

Njena teorija je napovedala, da obstaja tesna povezava med kršitvijo simetrije CP pri različnih vrstah delcev.

1974, 1977, 1994: 21 let po objavi njune teorije so fiziki odkrili težje delce, ki so vsebovali vse tri manjkajoče kvarke.

Na **kronski dokaz** o kršitvi simetrije med temi težjimi delci in njihovimi antidelci pa je bilo potrebno počakati do začetka tega desetletja, **ko smo kršitev simetrije CP izmerili pri mezonih B.**

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

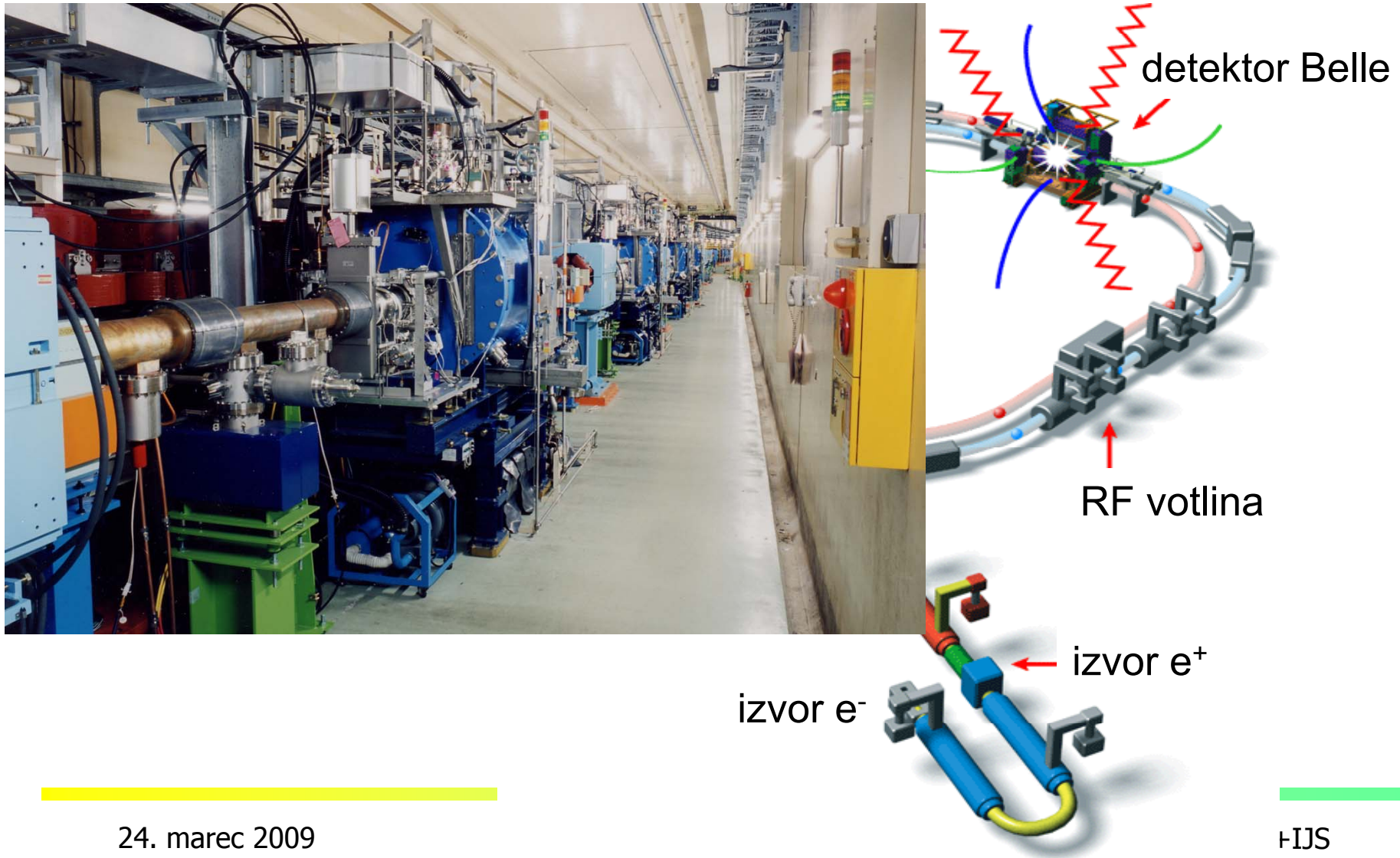
$$J/\psi \rightarrow \mu^- \mu^+$$

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

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 .

Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



24. marec 2009

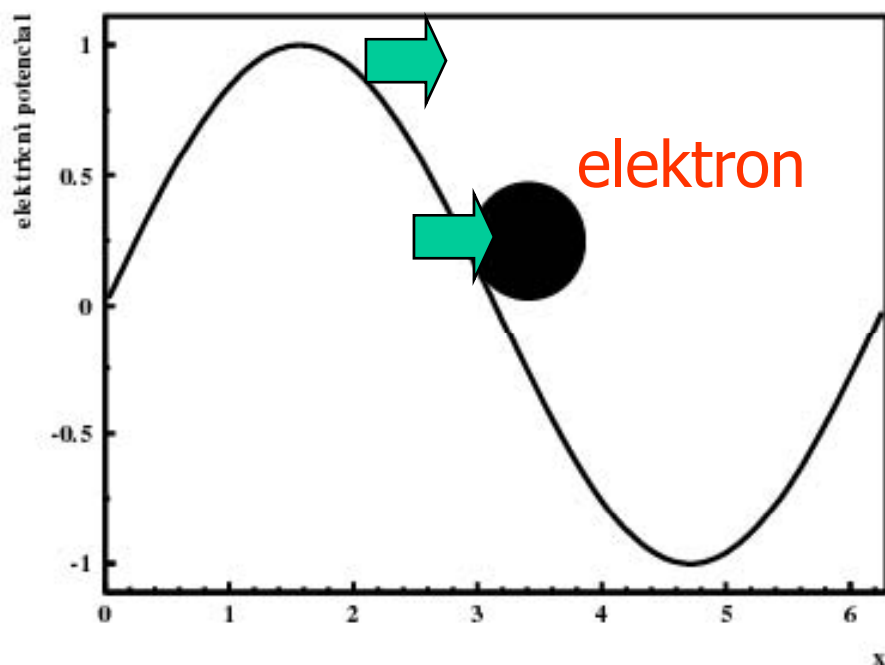
IJS

Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi



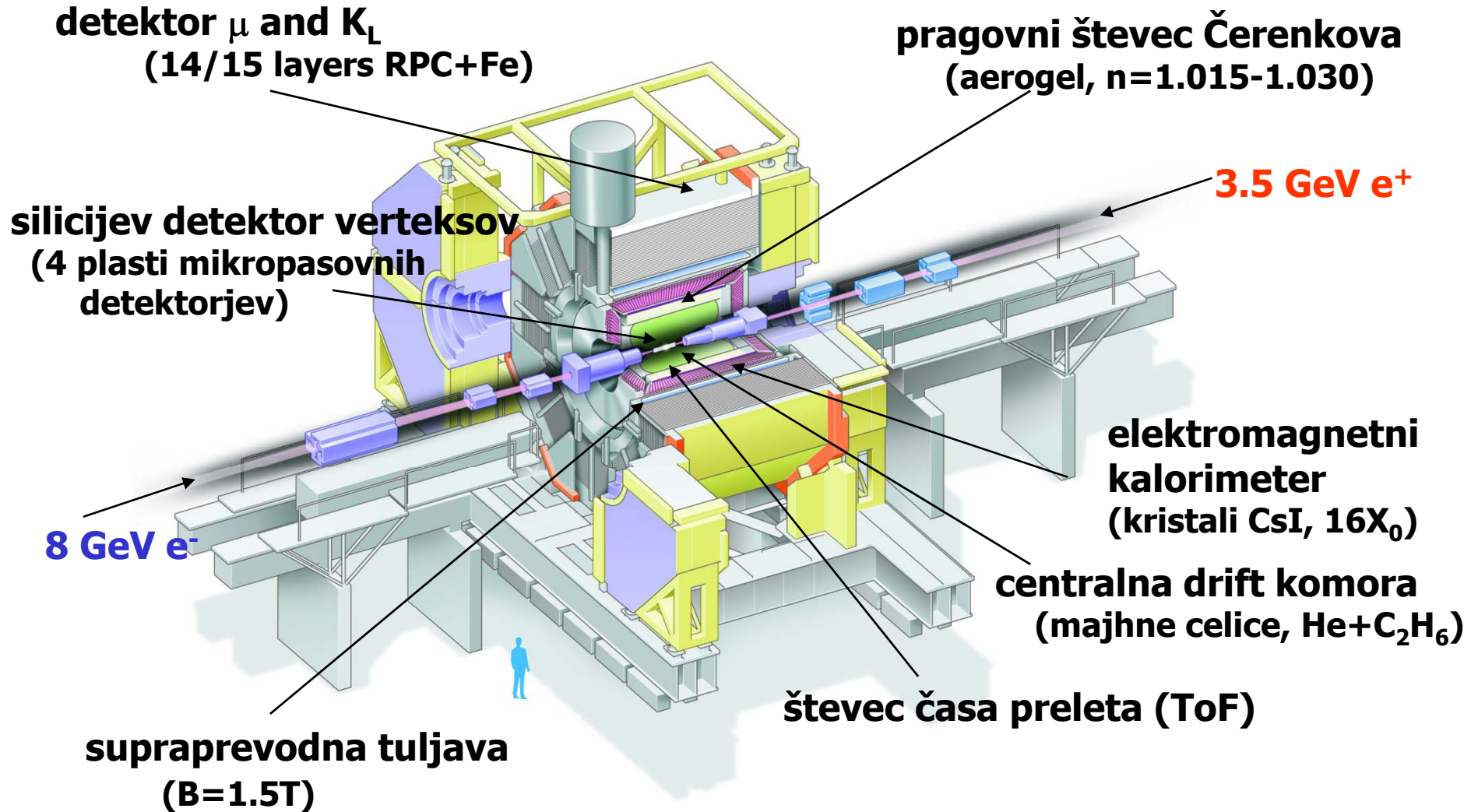
Kako pospešujemo nabite delce?

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



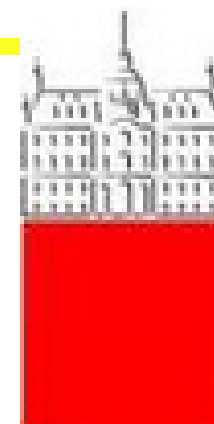
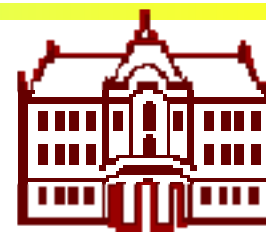
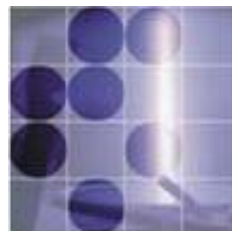
... podobno deskanju na valovih

Spektrometer Belle



Slovenska ekipa v raziskovalni skupini Belle

- Institut J. Stefan
- Fakulteta za matematiko in fiziko UL
- Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo UM
- Laboratorij za astrofiziko osnovnih delcev UNG



izr.prof.dr. B. Golob, izr.prof.dr. S. Korpar, izr.prof.dr. S. Stanič,
izr.prof.dr. M. Starič, doc.dr. T. Živko, dr. M. Bračko, dr. S.
Kupper, dr. R. Pestotnik, podiplomski študenti: M. Petrič, P.
Smerkol, A. Zupanc

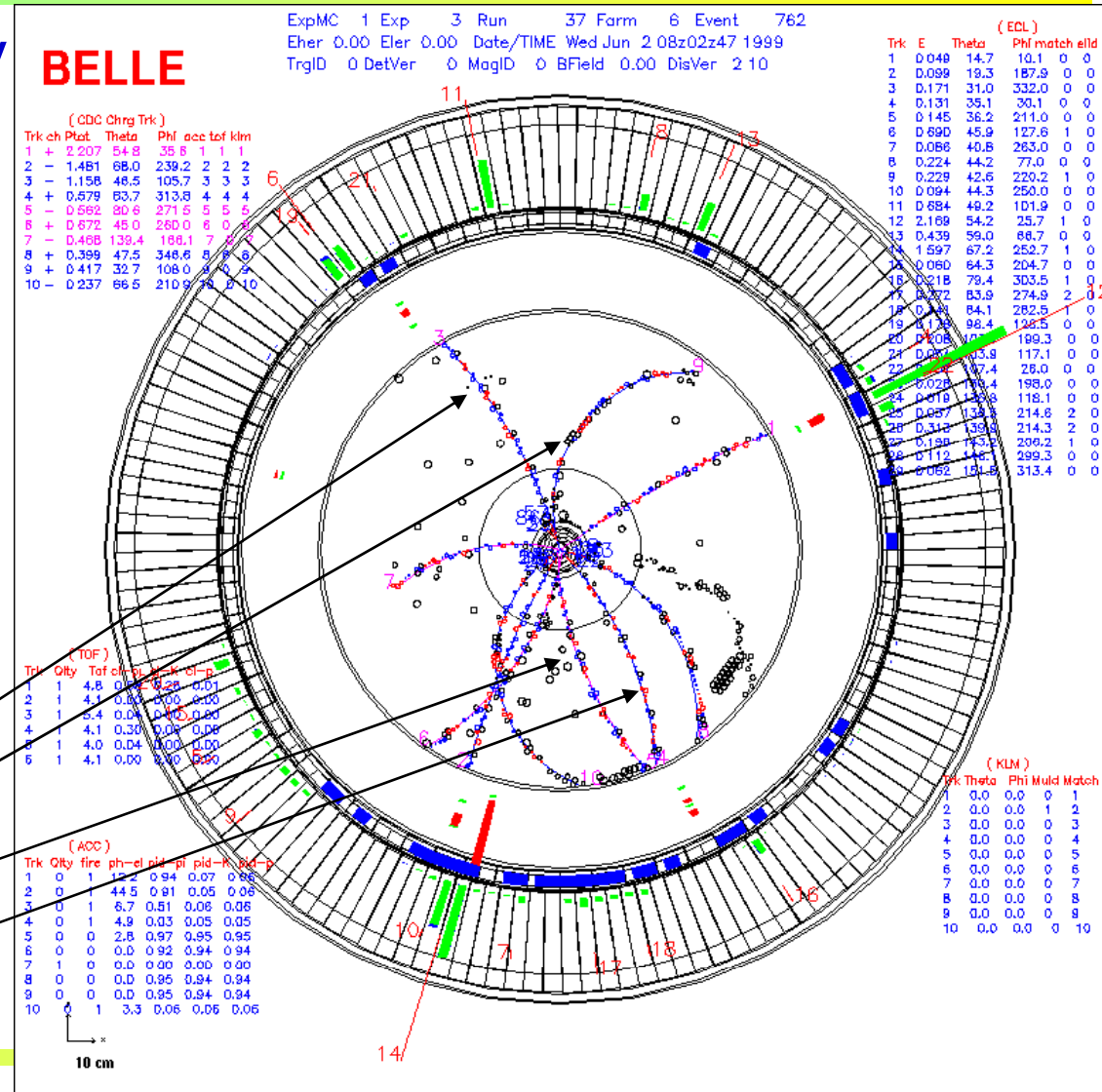
Kaj izmerimo z detektorjem?

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

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

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

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



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

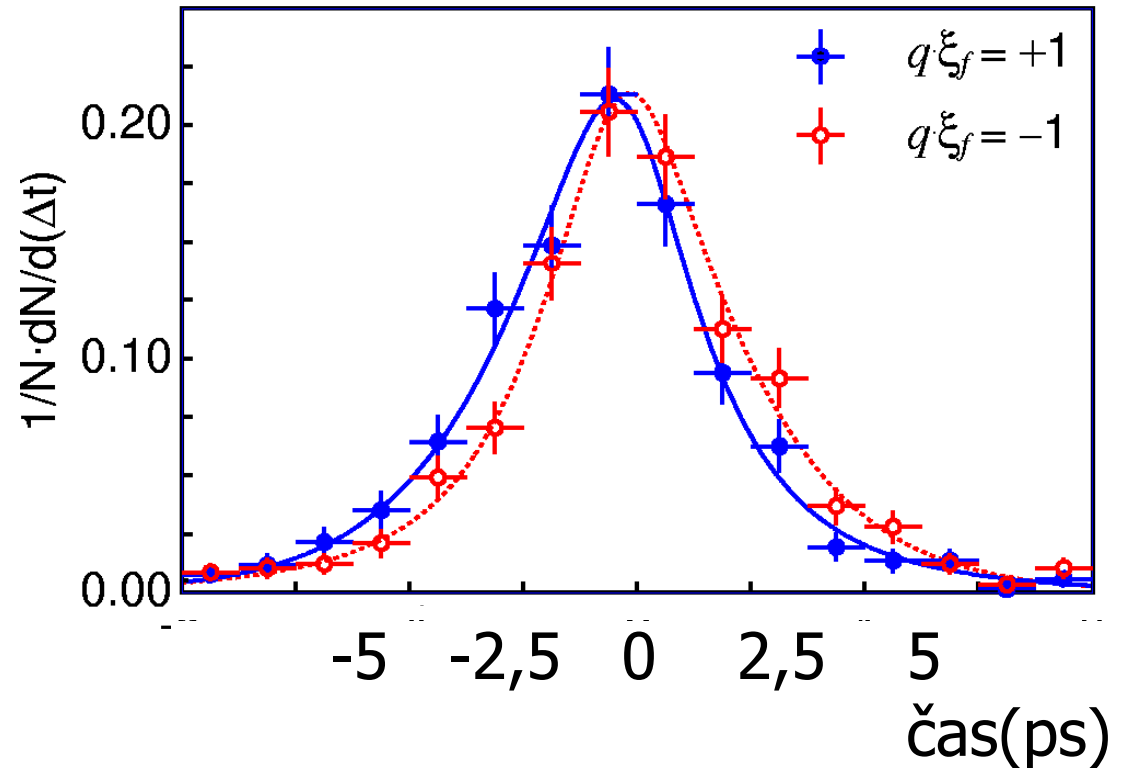


Po nekaj letih trdega dela, priprav detektorja in
pospeševalnika, in po dolgotrajnih meritvah z njima →

Rezultat meritve: simetrija CP je kršena!

Modra: časovni potek razpada anti-B

Rdeča: isto za B

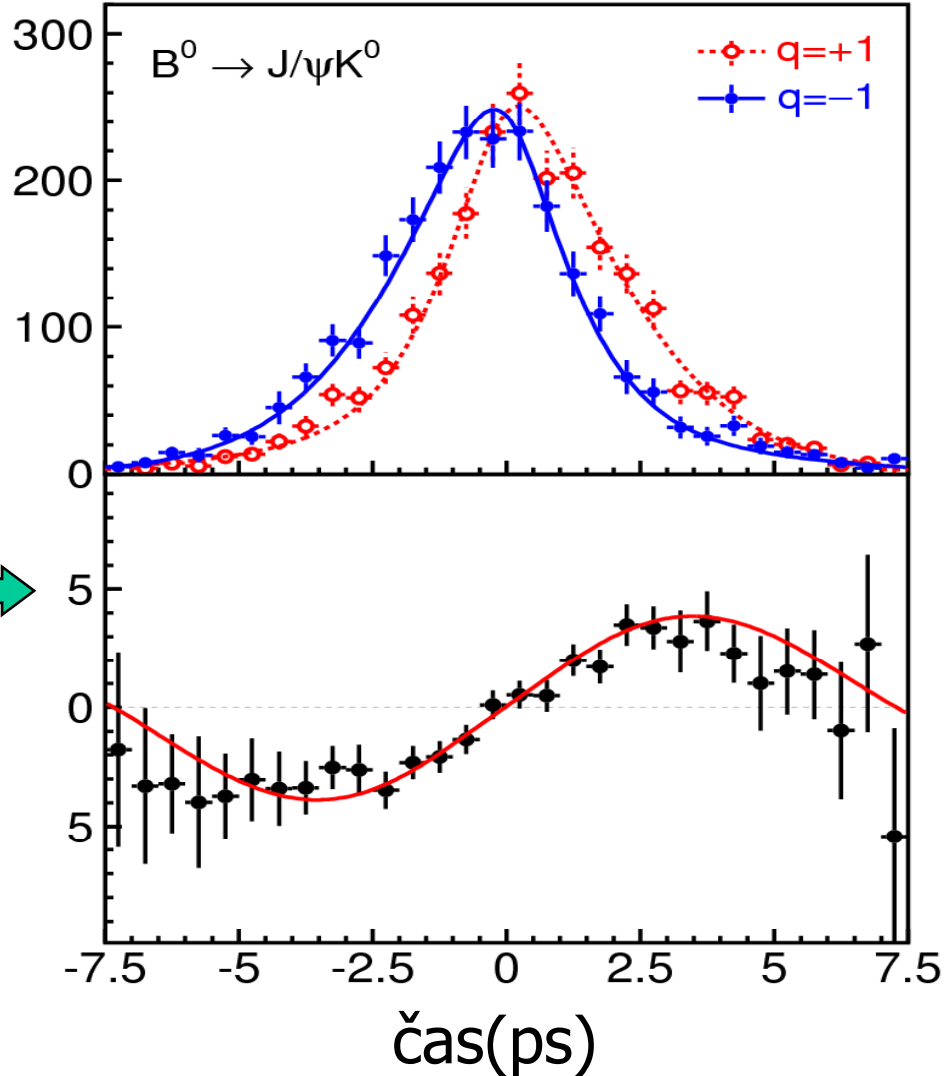
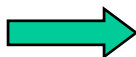


Očitna razlika med delci in anti-delci!

Rezultat meritve: simetrija CP je kršena!

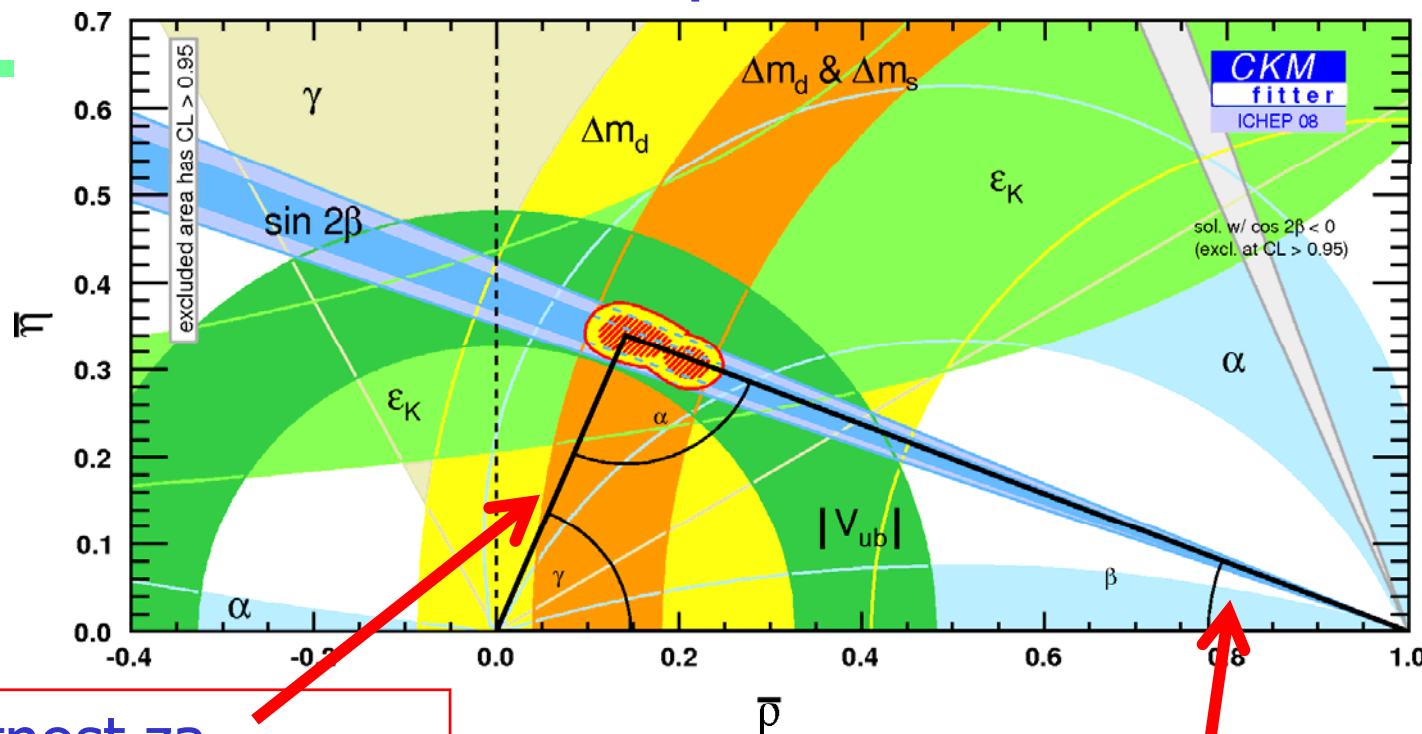
Razlika med delci in antidelci:
Modra: časovni potek razpada anti-B
Rdeča: isto za B

Relativna razlika med obema porazdelitvama: posledica kvantno-mehanskega pojava, interference med dvema prehodoma.



Amplituda oscilacije: fundamentalen parameter

Konsistentnost opisa: primerjava meritev različnih parametrov



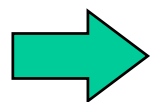
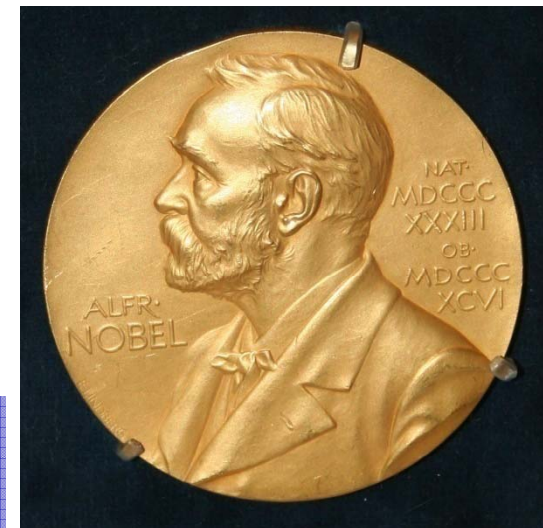
Verjetnost za pretvorbo kvarka b v kvark u \rightarrow dolžina stranice V_{ub}

Amplituda oscilacije \rightarrow kot β

\rightarrow Meritve različnih parametrov Standardnega modela potrjujejo hipotezo Kobayashija in Maskawe

Rezultat meritve kršitve simetrije CP: zmagoslavje Standardnega modela!

Razlika med delci in antidelci se ujema z napovedjo japonskih fizikov Kobayashija in Maskawe
Zveze med parametri pri različnih procesih so take, ko jih napoveduje njuna hipoteza →



Nobelova nagrada 2008!

Proslavljali pa smo tudi mi...



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:

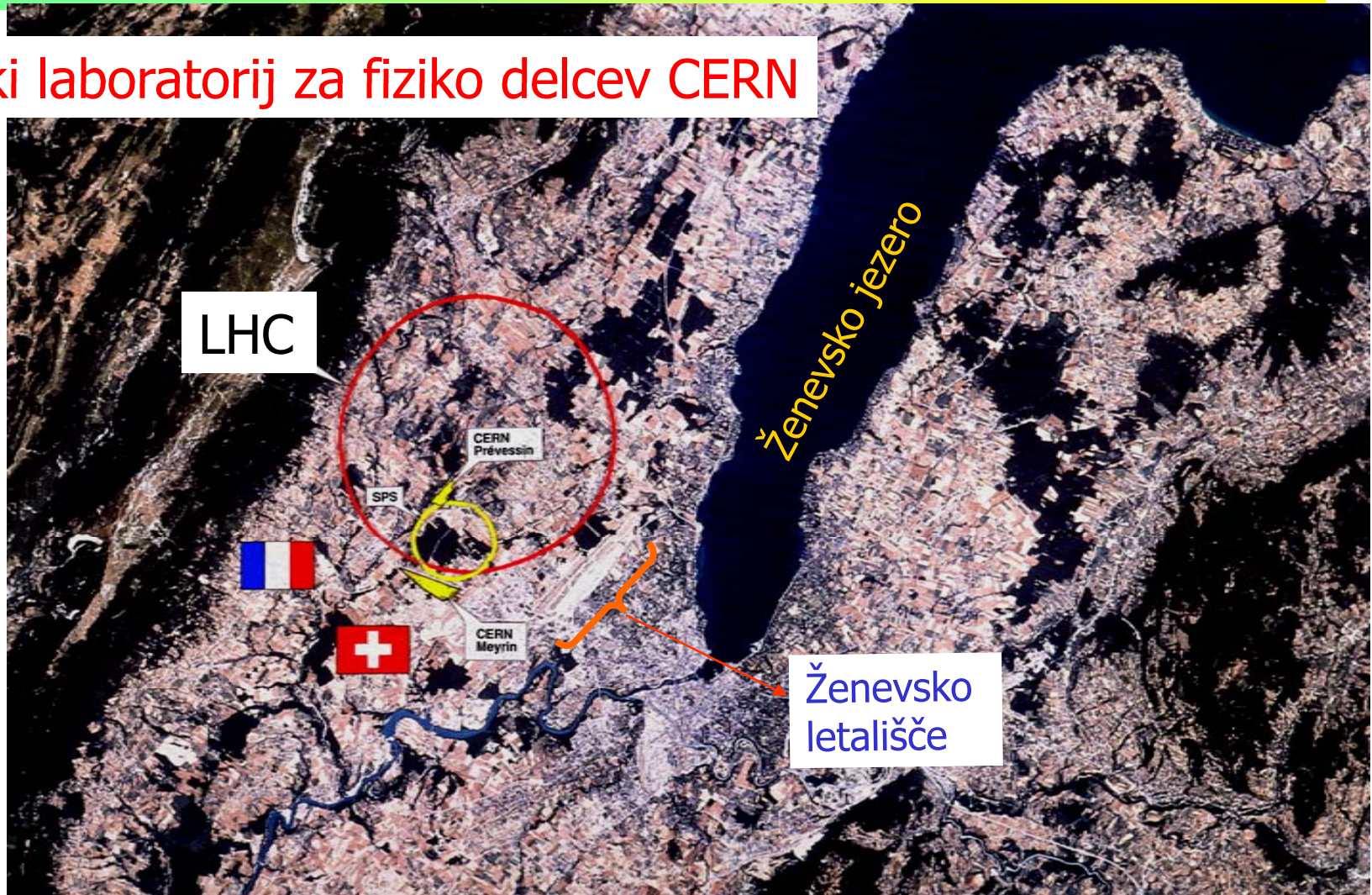
→ Higgsov bozon

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

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

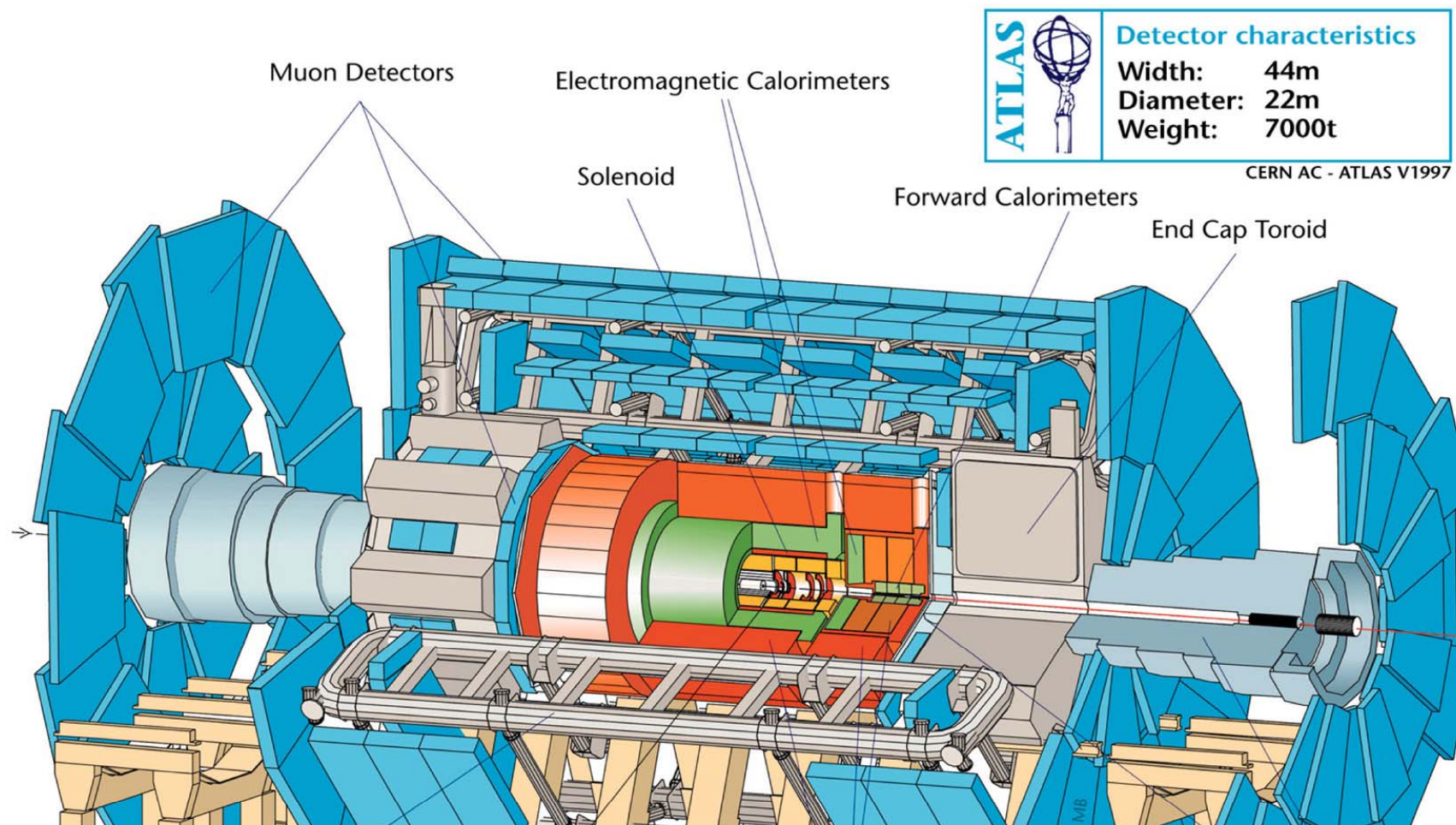
Na lovu za Higgsovimi delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



LHC = large hadron collider

Detektor ATLAS ob LHC



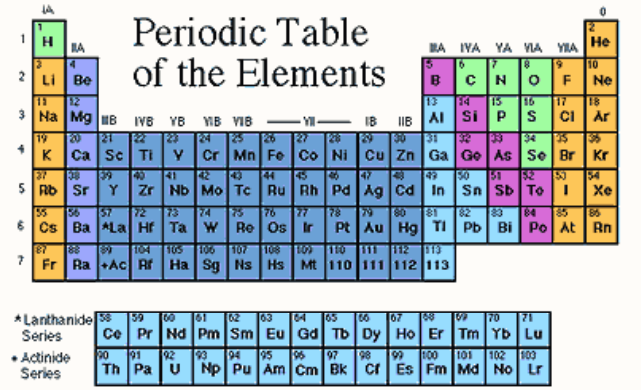
- Trkalnik so prvič pognali lani septembra
- Oba velika detektorja (ATLAS, CMS) sta nared
- Prve meritve letos jeseni
- V pričakovanju velikih presenečenj...



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)



Periodic Table of the Elements

1	2											10					
3	4											10					
11	12	13	14	15	16	17	18					18					
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104

* Lanthanide Series
* Actinide Series

→Pravilen, a s preveč osnovnimi delci?

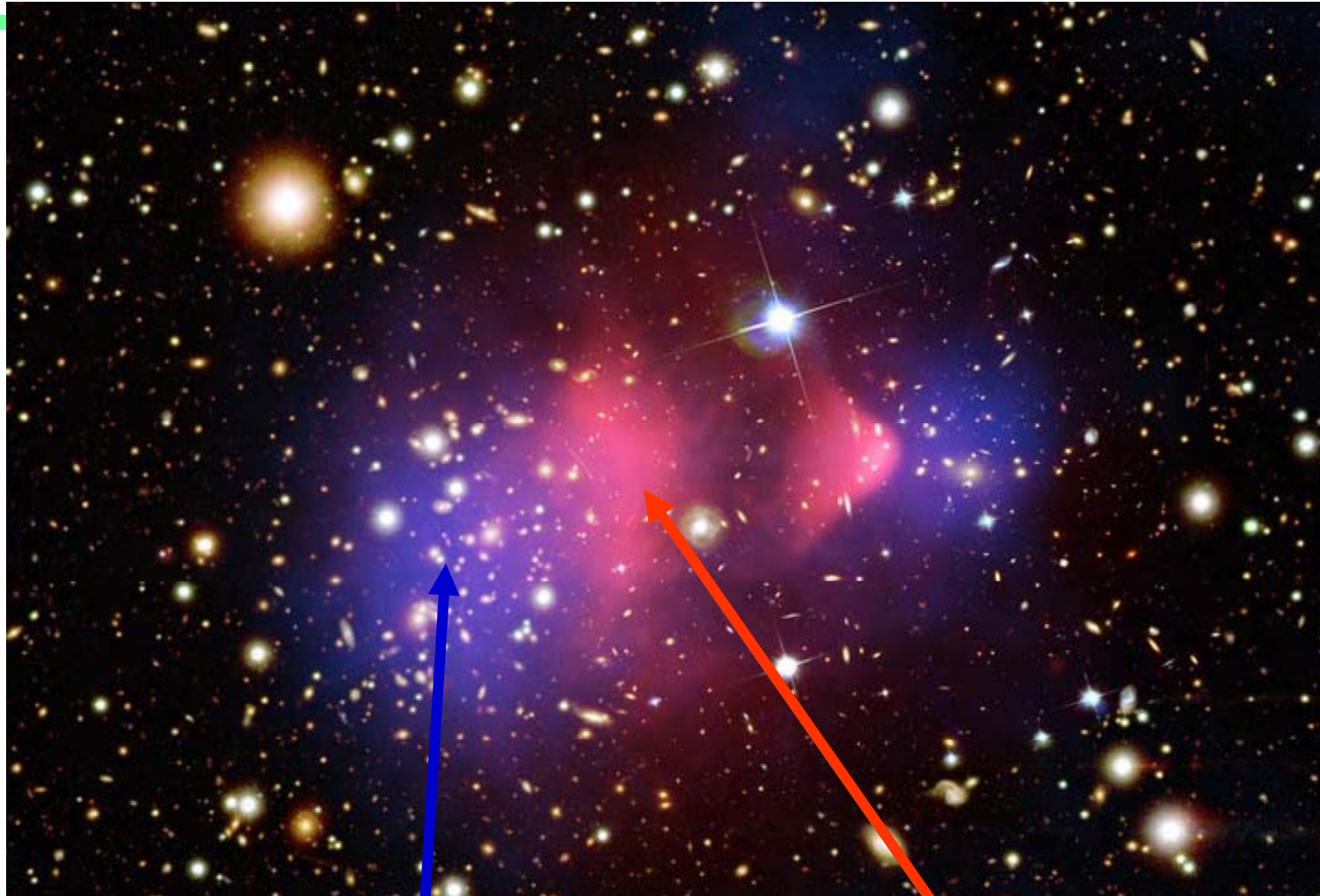
Poleg tega...

Standardni model ni dokončna teorija

- 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.

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 γ fotino $\tilde{\gamma}$

Do sedaj nismo videli še nobenega supersimetričnega partnerja običajnih delcev...

Odkritje fizikalnih pojavov izven Standardnega modela bi prineslo izjemen preskok v razumevanju sveta.

Iskanje fizike izven Standardnega modela

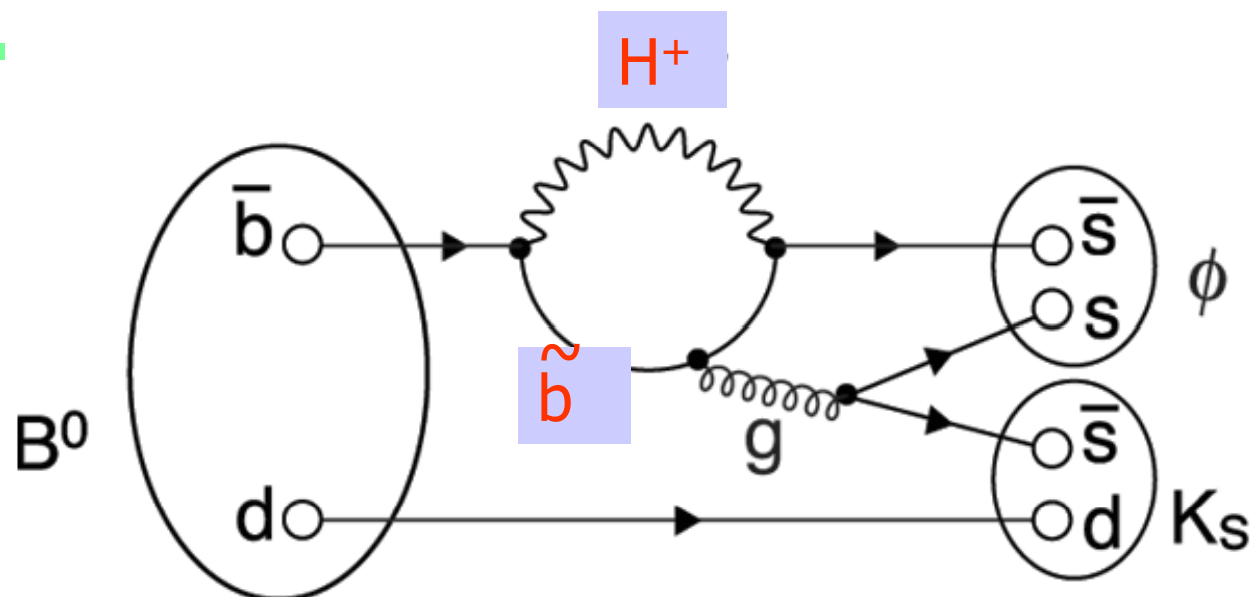
... Zato več raziskovalnih skupin na različne načine išče odstopanja od sicer izjemno natančno preverjenega Standardnega modela.

Dve možnosti:

- **Direktno iskanje** novih delcev, supersimetričnih partnerjev: delci morajo biti masivni → iskanje pri velikih energijah (LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov** – z natančnimi meritvami redkih razpadov mezonov B - pri nižjih energijah (Belle in SuperBelle).

→ Oba pristopa se dopolnjujeta.

Iskanje novih 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).

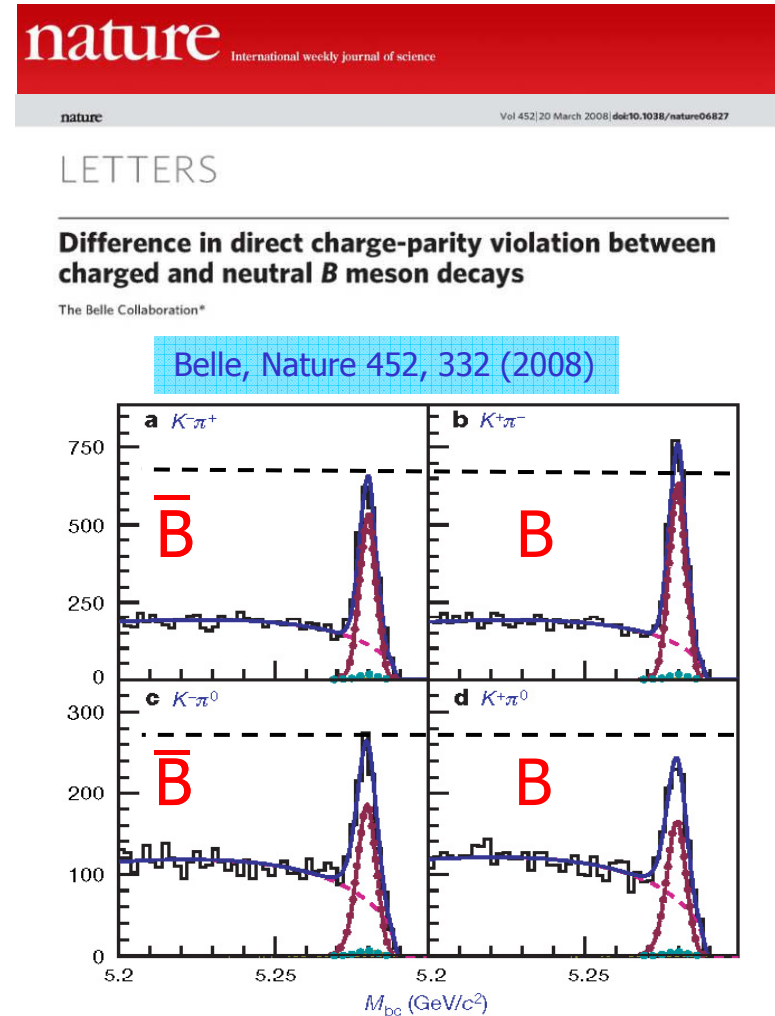
Našli smo že nekaj neskladij

Recimo pri kršitvi simetrije CP pri razpadih $B^0 \rightarrow K^- \pi^+$ in $B^- \rightarrow K^- \pi^0$

Kršitev simetrije CP bi morala biti pri obeh procesih **enaka**. Meritve pa kažejo, da se bistveno razlikujeta.

Rezultat smo lani objavili v elitni naravoslovni reviji **Nature**.

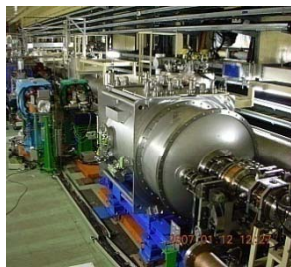
To še ni znak, da smo zares odkrili delce izven Standardnega modela, je pa del mozaika, ki kaže na to.



Projekt SuperBelle

Namen: izboljšati natančnost meritev – še boljši detektor in še bolj zmogljiv pospeševalnik

Nove meritve od leta 2013 dalje → pomemben vpliv na fiziko osnovnih delcev, podobno kot Belle do sedaj



Nova RF votlina

8GeV e^-

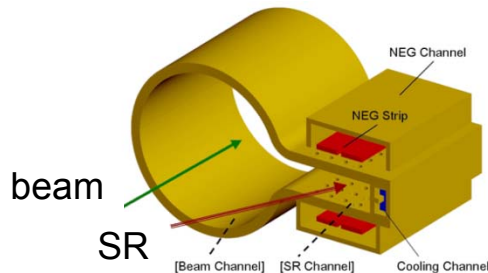
Boljše fokusiranje žarkov v interakcijski točki

Slovenska raziskovalna skupina je med vodilnimi nosilci tega projekta.

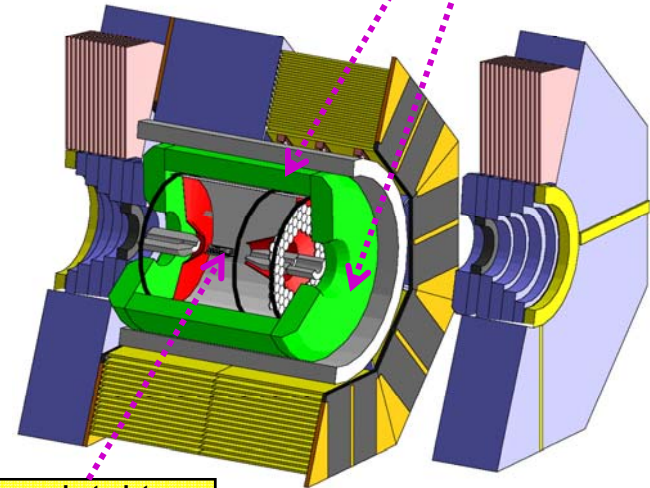
Nova zarkovna cev

RF napajanje žarkov

Obroč za e^+



Izboljšana identifikacija nabitih delcev



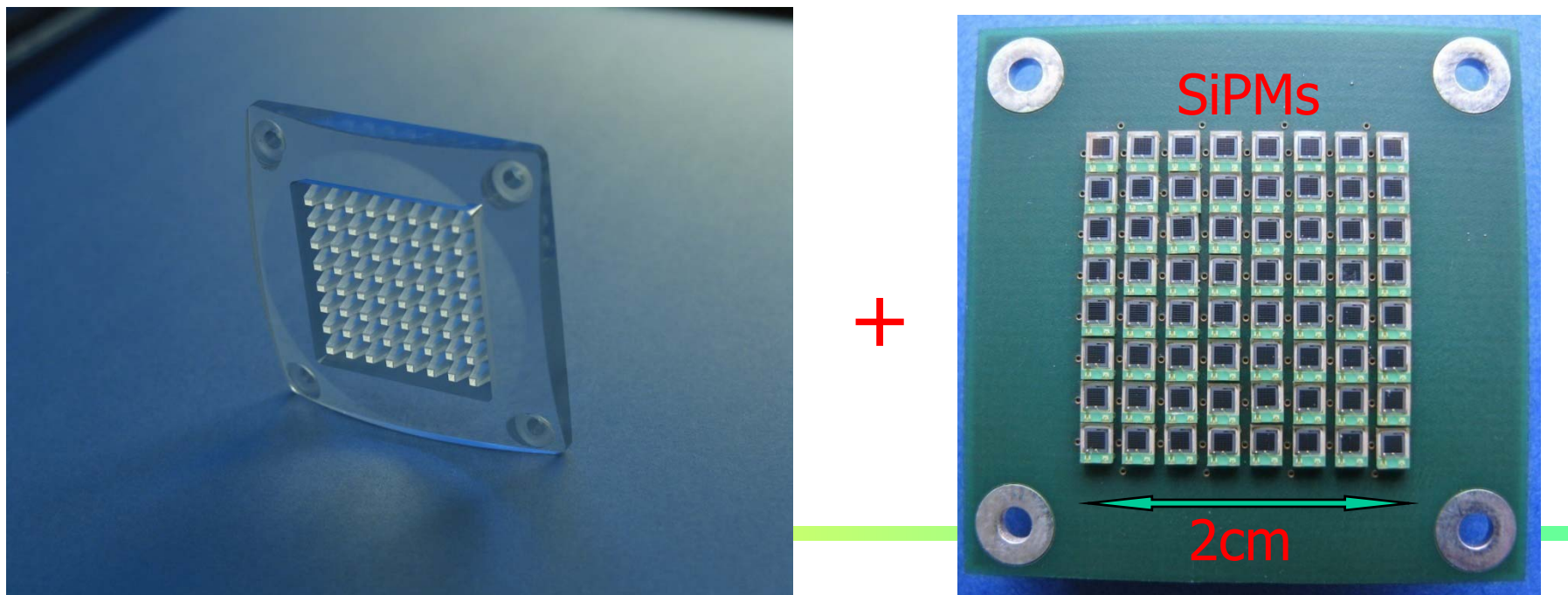
Nov detektor interakcijske točke

Koordinacija izvedbe in programa projekta

Razvoj novega svetlobnega senzorja

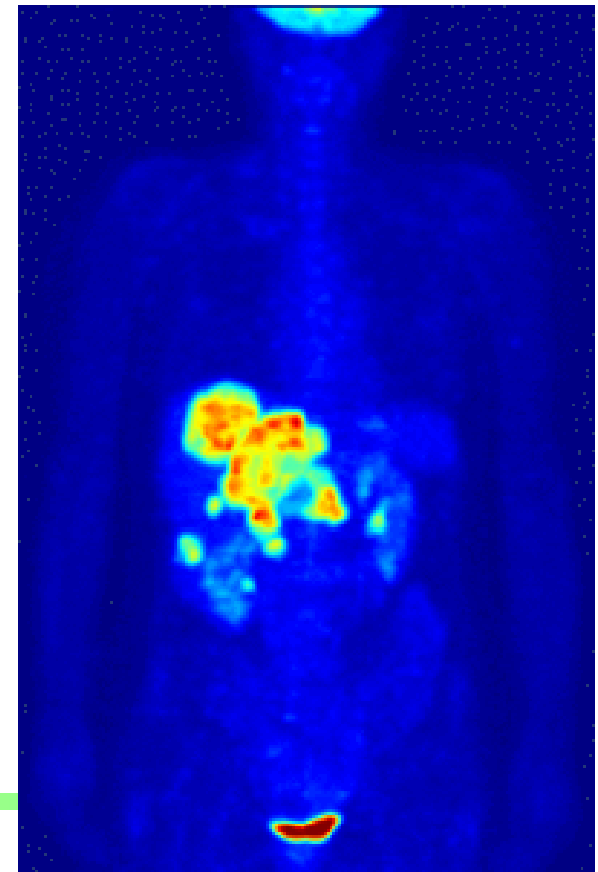
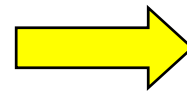
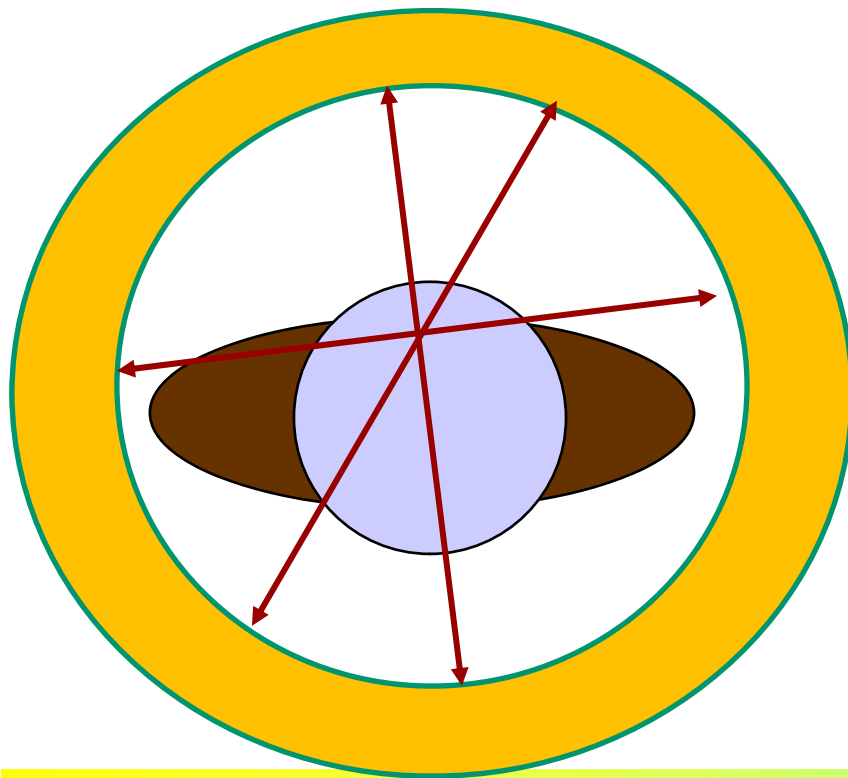
Merske metode fizike osnovnih delcev se včasih posreči predelati tako, da so uporabne na drugih področjih, recimo v medicinski diagnostiki.

Primer: razvili smo nov tip **senzorja svetlobe** za detektorje obročev Čerenkova → možna uporaba pri slikanju s **pozitronsko tomografijo (PET)**



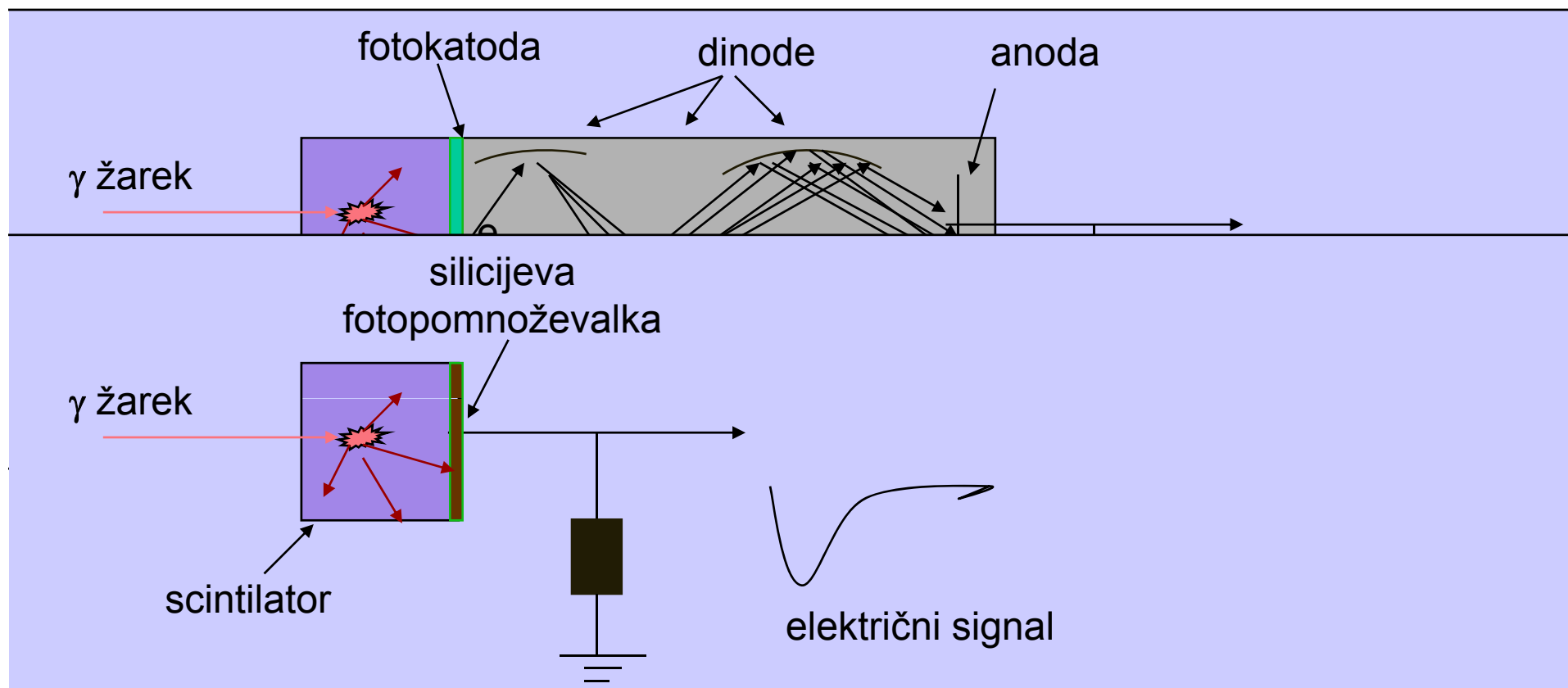
PET: pozitronska tomografija

Pacientu vbrizgamo v kri snov, v katero smo vgradili **radioaktivni fluor**; pri njegovem razpadu nastaneta dva žarka gama. Na mestih, kjer se bo nabralo več te snovi, bo nastajalo več parov žarkov γ . Zaznamo jih s kombinacijo kristal – svetlobni senzor



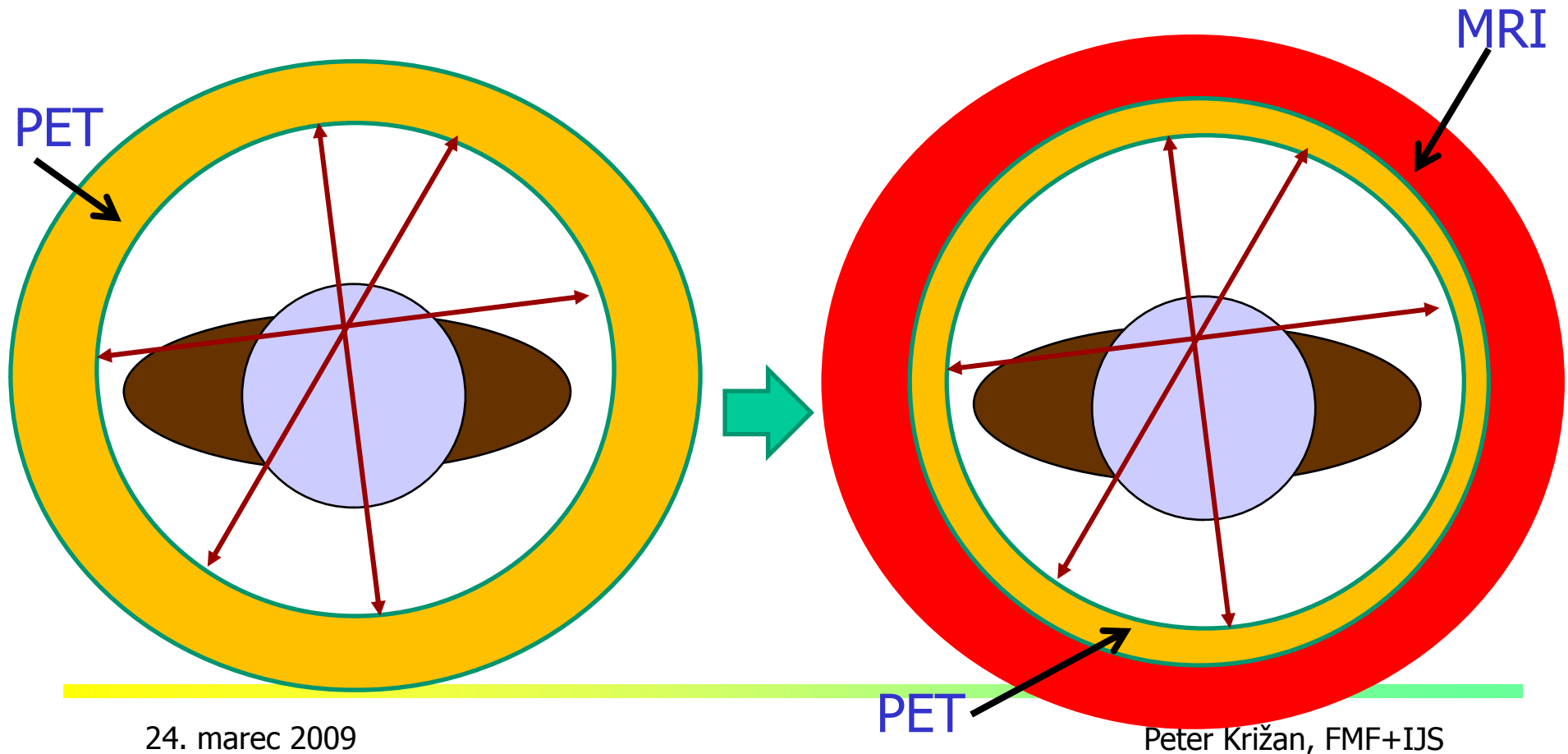
PET z novo vrsto detektorja

Silicijeva fotopomnoževalka: nova vrsta detektorja scintilacijski svetlobe, ki smo ga razvili za meritve v fiziki osnovnih delcev: → **bistveno manjša** od obstoječih detektorjev, **ne potrebuje visoke napetosti**, **deluje v velikih magnetnih poljih** (nekaj T).



PET z novo vrsto senzorja

Omogoča sočasno slikanje z **magnetno resonanco in PET** – pomembna izboljšava za hitro in učinkovito diagnostiko!



Zaključek

Fizika osnovnih delcev je v zadnjih desetih letih naredila velik korak naprej: Standardni model se je utrdil kot zelo natančen opis osnovnih gradnikov snovi pri energijah, do katerih sežejo naši pospeševalniki

Kršitev simetrije CP je v skladu z napovedjo Kobayashija in Maskawe – je pa premajhna, da bi pojasnila naš obstoj.

V pripravi je naslednja generacija poskusov, ki nam bo odprla pogled daleč nazaj v razvoju vesolja.

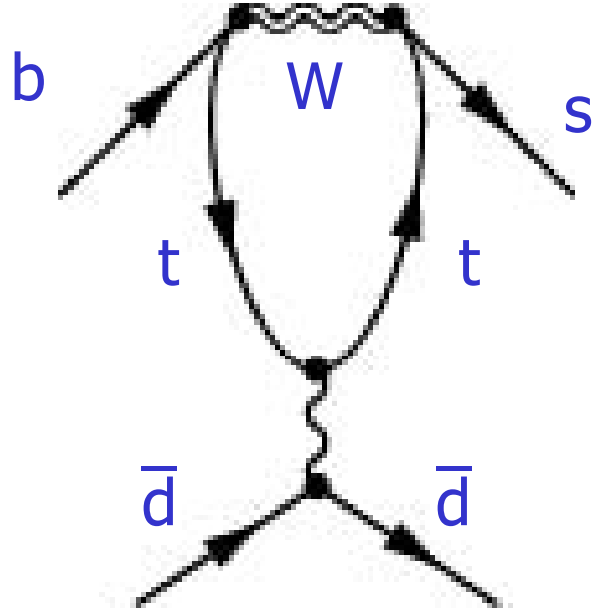
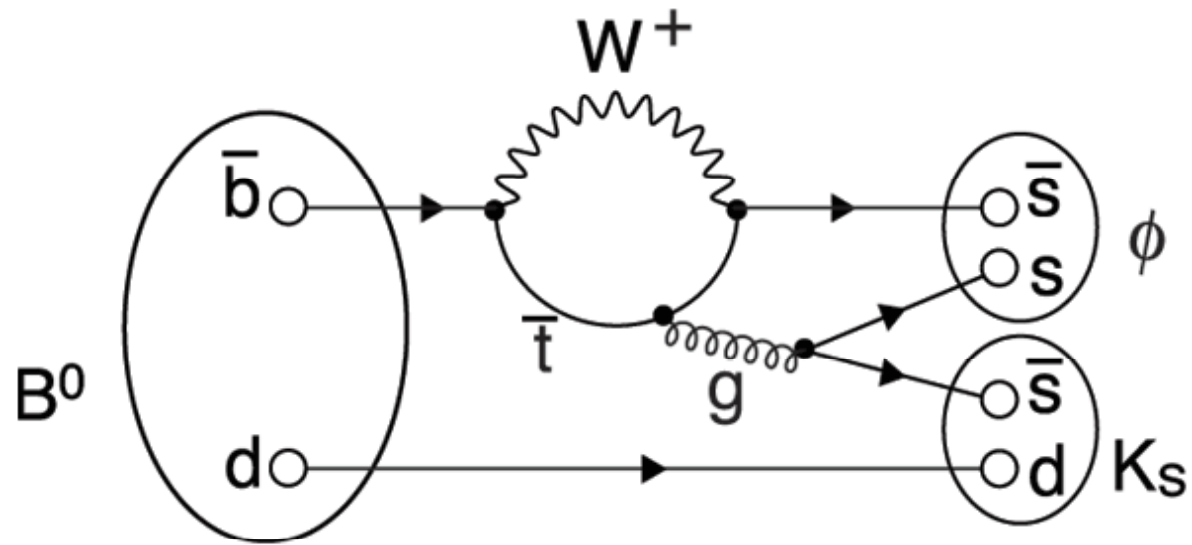
Slovenski fiziki smo v prvih vrstah iskanja odgovorov na nova vprašanja, posredne rezultate svojih raziskav poskušamo uporabiti pri napredku v medicini in varovanju okolja.

Pogoji za razliko v količini snovi in anti-snovi v današnjem vesolju

A. Saharov (1967): za opaženo dramatično razliko v količini snovi in antisnovi so morali v razvoju vesolja biti izpolnjeni trije pogoji:

- Delci se obnašajo malo drugače od antidelcev
- Barioni (n.pr. proton) niso stabilni delci
- Vesolje je v teku svojega razvoja šlo skozi neravnovesno fazo

Pingvinski diagrami



Razlika v kršitvi simetrije CP pri razpadih B^+ in B^0

CP asimetrija

$$\mathcal{A}_f = \frac{N(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) - N(B \rightarrow f)}{N(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) + N(B \rightarrow f)}$$

V Standardnem modelu pričakujemo, da je asimetrija enaka pri obeh razpadih

$$\mathcal{A}_{K^\pm \pi^\mp} \approx \mathcal{A}_{K^\pm \pi^0}$$

Izmerimo pa:

$$\mathcal{A}_{K^\pm \pi^\mp} = -0.094 \pm 0.018 \pm 0.008$$

$$\mathcal{A}_{K^\pm \pi^0} = +0.07 \pm 0.03 \pm 0.01$$

$$\Delta\mathcal{A} = +0.164 \pm 0.037$$

24. marec 2009

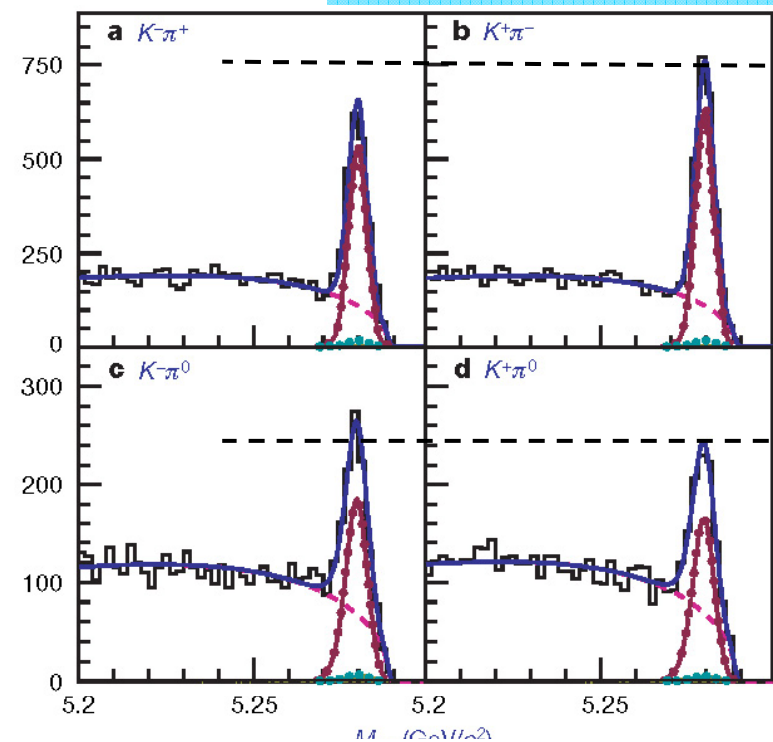


LETTERS

Difference in direct charge-parity violation between charged and neutral B meson decays

The Belle Collaboration*

Belle, Nature 452, 332 (2008)



~1 od 100.000 mezonov B razpade na ta način