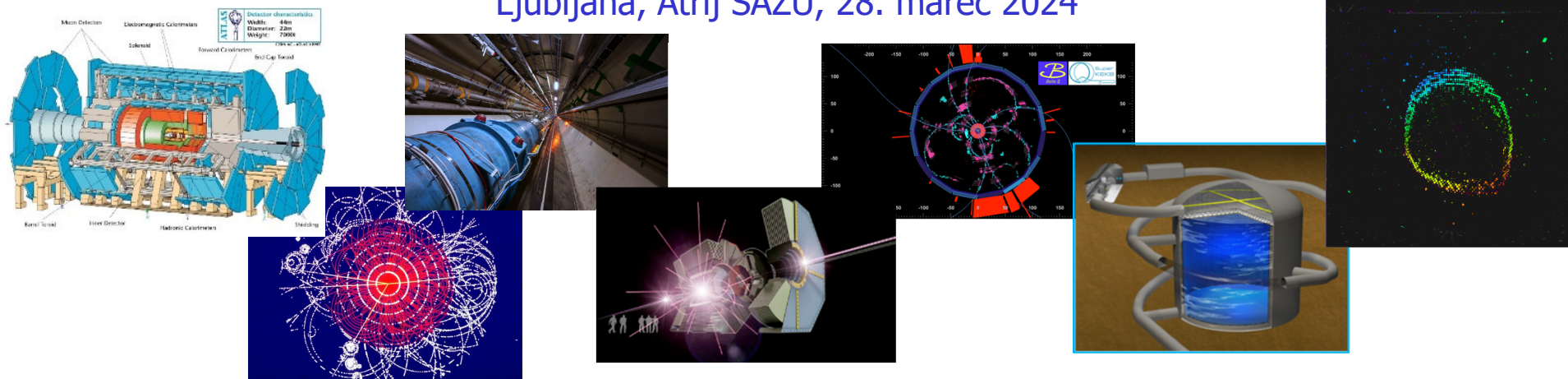


Simpozij ob 90-letnici PDS in revije Proteus
Devetdeset let znanosti in naravoslovja – tehnološki, družbeni in okoljski odmev
Ljubljana, Atrij SAZU, 28. marec 2024



Fizika jedra in delcev

Peter Križan

FMF UL in IJS



FMF

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za matematiko in fiziko



Institut
"Jožef Stefan"
Ljubljana, Slovenija



Fizika jedra in delcev v Proteusu

... že od prve številke!

Lavo Čermelj: Sodobna alkemija

- o radioaktivnosti,
- sestavnih delih atoma, atomskih jedrih,
- zlivanju jeder (fuziji) kot energijskem viru bodočnosti

LAVO ČERMEJLJ:

SODOBNA ALKIMIJA.

S kakšnim čarom je bila in je še danes ovita doba alkimistov! Le najtrdnjše prepričanje in slepa vera v možnost, rešiti stavljeno si nalogo, sta jim lahko dali potrebno silo, da so prenesli vse neuspehe in prevare. Sodobna znanost je bolj trezna in oprezna. Radi tega ji manjka tudi oni tajinstveni čar, s katerim se je obdajala alkimijska. Vprav radi tega pa so uspehi sodobne znanosti neprimerno večji.

Glavni cilj alkimistov je bil, ustvariti iz manj vrednih snovi najbolj cenjeno in najzlahotnejšo — zlato. Ker se je vse tedanje znanje o materiji opiralo na Platonove in Aristoteleve nauke, se jim je morala zdeti taka pretvorba povsem mogoča. Zadostovalo bi na primer, dati živemu srebru, ki jih je radi svojih posebnih svojstev gotovo najbolj mikal, zlatorumeno barvo in trdnost in zlato bi bilo gotovo.

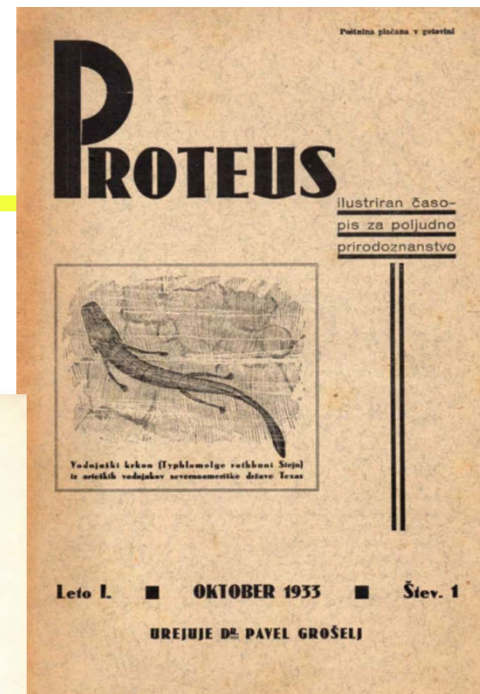
Ogromno je bilo število poizkusov in veliko število poizkuševalcev in poizkušancev. Zanimali so se zanje iz umljivih razlogov celo cesarji in papeži. Zaželenega uspeha pa vendar ni bilo. Iz ogromnega negativnega materiala, ki se je tako s časom nabral, pa so se porodili osnovni nauki moderne kemije. Neposrečeni poizkusi alkimistov so neposredno vodili do pravičnega pojmovanja materije in prvin. Novo naziranje, da tvori namreč podlago vsega materialnega sveta množstvo prvin, ki so strogo različne druga od druge in ki nimajo prav nič skupnega med seboj, je nastalo lahko samo na razvalinah brezuspešnega trudapolnega dela alkimistov.

Kemija je nastala na podlagi alkimije, toda njeni osnovni nauki so bili v najostrejšem nasprotju z vodilno težnjo alkimistov, pretvarjati namreč manj vredne snovi v zlato. Tembolj se moramo radi tega čuditi, da je nadaljnji razvoj kemije docela ogledil prepad, ki je ločil kemijo od alkimije, in da se nam zdi danes težnja alkimistov povsem verjetna in naravna. Še pred tridesetimi leti bi vsakogar, ki bi zagovarjal možnost, proizvajati zlato iz drugih prvin, smatrali za blaznega. Danes je ta ideja povsem v skladu z našimi teorijami o prvinah in njenih najmanjših delcih — atomih.

Mejnik v nauku o materiji je odkritje radioaktivnosti. Preučevanje radioaktivnih pojavov je temeljito razbistrilo pojme o prvinah in atomih.

Danes vidimo v vsakem atomu nekako osolnčje v malem ali bolje: v najmanjšem obsegu. V vsakem atomu imamo solnce — pozitivno električno jedro, okoli katerega kroži večje ali manjše število silno majhnih negativno električnih planetov — elektronov. Tako osolnčje v malem merilu meri le desetmilijonski del milimetra in še manj. Elektroni so vsi med seboj enaki, in sicer ne samo v enem in istem atomu ali v atomih iste prvine, temveč v vseh atomih vseh prvin. Nasprotno pa so jedra v atomih ene in iste prvine vsaj do neke meje vsa enaka, toda različna pri različnih prvinah. Napačna pa bi bila misel, da gre za toliko snovno različnih vrst jeder, kolikor je prvin. Dognali so, da so tudi jedra zgrajena iz bolj enostavnih delov in sicer iz jeder najlažje prvine, vodika, ki jih imenujemo protone, in iz elektronov. Vsak proton izenači električnost enega elektrona. V jedru je vedno več protonov kot elektronov, tako da je jedro na zunaj pozitivno električno. Število protonov določuje v glavnem težo atoma. Elektroni so namreč 2000krat lažji

17



Peter Križan



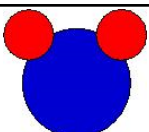
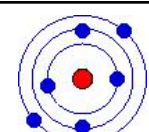
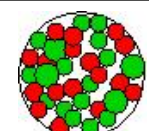

Vsebina

Uvod

Malo zgodovine

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

Odprta vprašanja – kam gremo?

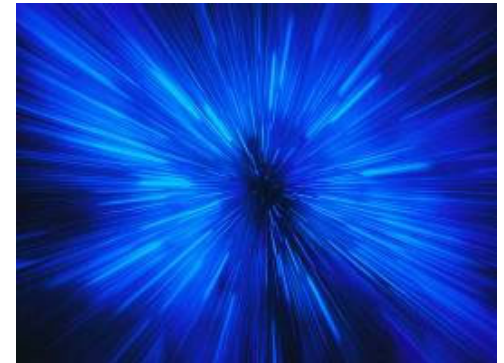
DELCI		in	SILE	po	nadstropjih	
Velikost					Smisel	Strokovnjak
10^{26}						↑ filozof kozmolog, astrofizik, astronom
10^{22}	planeti					
1						
10^{-8}	molekule		elektromagnetna	peستrost svetlobe, življenja	kemik, fizik	
10^{-10}	atomi			energija	atomski fizik	
10^{-14}	jedra		jedrska	kemijski elementi, sonce, reaktor	jedrski fizik	
10^{-15}	nukleoni		močna	moja plača	fizik osnovnih delcev	
					↓ filozof	

Nadstropja se zelo dobro ločijo med sabo: ko opisujemo pojave v enem od njih, lahko v večini primerov zanemarimo sosednja nadstropja.

Razen... povezave med najnižjim in najvišjim! Obstaja tesna povezava med fiziko osnovnih delcev in razvojem vesolja.

Zveza med fiziko osnovnih delcev in zgodnjim razvojem vesolja

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

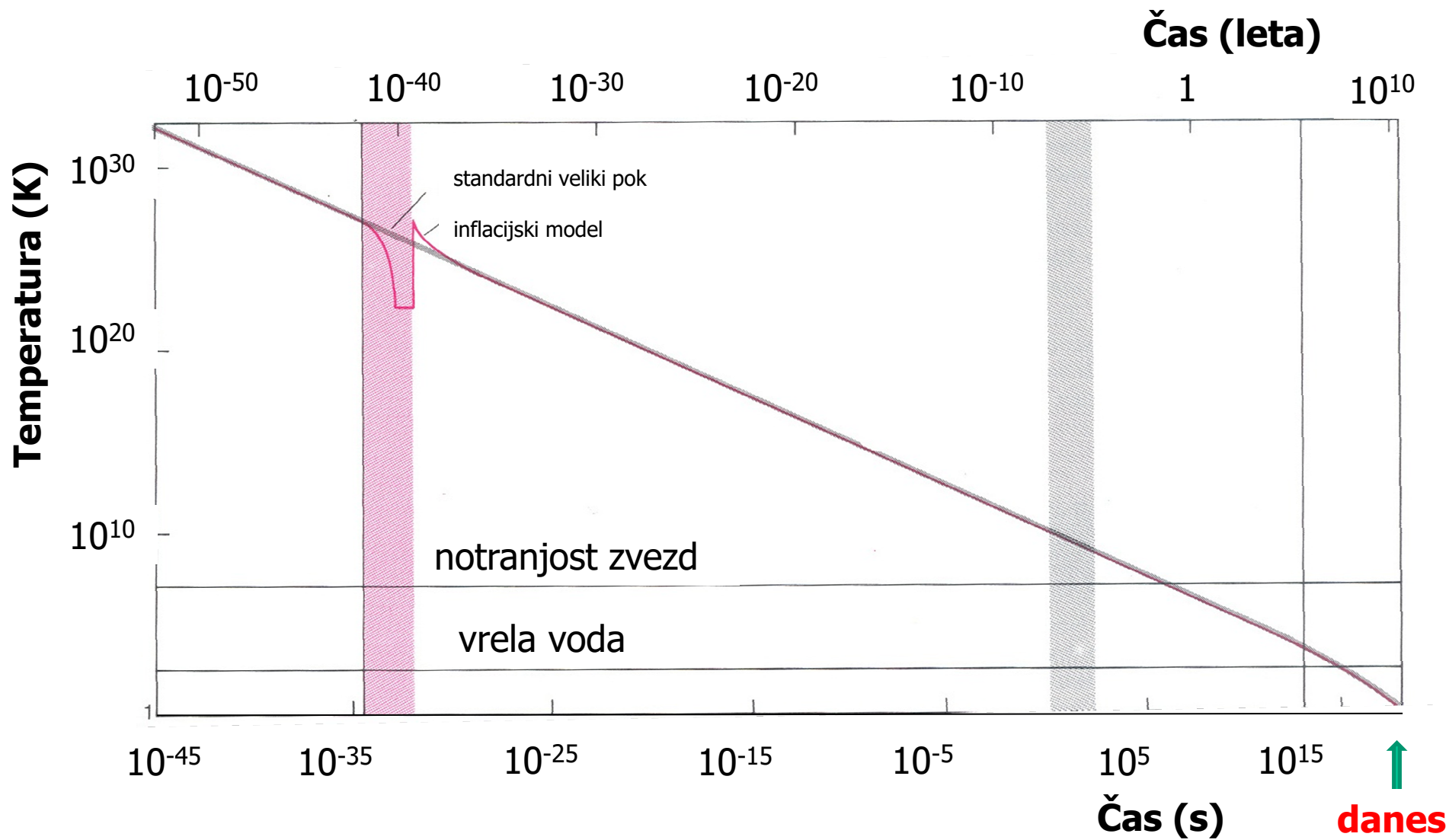


Plin pri visoki temperaturi: **velika hitrost** molekul

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



Temperatura vesolja

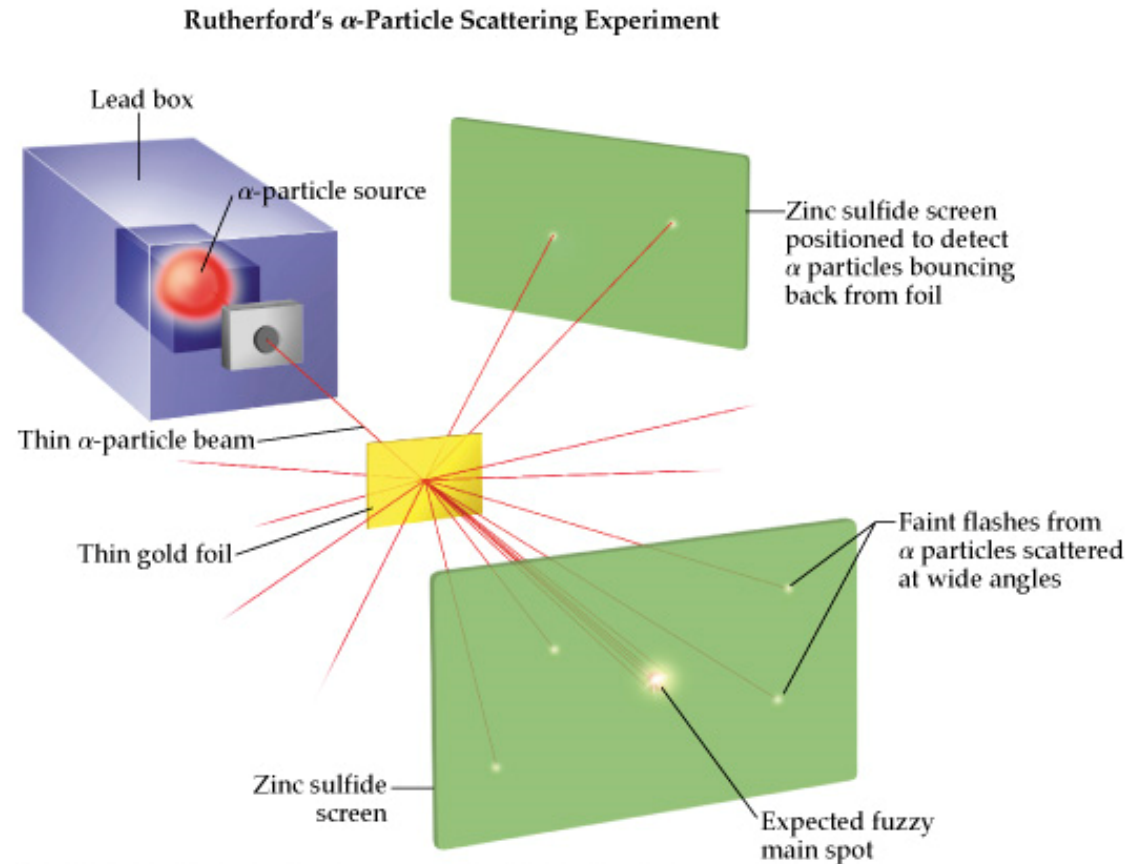


Najprej pa malo zgodovine...

Sipanje delcev α na Au foliji



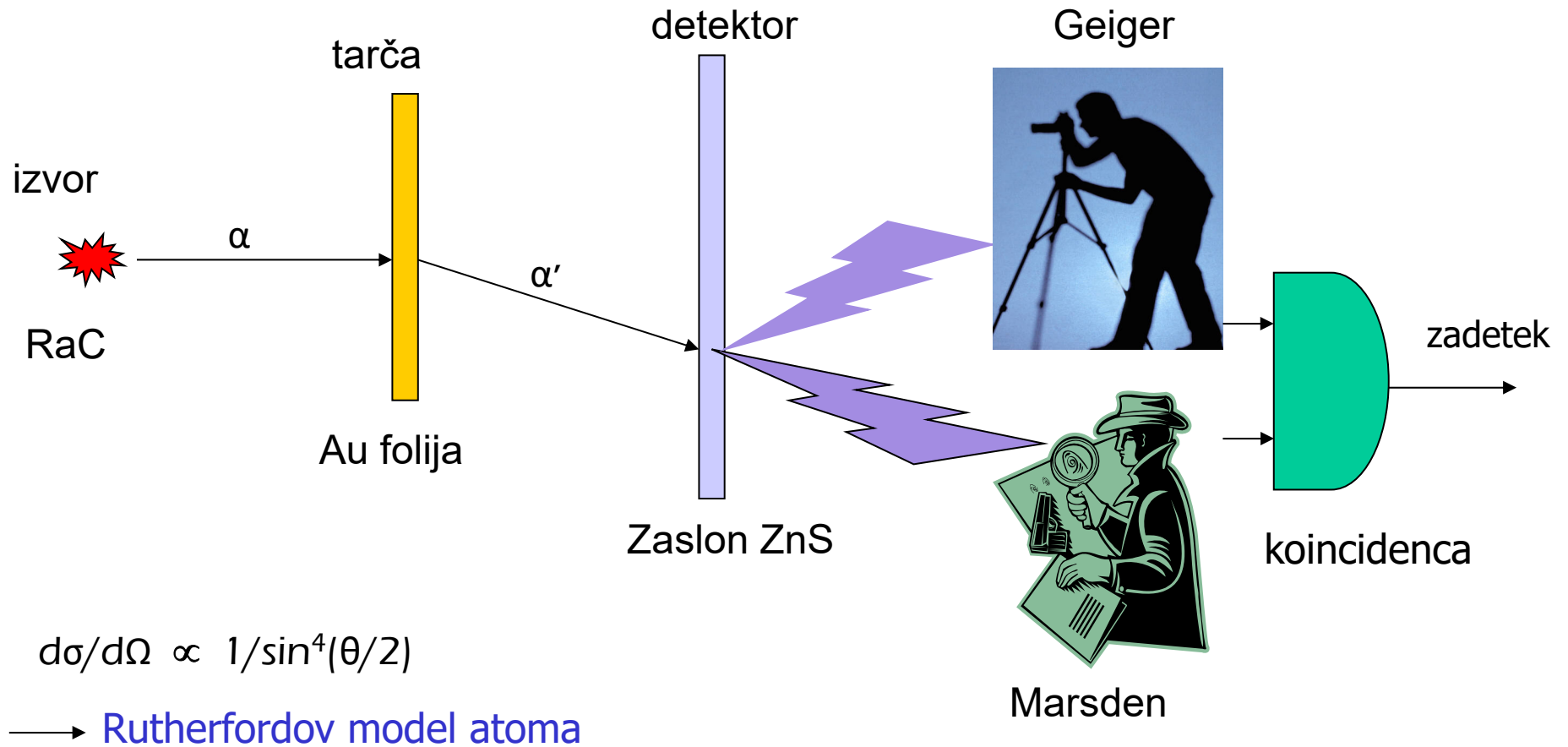
Rutherford, Geiger



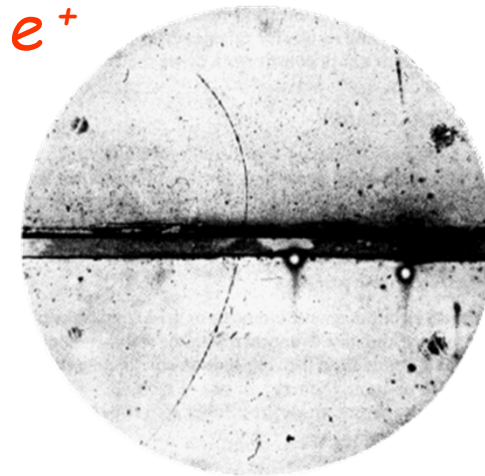
Thomson: pozitivni naboj enakomerno porazdeljen po atomu \rightarrow vsi delci α se sipljejo pod majhnimi koti.

Poskus: precej delcev α se siplje **pod velikimi koti!**

1911 Rutherfordov eksperiment



Odkritje pozitrona



C. Anderson
(NN 1936)

Nabit delec prečka ploščo iz Pb, vse skupaj v magnetnem polju, pravokotnem na ravnino slike – tir delca je krožnica

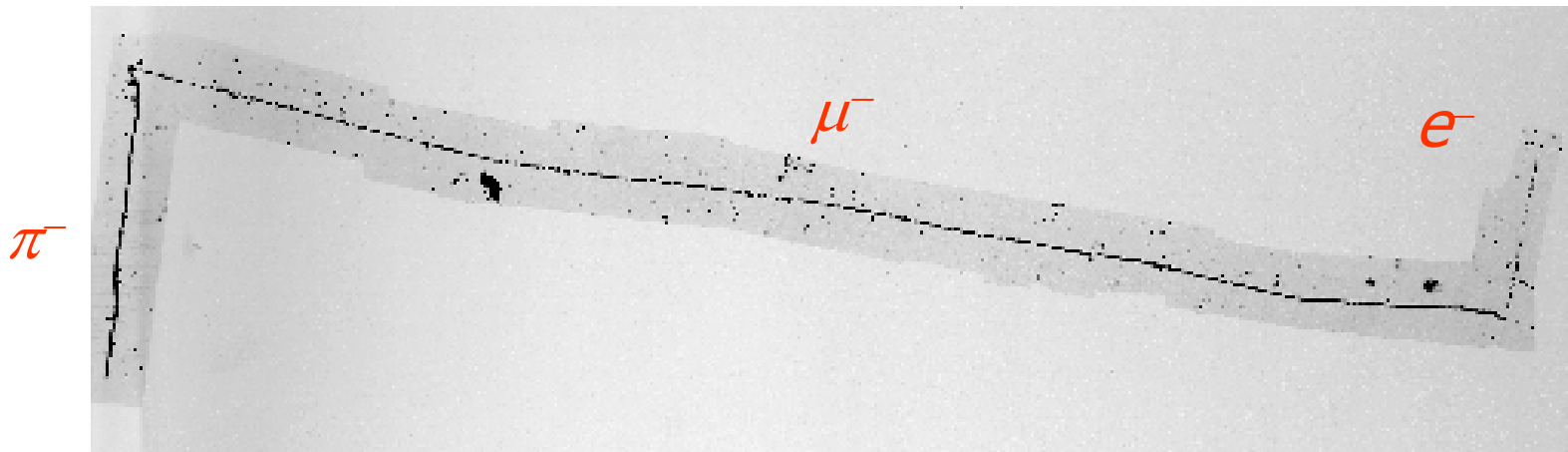
Smer: od krožnice z večjim polmerom proti krožnici za manjšim (zaradi izgube energije v plošči)

Naboj: predznak iz ukrivljenosti v B (B kaže v sliko)

Masa: iz gibalne količine – polmer kroga - in hitrosti (to pa ocenimo iz izgube ΔE pri preletu svinca)

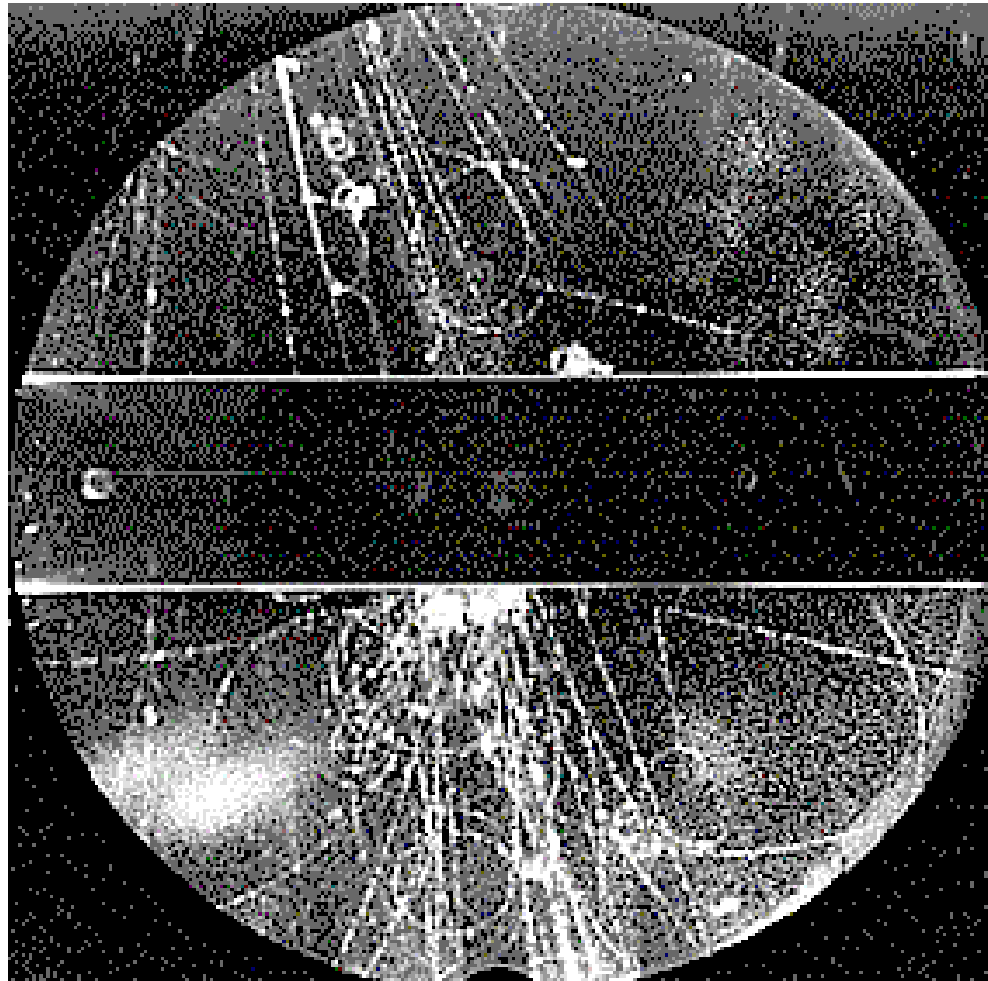
Odkritje piona

C. Powell: fotografska emulzija, odkritje π (1947)
(NN 1950)



Pravilno zaporedje: počasnejši delci izgubljajo več energije \rightarrow
puščajo debelejšo sled

Odkritje kaonov: na sceno stopijo pospeševalniki

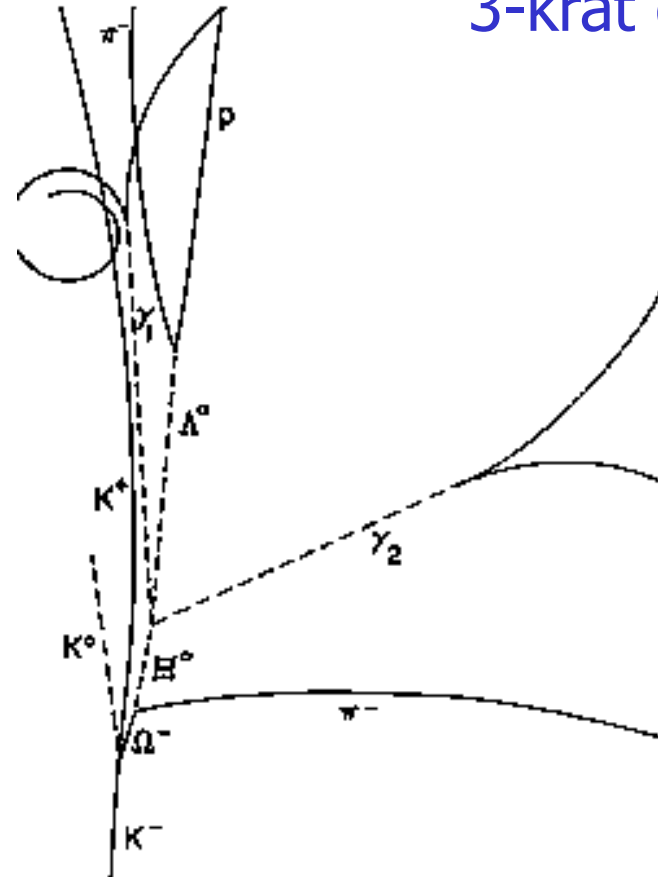
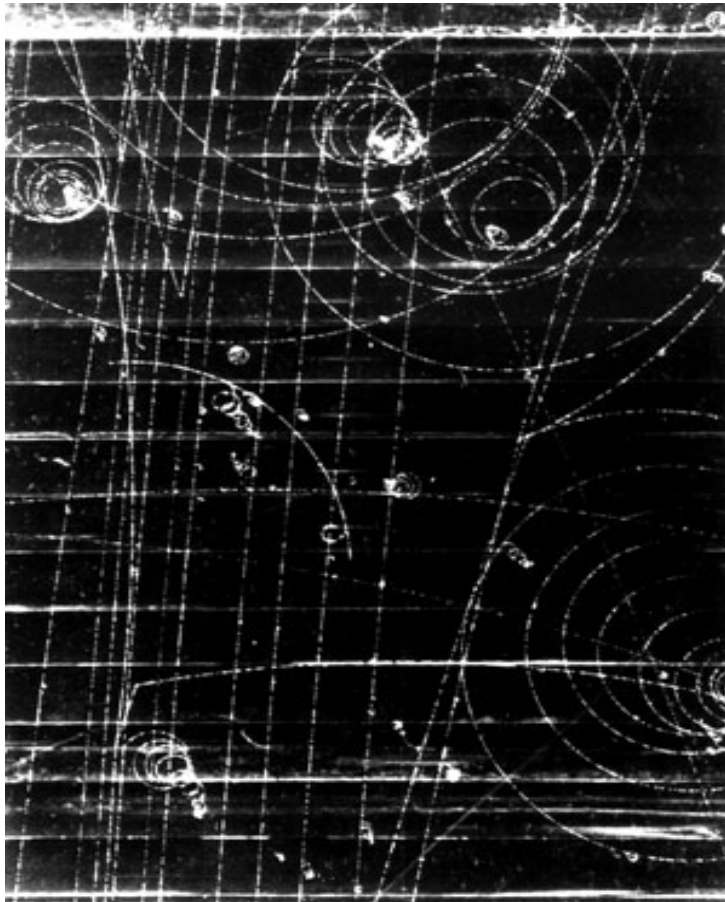


svinčna plošča



Rochester, Butler (1947)

Detektorji: mehurčne celice



3-krat čudni Ω

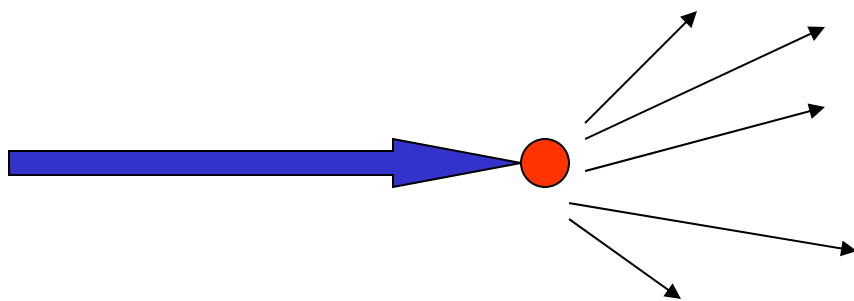
Naslednji korak, velika revolucija v fiziki delcev: detektorji, v katerih delec povzroči električni signal

Poskusi v fiziki osnovnih delcev

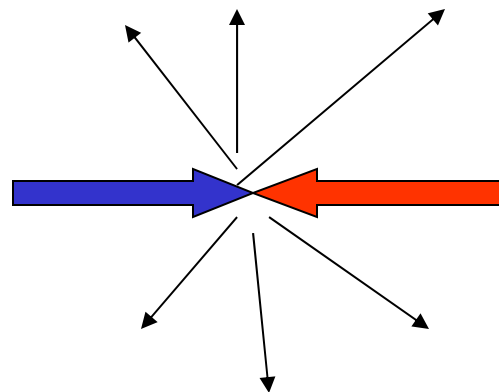
Pospešimo osnovne delce, pri trku se sprosti energija, ta se pretvori v materijo – delce, od katerih so nekateri neobstojni.

Dva načina trkanja:

Poskusi s fiksno tarčo

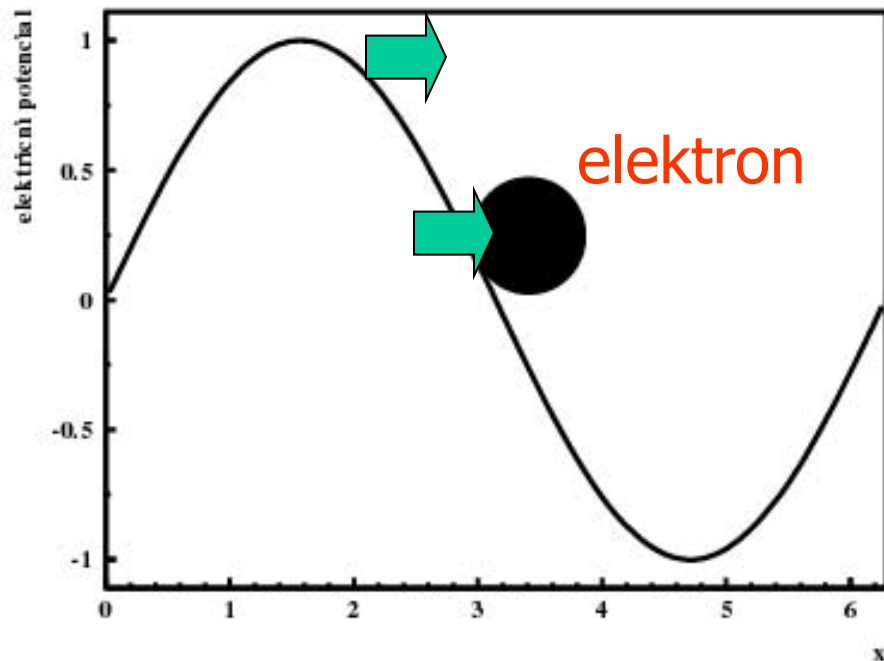


Trkalnik



Kako pospešujemo nabite delce?

- Pospeševanje z elektromagnetnim valovanjem (tipična frekvenca 500 MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 oz. 1800 MHz)
- Valovanje v radiofrekvenčni votlini: $c < c_0$

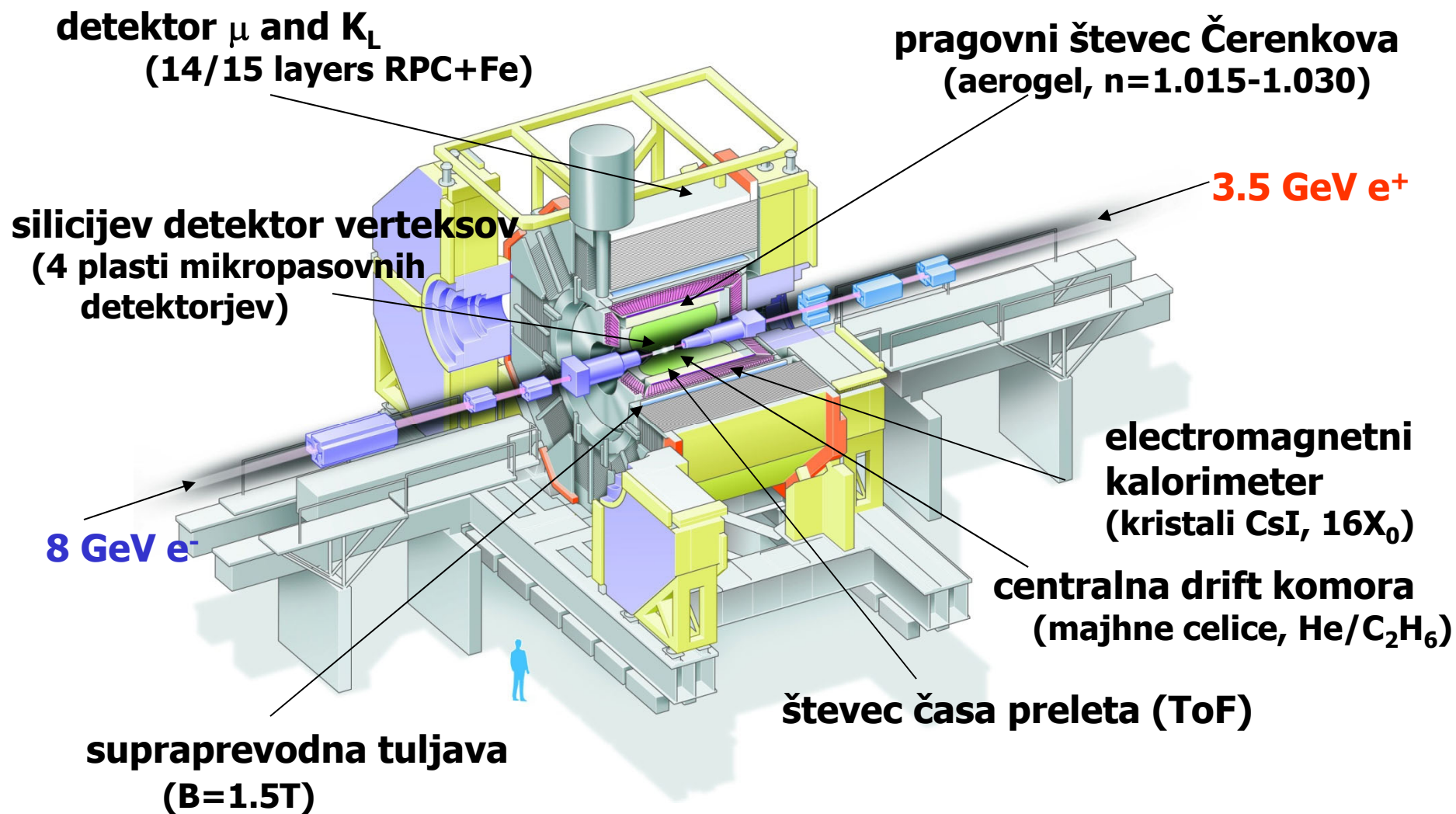


... podobno deskanju na valovih

Trkalnik KEK-B in detektor Belle v Tsukubi

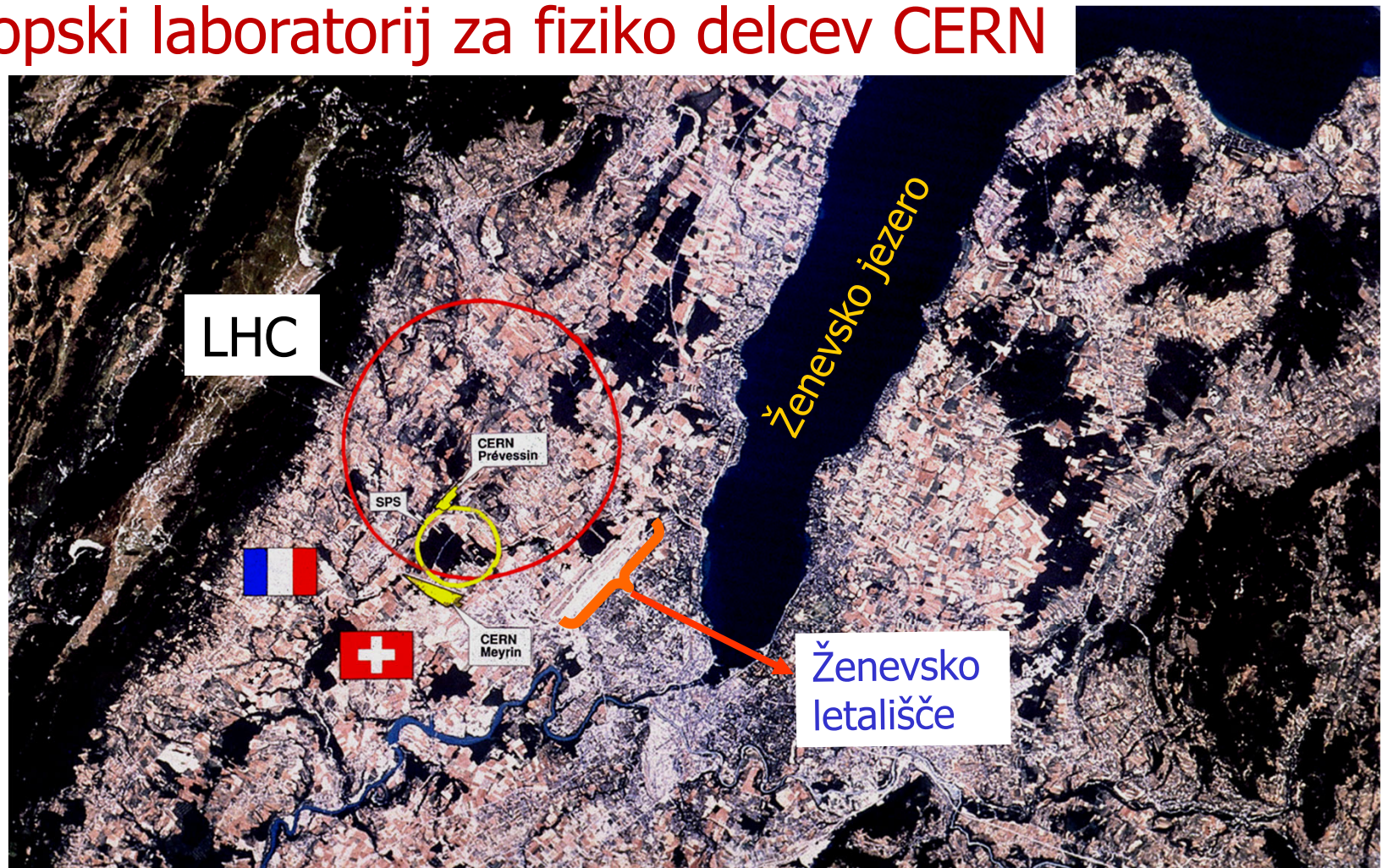


Spektrometer Belle

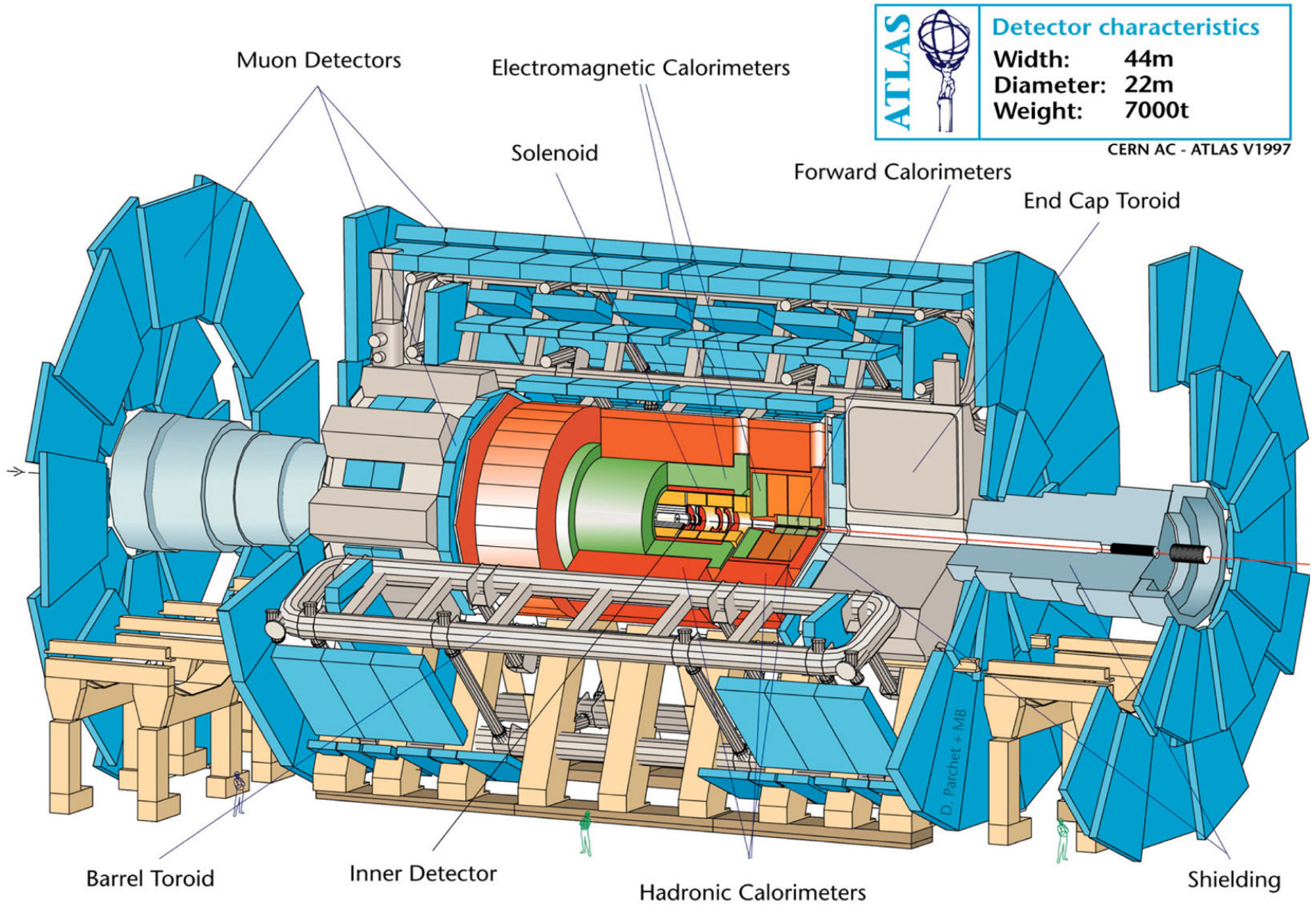


LHC = Large Hadron Collider, Veliki hadronski trkalnik

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



Detektor ATLAS ob LHC



Peter Križan

'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

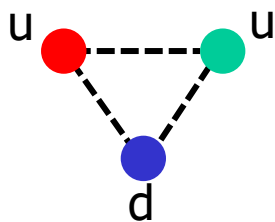
(teorija osnovnih delcev in njihovih interakcij)

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

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...

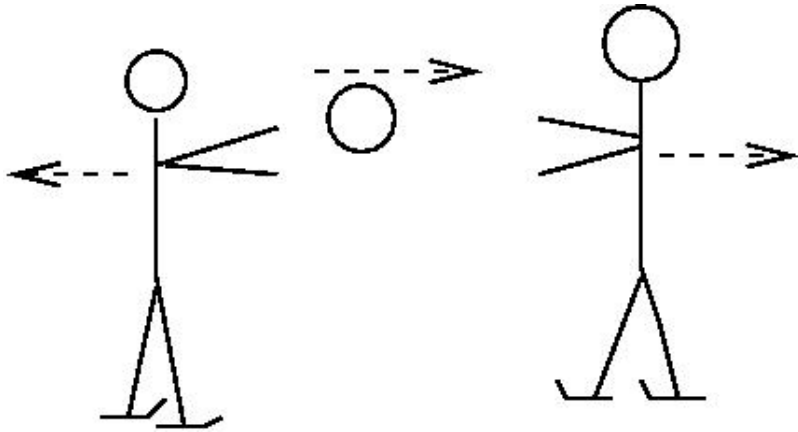
π^+ : kvark u + antikvark \bar{d}

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

masa
 $1/7 m_p$
 $5.5 m_p$

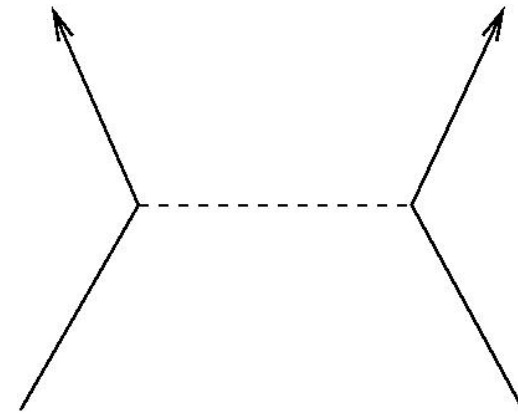
in množica njihovih sorodnikov...

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

Dve veliki vprašanji na začetku tega stoletja

Zakaj ni v vesolju skoraj nič anti-delcev?

→ detektorja Belle (KEK) in BaBar (SLAC)

Odkod delcem masa?

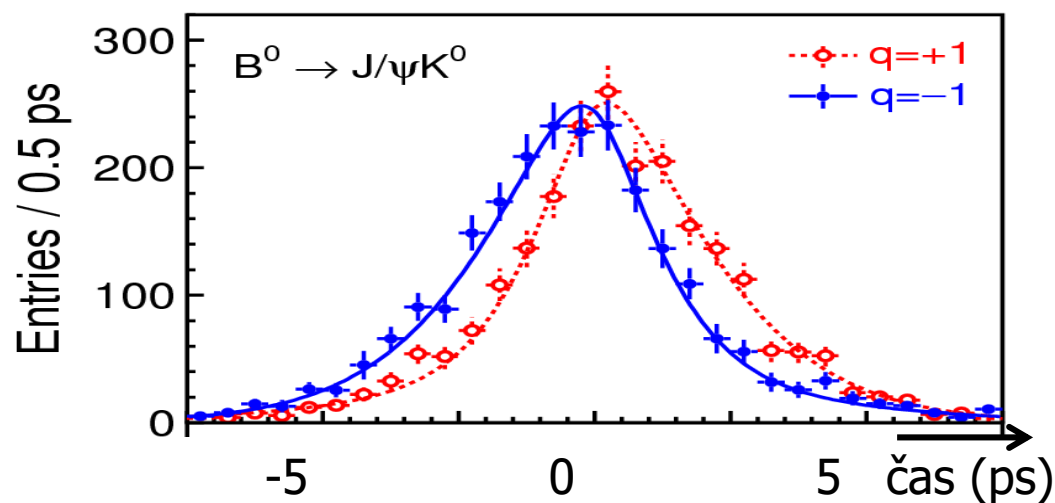
→ detektorja ATLAS in CMS (LHC, CERN)

... in pri odgovoru nanju veliko
zmagoslavje Standardnega modela

Rezultat meritev eksperimenta Belle

Zmagoslavje Standardnega modela!

Razlika med delci in antidelci se ujema z napovedjo Standardnega modela in odločilno dopolnjuje predhodne meritve povezanih količin.



Modra: časovni potek razpada za mezone B

Rdeča: isto za njihove antidelce, anti-B

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“



Higgsov bozon

Škotski fizik Peter Higgs, 1964:

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

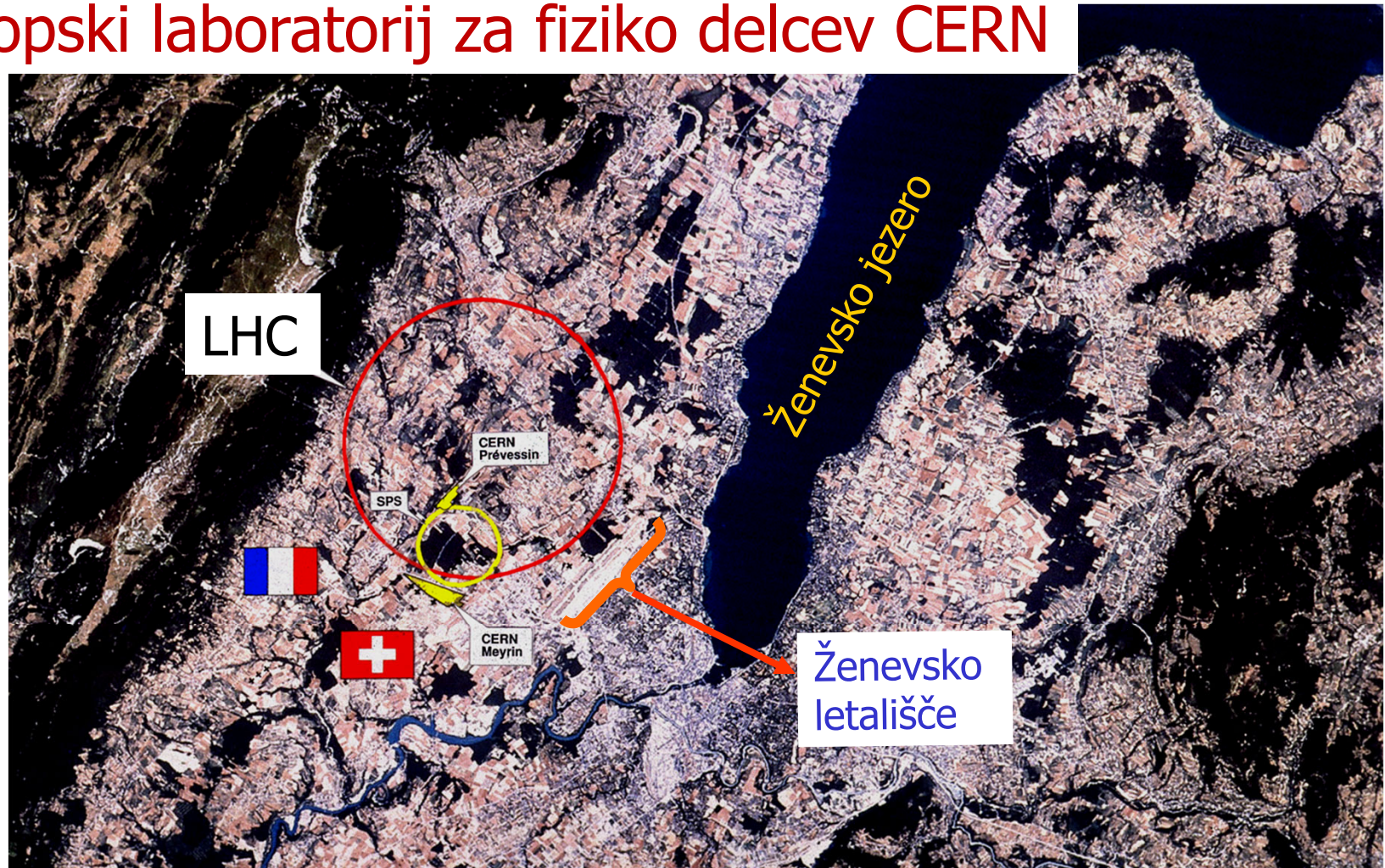
Elektromagnetno polje → nabit delec (e^-) občuti silo
velikost sile odvisna od velikosti električnega naboja

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

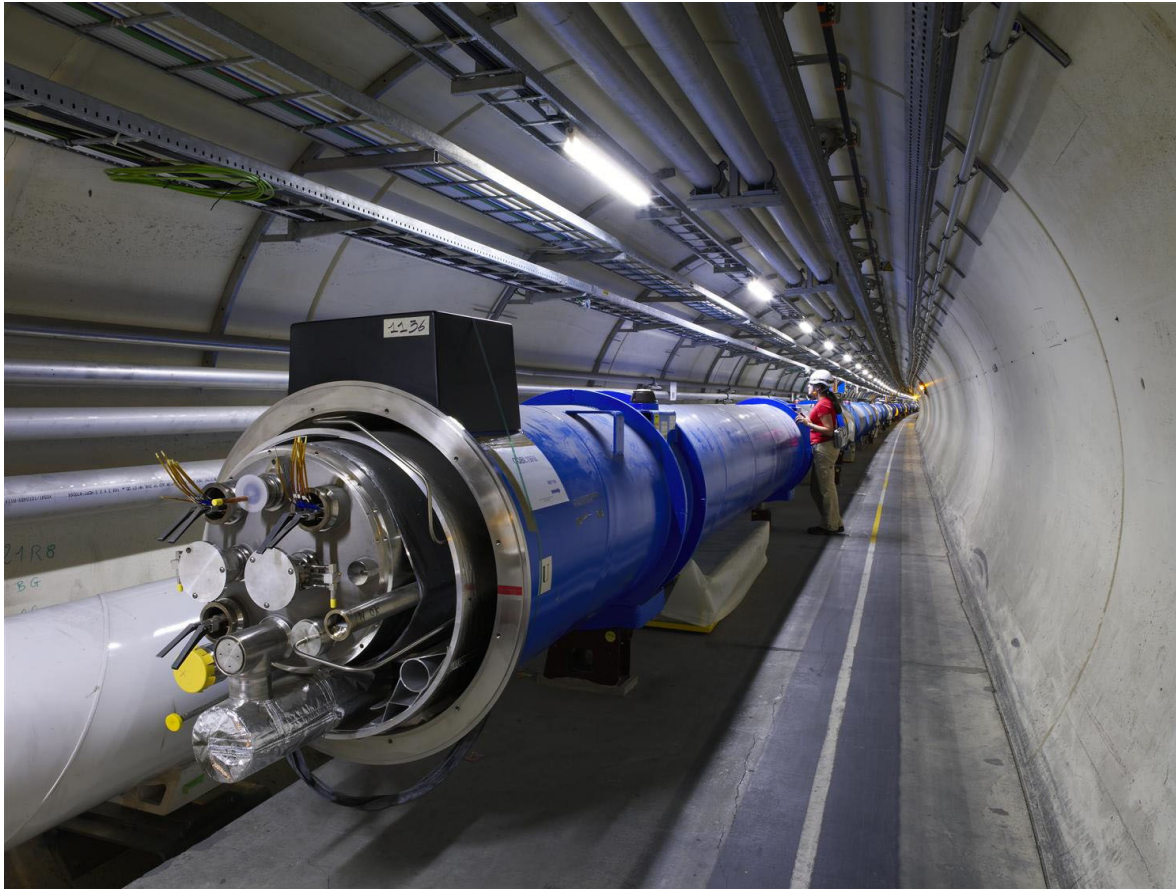
elektromagnetno polje ima svoje delce – fotone
Higgsovo polje ima svoje delce – **Higgsove bozone**

Na lovu za Higgsovimi delcem

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN

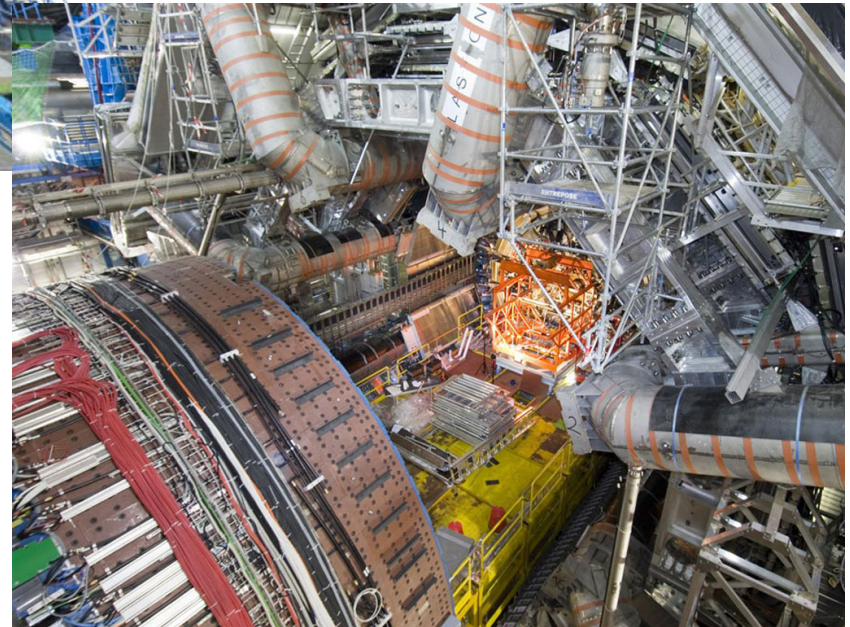
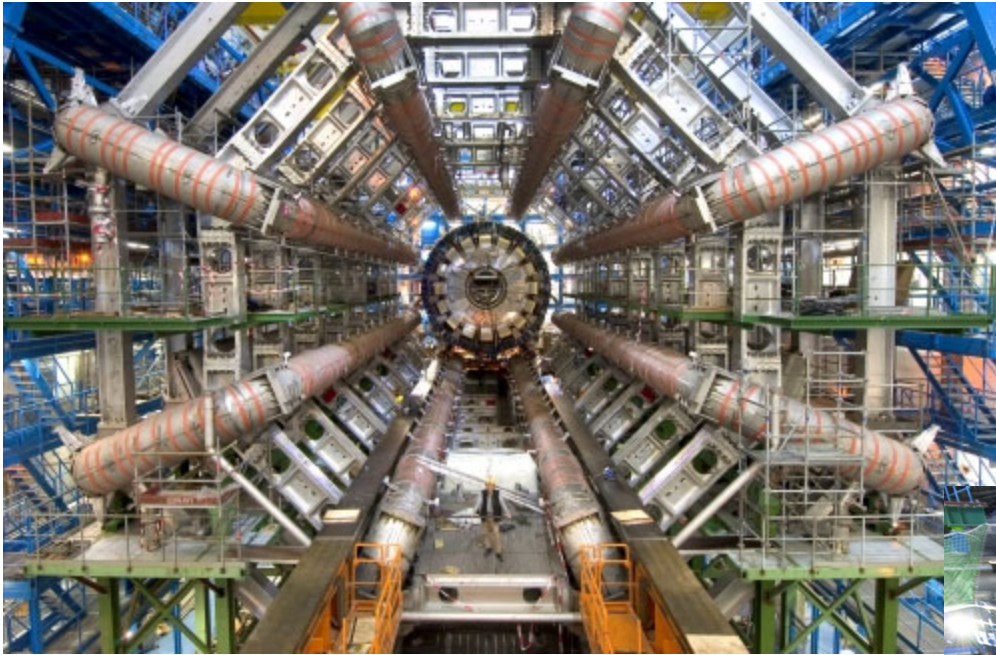


LHC = Large Hadron Collider



del 27 km dolgega
pospeševalnika



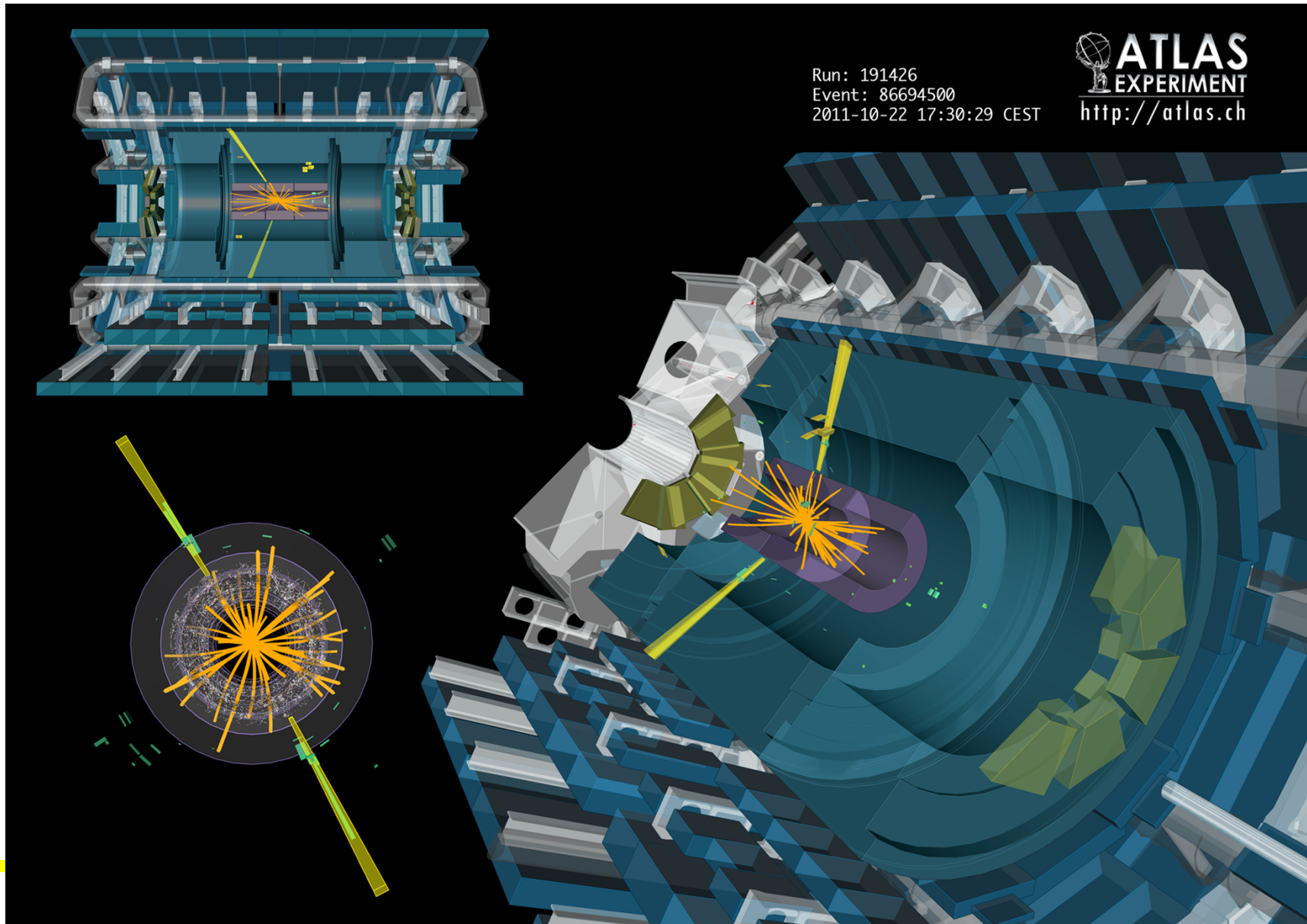


detektor ATLAS med
izgradnjo

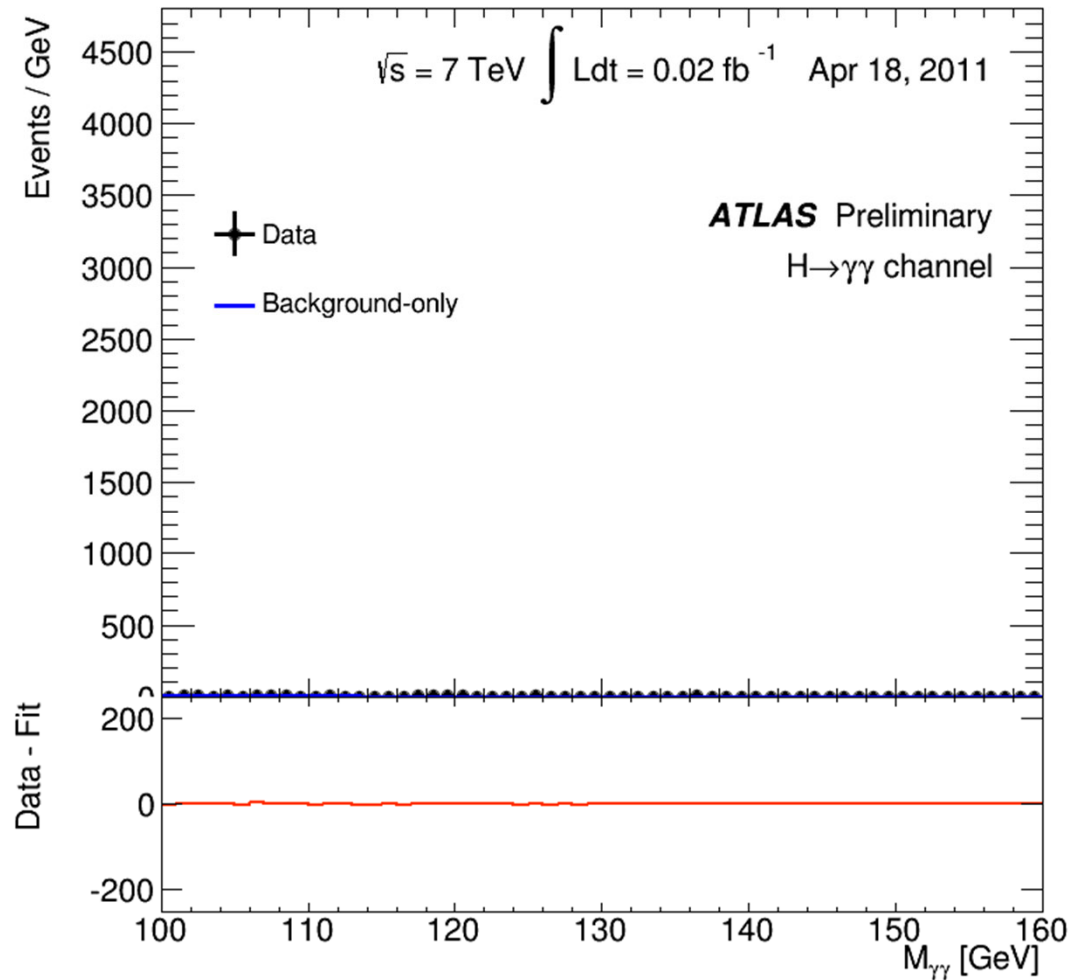


Kontrolna soba med
meritvami

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



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



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 je vse kazalo, da ima take lastnosti, kot jih pričakujemo od Higgsovega delca.
- Na dokončno potrditev je bilo treba počakati do poletja 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.

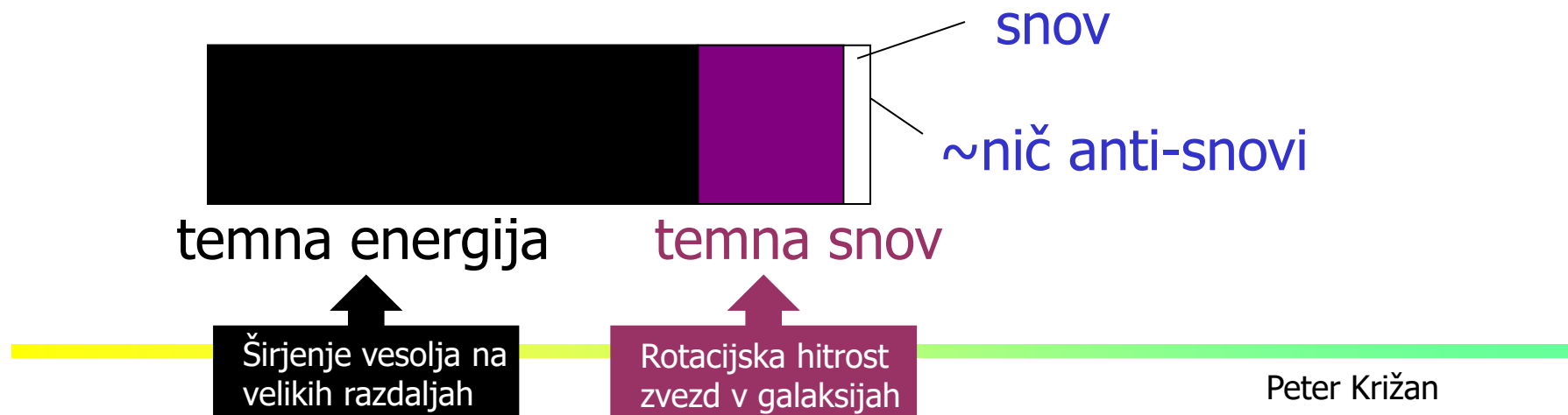
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

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...



Iskanje popolnejšega opisa narave

Dve možnosti:

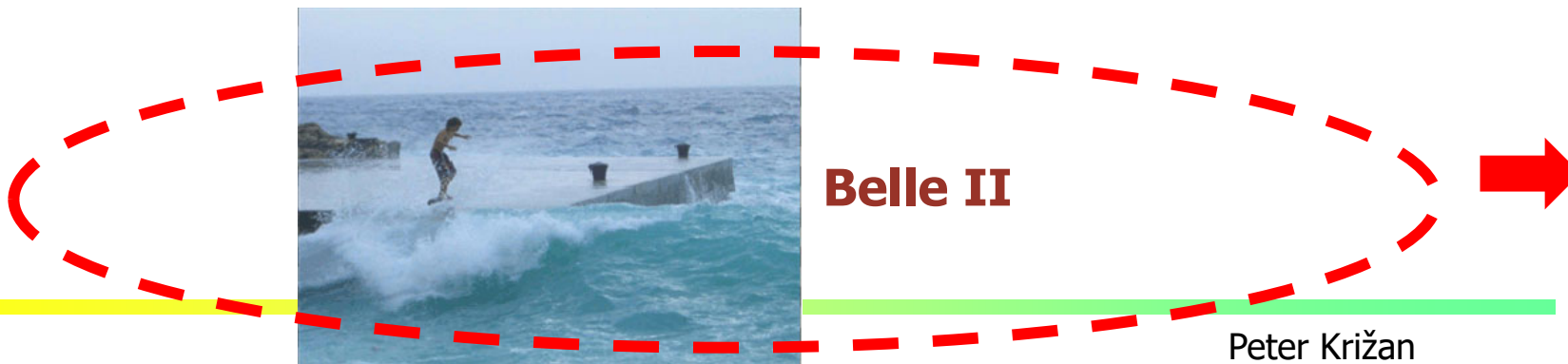
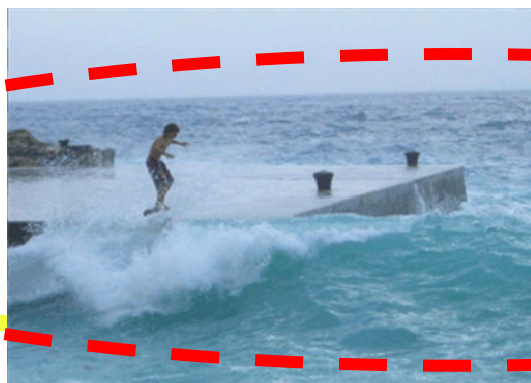
- Neposredno iskanje novih delcev
 - iskanje pri velikih energijah (LHC)
- Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle in Belle II).

→ 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

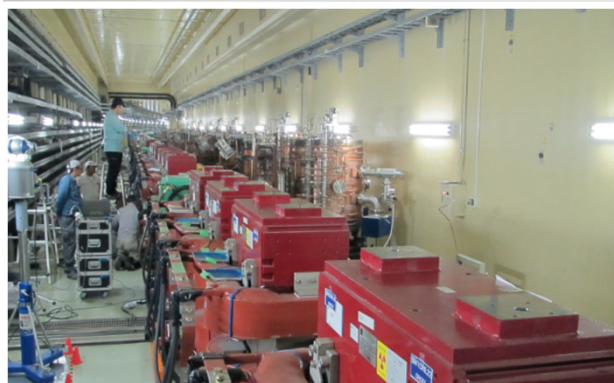
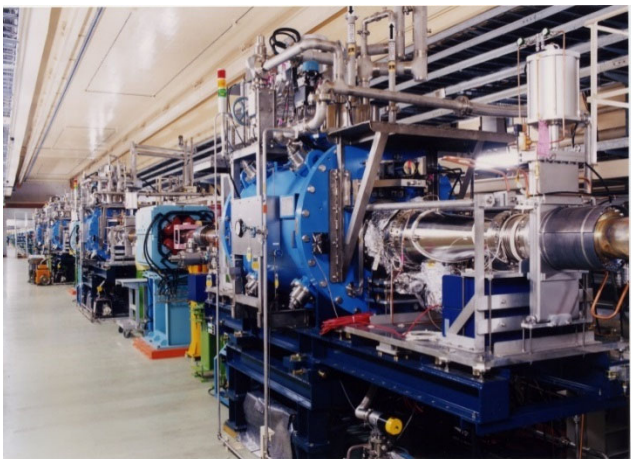


Belle II

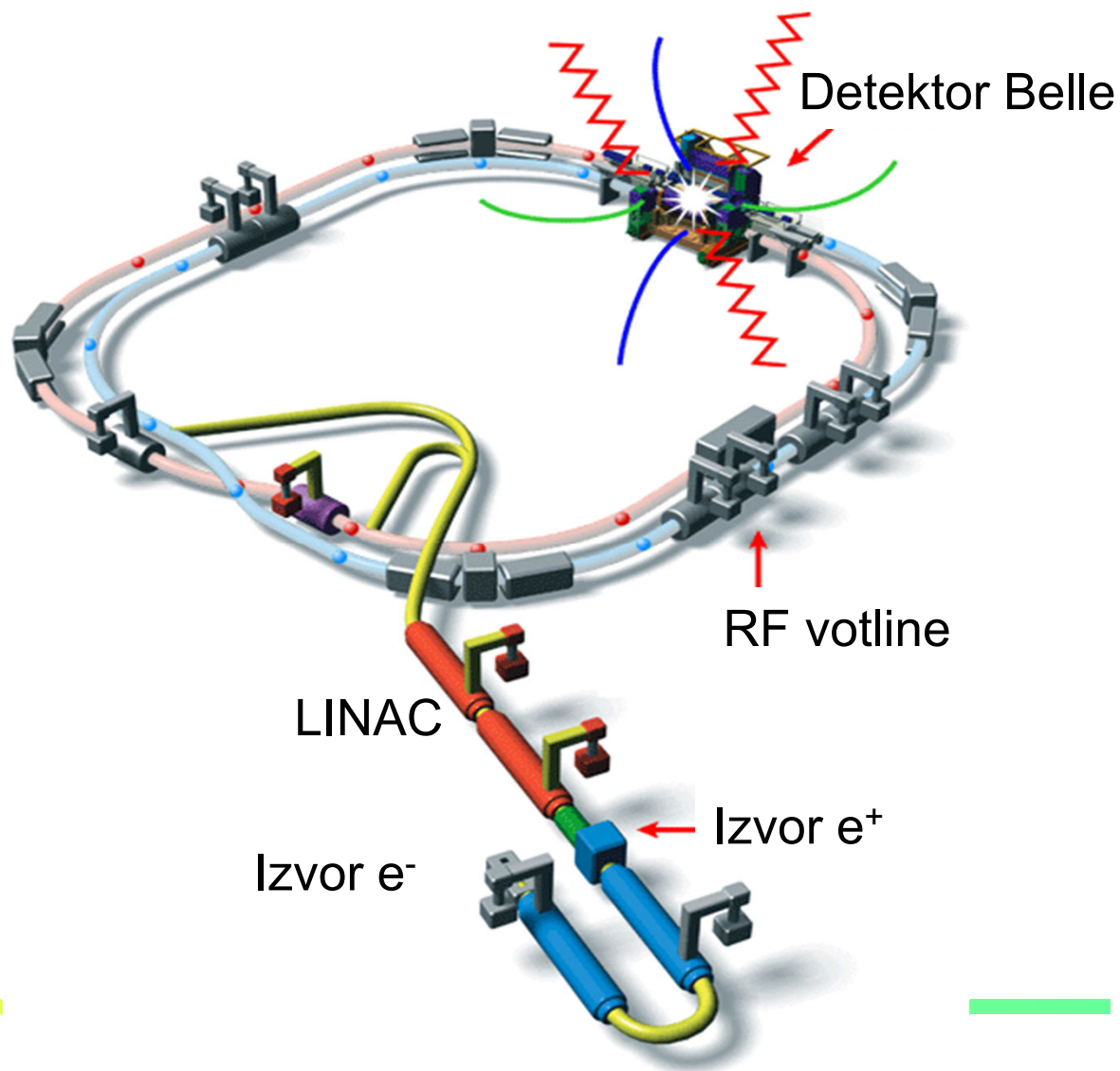
Peter Križan

Trkalnik SuperKEKB

pospešuje elektrone in pozitrone do trka

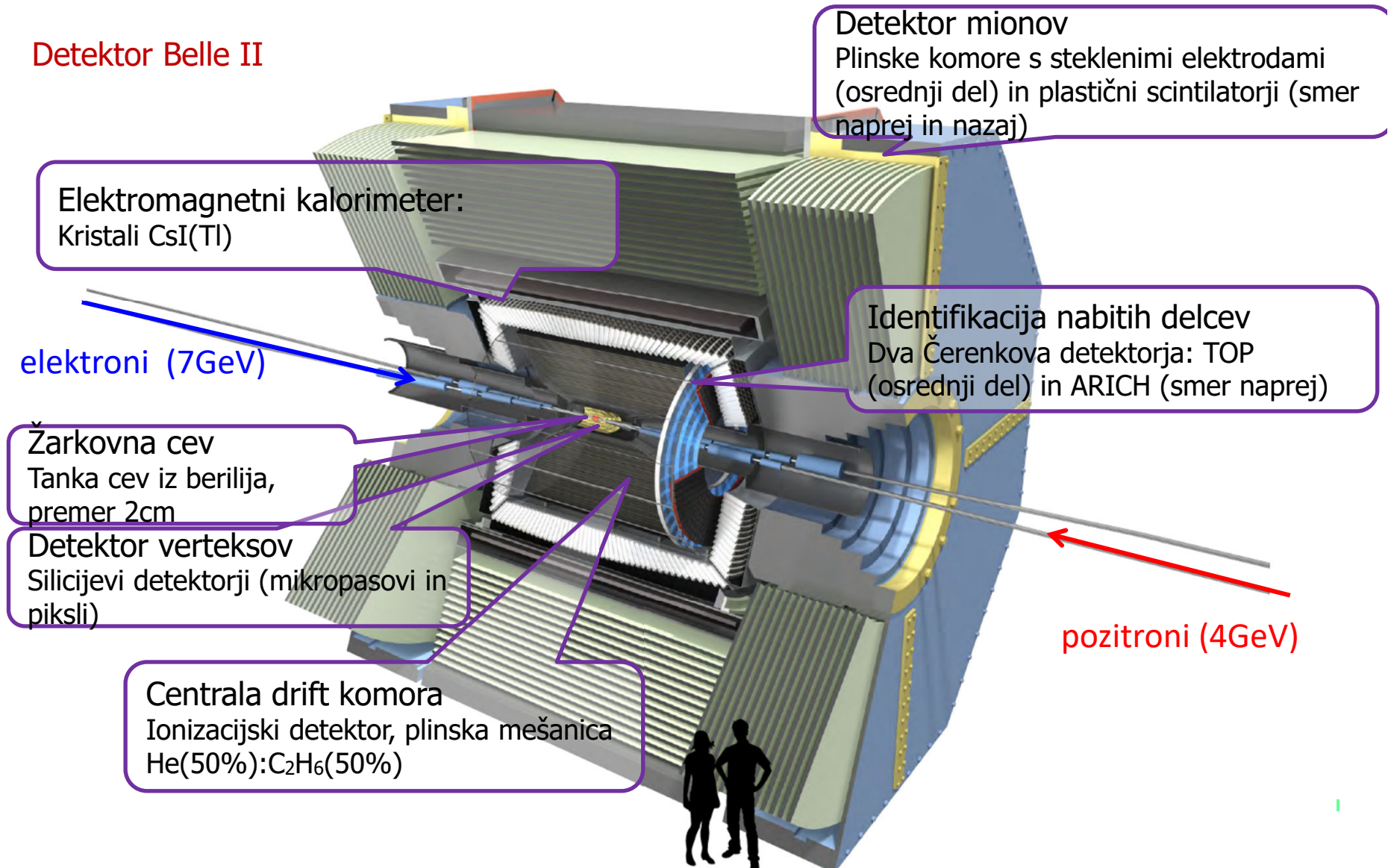


Del obroča trkalnika:
magneti in
pospeševalni elementi

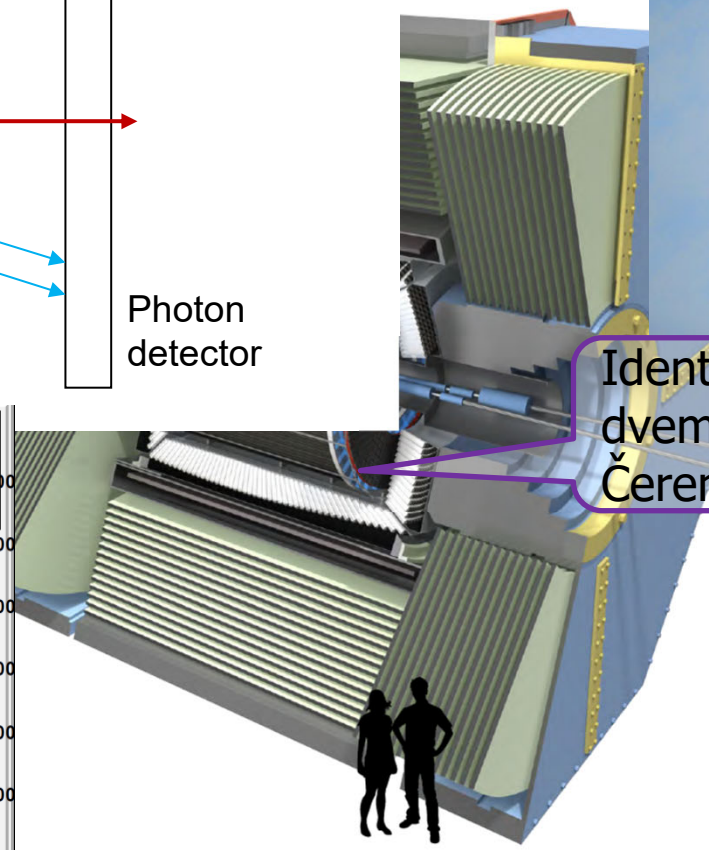
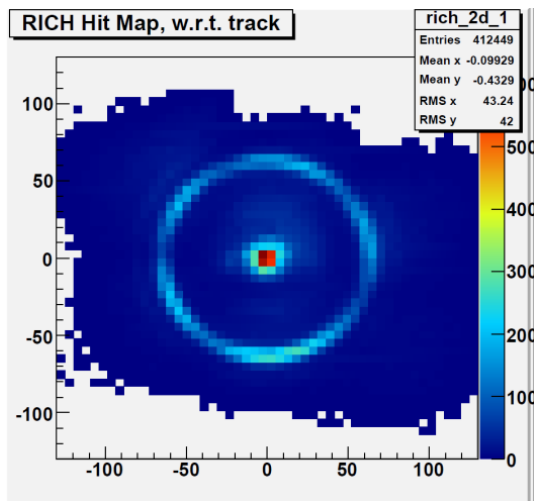
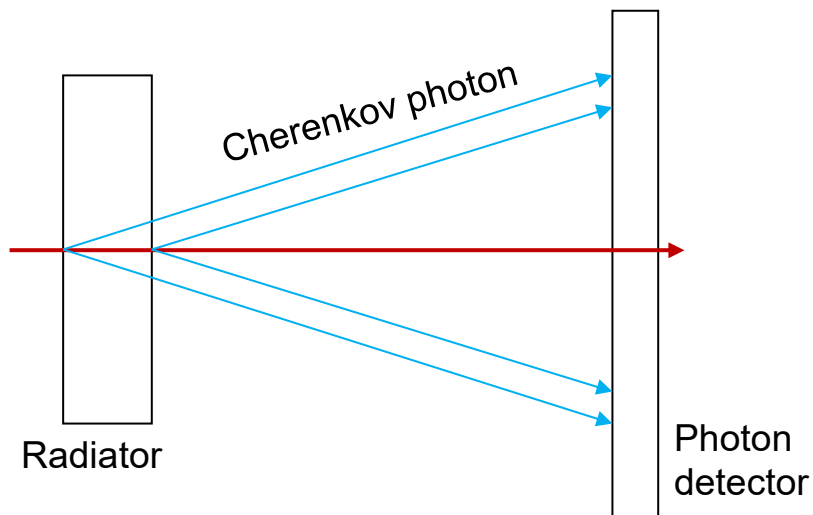


Eksperiment Belle II: kako ugotovimo, kaj se je zgodilo pri trku?

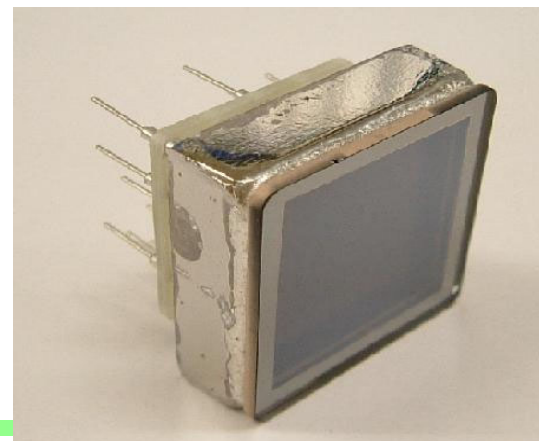
Težki delci, ki pri trkih nastanejo, niso obstojni, zelo hitro razpadajo, pri tem pa nastane množica lažjih, obstojnih delcev, ki jih prestrežemo z zapletenim sistemom detektorjev.



Za identifikacijo delcev uporabimo **pojavn sevanja Čerenkova**: svetloba, ki jo seva delec, ki je **hitrejši kot hitrost svetlobe** v snovi – podobno kot **udarni val nadzvočnega letala!**

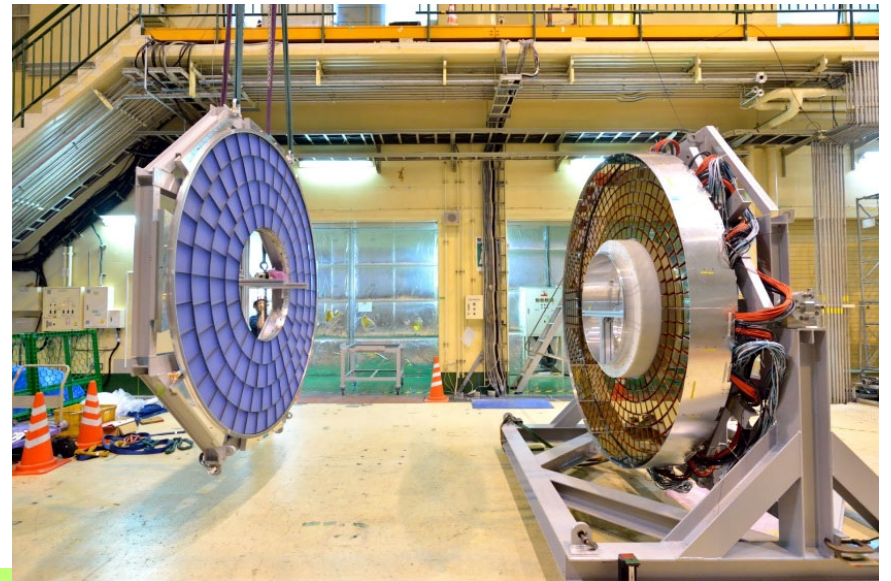
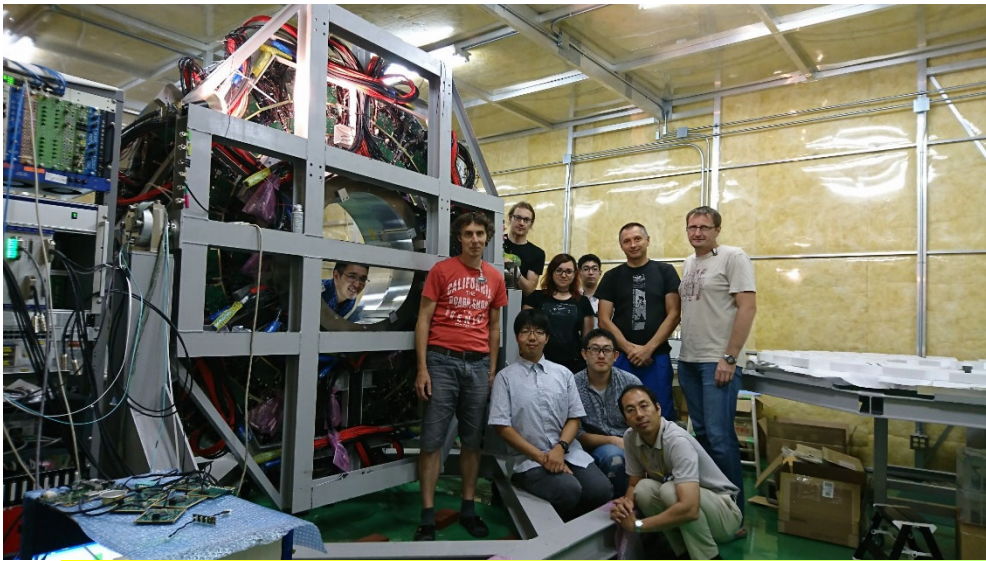
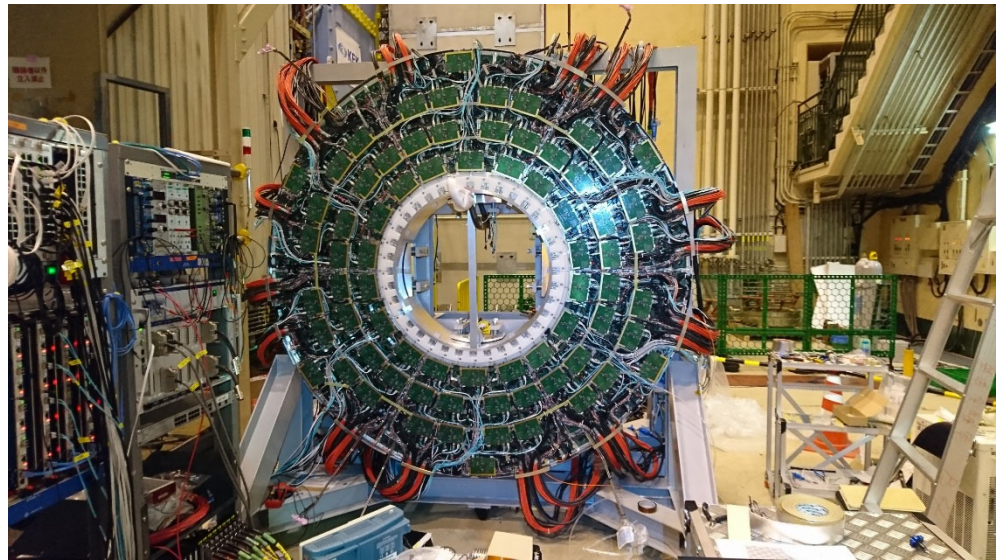
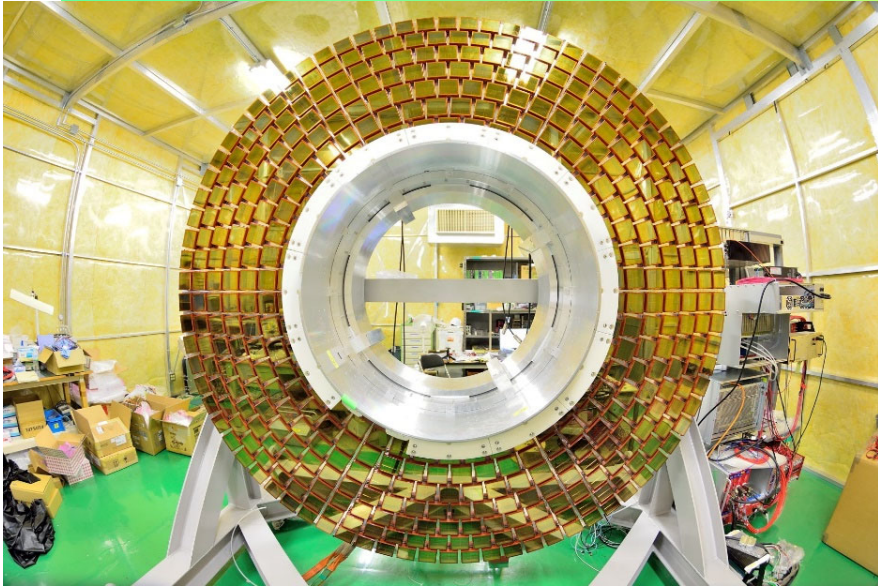


Identifikacija nabitih delcev z dvema detektorjema Čerenkovega sevanja



Peter Križan

Veliko oko eksperimenta Belle II



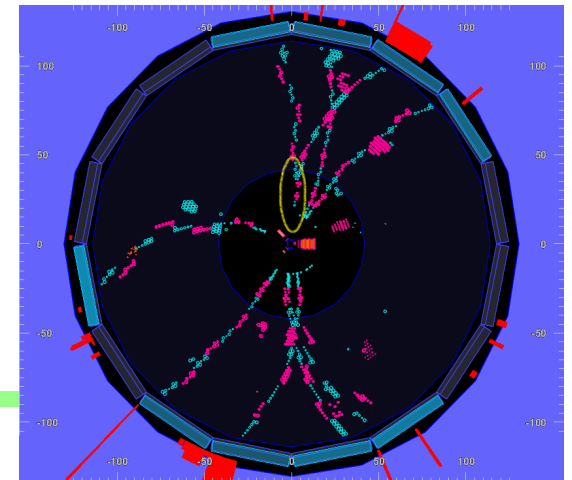
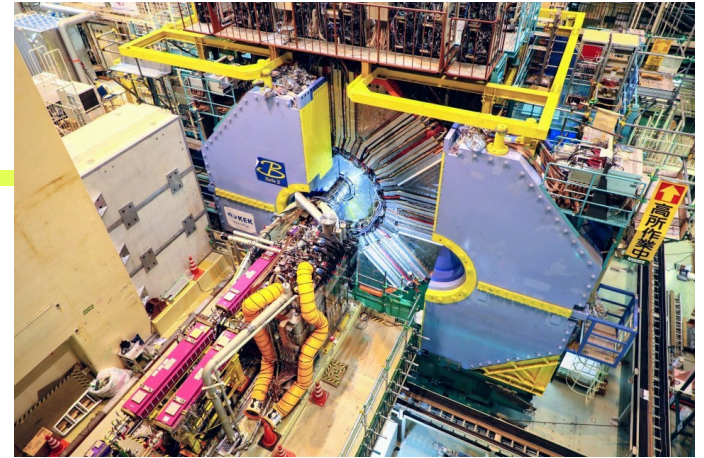
Peter Križan

Detektor Belle II

Z detektorjem Belle II smo pričeli meriti spomladi 2019. Med pandemijo je bilo precej napeto, ker smo morali precej dela opraviti na daljavo, pa smo vseeno zmogli 😊

Detektor se je odlično izkazal, imamo že precej zanimivih rezultatov.

Pridno zajemamo podatke, da bomo nabrali dovolj velik vzorec - med drugim tudi za **natančne študije redkih razpadov mezonov B**, ki so tema prestižnega projekta ERC Advanced Grant FAIME na IJS in UL FMF (<https://faime.ijs.si/>).



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 dožemanje 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.