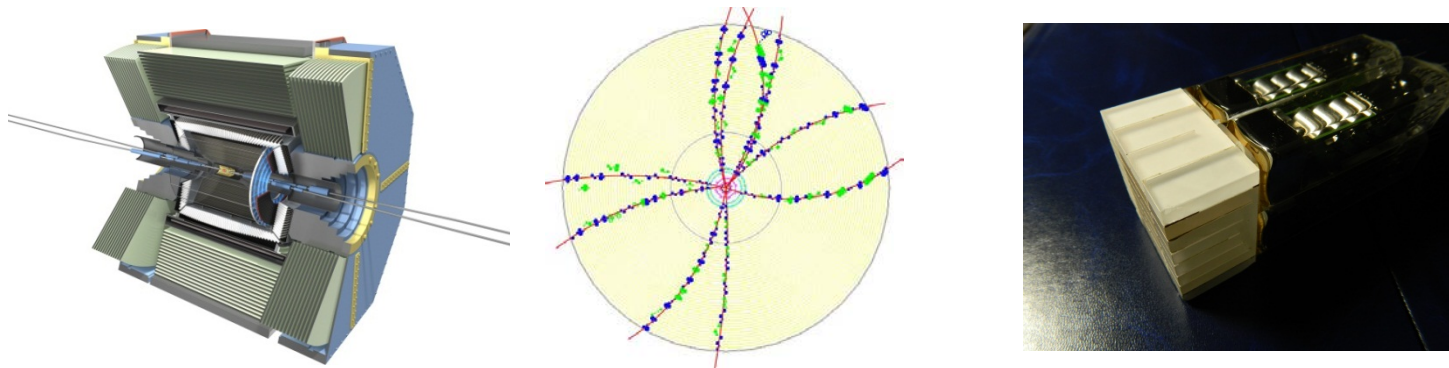


Fizika osnovnih delcev in napredek v medicinskem slikanju



Peter Križan

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

Medicina in pravo, Maribor, 30.3.2012

Kaj raziskujemo fiziki osnovnih delcev?

Kako to počnemo?

Ali lahko nove eksperimentalne metode uporabimo tudi na drugih področjih?

Primeri potencialne uporabe:

- Novi detektorji za medicinsko slikanje
- Nove metode pri radioterapiji

Tesna povezava že nekaj desetletij: največja konferenca za detektorje v fiziki osnovnih delcev poteka skupno z največjo konferenco za razvoj novih metod v medicinskem slikanju!

DELCI**in****SILE****po****nadstropjih**

Velikost(m)	Predmet		Sila	Smisel	Strokovnjak
10^{21}	kopice galaksij		gravitacija		↑ filozof
10^{14}	<p>Nadstropja se zelo dobro ločijo med sabo: ko opisujemo pojave v enem od njih, lahko v večini primerov zanemarimo sosednja nadstropja.</p>				
1					
10^{-8}			magnetna	nestrost svetlobe, življenja	kemik, fizik
10^{-10}	<p>Razen... povezave med najnižjim in najvišjim!</p>				
10^{-14}	jedra		jedrsko	kemijski elementi, sonce, reaktor	jedrski fizik
10^{-15}	nukleoni		močna, šibka	moja plača	fizik osnovnih delcev
10^{-18}	kvarki		?	?	↓ filozof



Zveza med fiziko osnovnih delcev in zgodnjim razvojem vesolja

Zgodnje vesolje: izredno **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**



Asimetrija med snovjo in antisnovjo

Današnje vesolje:

skoraj izključno snov, nič antisnovi.

Kam so izginili vsi antidelci iz Velikega poka (ko jih je bilo enako kot delcev)?

Delci in anti-delci se obnašajo nekoliko različno:

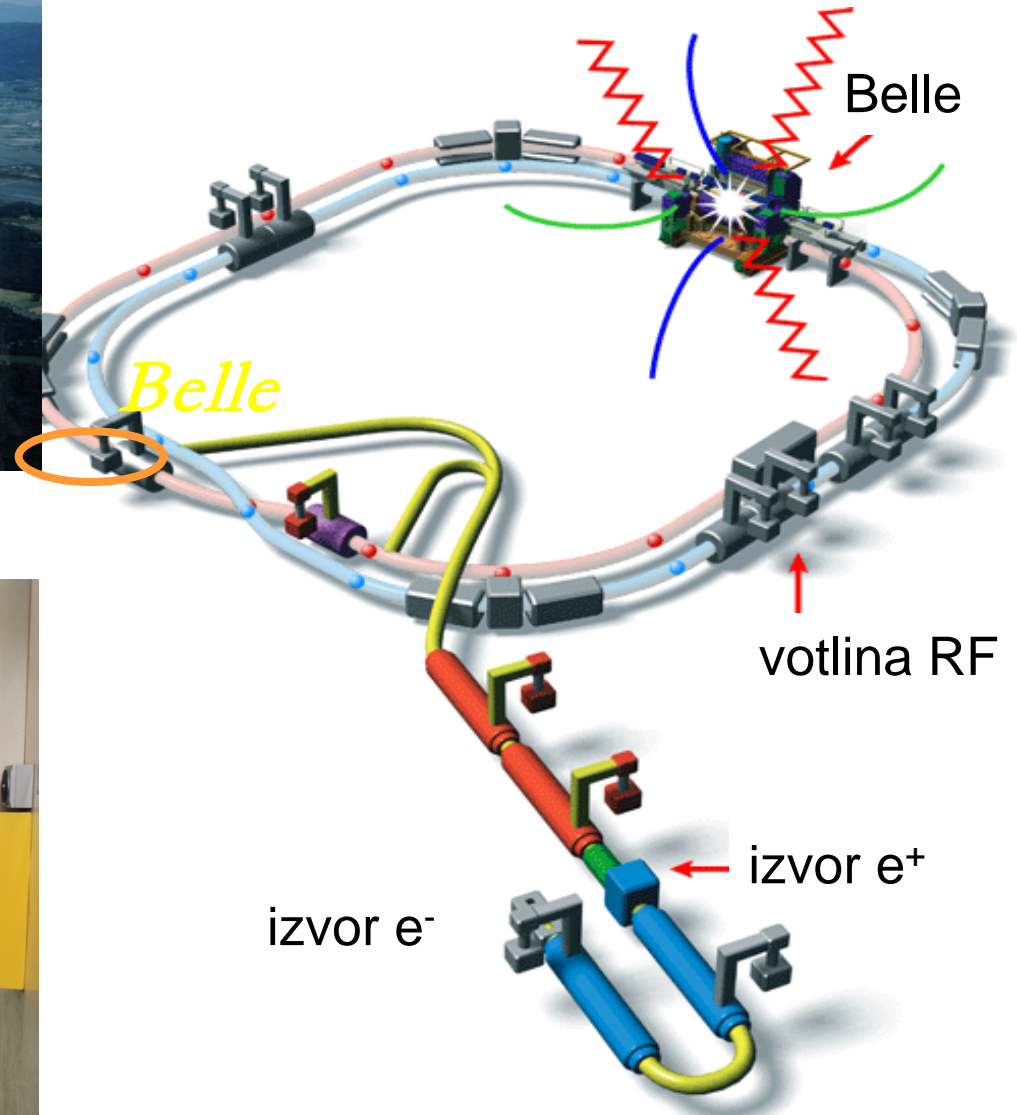
drugače razpadajo v stabilne delce → v dolgem razvoju vesolja je obstalo malo delcev in nič anti-delcev

Eksperiment Belle:

Kako se delci razlikujejo od anti-delcev?

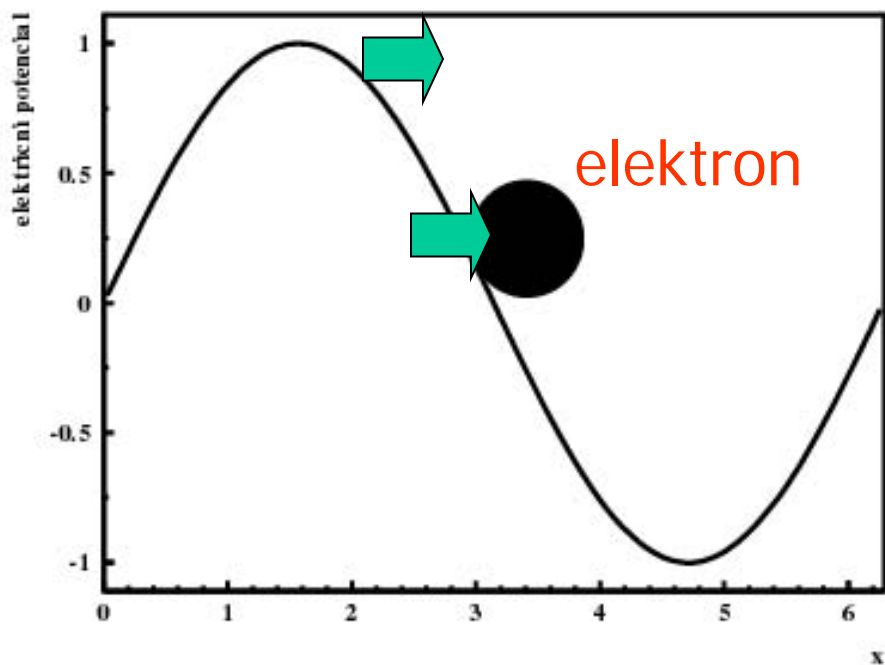
Trkalnik KEK-B

pospešuje elektrone in pozitrone do trka



Kako pospešujemo nabite delce?

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

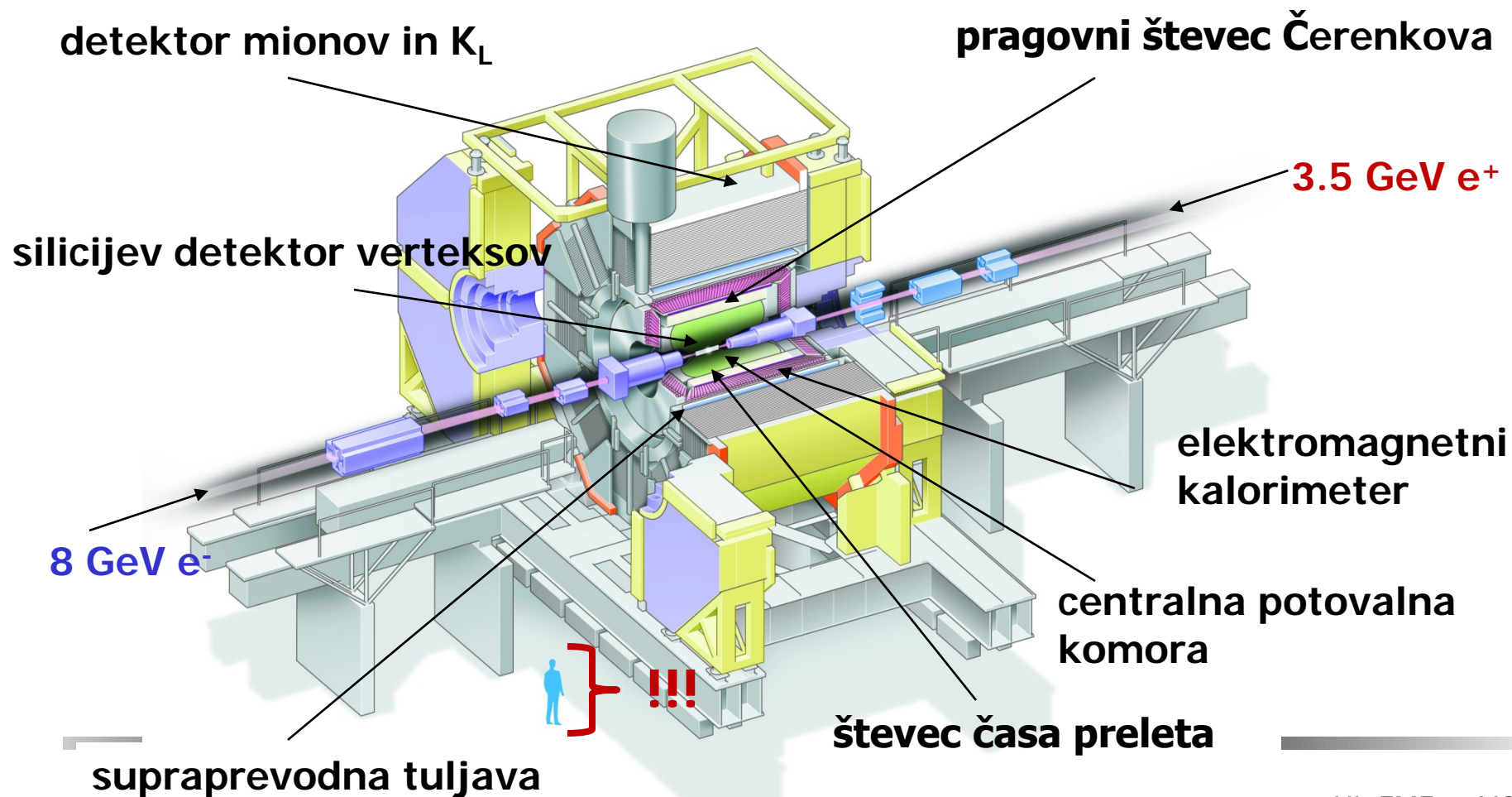


... podobno deskanju na valovih

Spektrometer Belle:

originalne tehnične rešitve in vrhunska tehnologija

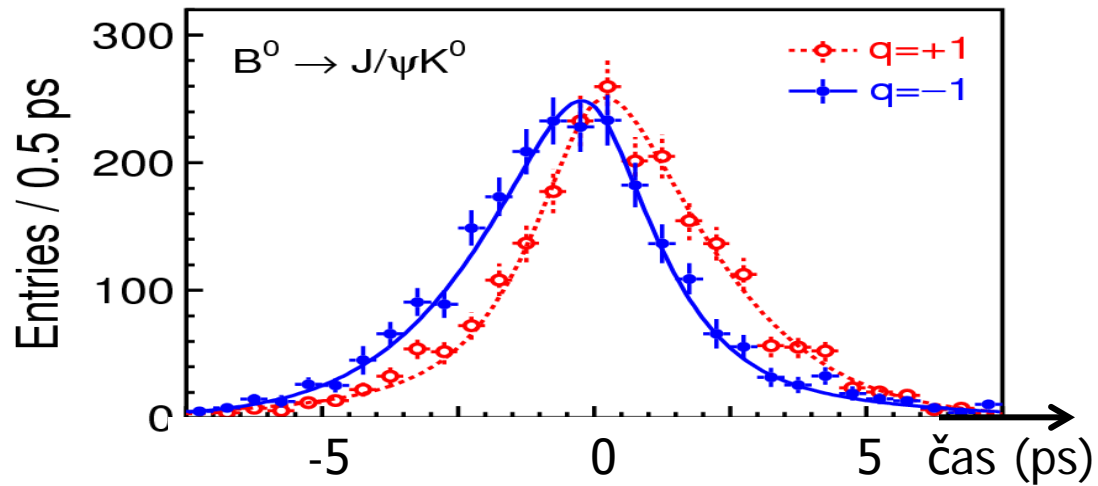
pospravljeno v $\sim 100 \text{ m}^3$ raziskovalne aparature



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!



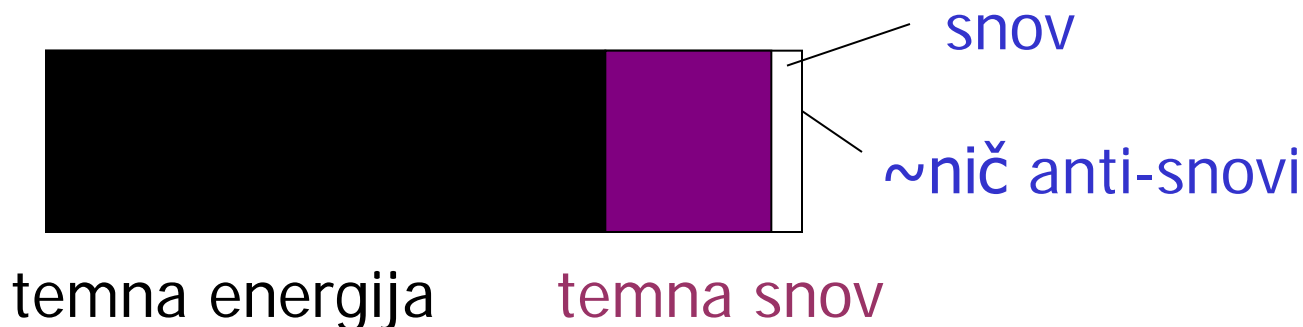
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

Žal ne...

Izmerjena kršitev simetrije med delci in antidelci je za **10 redov velikosti (10 milijard krat) 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 v CERNu)
- **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

Direktno opazovanje (LHC)



Posredno opazovanje (Belle II)

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

Raziskovalna skupina Belle II



Močna raziskovalna skupina ~ 400 fizikov s celega sveta

Prenos znanja

Računalnik iz vtičnice?

Novi detektorji za medicinsko slikanje

Nova spoznanja na področju radioterapije

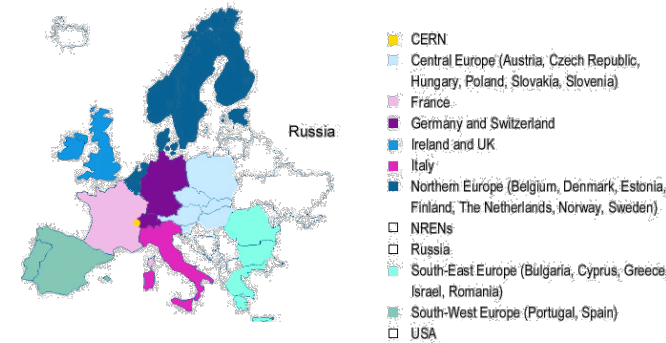
Spin-off osnovnih raziskav – primer 1

Svetovni splet: izmislili so si ga fiziki osnovnih delcev, ker so potrebovali orodje, ki bi jim omogočalo nemoteno raziskovalno delo tudi takrat, ko ne sedijo ob pospeševalniku.

Grid kot naslednja stopnja razvoja interneta: distribuirane računalniške kapacitete (**'računalnik iz vtičnice'**)

Ekspserimenti v fiziki osnovnih delcev so prvi veliki uporabniki Grida, razvoj in preizkus tehnologije

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



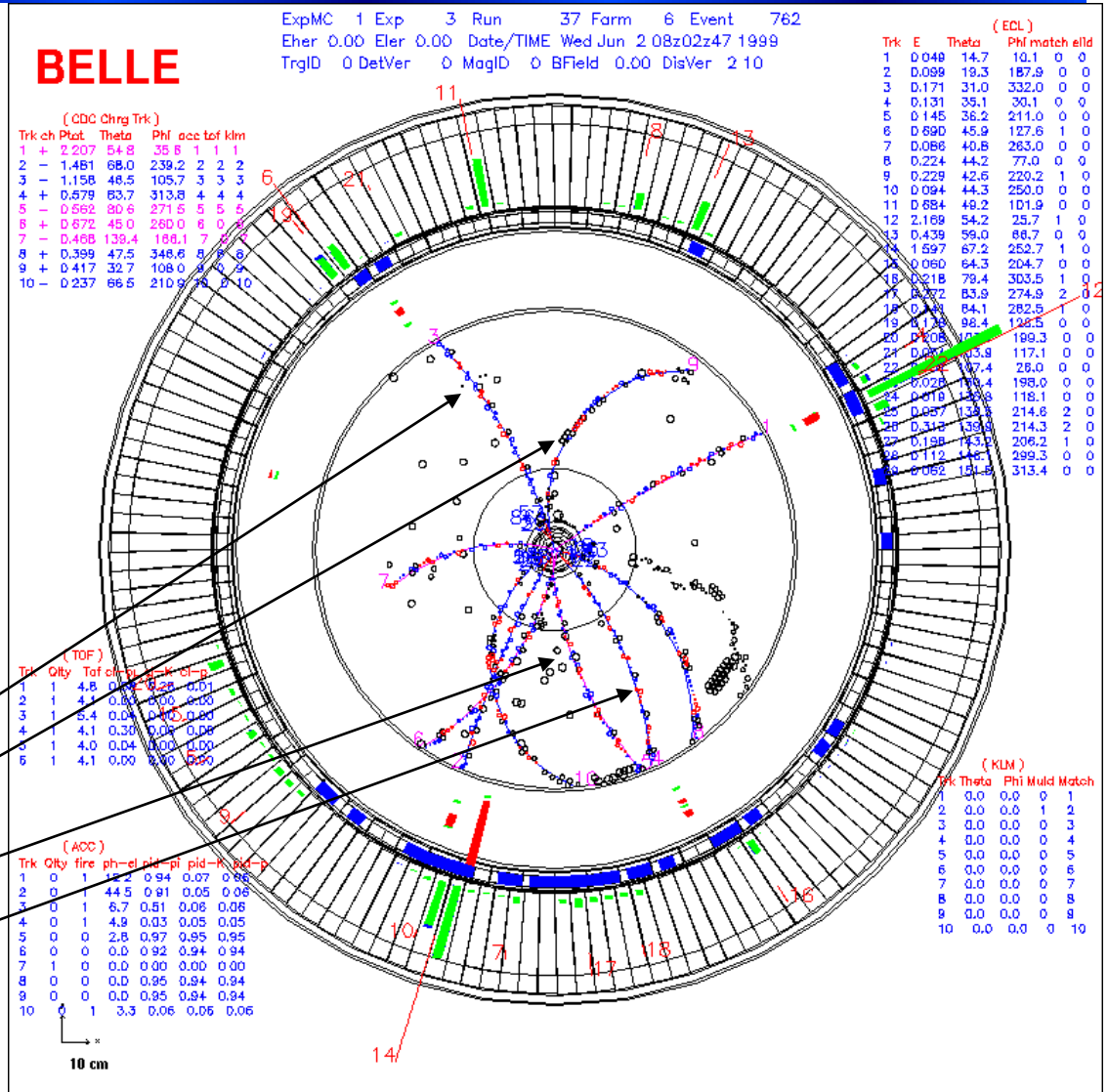
Kaj izmerimo z detektorjem?

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

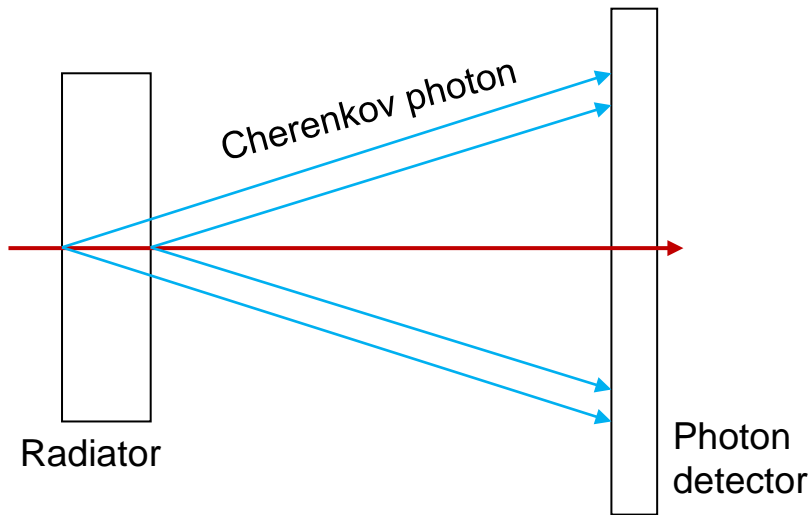
$$B^0 \rightarrow K_S J/\psi$$

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

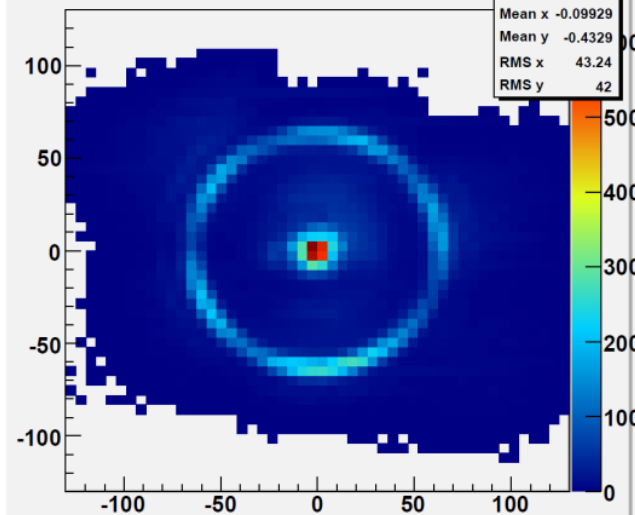
$$J/\psi \rightarrow \mu^- \mu^+$$



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

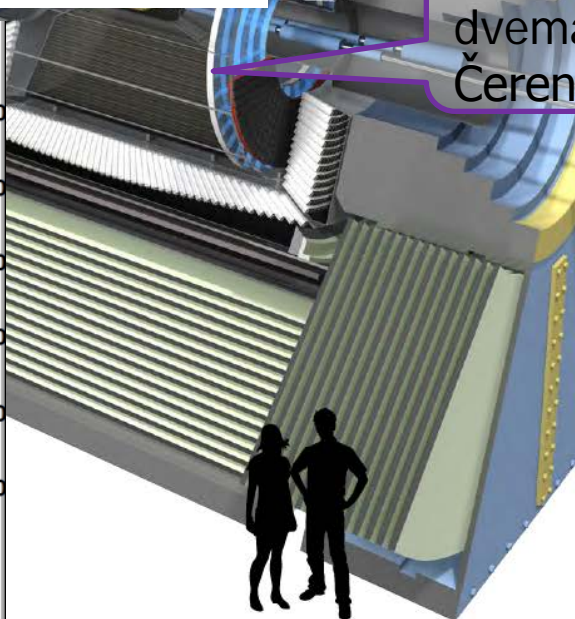
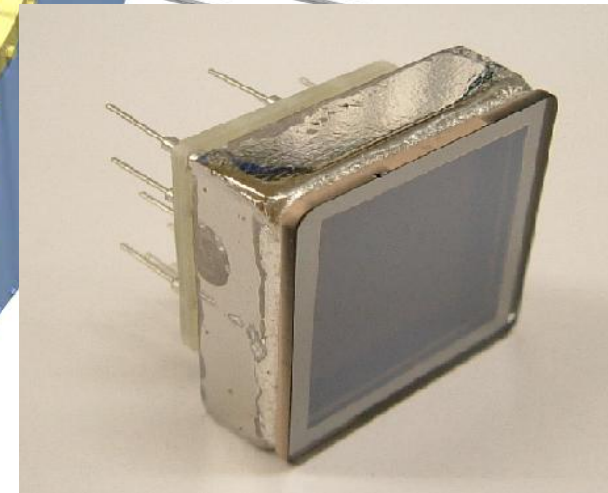


RICH Hit Map, w.r.t. track



rich_2d_1	
Entries	412449
Mean x	-0.09929
Mean y	-0.4329
RMS x	43.24
RMS y	42

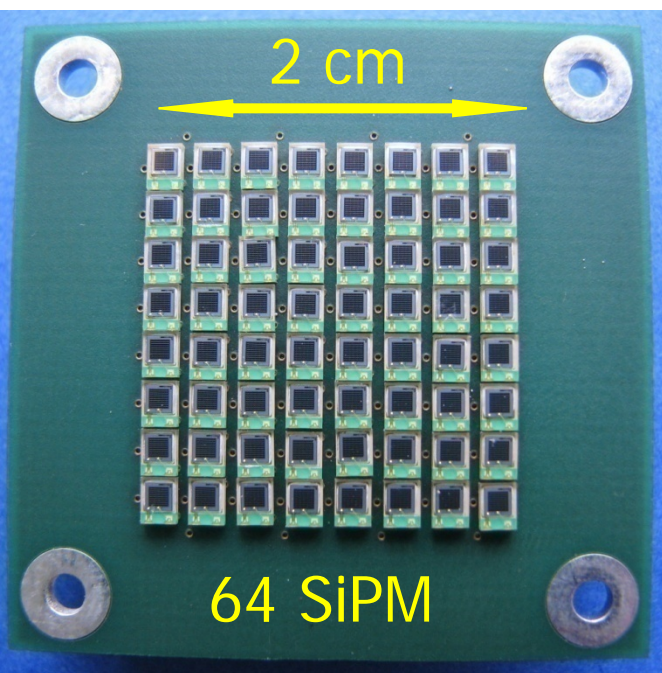
Identifikacija nabitih delcev z dvema detektorjema Čerenkovega sevanja



Detekcija svetlobe Čerenkova

Zaznati moramo posamezne fotone (energijske pakete, kvante) vidne svetlobe → potrebujemo zelo občutljiv senzor

Eden izmed kandidatov: silicijeve fotopomnoževalke (SiPM)

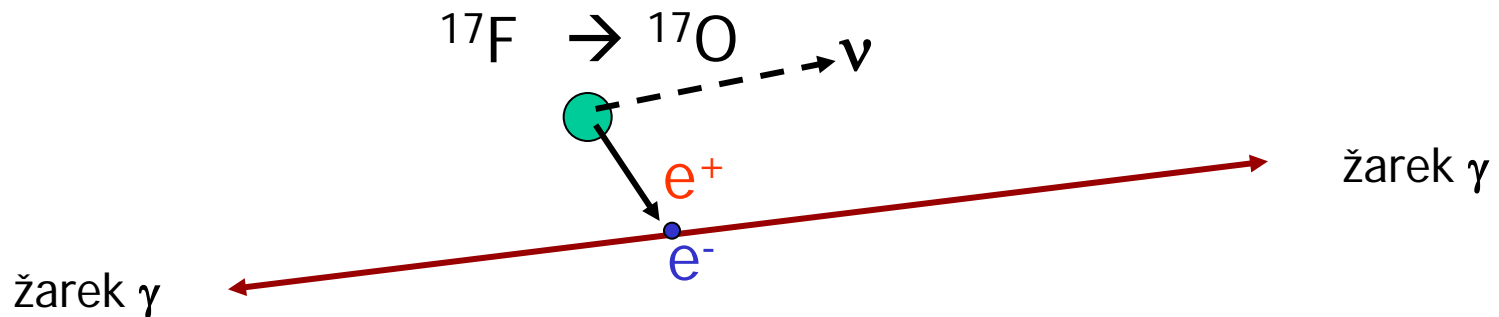


- zelo perspektiven nov tip detektorja
- tanek, deluje v visokih magnetnih poljih, ne potrebuje visoke napetosti, enostaven za uporabo

Uporaben tudi za medicinsko slikanje?

PET: pozitronska tomografija

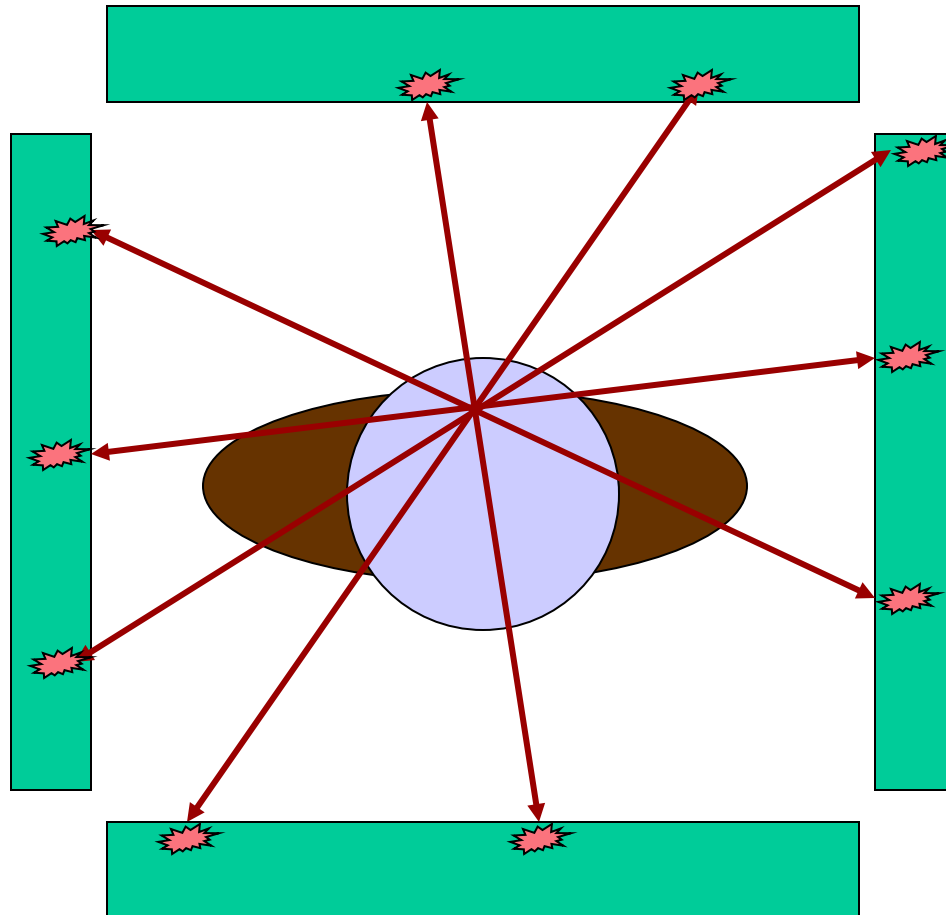
Radioaktivni fluor razpade z beta+ razpadom na kisik, pozitron in nevtrino



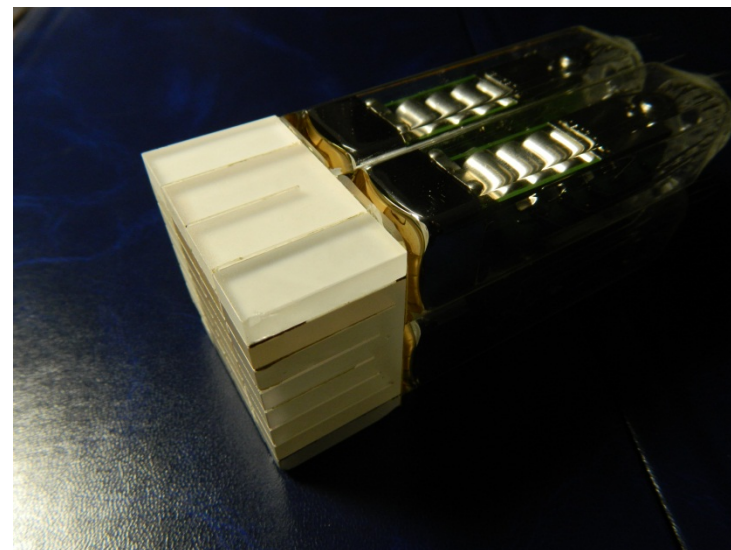
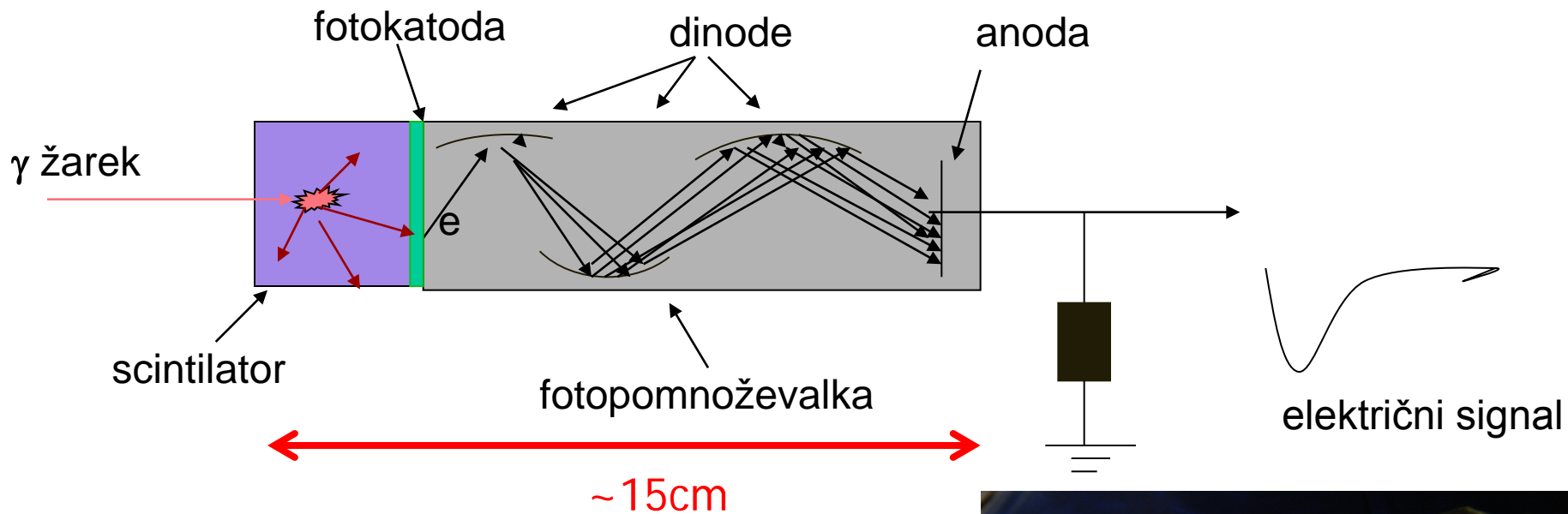
Pozitron se anihilira z elektronom v okoliški snovi, nastaneta dva žarka γ , ki odletita v nasprotnih smereh.

PET: pozitronska tomografija

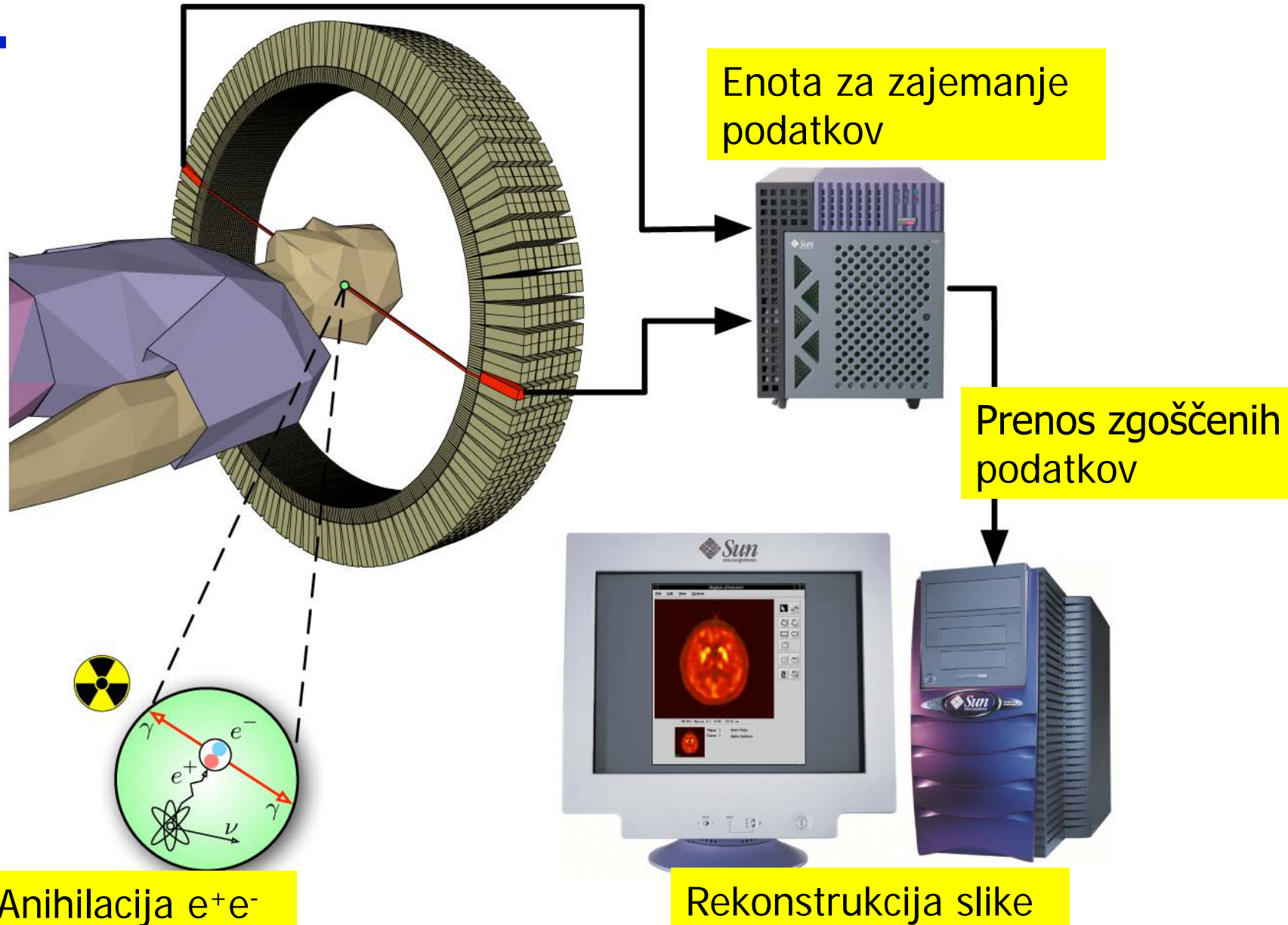
Pacientu vbrizgamo v kri snov, v katero smo vgradili **radioaktivni fluor** (recimo fluorodeoksiglukoza). Na mestih, kjer se bo nabralo več krvi s to snovjo, bo nastajalo več parov žarkov γ .



Detektor žarkov γ : scintilator s fotopomnoževalko

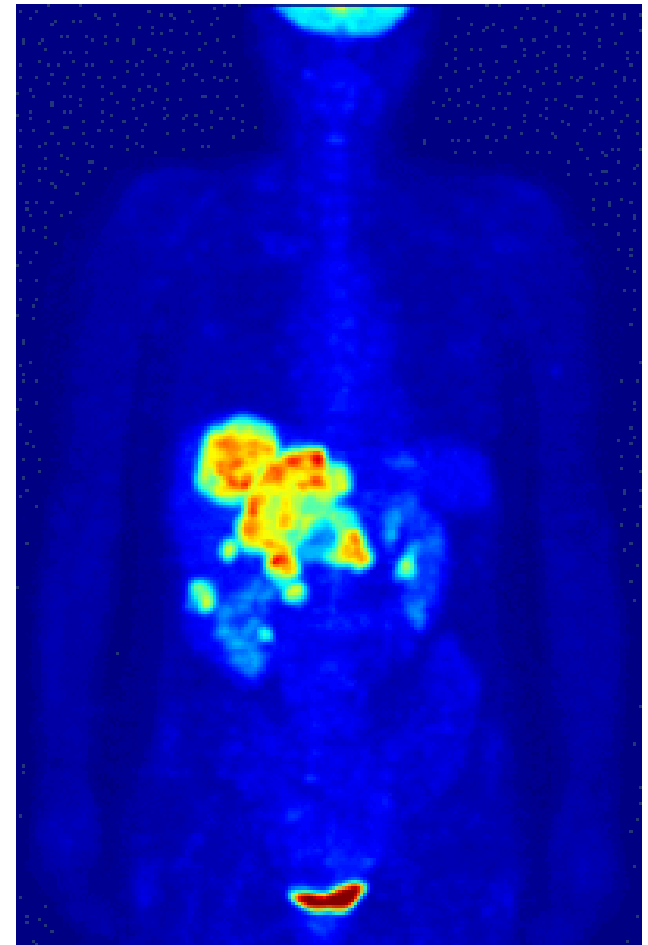
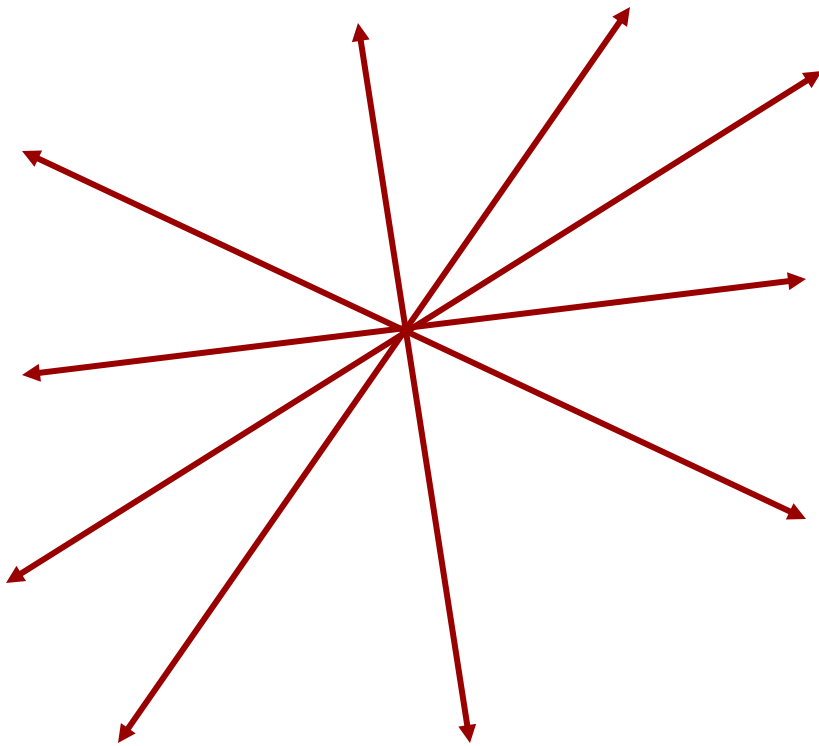


PET: pozitronska tomografija



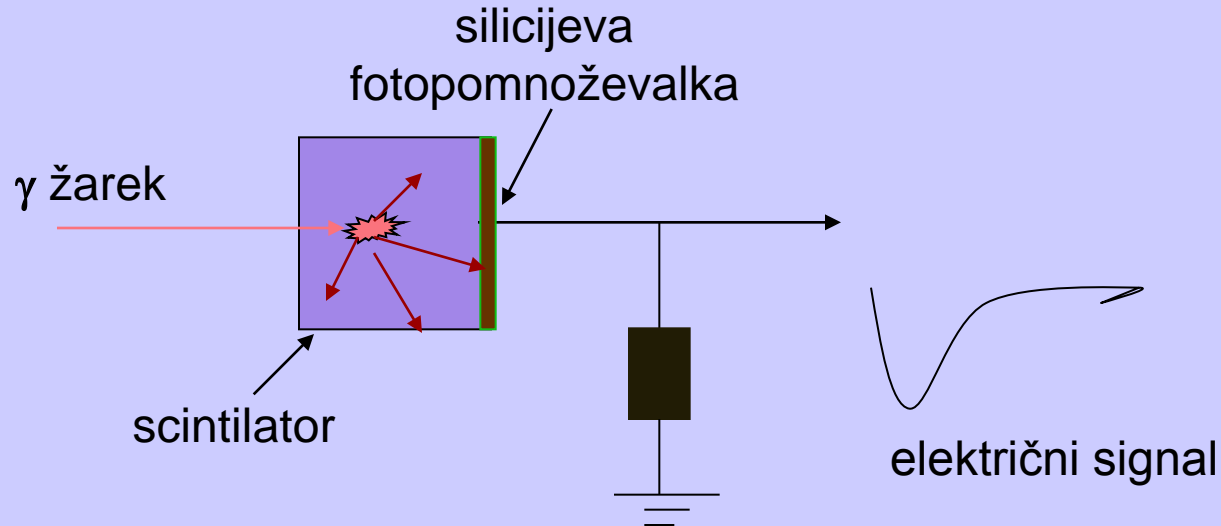
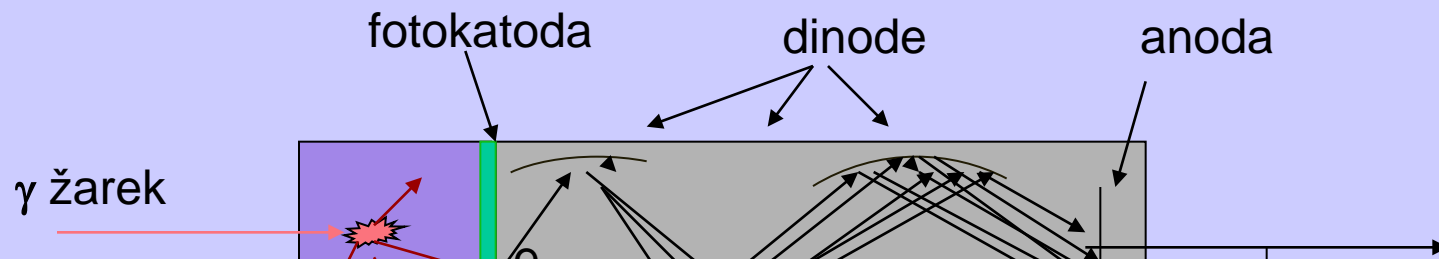
PET: pozitronska tomografija

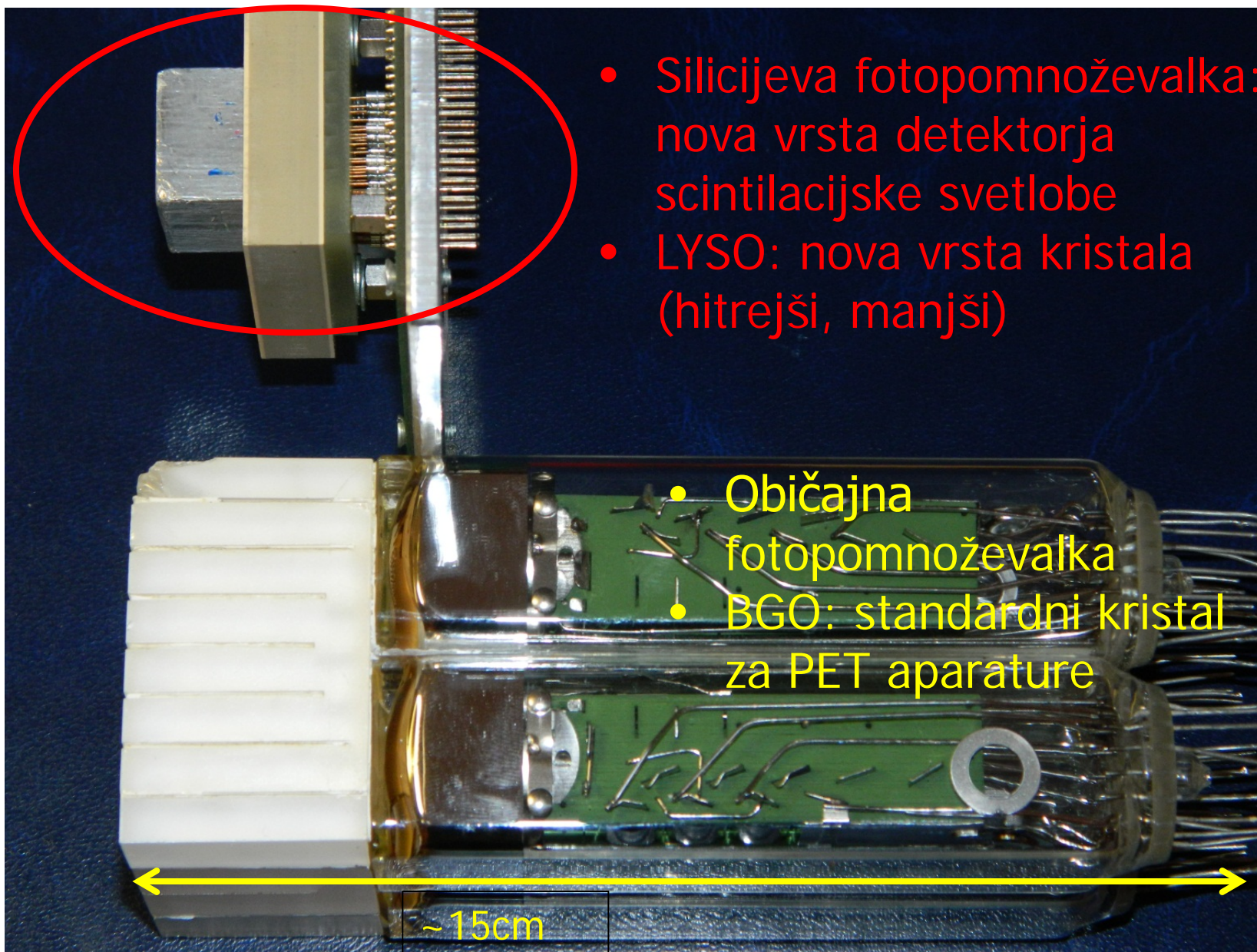
Rekonstrukcija slike: iz smeri premic določiti porazdelitev radioaktivnega fluora v telesu – podobno rekonstrukciji reakcij v fiziki osnovnih delcev.



PET z novo vrsto senzorja

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).



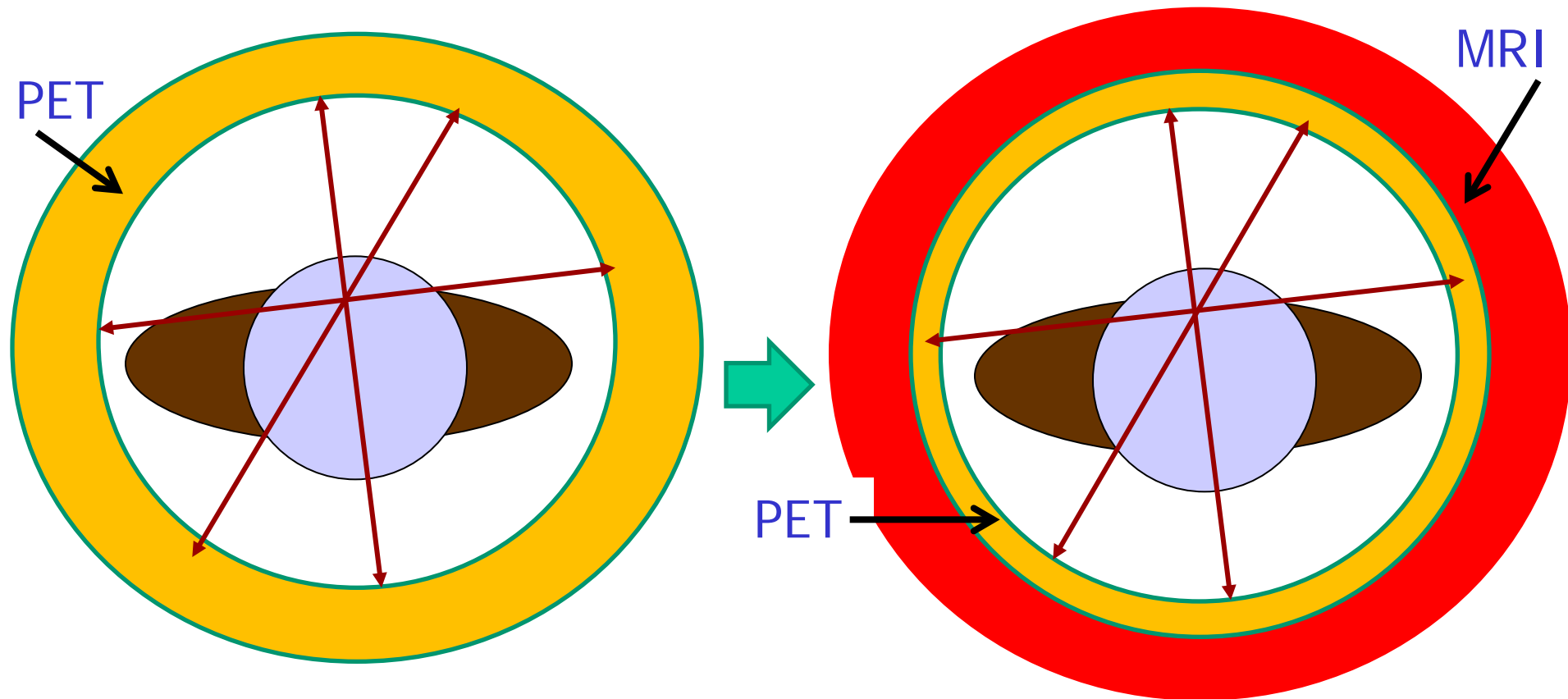


- Silicijeva fotopomnoževalka: nova vrsta detektorja scintilacijske svetlobe
- LYSO: nova vrsta kristala (hitrejši, manjši)

- Običajna fotopomnoževalka
- BGO: standardni kristal za PET aparature

~15cm

Nova vrsta senzorja, ki smo ga razvili za meritve v fiziki osnovnih delcev: → bistveno manjši od obstoječih detektorjev in deluje v velikih magnetnih poljih.

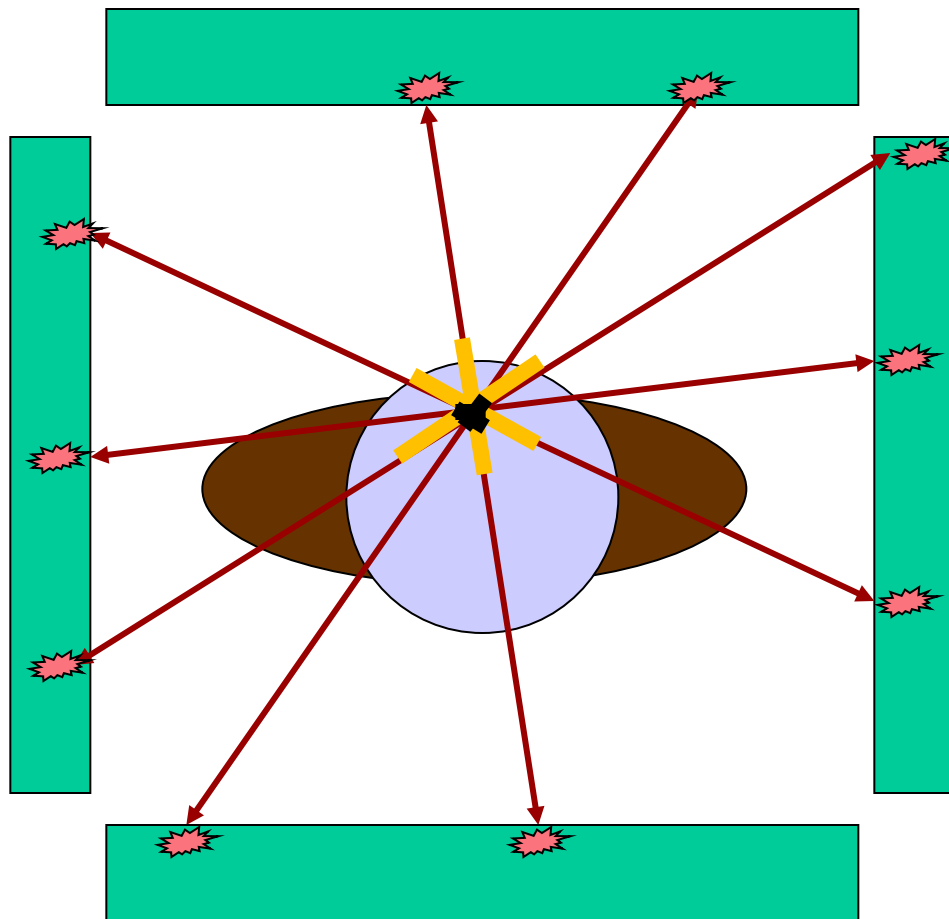


Omogoča sočasno slikanje z magnetno resonanco in PET – pomembna izboljšava za učinkovito diagnostiko!

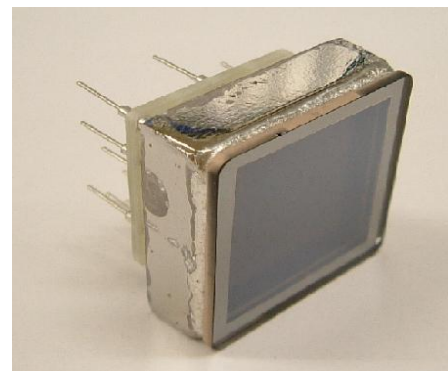
TOF-PET: pozitronska tomografija z meritvijo časa preleta

Zmerimo čas detekcije žarka gama → določimo lahko, kje vzdolž daljice se nahaja izvor.

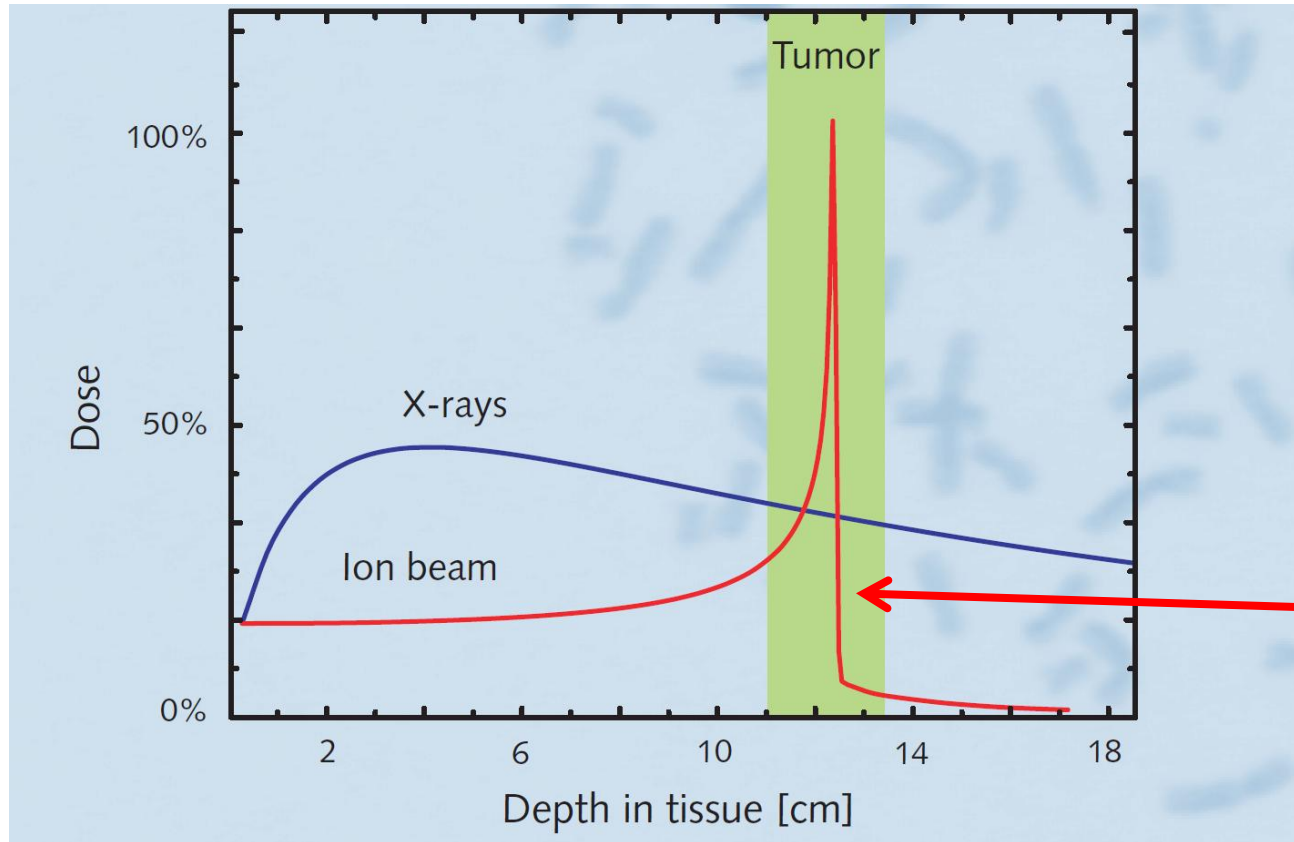
Komercialno dosegljive aparature: **skromna natančnost**



Nova metoda za detekcijo (večkanalna fotomnoževalka in kristal – sevalec Čerenkova): možna bistvena izboljšava!



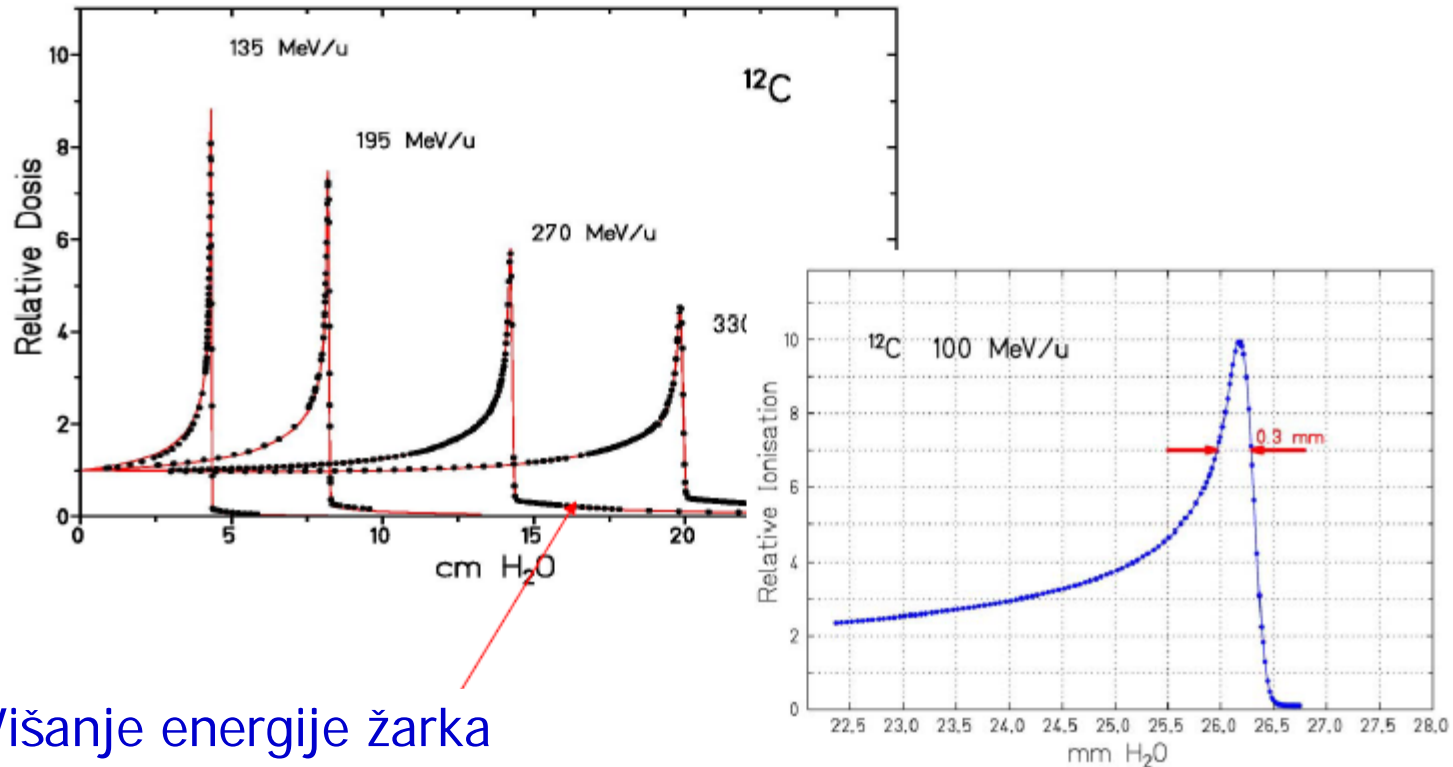
Radioterapija s pospešenimi ioni



Braggova krivulja
in Braggov vrh

Absorbirana doza v odvisnosti od globine ima za žarke nabitih delcev izrazit vrh: posledica dejstva, da počasnejši nabiti delci pri prehodu skozi snov izgubljajo energijo več energije kot hitrejši (izgube so sorazmerne $1/v^2$)

Terapija s hadroni: ogljikova jedra

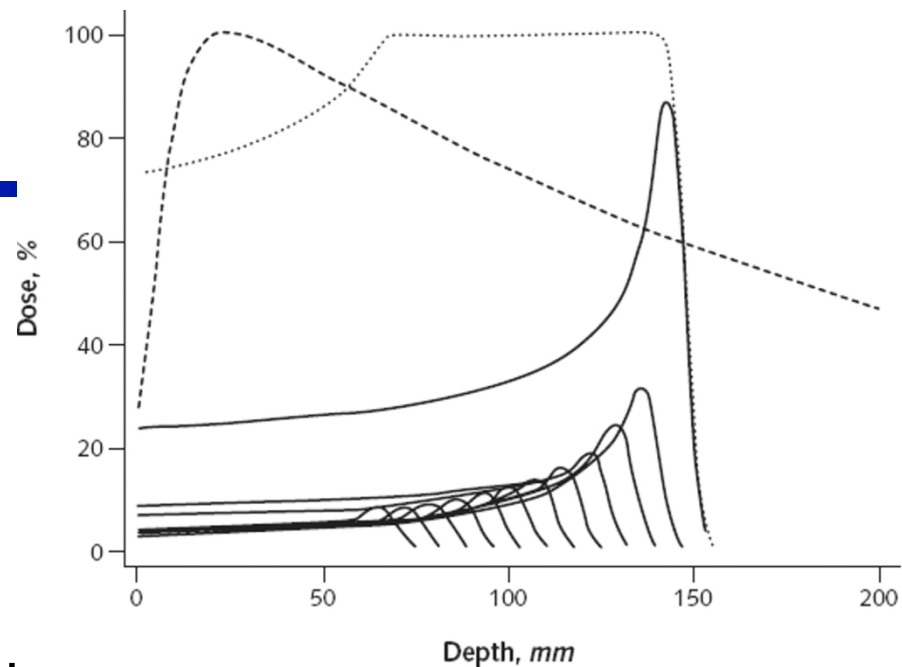


Višanje energije žarka

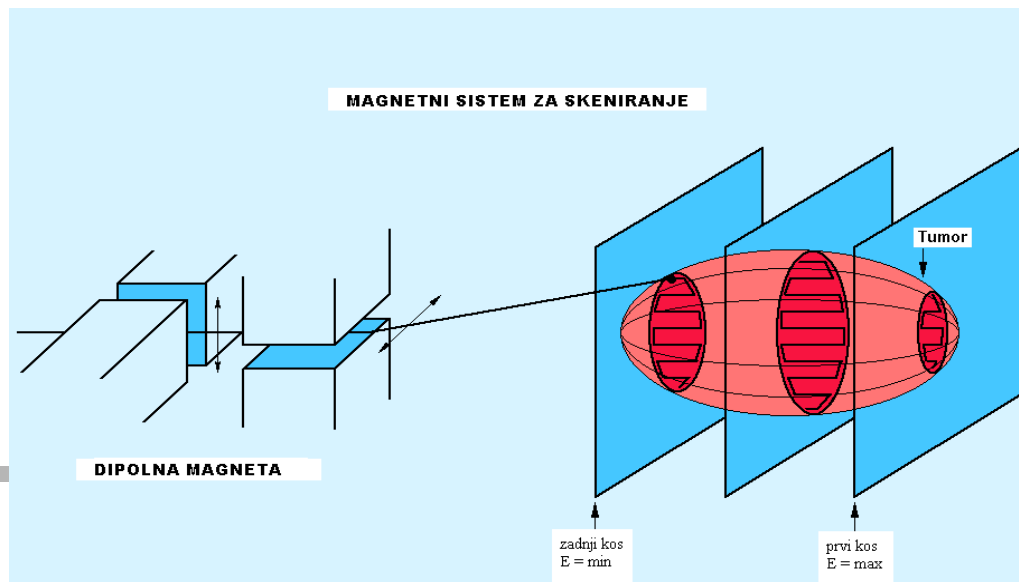
Odvisnost dosega od energije: z izbiro energije delcev v žarku določimo globino obsevanja.

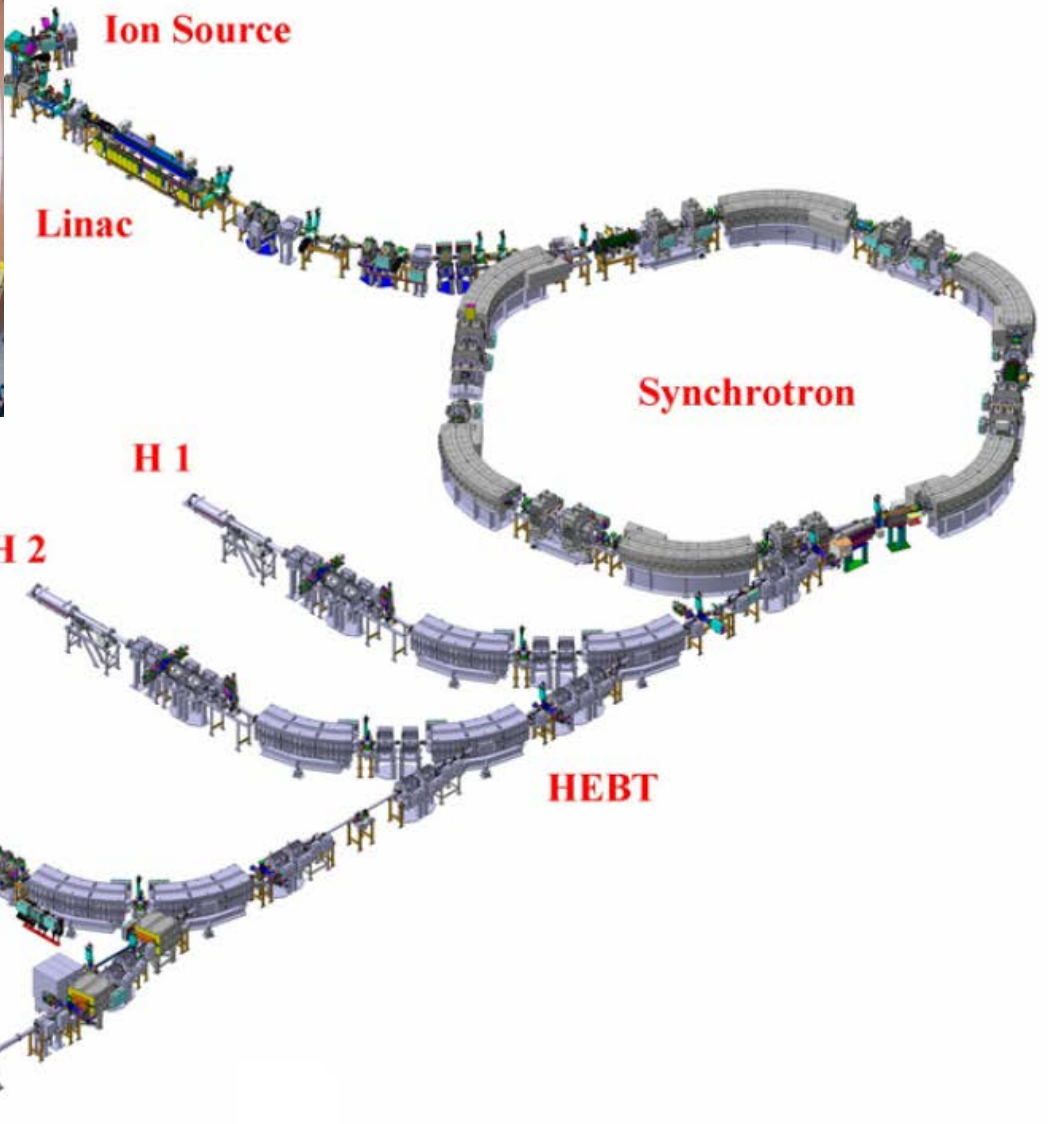
Obsevanje s pospešenimi ioni

Globina: z izbiro energije



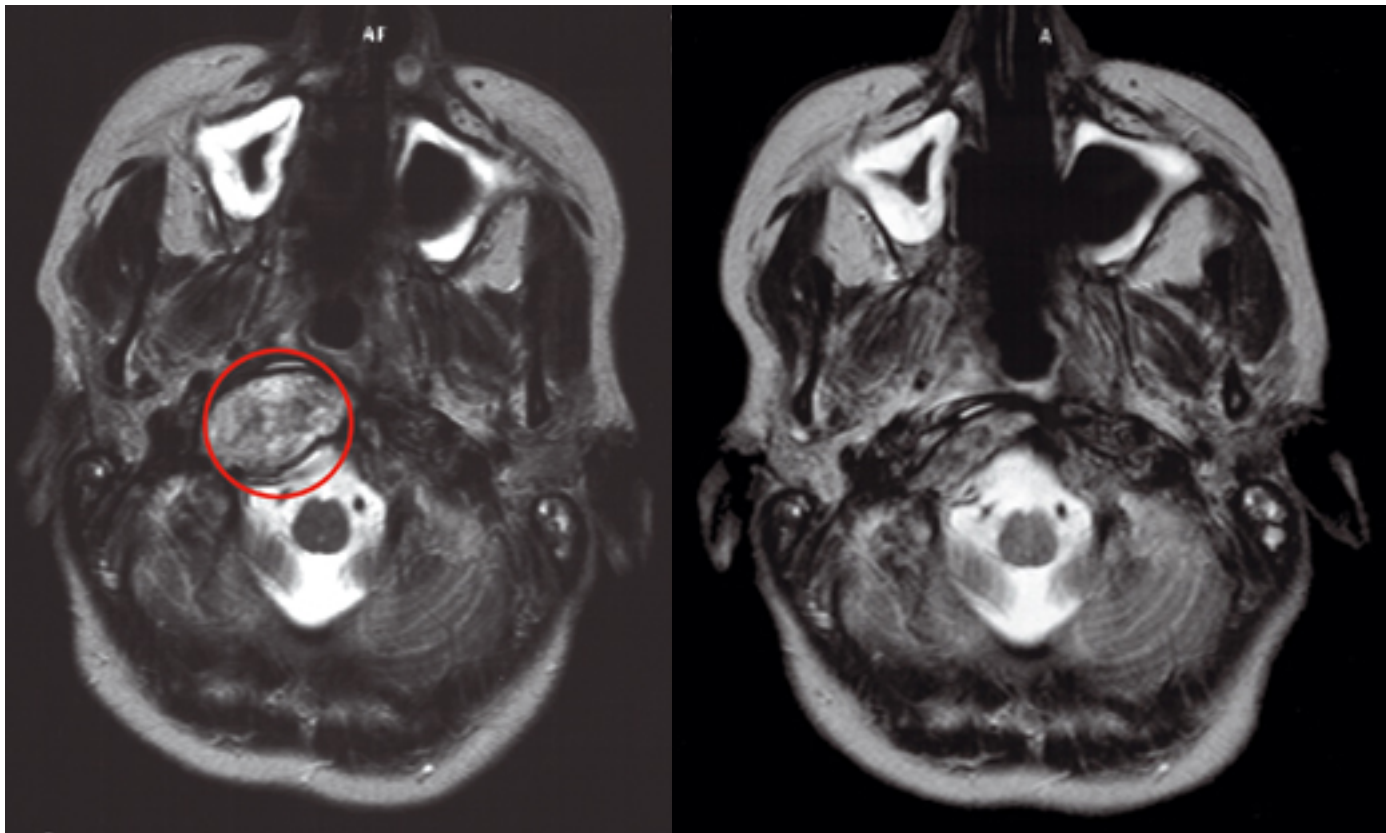
Prečni položaj žarka: sistem za skeniranje





Heidelberg ion therapy facility: 300 pacientov na dan, obsevanja s protoni in ogljikom

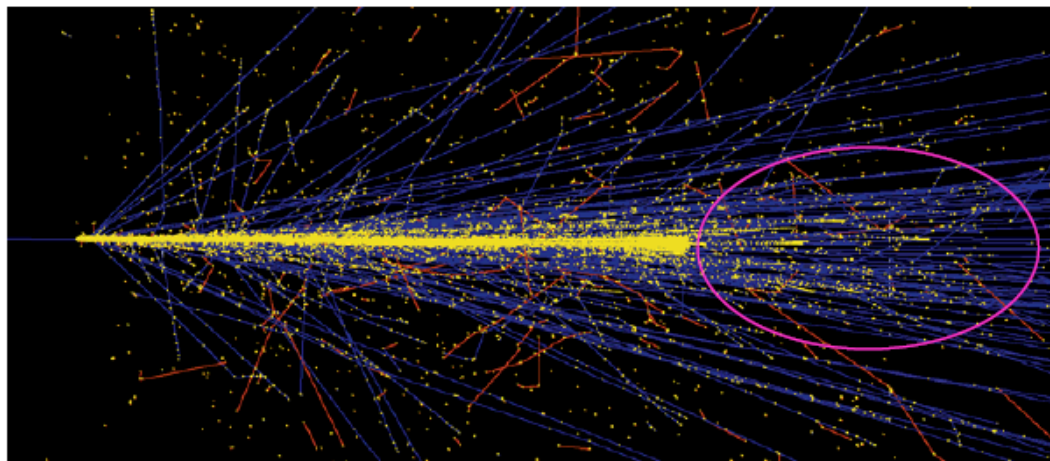
Primer uspešnega zdravljenja



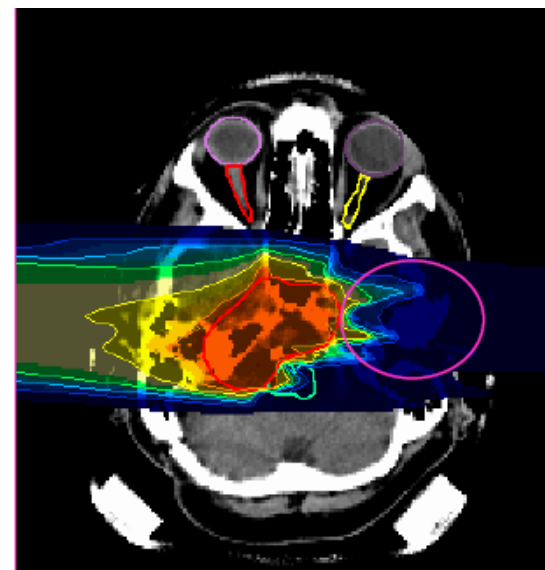
Pacient pred in po šestih tednih zdravljenja.

Terapija s hadroni: ogljikova jedra in protoni

High-energy carbon beam stopping in water



I. Pshenichnov

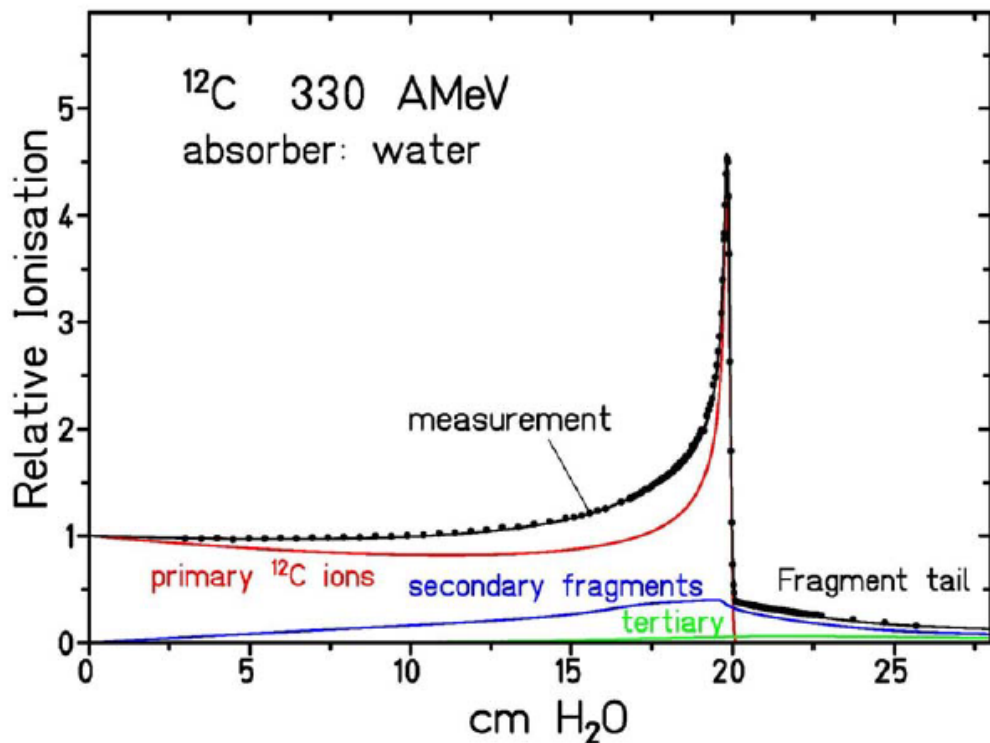


Odprta vprašanja: kaj je boljše, ogljikova jedra ali protoni?

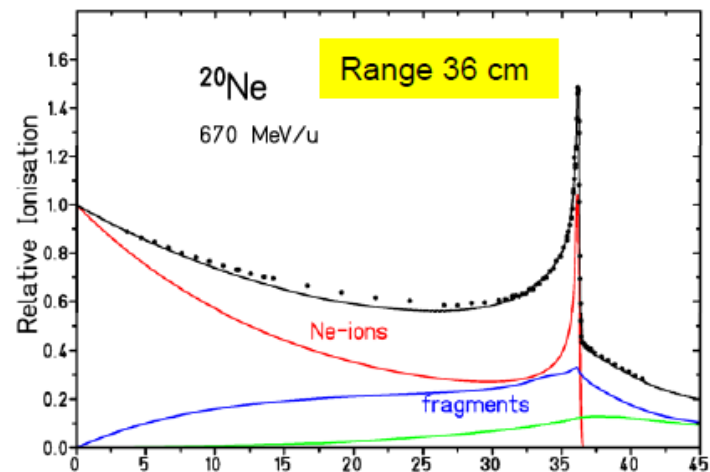
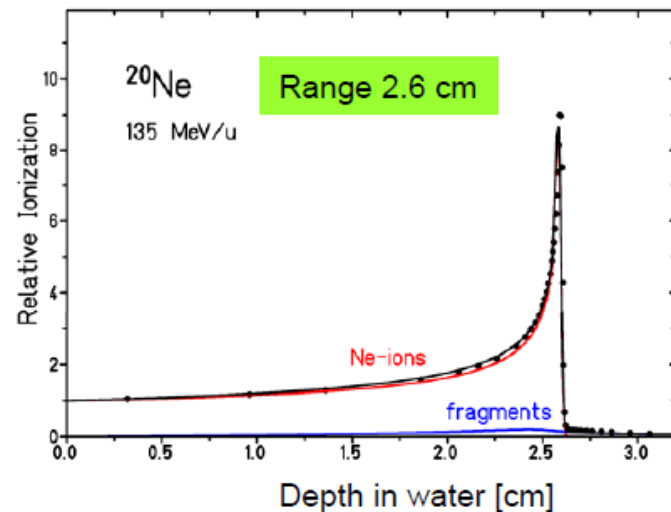
Problem: jedrske reakcije, ki jih sprži ogljik pri trkih z jedri v obsevani snovi (,fragmentacija').

Produkti reakcij letijo dalje → repi v porazdelitvi doze.

Terapija s hadroni: ogljikova jedra in protoni

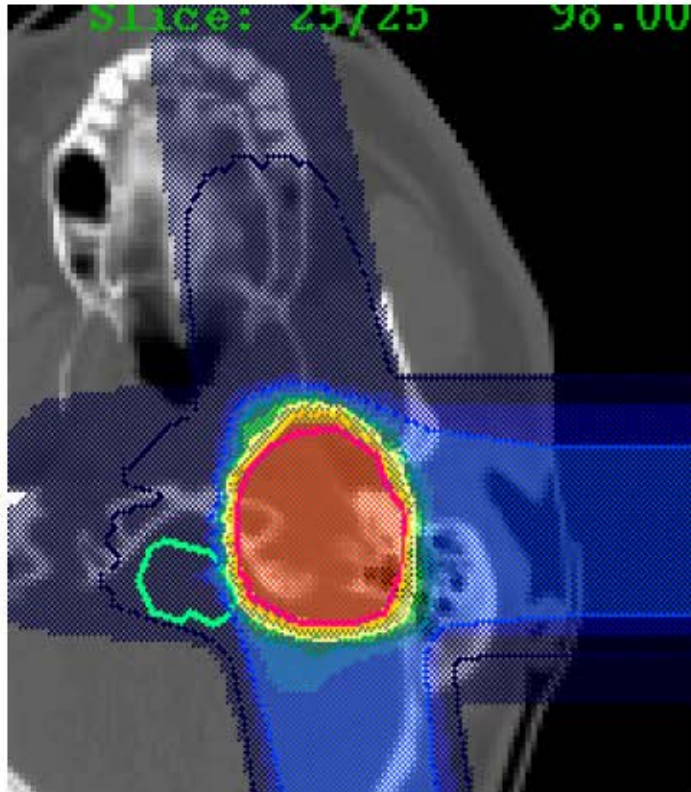


Z računalniško simulacijo procesov pri prehodu delcev skozi snov lahko zelo natančno napovemo, kakšni bodo efekti obsevanja.

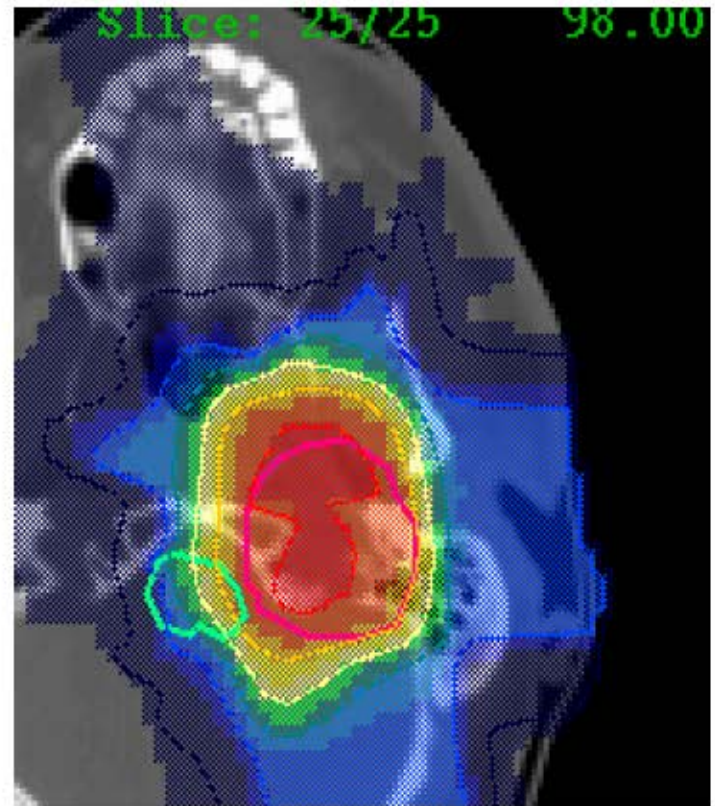


Terapija s hadroni: ogljikova jedra in protoni

C-12 (GSI)



Protons (Capetown/SA)



Razširitev žarka v prečni smeri: ogljik (levo) je boljši kot protoni (desno)

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.

Dodatne prosojnice

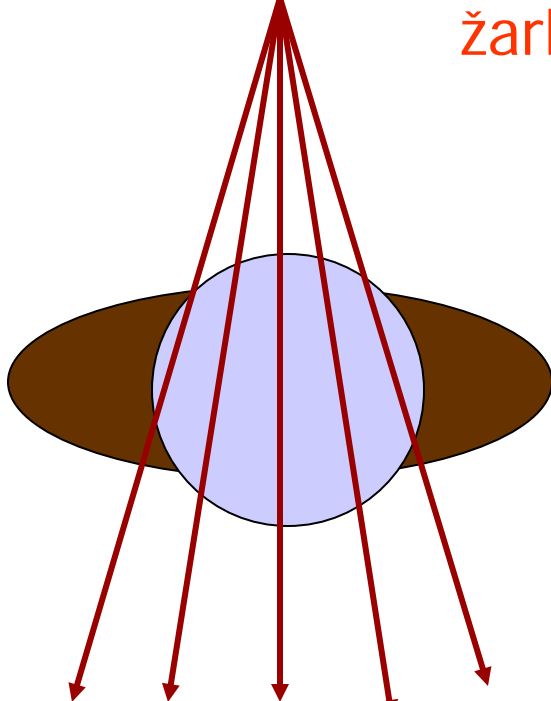
CT: tomografija z rentgenom

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

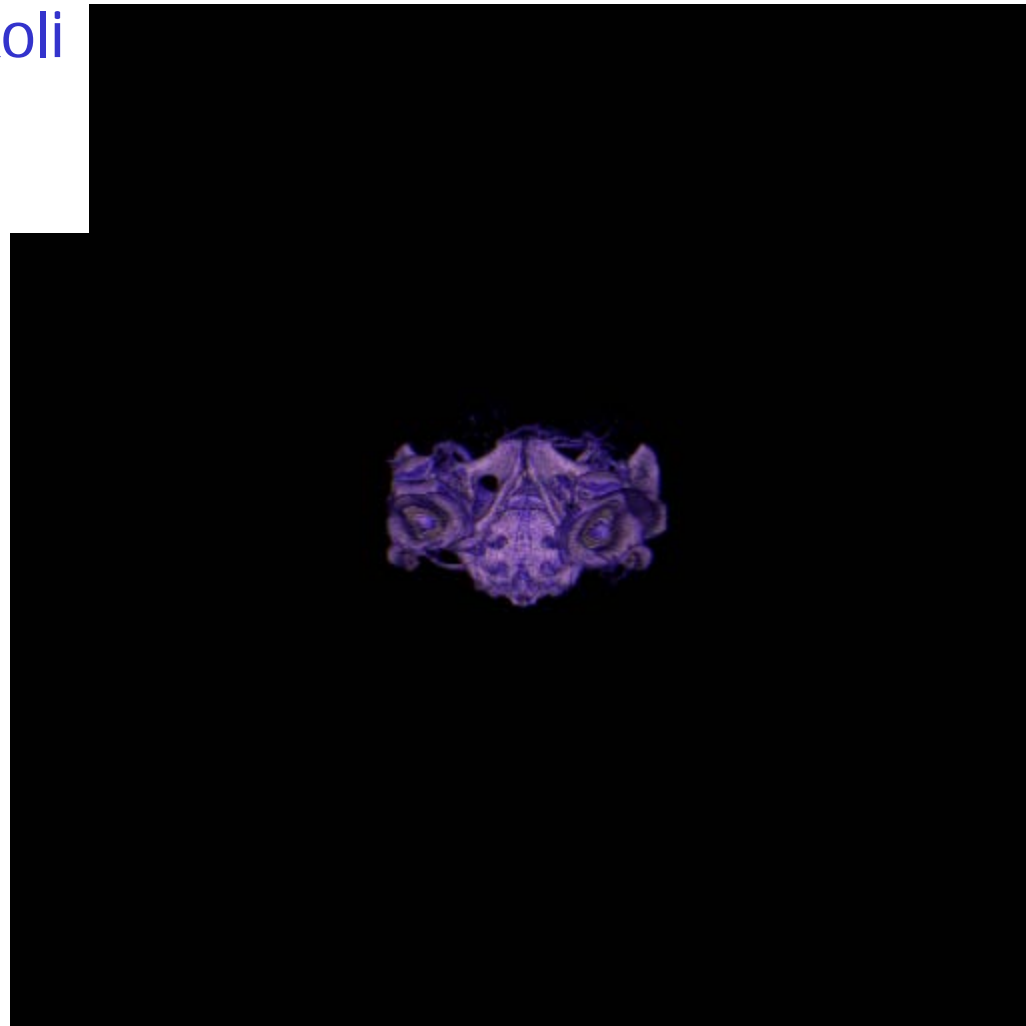
rentgen

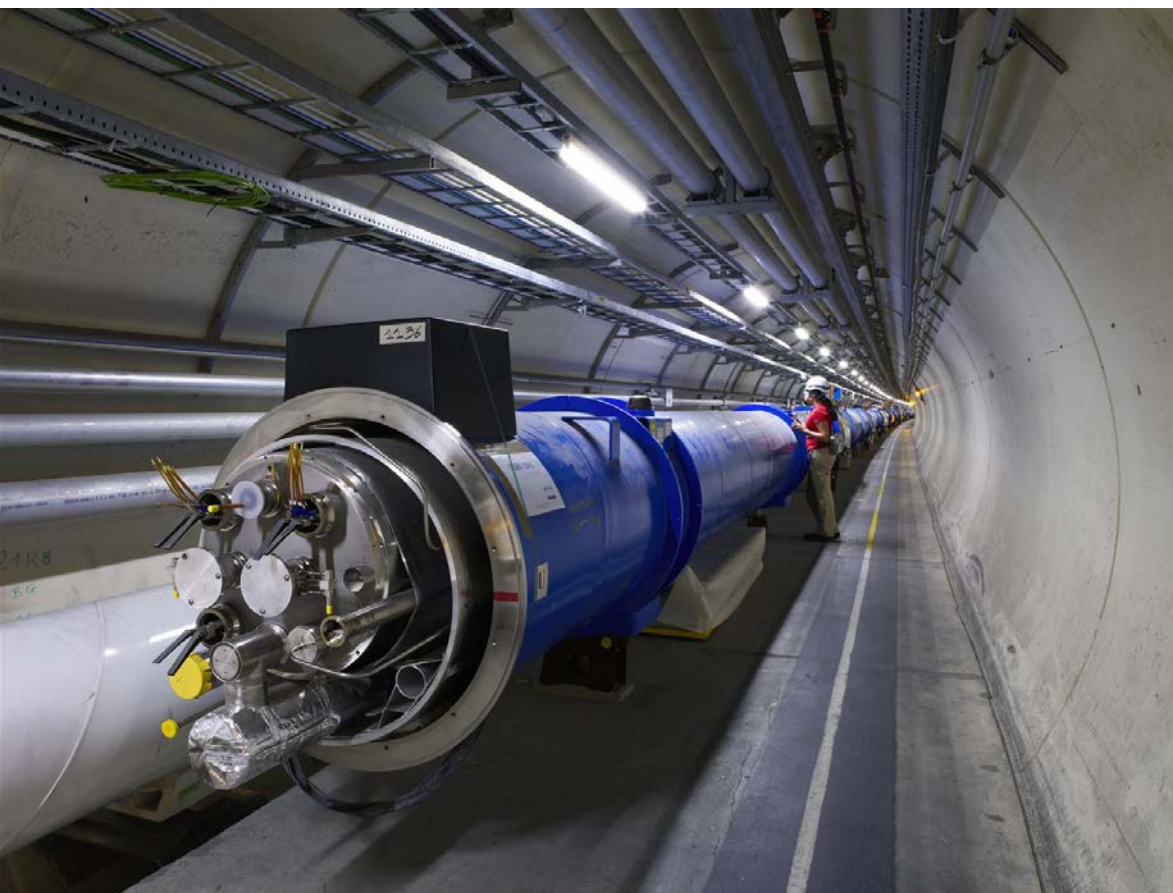


žarki X



detektor žarkov X

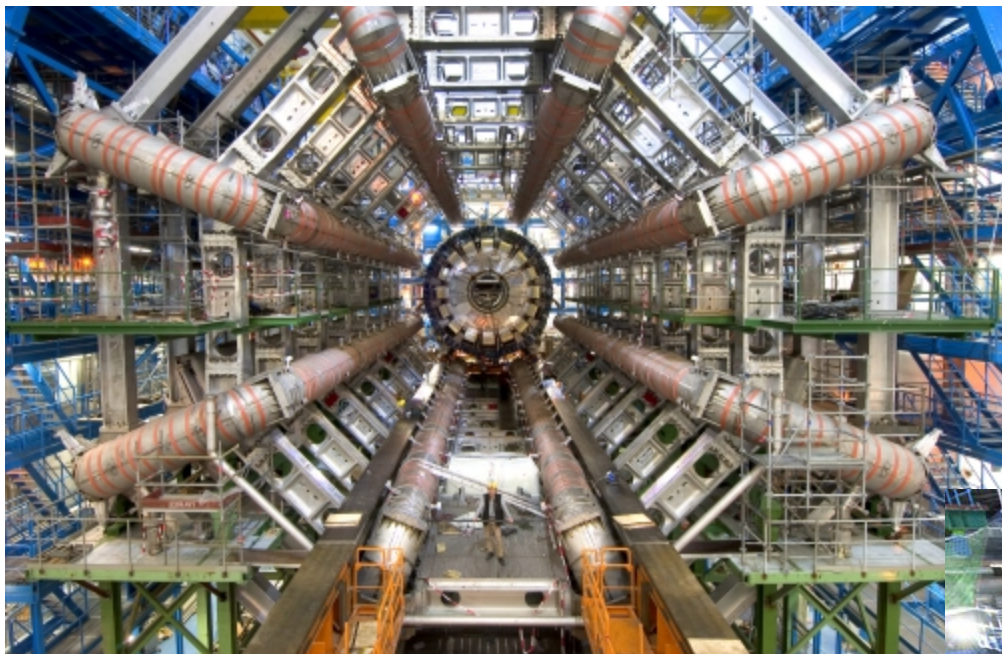




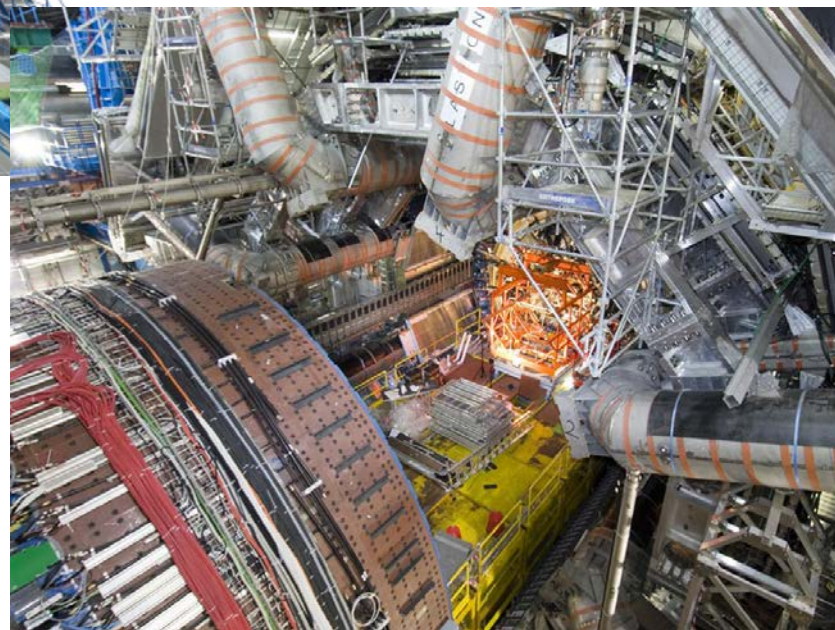
del 27 km dolgega
pospeševalnika

30. marec 2012





detektor ATLAS med izgradnjo



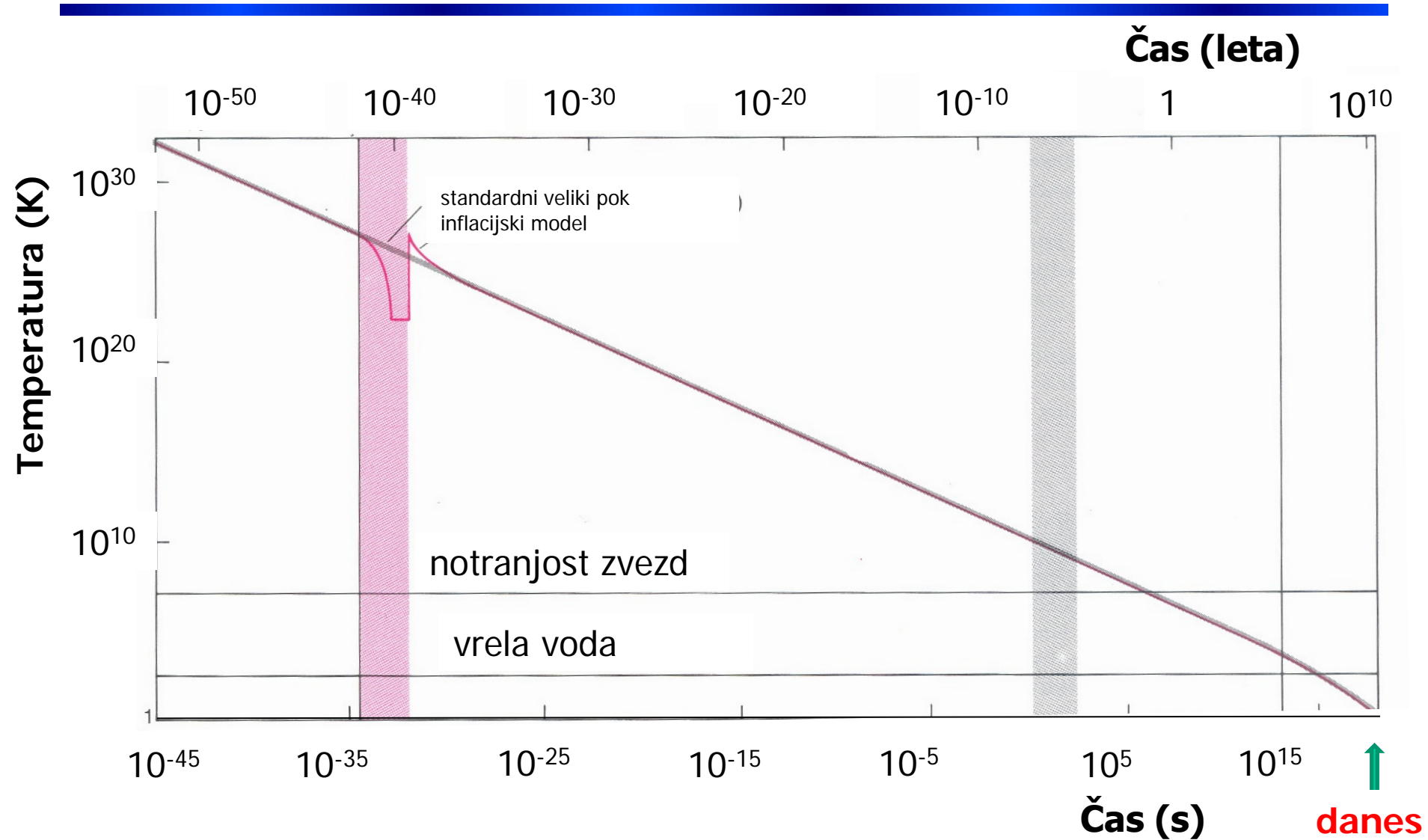
Iskanje Higgsove delca z detektorjema ATLAS in CMS ob LHC

- 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, in da ima maso približno enako masi 140 protonov
- Na dokončno potrditev bo treba počakati do konca tega leta, ko bo na razpolago dovolj velik vzorec podatkov.
- Prepričati se namreč moramo, da ne gre za slučajne kombinacije delcev, v katere naj bi Higgsov delec razpadel....

Primerjava z metanjem kocke:

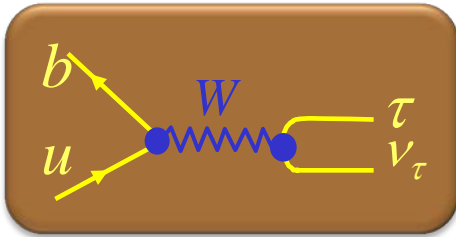
- Trenutno stanje meritev je tako, da je verjetnost, da zaznani razpadi ne ustrezajo razpadu Higgsovega delca, ustreza verjetnosti, da smo 2x zaporedoma vrgli šestico.
- Zares prepričani bomo šele, ko bo verjetnost za napako enaka verjetnosti, da je šestica padla zaporedoma 8x.

Temperatura vesolja

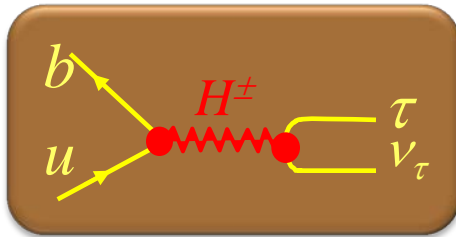


Primer: lov na nabit Higgsov delec v razpadu $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$

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.

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

→ Lastnosti nabitega Higgsa (recimo njegova masa)

Kako naprej?

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

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