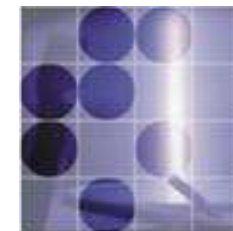


Izzivi fizike osnovnih delcev

Peter Križan

*Fakulteta za matematiko in fiziko UL,
in Institut Jožef Stefan*

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*

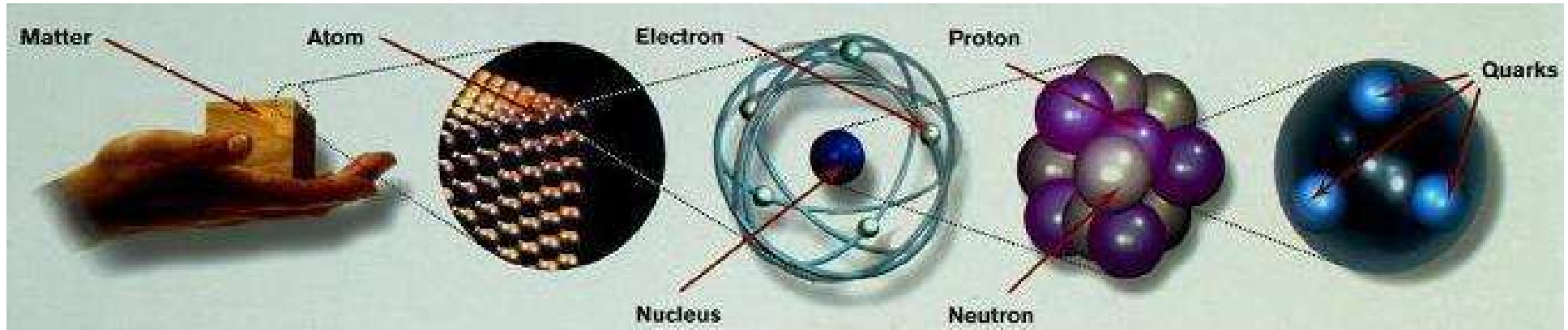


Nastopno predavanje, SAZU, 20.9.2017

Izzivi fizike osnovnih delcev

- Kaj vemo: Standardni model
- Zveza med fiziko delcev in kozmologijo
- Standardni model: najbolj natančna teorija vseh časov
- Razpoke v teoriji
- Iskanje pojavov Nove fizike
- Pospeševalniki in detektorji
- Quo vadis, fizika delcev?

DELCI po nadstropjih



snov

atomi

atomska jedra,
elektroni

protoni,
nevtroni

kvarki

'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

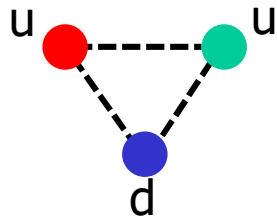
(teorija osnovnih delcev in njihovih interakcij)

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...

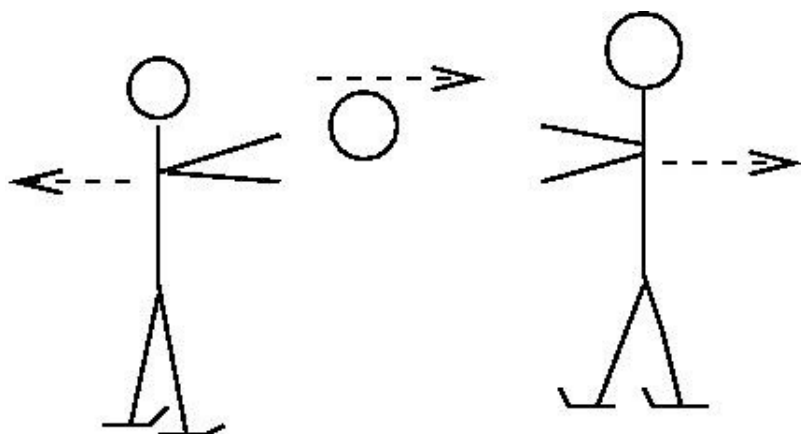
π^+ : kvark u + antikvark \bar{d}

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

masa
 $1/7 m_p$
 $5.5 m_p$

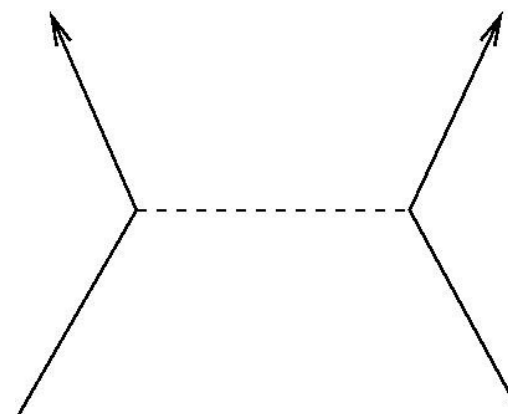
in množica njihovih sorodnikov...

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.



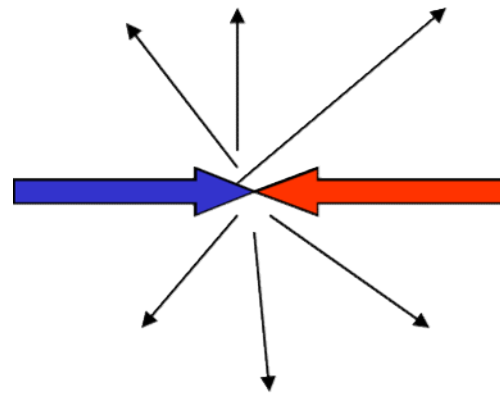
Osnovni delci sodelujejo (interagirajo) med sabo preko nosilcev sile (interakcije)

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

Kako proučujemo delce, ki jih v naravi običajno ne najdemo?

Delce, ki jih v naravi ni, moramo narediti.

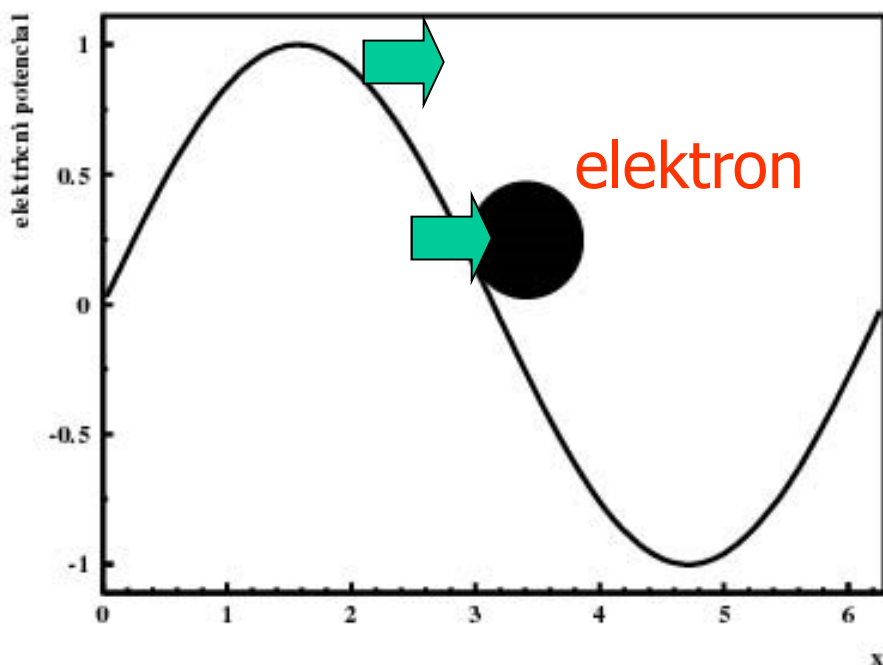
- Pri tem si pomagamo z Einsteinovo relacijo **$E = m c^2$**
- Delce (elektrone, protone) pospešimo in jih trkamo ene v druge. Pri trku se sprosti energija, nastanejo novi delci, ki so lahko bistveno bolj masivni kot elektroni ali protoni



- Ti novi delci hitro razpadejo, pri tem pa nastanejo delci, ki jih poznamo in jih lahko zaznamo v detektorju

Kako pospešujemo nabite delce?

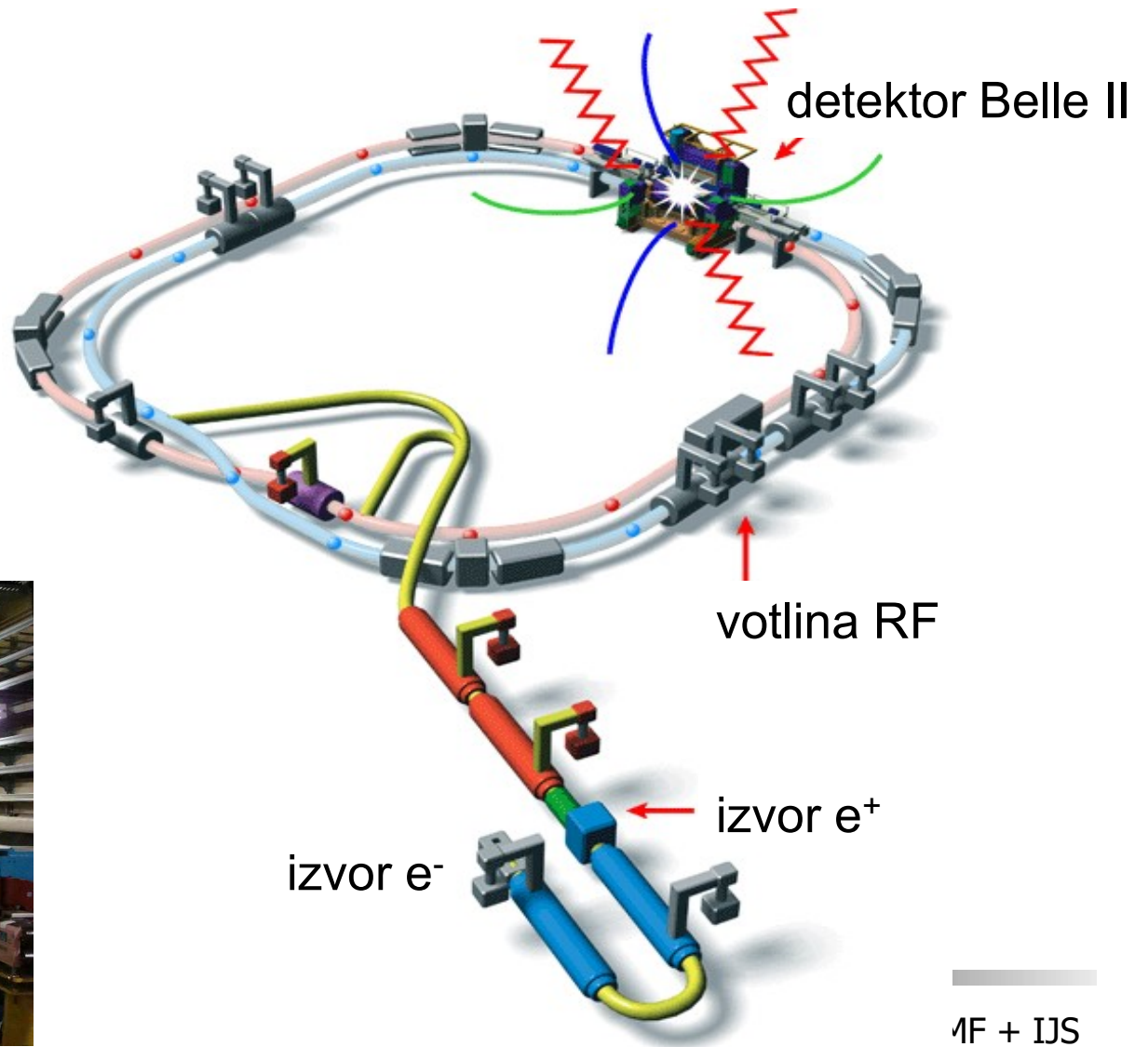
Pospeševanje z elektromagnetnim valovanjem (tipična frekvenca 500 MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 in 1800 MHz)



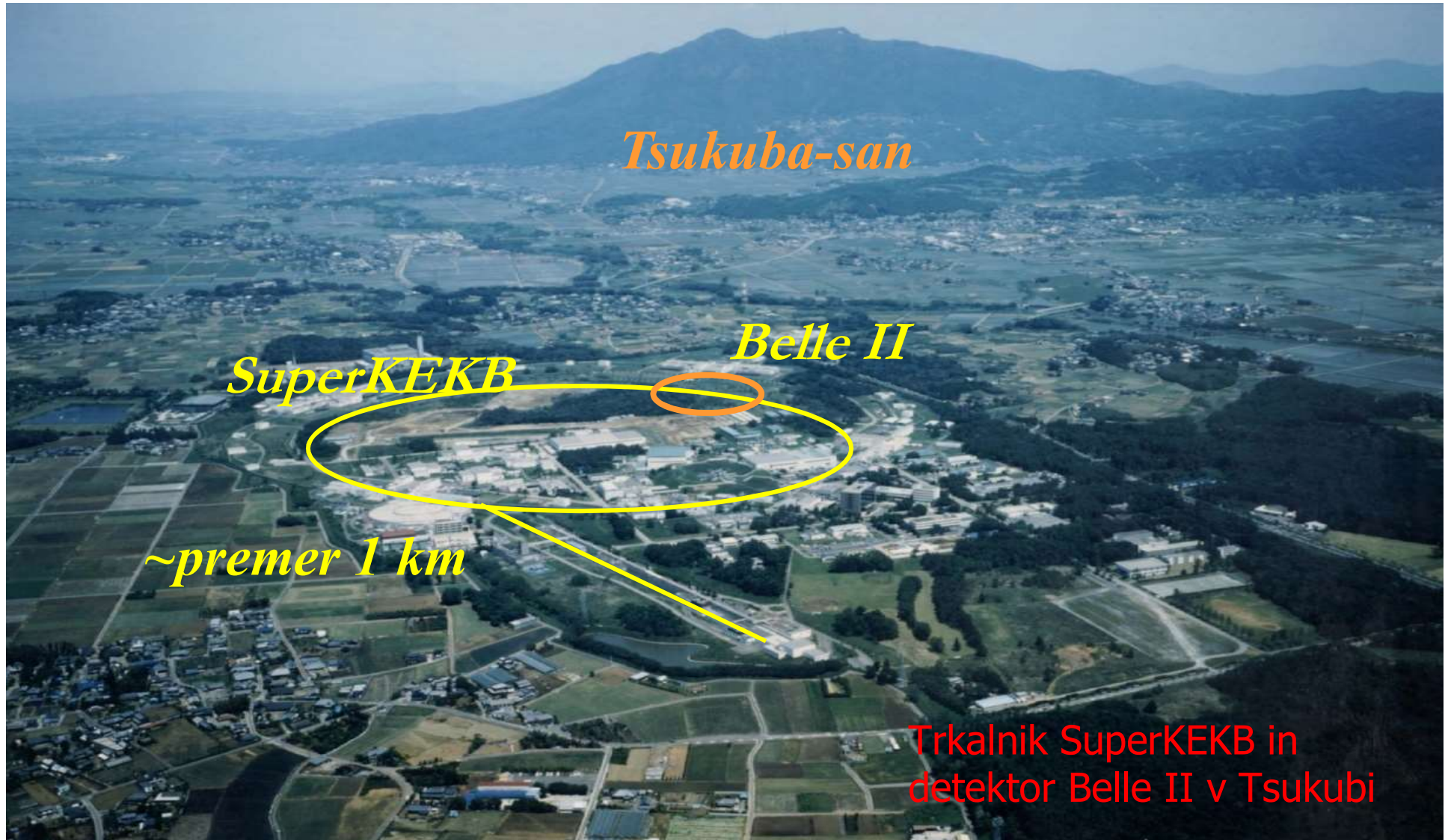
... podobno deskanju na valovih

Trkalnik SuperKEKB

pospešuje elektrone in pozitrone do trka

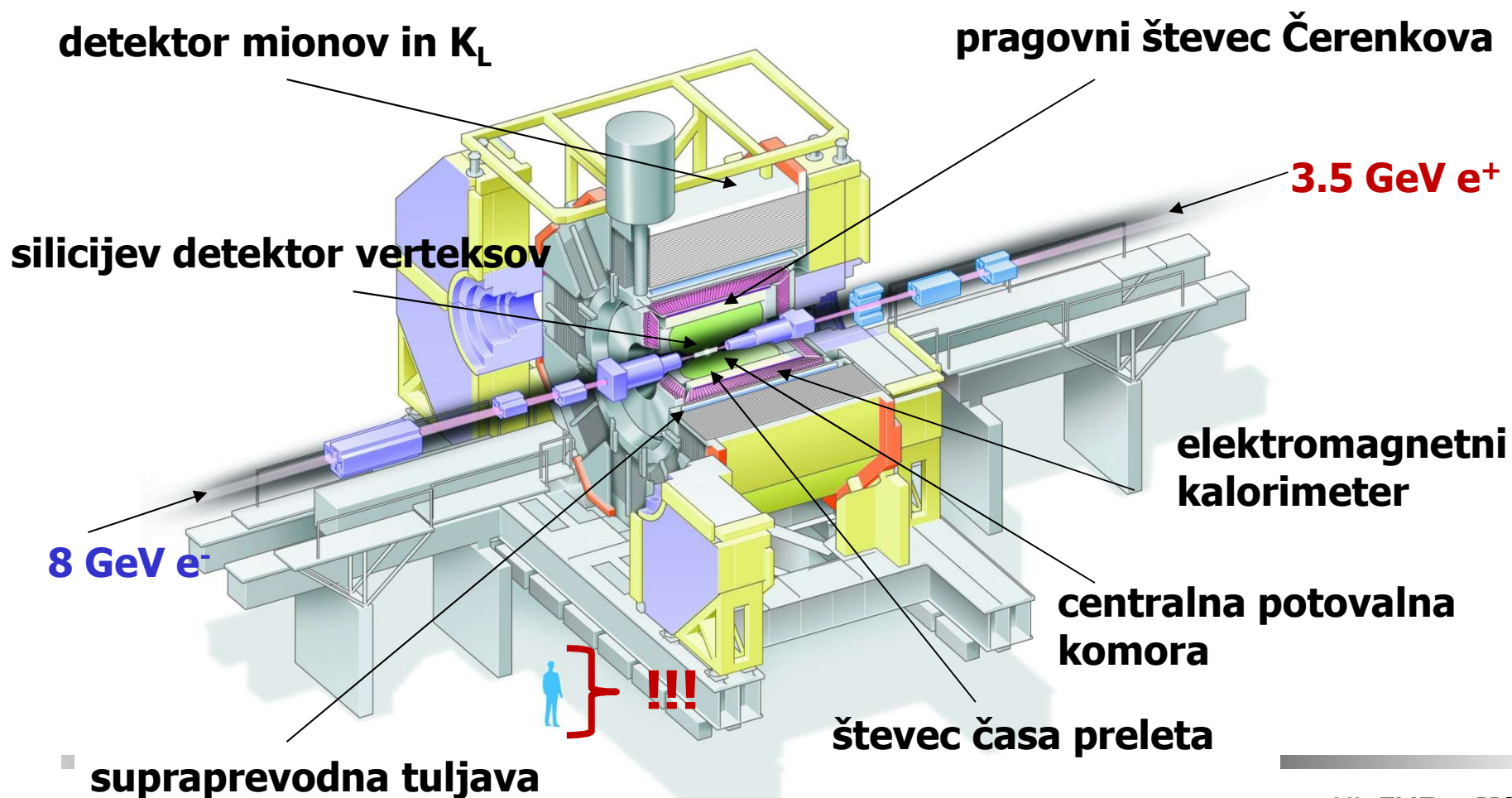


Trkalnik SuperKEKB: od leta 2010 predelava zelo uspešnega predhodnika KEKB



Kako ugotovimo, kaj se je pri trku zgodilo?

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



Kaj izmerimo z detektorjem?

-sledi nabitih delcev v magnetnem polju (polmer kroga je odvisen od gibalne količine delca)

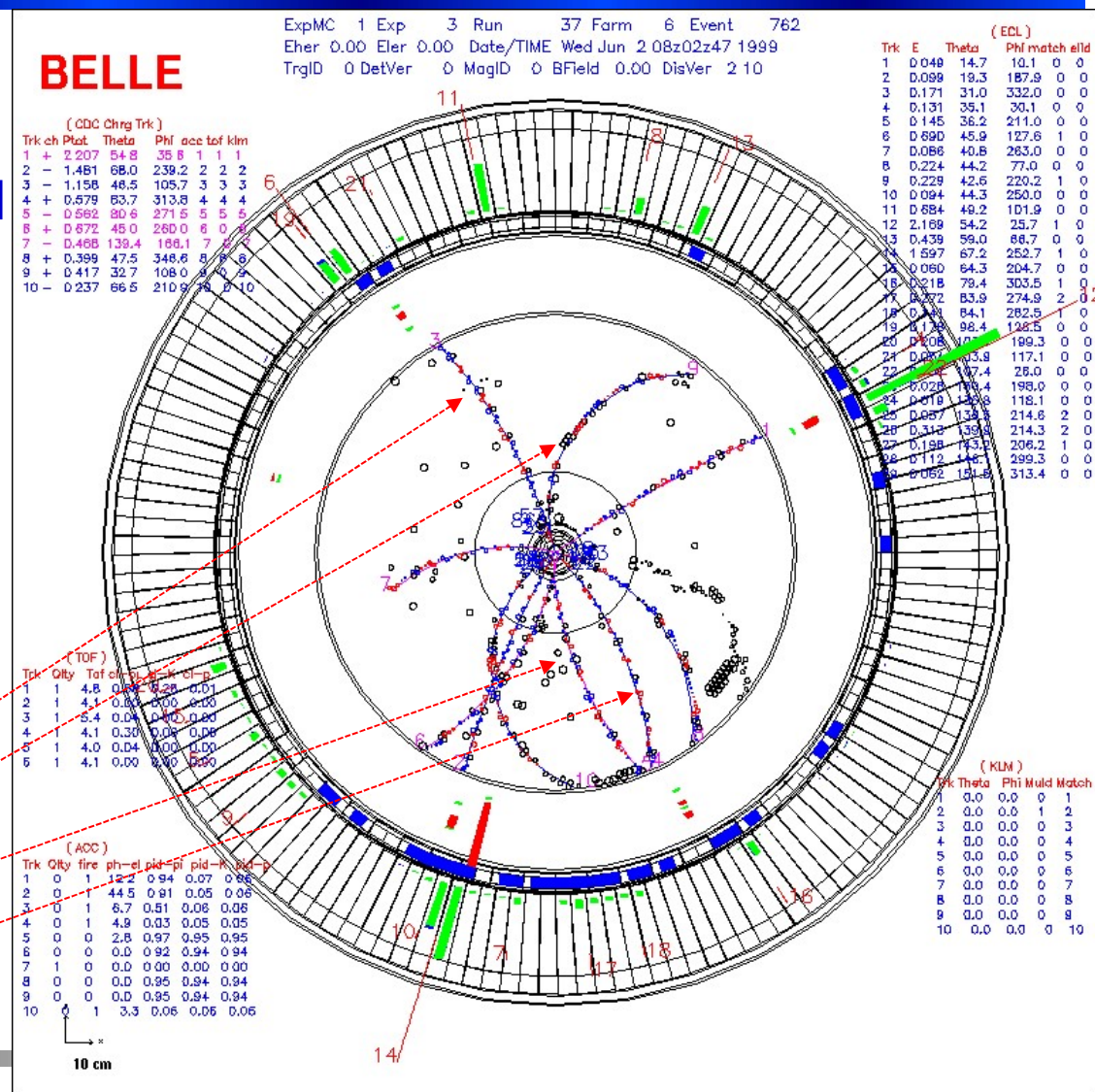
-koordinate točke, od koder sledi izhajajo

-vrsto delca

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

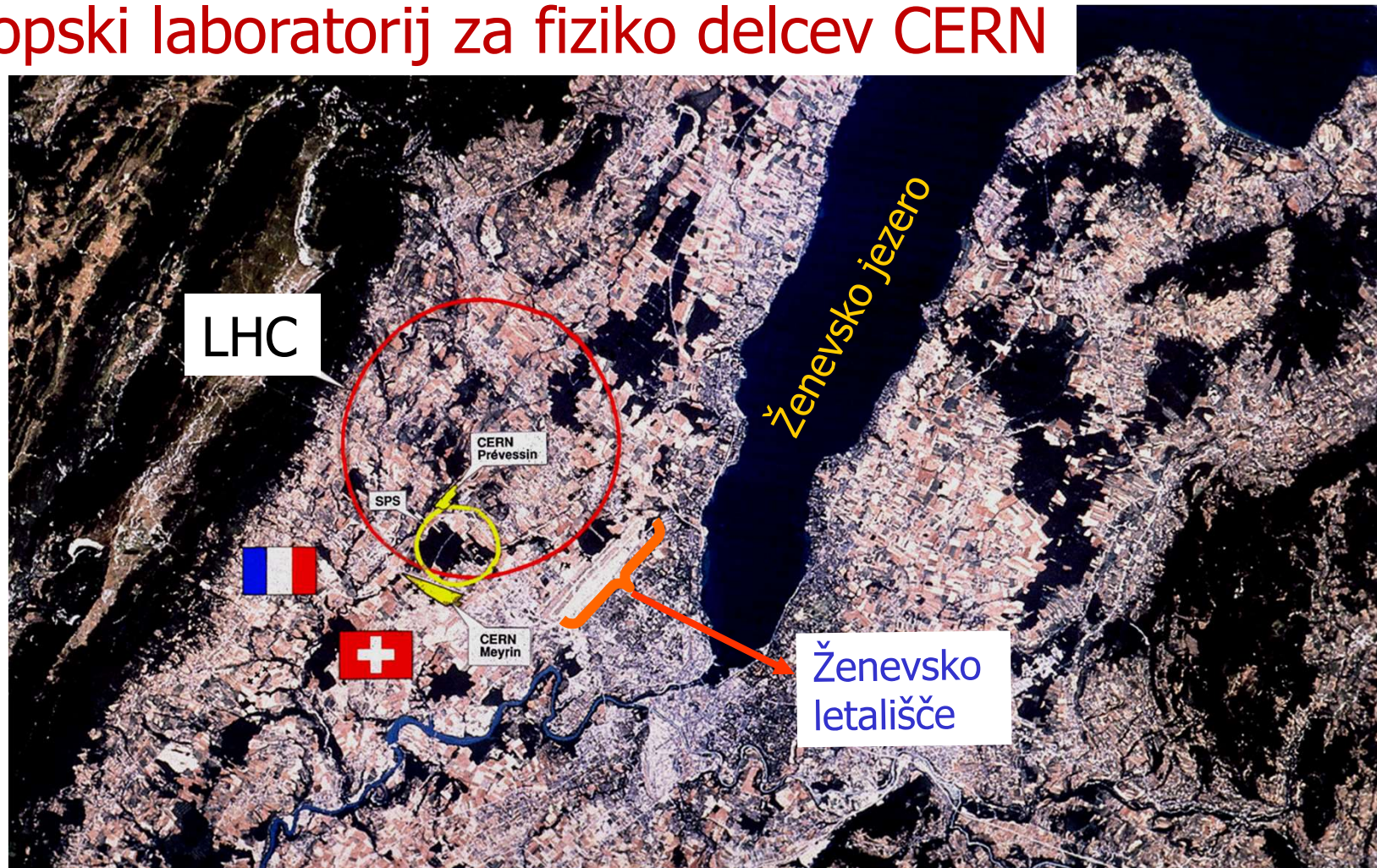
$$K^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$$

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



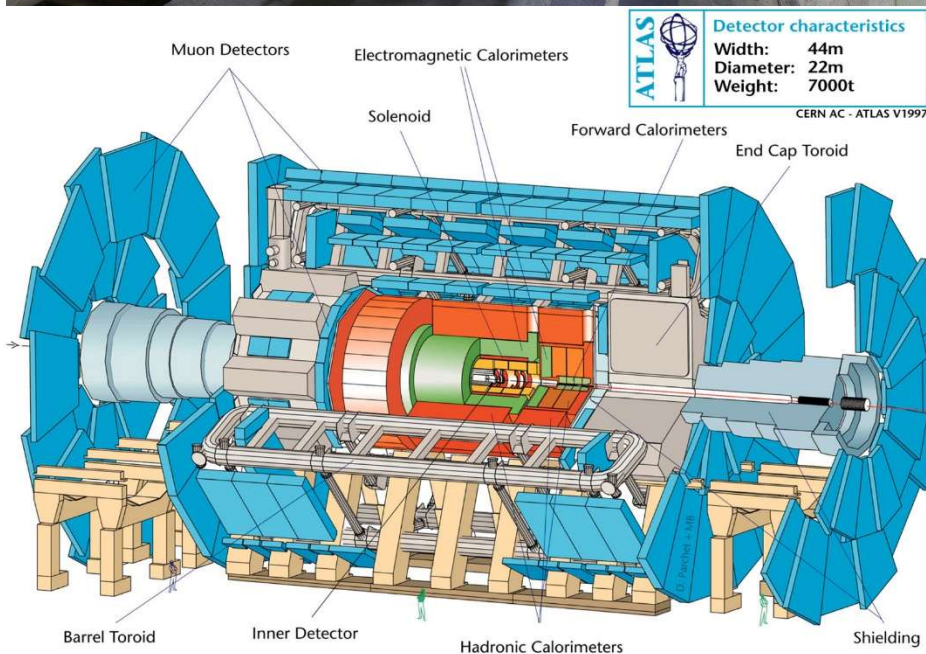
Veliki hadronski trkalnik (LHC)

Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN



LHC = Large Hadron Collider

LHC: 27 km dolg pospeševalnik



pospešeni protoni trkajo v
pospešene protone – višje
energije → večji detektor

Zveza med fiziko osnovnih delcev in zgodnjim razvojem vesolja

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

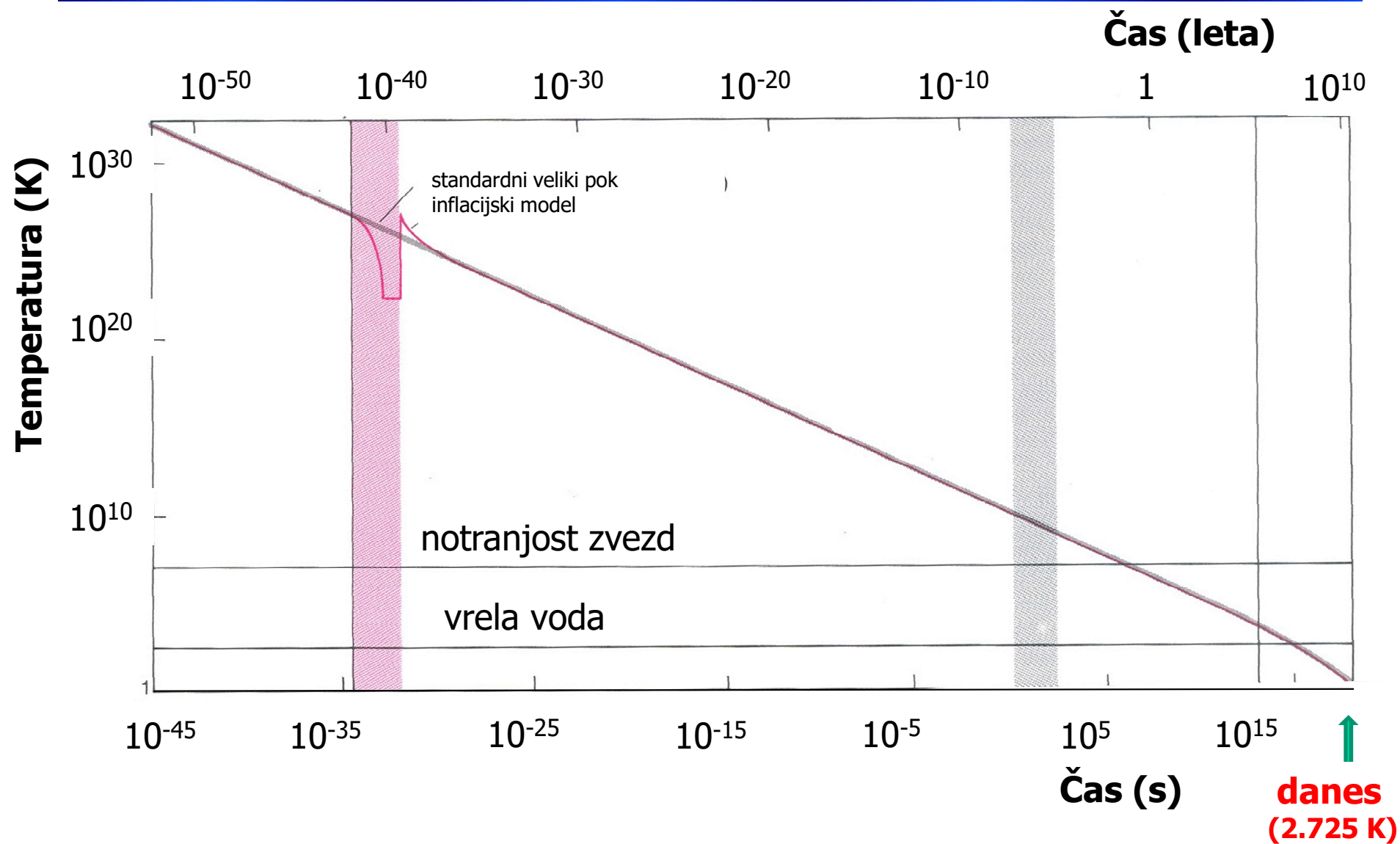


Plin pri visoki temperaturi: **velika hitrost** molekul

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



Temperatura vesolja



Veliko vprašanje

Zakaj ni v vesolju skoraj nič anti-delcev?

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

→ Delci in anti-delci se obnašajo nekoliko različno

Eksperiment Belle:

Kako se delci razlikujejo od anti-delcev?

Eksperiment Belle: predhodnik eksperimenta Belle II

Najvažnejša meritev: kako se delci (mezoni B) razlikujejo od antidelcev (anti-B)?

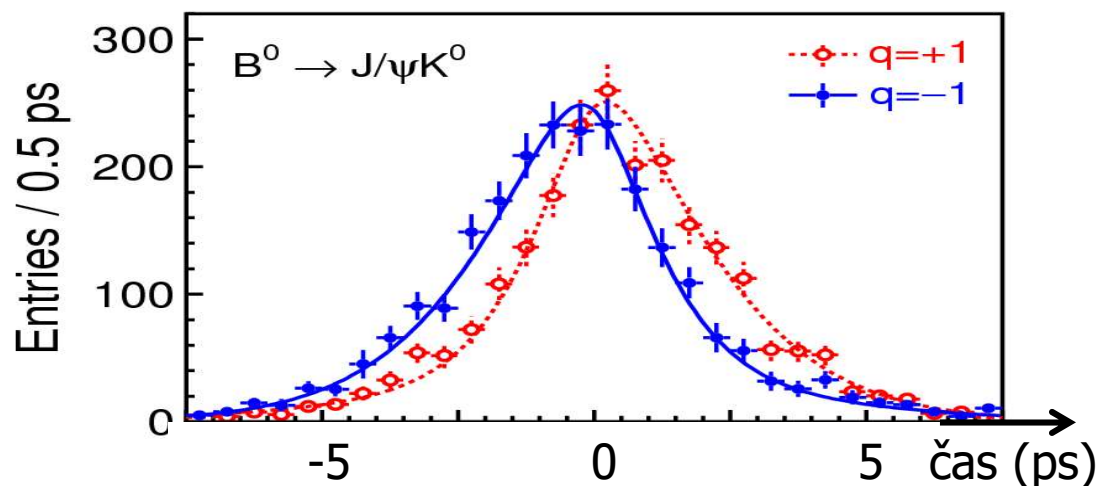
Pri trku elektrona in pozitrona ustvarimo par mezonov, B in anti-B, in nato proučujemo, kako se s časom spreminjajo njune lastnosti.

Ni enostavno: v povprečju razpadeta v lažje delce v bilijoninki sekunde!

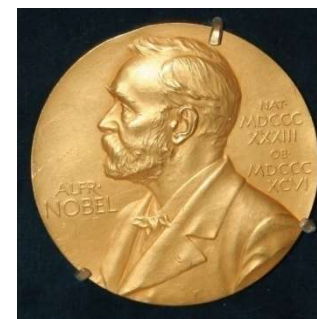
Rezultat meritev: zmagoslavje Standardnega modela!

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!




Veliko vprašanje

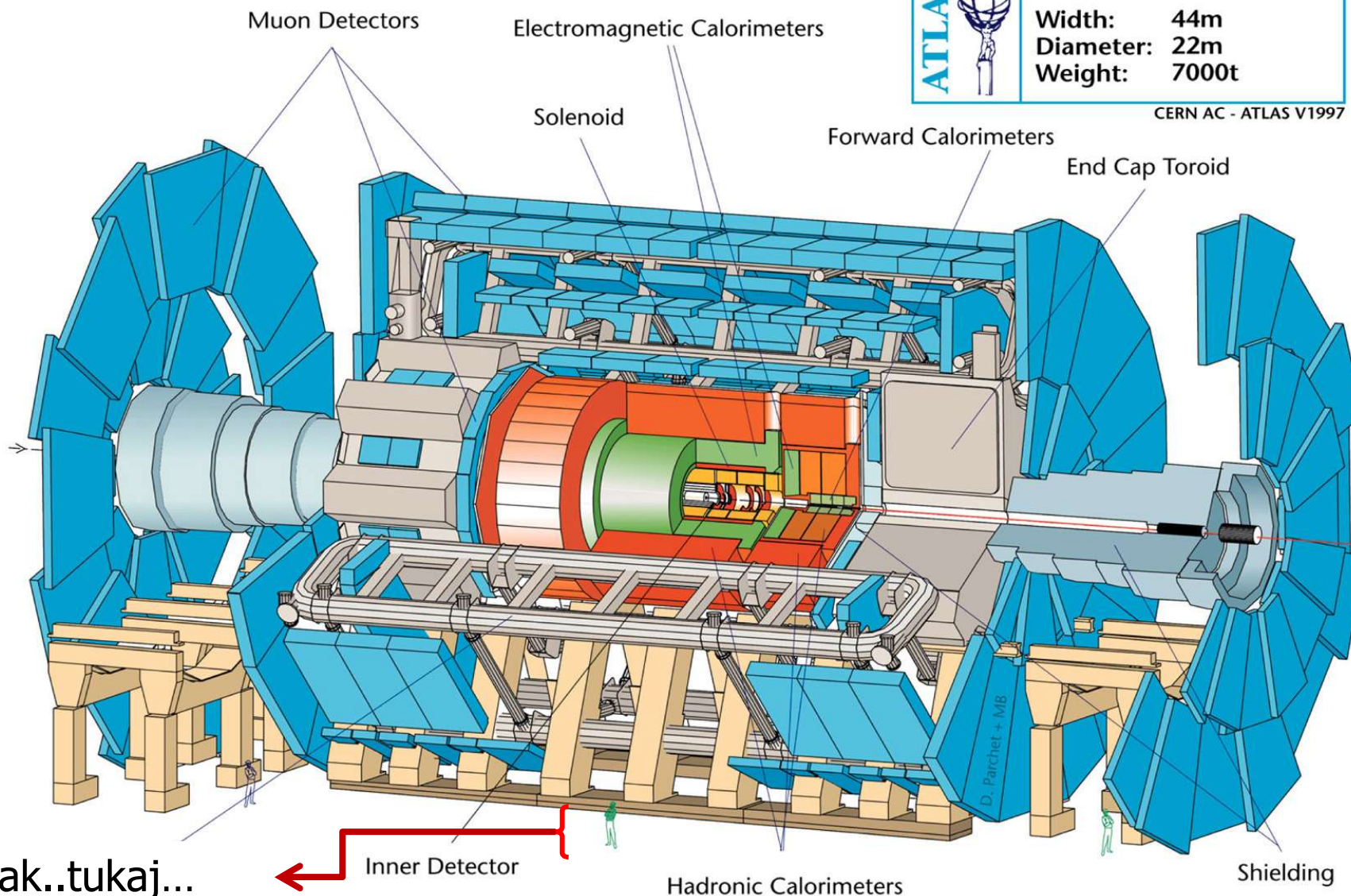
Odkod imajo delci maso?

Detektor ATLAS ob LHC



ATLAS 	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

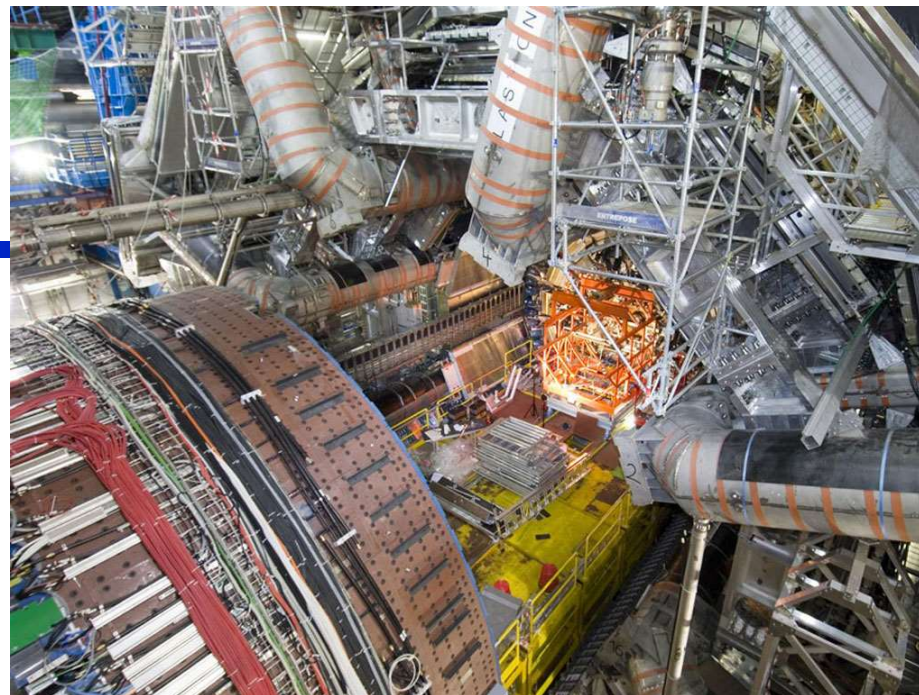
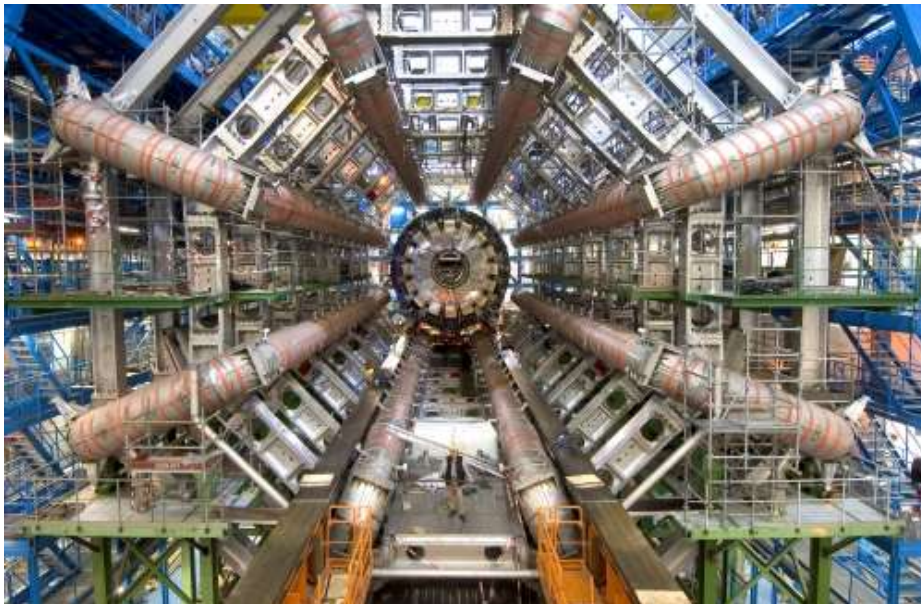
CERN AC - ATLAS V1997



možak..tukaj...



Detektor ATLAS med gradnjo



Viden delež slovenske raziskovalne skupine (IJS in FMF UL)

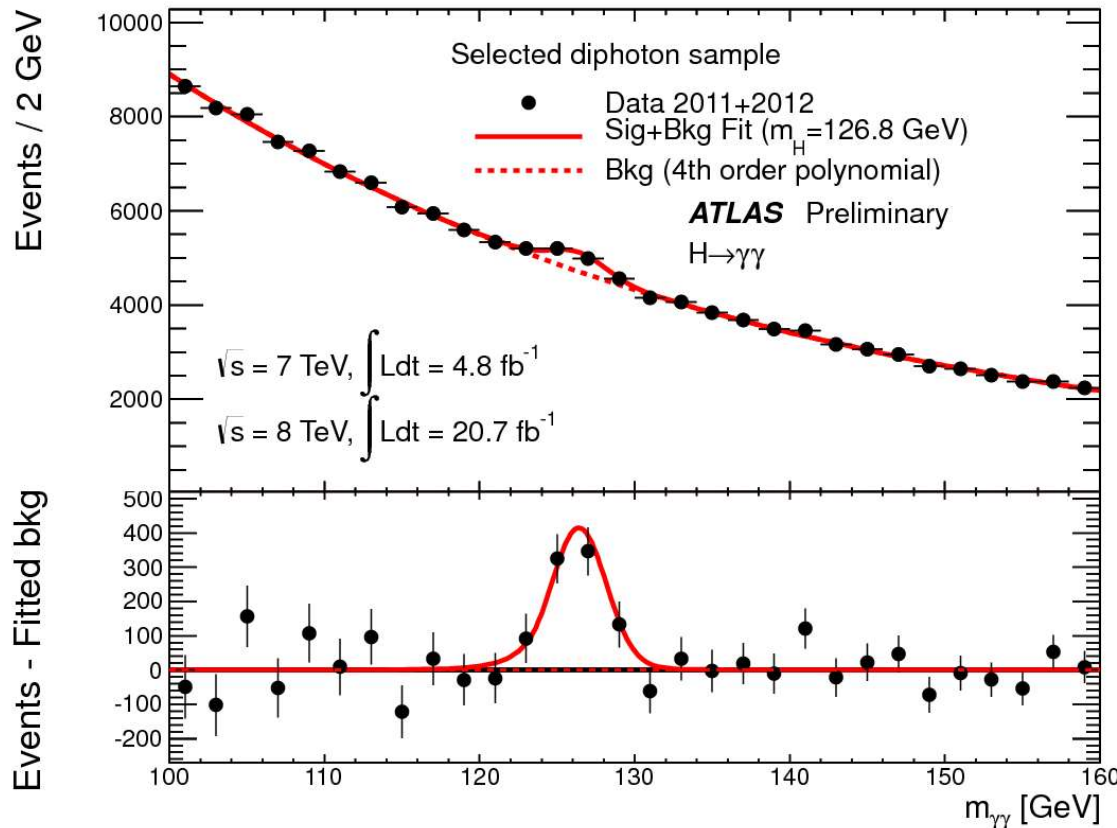


Marko Mikuž

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 zaenkrat je vse kazalo, da ima take lastnosti, kot jih pričakujemo od Higgsovega delca ('Higgs-like particle').
- Na dokončno potrditev je bilo treba počakati še eno leto, da so nabrali dovolj velik vzorec podatkov in opravili dodatne meritve.

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



Masa vsake zabeležene kombinacije dveh visokoenergijskih žarkov gama:

- veliko večino predstavljajo naključne kombinacije
- vrh pri energiji 126 GeV ustreza razpadom $H \rightarrow \gamma\gamma$

Izmerjena porazdelitev minus ozadje \rightarrow signal!

Odkritje Higgsovega delca

Na dokončno potrditev leta 2013 z večjim vzorcem in dodatnimi meritvami:

- Primerjava števila razpadov Higgsovega bozona v različnih razpadnih kanalih
- Kotne porazdelitve delcev v končnem stanju – določanje lastnosti tega delca (spin – vrtilna količina).

→ Novi delec ima take lastnosti, kot jih predvideva Standardni model

Nobelova nagrada 2013!



Francois Englert in Peter W. Higgs

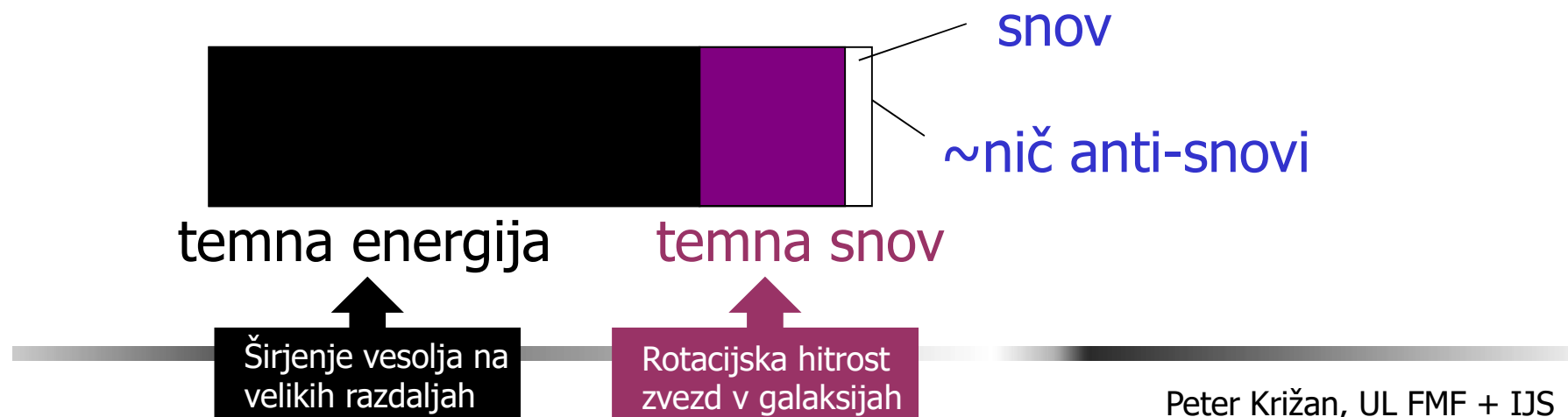
Ali je to to? Ali zdaj razumemo vesolje od začetka dalje?

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

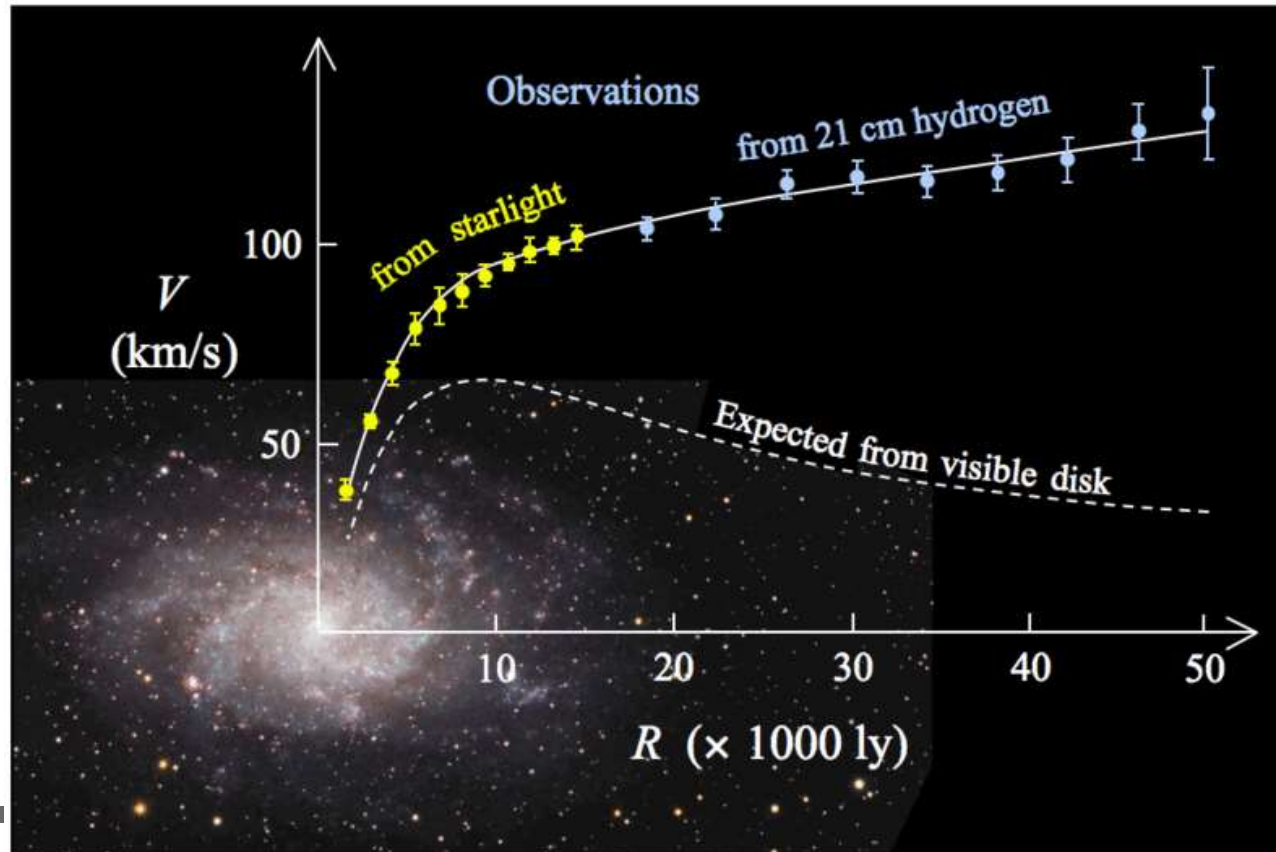
In nenazadnje: večina vesolja je narejena iz delcev, ki jih ne poznamo...



Rotacijske krivulje galaksij

Izmerjena hitrost gibanja zvezd v galaksijah je precej večja kot pričakovana (glede na opaženo gostoto zvezd in prahu)

→ večino mase galaksije prispeva temna snov, delci, ki jih ne poznamo!

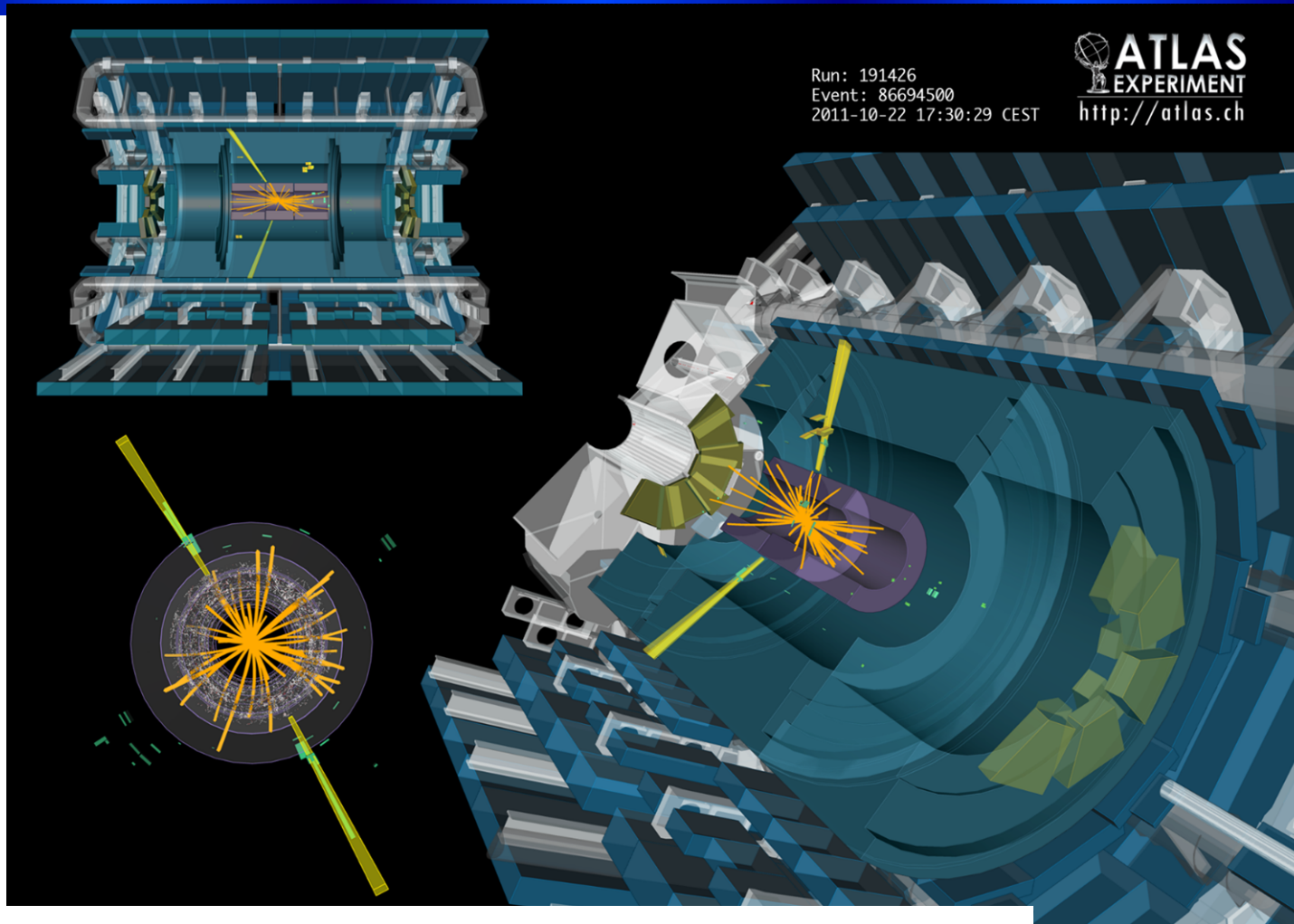


Iskanje popolnejšega opisa narave

Dve možnosti:

- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (LHC)

Neposredno iskanje novih delcev pri velikih energijah v detektorjih ATLAS in CMS na LHC



Primer: iskanje novih delcev, ki razpadajo
v dva visokoenergijska žarka gamma

Iskanje popolnejšega opisa narave

Dve možnosti:

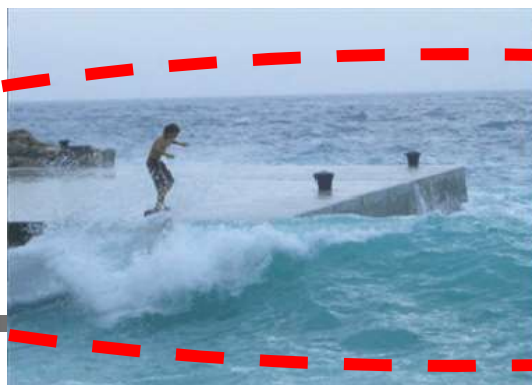
- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov**
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle in Belle II).

→ 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

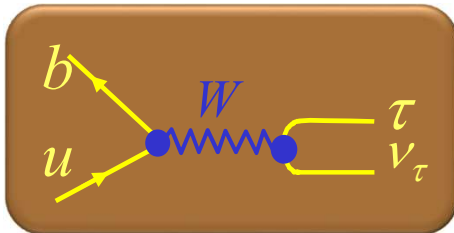


Belle II

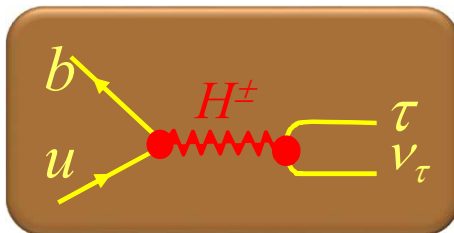


Primer: lov na **nabit Higgsov delec** v razpadu $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$

Poleg nevtralnega Higgsovega delca, kot ga predvideva Standardni model, bi lahko (v okviru supersimetričnih teorij) obstajal tudi **nabit Higgsov delec**.



Redki razpad $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$ poteka v Standardnem modelu preko **bozona W^-**



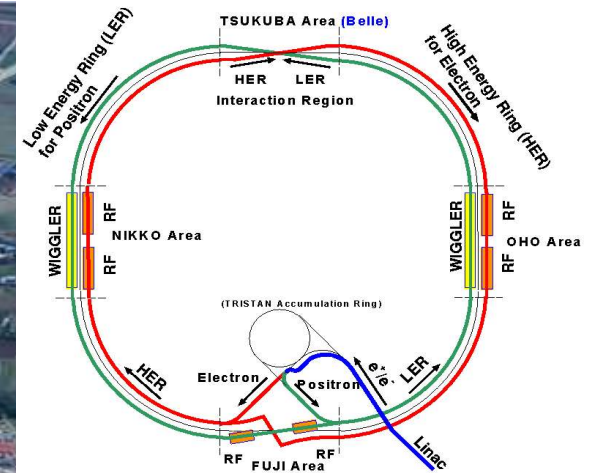
V nekaterih supersimetričnih teorijah bi lahko potekal tudi preko **nabitega Higgsovega delca H^\pm** .

Nabit Higgsov delec bi vplival na razpad mezona B na lepton tau in neutrino, in bi spremenil verjetnost za ta proces.

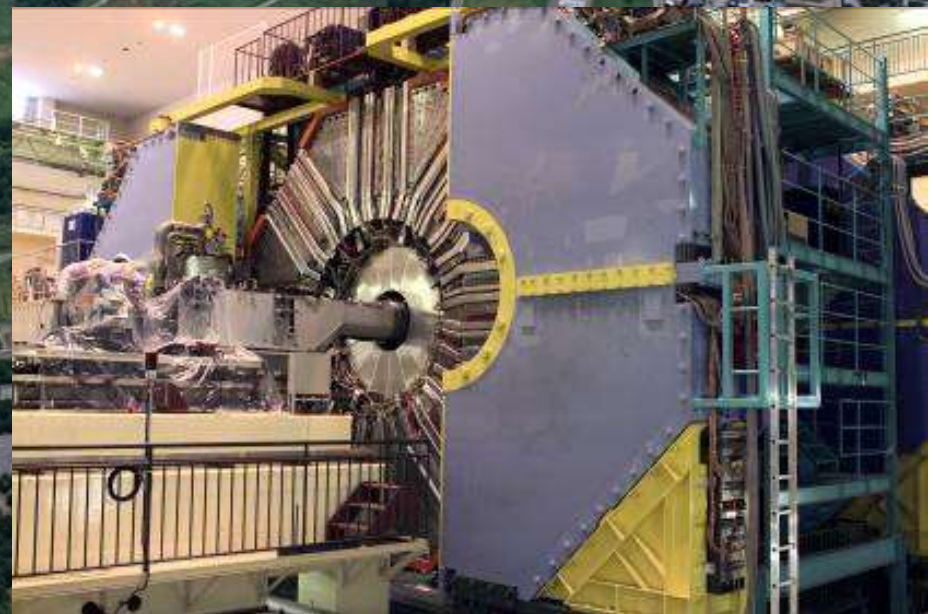
Če izmerimo verjetnost za tak razpad in jo primerjamo s predvidevanjem Standardnega modela (kjer nabitega Higgsa ni):

→ **lastnosti nabitega Higgsa (recimo njegova masa)**

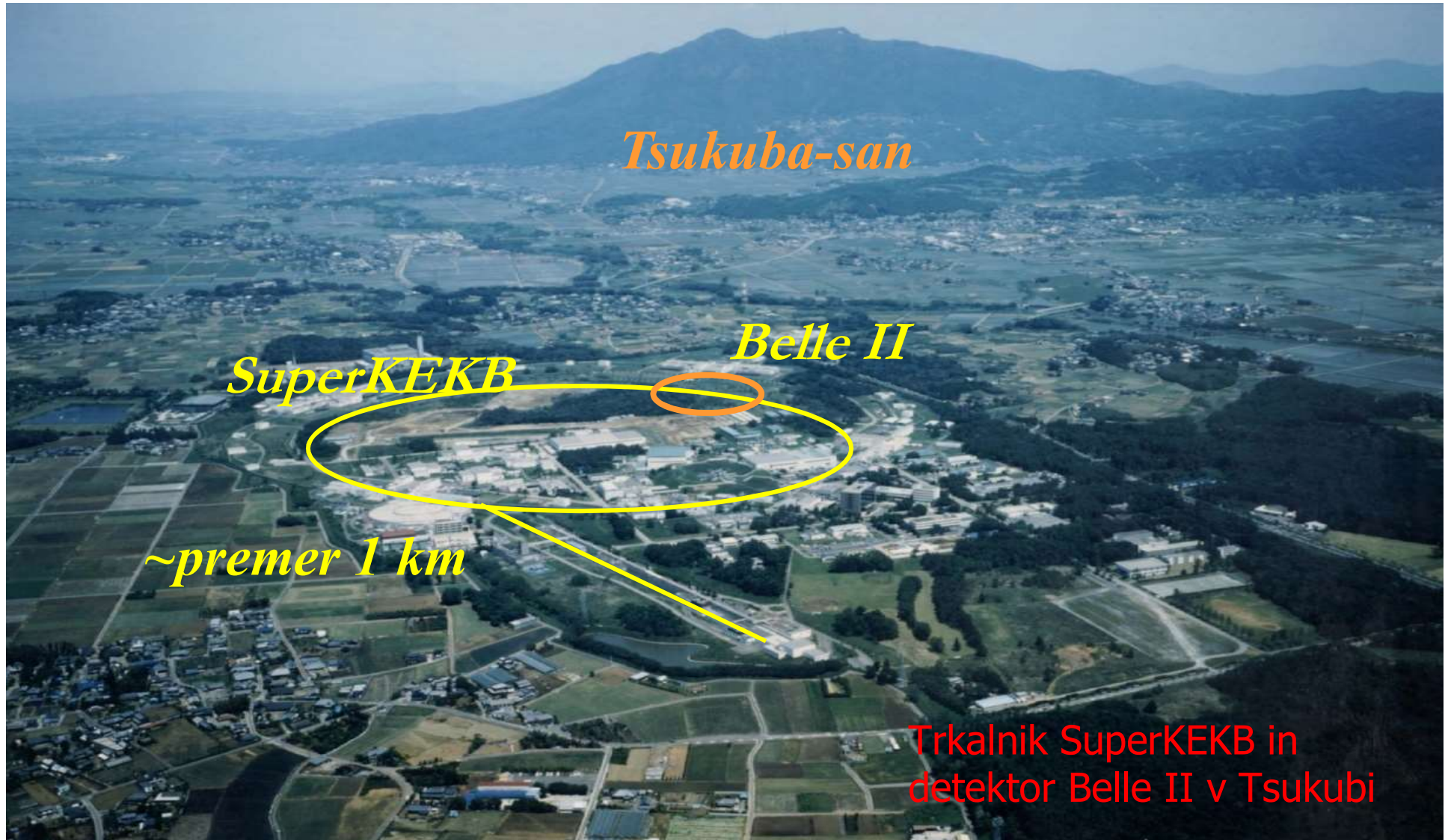
Študij redkih prehodov:
Potrebujemo 50x več
trkov elektronov in
pozitronov kot v 10 letih
eksperimenta Belle!



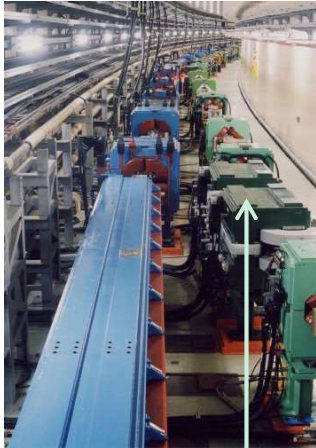
KEKB → SuperKEKB
Belle → Belle II



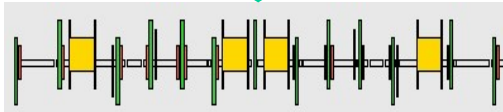
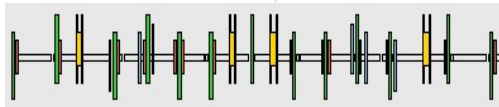
Trkalnik SuperKEKB: od leta 2010 predelava zelo uspešnega predhodnika KEKB



Predelava: KEKB → SuperKEKB

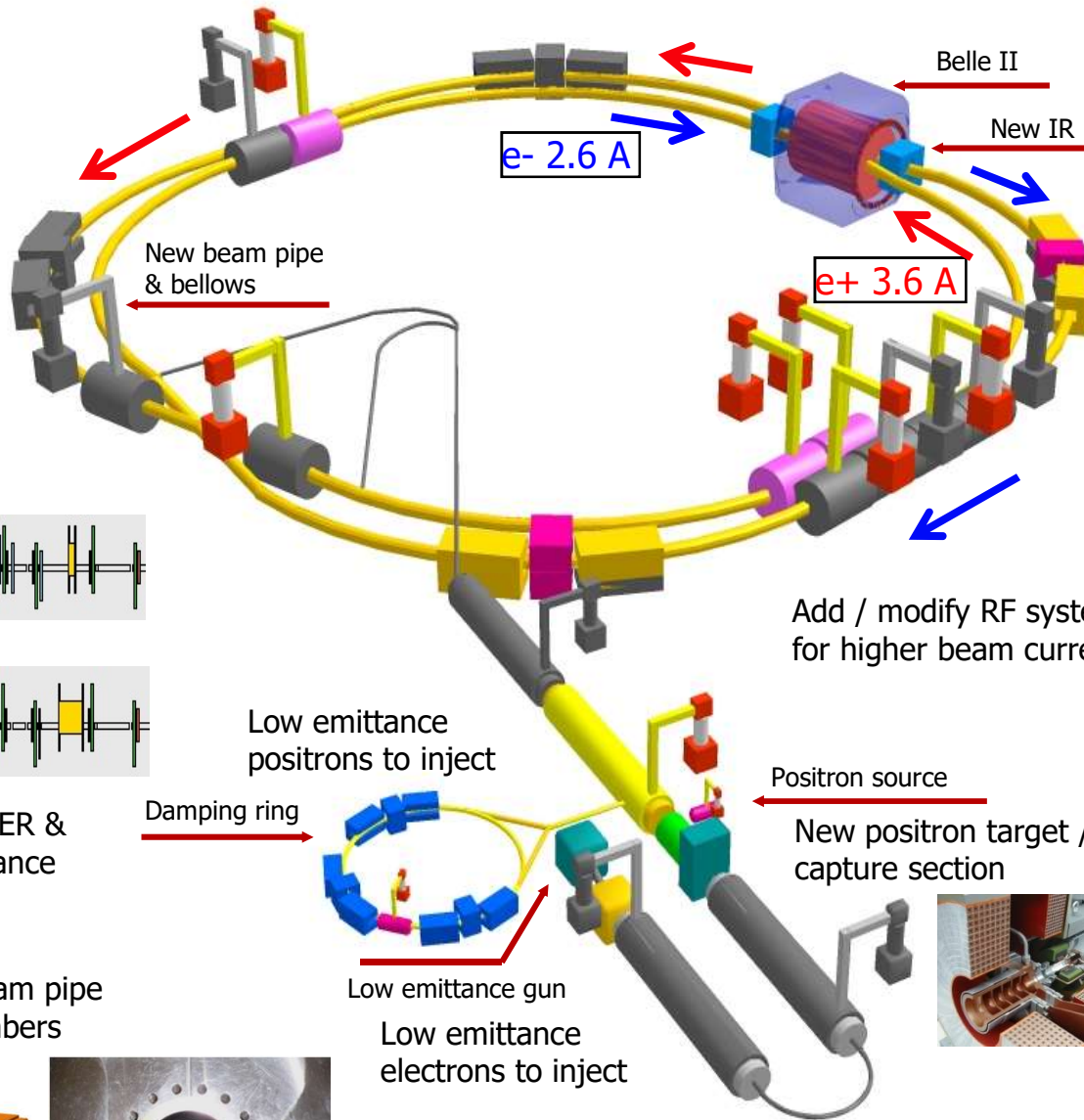
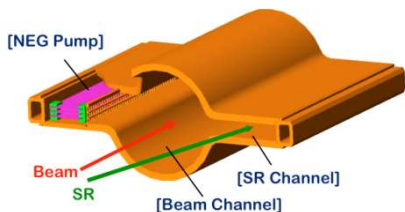


Replace short dipoles with longer ones (LER)

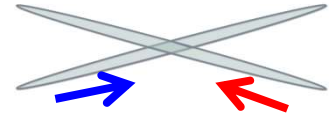


Redesign the lattices of HER & LER to squeeze the emittance

TiN-coated beam pipe with antechambers



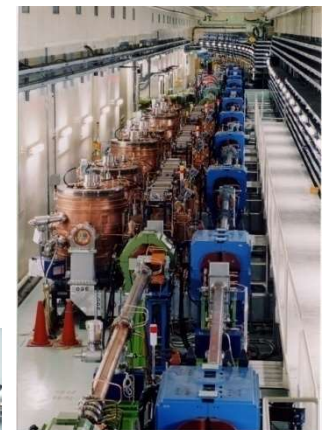
Colliding bunches



New superconducting / permanent final focusing quads near the IP



Add / modify RF systems for higher beam current



Positron source

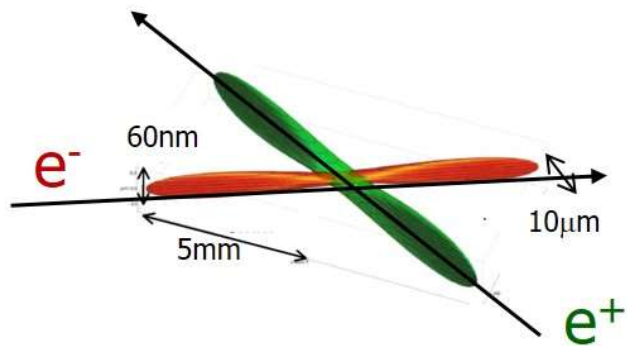
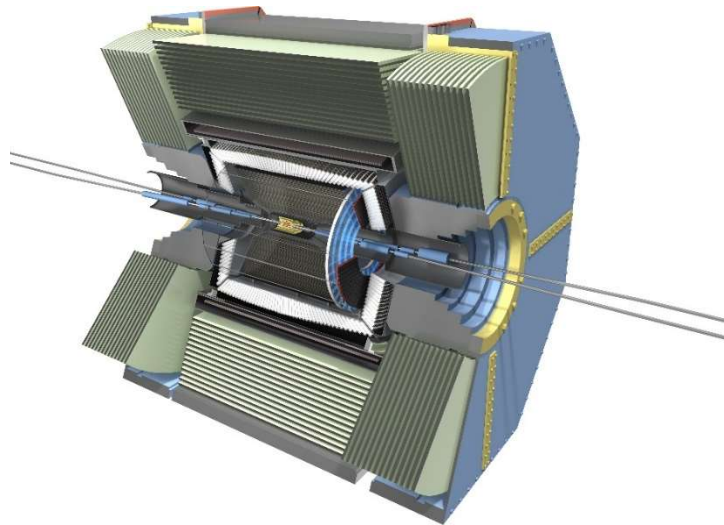
New positron target / capture section



Low emittance gun
Low emittance electrons to inject

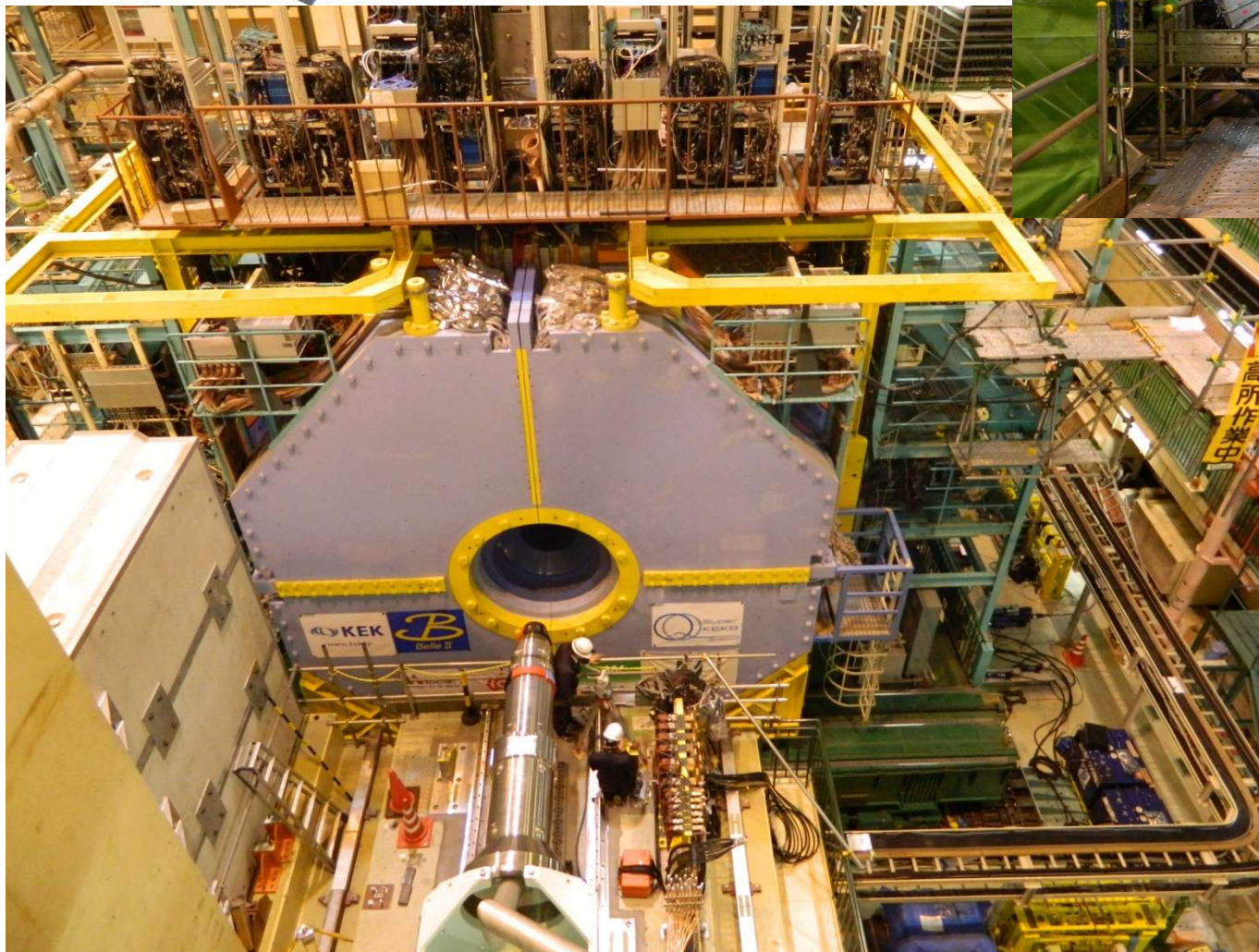
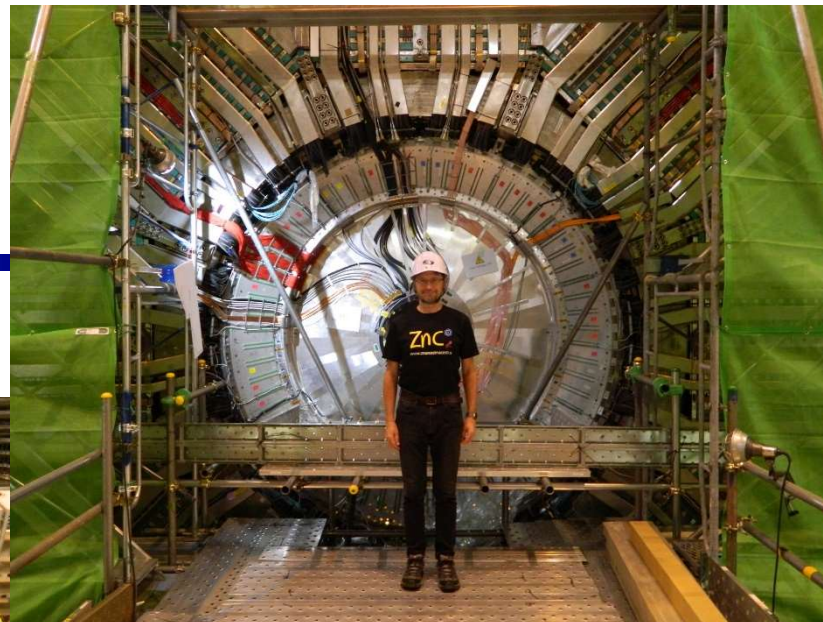
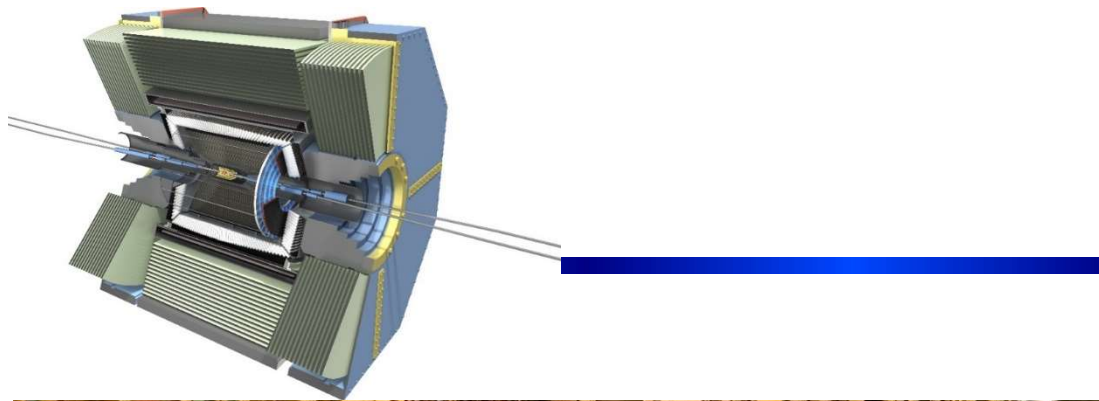
Za x40 bolj zmogljiv pospeševalnik

Fokusiranje elektronskega in pozitronskega žarka v točko trka: dve velikanski elektromagnetni leči



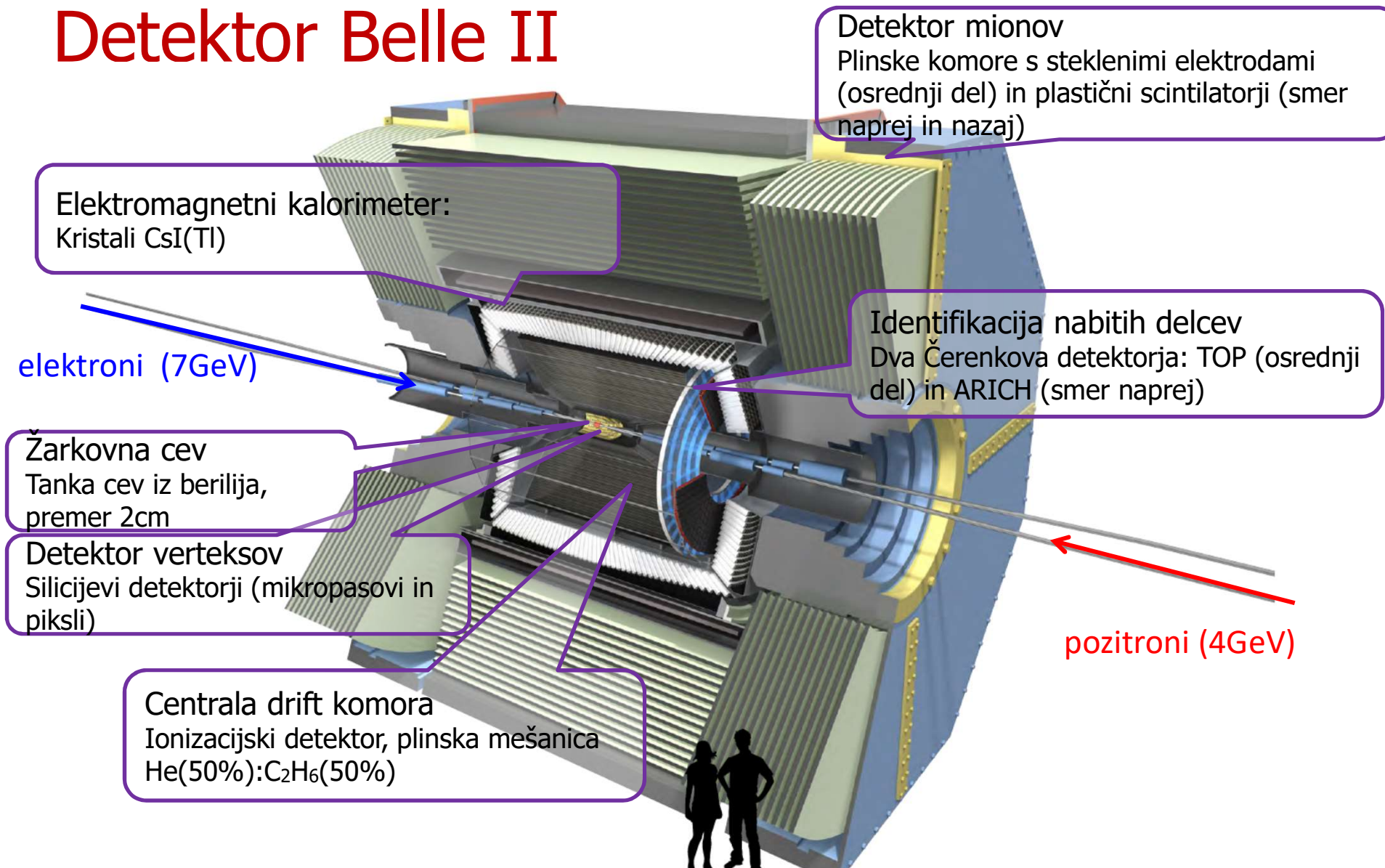
Supraprevodna magnetna leča s 25 magnetnimi navitji (tuljavami), hlajena s tekočim helijem na 4 K (= -269 stopinj Celzija).

Elektronski in pozitronski žarek v točki trka



Peter Križan, UL FMF + IJS

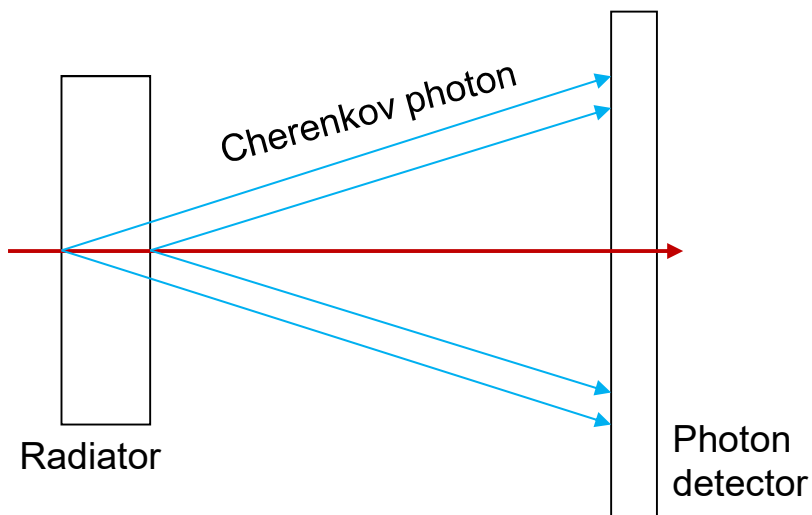
Detektor Belle II



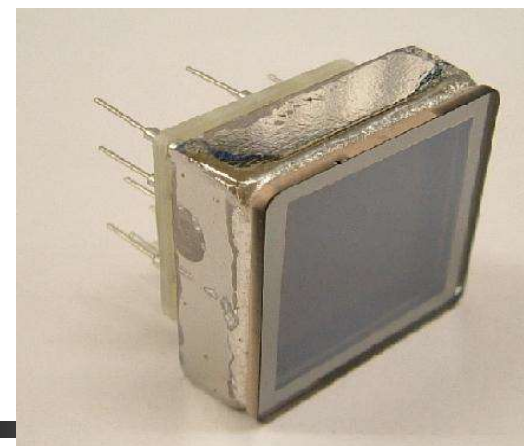
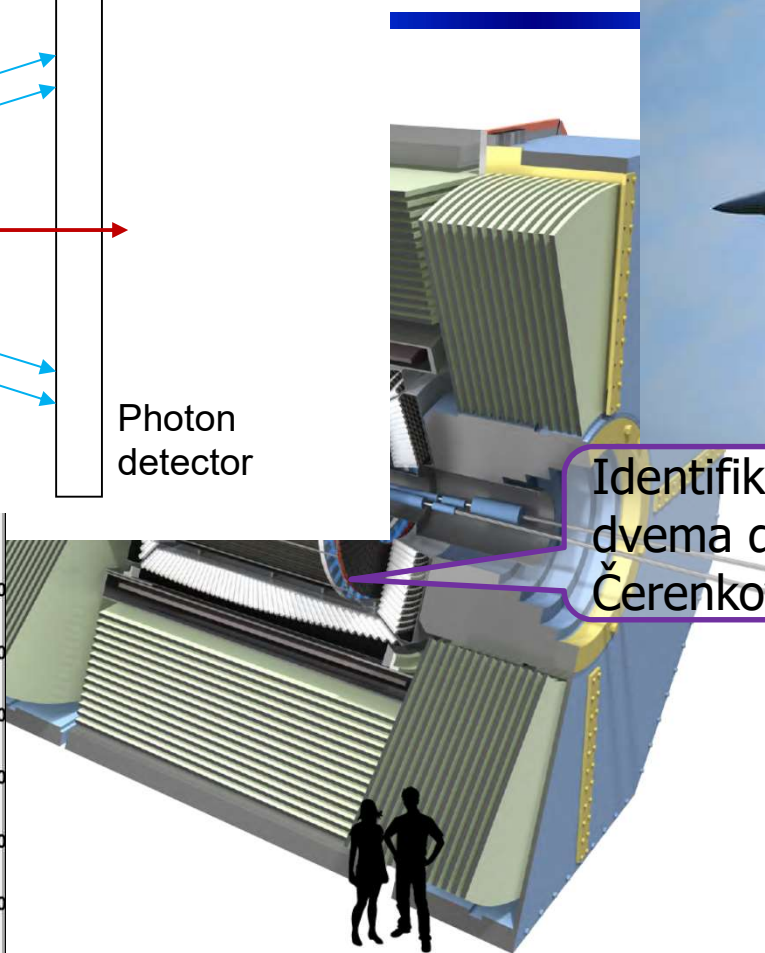
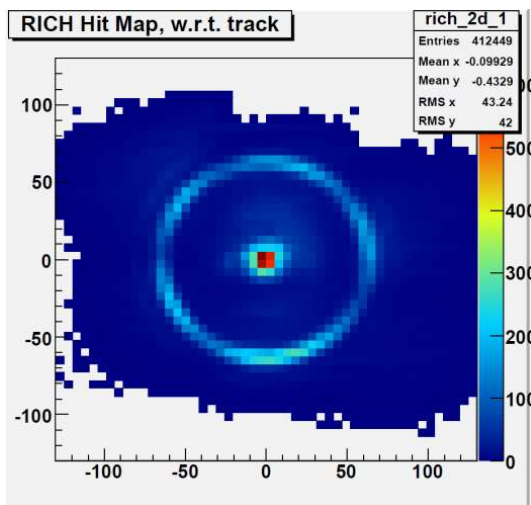
Namen: izboljšati domet meritev za 100x

– **boljši detektor** ob **zmogljivejšem pospeševalniku**

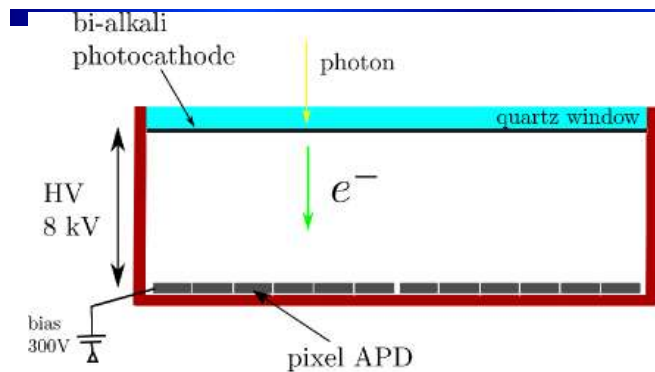
Za identifikacijo delcev uporabimo **pojav sevanja Čerenkova**: svetloba, ki jo seva delec, ki je **hitrejši kot svetloba** v snovi – podobno kot **udarni val nadzvočnega letala!**



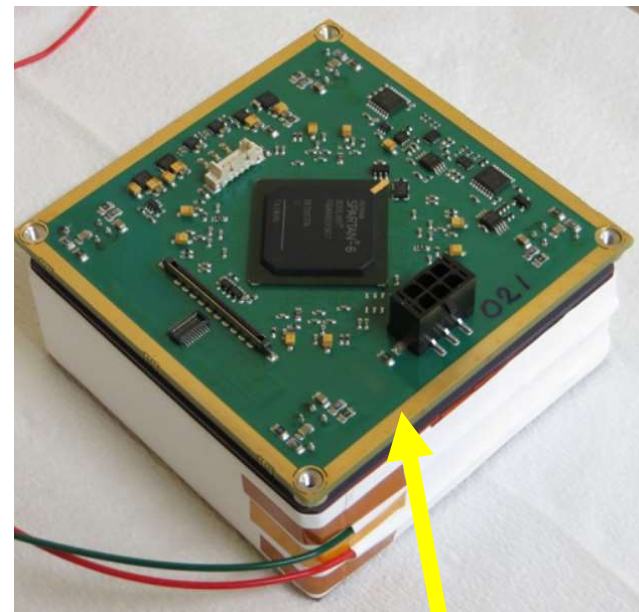
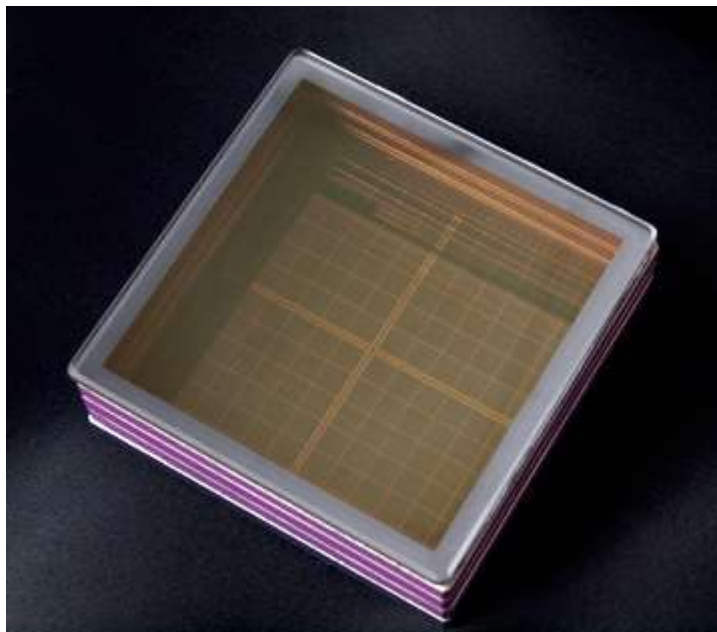
Identifikacija nabitih delcev z dvema detektorjema Čerenkovega sevanja



Zaznavanje fotonov Čerenkova: potrebujemo zelo občutljiv svetlobni senzor



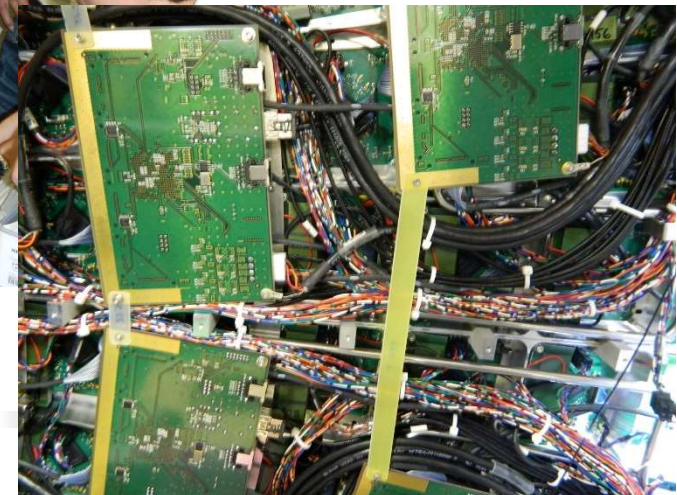
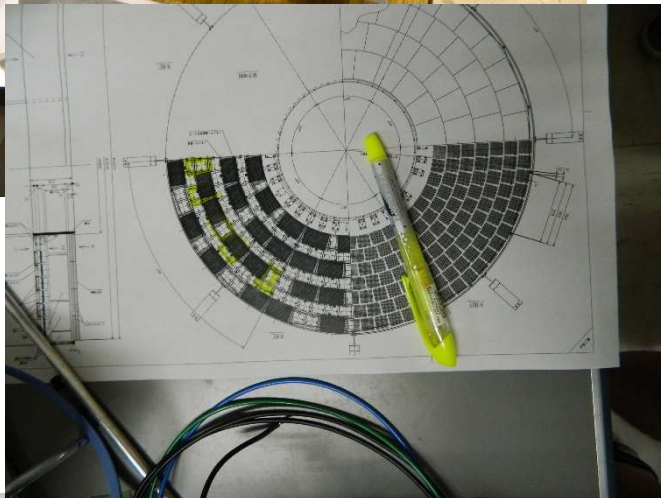
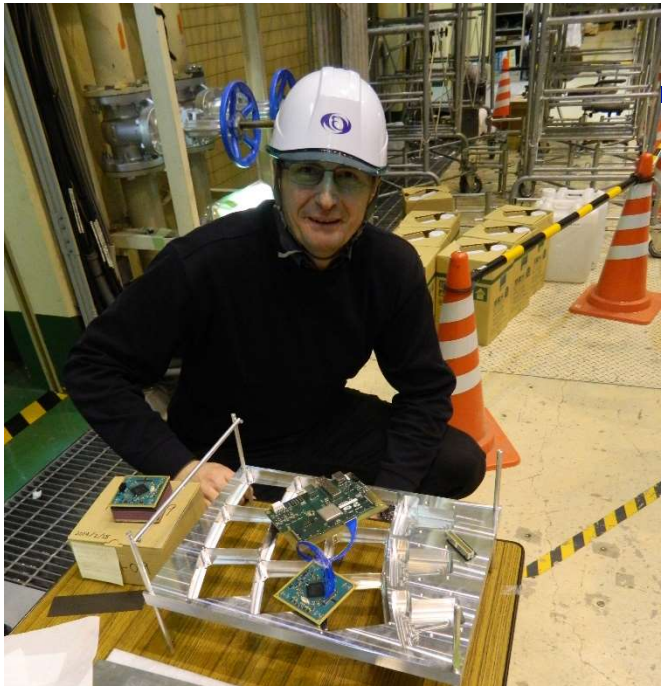
Zaznavanje posameznih fotonov z novim tipom detektorja, hibridnih fotonских detektorjem, Hibrid Avalanche Photo Detector (HAPD).

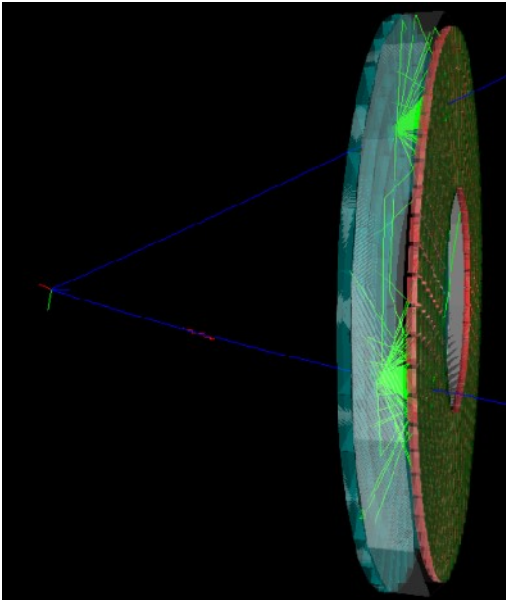
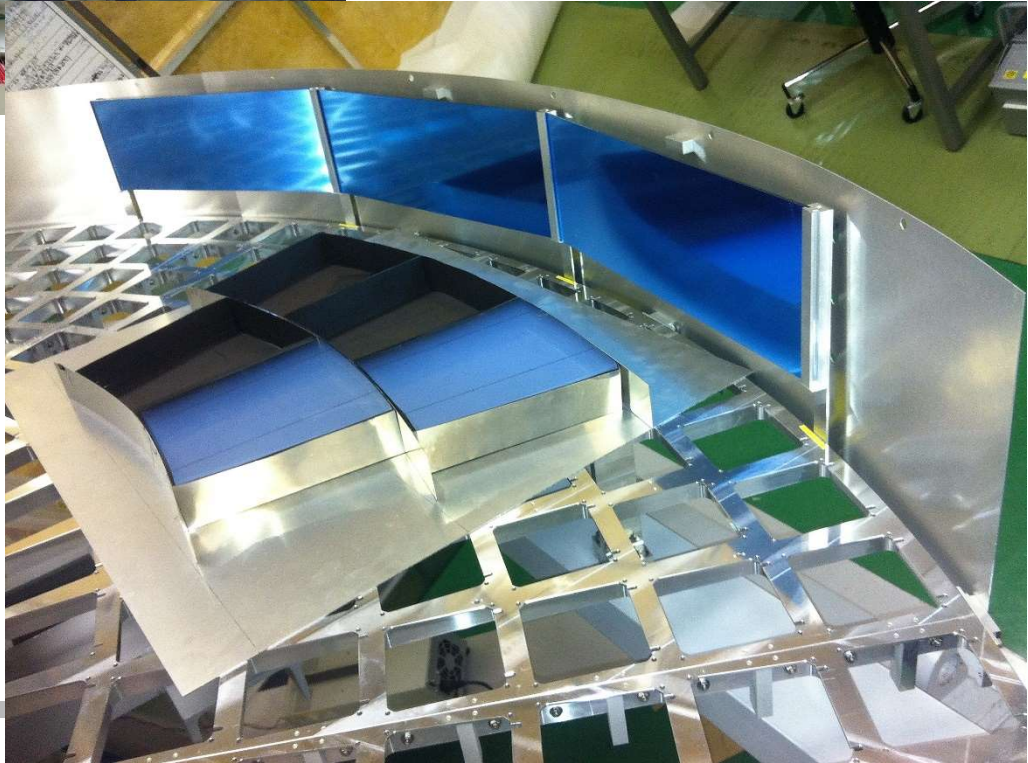


Made in Slovenia

Kako pospraviti senzorje in elektroniko na omejenem prostoru?

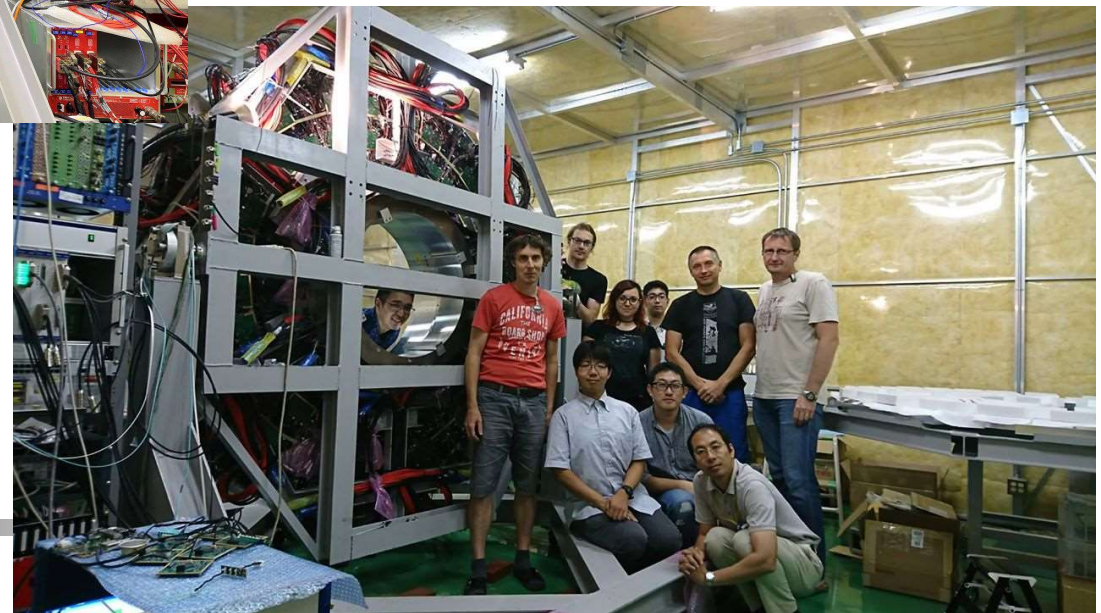
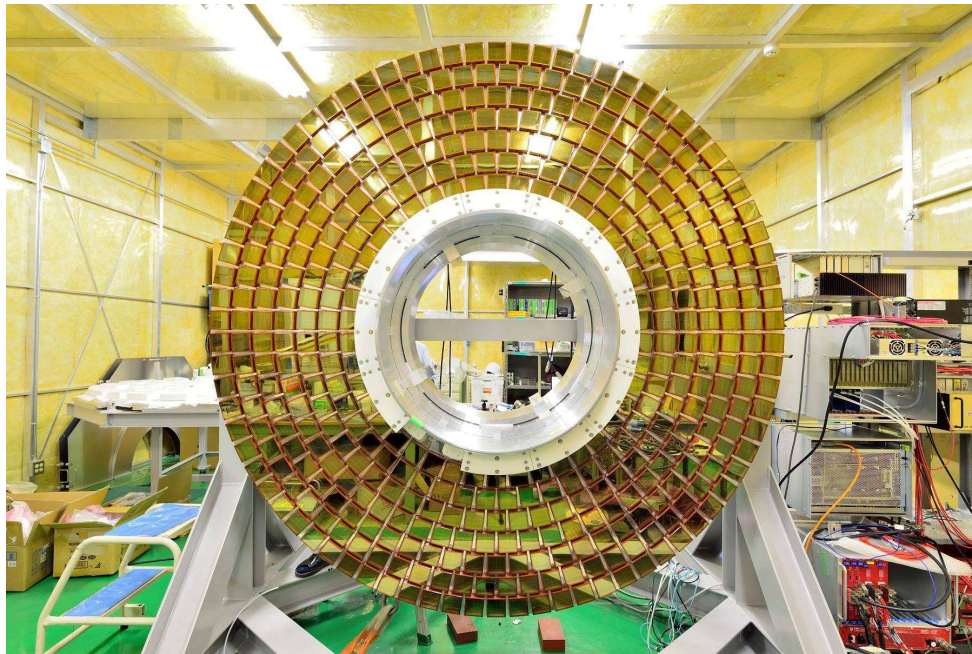
Samo Korpar (UM in IJS), vodja tega detektorskega sklopa, s sodelavci med enim od t.i. sestankov ‚gemba‘ (=na mestu eksperimenta)



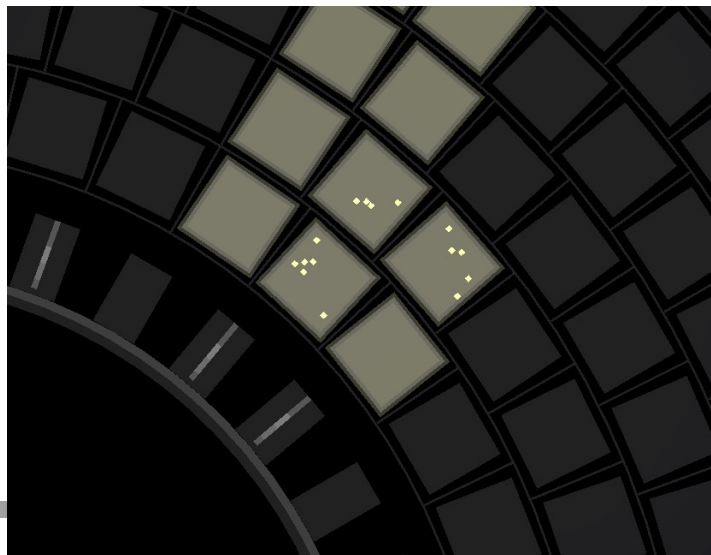


Peter Kitzan, UL FMI + IJS

Detektor je po mnogih letih raziskav, razvoja in sestavljanja pripravljen za meritve!



Prvi Čerenkovi obroči, ki jih je zaznal detektor!



Velik uspeh, dobra popotnica
za naprej!

Raziskovalna skupina Belle II



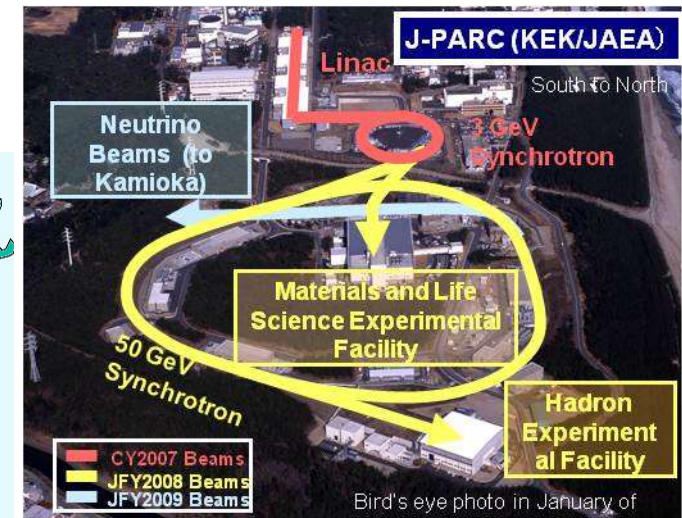
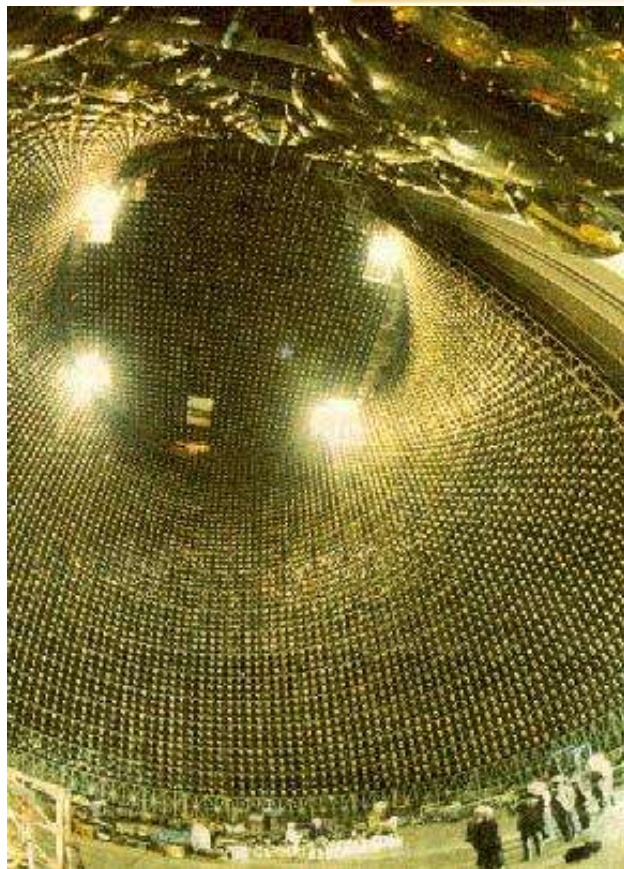
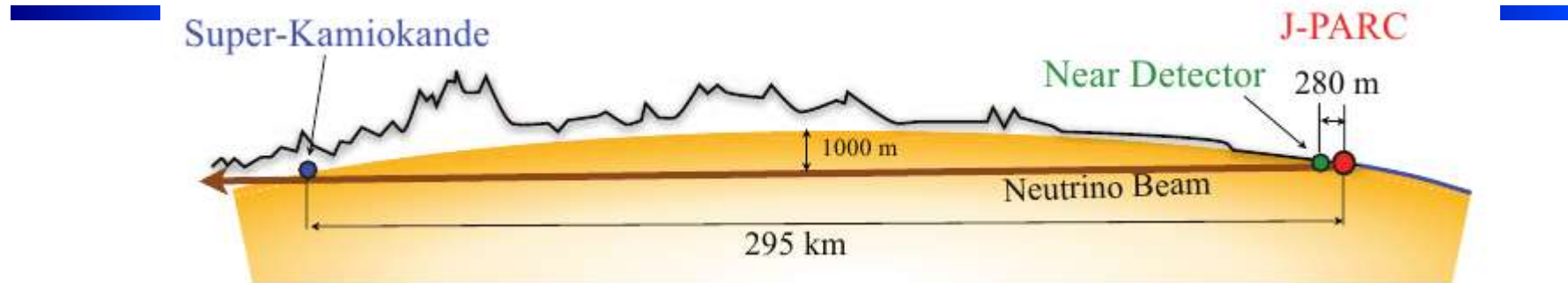
Močna raziskovalna skupina ~ 700 fizikov s celega sveta

Komaj čakamo, da ponovno poženemo pospeševalnik in začnemo z resnimi meritvami.

Iskanje 'Nove fizike': usklajen pristop na več frontah

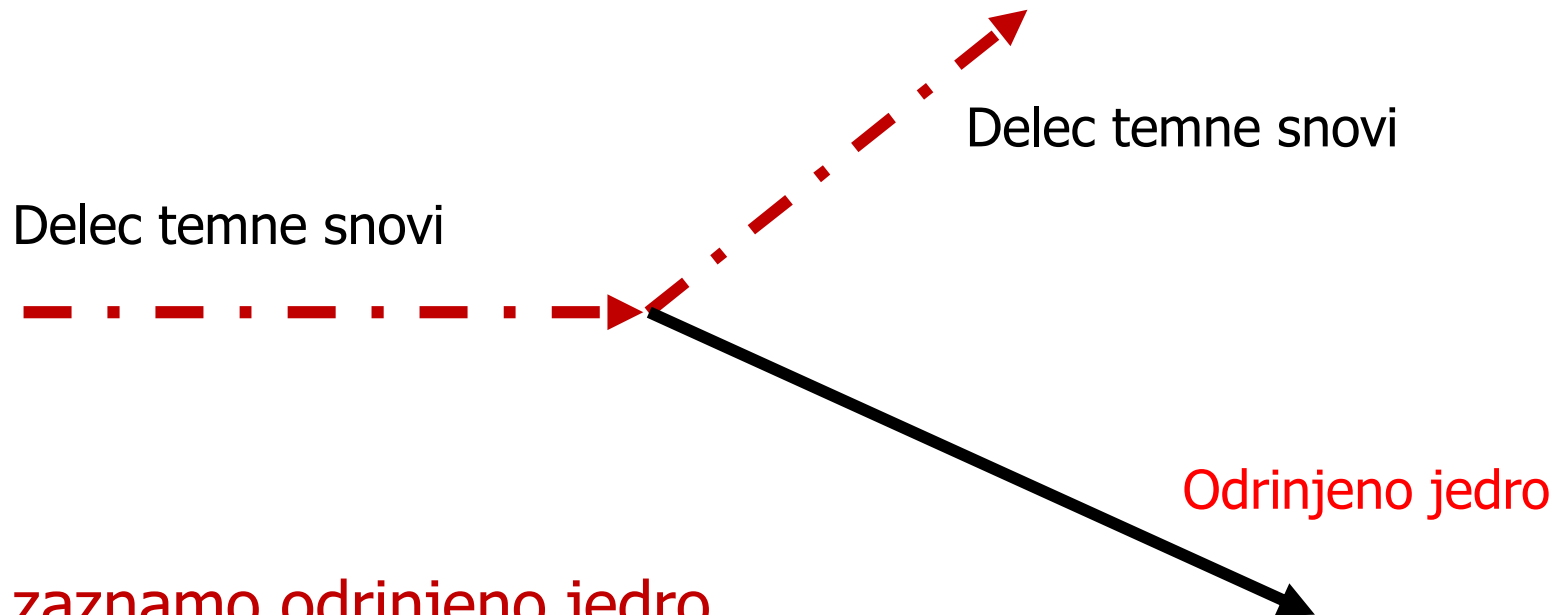
- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (ATLAS na LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov**
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle II)
- **Študij lastnosti nevtrinov (nevtralni partner elektrona)**
 - meritve mešanja nevtrinov – prehajanja ene vrste nevtrinov v drugo →
- **Neposredno iskanje delcev temne snovi**
 - Iskanje pojavov, pri katerih delec trdne snovi odrine jedro v detektorju →

Poskusi z nevtrini: ustvarimo jih v pospeševalniku, detektiramo v 295km oddaljenem detektorju

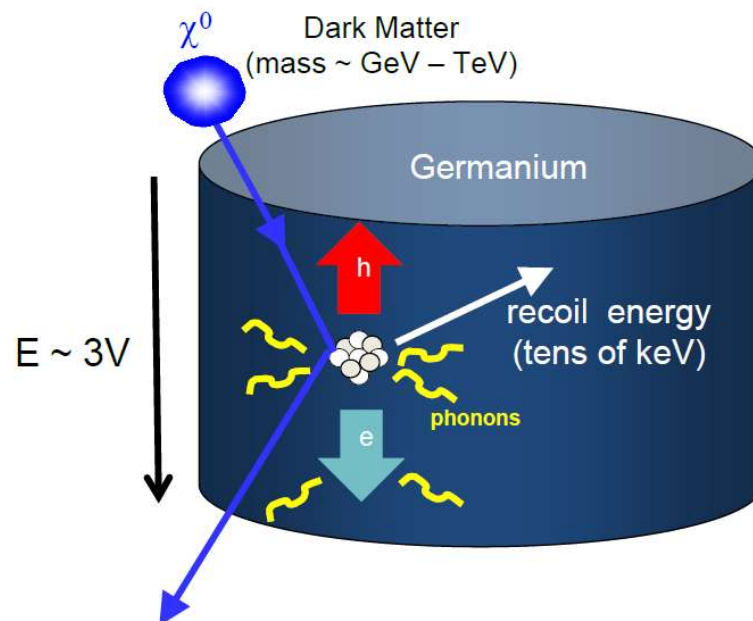
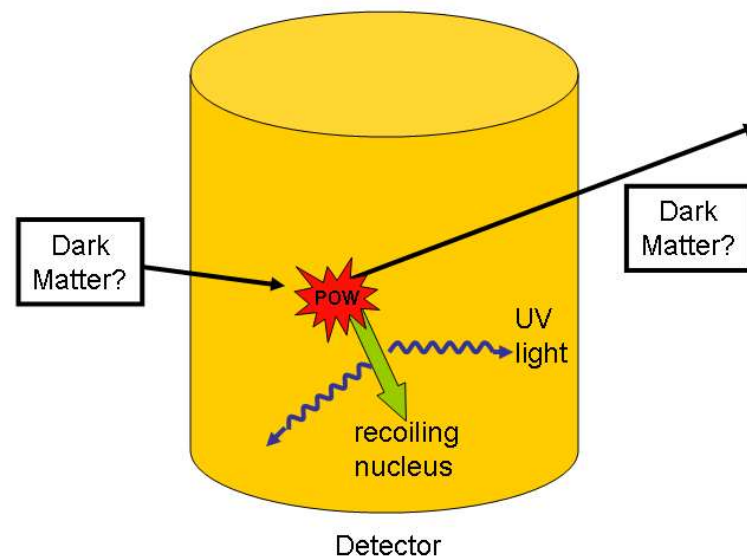
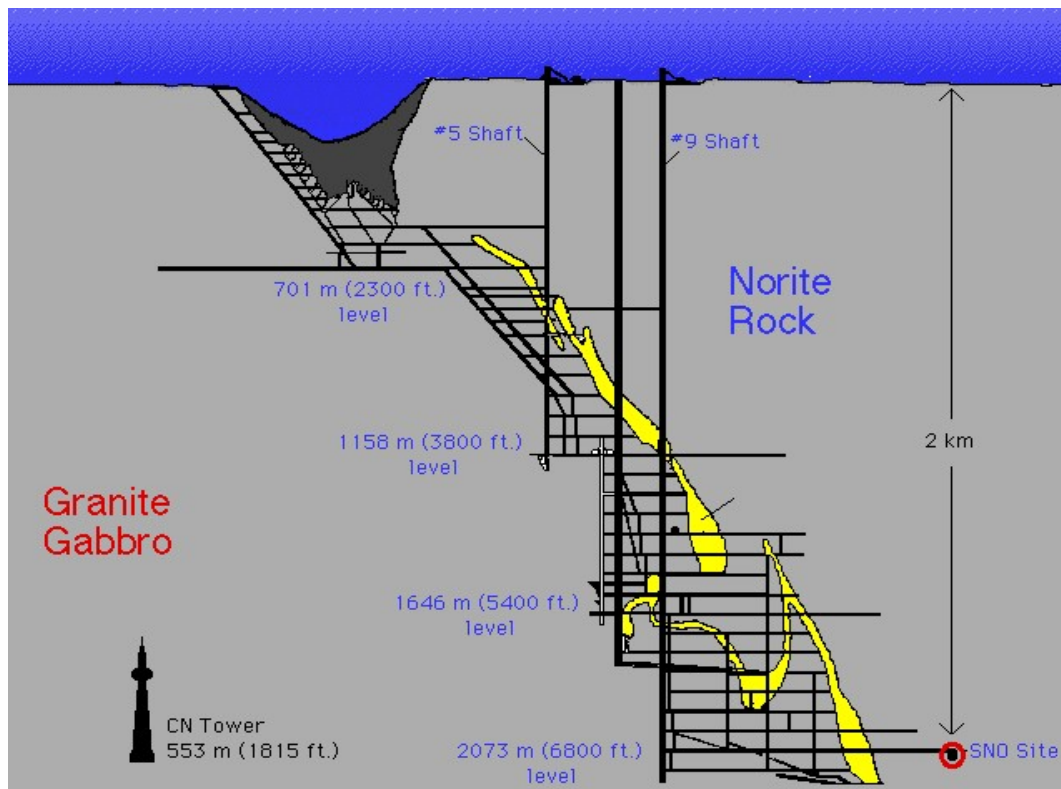


Ponovno je za detekcijo bistven pojav Čerenkova!

Direktna detekcija delcev temne snovi



- Ideja: zaznamo odrinjeno jedro.
- Odrinjeno jedro: detekcija preko pojavov, ki jih nabit delec povroči v snovi (scintilacije, ionizacija)
- Težava: redek proces (...) → motijo procesi iz ozadja → eksperiment opstavimo globoko pod zemljo



Iskanje 'Nove fizike': usklajen pristop na več frontah

- **Neposredno iskanje novih delcev**
 - iskanje pri velikih energijah (ATLAS na LHC)
- **Iskanje odstopanj od pričakovanih značilnosti procesov**
 - izjemno natančne meritve pri nižjih energijah (Belle II)
- **Študij lastnosti nevtrinov (nevtralni partner elektrona)**
 - meritve mešanja nevtrinov – prehajanja ene vrste nevtrinov v drugo
- **Neposredno iskanje delcev temne snovi**
 - Iskanje pojavov, pri katerih delec trdne snovi odrine jedro v detektorju

V naslednjih desetih letih se bo razjasnilo kup dodatnih vprašanj, ki nam jih je zastavila Narava.

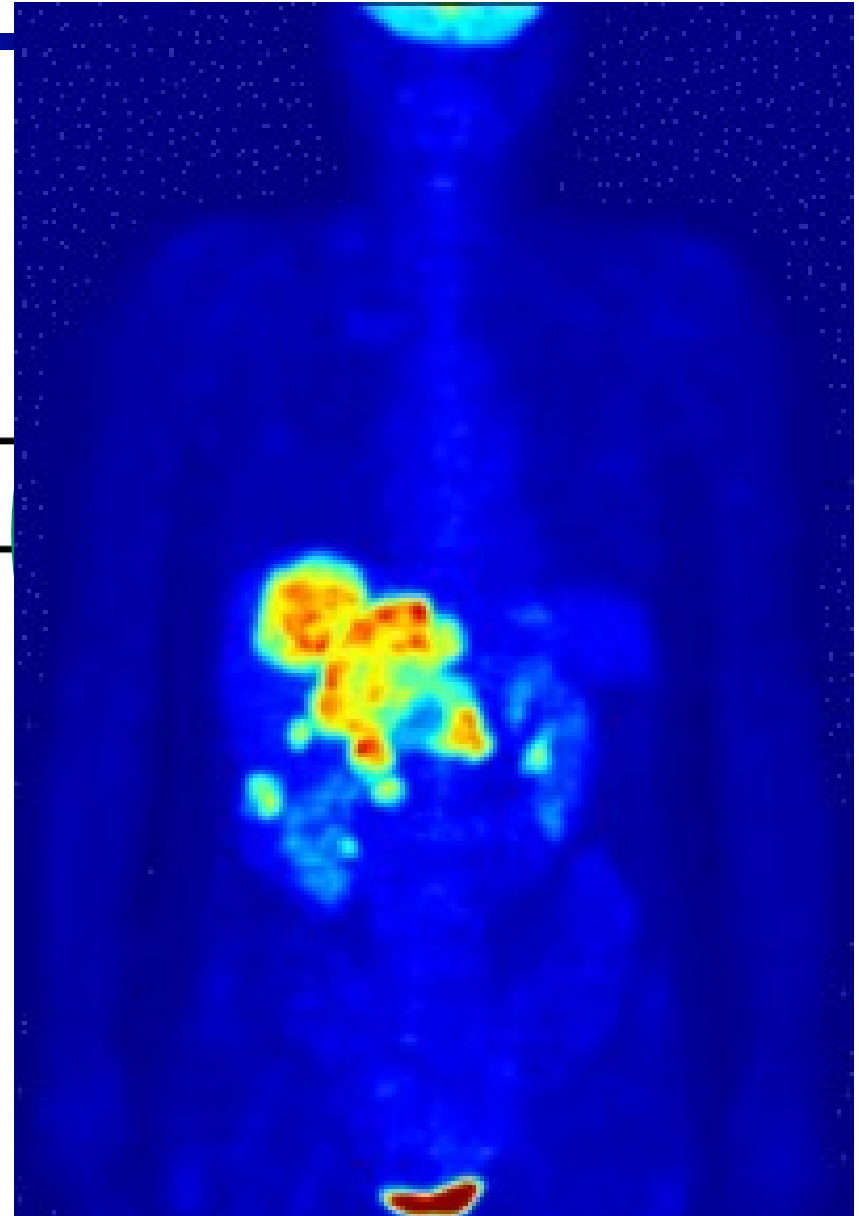
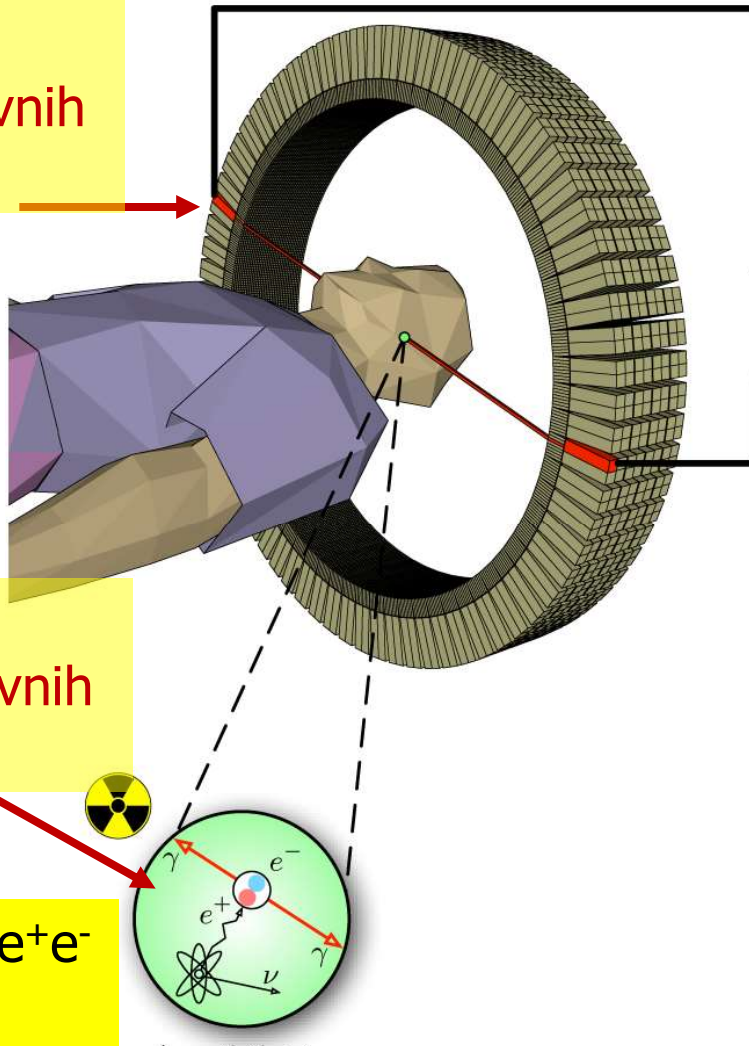
Spin-off osnovnih raziskav – primer 1

PET: pozitronska tomografija

detektor iz fizike osnovnih delcev

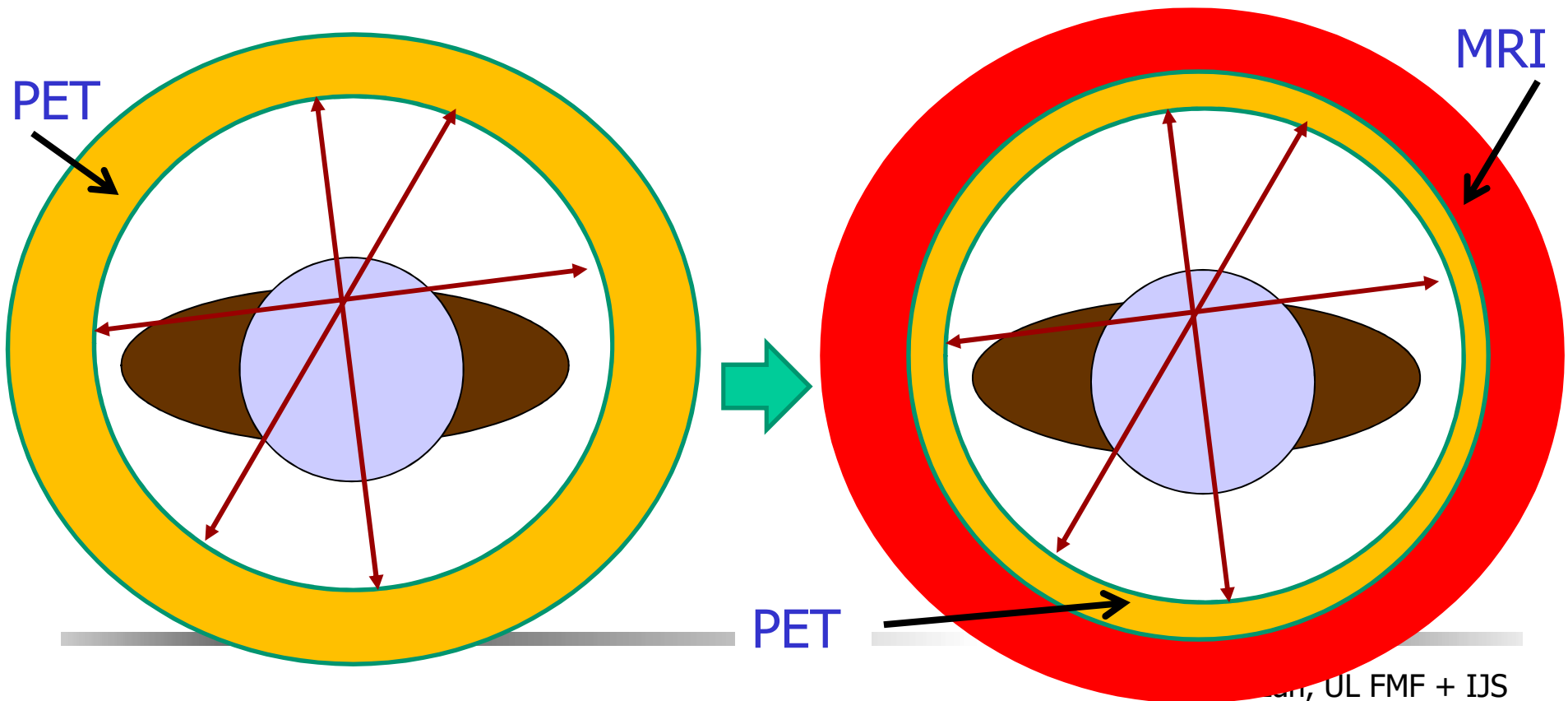
zakonitosti fizike osnovnih delcev

anihilacija e^+e^-



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!



Spin-off osnovnih raziskav – primer 2

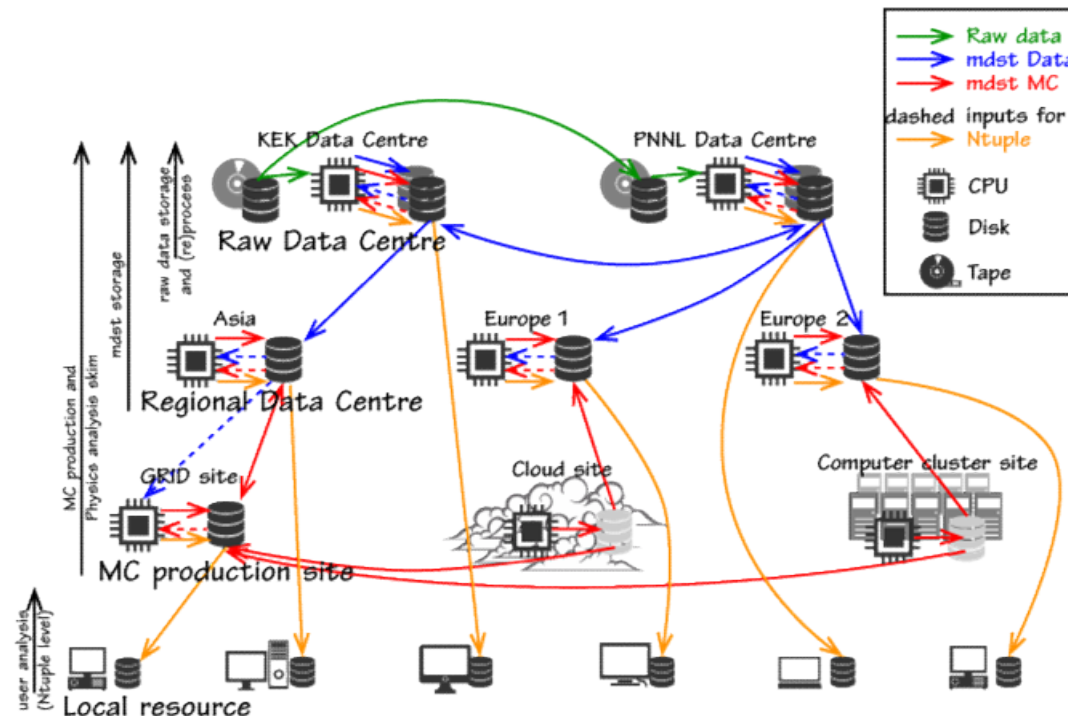
Svetovni splet: izmislili so si ga fiziki osnovnih delcev, ker so potrebovali orodje, ki bi jim omogočalo nemoteno raziskovalno delo tudi takrat, ko ne sedijo ob pospeševalniku.

Grid kot naslednja stopnja razvoja interneta: distribuirane računalniške kapacitete (‘računalnik iz vtičnice’)

LHC je prvi veliki uporabnik Grida, razvoj in preizkus tehnologije

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

Obdelava podatkov pri Belle II:
GRID in Cloud



Kontrolni sistemi v pospeševalnikih

Bistveni element pospeševalnika! Merijo lastnosti žarkov (položaj, velikost) in omogočajo računalniško krmiljenje teh zapletenih naprav.

Izkušnje, pridobljene pri razvoju pospeševalnikov v fiziki osnovnih delcev, lahko koristno uporabimo pri načrtovanju pospeševalnikov za **študij materialov** (sinhrotroni) in **hadronsko terapijo** (zdravljenje raka z obsevanjem).

Slovenija igra zelo pomembno vlogo tudi na tem področju, **Instrumentation technologies** (Solkan) in **Cosylab** (Ljubljana) sta eni od vodilnih firm v svetu!

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 dojemanje 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.

Dodatne prosojnice

Zakaj imajo delci maso: Higgsov bozon

Škotski fizik Peter Higgs in belgijski fizik Francois Englert, 1964:
Maso delcev lahko pojasnimo, če predpostavimo, da je prostor napolnjen s poljem – 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“



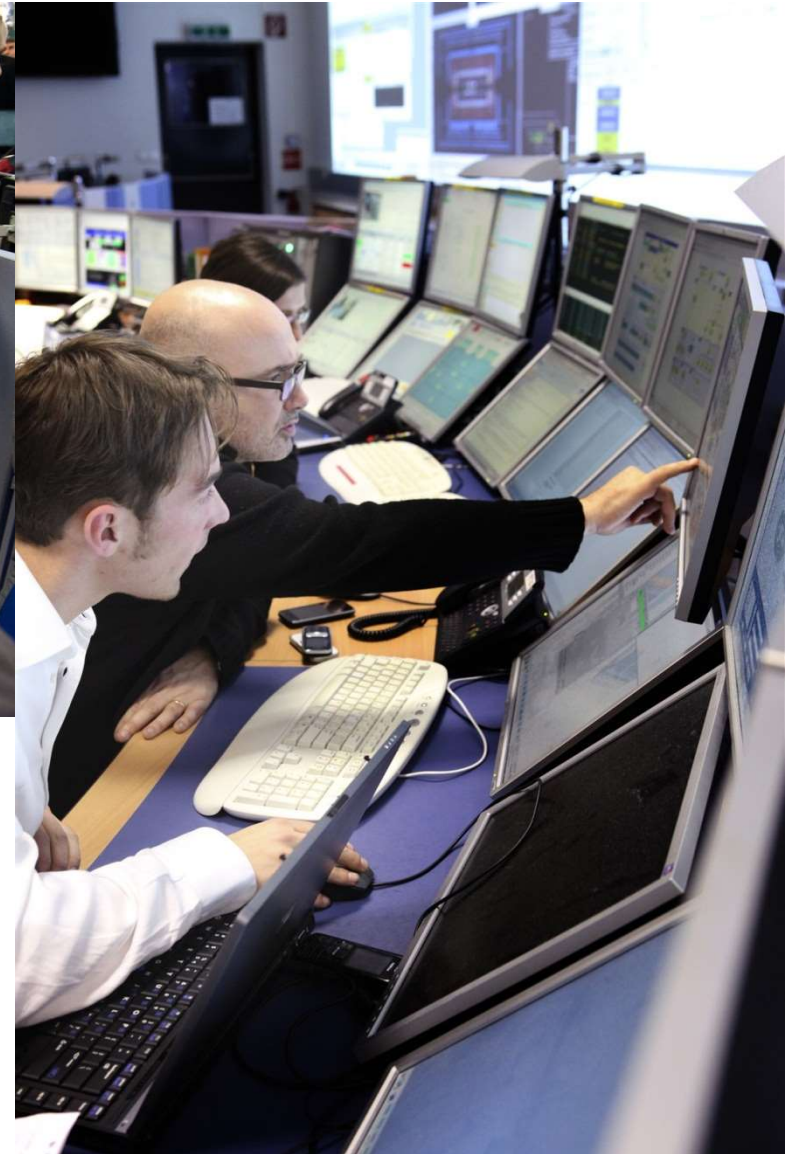
Higgsov bozon

Škotski fizik Peter Higgs in belgijski fizik Francois Englert, 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

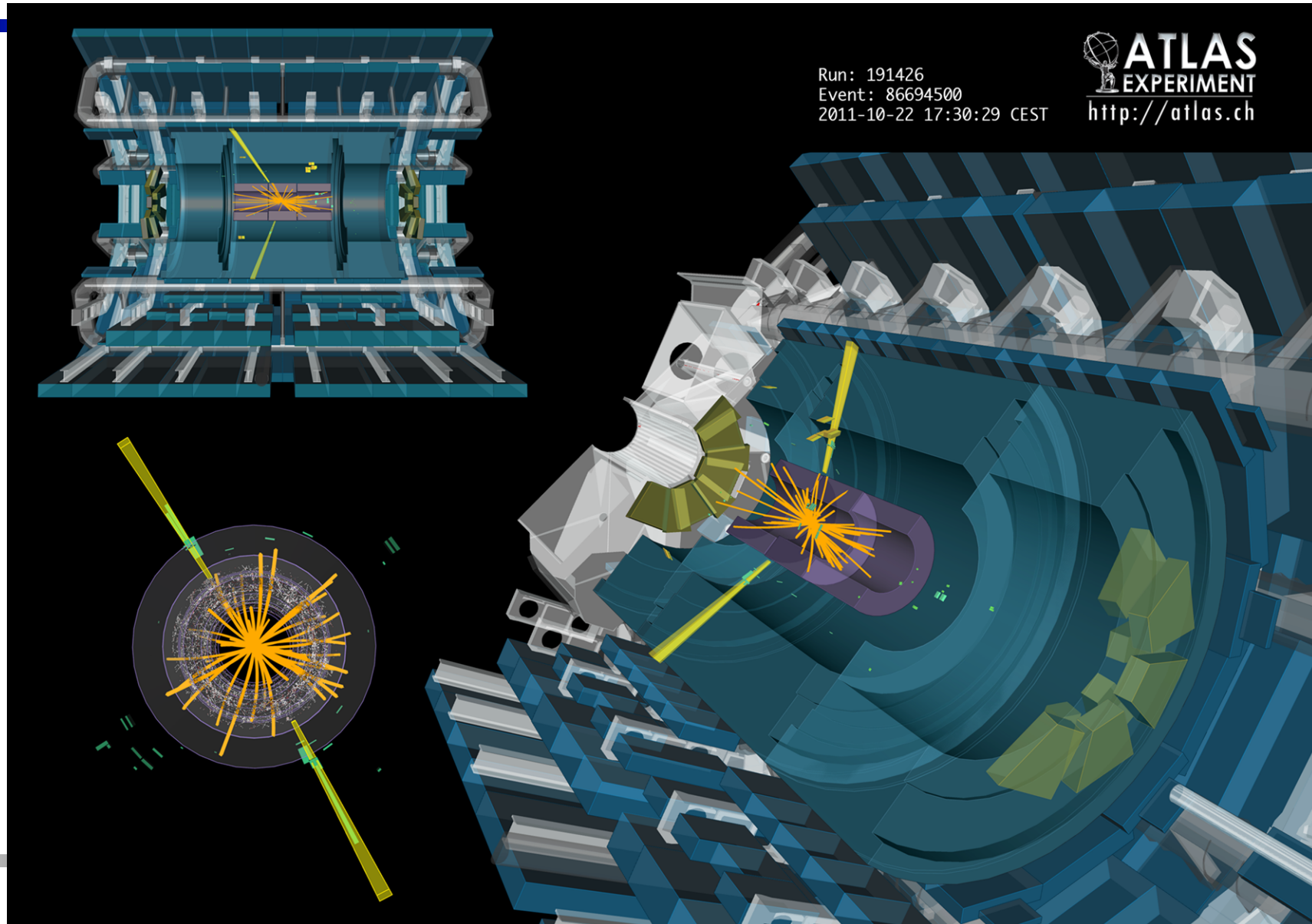
Higgsovo polje → delci imajo maso
velikost mase odvisna od velikosti „Higgsovega naboja“

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

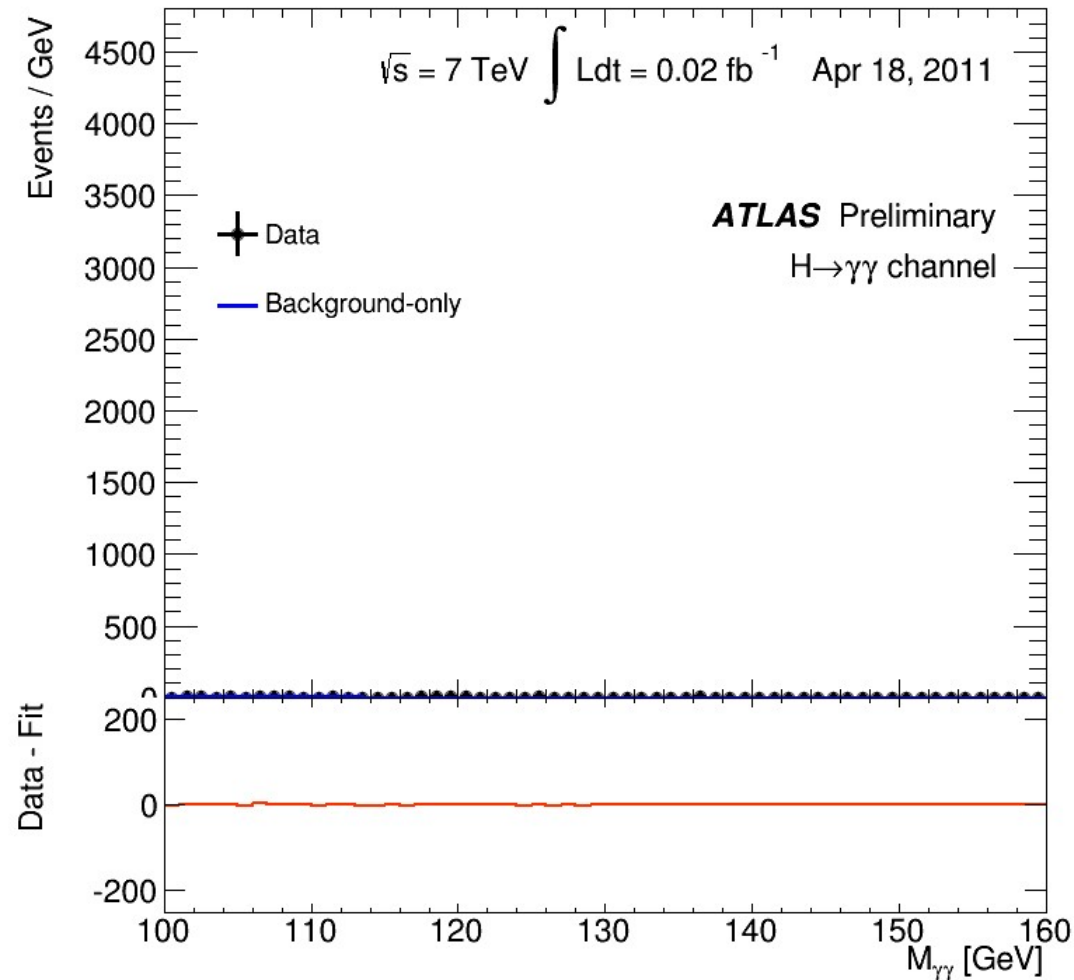


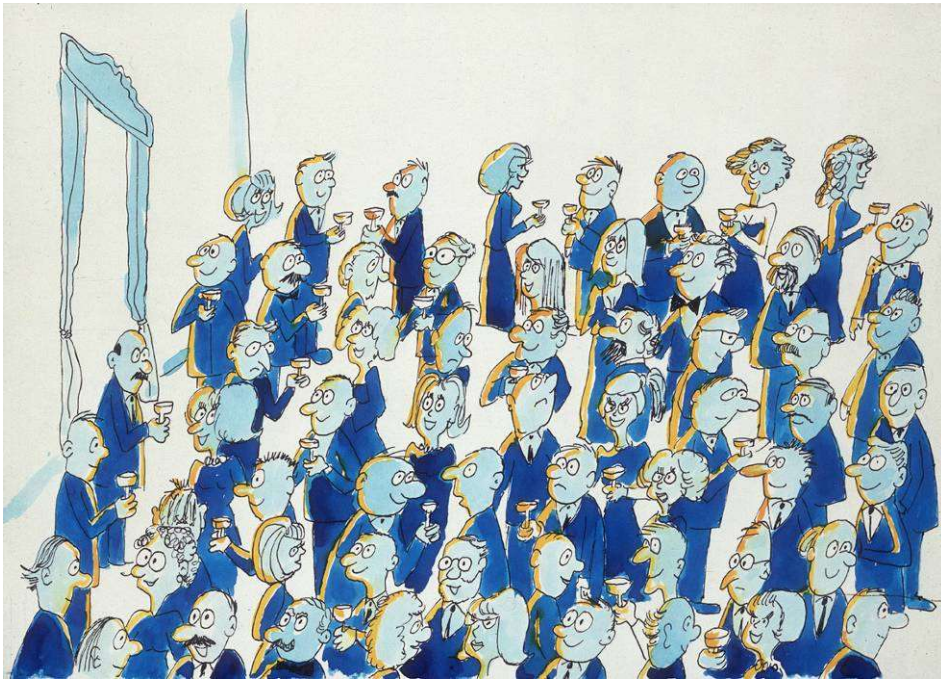
Kontrolna soba med
meritvami...

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

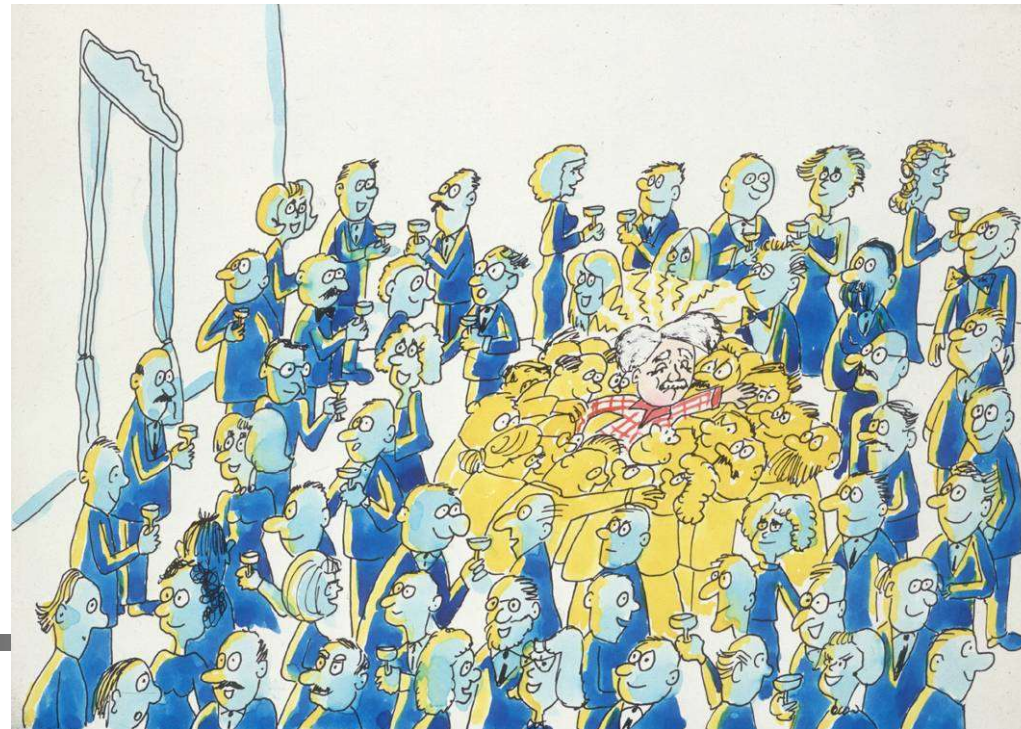


Rezultat meritve: iskanje razpada Higgsovega bozona v dva žarka gamma, $H \rightarrow \gamma\gamma$

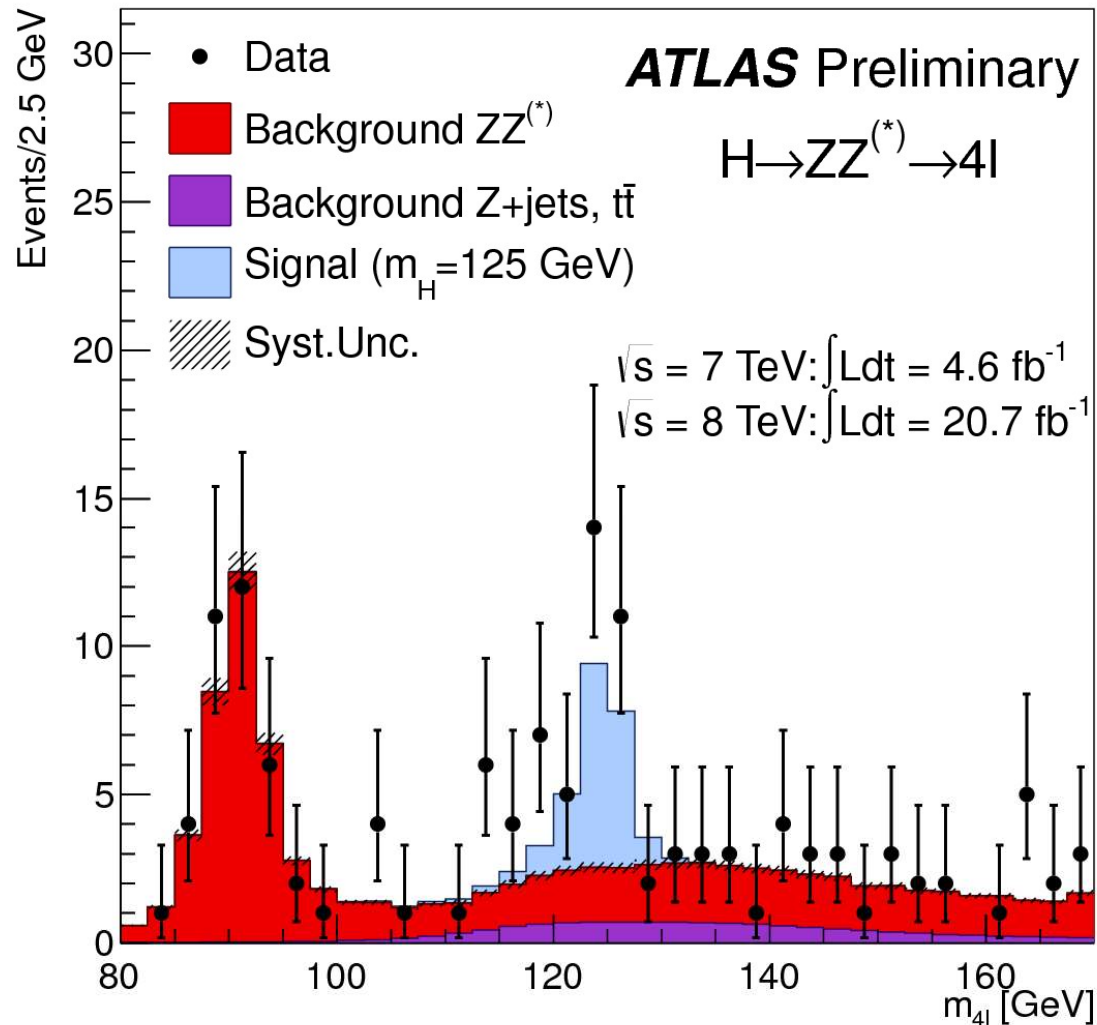




Kako razumeti
maso delcev,
ki je posledica
Higsovega polja?



Rezultat meritve: iskanje razpada Higgsovega bozona v štiri leptone, $H \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$



Masa vsake zabeležene kombinacije štirih mionov – večinoma kombinacije drugih procesov - ozadja (rdeče in vijolično).

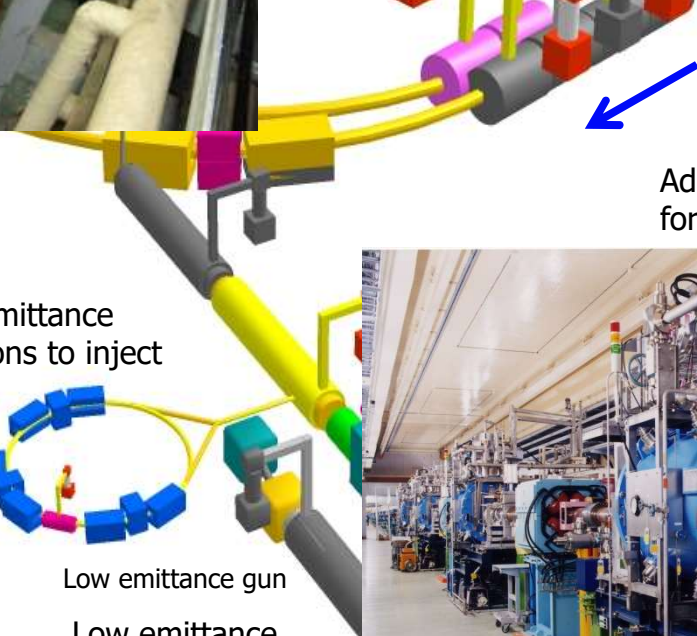
Modro: signal, kot bi ga pričakovali za Higgsov delec



Installation of 100 new long LER bending magnets



Installation of HER wiggler chambers

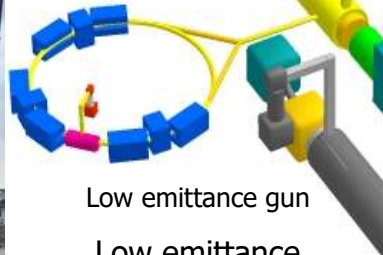


Add / modify RF systems for higher beam current



Damping ring tunnel

Low emittance positrons to inject



Low emittance gun

Low emittance electrons to inject

