

FIZIKA OSNOVNIH DELCEV - Eksperimentalne metode

- Kaj opazujemo pri poskusih
- Kako opišemo trk
- Opazovanje trkov in razpadov delcev
- Kakšne naprave potrebujemo:
 - pospeševalniki in trkalniki delcev
 - detektorji: Belle, Belle II, ATLAS

Peter Križan

Fakulteta za matematiko in fiziko,
Univerza v Ljubljani

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



in Institut Jožef Stefan, Ljubljana



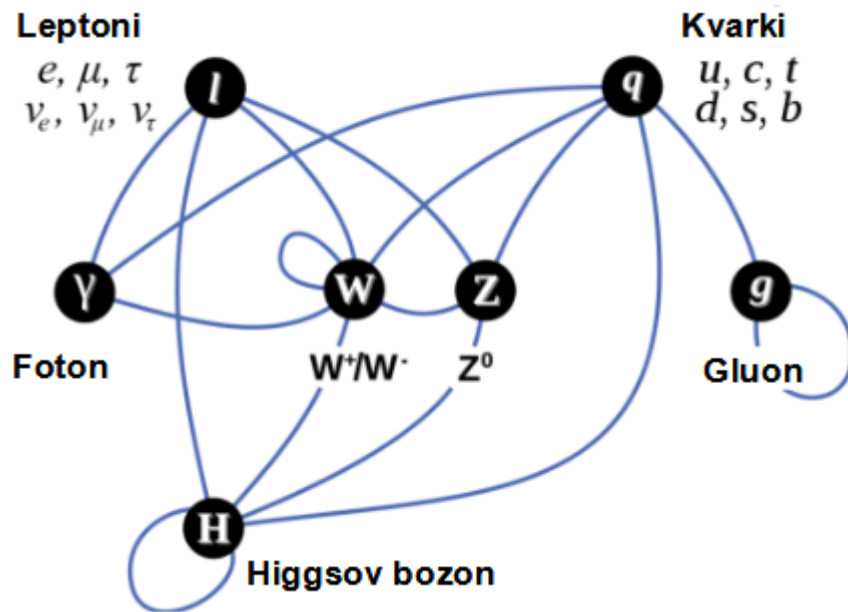
International Masterclasses 2026
17. 3. 2026

Standardni model osnovnih delcev

- Kvarki: u, d, c, s, t, b
- Leptoni: $e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \tau^-, \nu_\tau$
- Higgsov delec H
- Sile: elektrošibka (γ, Z, W) in močna (g)

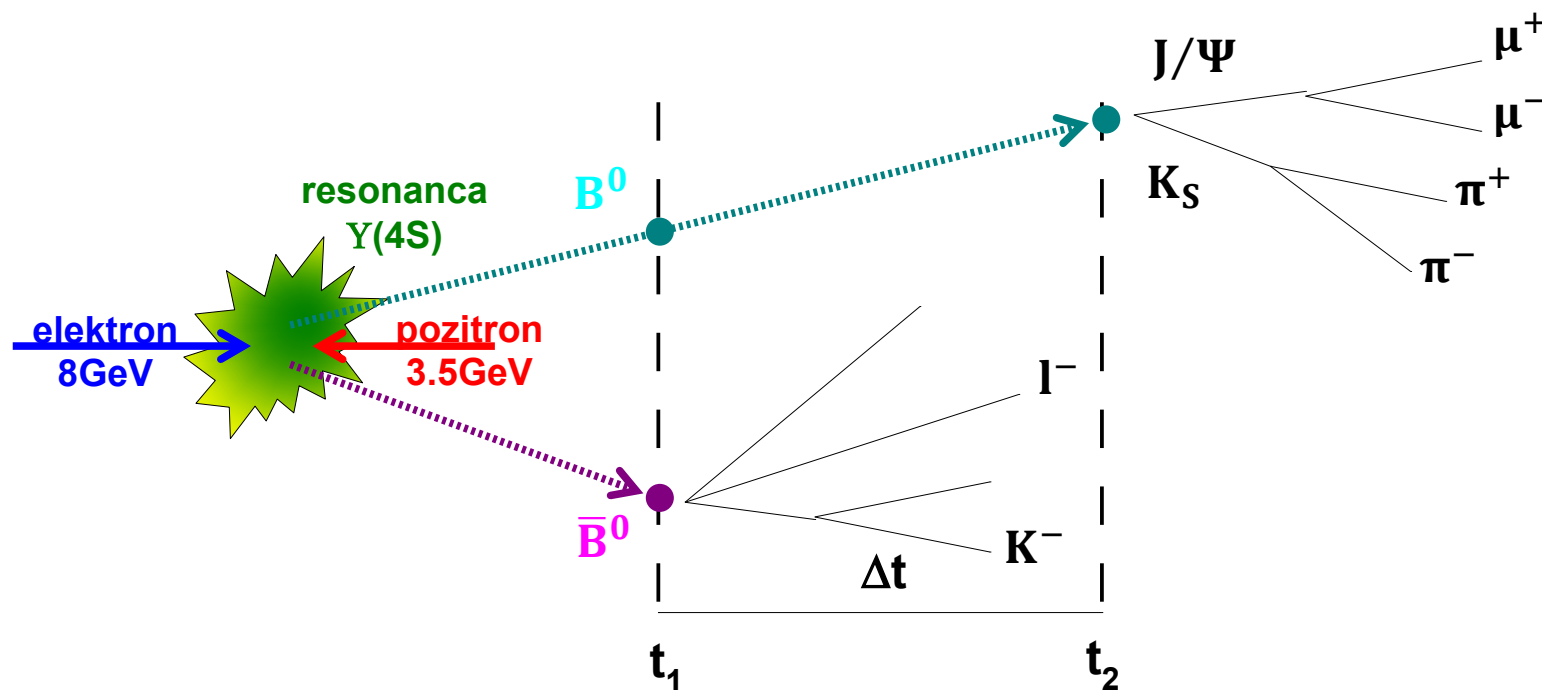
Kvarki ne obstajajo prosti, ampak so vezani v mezonih ($q\bar{q}$) in barionih (qqq).

	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
naboj →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
ime →	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Kvarki	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 Z boson
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptoni	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm W boson



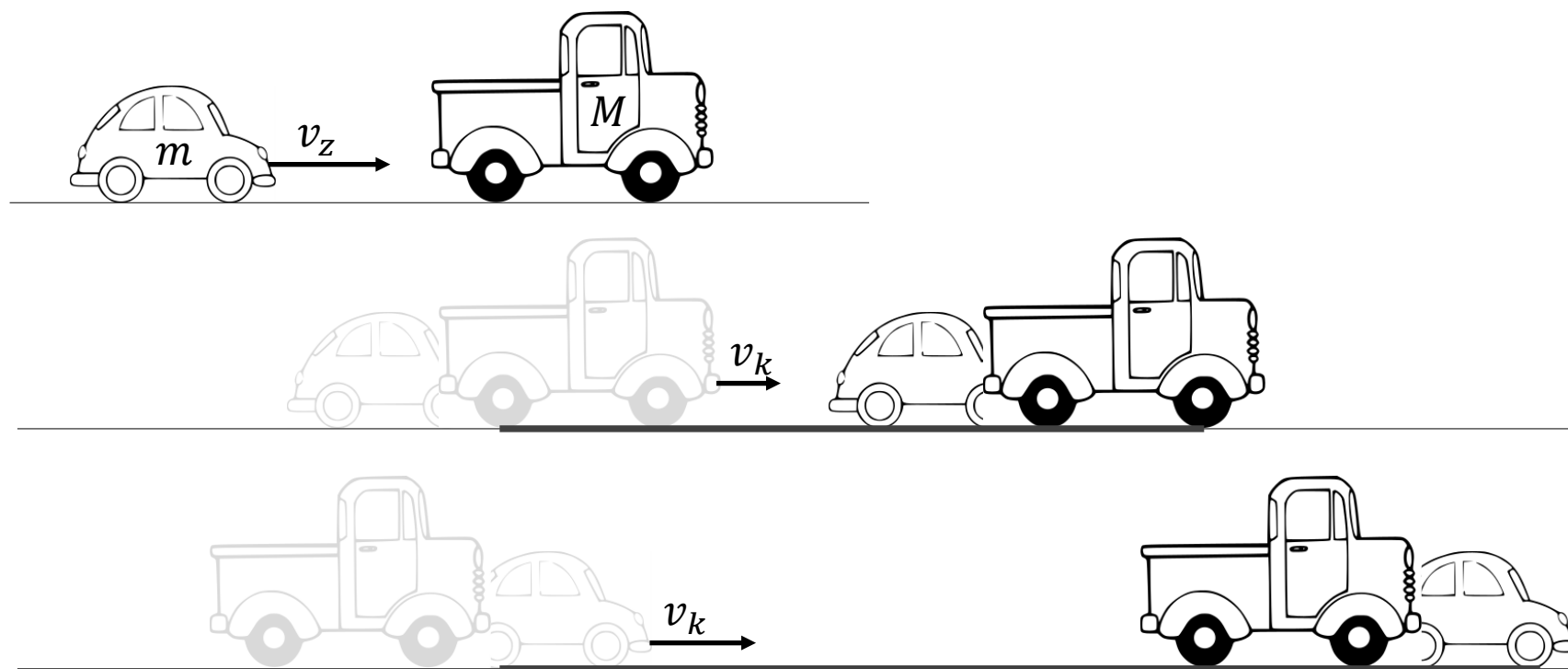
Kaj opazujemo?

- snov, ki tvori nas in našo okolico, je sestavljena iz protonov in nevtronov v atomskih jedrih ter elektronov
- ostale delce moramo najprej ustvariti s trki, pri katerih se del kinetične energije delcev pretvori v novonastale delce
- ker je večina nastalih delcev kratkoživa, jih lahko zaznamo le preko njihovih razpadnih produktov



Trki „delcev“

- primer trka vozil, ki se sprimeta (popolnoma neprožen trk)
- pri gibanju ima „delec“ (vozilo) gibalno količino $p = mv$ in kinetično energijo $E_k = \frac{1}{2}mv^2$
- ker ni zunanjih vplivov se skupna gibalna količina in energija ohranjata



$$mv_z = (m + M)v_k \Rightarrow v_k = \frac{m}{m + M}v_z$$

$$\frac{1}{2}mv_z^2 = \frac{1}{2}(m + M)v_k^2 + E_n$$

- iz izmerjene sledi delca (pot ustavljanja) lahko ocenimo hitrost vozil po trku
- poškodbe vozil so merilo sproščene energije pri trku

Opis trka ali razpada delcev

- opis trka ali razpada delcev sloni na enakih zakonitostih, vendar jih moramo zapisati za gibanje hitrih delcev (teorija relativnosti)
- pri ohranitvi skupne energije moramo upoštevati tudi lastno energijo delcev zaradi njihove mase $E_0 = mc_0^2$, kjer je c_0 hitrost svetlobe v vakuumu.
- gibalna količina in energija delcev sta sedaj

$$\vec{p} = m\gamma\vec{v} \quad E = m\gamma c_0^2 = E_0 + E_k$$

$$\gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}, \quad \frac{v}{c_0} = \beta < 1$$

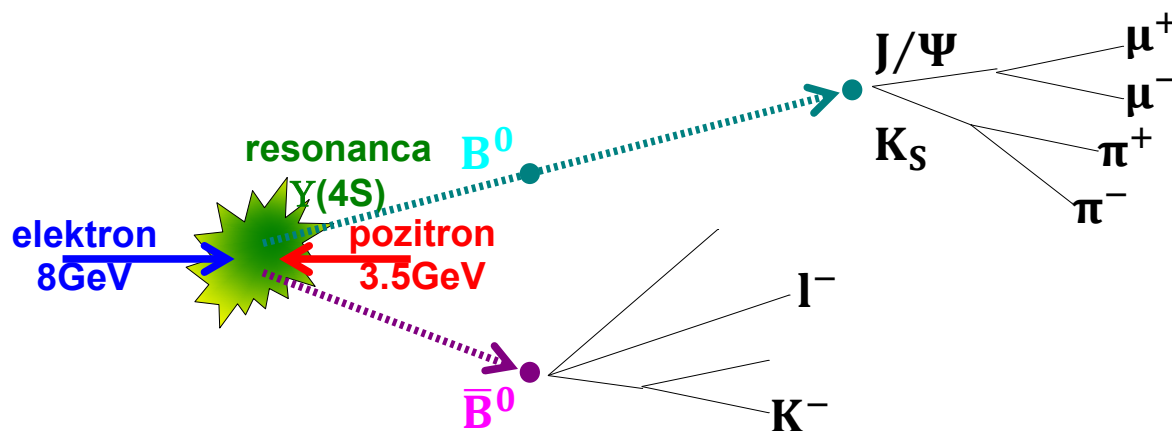
$$E^2 = E_0^2 + p^2 c_0^2$$

merjenje
energije
ali hitrosti

identifikacija
delcev

merjenje
gibalne količine

- skupni gibalna količina in energija delcev pri trku ali razpadu se ohranjata



Mase in življenjski časi nekaterih delcev

- masa je podana v enotah mirovne energije $m = E_0/c^2$
- življenjski čas je podan za mirujoč delec – lastni življenjski čas

Ime	Oznaka	masa [MeV/c ₀ ²]	Življenjski čas t_0 [s]	Ocena dosega $c_0 t_0$ [m]
elektron (pozitron)	e^-/e^+	0,511	stabilen	--
mion	μ^-/μ^+	105,7	$2,2 \times 10^{-6}$	660
tau lepton	τ^-/τ^+	1777	$2,9 \times 10^{-13}$	$8,7 \times 10^{-5}$
nevtralni pion	π^0	135	$8,4 \times 10^{-17}$	$2,5 \times 10^{-8}$
nabiti pion	π^+/π^-	139,6	$2,6 \times 10^{-8}$	7,8
kratkoživi kaon	K_S	498	$9,0 \times 10^{-11}$	$2,7 \times 10^{-2}$
dolgoživi kaon	K_L	498	$5,1 \times 10^{-8}$	15,3
nabiti kaon	K^+/K^-	494	$1,2 \times 10^{-8}$	3,6
nevtralni mezon B	B^0/\bar{B}^0	5279,6	$1,5 \times 10^{-12}$	$4,5 \times 10^{-4}$
nabiti mezon B	B^+/B^-	5279,3	$1,5 \times 10^{-12}$	$4,5 \times 10^{-4}$
mezon J/Ψ	J/Ψ	3097	$7,2 \times 10^{-21}$	$2,2 \times 10^{-12}$
proton (antiproton)	p/\bar{p}	938,2	stabilen	--
nevtron	n/\bar{n}	939,6	885,7	$2,7 \times 10^{11}$

• povprečen doseg je ocenjen kot produkt življenjskega časa t_0 in hitrosti svetlobe c_0

• zaradi hitrega gibanja se življenjski čas podaljša za faktor

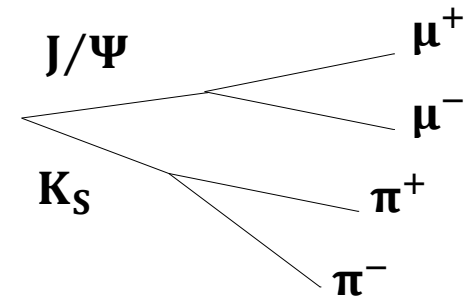
$$\gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_0^2}}}$$

- za opazovanje delcev jih **moramo najprej ustvariti** (pospeševalnik, trkalnik) in nato opazujemo njihove razpade (spektrometer)
- le redki delci živijo dovolj dolgo, da pustijo sledi v detektorjih: nabiti e, μ, π, K, p in nevtralni γ, K_L, n
- **kratkožive delce** zaznamo posredno, tako da jih **rekonstruiramo preko njihovih razpadnih produktov**:

- poiščemo delce, ki prihajajo iz skupnega verteksa

- iz izmerjenih energij/hitrosti in gibalnih količin

lahko določimo maso delca, ki je razpadel, saj se skupna gibalna količina in energija ohranjata



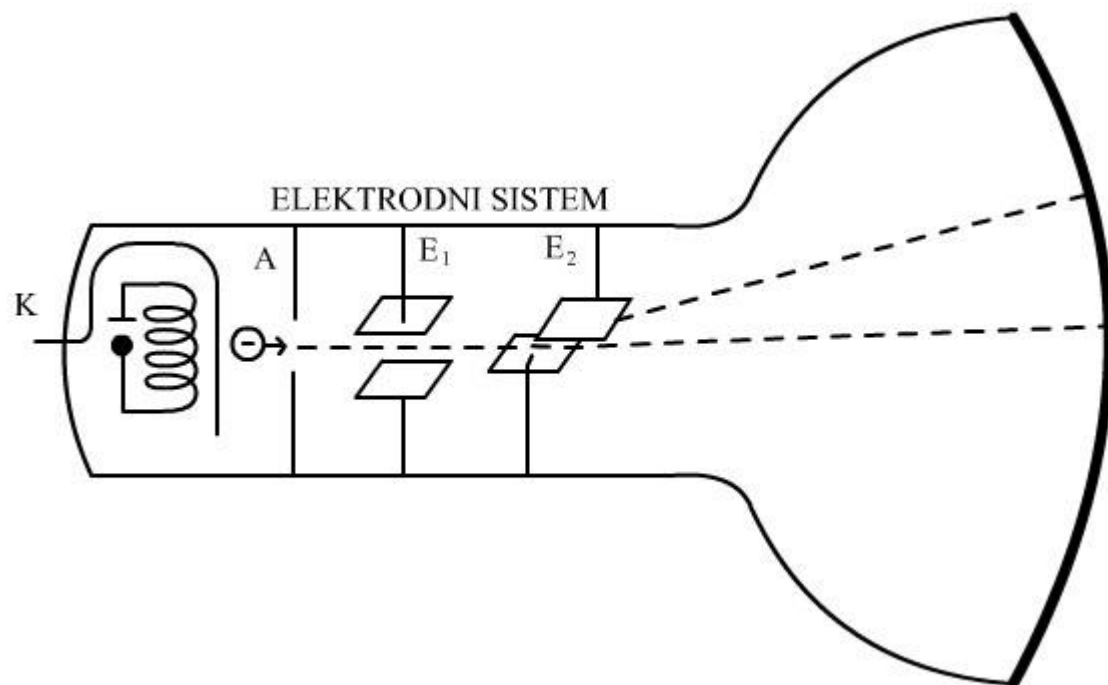
$$M c_0^2 = \sqrt{\left(\sum_i E_i\right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i\right)^2} c_0^2$$

$$E^2 = M^2 c_0^4 + p^2 c_0^2$$

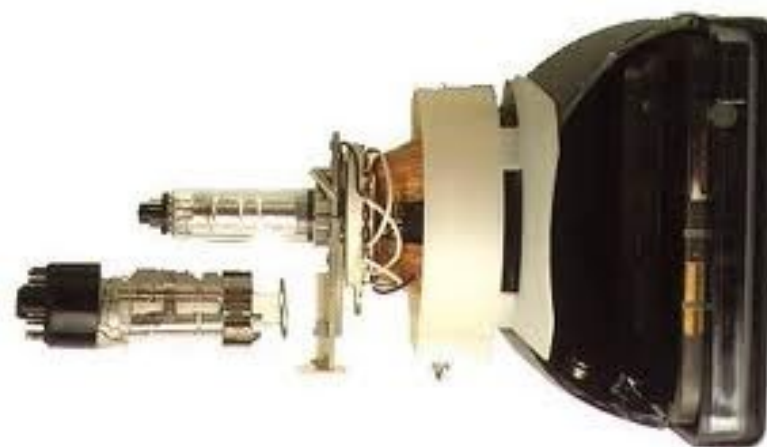
$$E_i^2 = m_i^2 c_0^4 + p_i^2 c_0^2$$

„Domači“ pospeševalnik

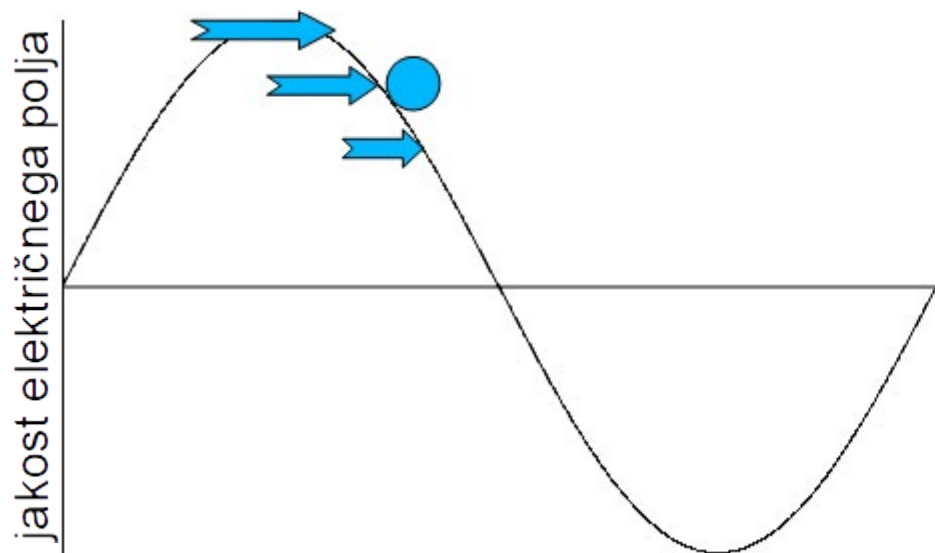
- televizorji/monitorji s katodno cevjo – spomin iz otroštva, danes redkost
- elektroni „hlapijo“ iz močno segrete kovine
- električno polje pospeši elektrone
- skozi luknjico v elektrodi izhaja curek elektronov
- curek lahko usmerjamo s pomočjo električnega in magnetnega polja:
električna sil $\vec{F} = q \vec{E}$, magnetna sila $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$ (pravokotna na smer gibanja – hitrost)



$$F = ma$$
$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow p = qBr$$



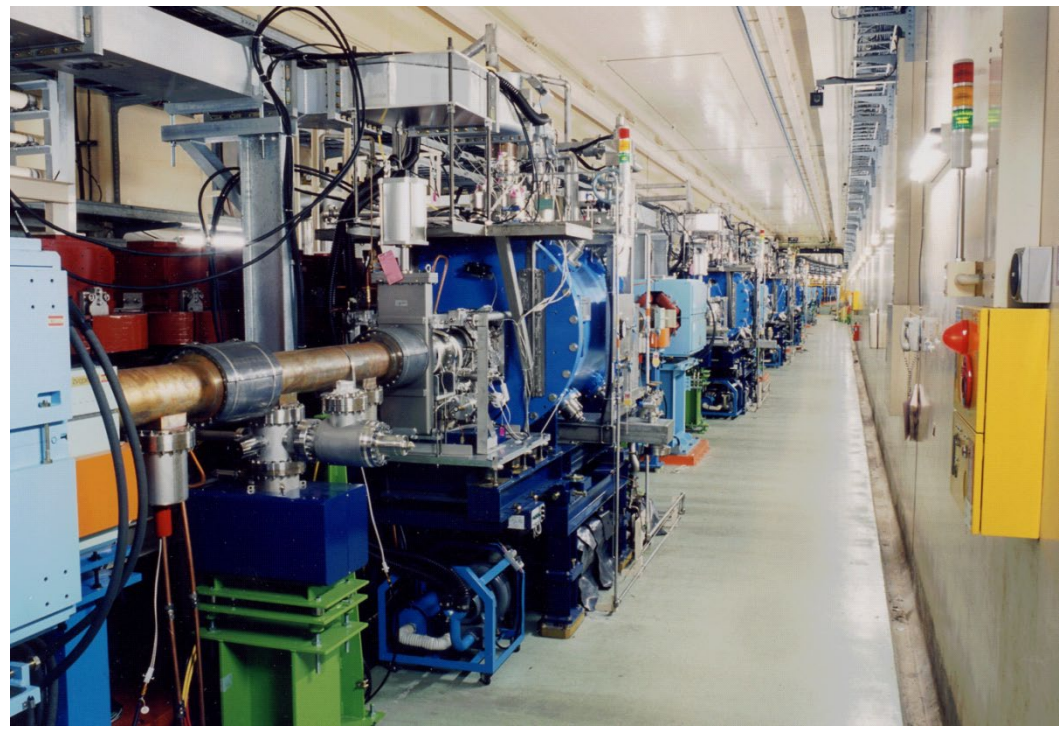
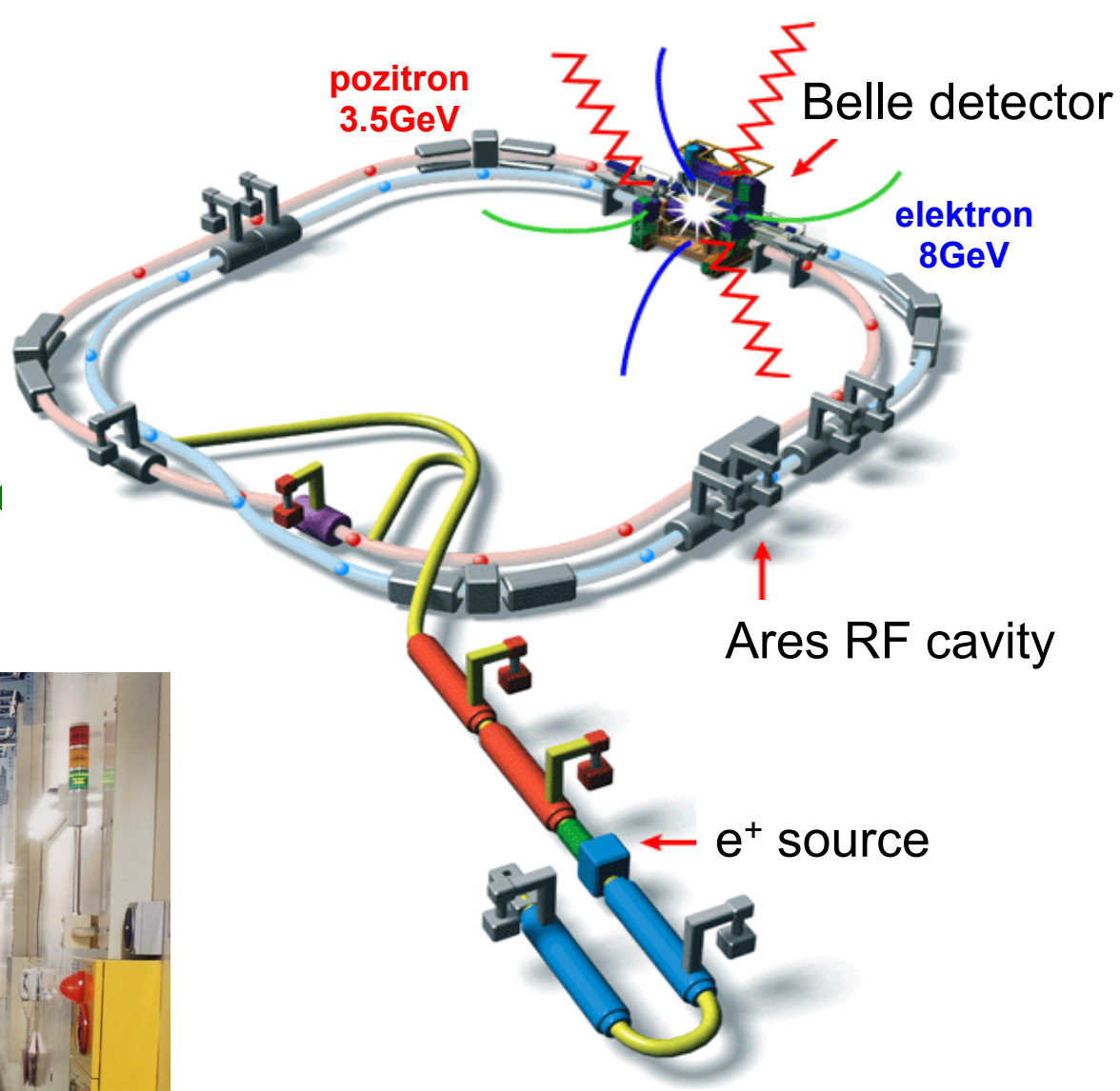
- Pospeševanje z elektromagnetnim valovanjem (tipična frekvenc ~ 500 MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 MHz, 1800 MHz ...)



... podobno deskanju na valovih

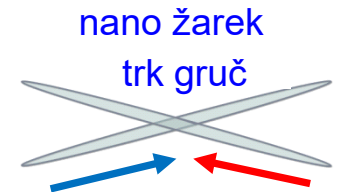
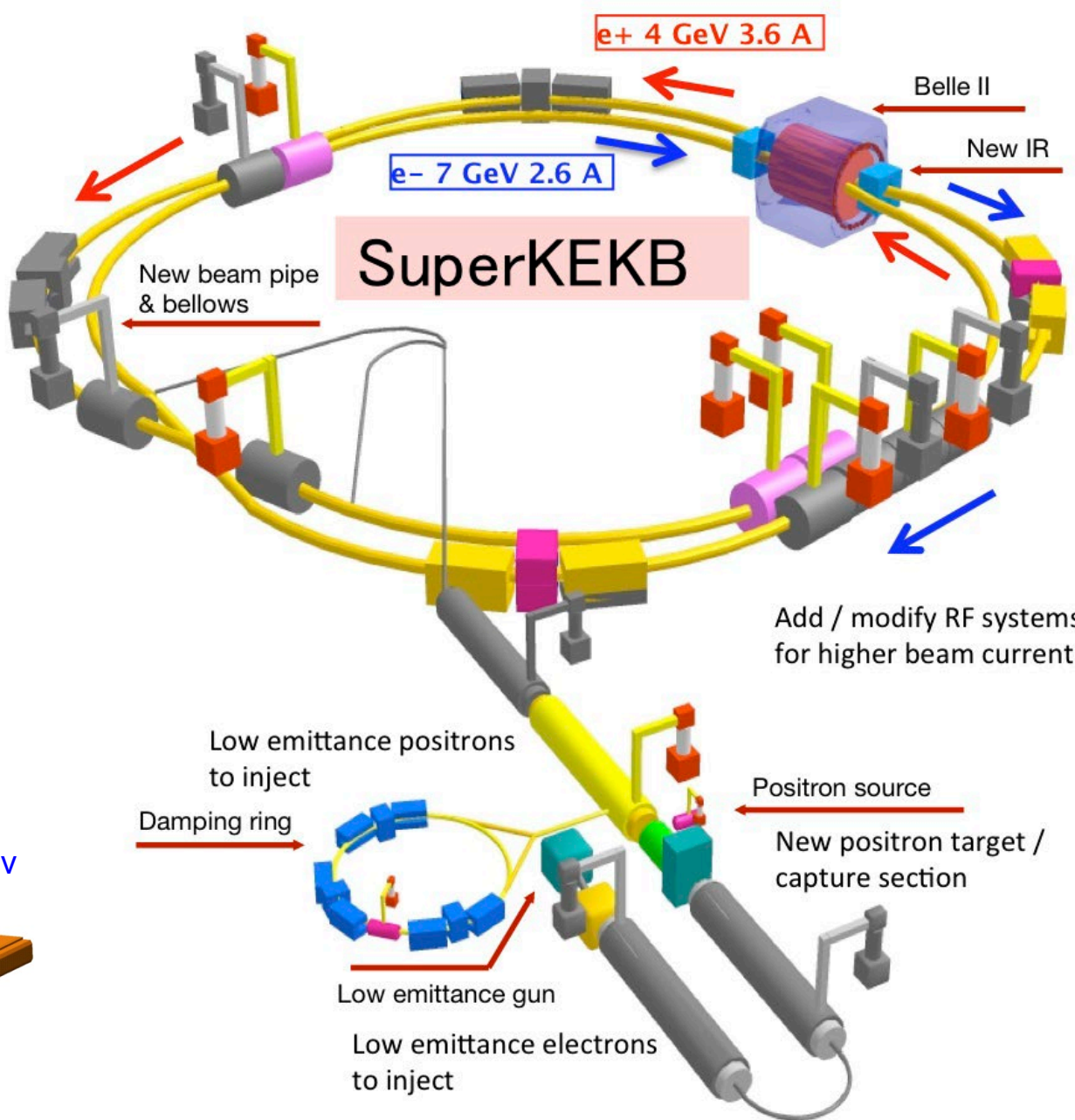
- val poskrbi tudi, da ostane gruča v vzdolžni smeri kompaktna
- žarek vodimo z dipolnimi magneti
- za vzdrževanje kompaktnosti v prečni smeri skrbijo multipolni magneti – magnetne leče

- pospeševanje elektronov in pozitronov v trkalniku KEKB
- pogostost trkov elektronov in pozitronov je odvisno od pogostosti srečanj gruč in gostote elektronov/pozitronov v gruči

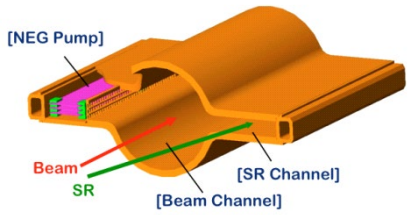


- elementi pospeševalnika v tunelu

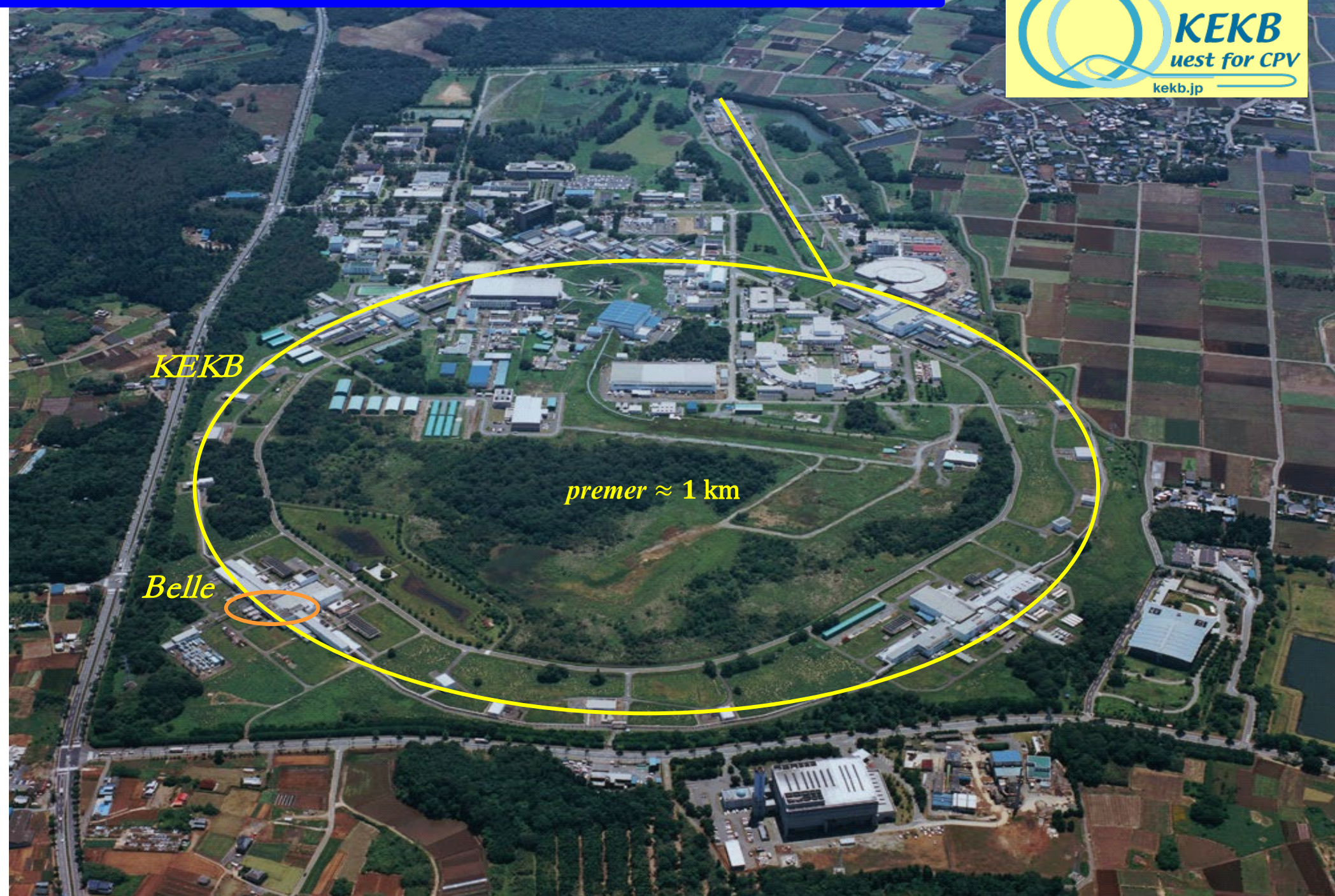
Trkalnik Super KEKB



nova žarkovna cev

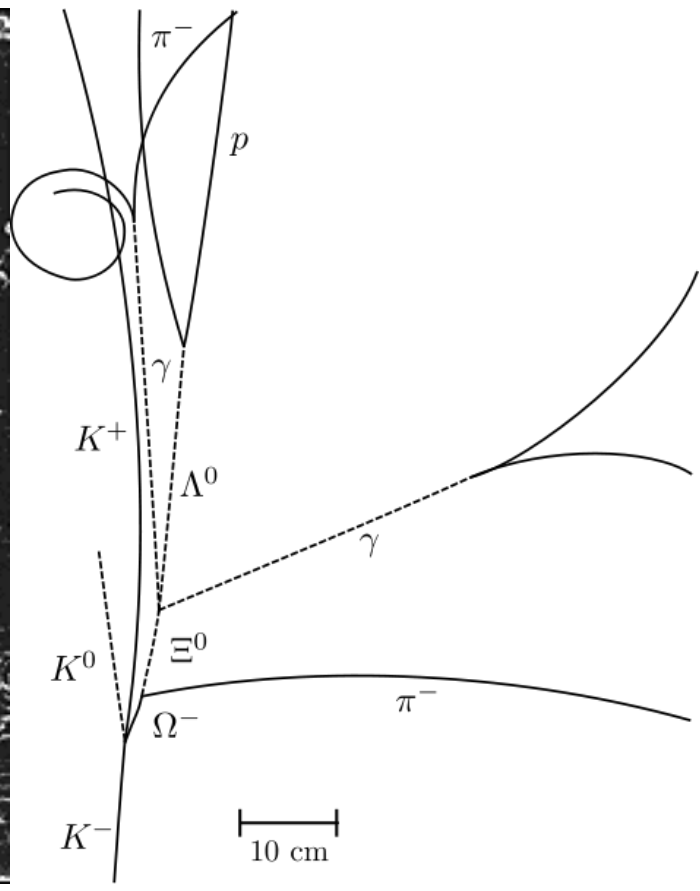
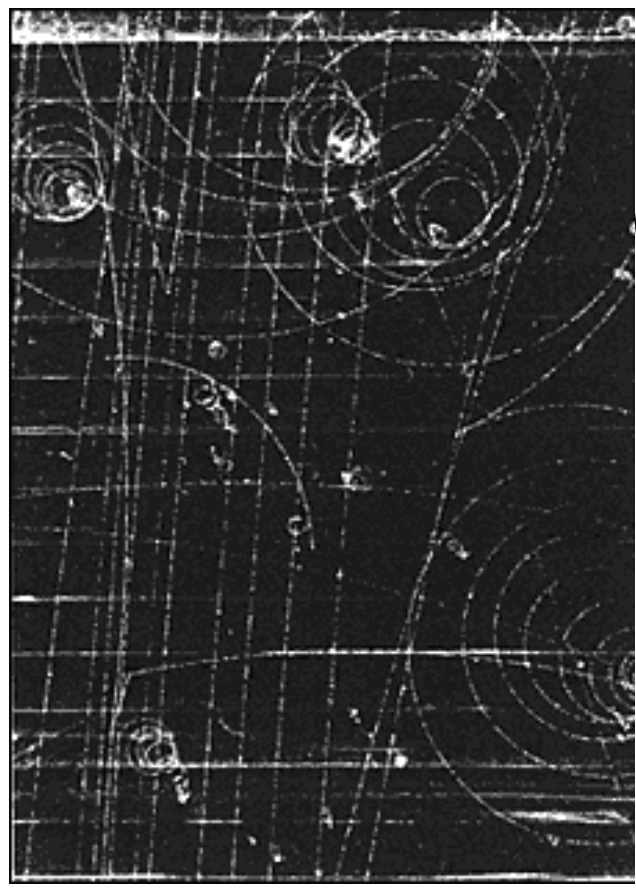
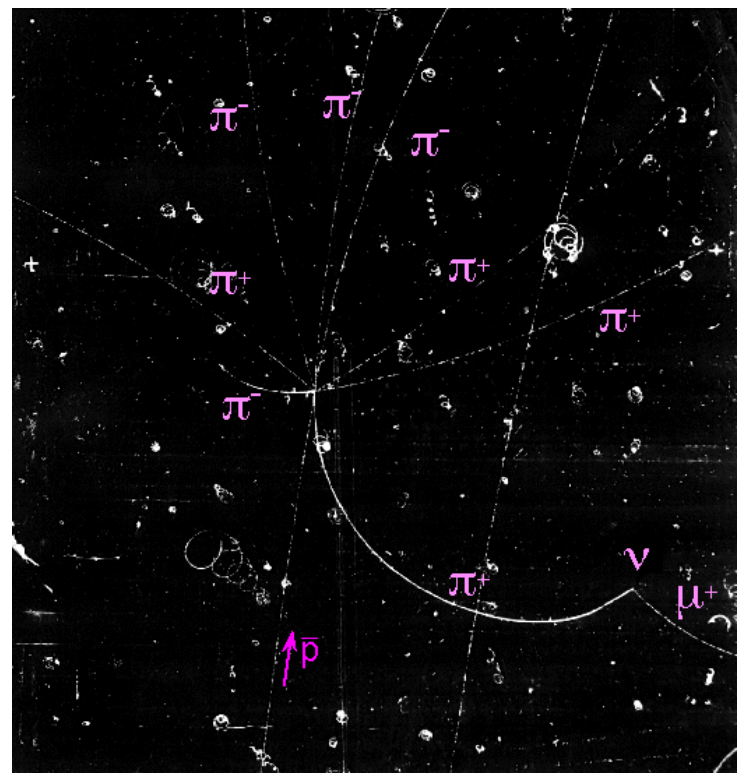


Kompleks pospeševalnikov v Tsukubi, Japonska



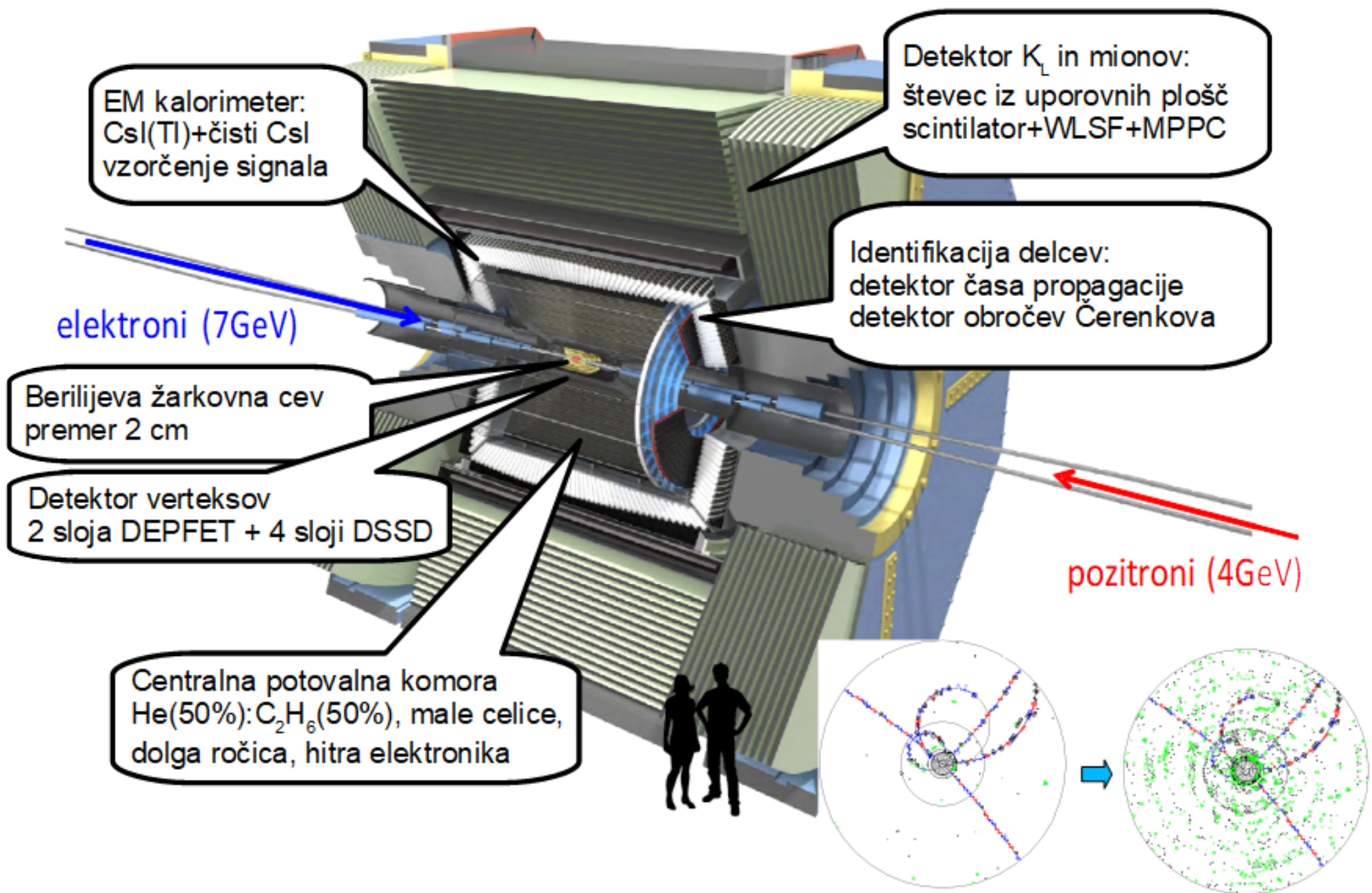
Mehurčna komora

- eden izmed prvih detektorjev so bile mehurčne komore, kjer nabiti delci povzročijo tvorbo mehurčkov na svoji poti skozi pregreto tekočino



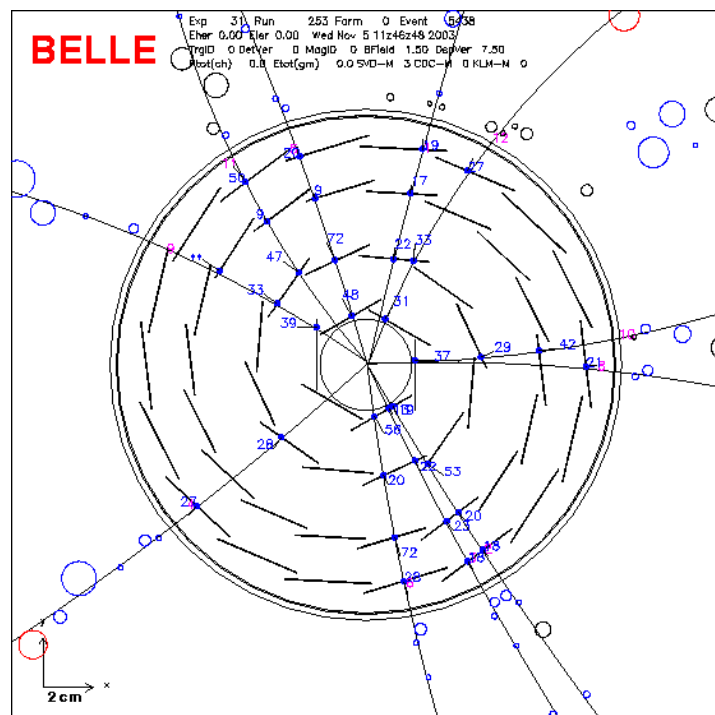
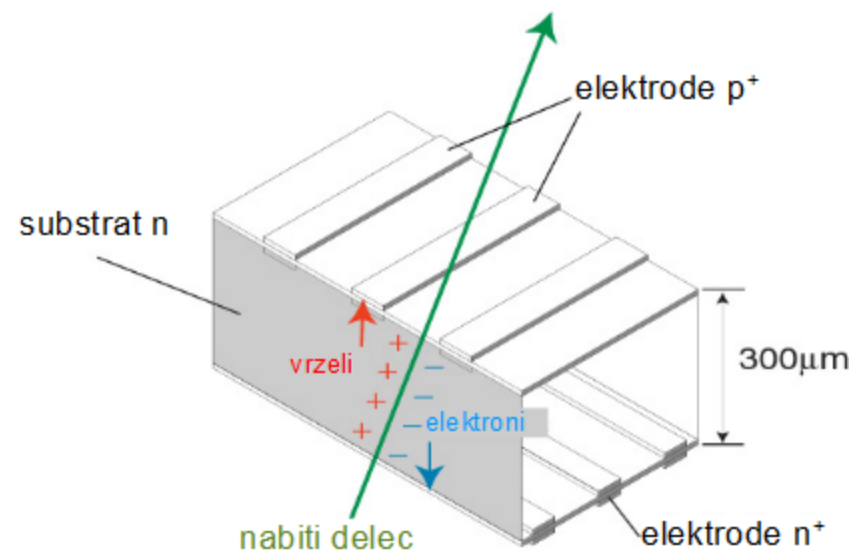
$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow p = qBr$$

Spektrometer Belle II



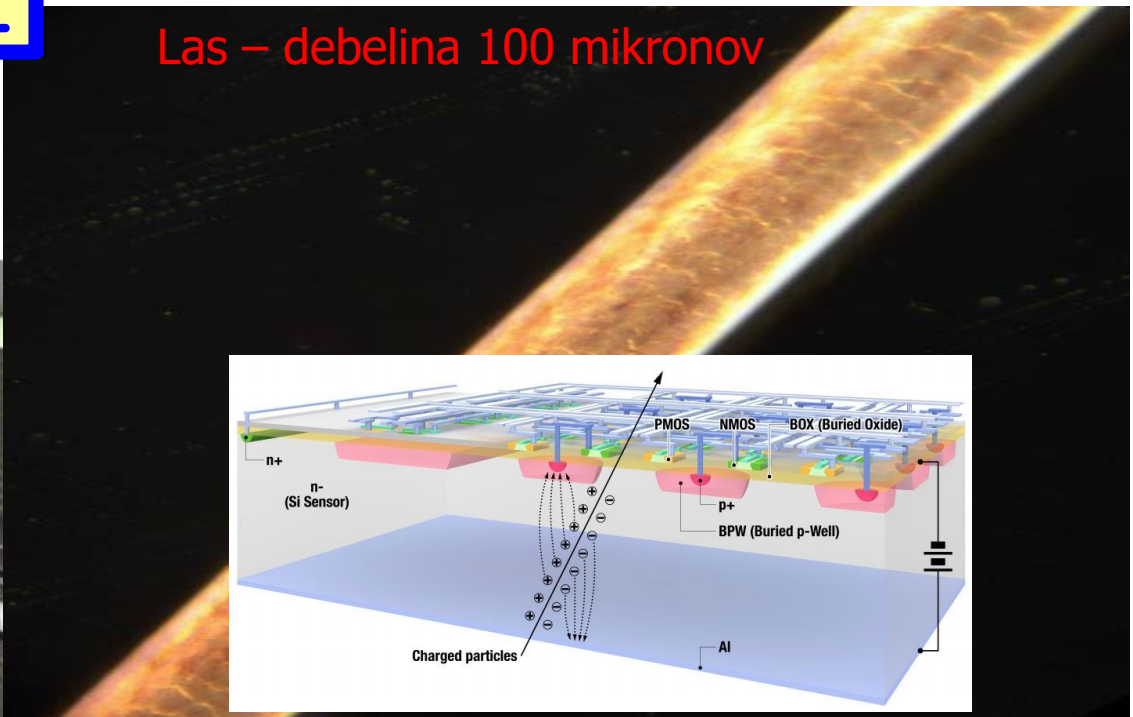
Detektor verteksov - Belle

- Eden bistvenih elementov detektorja je detektor verteksa, točke, kjer je kratkoživi delec razpadel.
- Zelo občutljiv kos aparature iz $300\mu\text{m}$ debelih silicijevih plošč z gosto nanesenimi elektrodami: natančnost meritve mesta preleta nabitega delca: $10\mu\text{m}$!



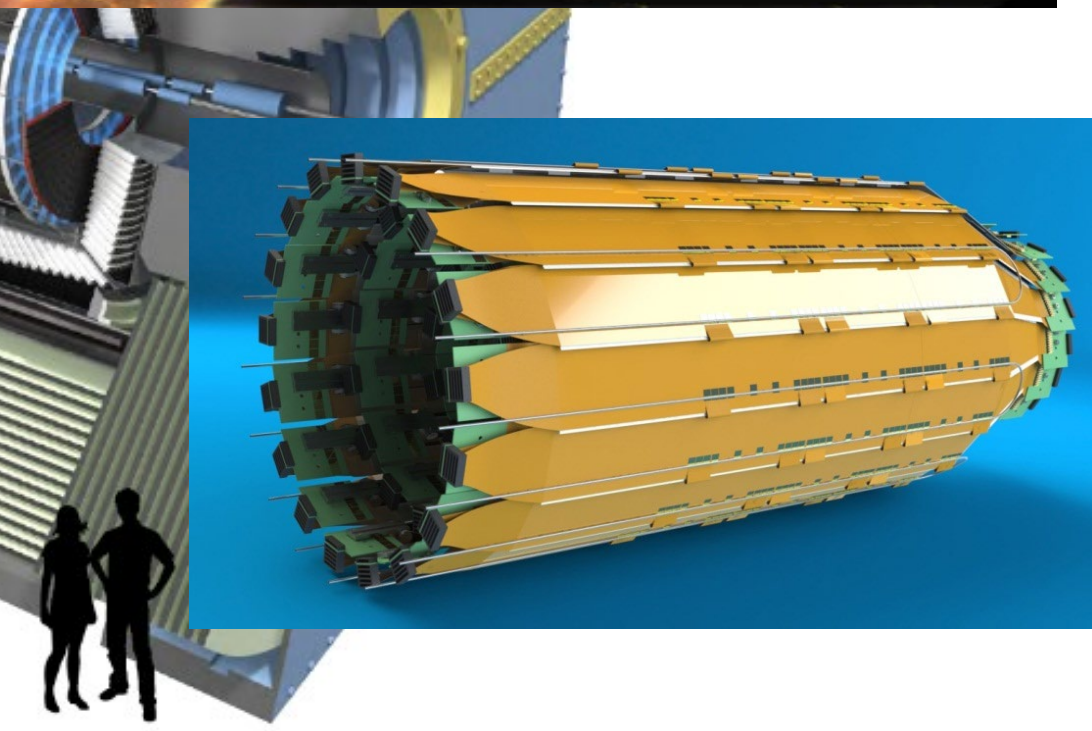
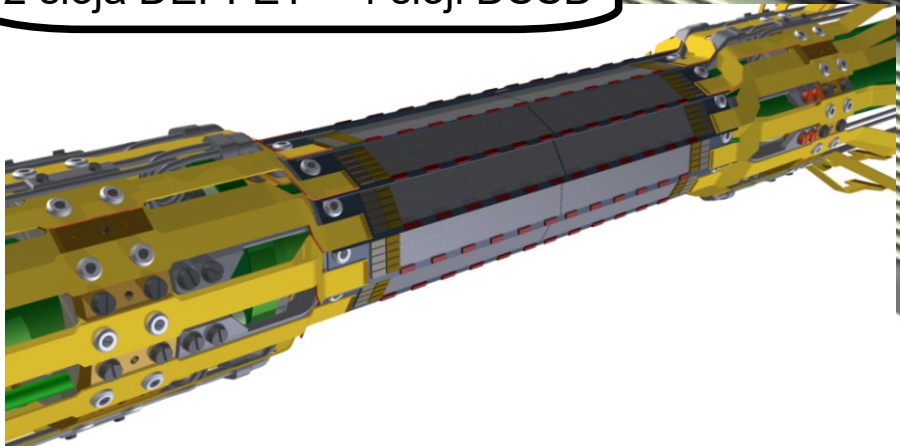
Detektor verteksov - Belle II

Določanje **točke interakcije** z visoko natančnostjo



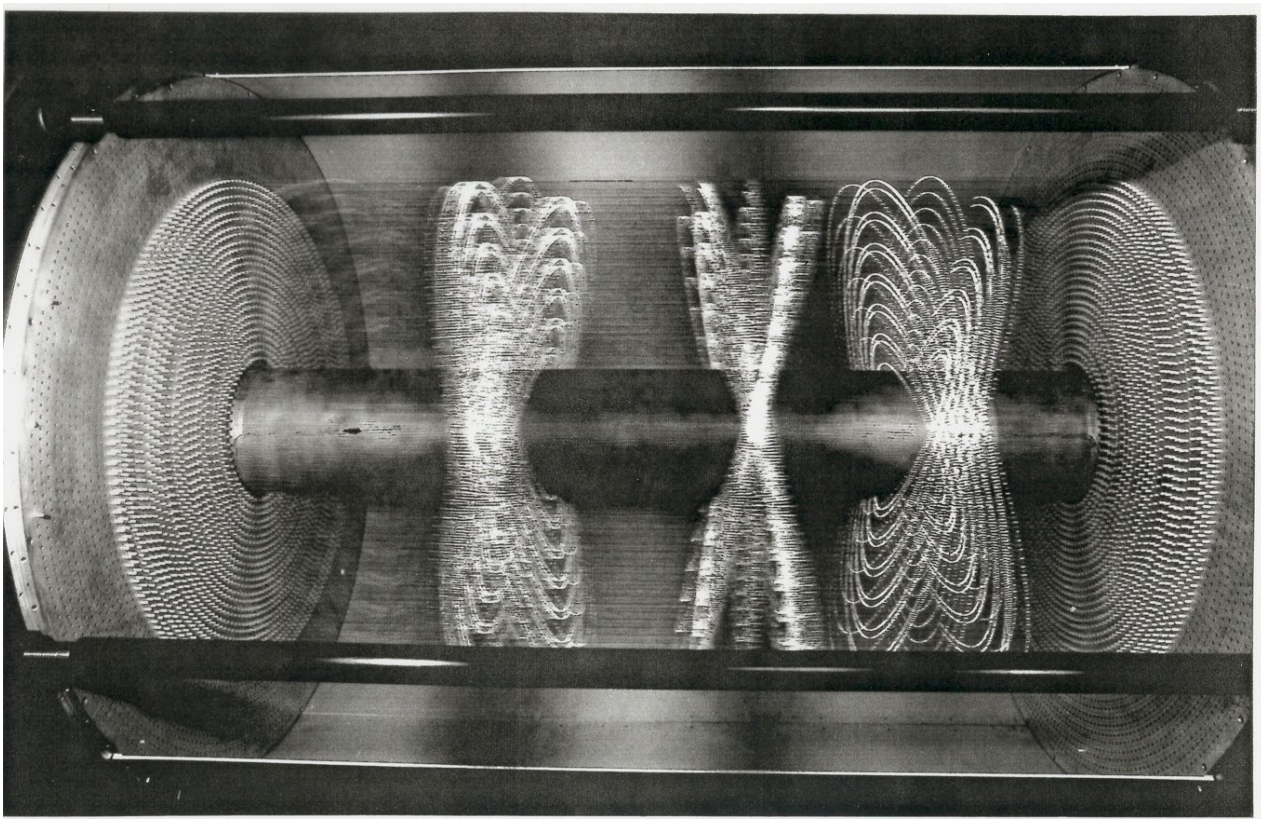
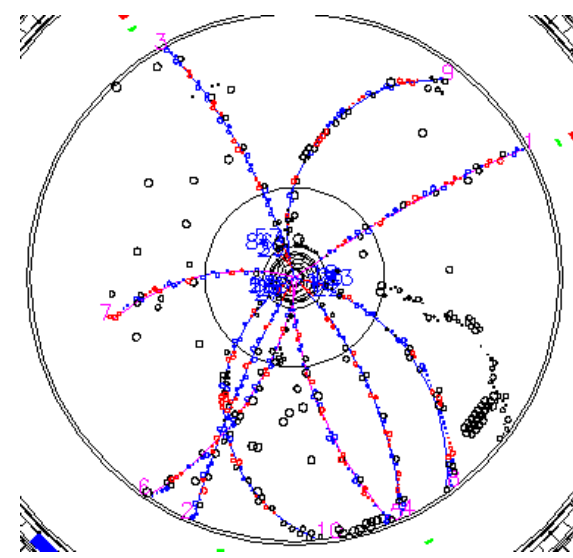
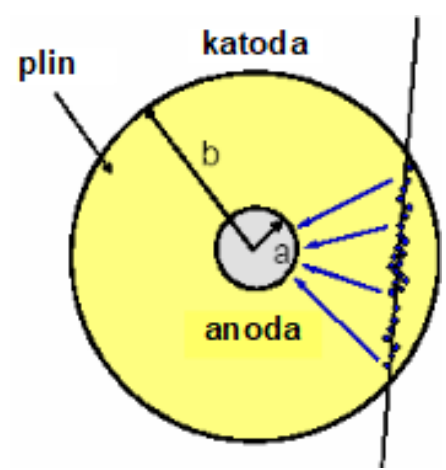
Berilijeva žarkovna cev premer 2 cm

Detektor verteksov 2 sloja DEPFET + 4 sloji DSSD

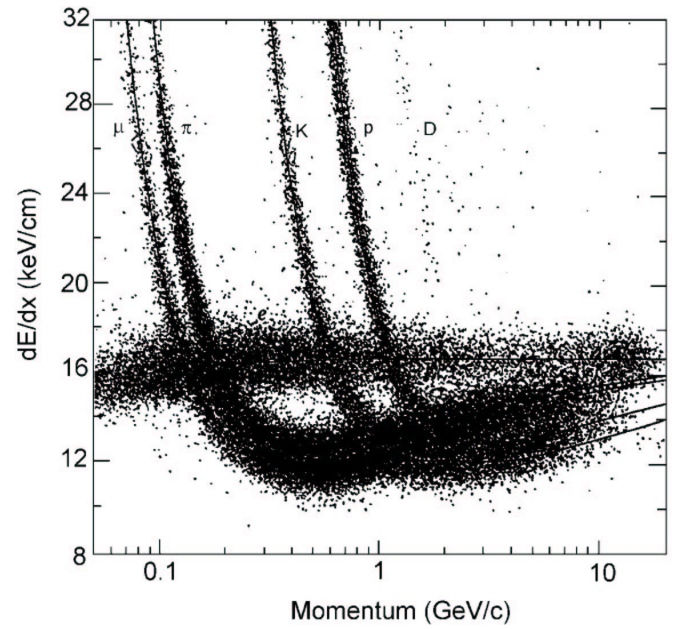


Potovalna komora - Belle

- meritev točke preleta nabitega delca – sledenje delcu v magnetnem polju, kjer iz ukrivljenosti določimo gibalno količino
- meritev specifične ionizacije (= velikost signala) – identifikacija nabityh delcev



$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow p = qBr$$

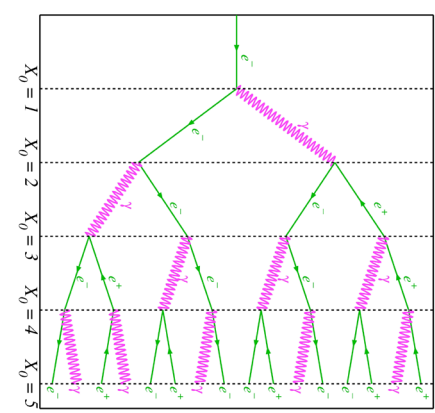
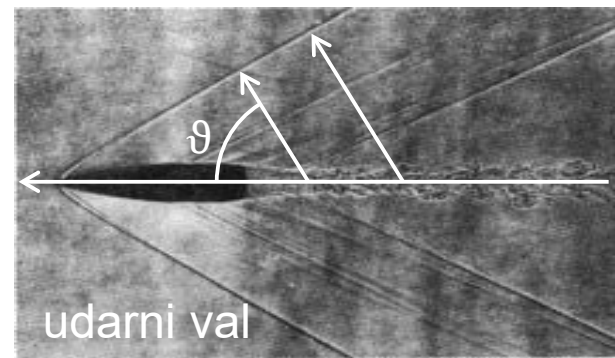


Identifikacija delcev - Belle II

$$mc_0^2 = \sqrt{E^2 - p^2 c_0^2} \quad mc_0^2 = pc_0 \sqrt{\frac{c_0^2}{v^2} - 1}$$

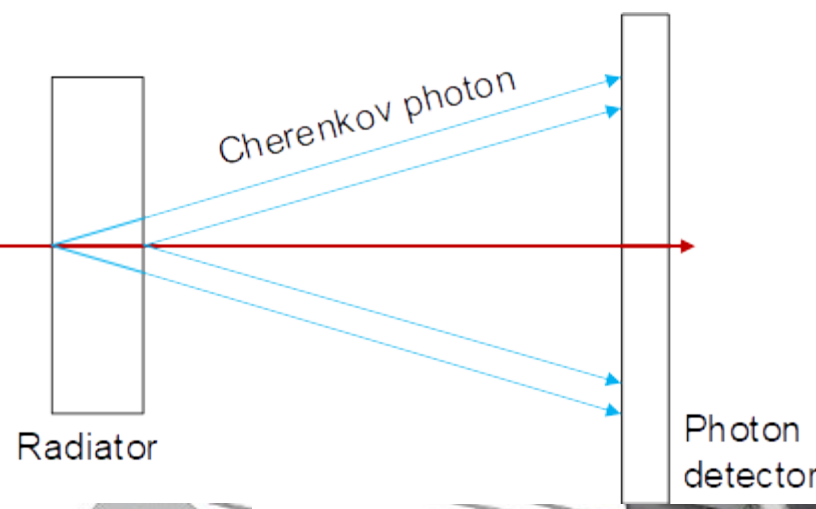
- pioni, kaoni in protoni: - števec časa preleta - meritev specifične ionizacije - pragovni števec Čerenkova
- elektroni:- elektromagnetni kalorimeter
- mioni:- mionske komore (KLM)
- K_L :- mionske komore (KLM)
- visokoenergijski žarki γ :- elektromagnetni kalorimeter

delec identificiramo tako, da mu določimo maso \rightarrow ob gibalni količini potrebujemo še energijo ali hitrost

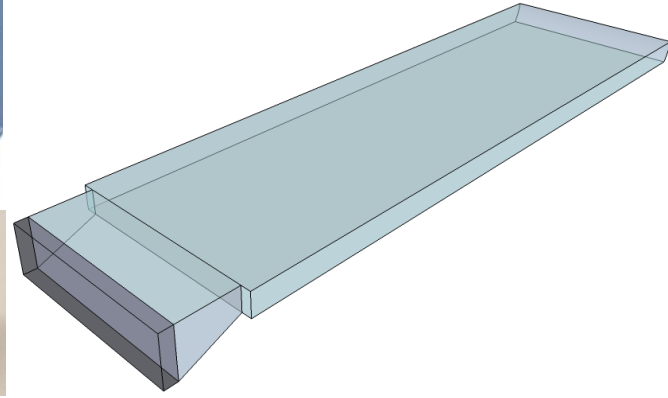
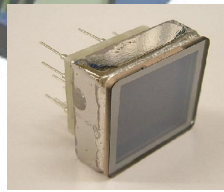
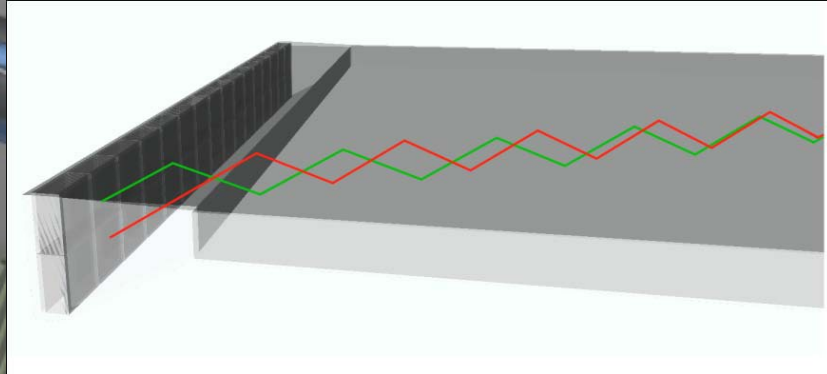
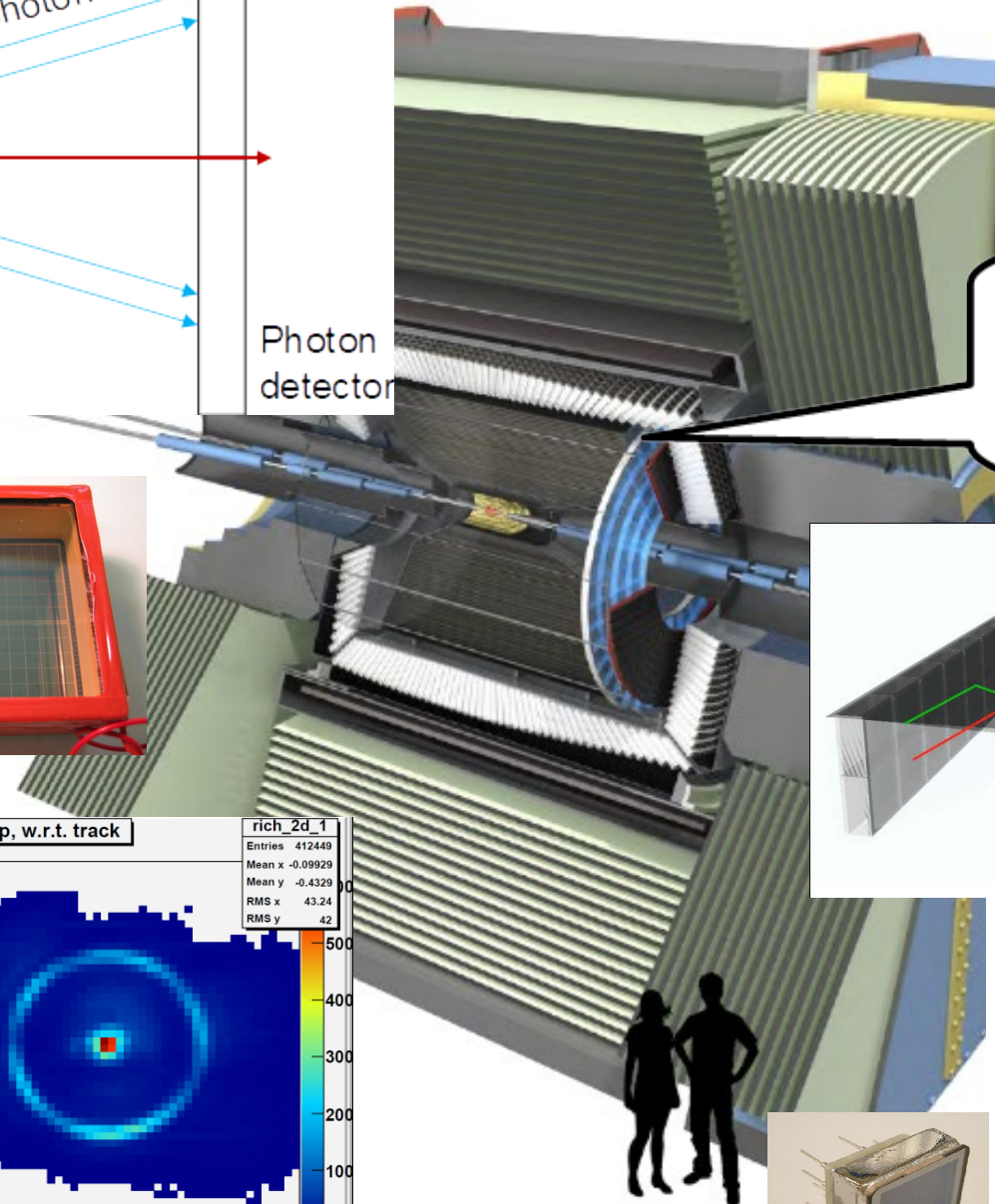
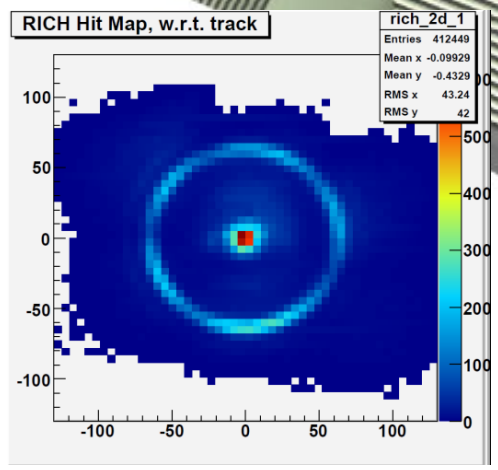
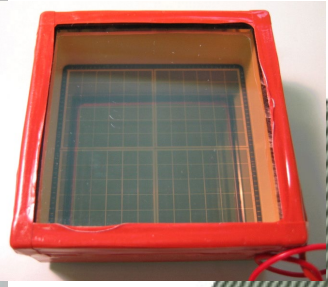
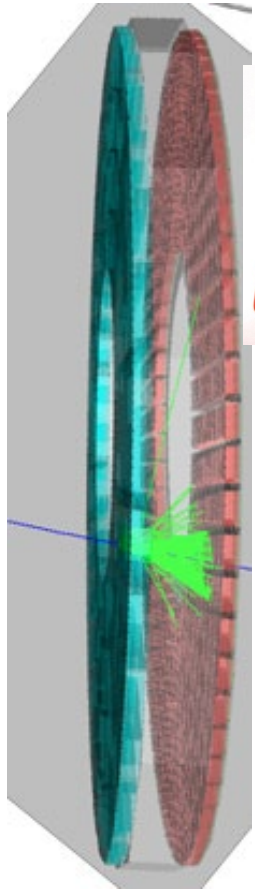


razvoj pljuska

Identifikacija delcev - Belle II

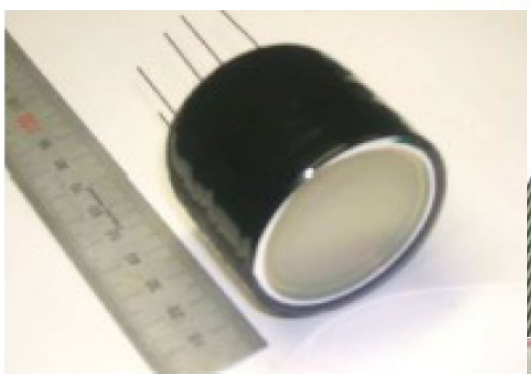
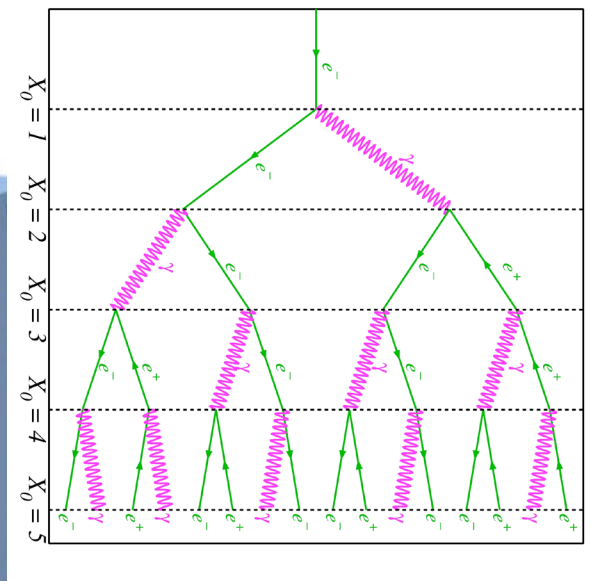


Identifikacija delcev:
detektor časa propagacije
detektor obročev Čerenkova



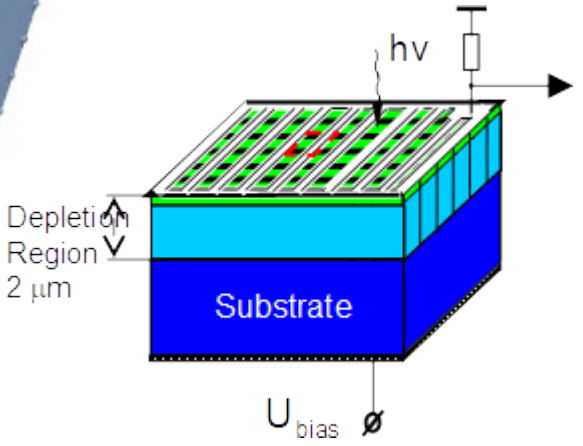
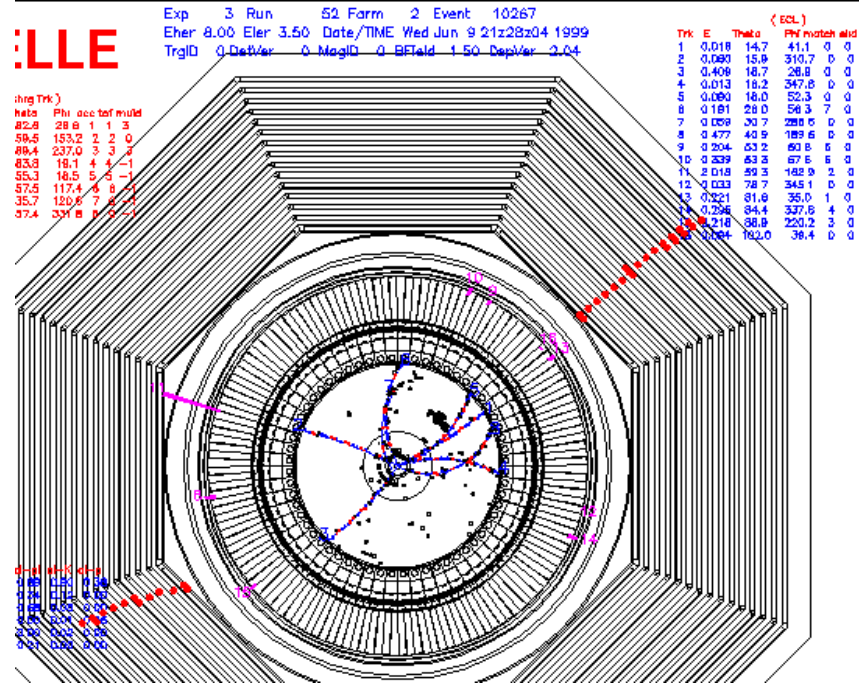
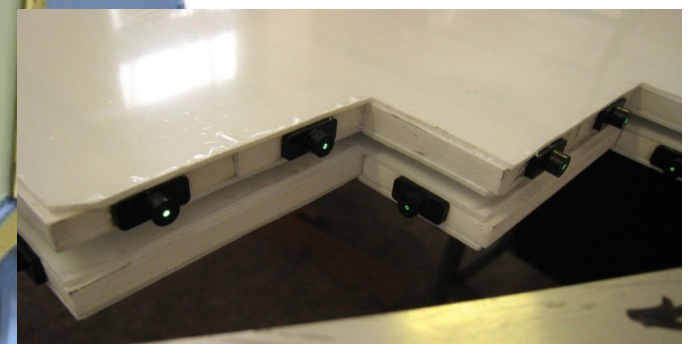
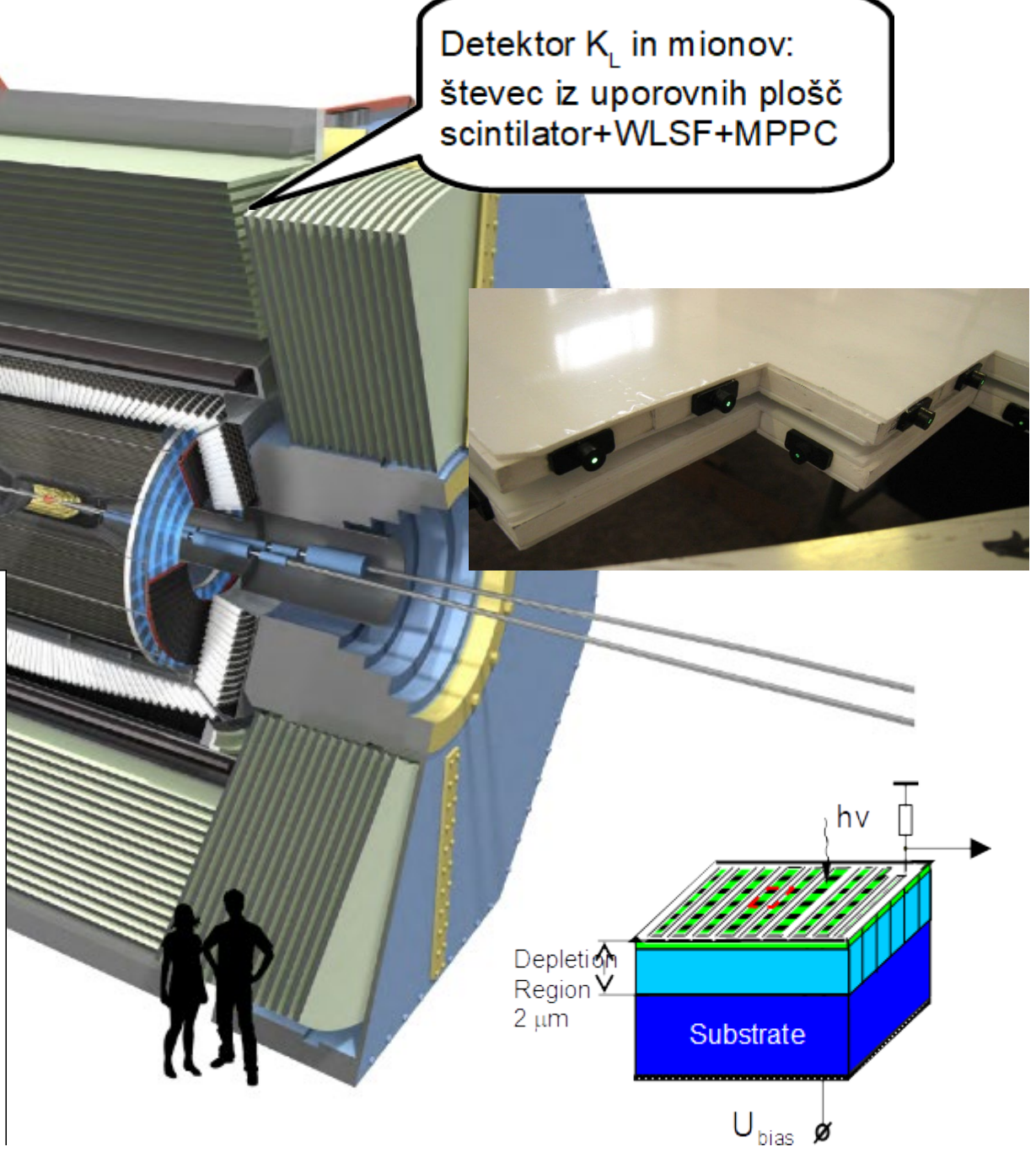
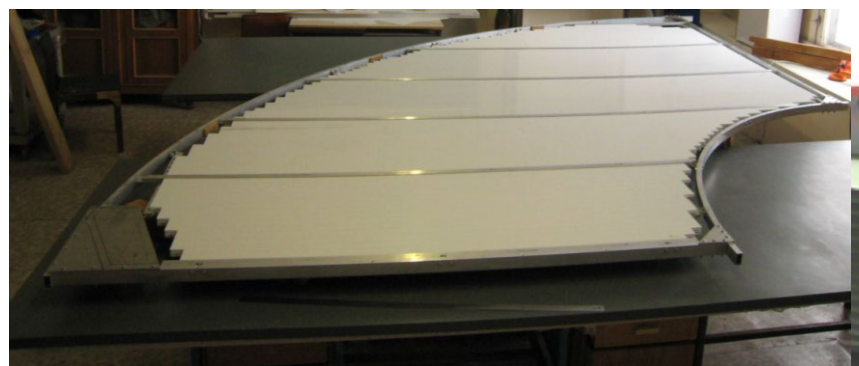
Elektromagnetni kalorimeter

EM kalorimeter:
CsI(Tl)+čisti CsI
vzorčenje signala



Detektor mionov μ in dolgoživih kaonov K_L

Detektor K_L in mionov:
števec iz uporovnih plošč
scintilator+WLSF+MPPC



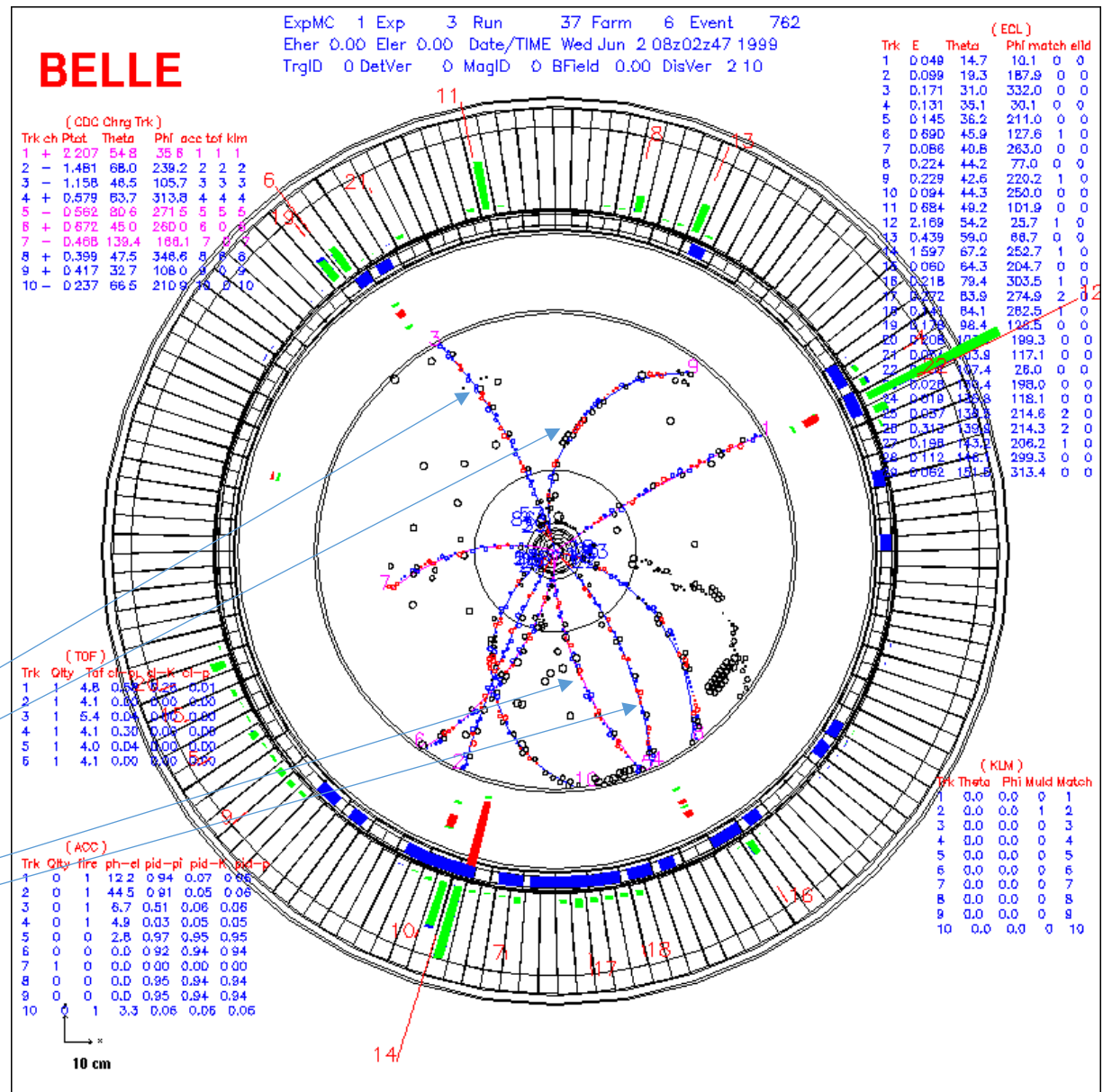
Rekonstrukcija dogodka

- sledi nabitih delcev v magnetnem polju (polmer kroga je merilo gibalne količine)
- koordinate točke izvora sledi
- dodatni podatki o identiteti delca

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

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

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



Več o analizi podatkov v naslednjem predavanju ...

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$

Super KEKB

BL

VIRGINIA TECH

Time (nanoseconds)

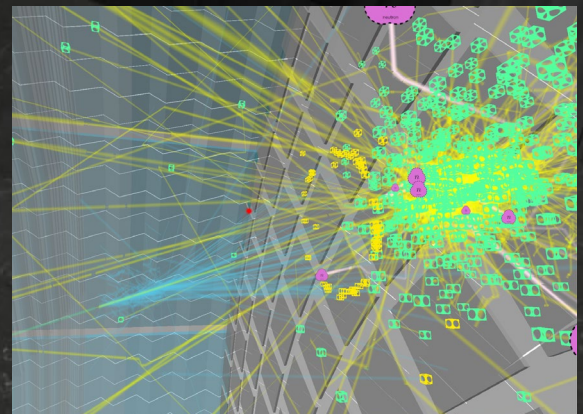
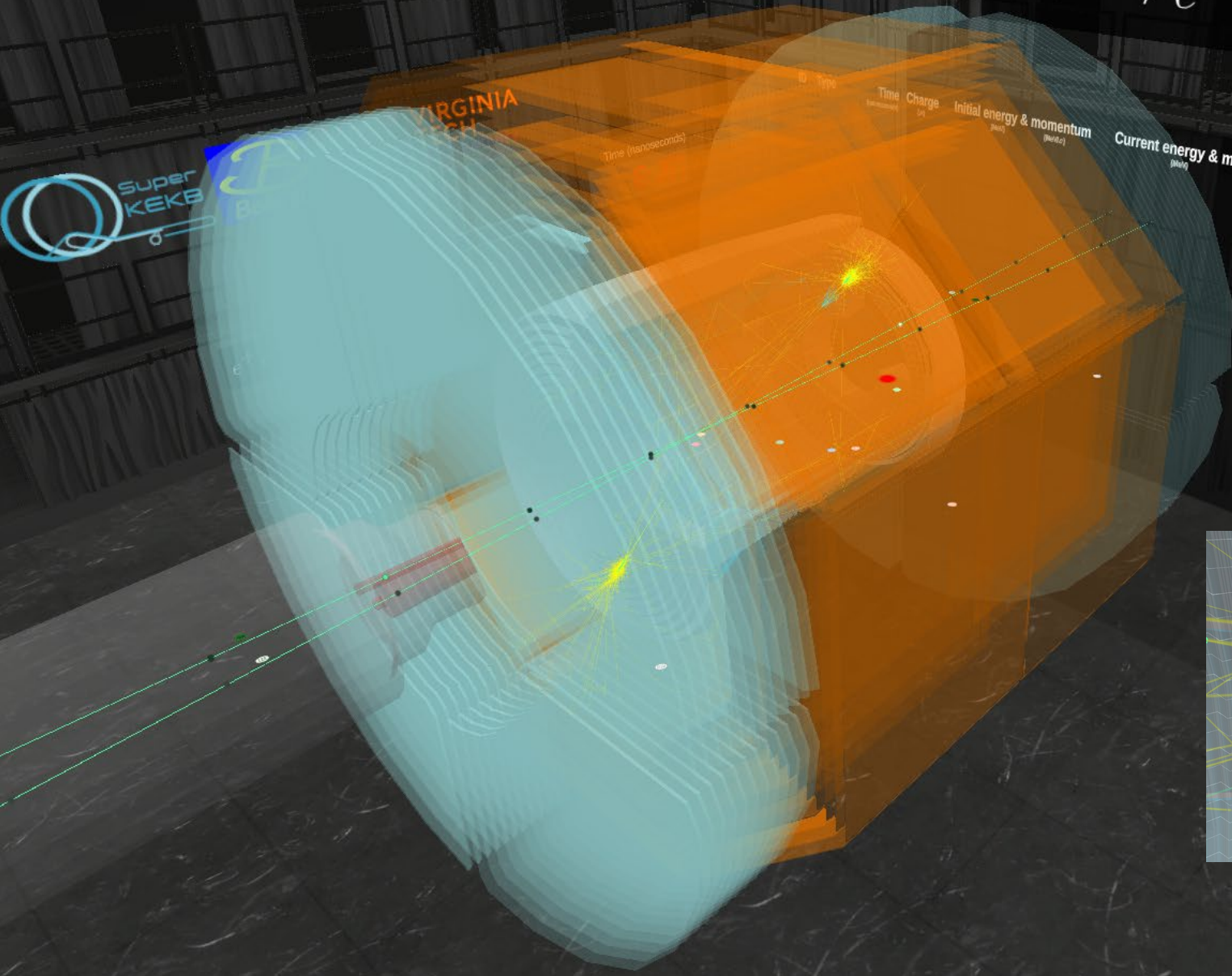
Time (picoseconds)

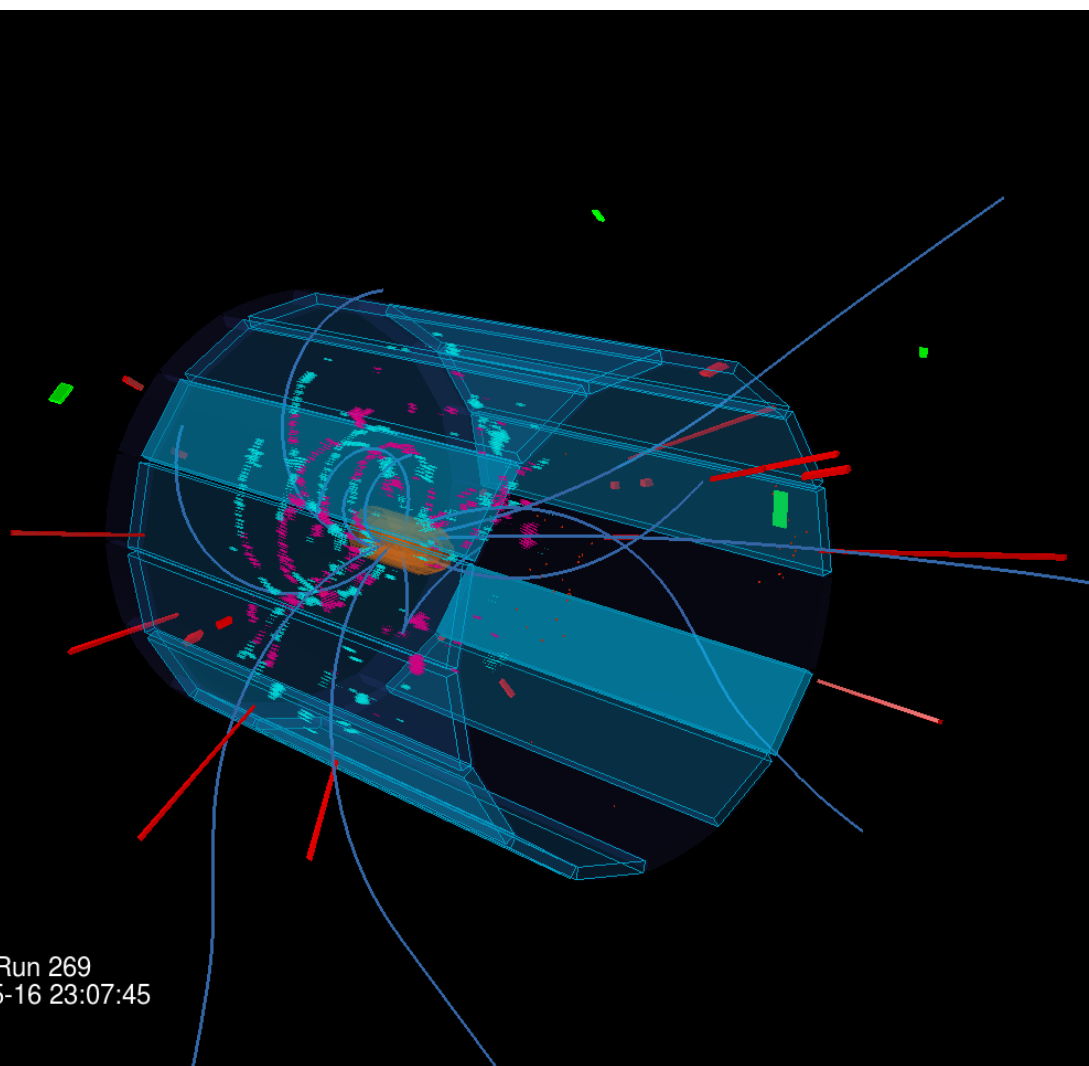
Charge (e)

Initial energy & momentum (MeV/c)

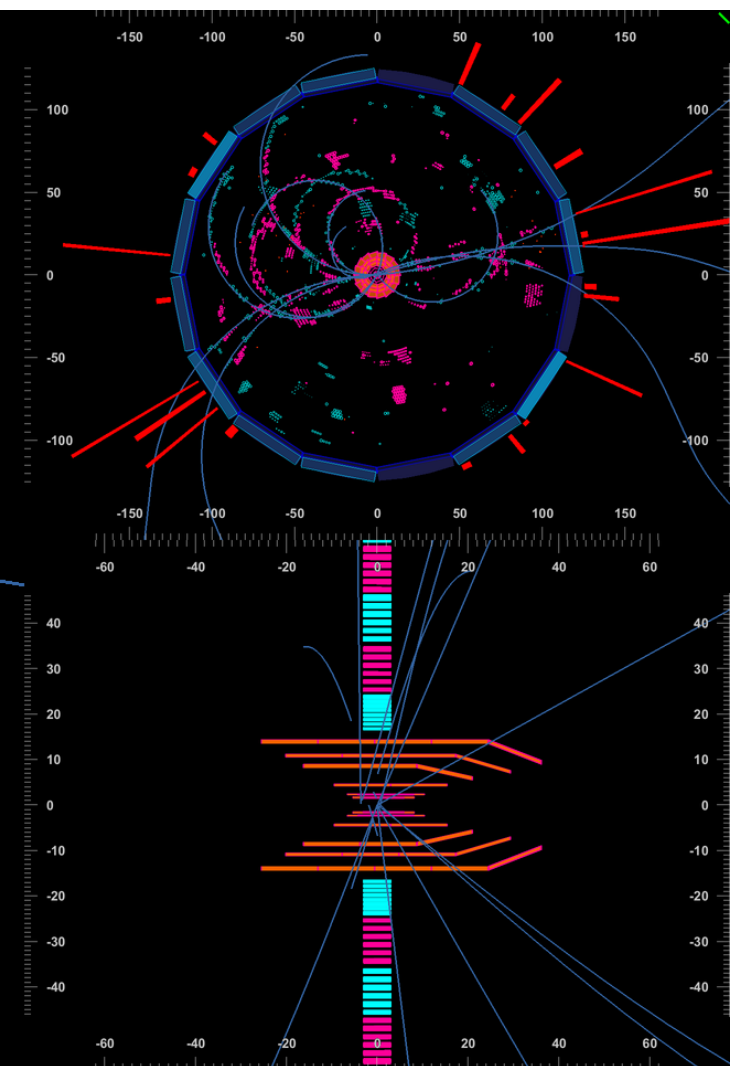
Current energy & momentum (MeV/c)

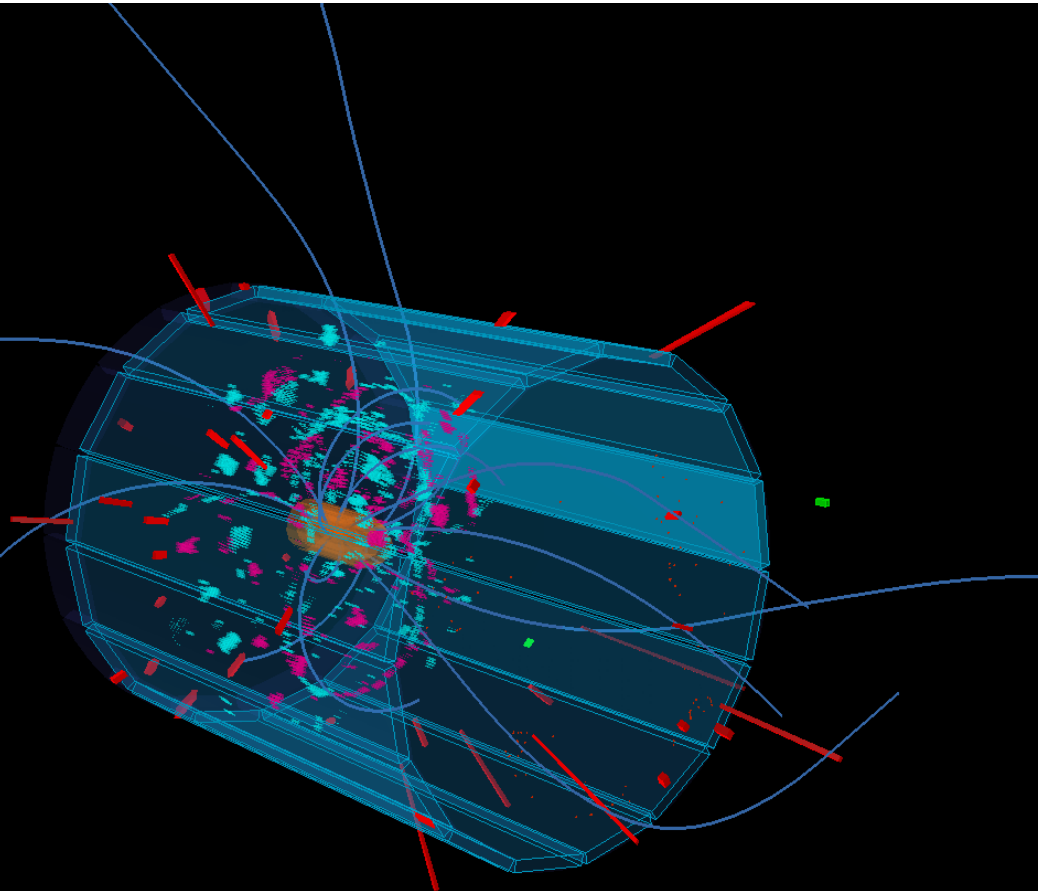
Final energy & momentum (MeV/c) Sum?



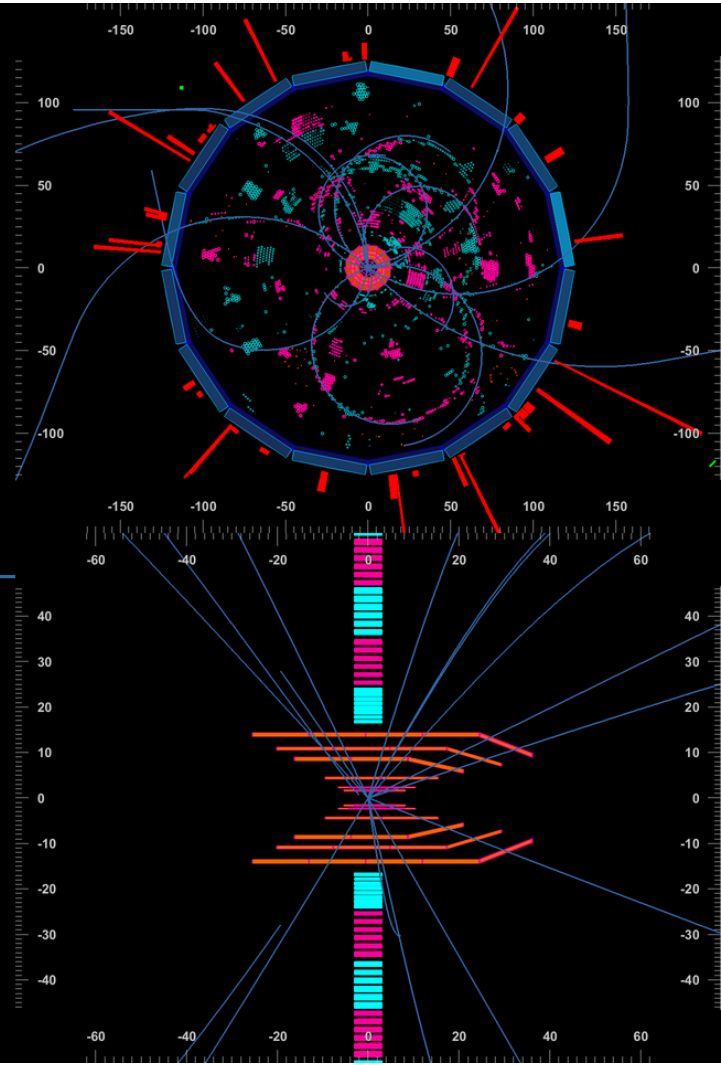


Run Type : physics
Run Number : Exp 26 Run 269
Generated at : 2022-05-16 23:07:45

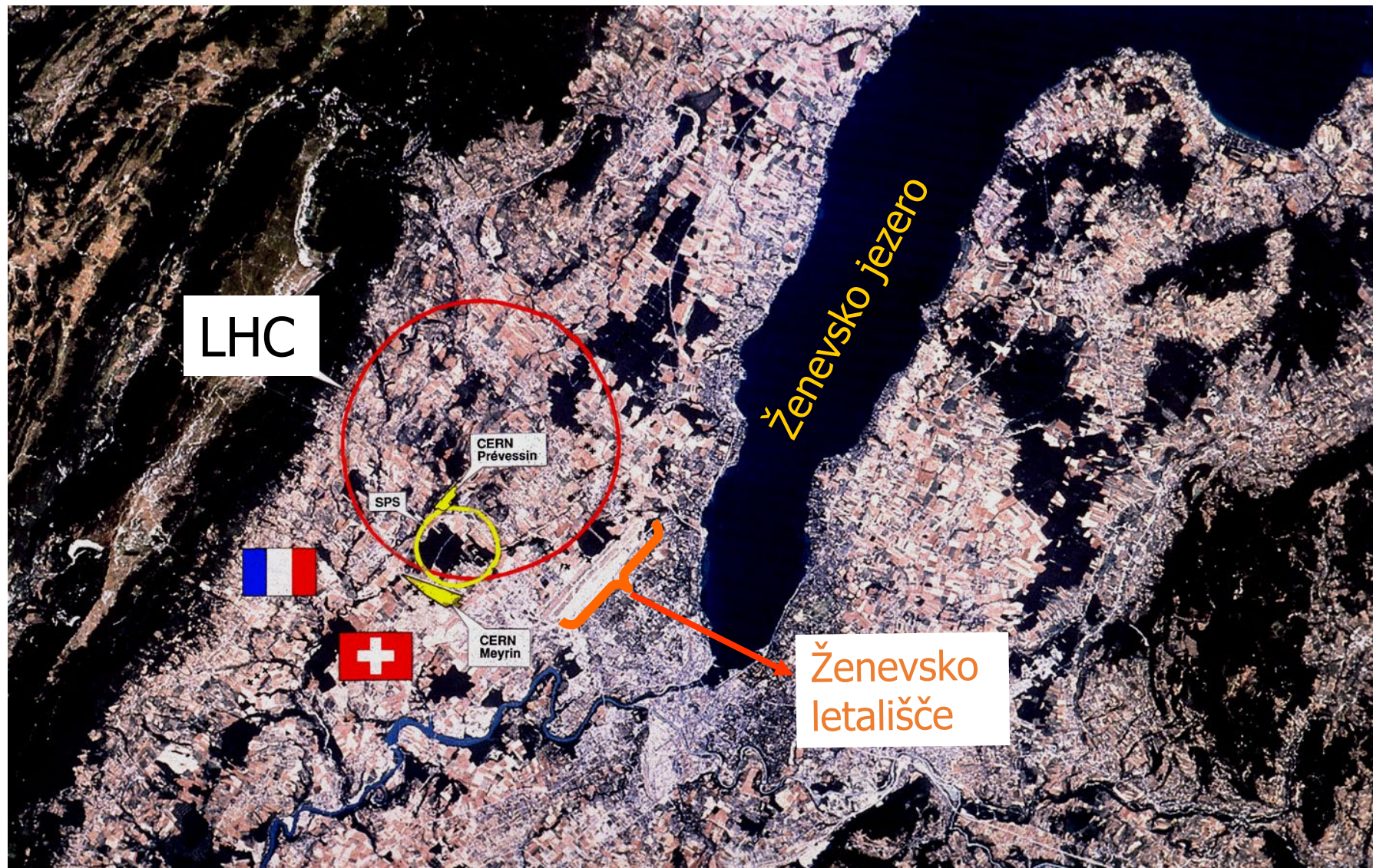




Run Type : physics
Run Number : Exp 26 Run 271
Generated at : 2022-05-17 00:05:50




Evropski laboratorij za fiziko delcev CERN

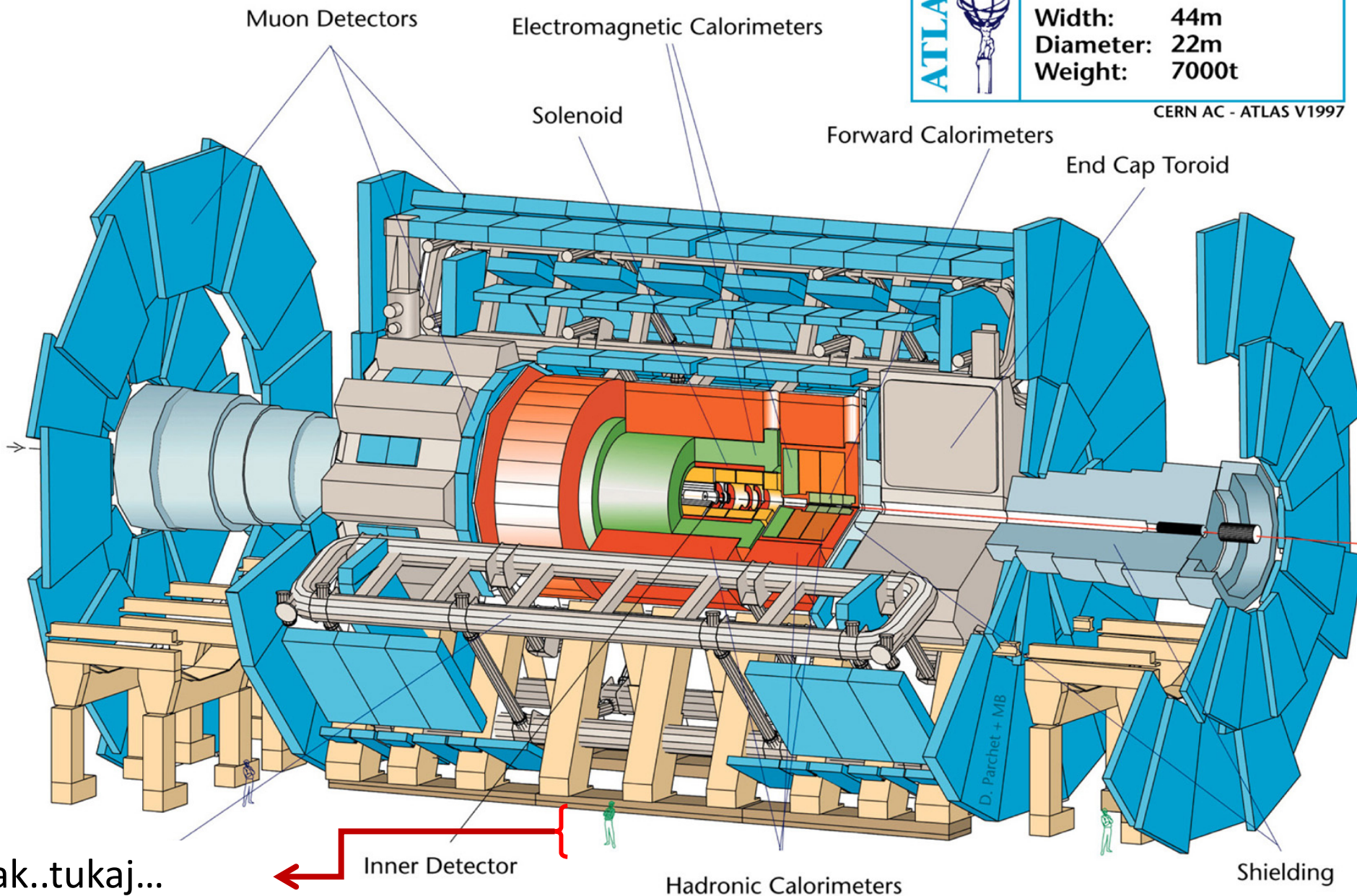


Int LHC = Large Hadron Collider

Detektor ATLAS ob LHC

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

CERN AC - ATLAS V1997



možak..tukaj...

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

