

# 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

Samo Korpar

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo,  
Univerza v Mariboru



Univerza v Mariboru  
Fakulteta za kemijo  
in kemijsko tehnologijo

in Jožef Stefan Institute, Ljubljana



Belle II Masterclass  
16. 3. 2022



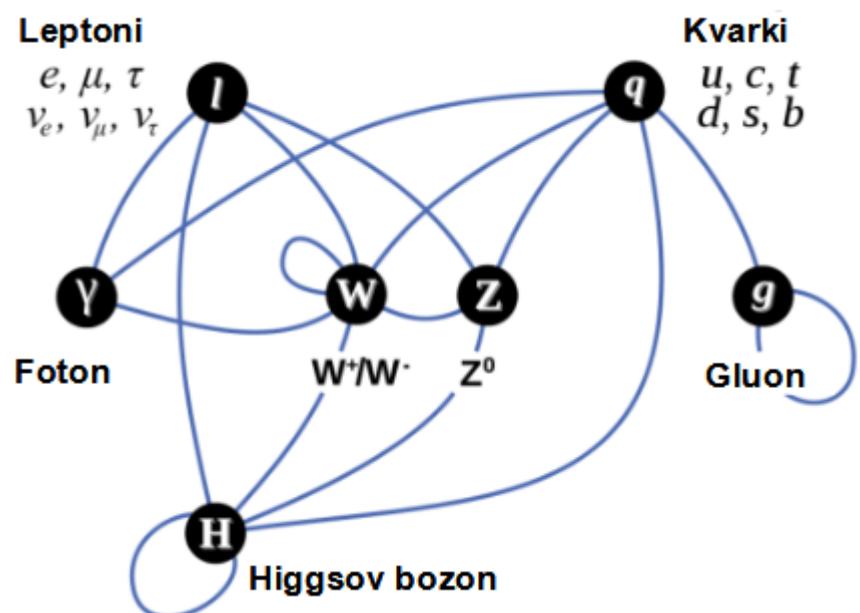
# Standardni model osnovnih delcev

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

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

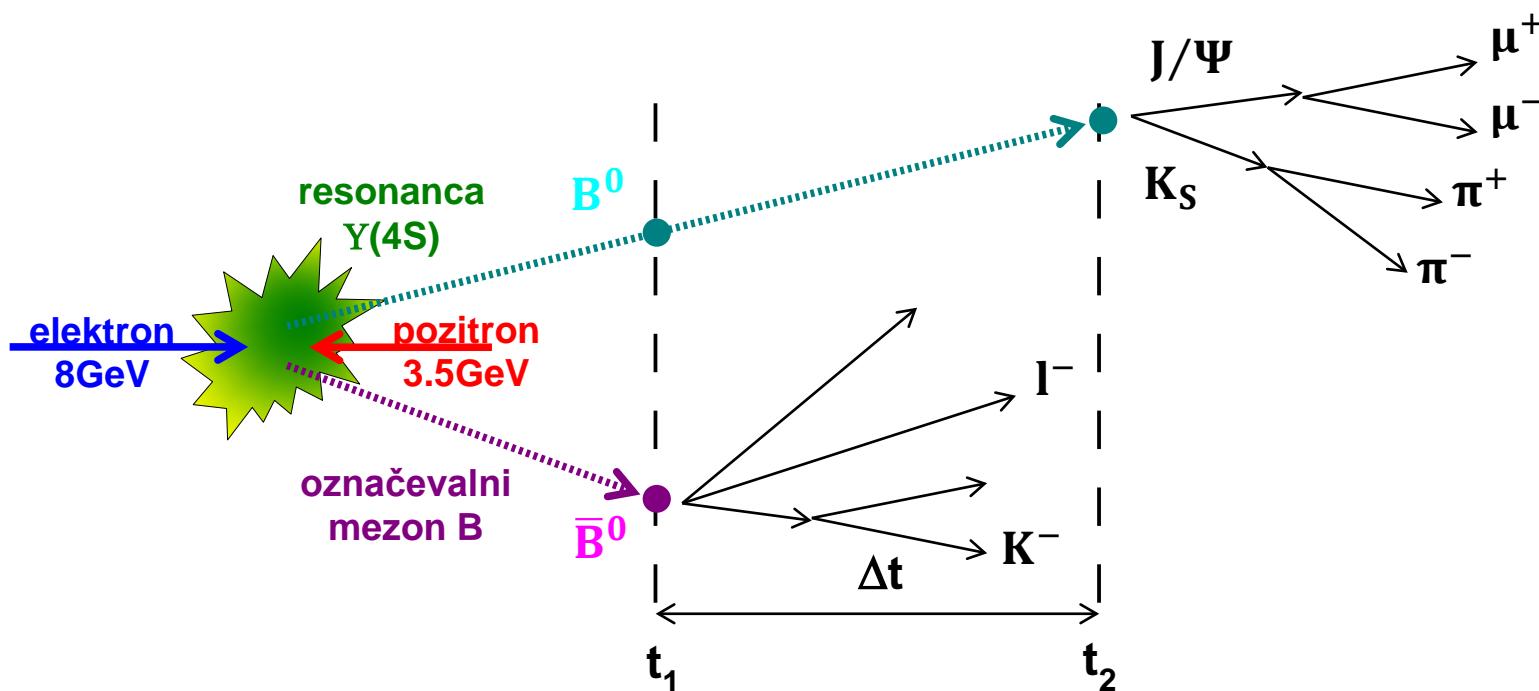
	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
naboj →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
ime →	U up	C charm	t top	γ photon
Kvarki	d down	s strange	b bottom	g gluon
<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV	
0	0	0	1	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$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

Umetnitveni bozoni



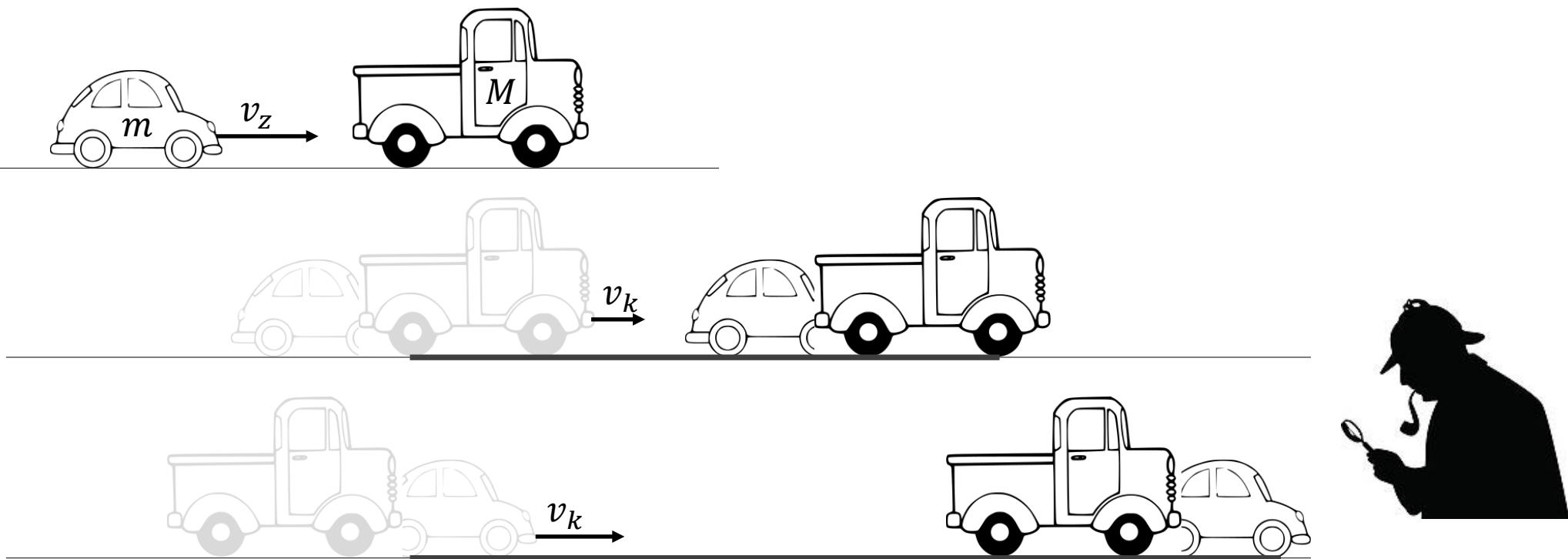
# Kaj opazujemo?

- 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, običajno trkamo delec in antidelec, saj je tako za tvorbo novih na voljo največ energije
- ker je večina nastalih delcev kratkoživa, jih lahko zaznamo le preko njihovih razpadnih produktov
- trki in razpadi sledijo enakim zakonitostim



# 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

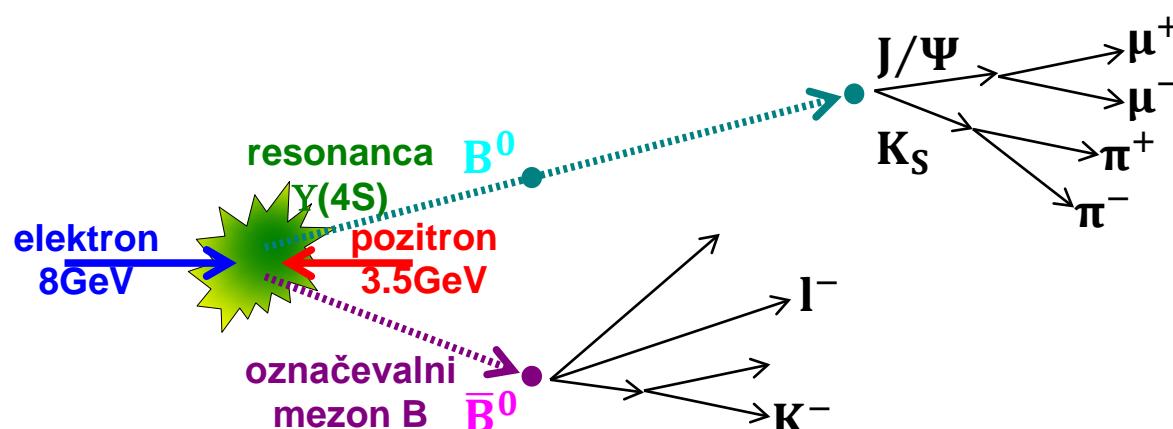
$$\vec{p} = m\gamma\vec{v} \quad E = m\gamma c_0^2 = E_0 + E_k$$

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

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

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	$\mu^-/\mu^+$	105,7	$2,2 \times 10^{-6}$	660
tau lepton	$\tau^-/\tau^+$	1777	$2,9 \times 10^{-13}$	$8,7 \times 10^{-5}$
nevtralni pion	$\pi^0$	135	$8,4 \times 10^{-17}$	$2,5 \times 10^{-8}$
nabiti pion	$\pi^+/\pi^-$	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 $J/\Psi$	$J/\Psi$	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

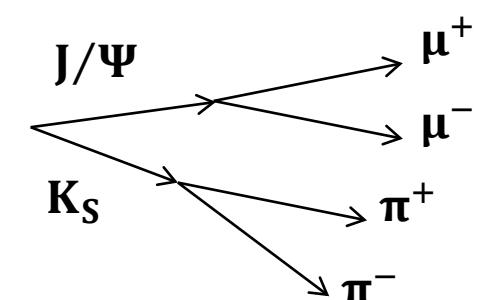
$$\gamma = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c_0^2}\right)}}$$

- za opazovanje delcev moramo le te najprej ustvariti (pospeševalnik, trkalnik) in nato opazujemo njihove razpade (spektrometer)
- le redki delci živijo dovolj dolgo, da pustijo sledi v detektorjih: nabiti  $e, \mu, \pi, K, p$  in nevtralni  $\gamma, K_L, n$
- 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

$$Mc_0^2 = \sqrt{\left(\sum_i E_i\right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i\right)^2 c_0^2}$$

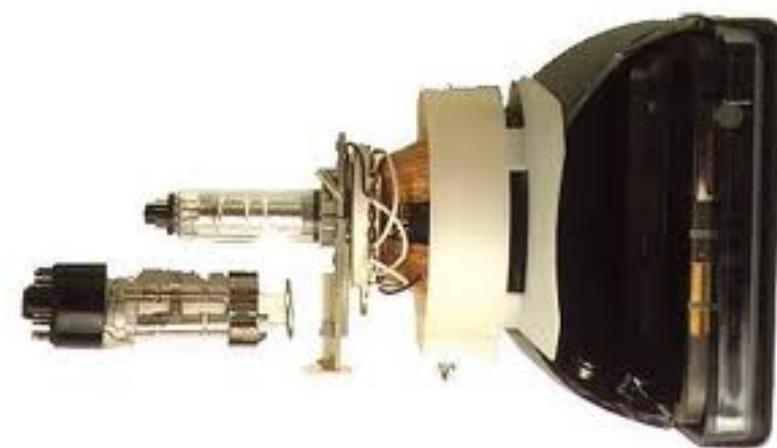
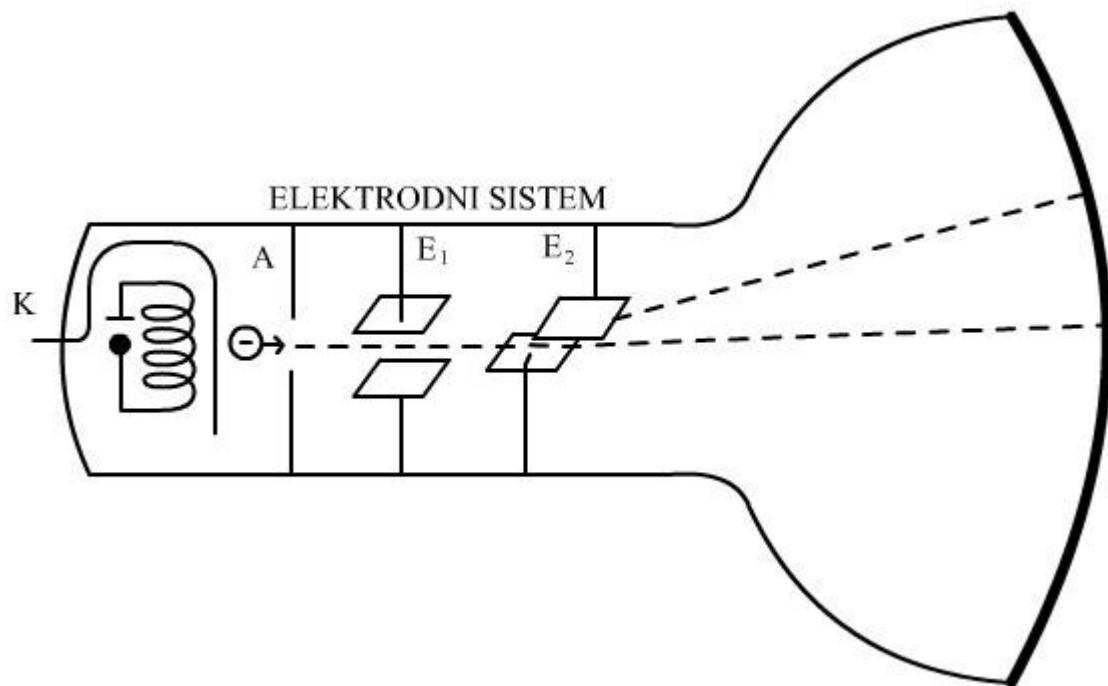
$$E^2 = M^2 c_0^4 + p^2 c_0^2$$

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



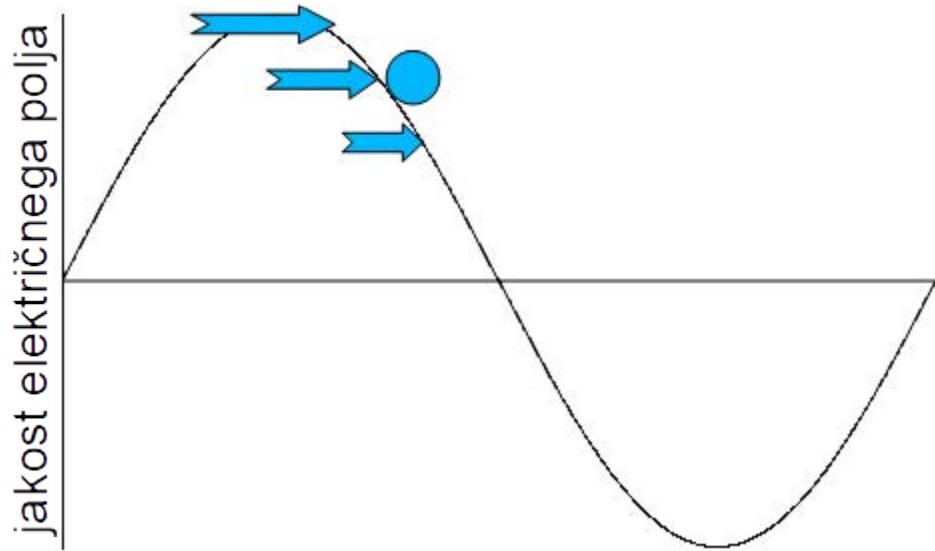
# „Domači“ pospeševalnik

- 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 sila  $\vec{F} = q \vec{E}$ , magnetna sila  $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$  (pravokotna na smer gibanja – hitrost)



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

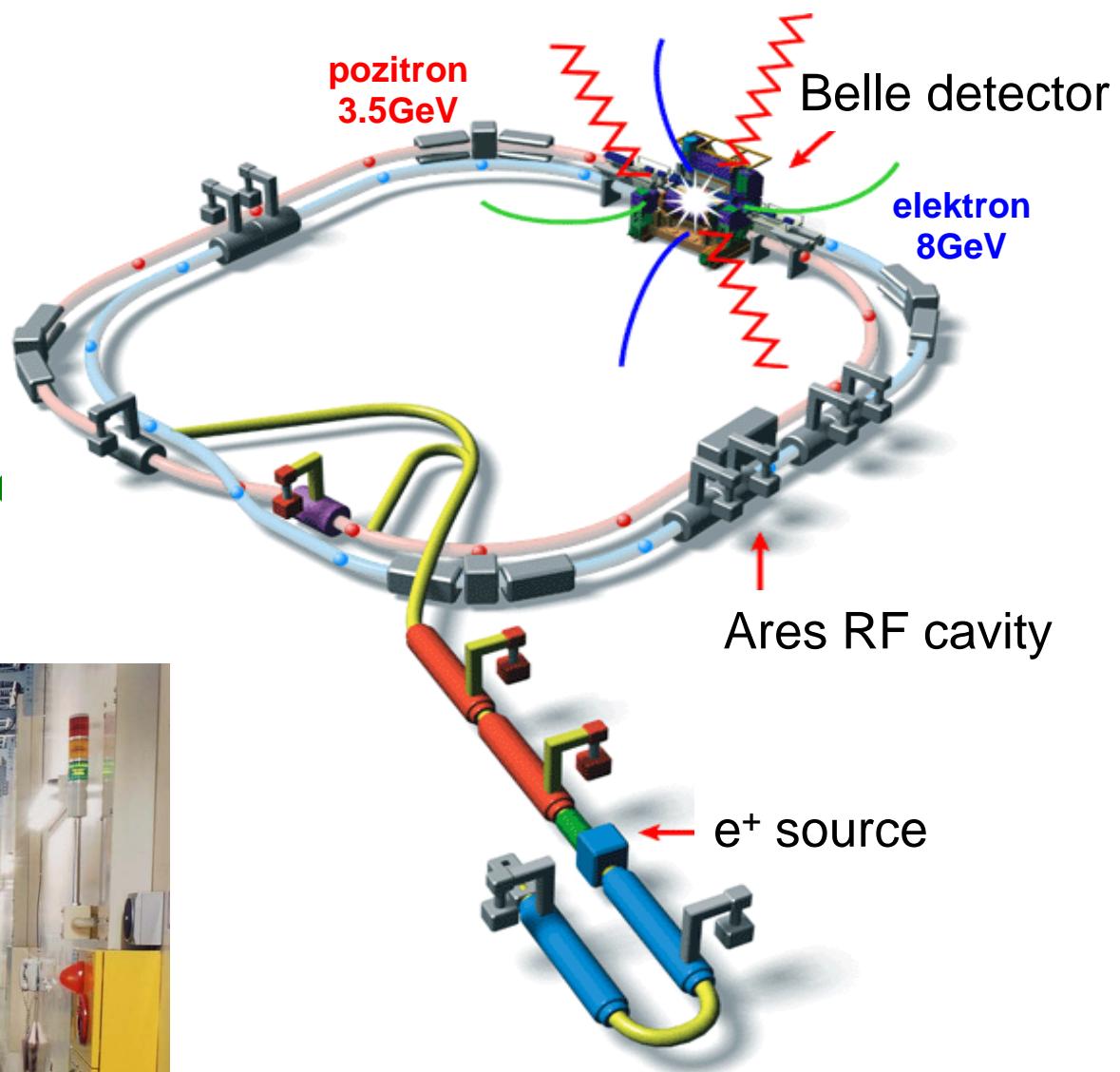
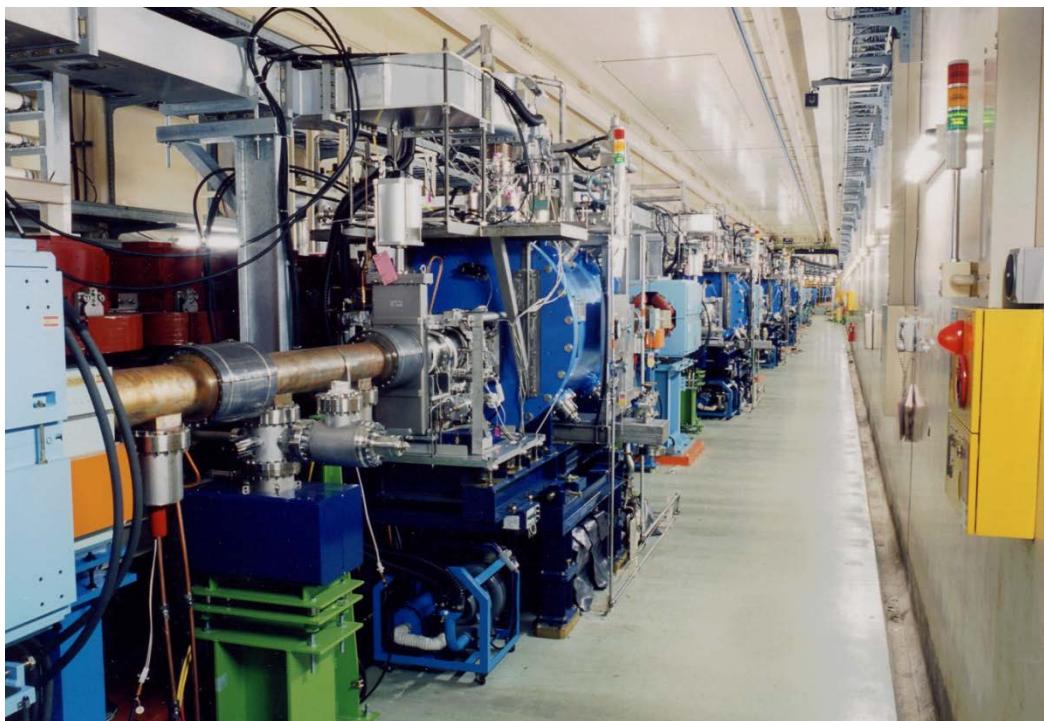
- Pospeševanje z elektromagnetskim valovanjem (tipična frekvenc  $\sim 500$  MHz – mobilni telefoni delujejo pri 900 MHz, 1800 MHz ...)



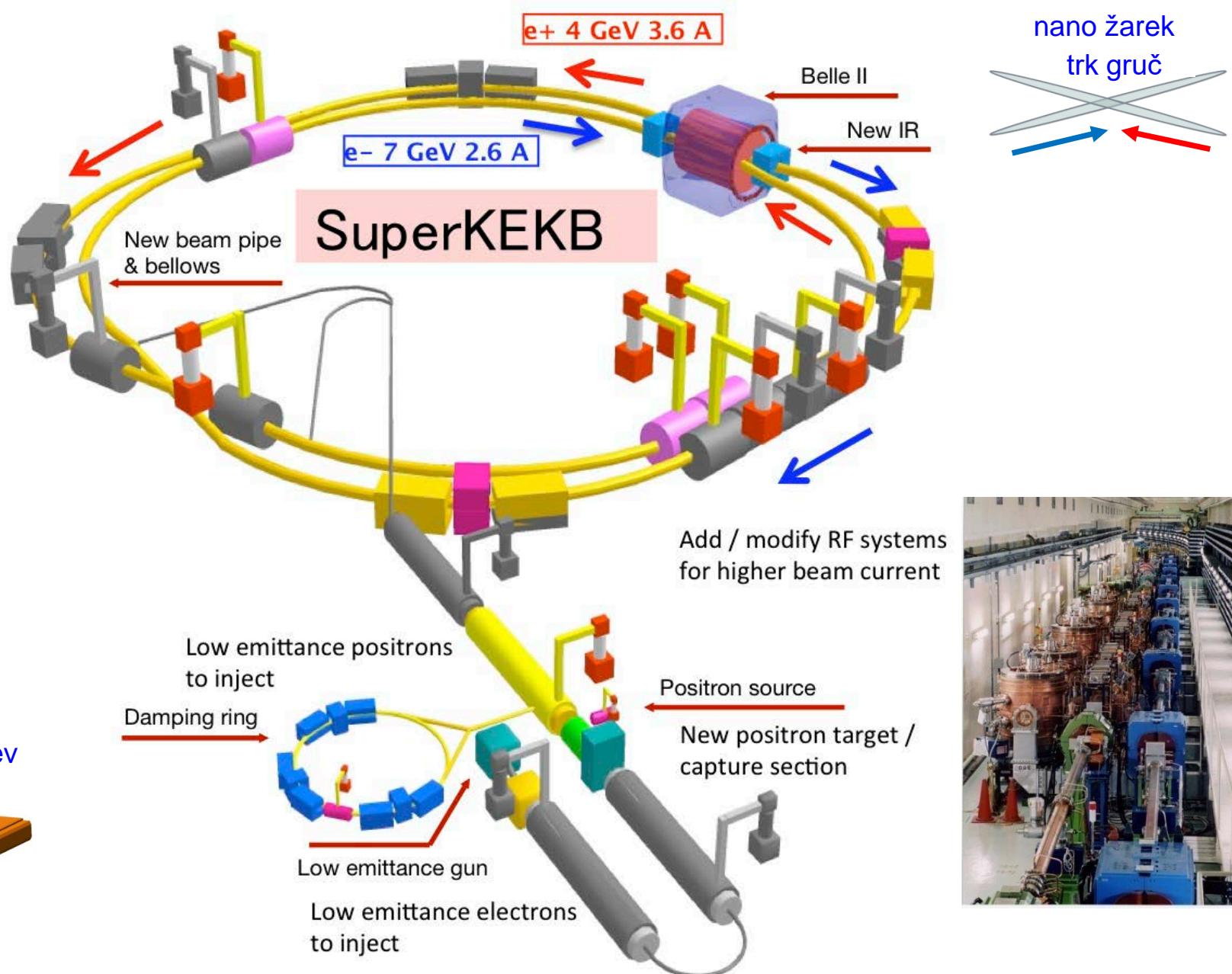
... podobno deskanju na valovih

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

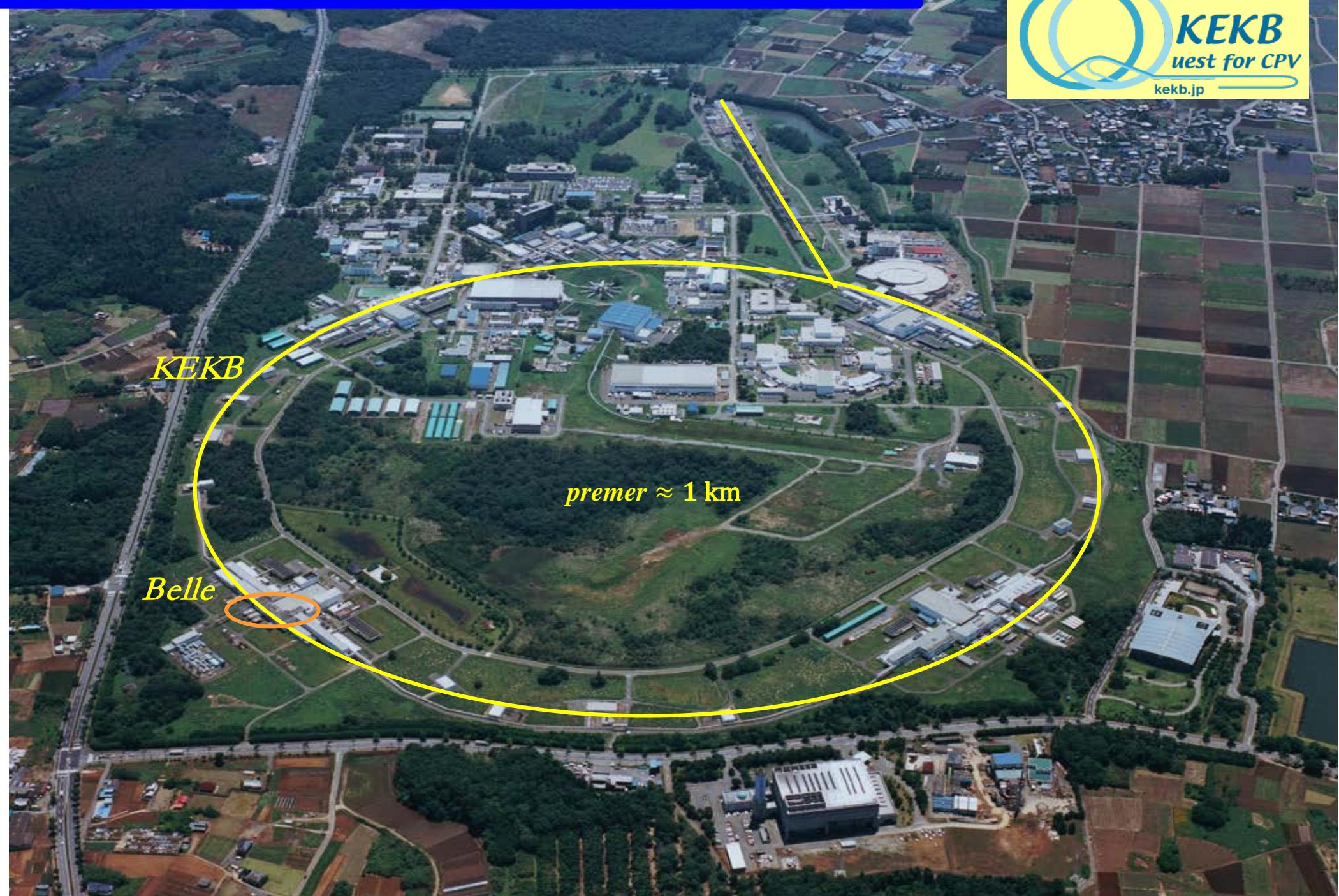
- pospeševanje elektronov in pozitronov v trkalniku KEKB
- pogostost trkov elektronov in pozitronov je odvisno od pogostosti srečanj gruč in goste elektronov/pozitronov v gruči



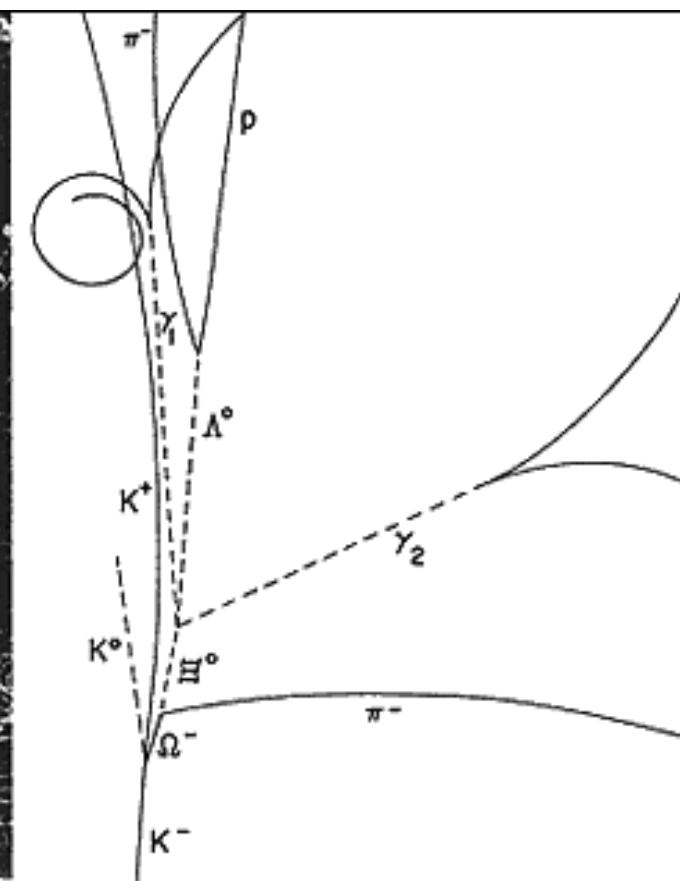
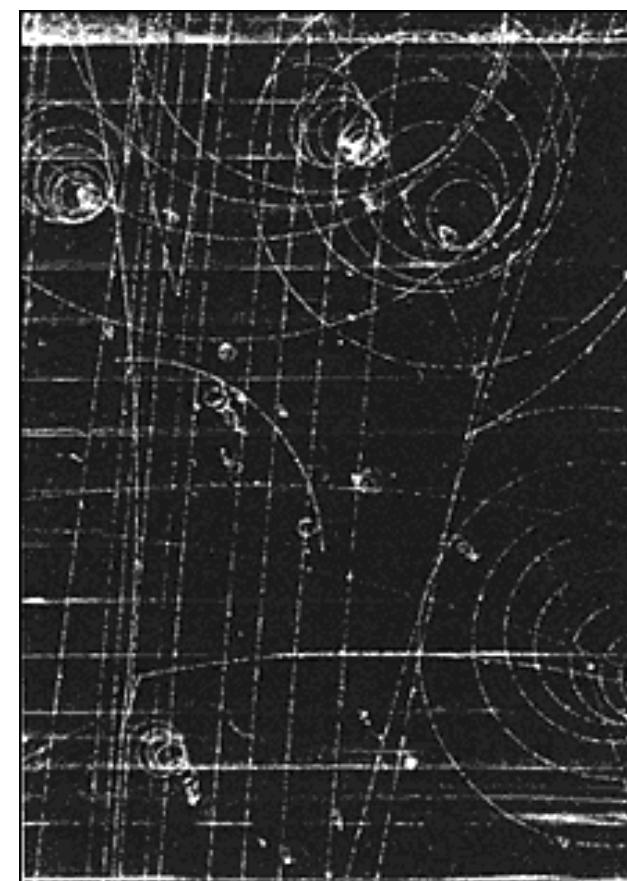
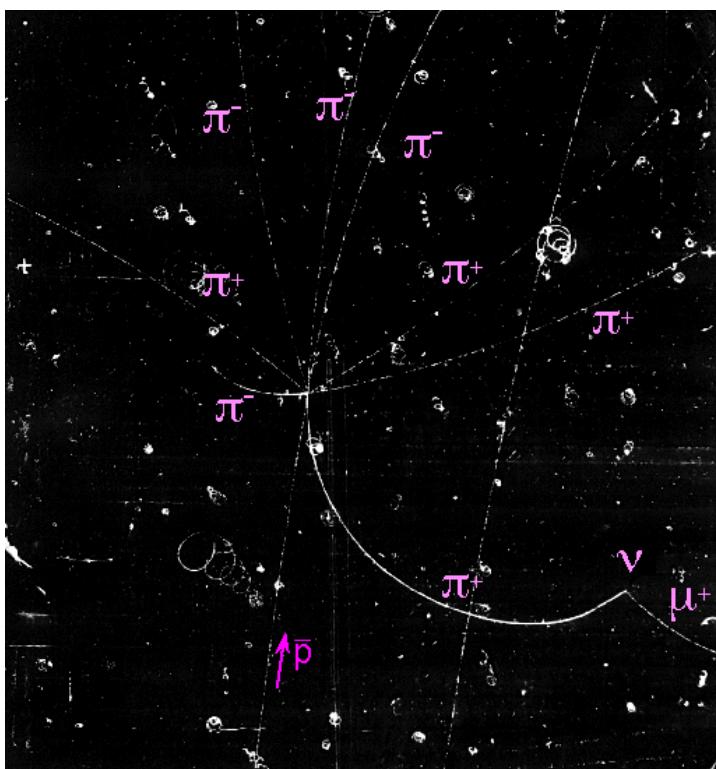
- elementi pospeševalnika v tunelu



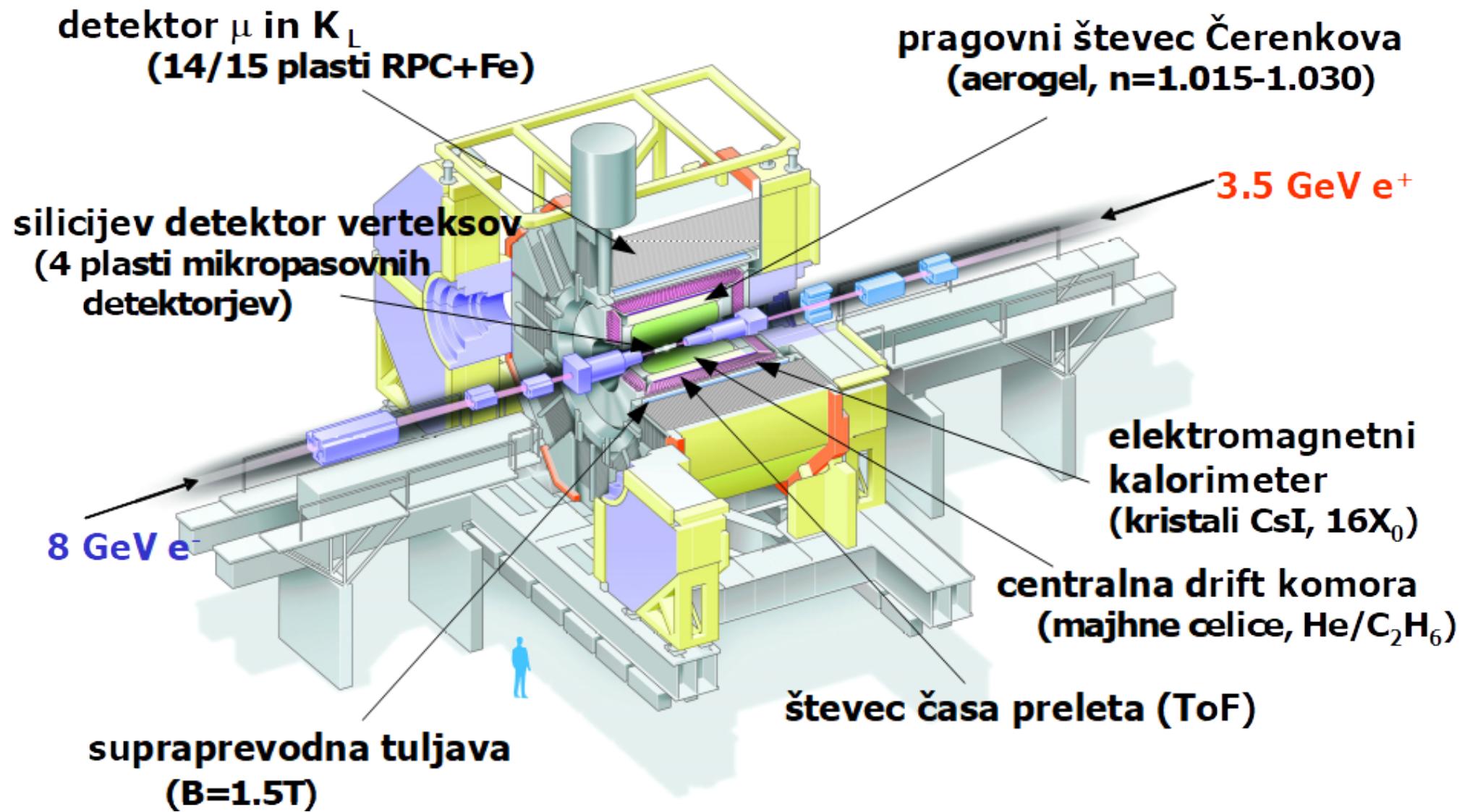
# Kompleks pospeševalnikov v Cukubi, Japonska



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

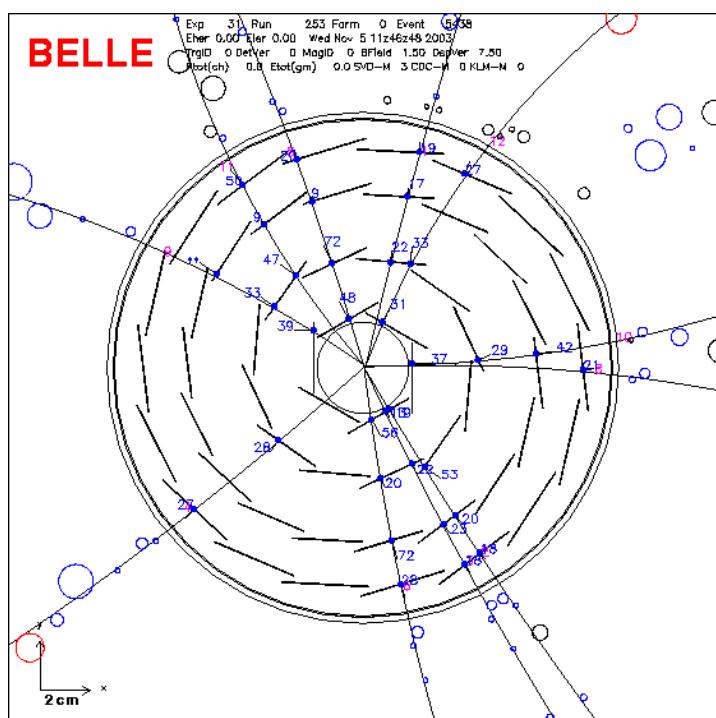
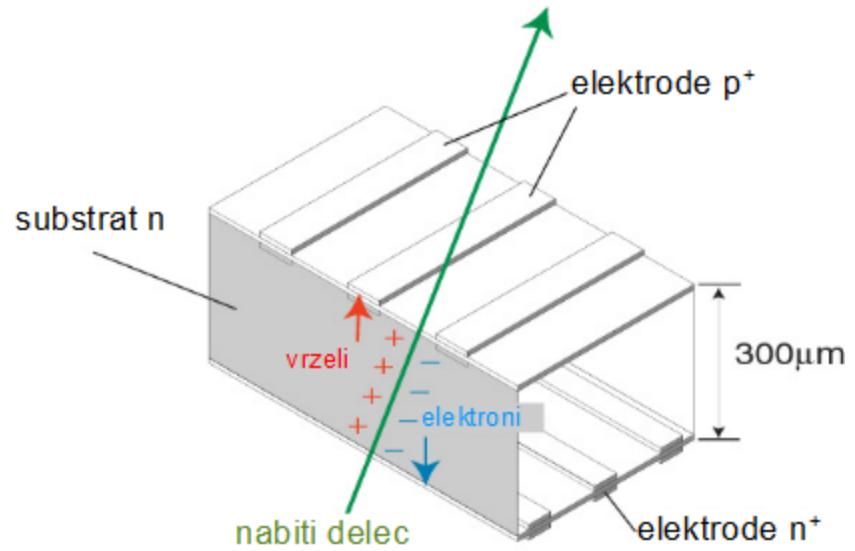


$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow p = qBr$$



# 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:  **$10\mu\text{m}$  !**



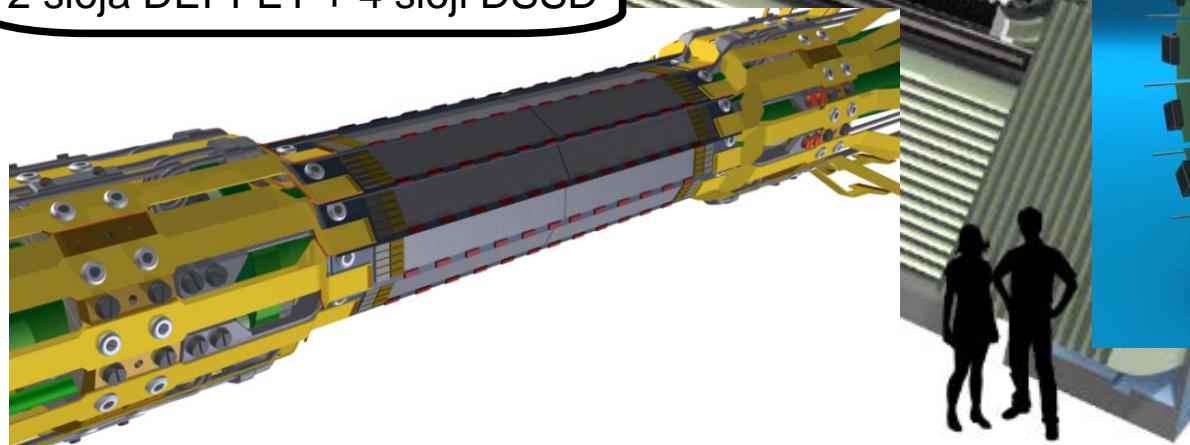
# Detektor verteksov - Belle II

Določanje točke interakcije z visoko natančnostjo

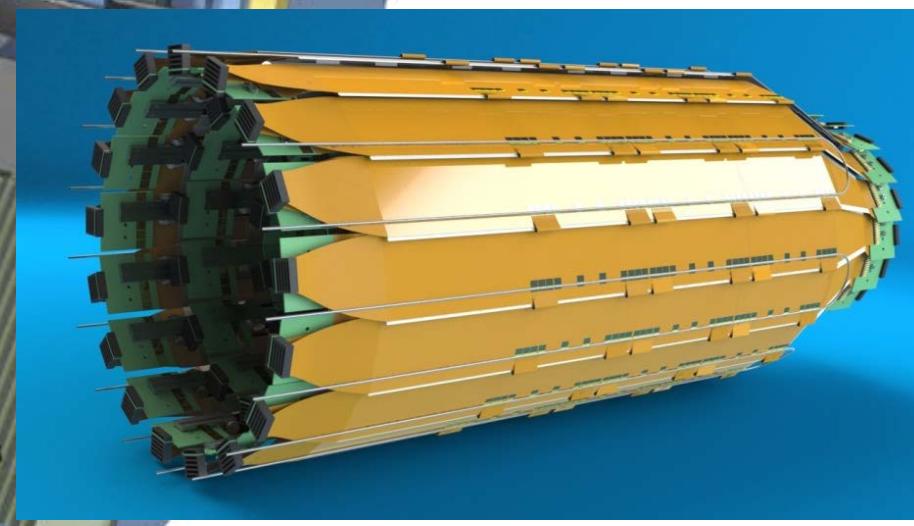
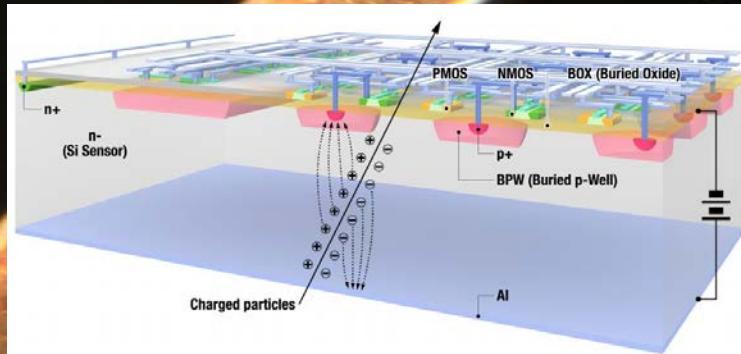


Berilijeva žarkovna cev  
premer 2 cm

Detektor verteksov  
2 sloja DEPFET + 4 sloji DSSD

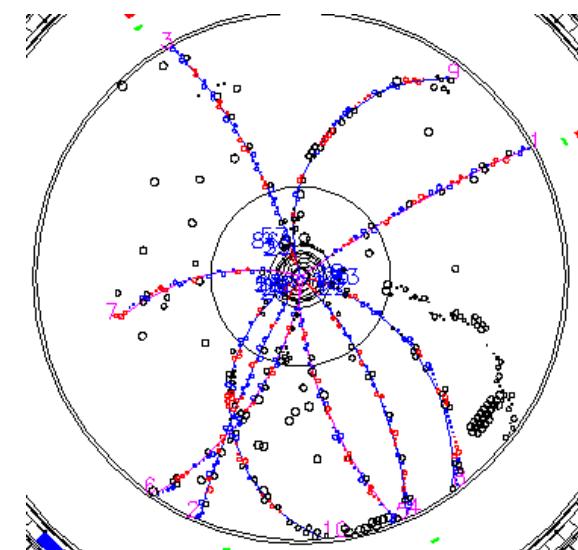
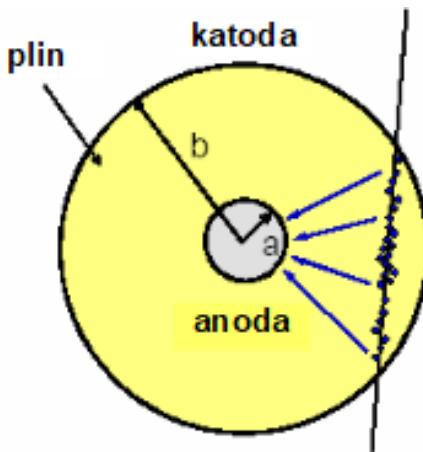


Las – debelina 100 mikronov

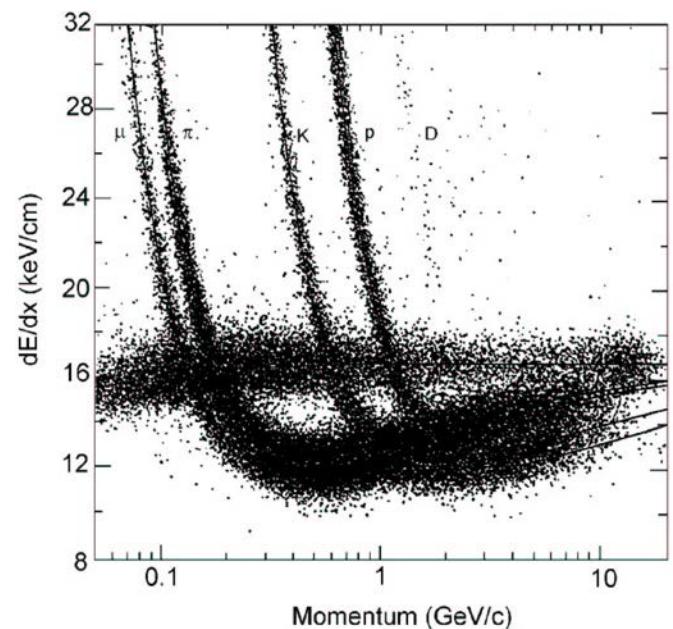
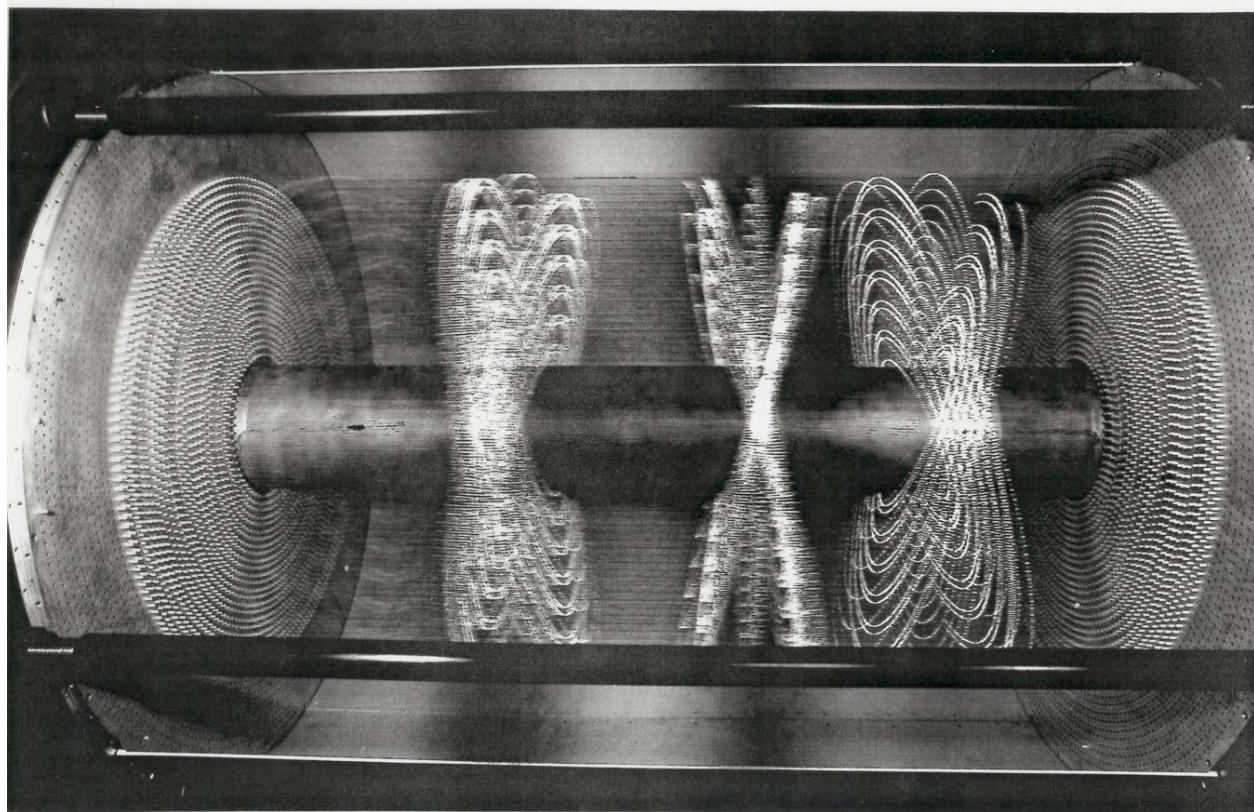


# Potovalna komora - Belle

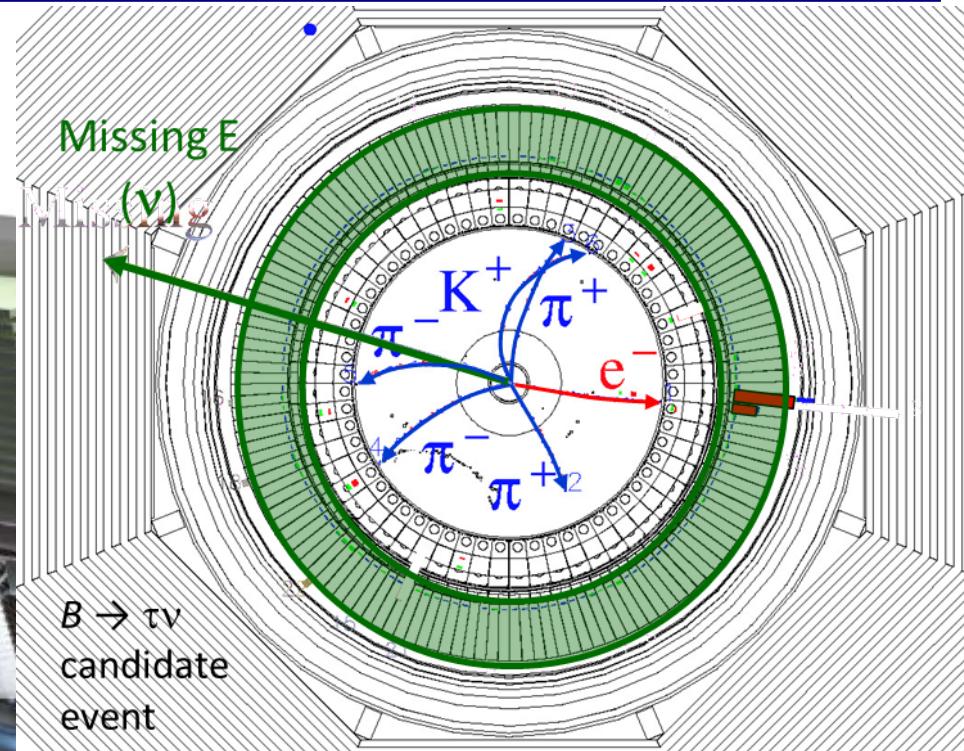
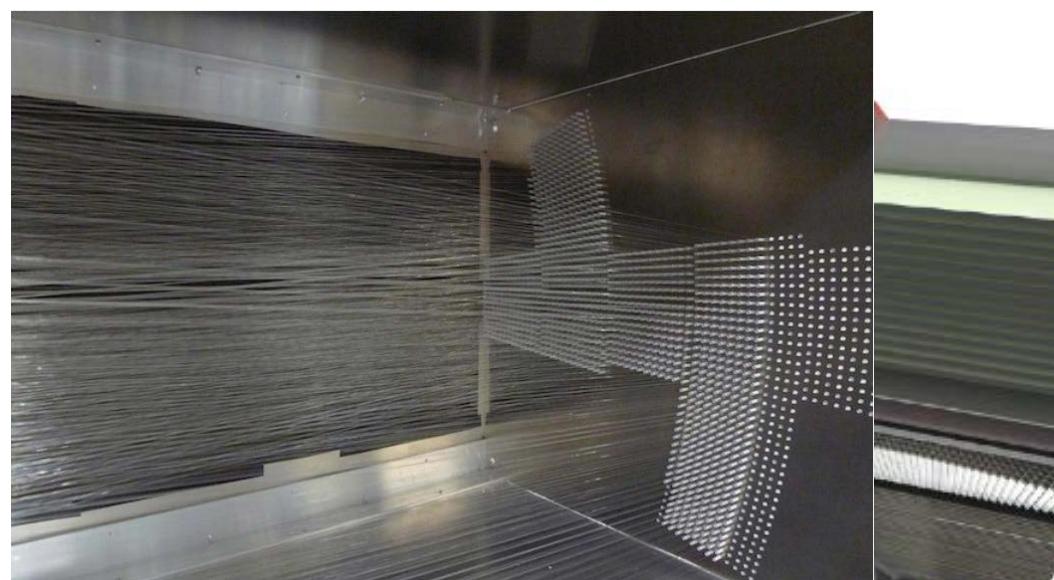
- meritev točke preleta nabitega delca – sledenje delcu v magnetnem polju, kjer iz ukrivljenosti določimo gibalno količino
- meritev specifične ionizacije (= velikost signala) – identifikacija nabitih delcev



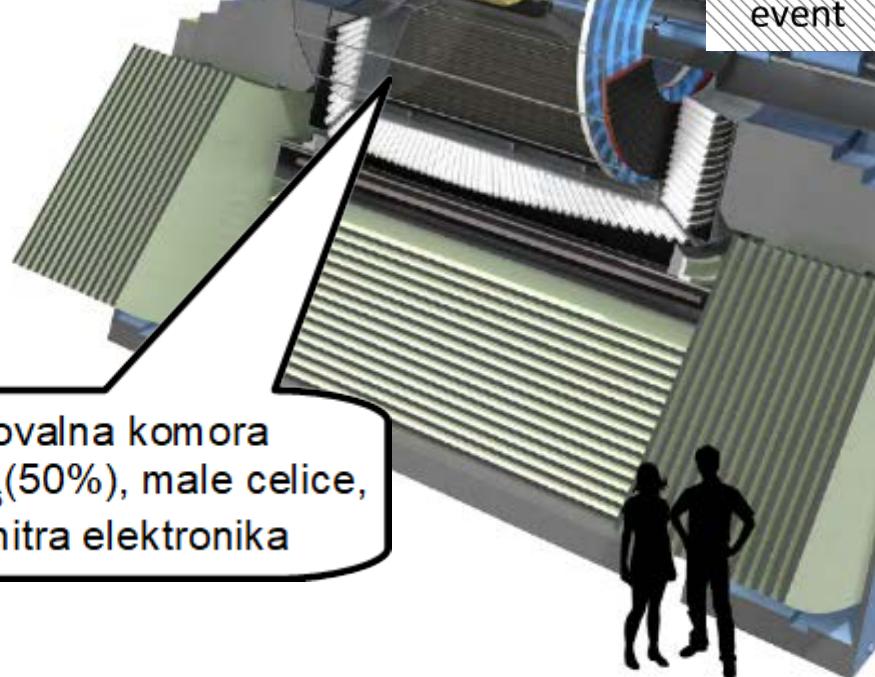
$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow p = qBr$$



# Potovalna komora - Belle II



$B \rightarrow \tau\nu$   
candidate  
event



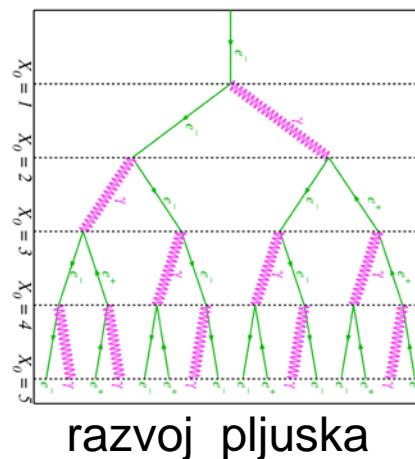
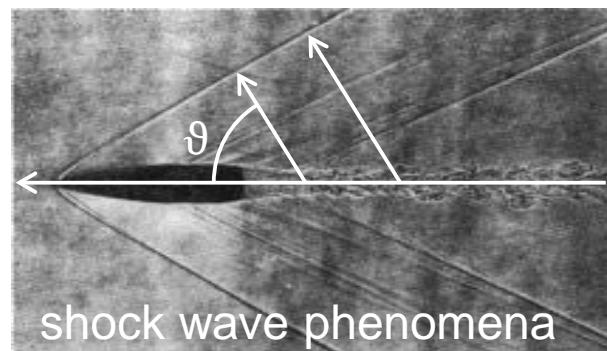
Centralna potovalna komora  
 $\text{He}(50\%):\text{C}_2\text{H}_6(50\%)$ , male celice,  
dolga ročica, hitra elektronika



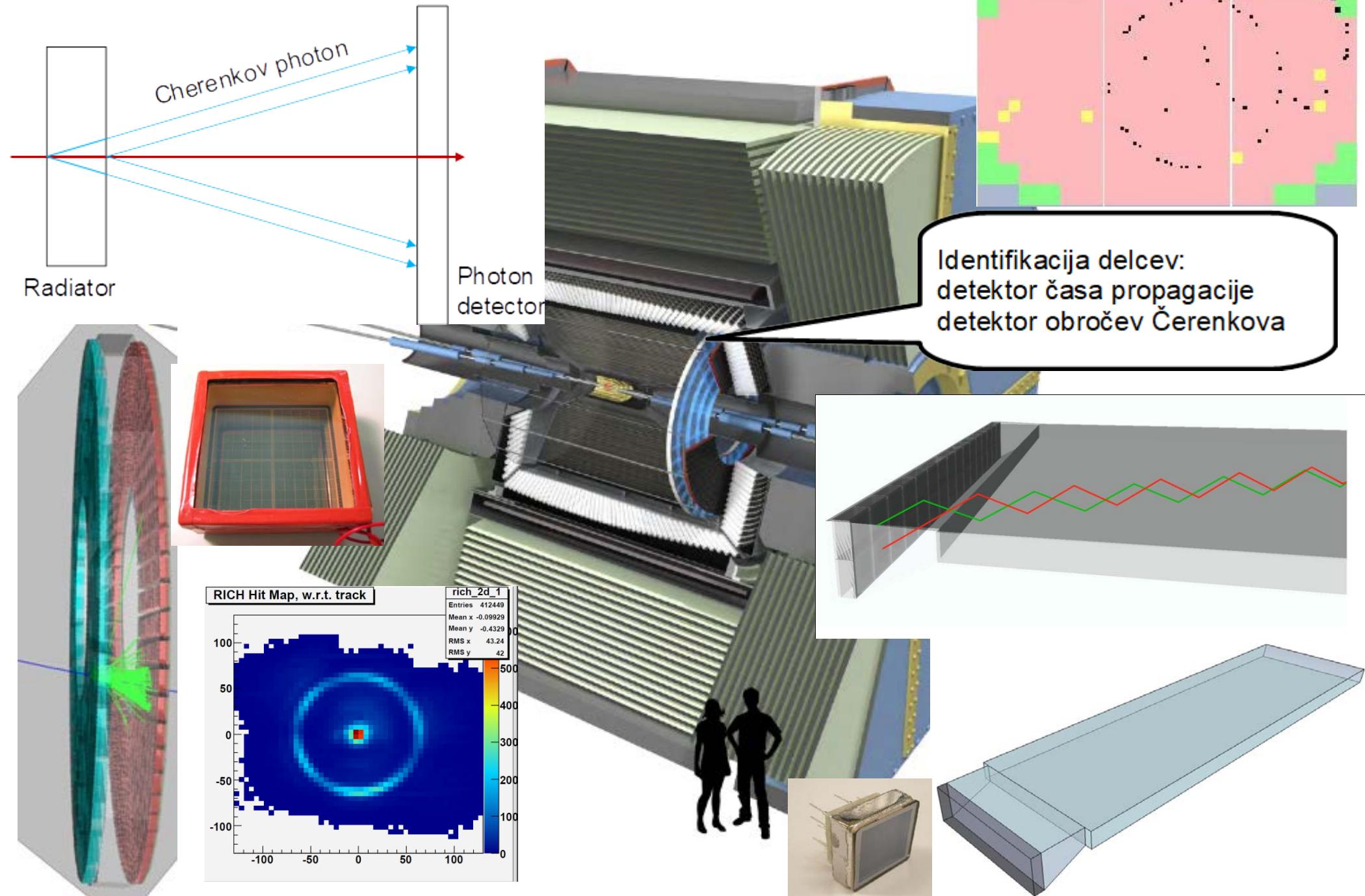
$$mc^2 = \sqrt{E^2 - p^2 c^2} \quad mc^2 = pc \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1}$$

- 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  $\gamma$ :- elektromagnetni kalorimeter

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

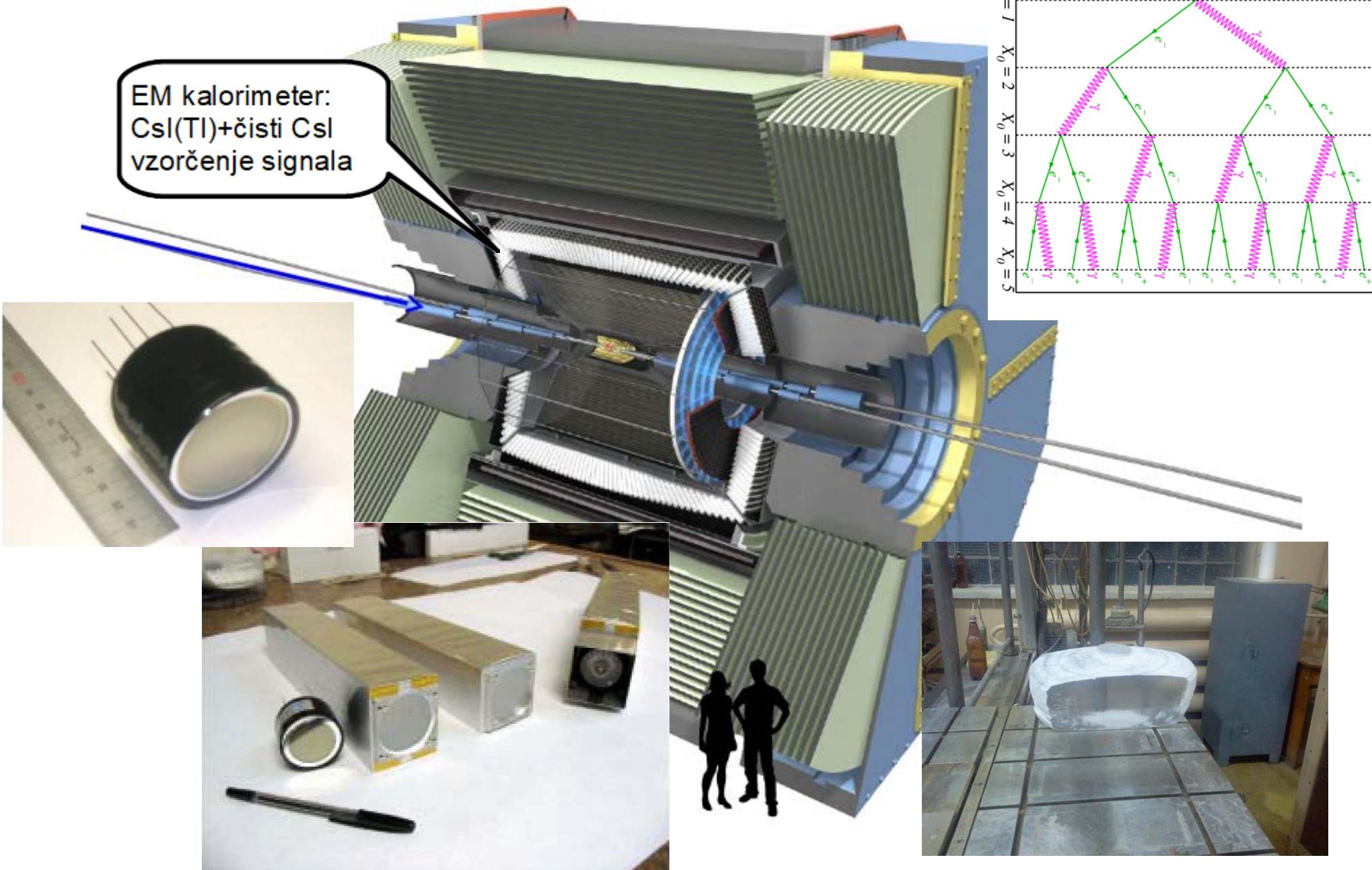


# Identifikacija delcev – Belle II

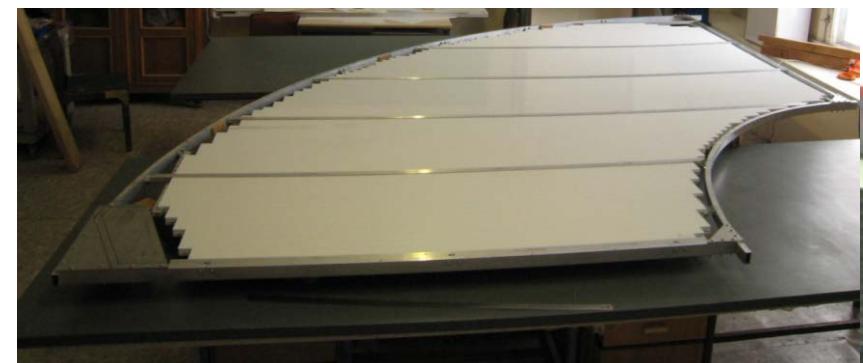


# Elektromagnetni kalorimeter

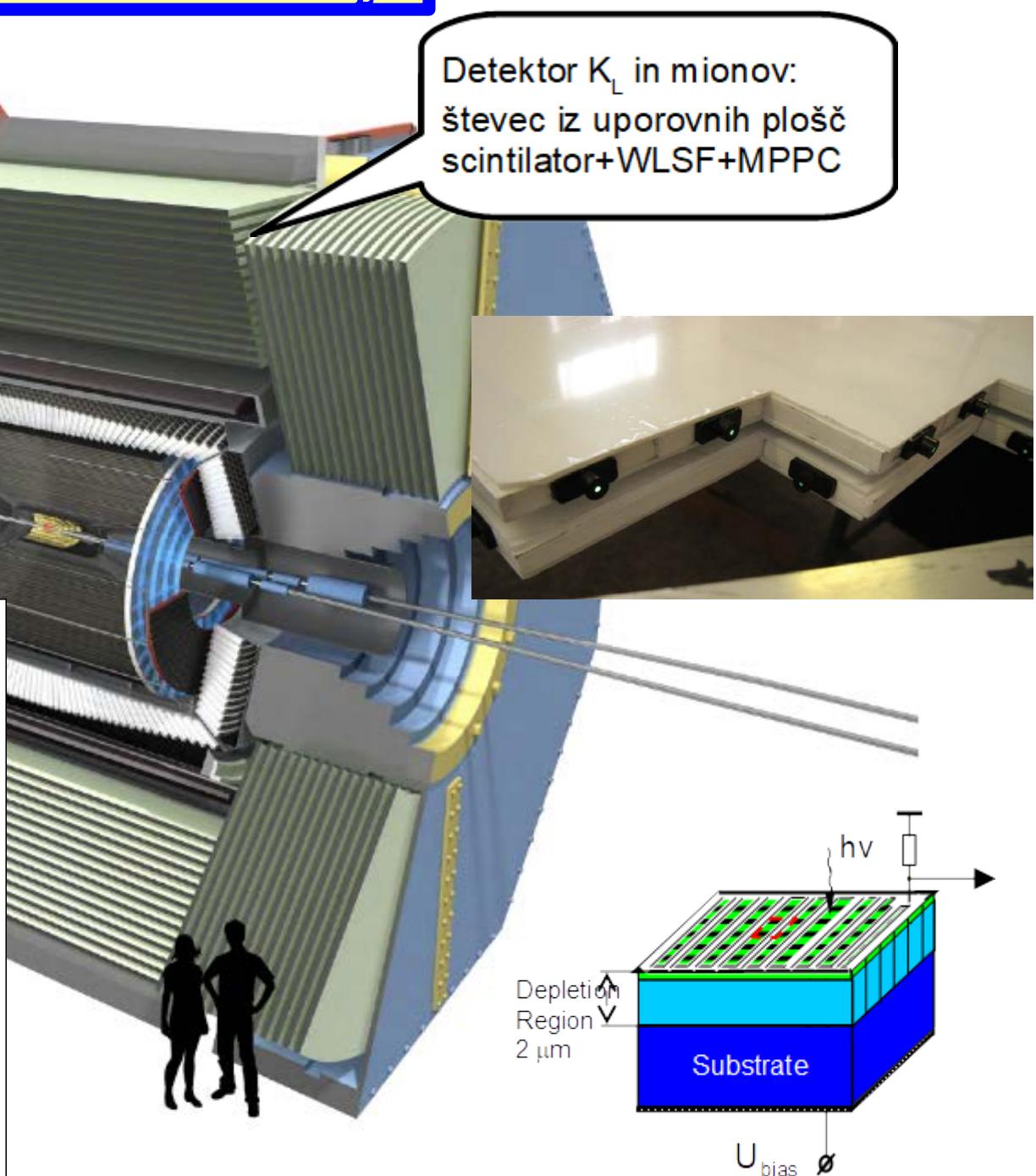
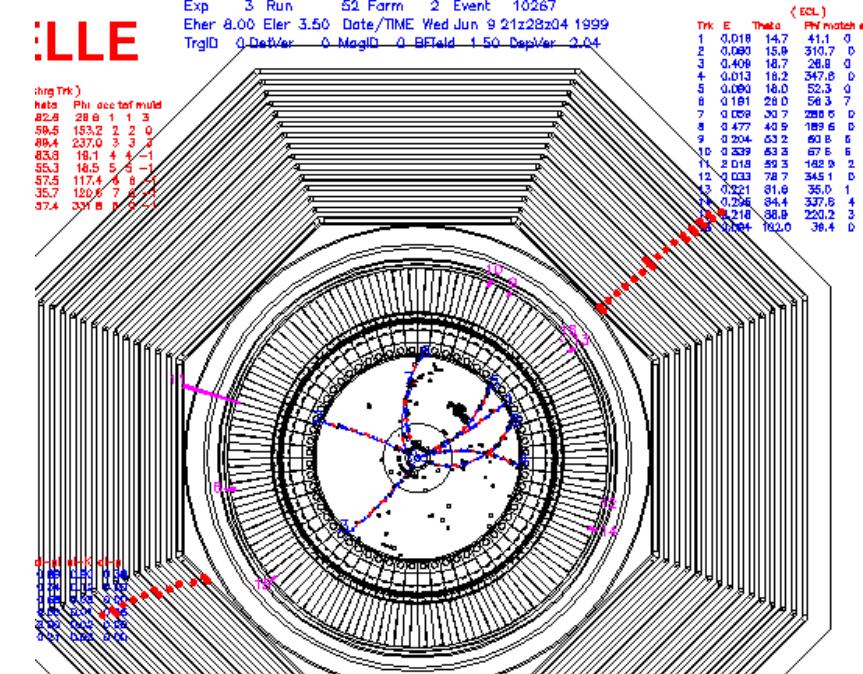
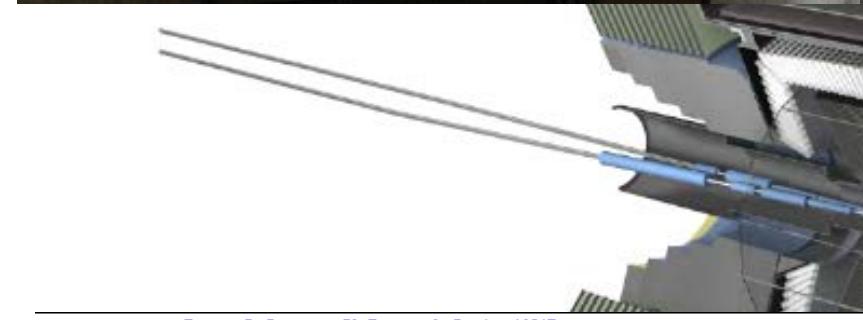
EM kalorimeter:  
CsI(Tl)+čisti CsI  
vzorčenje signala



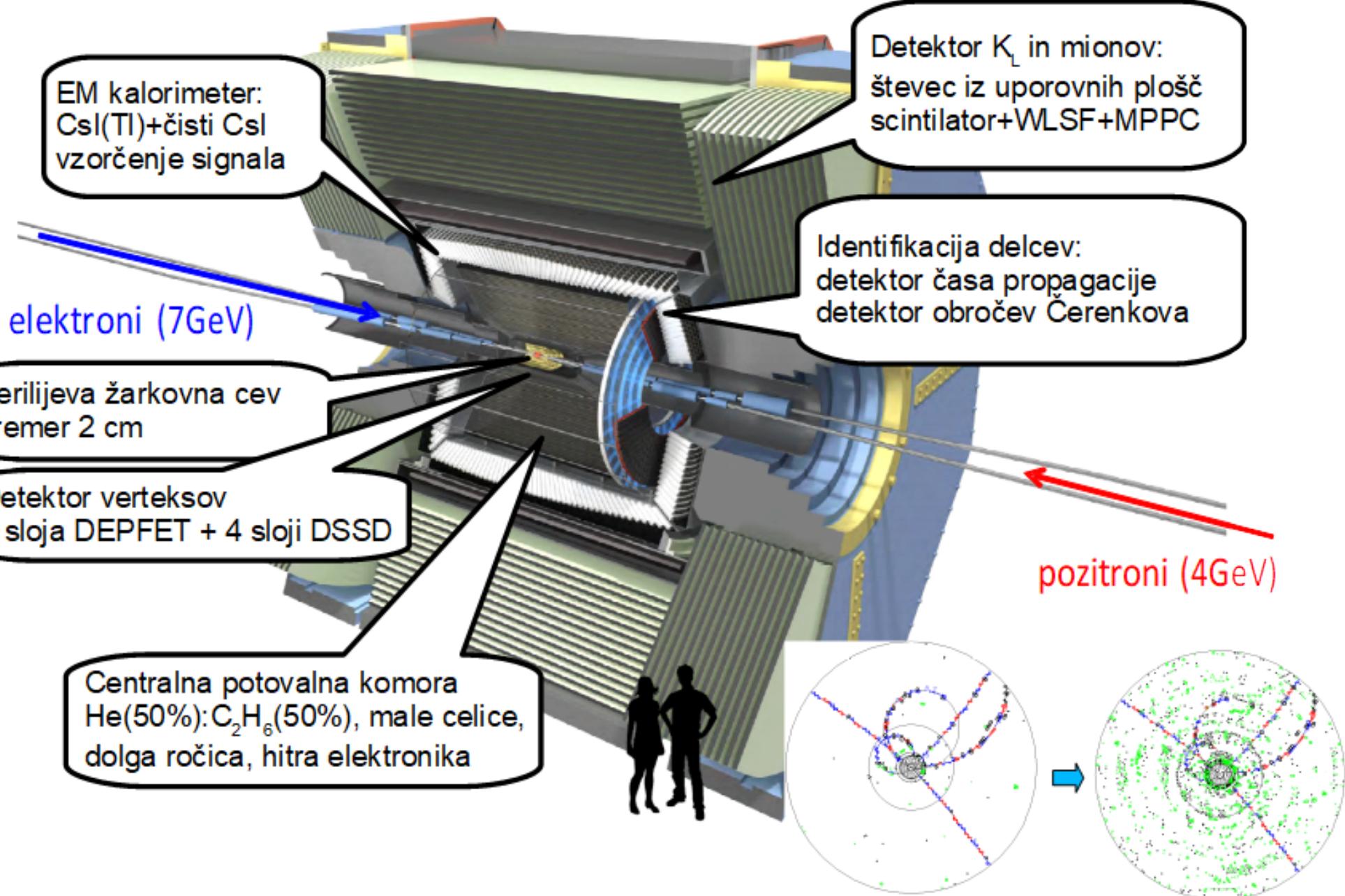
# Detektor mionov $\mu$ in dolgoživih kaonov $K_L$



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



# Spektrometer Belle II



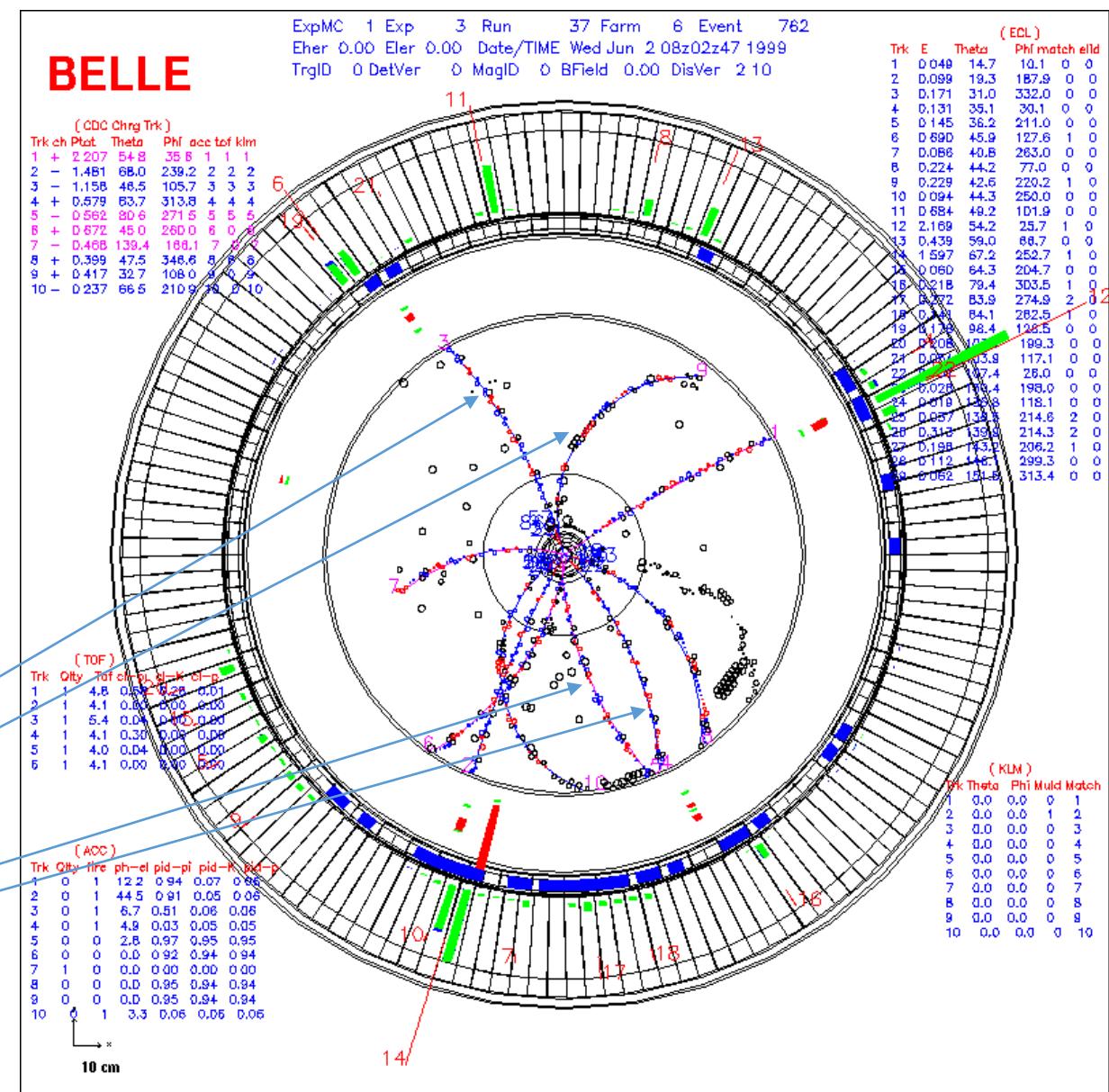
# Rekonstrukcija dogodka

- 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 ...