



# Croatian Teacher Programme

2–6 Apr 2023

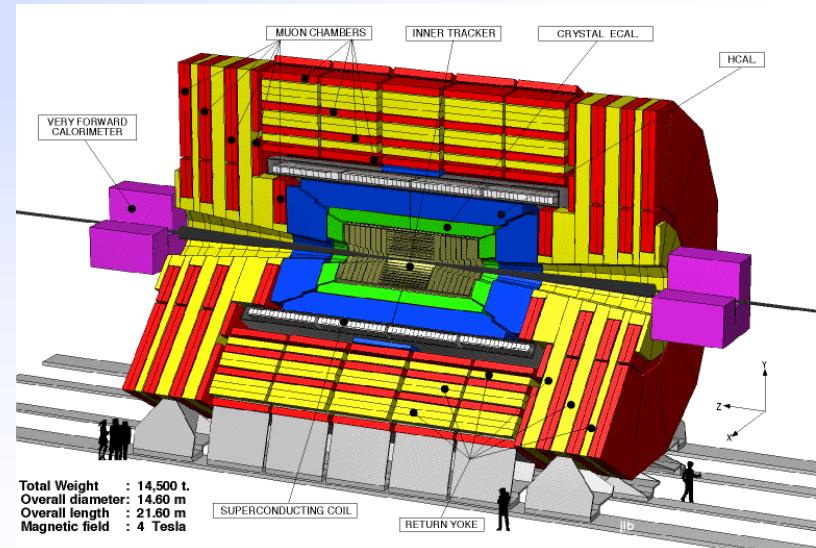
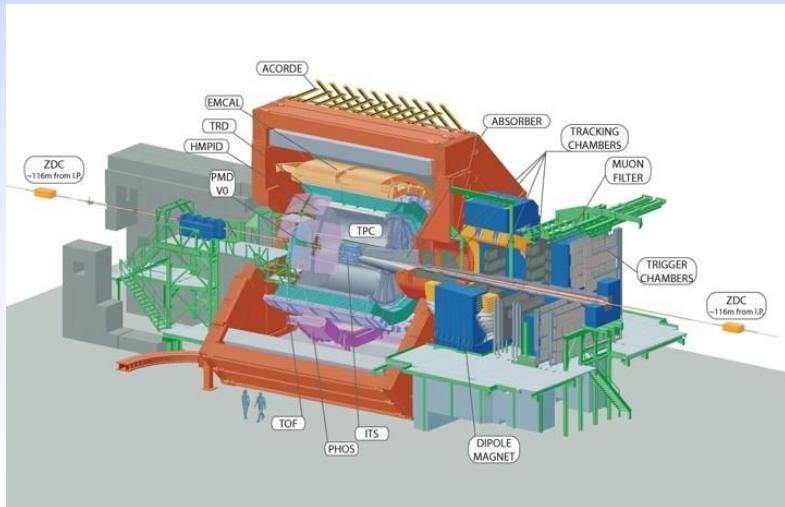
CERN

Europe/Zurich timezone

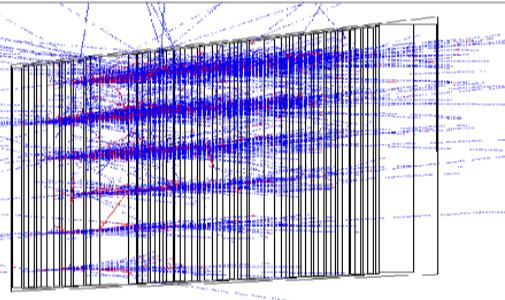


# Detektori u fizici elementarnih čestica

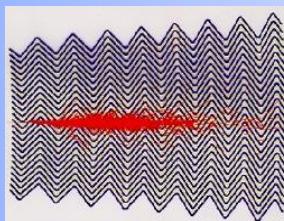
Mirko Planinić  
PMF



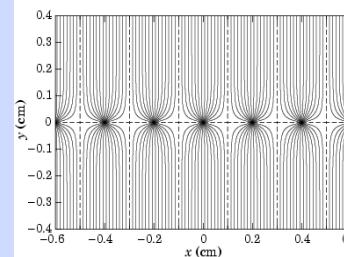
# Ajmo nešto reći o detektorima ...



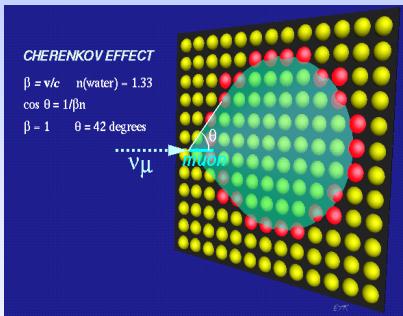
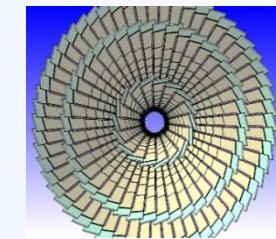
- Elektromagnetski kalorimetar



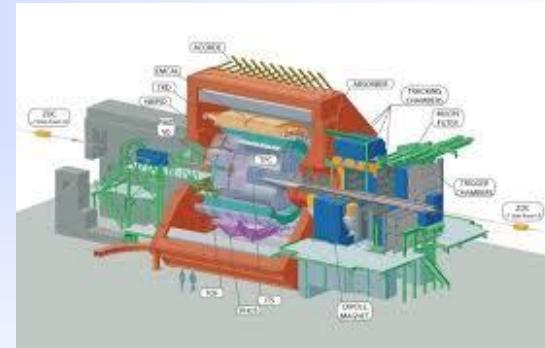
- Hadronski kalorimetar



- Mnogožičane komore
- Poluvodički detektori



- Čerenkovljevi detektori
- Interakcija čestica s materijom



- Hibridni detektori (ALICE, CMS)
- Spin-off
- Kvarkovsko - Gluonska Plazma
- Sažetak

# S'Cool EKIPA

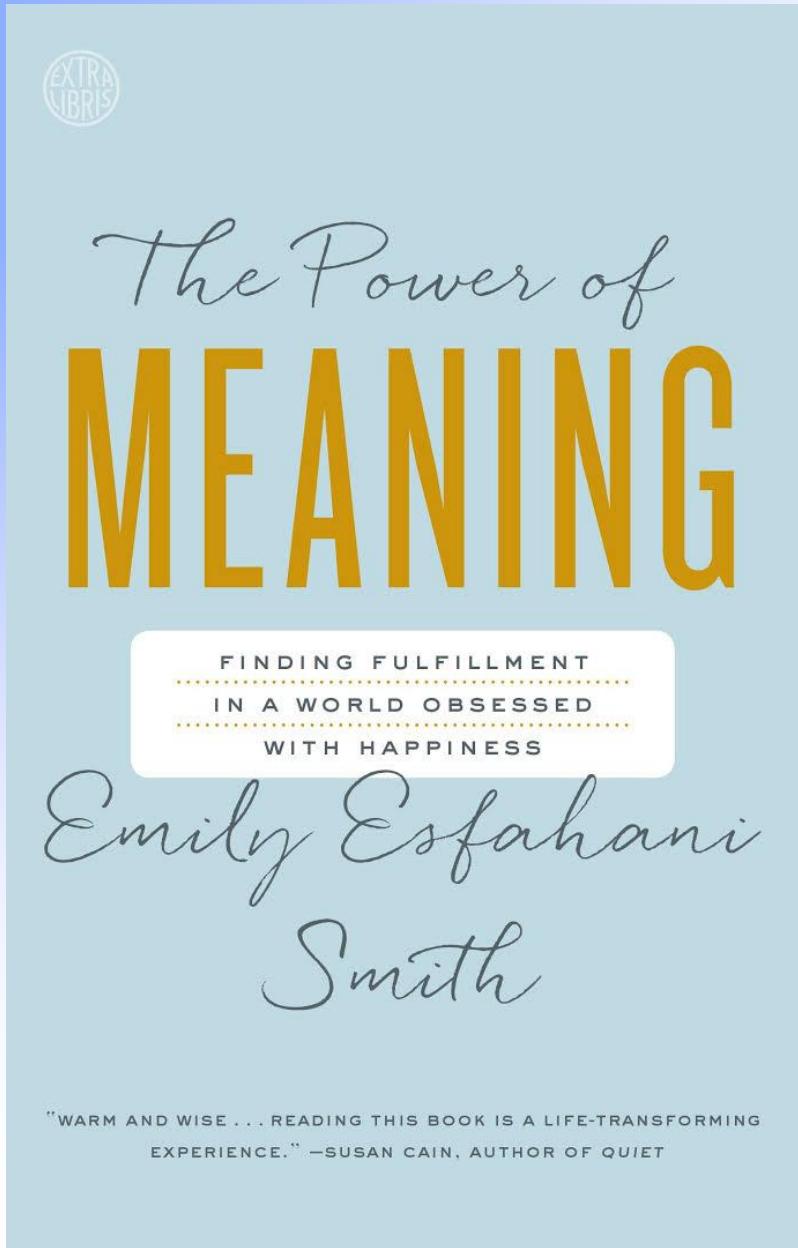
Idemo na  
posao ...



Čestice vole plesati dok ne dođu  
do detektora



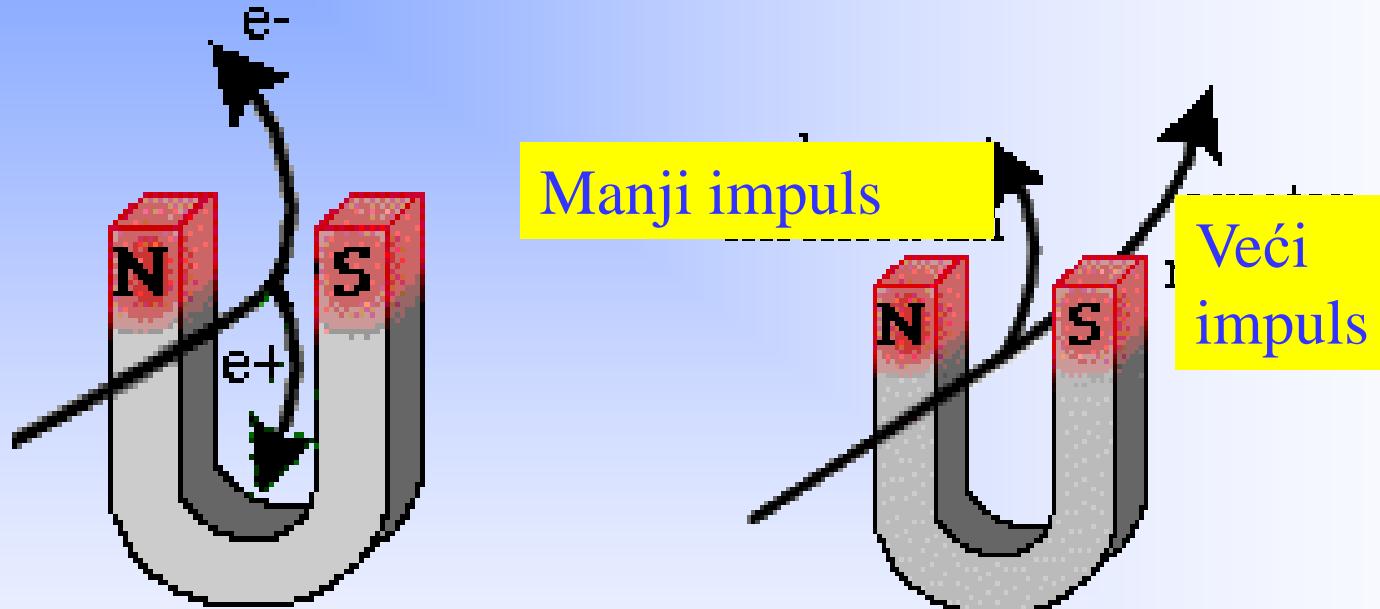
# Kratki izlet u metafiziku



# Što je cilj detekcije čestica?

## □ Detekcija čestica

Cilj detekcije je izmjeriti  $p_\mu = (E, \vec{p})$  čestica u konačnom stanju u sudarima visokih energija.



# Uvod u detekciju čestica

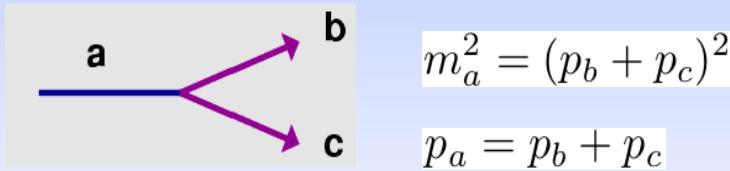
## □ Mjerenja čestica u konačnom stanju

- Stabilne čestice:

- Fotoni:  $\gamma$
- Leptoni:  $e^-, \mu^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- Hadroni:  $p, n, \pi^+, K^+, K_L^0$

- Nestabilne čestice :

- Direktna rekonstrukcija: Primjer:  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$



- Identifikacija i djelomična rekonstrukcija: Primjer:

$$e^- e^+ \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_\tau \mu^+ \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$$

# Najvažniji zadaci detektora

## □ Najvažniji zadaci detektora

- **Mjerenje položaja:** Odrediti točke prolaza nabijenih čestica ("hits")
- **Tragovi:** rekonstrukcija putanje čestica uz upotrebu nekoliko mjerениh položaja točaka uzduž putanje
- **Mjerenje impulsa:** Mjerenje impulsa nabijenih čestica unutar magnetskog polja iz rekonstrukcije zakriviljenosti putanje
- **Mjerenje energije:** Deponiranje energije čestice u dijelu detektora
- **Identifikacija čestica:** Masa i vrijeme proleta
- **Određivanje naboja čestice:** Zakriviljenost nabijenih čestica u magnetskom polju
- **Okidanje (trigger):** Okidanje detektora na "zanimljivim" događajima
- **Data acquisition:** Isčitavanje "događaja" i spremanje nakon okidanja

## Konceptualno pitanje

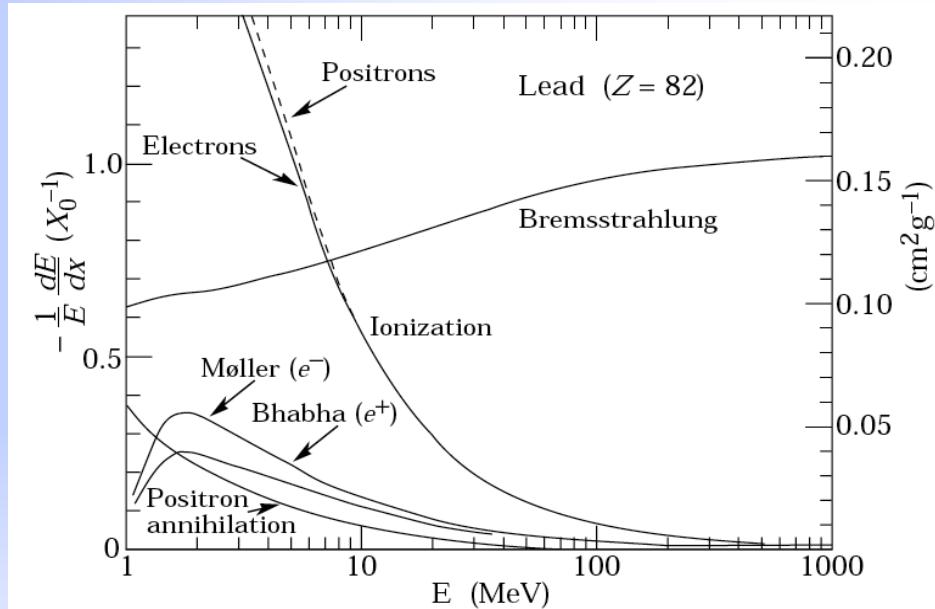
Koji od sljedećih procesa ne uzrokuju nabijene čestice:

- a) Ionizacija
- b) Zakočno zračenje
- c) Čerenkovljevo zračenje
- d) Comptonovo raspršenje



# Interakcija čestica pri prolasku kroz materiju

- Pregled interakcija
- Čestice stvorene u visokoenergijskim sudarima međudjeluju elektromagnetski i /ili nuklearno pri prolasku kroz materijal detektora
- Glavni procesi za nabijene čestice su:
  - Ionizacija
  - Čerenkovljevo zračenje
  - Zakočno zračenje

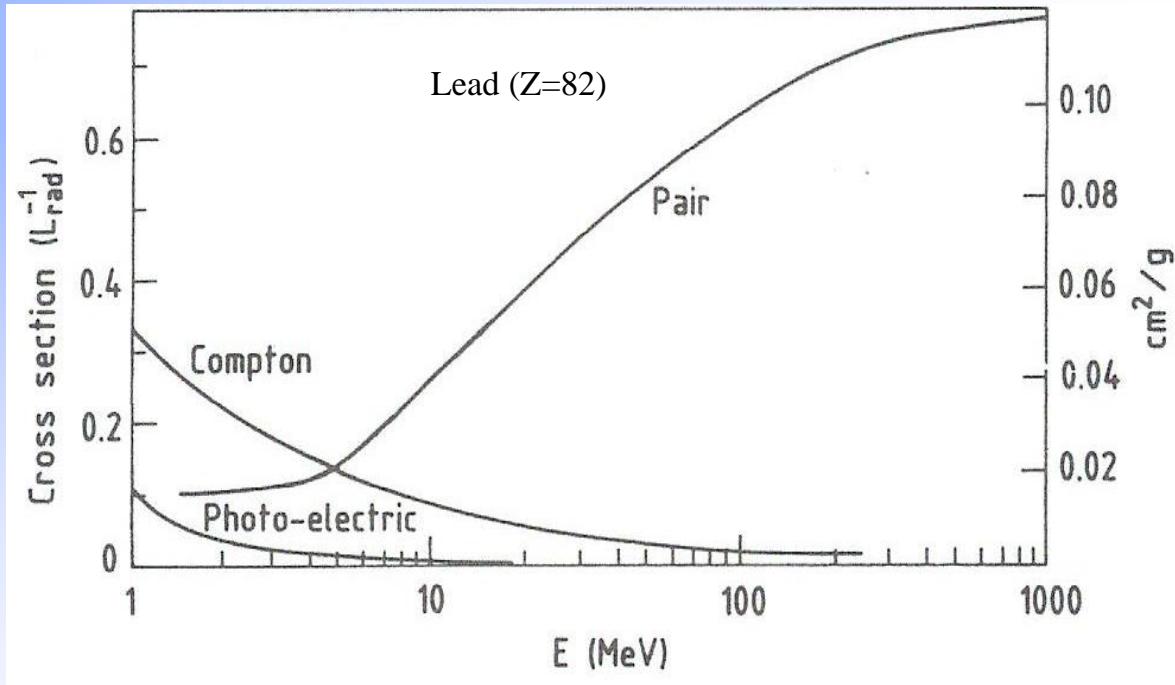


C. Fabjan,  
1987

# Interakcija čestica pri prolasku kroz materiju

## □ Glavni procesi za fotone: $\gamma$

- Fotoelektrični efekt
- Comptonovo raspršenje
- Producija parova



C. Fabjan,  
1987

# Konceptualno pitanje

Dublje u materiju prodiru:

- a) fotonii
- b) nabijene čestice
- c) ovisi o vrsti nabijenih čestica



# Zakočno zračenje

Gubitak energije elektrona zračenjem:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0}$$

Radijacijska duljina  $X_0$  je debljina medija koja reducira srednju energiju snopa elektrona za faktor  $e$ .

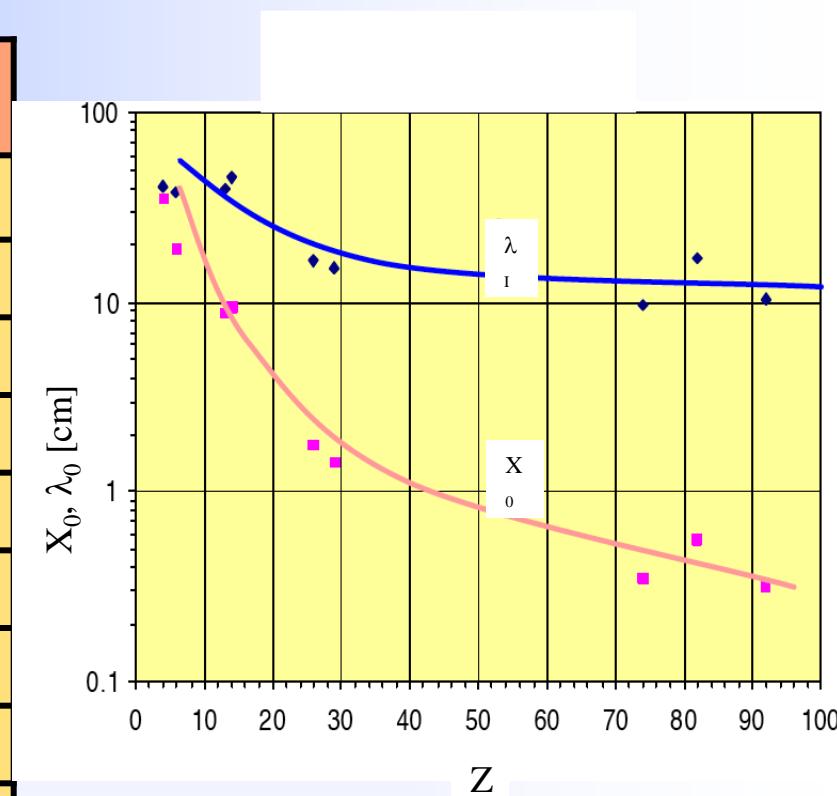
Kritična energija  $E_c$  je energija kod koje je gubitak energije na zračenje jednak gubitku energije na ionizaciju.

$$E_c \cong \frac{600}{Z} MeV$$

# Interakcija s materijom

- Usporedba nuklearne interakcijske duljine (u cm) s radiacijskom duljinom (u cm)

| Materija              | Z  | A     | Z/A  | $X_0$ (cm) | $\lambda_I$ (cm) | Gustoća (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|----|-------|------|------------|------------------|------------------------------|
| H <sub>2</sub> (tek.) | 1  | 1.00  | 0.99 | 866        | 718              | 0.0708                       |
| He                    | 2  | 4.0   | 0.50 | 756        | 520              | 0.125                        |
| C                     | 6  | 12.0  | 0.50 | 18.8       | 38.1             | 2.27                         |
| Al                    | 13 | 26.98 | 0.48 | 8.9        | 39.4             | 2.70                         |
| Cu                    | 29 | 63.55 | 0.45 | 1.43       | 15.1             | 8.96                         |
| Pb                    | 82 | 207.2 | 0.39 | 0.56       | 17.1             | 11.4                         |
| W                     | 74 | 183.8 | 0.40 | 0.35       | 9.58             | 19.3                         |
| U                     | 92 | 238.0 | 0.38 | 0.32       | 10.5             | 19.0                         |
| Scint.                |    |       | 0.53 | 42.4       | 81.5             | 1.03                         |
| BGO                   |    |       | 0.42 | 1.12       | 22.1             | 7.10                         |
| CsI                   |    |       | 0.41 | 1.85       | 36.9             | 4.53                         |
| NaI                   |    |       | 0.42 | 2.59       | 41.1             | 3.67                         |



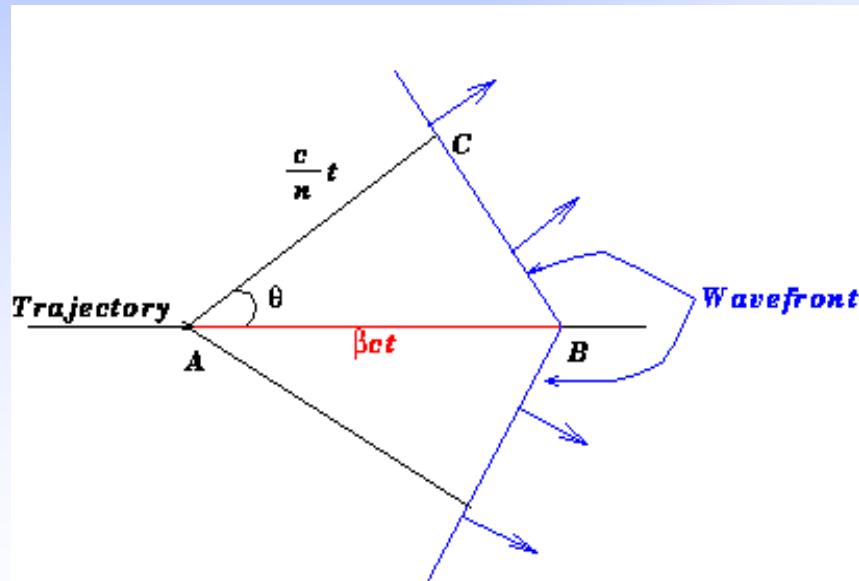
# Čerenkovljevo zračenje

Čerenkovljev efekt nastaje kad se nabijena čestica kreće brzinom većom od  $c/n$  (brzinom svjetlosti u tom mediju) gdje je

- $c$  brzina svjetlosti u vakuumu
- $n$  index loma u tom sredstvu

→ Emitira se “udarni val” fotonima

Simul.



$\beta c = \text{speed of particle}$

$\frac{c}{n} = \text{speed of radiation}$



# Čerenkovljevi detektori

Svojstva čerenkovljevih detektora

- Mjeranjem kuta mjerimo brzinu
- Dominira plava svjetlost

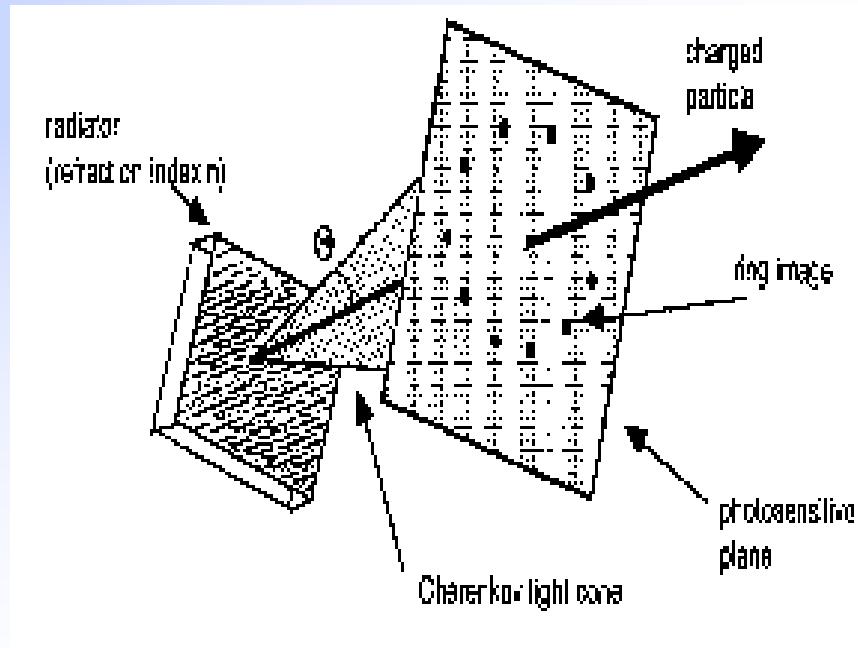
Primjena čerenkovljevih detektora

- Detektori praga (razdvajanje čestica istog impulsa a različitih masa)
- Identifikacija čestica (RICH → STAR)

$$\cos \theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n}$$

Broj fotona  $\sim \frac{1}{\lambda^2}$

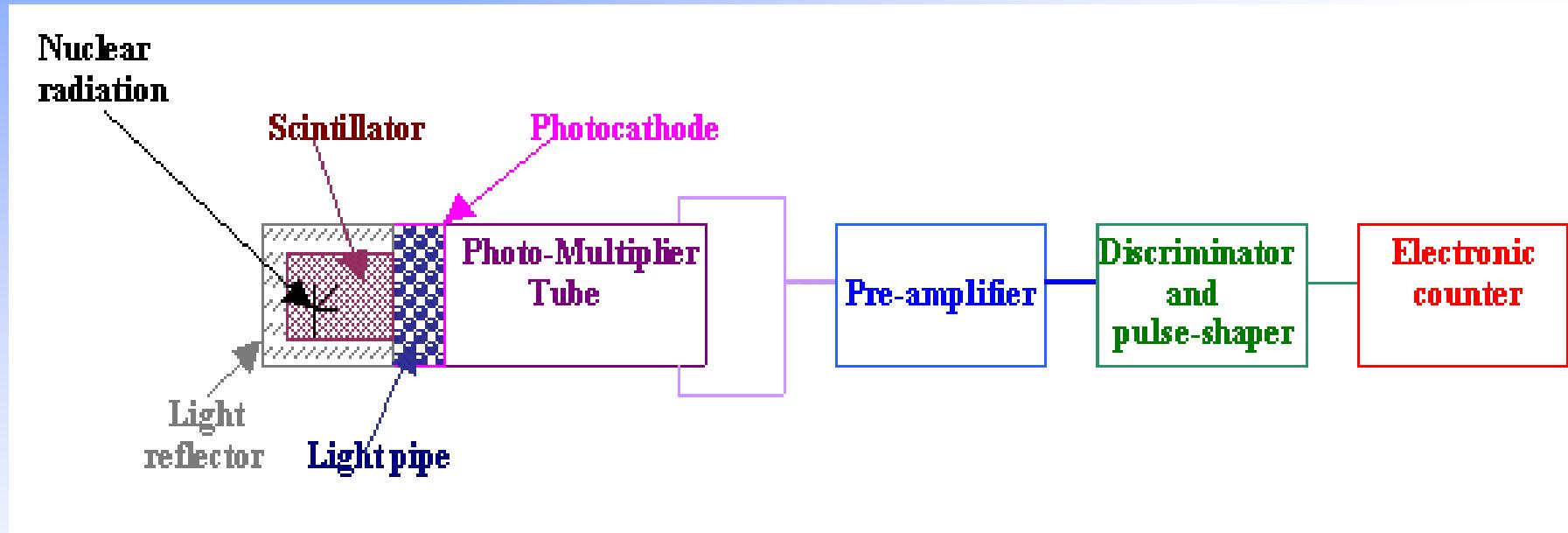
$\lambda$ -valna duljina



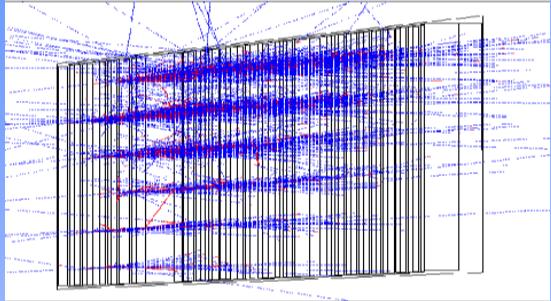
# Uvod u detekciju čestica

## □ Detekcija čestica

### *Scintilatorima*



# Kalorimetri



Energija i pozicija čestica se može mjeriti metodama totalne apsorpcije :

- Ulagana čestica interagira u detektoru velike mase, stvarajući sekundarne čestice ... → *pljusak*.
- Gotovo sva početna energija čestice se pojavljuje ili kao ionizacija ili kao pobuđenje medija → "kalorimetar"
- Nužni su za određivanje energije neutralnih hadrona.
- Energijska rezolucija  $\sim E^{-\frac{1}{2}}$  → dobra na vis. Energ.
- Kalorimetri daju brzu (100 ns) inf. o ukupnoj energiji

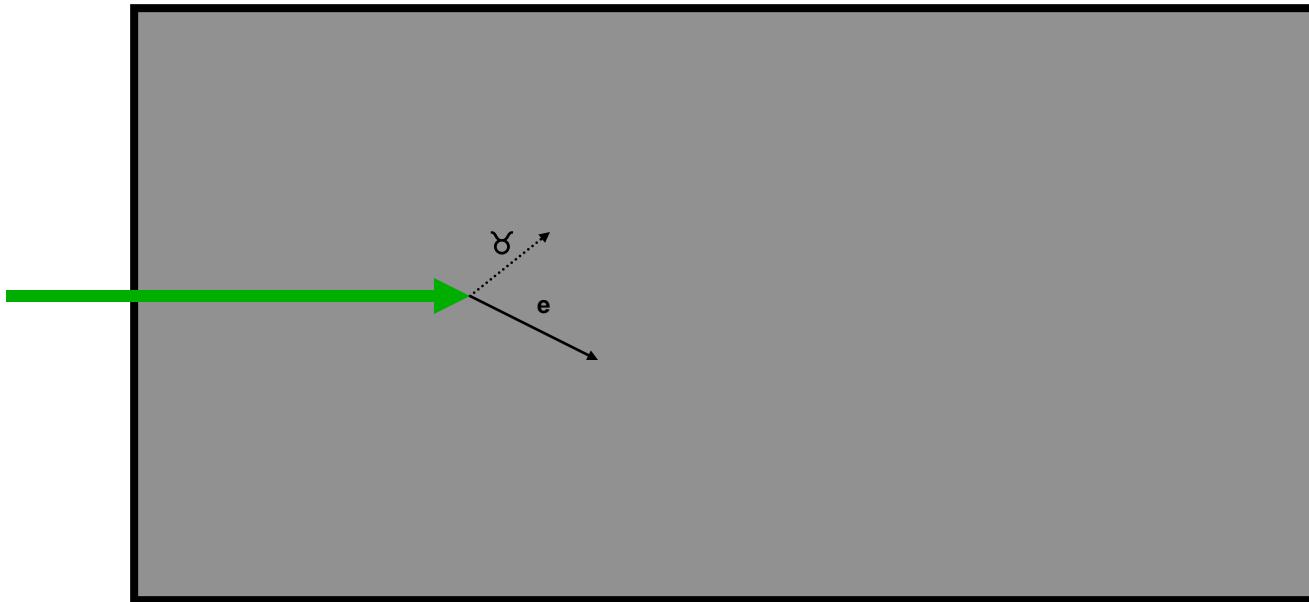


# Elektromagnestki pljusak



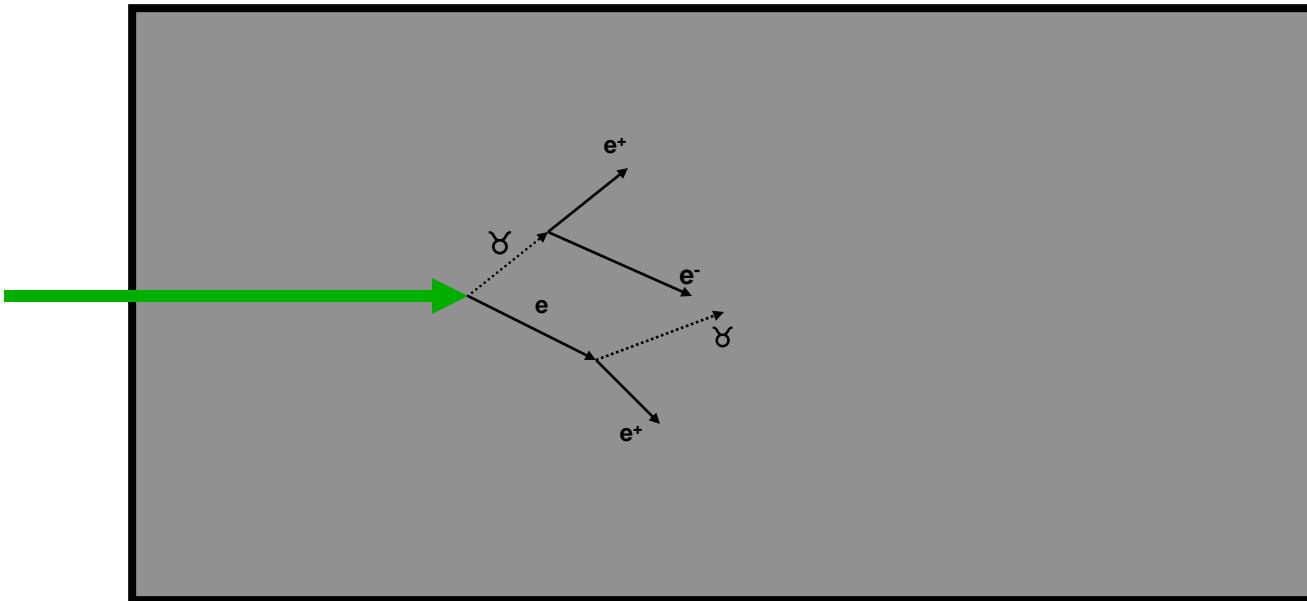


# Elektromagnetski pljusak



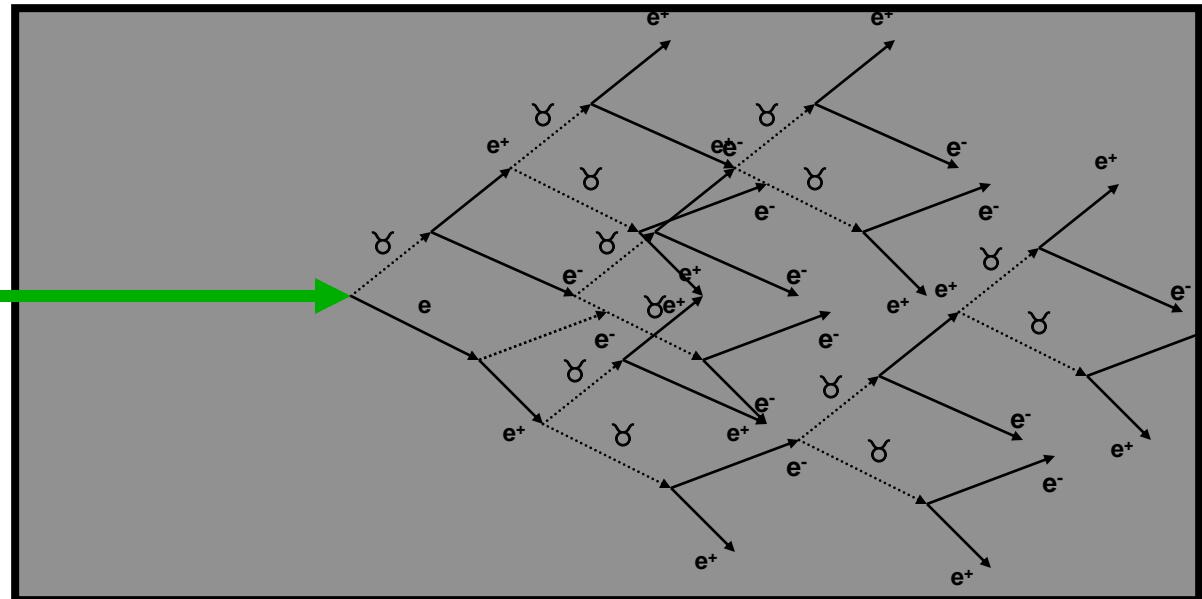


# Elektromagnetski pljusak





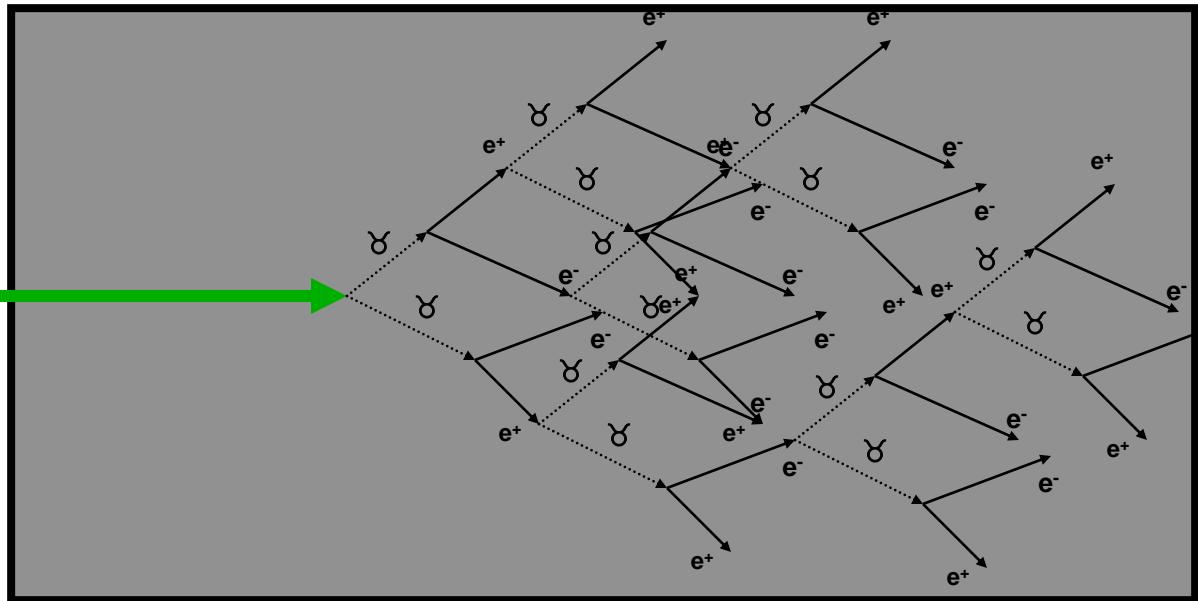
# Elektromagnetski pljusak



- this process repeats itself in a “cascading” fashion until there is not enough energy in the particles to continue



# Elektromagnetski pljusak

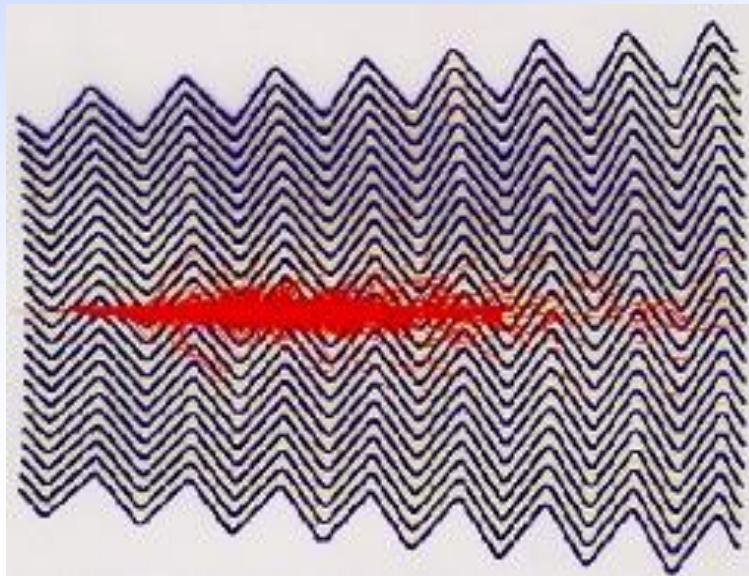


\*Uočite: Stvaraju se samo fotoni, elektroni i pozitroni

# Hadronski kalorimetar

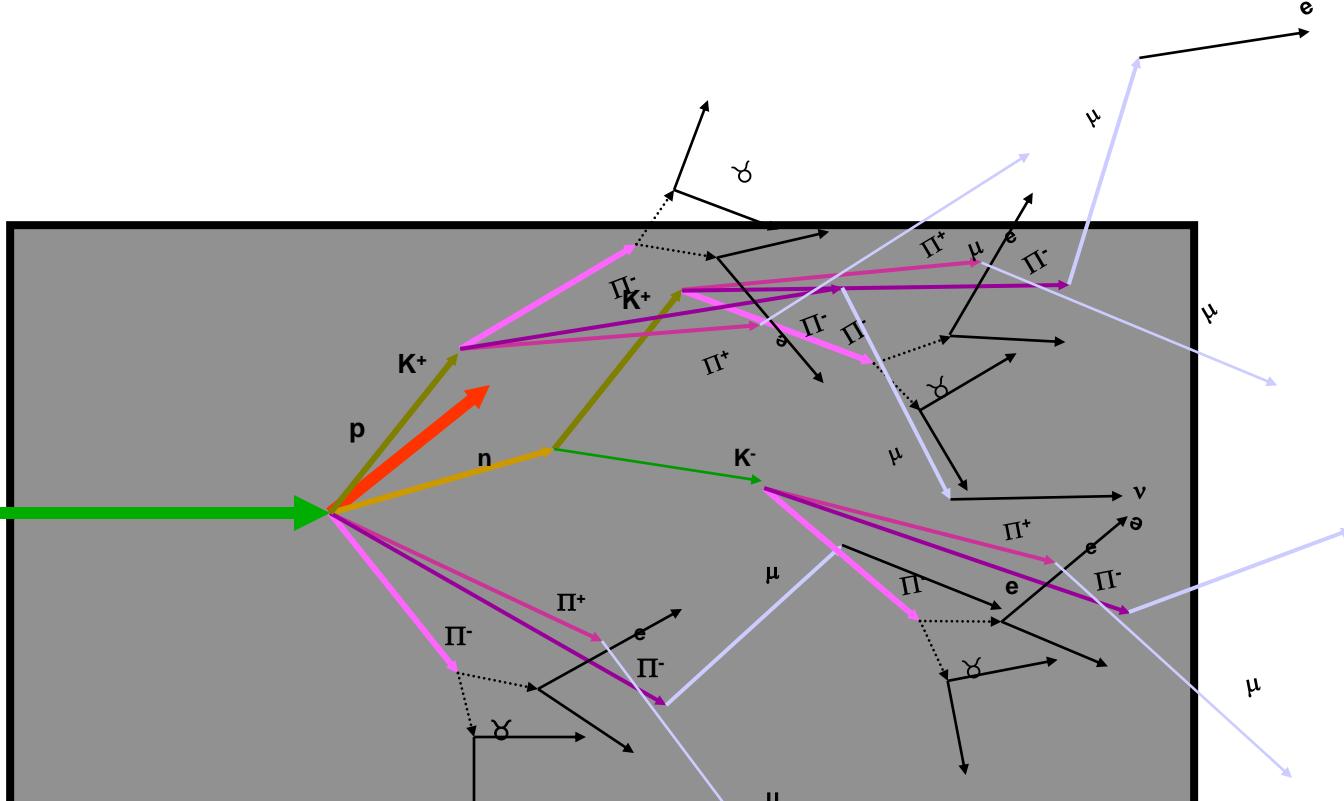
Hadronski pljusak : ulazni hadron → neelastični sudar  
→ proizvodnja sekundarnog hadrona ...

- $\lambda$  je velik u odnosu na  $X_0$  → Hacal su veliki u odnosu na Ecal
- U hadronskoj kaskadi 30 % energije se gubi  
(razbijanje jezgre, nuklearna pobudjenja, evaporacija neutrona)





# Hadronska kaskada



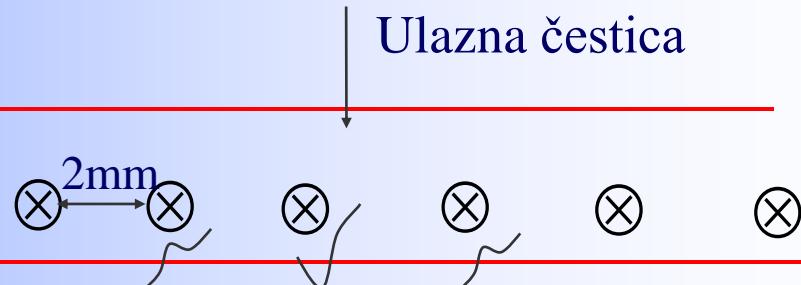
\*Uočite: proizvode se različite čestice  $p$ ,  $n$ ,  $\Pi$ ,  $\nu$ ,  $\Lambda$ ,  $K$ ,  $\Xi$

# Mnogožičane komore

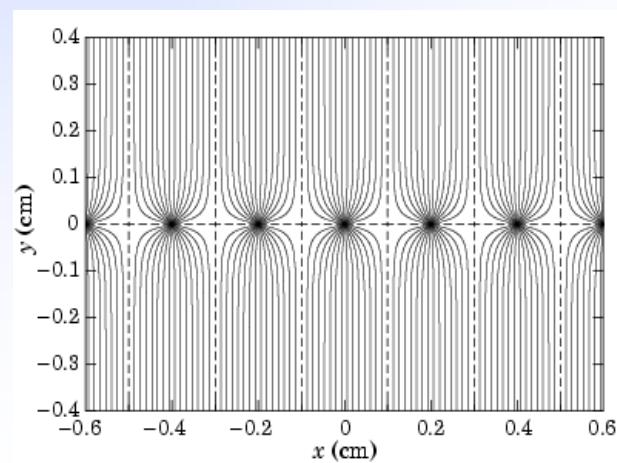
Katodna ravnina

MWC → anodne žice

Katodna ravnina



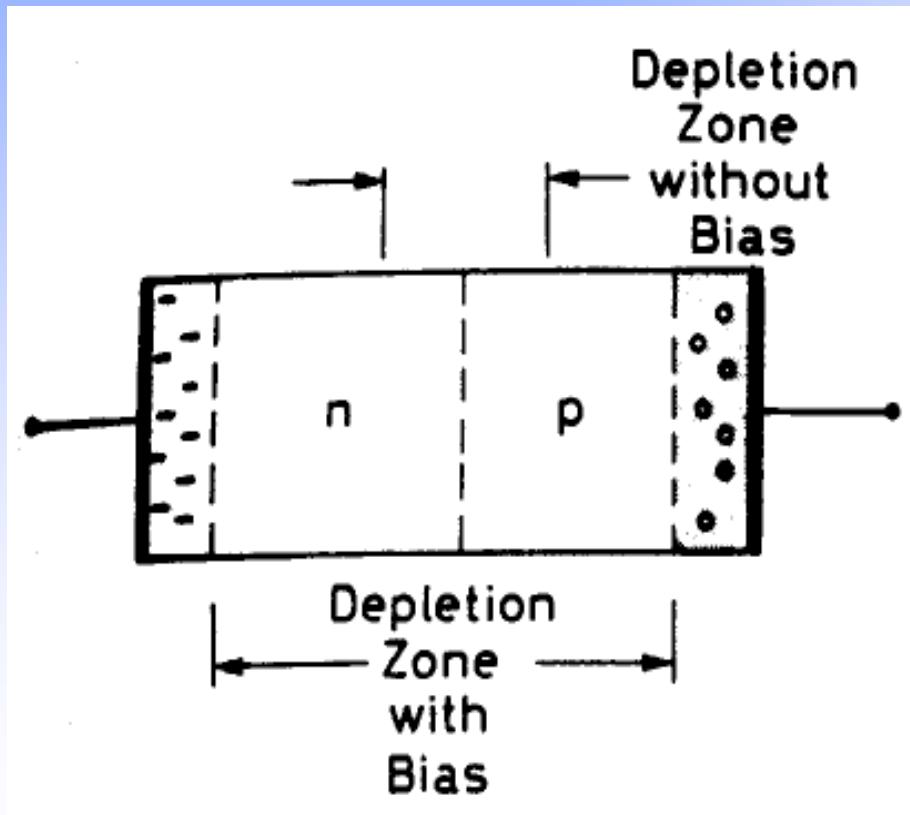
- Svaka žica djeluje kao nezavisni proporcionalni brojač
- Katode su na neg. pot. (2kV) dok su anode uzemljene
- Signal na žici koja okida je negativan i velik
- Signal na susjednim žicama je mali i pozitivan
- Prostorna rezolucija  $\sim 1$  mm
- Razlučivanje više hitaca



# Poluvodički detektori

Analogni plinskim ionizacijskim detektorima:

- Čestica u prolazu stvara parove elektron-šupljina (elektron-ion)
- Umjesto plina medij je poluvodički (čvrsti) materijal



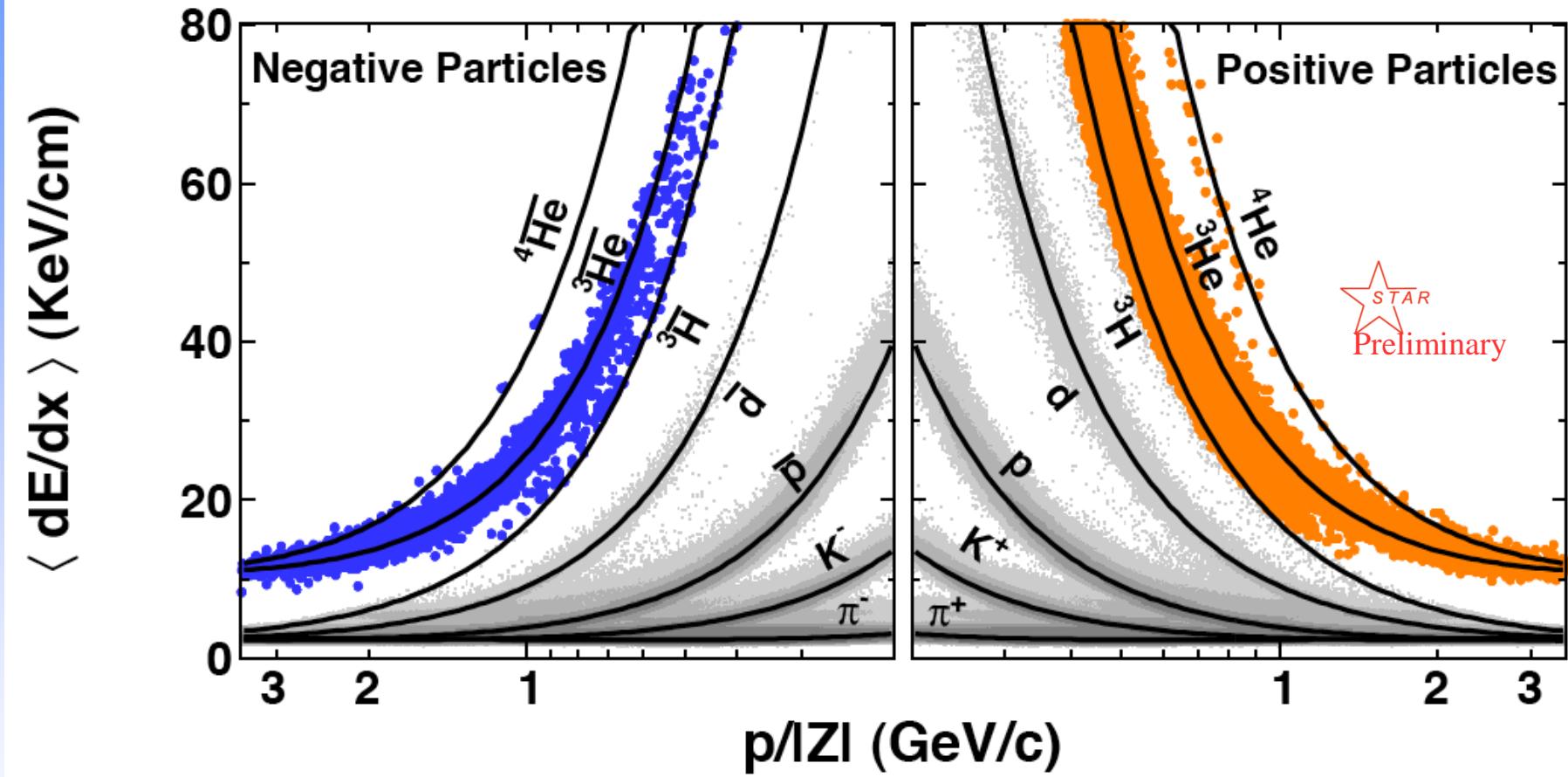
- Negativan napon na p-stranu, pozitivan napon na n-stranu
- Veći napon = više aktivnog medija + bolje skupljanje naboja
- Previsok napon → poluvodič postaje vodič

# Poluvodički detektori (usporedba s ionizacijskim detektorima)

- $E_{\text{elektron - šupljina}} < E_{\text{elektron-ion}}$  ➔ Bolja energijska rezolucija
- Bolja moć zaustavljanja od plinskih detektora (veća gustoća)
- Male dimenzije (<50 μm) ➔ dobra poz. Rezolucija
- Veća osjetljivost na zračenje (kraći vijek trajanja)
- Detektori male površine (cm<sup>2</sup>) (svaka traka ➔ pojačalo)
- Više materijala ➔ interakcija čestica koje detektiramo
- Detektori trebaju ponekad hlađenje radi smanjivanja šuma



## Kako još identificirati čestice ...

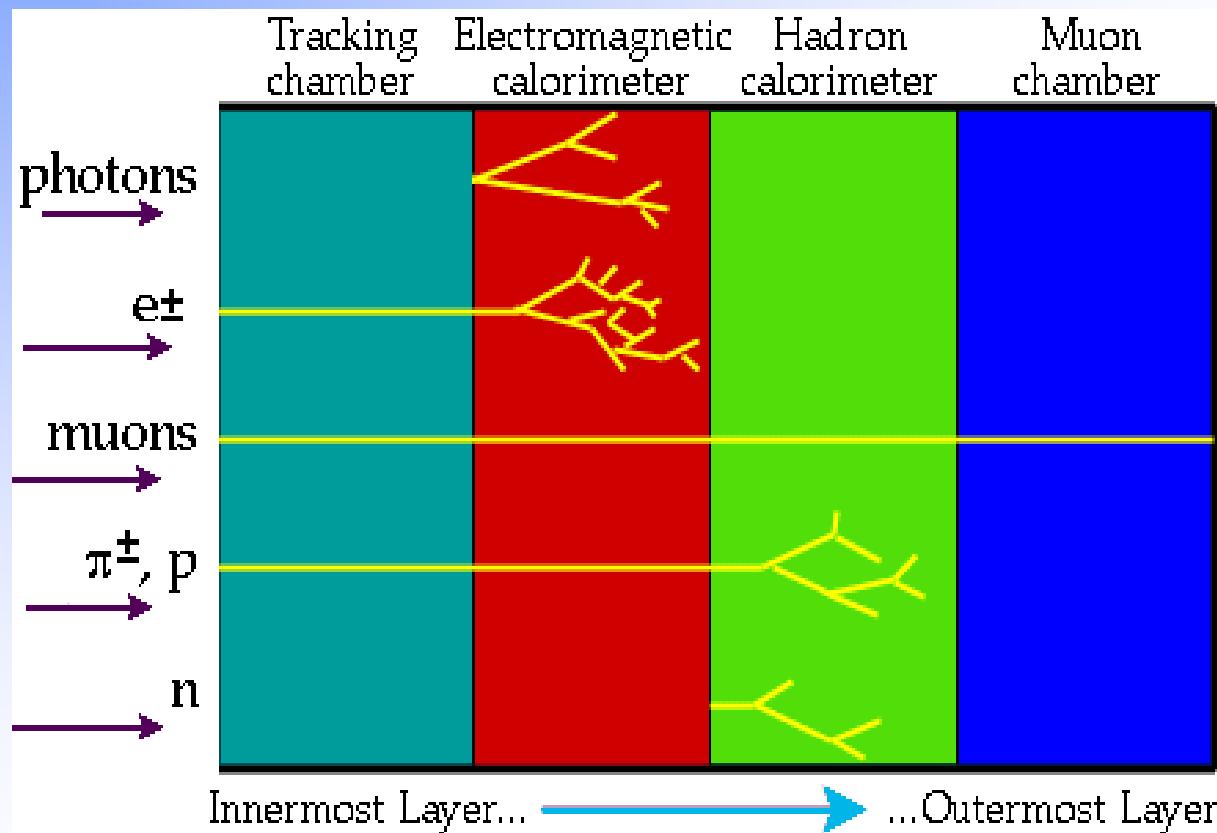


$dE/dx$  vs Rigidity

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

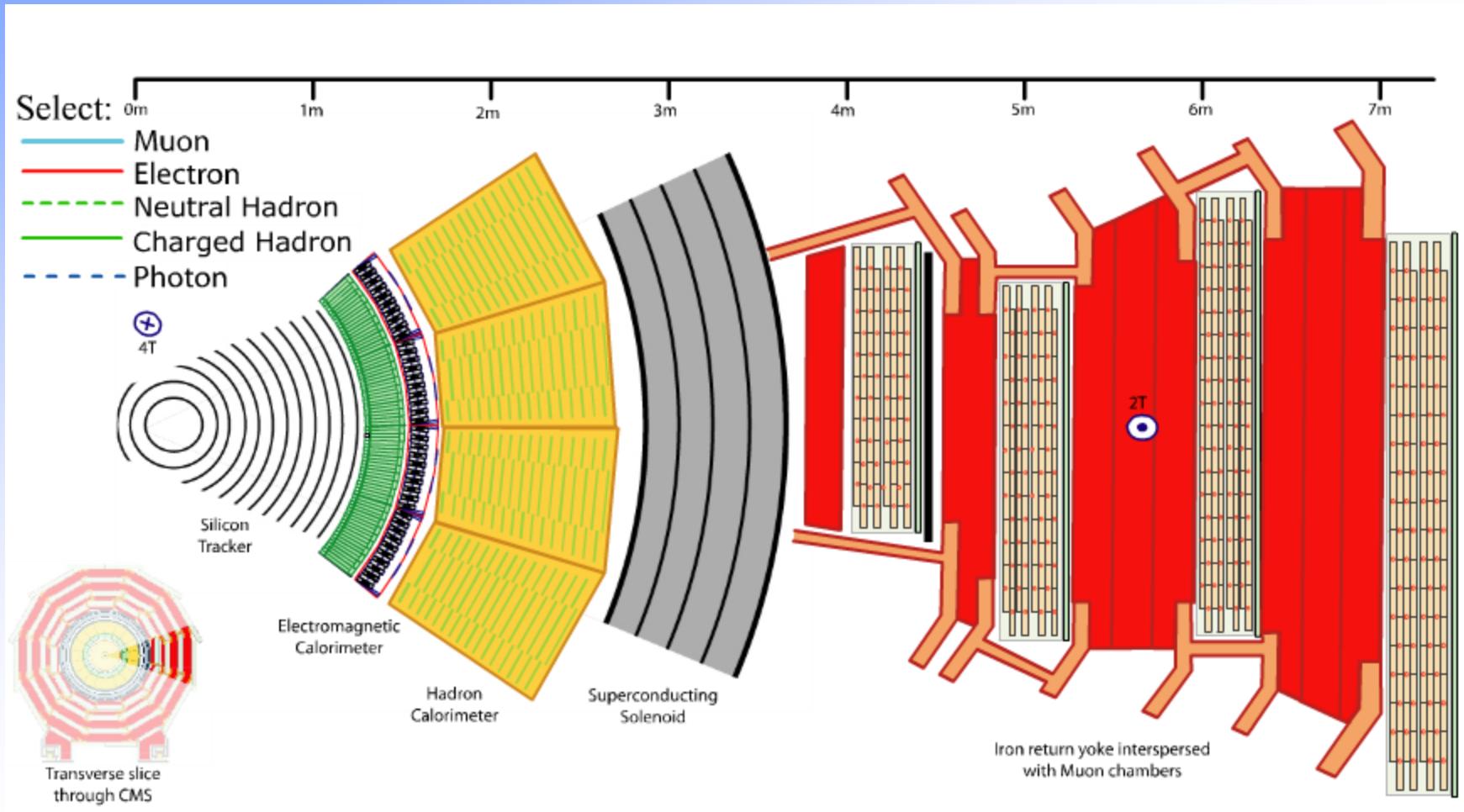
# Hibridni detektori

Eksperimenti u FEČ → Istovremena detekcija više čestica  
Redoslijed detekcije čestica ilustriran je na slici:

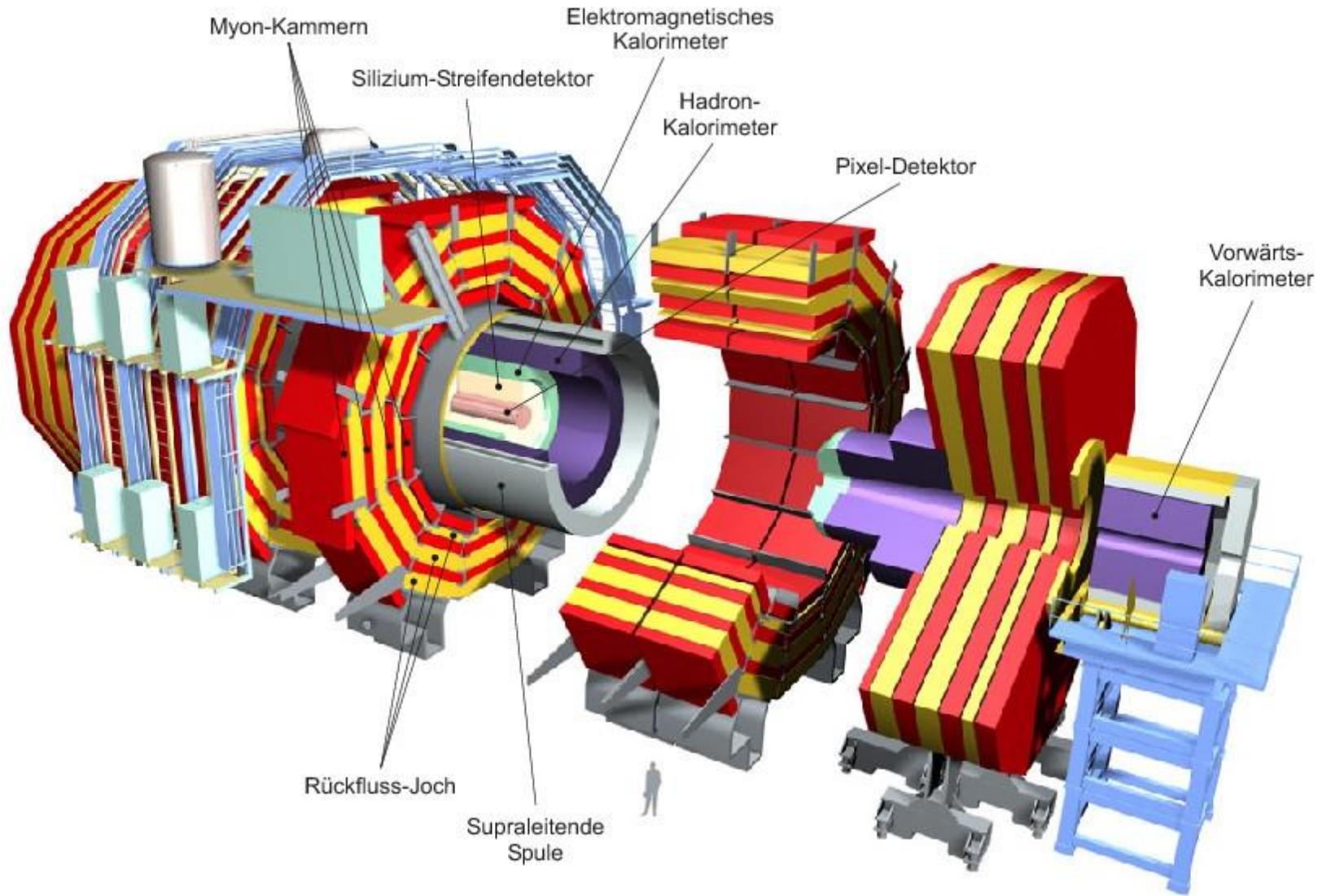


# Transverse slice through CMS detector

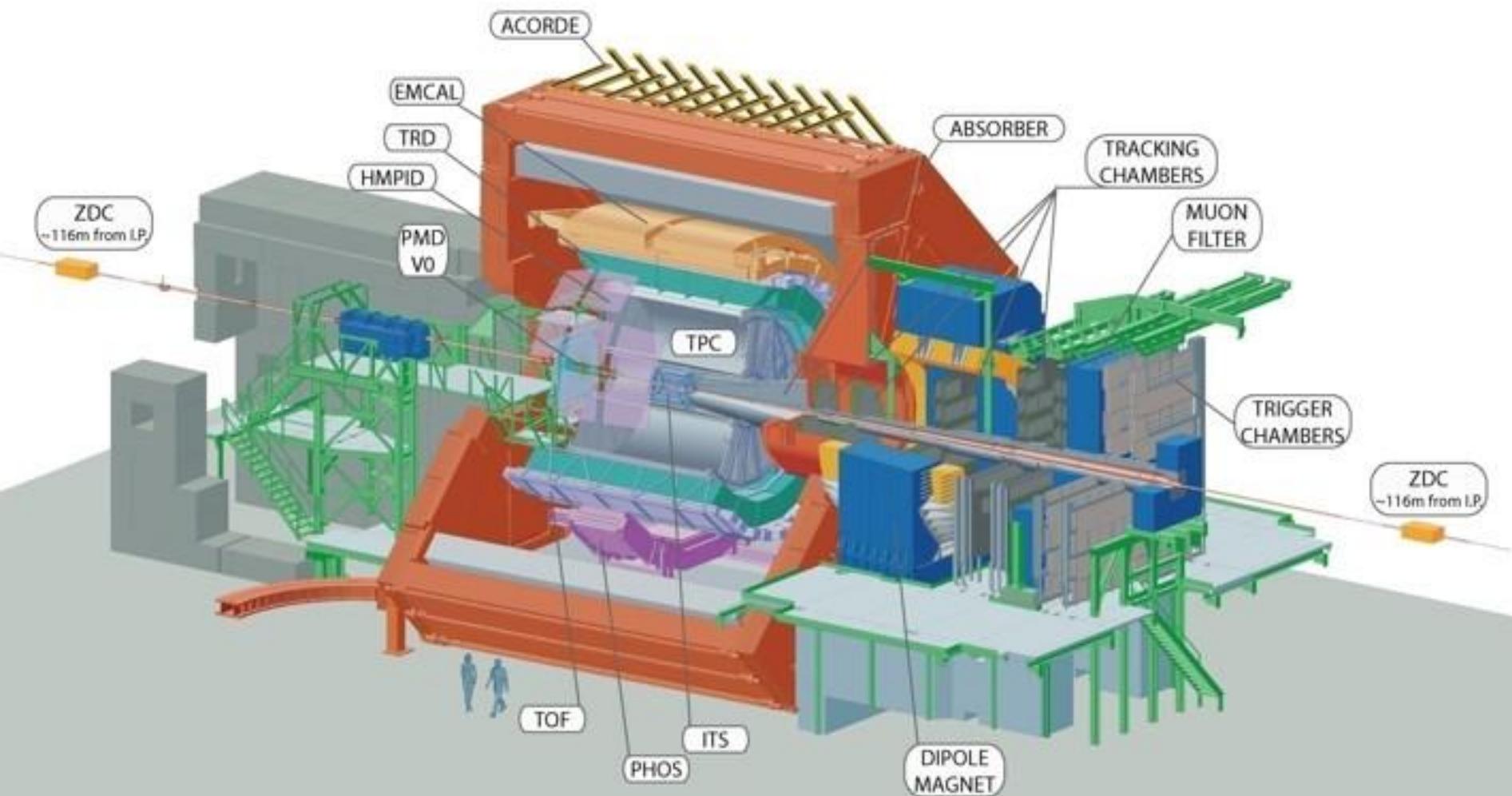
Click on a particle type to visualise that particle in CMS  
Press “escape” to exit



# CMS detektor



# ALICE eksperiment



**Spin off company - PicoLogic**

[www.picologic.hr](http://www.picologic.hr)



# PicoLogic

*Floating multi-channel picoammeters*



Izvoz u: Njemačku, SAD, Finsku, Indiju,  
Mađarsku, Rumunjsku, Izrael, Španjolsku,  
CERN



Hvala na pažnji!