



Croatian Teacher Programme

24–28 Mar 2024

CERN

Europe/Zurich timezone



Gauguin -ova pitanja

Koja je budućnost svemira?

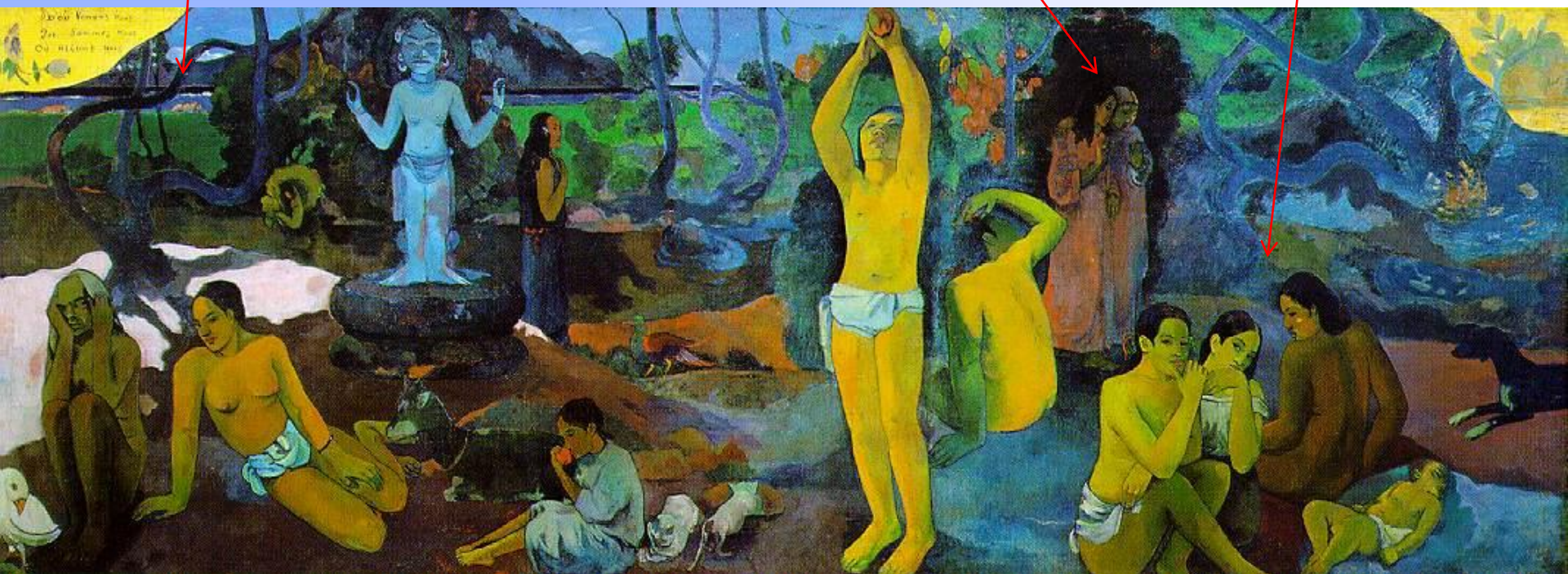
Kamo idemo ?

Od čega se sastoji svemir?

Tko smo mi ?

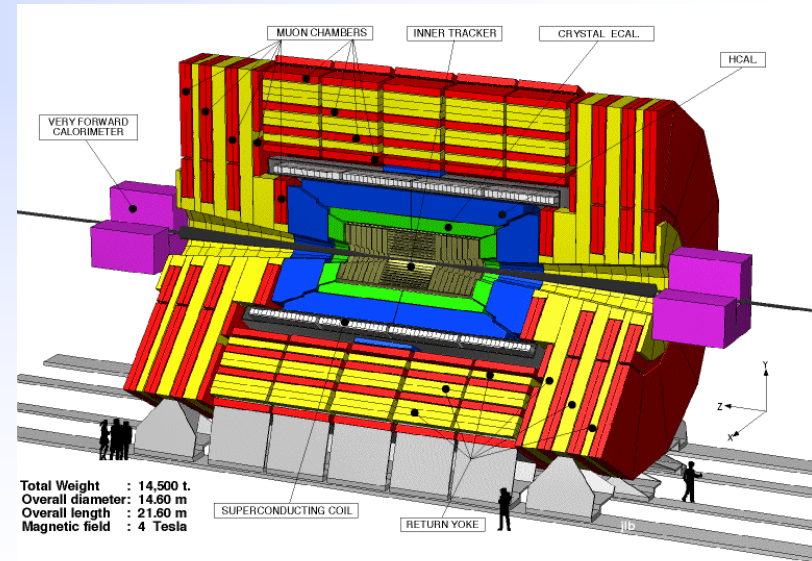
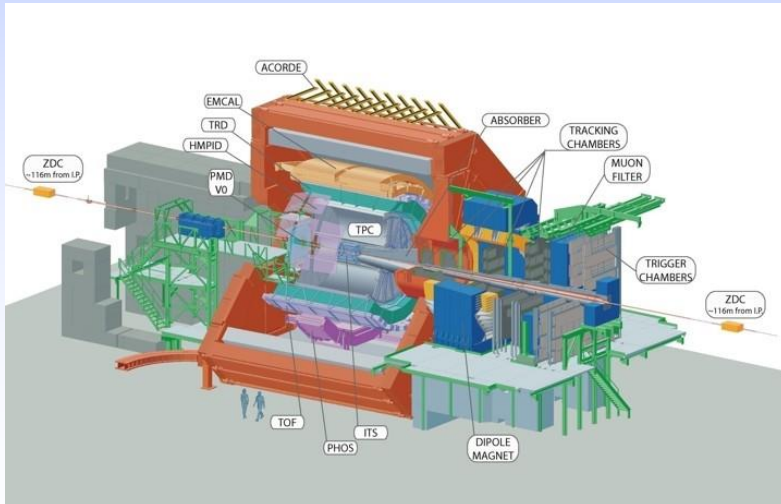
Koje su bile najranije faze Velikog praska?

Odakle dolazimo?



Detektori u fizici elementarnih čestica

Mirko Planinić
PMF



Ekipa za kućne detektore

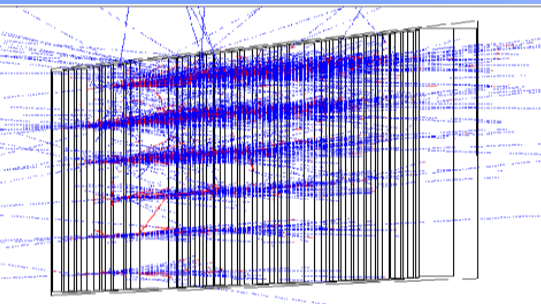
Idemo na posao ...



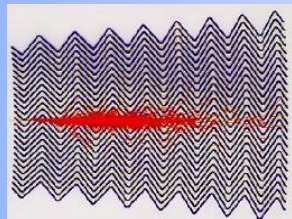
Ili možda ovo ...



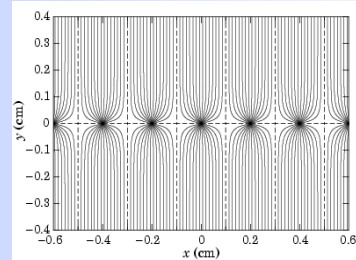
Ajmo nešto reći o detektorima ...



□ Elektromagnetski kalorimetar

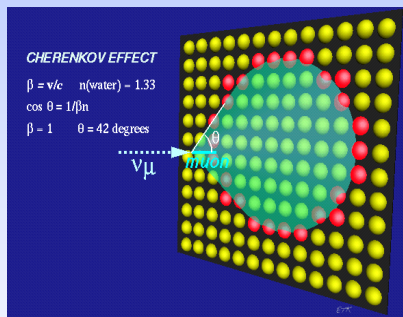
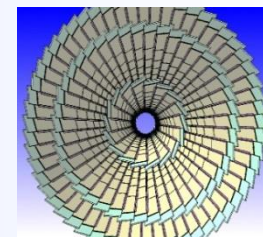


□ Hadronski kalorimetar



□ Mnogožičane komore

□ Poluvodički detektori



□ Čerenkovljevi detektori



□ Hibridni detektori (ALICE, CMS)

□ Spin-off

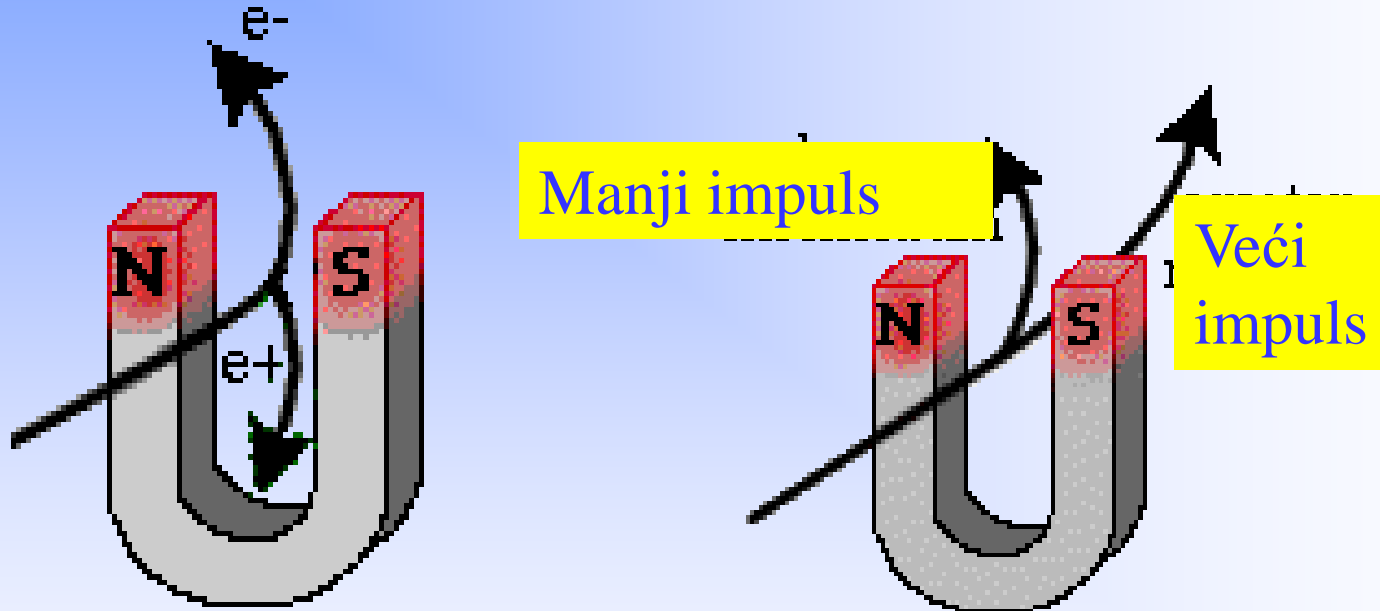
□ Interakcija čestica s materijom

□ Kvarkovsko - Gluonska Plazma
□ Sažetak

Što je cilj detekcije čestica?

- Detekcija čestica

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



Možemo li magnetskim poljem detektirati česticu?

Uvod u detekciju čestica

□ Mjerenja čestica u konačnom stanju

- Stabilne čestice:

□ Fotoni: γ

□ Leptoni: $e^-, \mu^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

□ Hadroni: p, n, π^+, K^+, K_L^0

- Nestabilne čestice :

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



$$m_a^2 = (p_b + p_c)^2$$

$$p_a = p_b + p_c$$

□ 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 mjerenih položaja točaka uzduž putanje
- **Mjerenje impulsa:** Mjerenje impulsa nabijenih čestica unutar magnetskog polja iz rekonstrukcije zakrivljenosti putanje
- **Mjerenje energije:** Deponiranje energije čestice u dijelu detektora
- **Identifikacija čestica:** Masa i vrijeme proleta
- **Određivanje naboja čestice:** Zakrivljenost 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



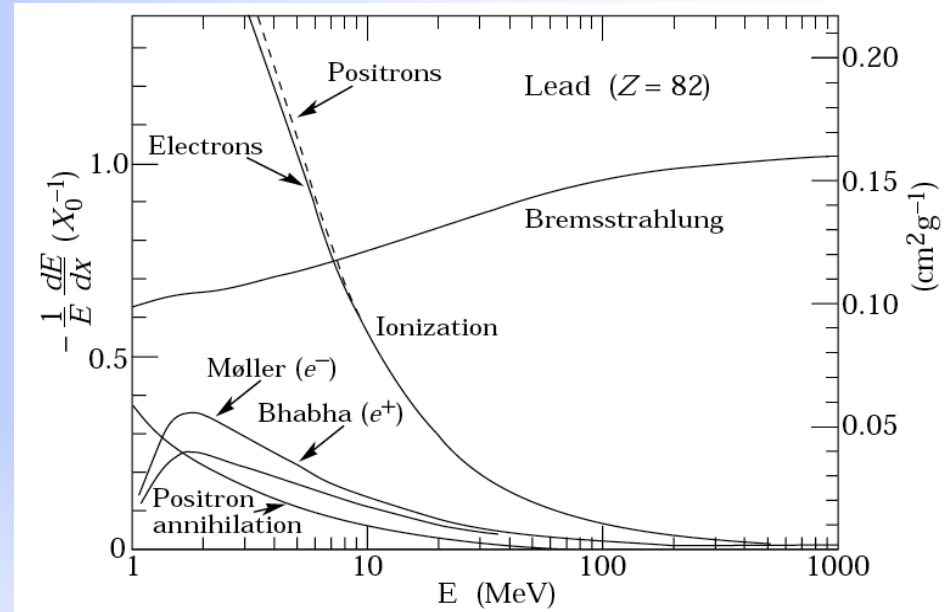
Interakcija čestica pri prolasku kroz materiju

□ 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**

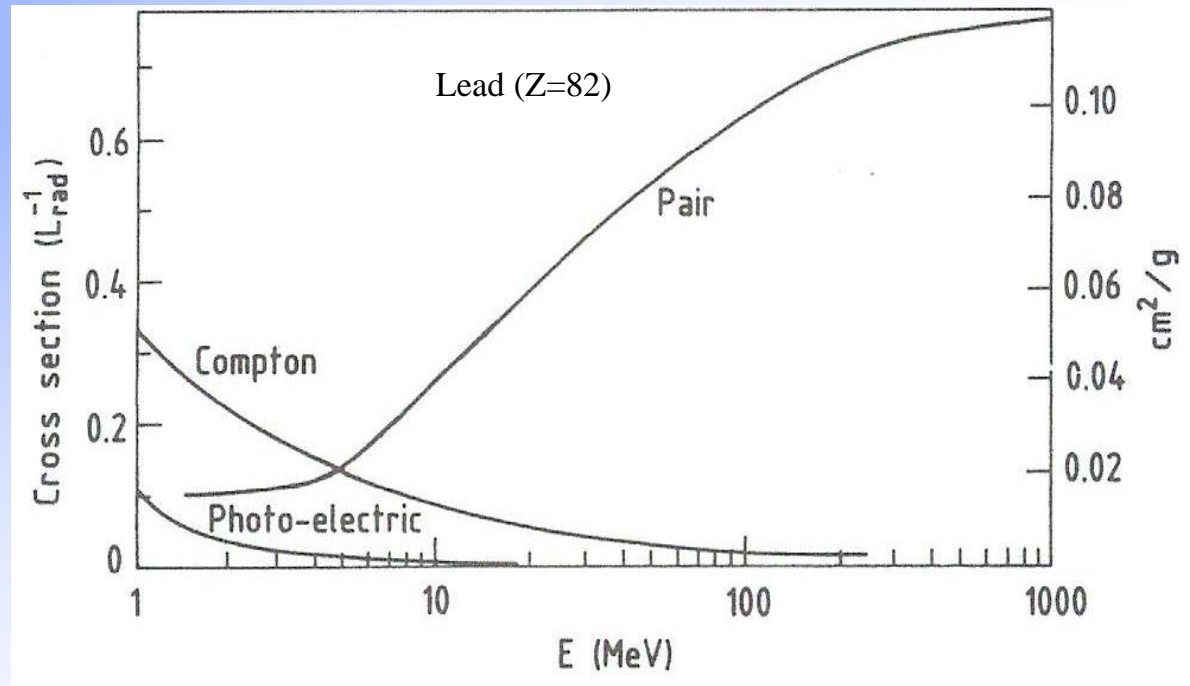


C. Fabjan,
1987

Interakcija čestica pri prolasku kroz materiju

□ Glavni procesi za fotone: γ

- Fotoelektrični efekt
- Comptonovo raspršenje
- Produkcija parova



C. Fabjan,
1987

Konceptualno pitanje

Dublje u materiju prodiru:

- a) fotoni
- 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 .

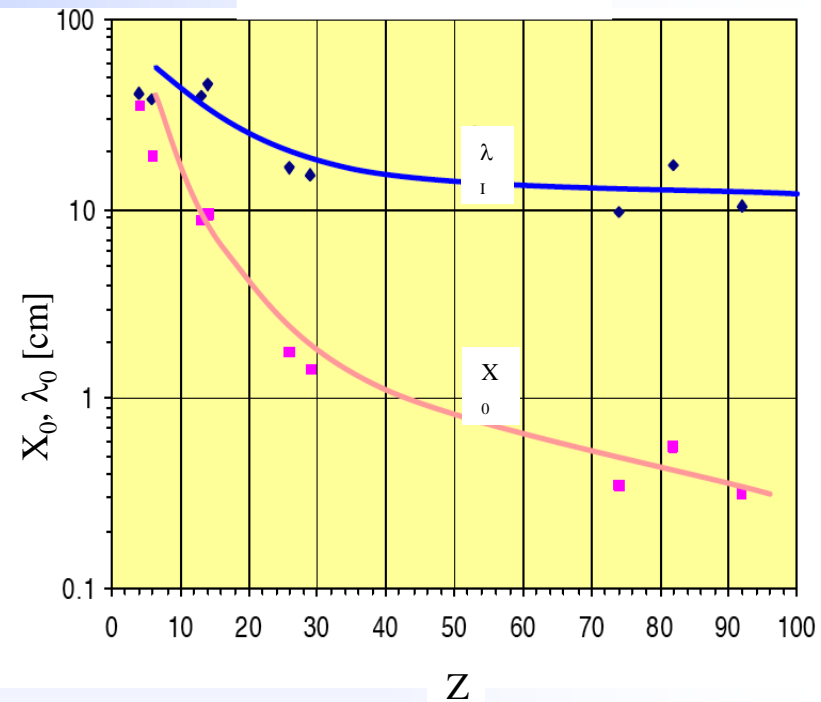
Kritična energija E_c je energija kod koje je gubitak energije na zračenje jednak gubitku energije na ionizaciju.

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

Interakcija s materijom

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

Materija I	Z	A	Z/A	X_0 (cm)	λ_I (cm)	Gustoća (g/cm ³)
H ₂ (tek.)	1	1.00 8	0.99 2	866	718	0.0708
He	2	4.0 02	0.50 0	756	520	0.125
C	6	12.0 1	0.50 0	18.8	38.1	2.27
Al	13	26. 98	0.48 2	8.9	39.4	2.70
Cu	29	63. 55	0.45 6	1.43	15.1	8.96
Pb	82	207. 2	0.39 6	0.56	17.1	11.4
W	74	183. 8	0.40 3	0.35	9.58	19.3
U	92	238. 0	0.38 7	0.32	10.5	19.0
Scint.			0.53 8	42.4	81.5	1.03
BGO			0.42 1	1.12	22.1	7.10
CsI			0.41 6	1.85	36.9	4.53
NaI			0.42 7	2.59	41.1	3.67



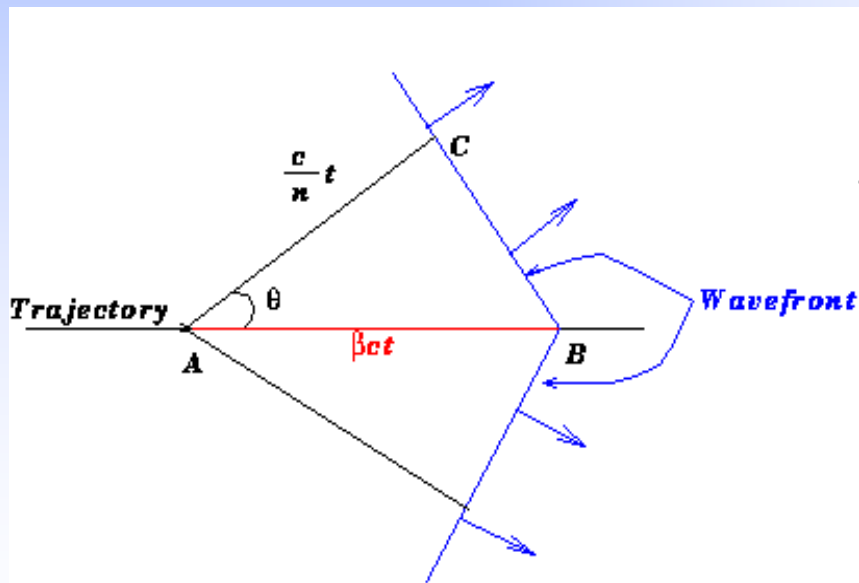
Čerenkovljevo zračenje

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” fotona

Simul.



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

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



Mirko Planinić

Čerenkovljevi detektori

Svojstva čerenkovljevih detektora

- Mjerenjem kuta mjerimo brzinu
- Dominira plava svjetlost

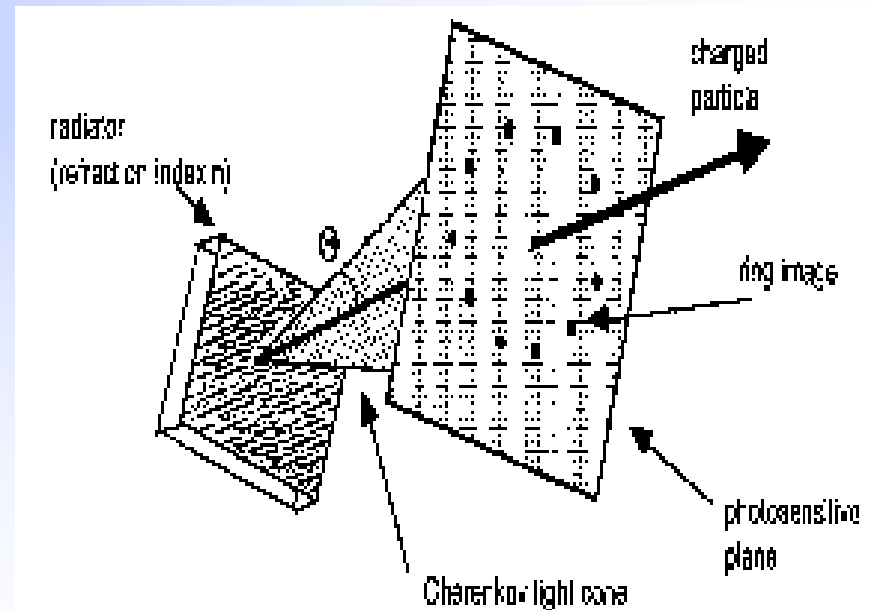
Primjena čerenkovljevih detektora

- 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 $\sim \frac{1}{\lambda^2}$

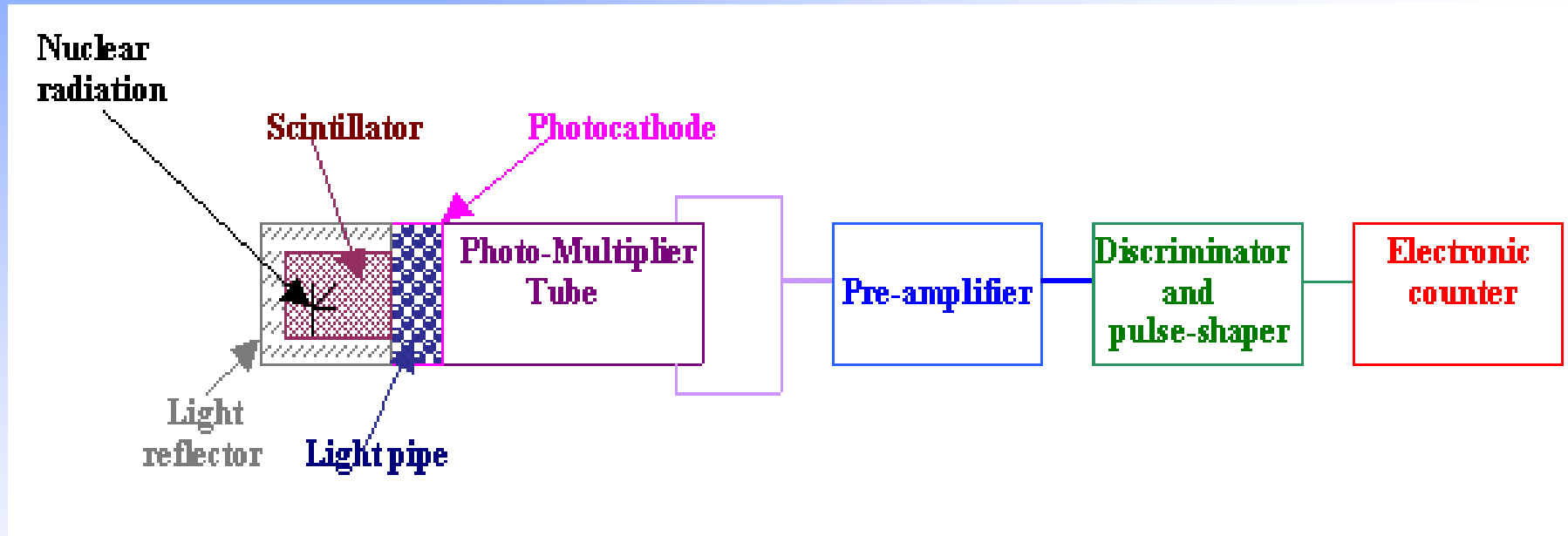
λ -valna duljina



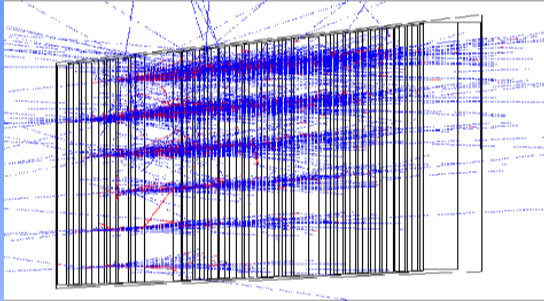
Uvod u detekciju čestica

- Detekcija čestica

Scintilatorima



Kalorimetri



Energija i pozicija čestica se može mjeriti metodama totalne apsorpcije :

- Ulazna 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 $\sim E^{-1/2}$ → dobra na vis. Energ.
- Kalorimetri daju brzu (100 ns) inf. o ukupnoj energiji

Zašto je bolja rezolucija na visokim energijama?

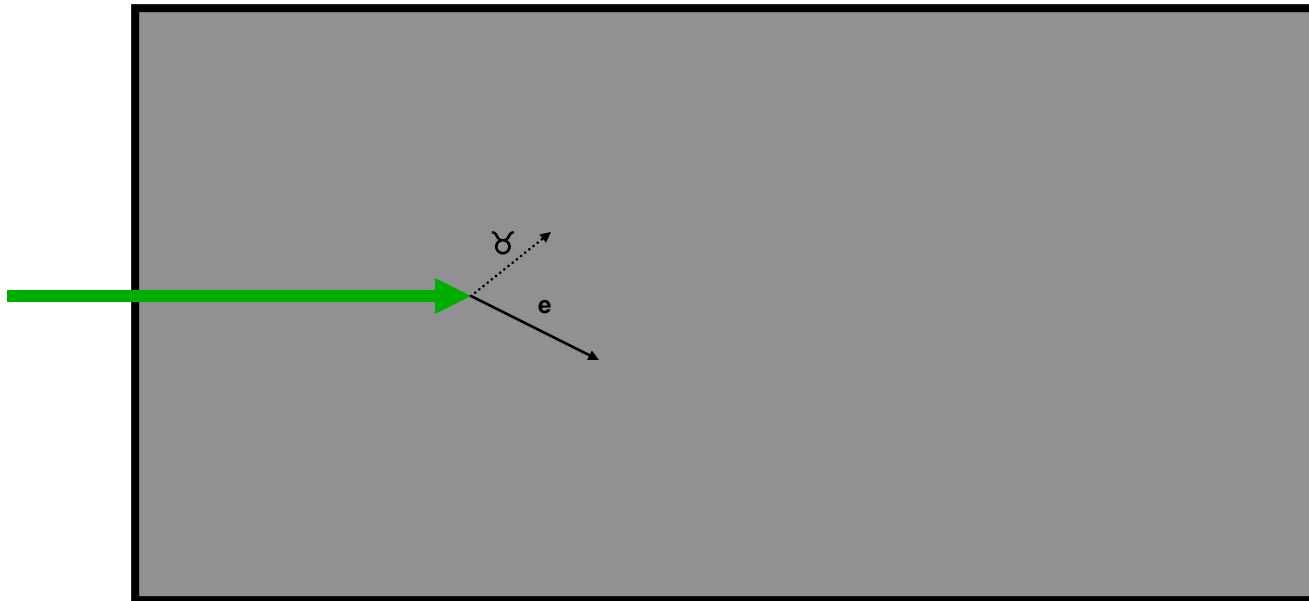


Elektromagnestki pljusak



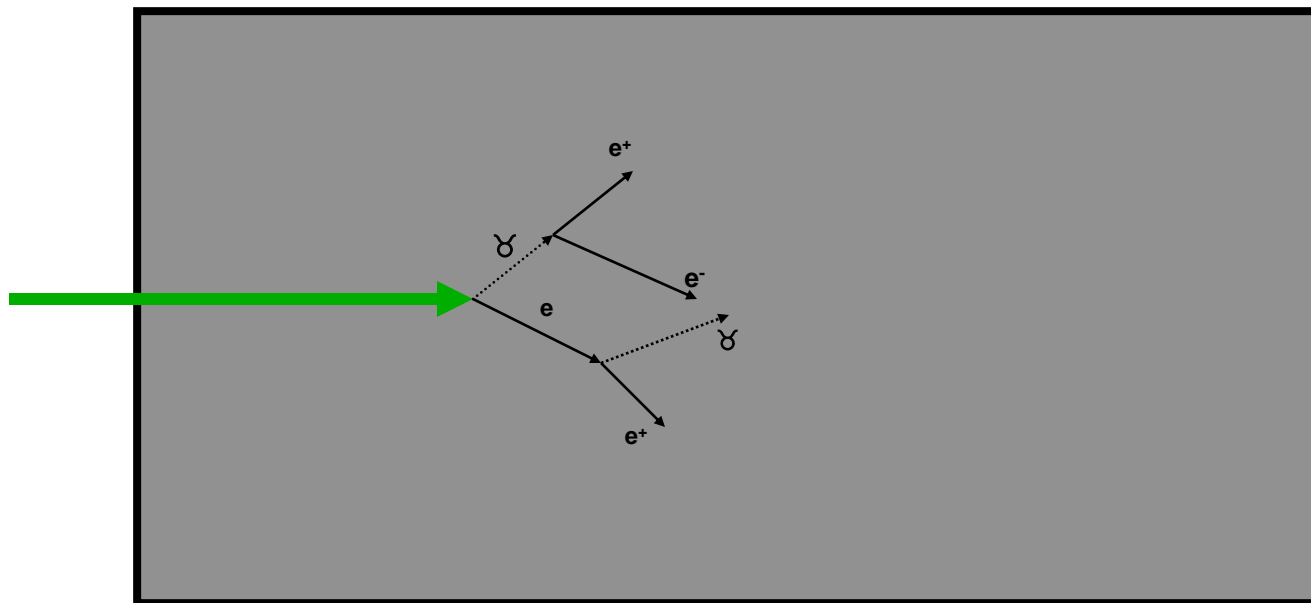


Elektromagnetski pljusak



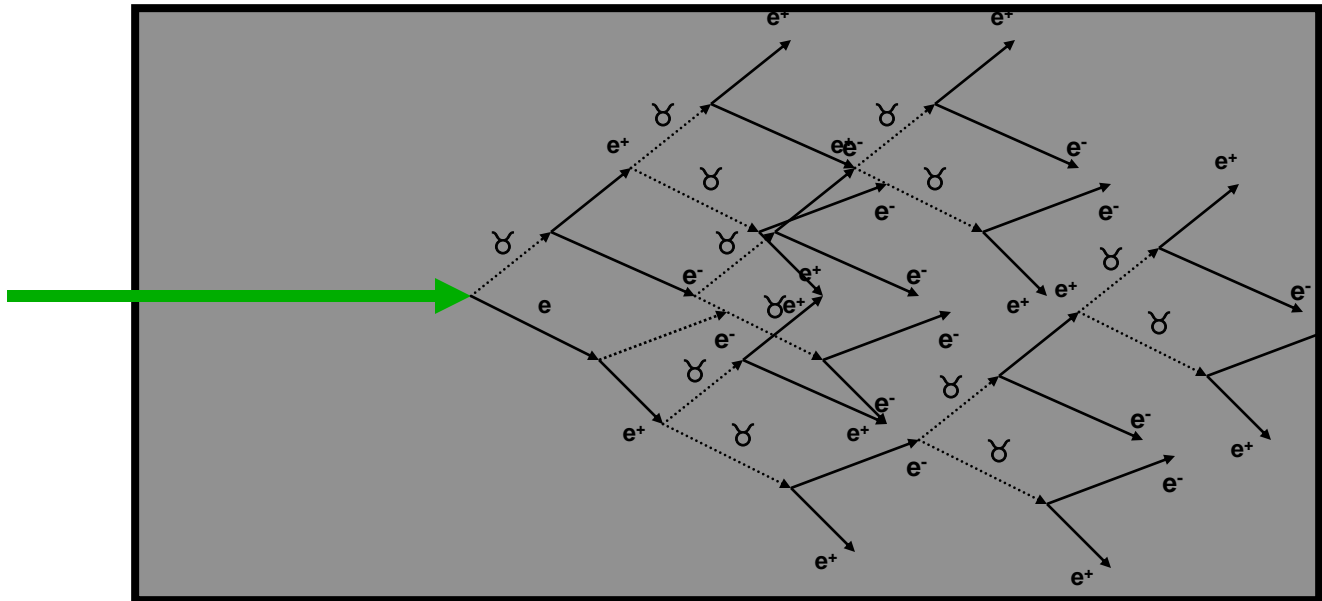


Elektromagnetski pljusak





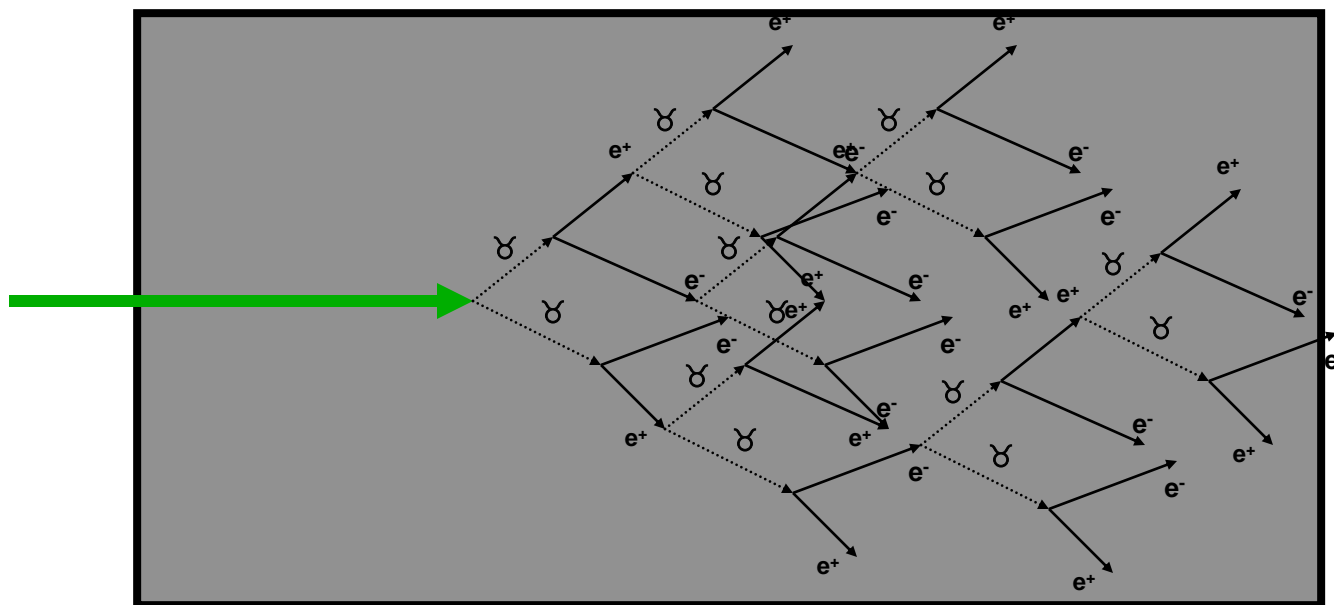
Elektromagnetski pljusak



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



Elektromagnetski pljusak

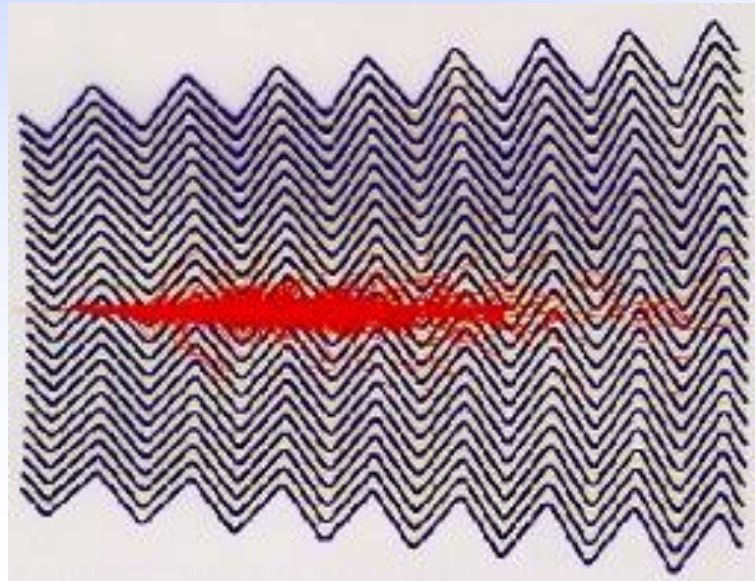


*Uočite: Stvaraju se samo fotoni, elektroni i pozitroni

Hadronski kalorimetar

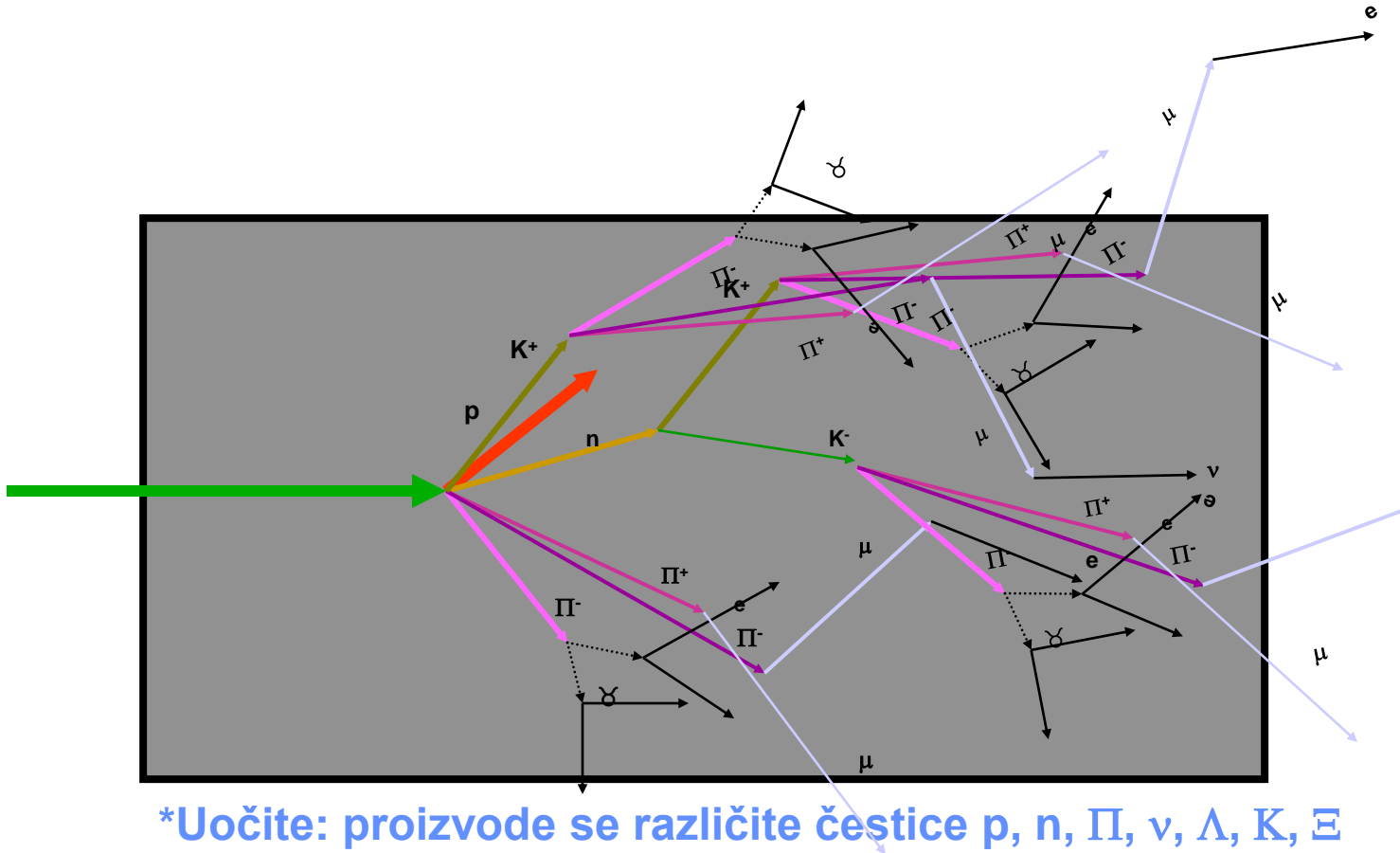
Hadronski pljusak : ulazni hadron \rightarrow neelastični sudar
 \rightarrow proizvodnja sekundarnog hadrona ...

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

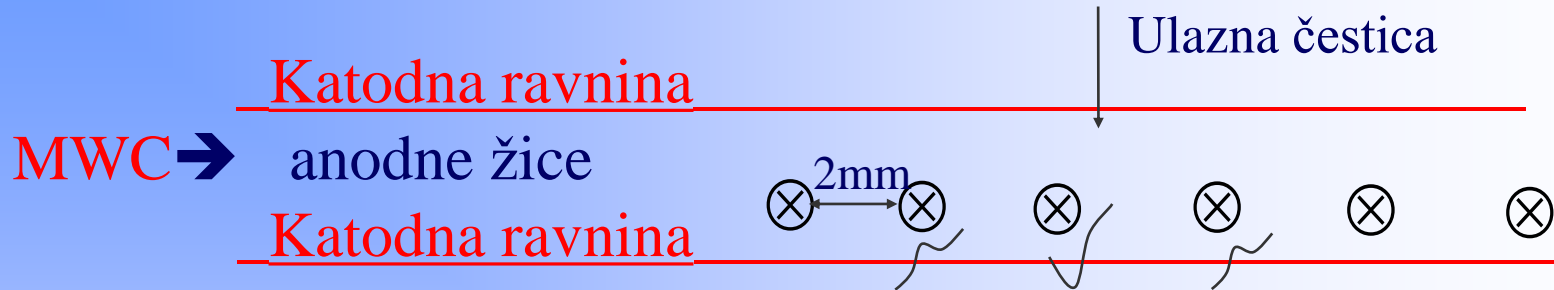




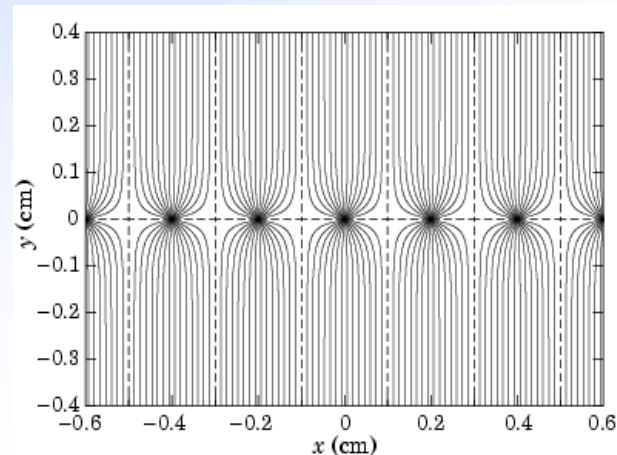
Hadronska kaskada



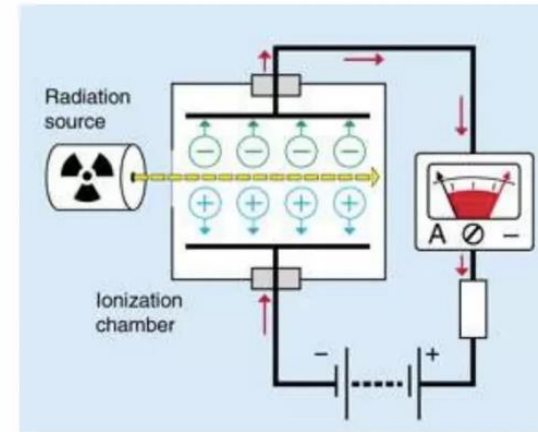
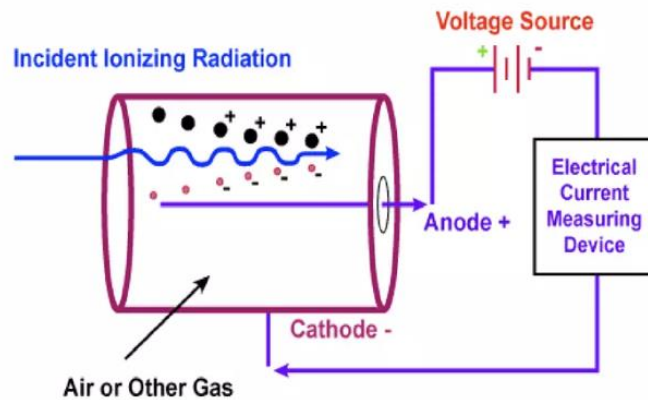
Mnogožičane komore



- 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 ~ 1 mm
- Razlučivanje više hitaca



Ionizacijski detektori

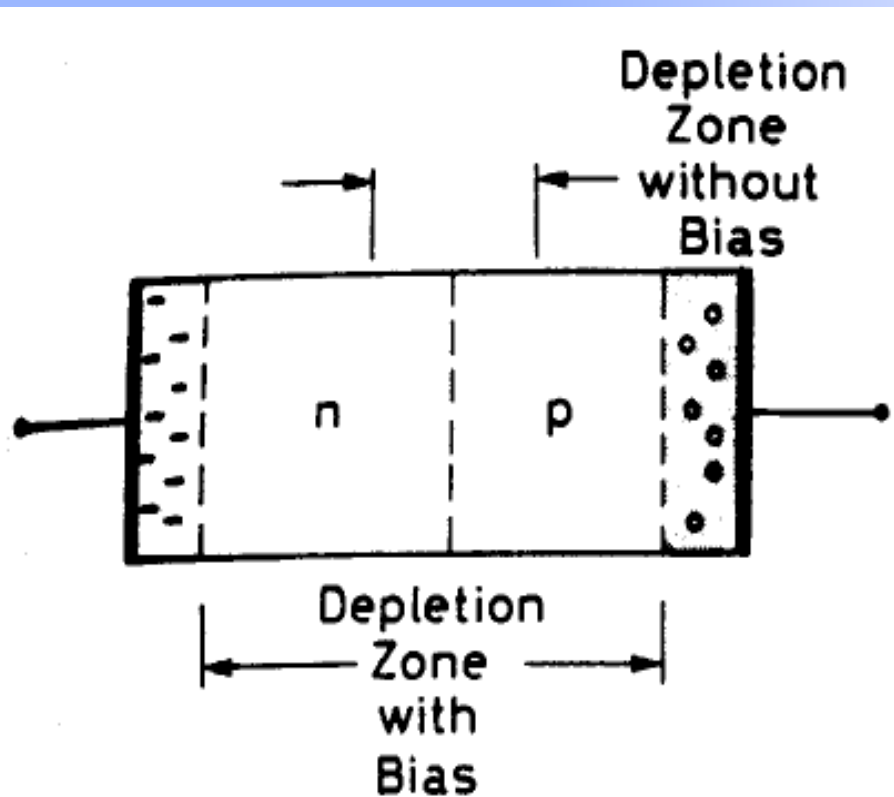


Parovi elektron ion se stvaraju kad nabijena čestica ide kroz plin. Elektroni idu na anodu, a pozitivni ioni na katodu. Razlika potencijala između katode i anode tjera naboje na gibanje kroz strujni krug, a ta struja se onda očitava na ampermetru.

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)

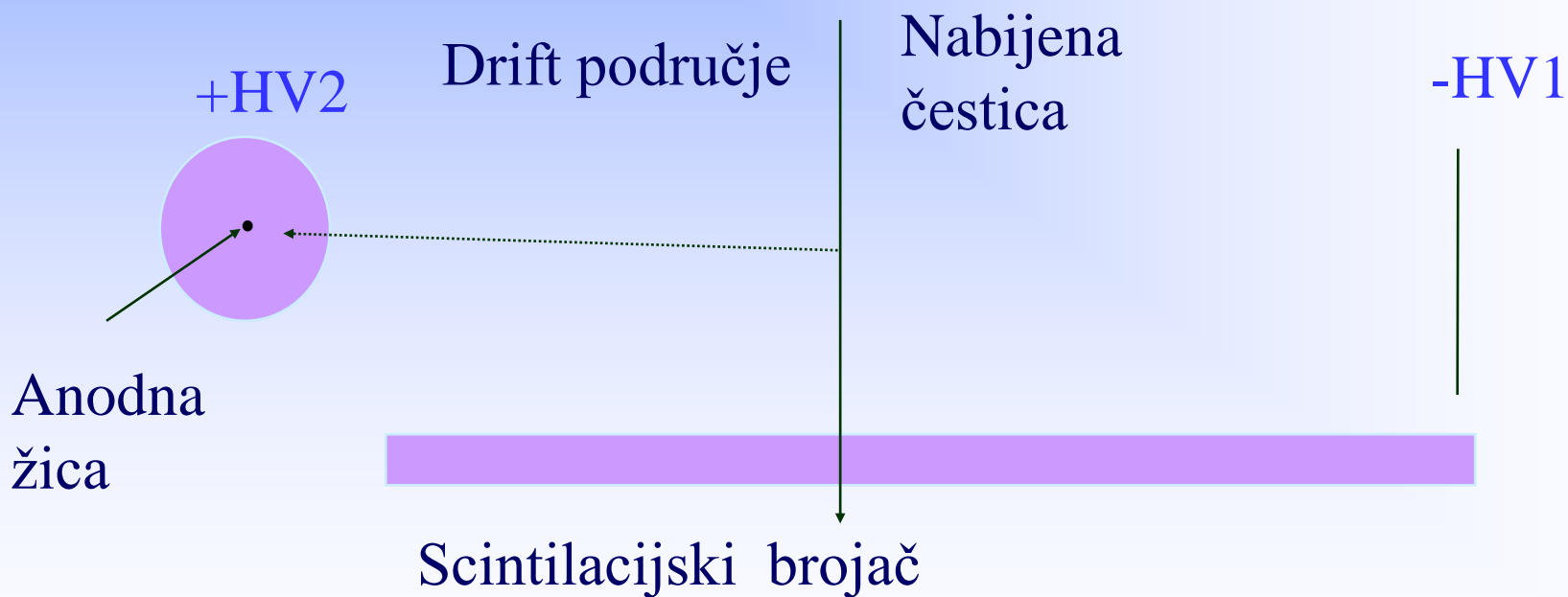
- $E_{\text{elektron} - \text{šupljina}} < E_{\text{elektron-ion}}$ → Bolja energijska rezolucija
- Bolja moć zaustavljanja od plinskih detektora (veća gustoća)
- Male dimenzije ($< 50 \mu\text{m}$) → dobra poz. Rezolucija
- Veća osjetljivost na zračenje (kraći vijek trajanja)
- Detektori male površine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



Ostale ionizacijske komore

Driftne (vlačne) komore

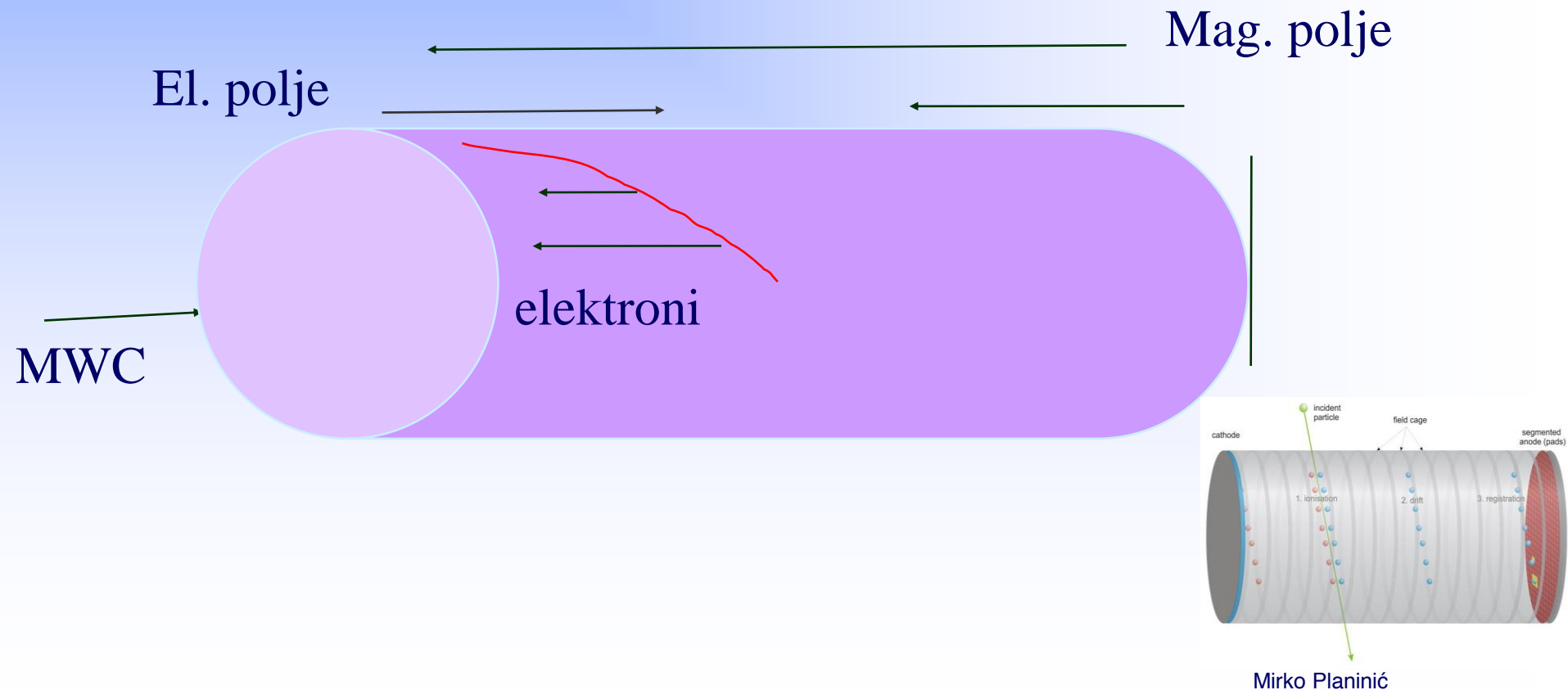
➤ Prostorna informacija → iz mjerenja vremena pomaka (drifta) elektrona u ionizacijskom događaju



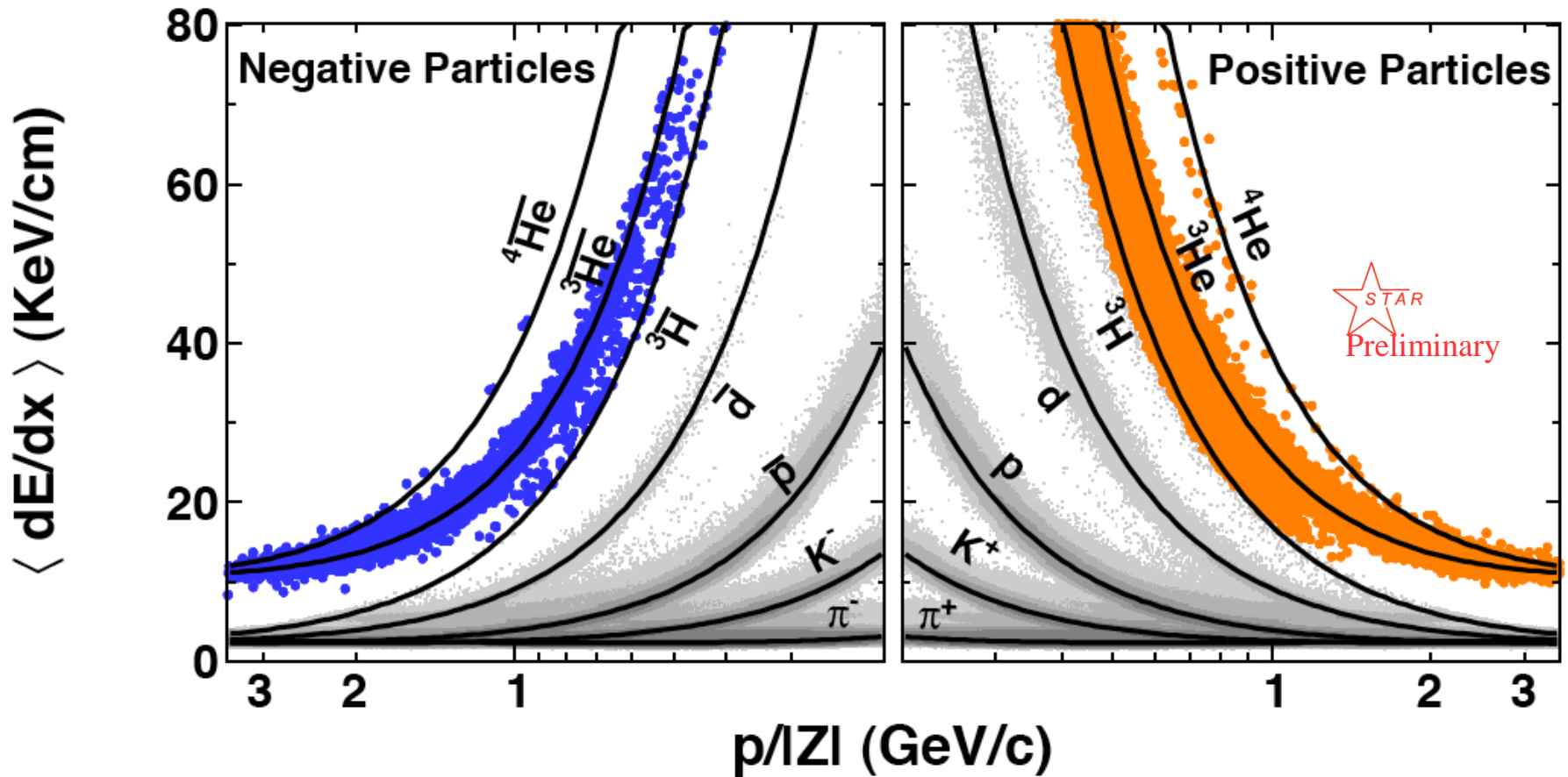
Ostale ionizacijske komore

Komore vremenske projekcije (time projection chamber)

- 3D tračni detektor
- Kombinacija vlačne i mnogožičane komore



Kako još identificirati čestice ...

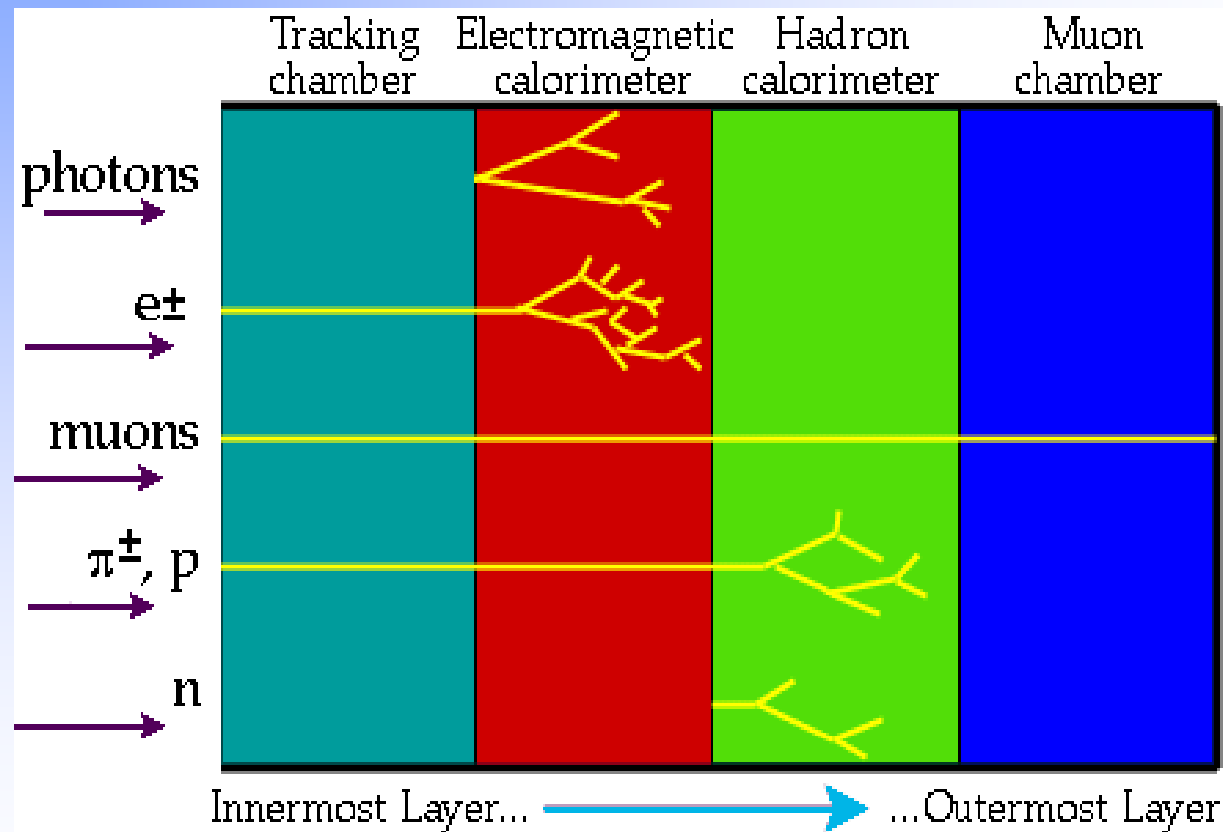


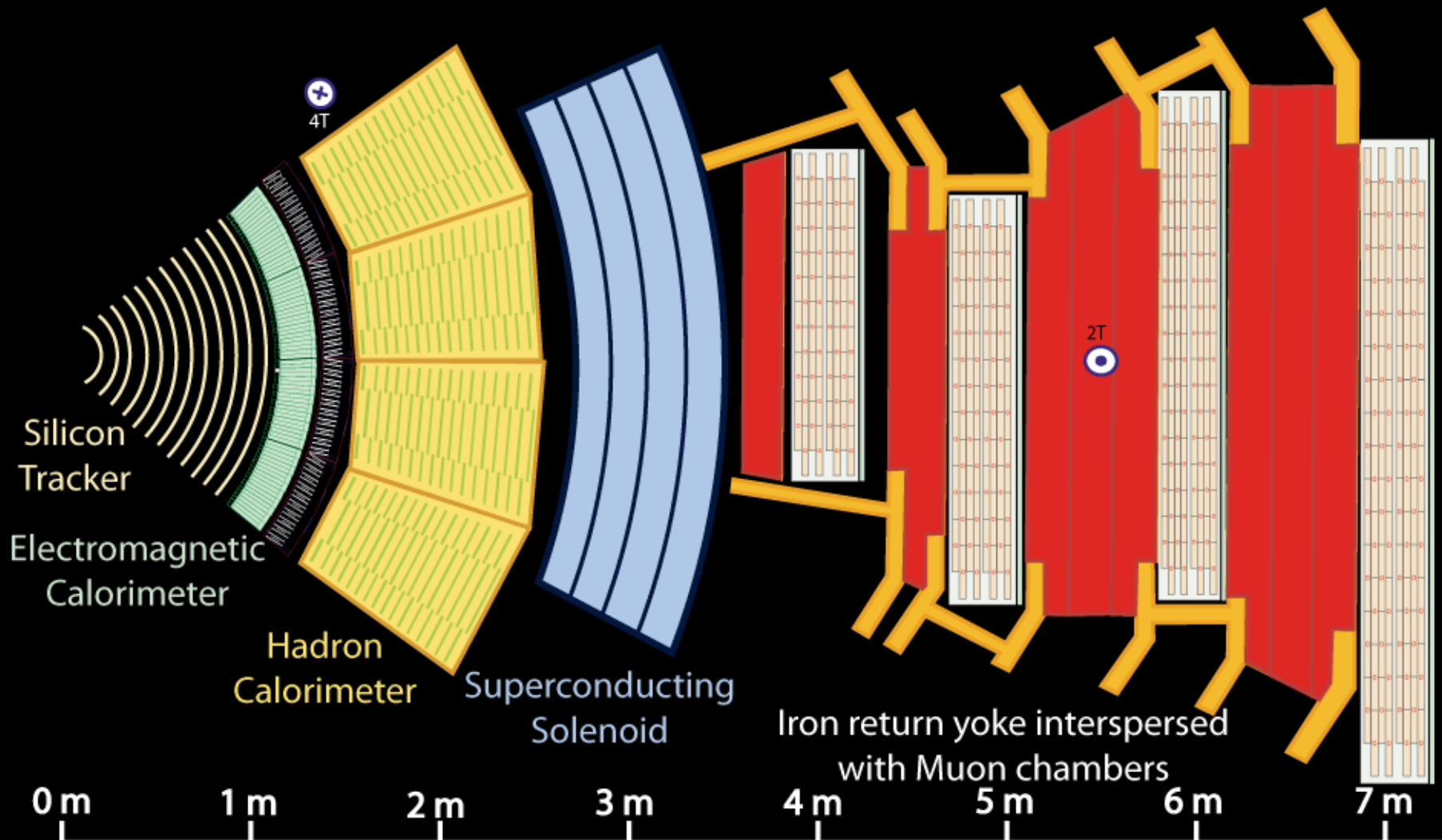
dE/dx vs Rigidity

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

Hibridni detektori

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





Key:

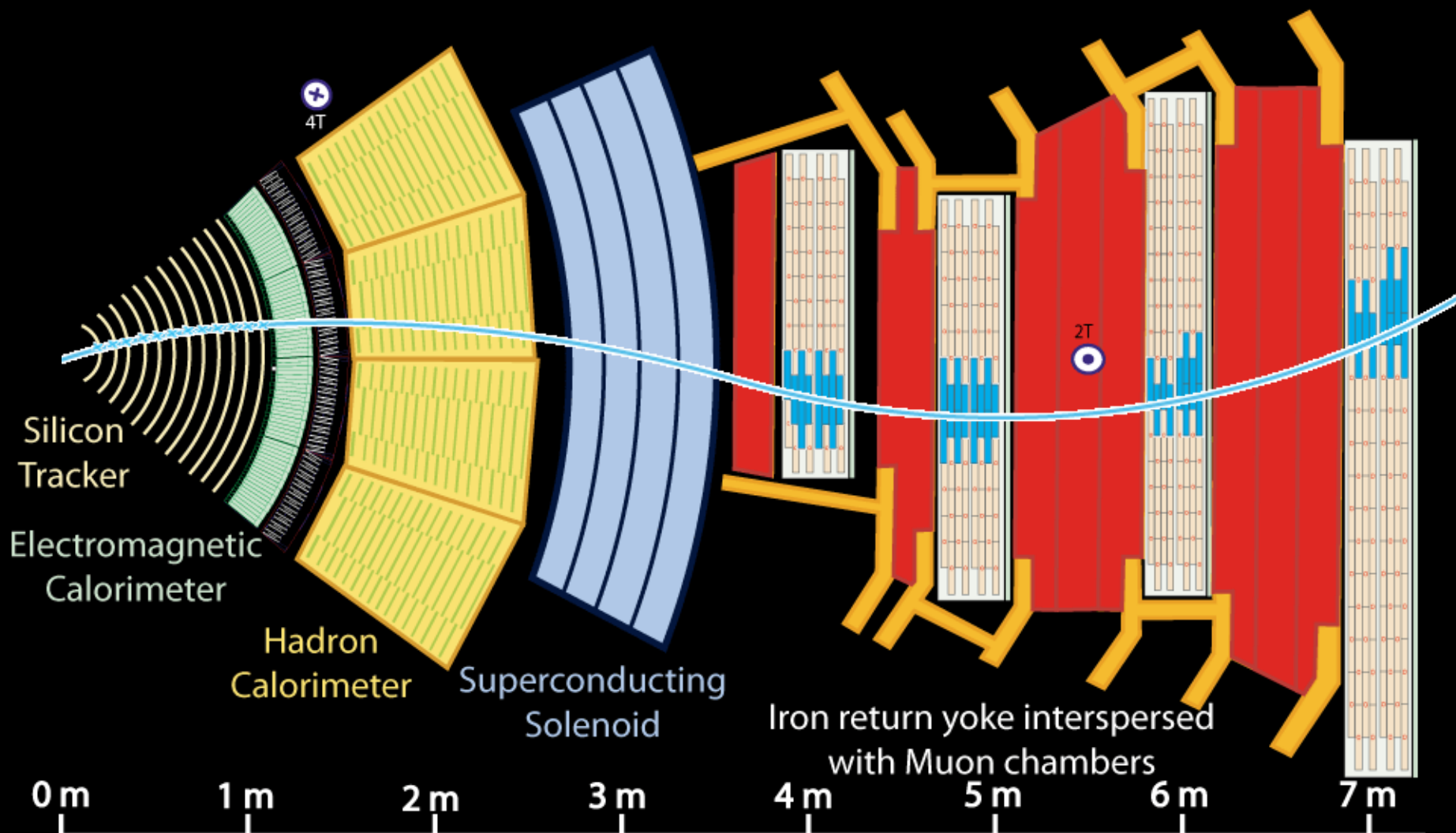
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Silicon Tracker

Electromagnetic Calorimeter

Hadron Calorimeter

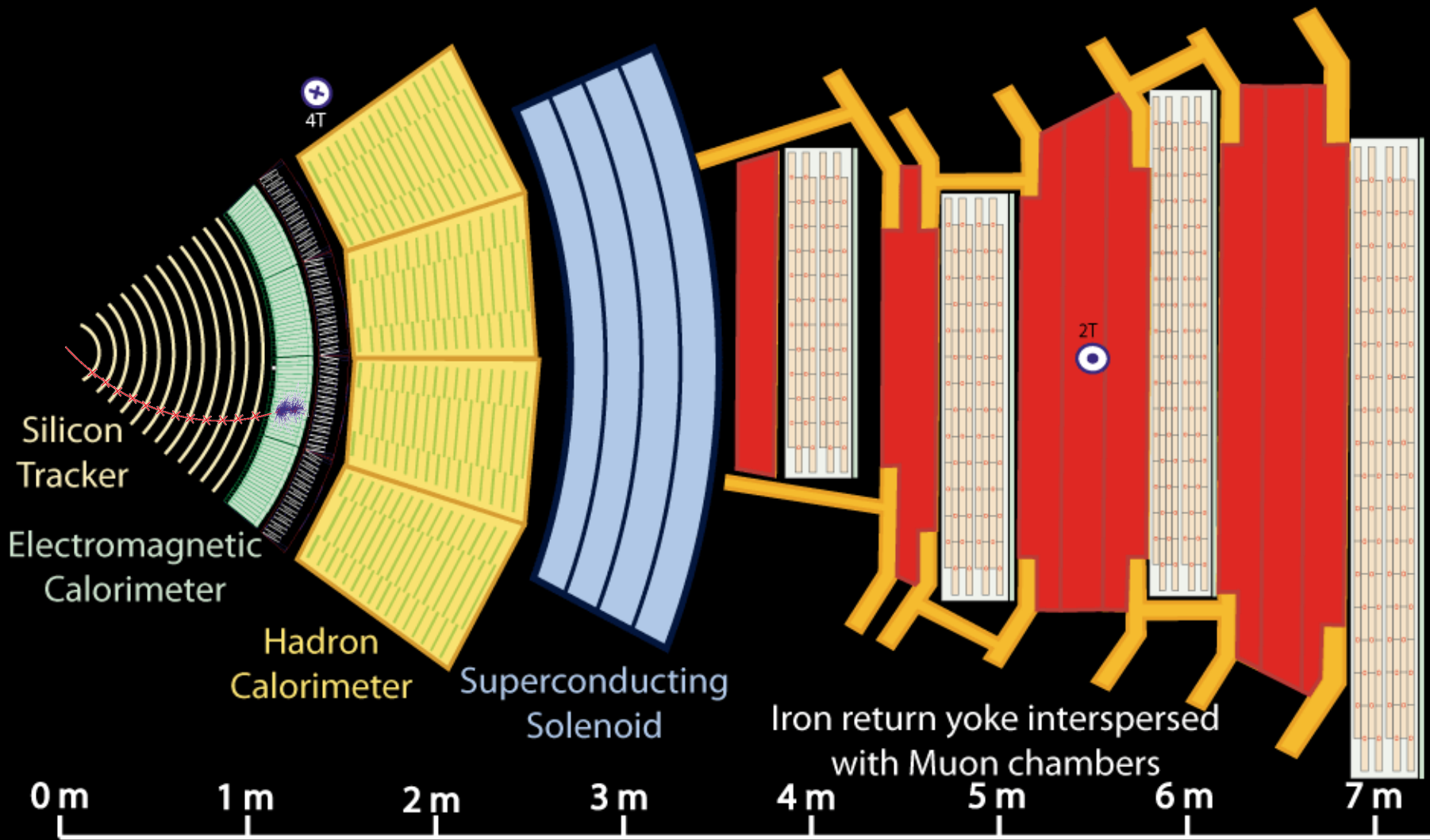
Superconducting Solenoid

Iron return yoke interspersed with Muon chambers

0 m 1 m 2 m 3 m 4 m 5 m 6 m 7 m

Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

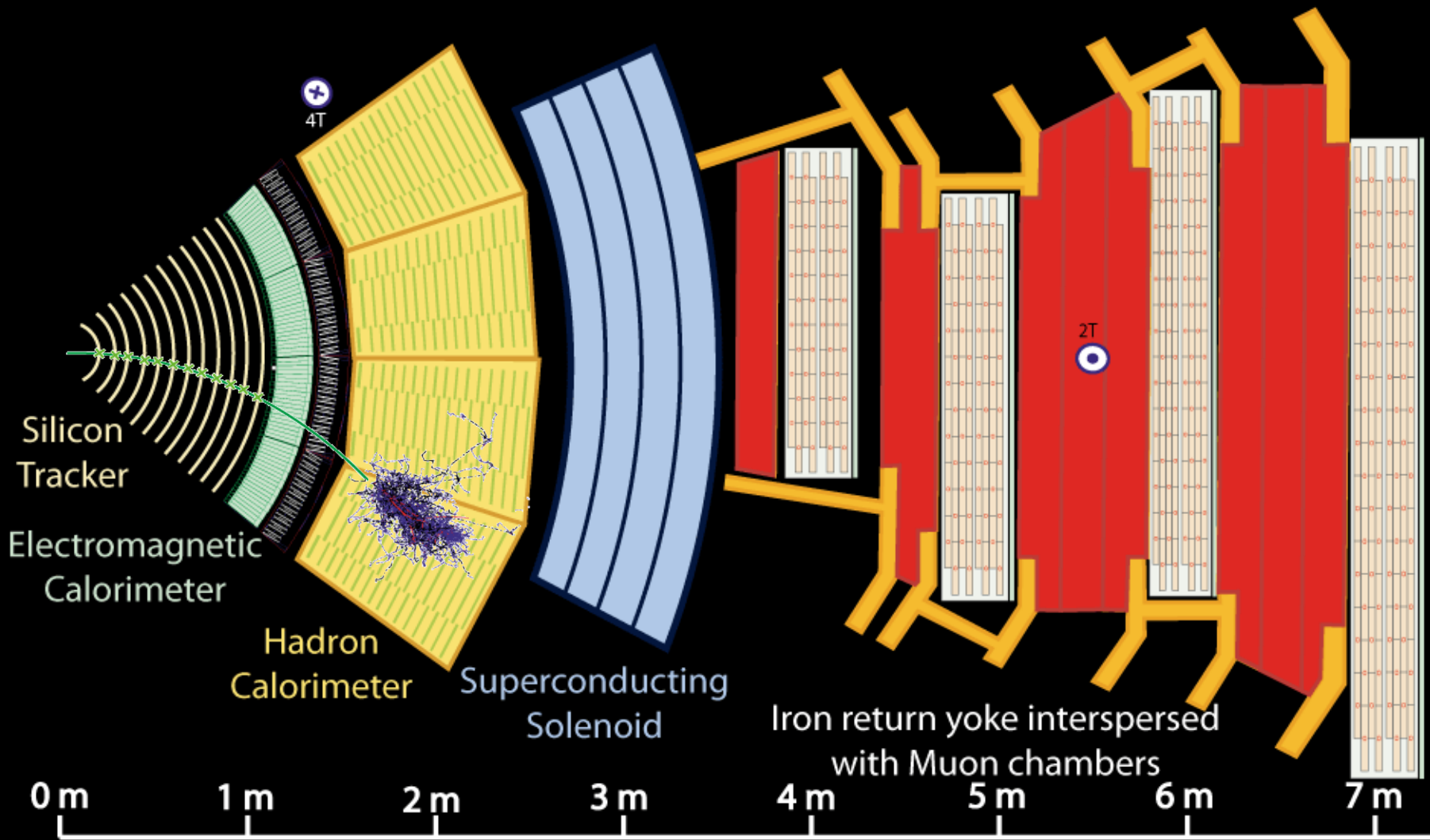
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

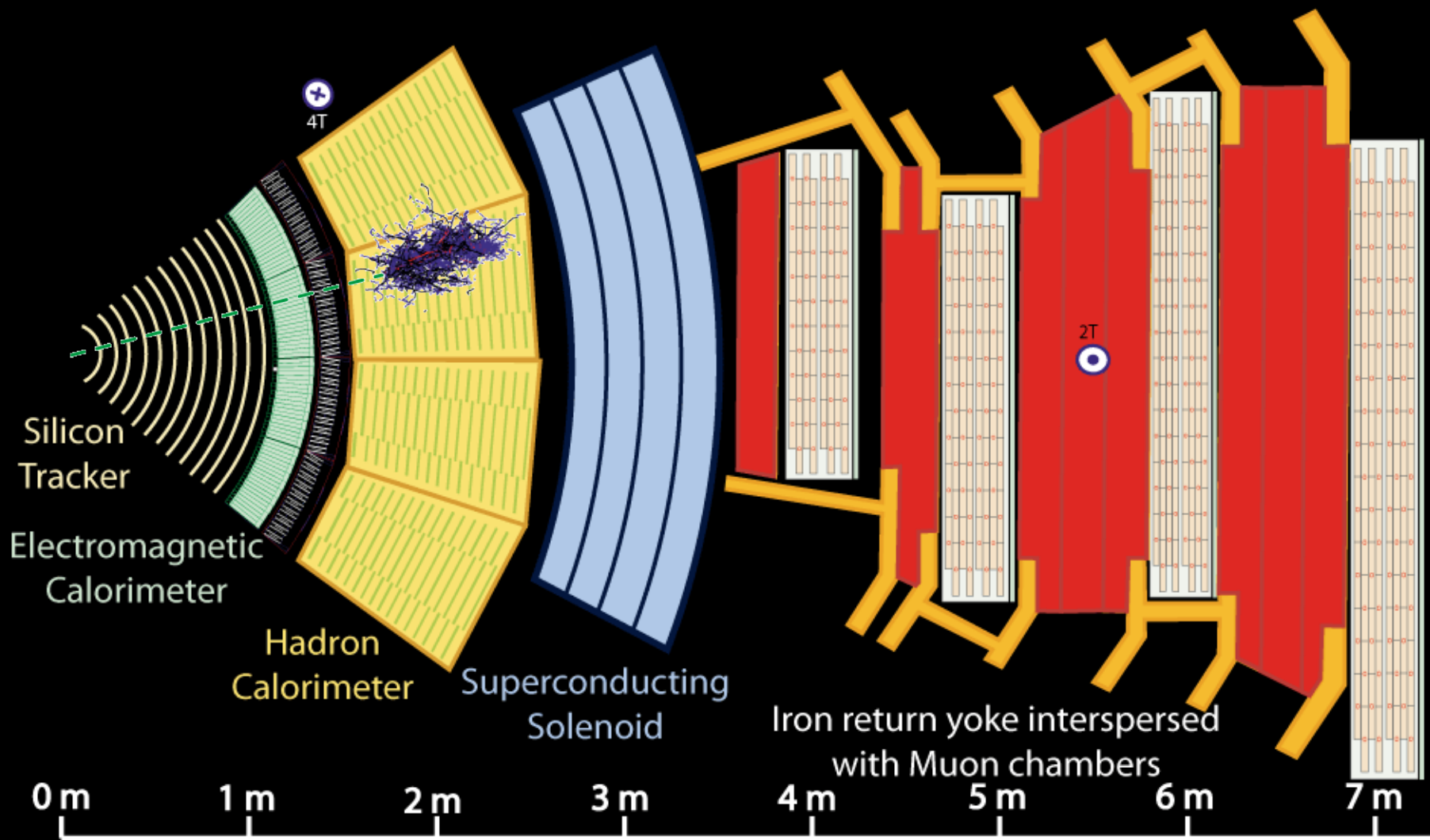
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

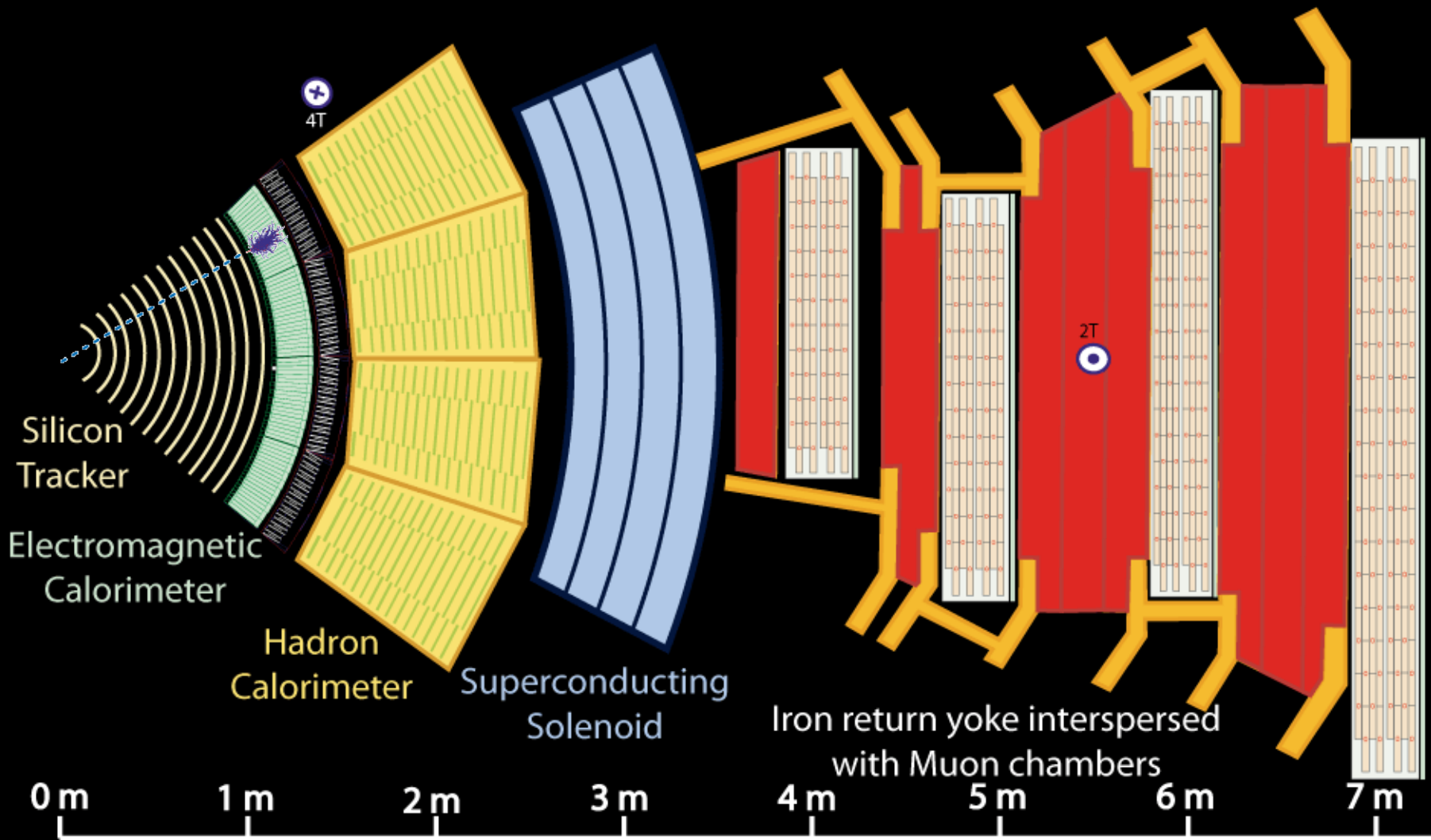
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

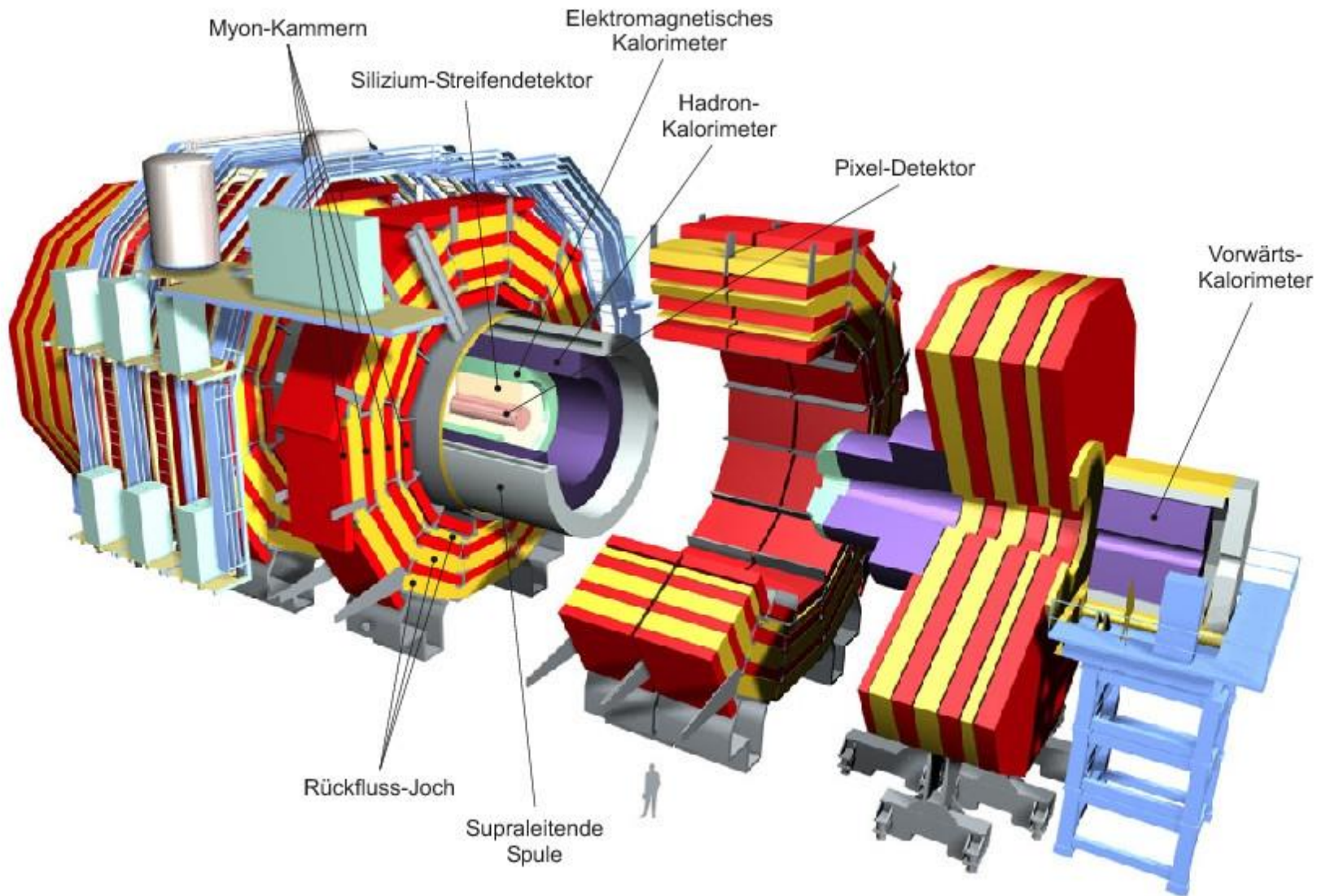
- - - Photon



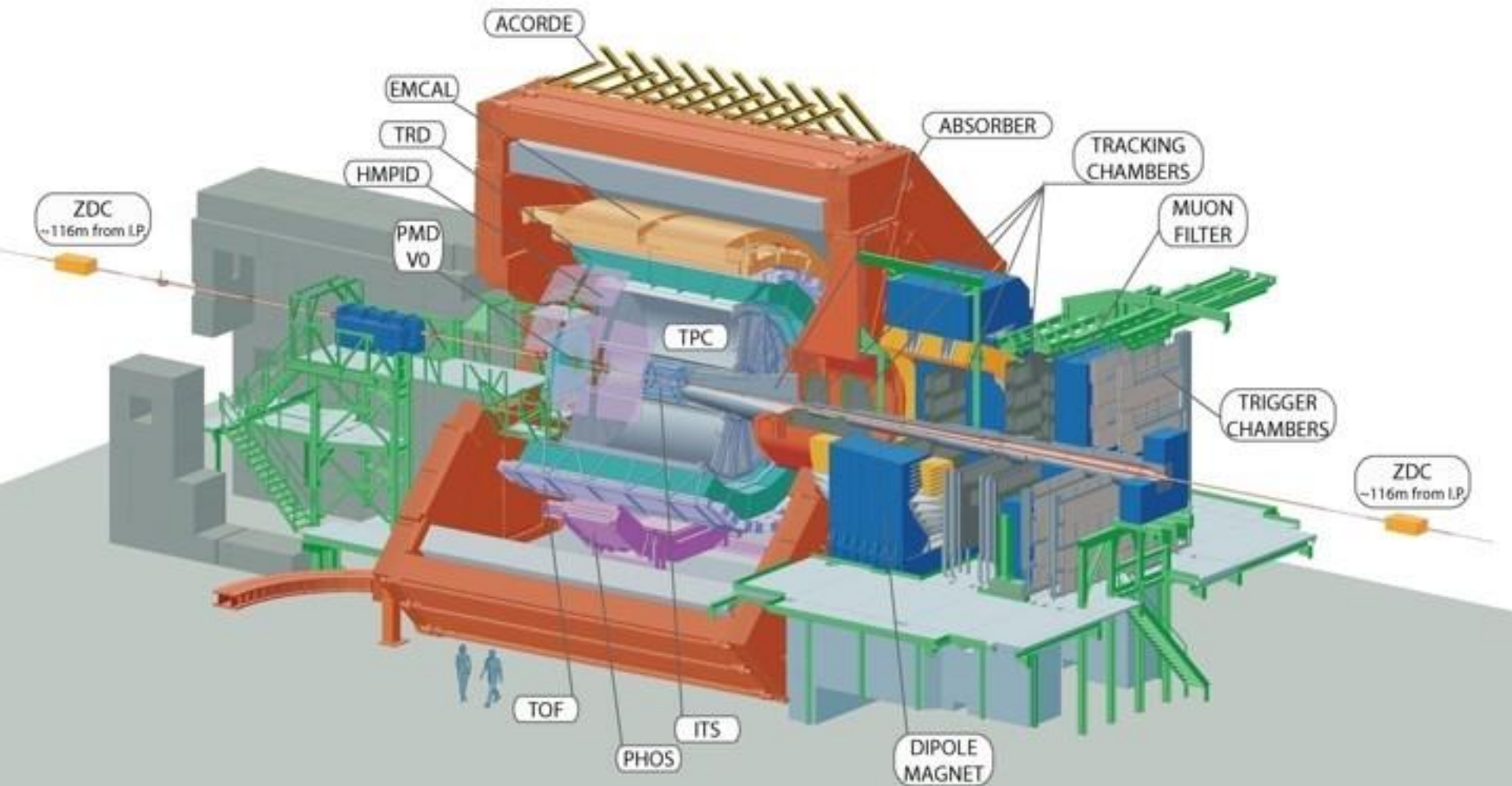
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

CMS detektor



ALICE experiment



Spin off company - PicoLogic

www.picologic.hr



PicoLogic

Floating multi-channel picoammeters



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



Kratki izlet u metafiziku



The Power of
MEANING

FINDING FULFILLMENT
IN A WORLD OBSESSED
WITH HAPPINESS

*Emily Esfahani
Smith*

"WARM AND WISE . . . READING THIS BOOK IS A LIFE-TRANSFORMING
EXPERIENCE." —SUSAN CAIN, AUTHOR OF QUIET

Hvala na pažnji!

