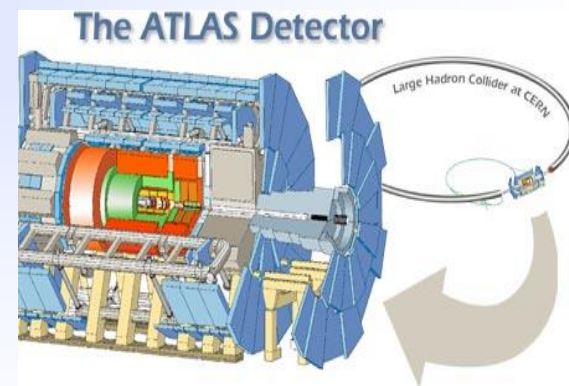
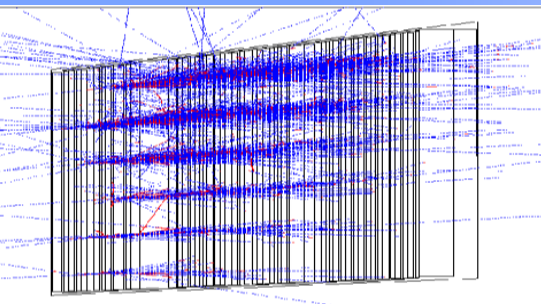


Ubrzivači i detektori u fizici elementarnih čestica

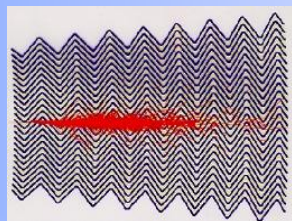
Mirko Planinić
PMF



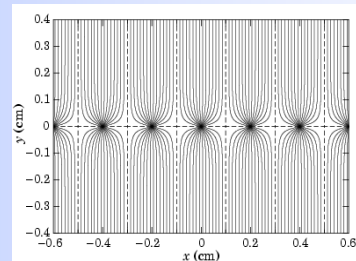
Sadržaj



■ Elektromagnetski kalorimetar

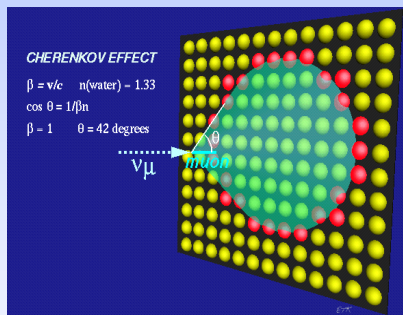
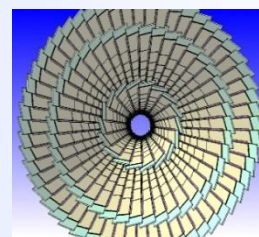


■ Hadronski kalorimetar

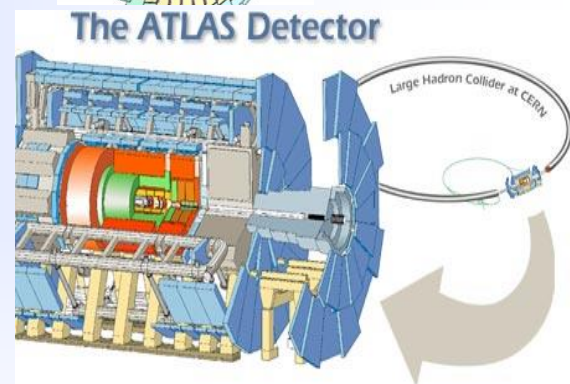
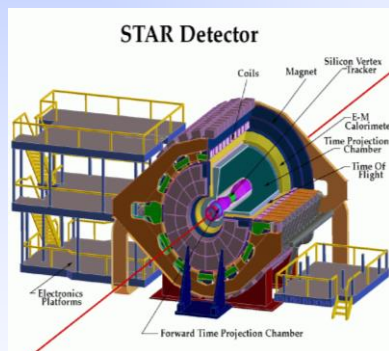


■ Mnogožičane komore

■ Poluvodički detektori



■ Čerenkovljevi detektori



■ Hibridni detektori (STAR, ATLAS)

■ Od ubrzivača do suprasudarivača

■ Interakcija čestica s materijom

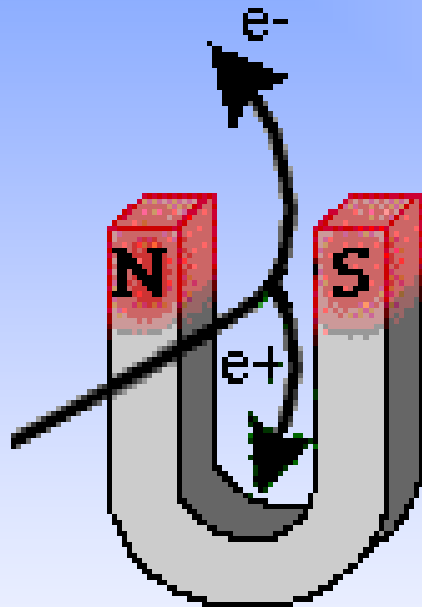
■ Sažetak



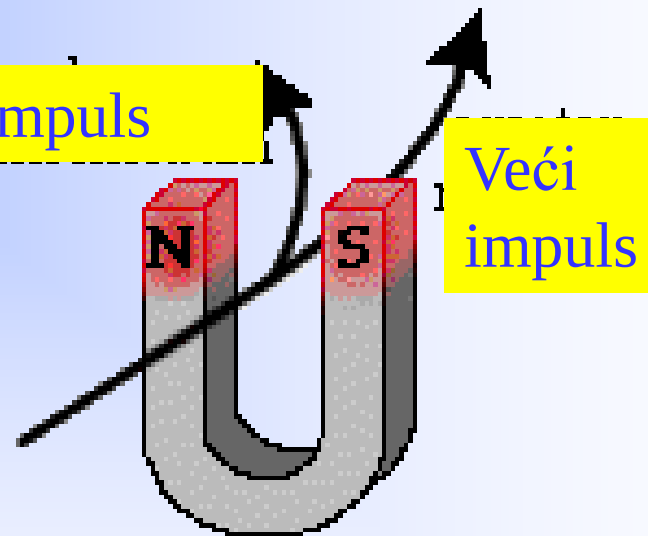
Što je cilj detekcije čestica?

■ Detekcija čestica

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



Manji impuls



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:

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



Uvod

■ 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



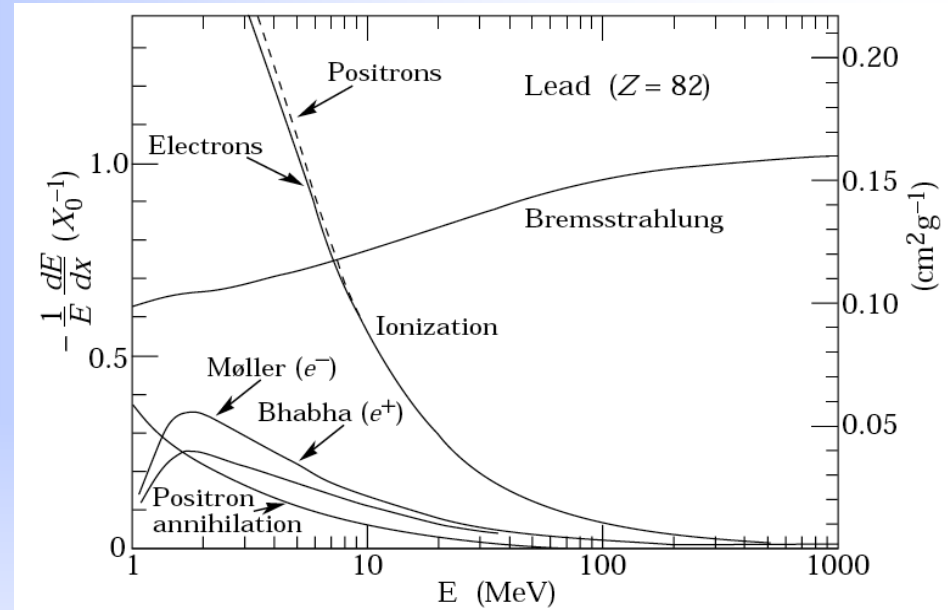
Interakcija čestica pri prolasku kroz materiju

■ 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



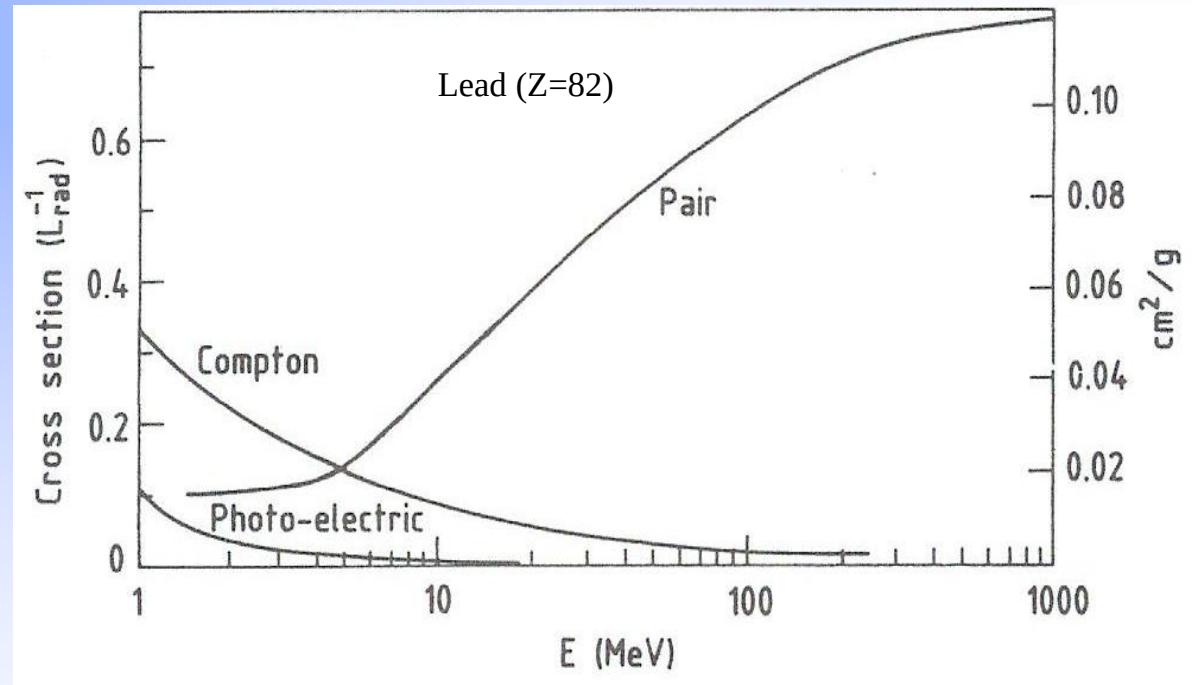
C. Fabjan,
1987



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



Interakcija čestica s materijom

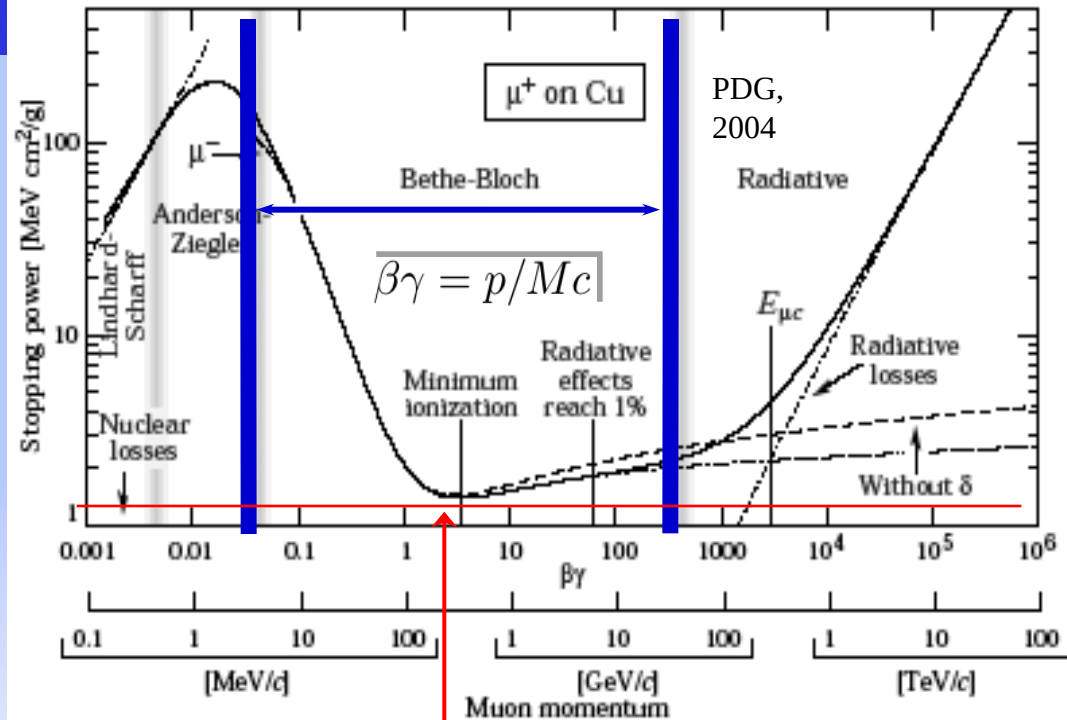
Gubitak energije- Ionizacija

- Bethe-Bloch jednačba:
Prosječan gubitak energije

$-dE/dx$ jedinica:

$$(\text{MeV/cm})/(\text{g/cm}^3) = (\text{MeV cm}^2/\text{g})$$

$-dE/dx$ za nabijene čestice: $M \gg m_e$



Minimum na približno.: $\beta\gamma \approx 3$

($-dE/dx$ relativističkih čestica:
Približno minimum-ionizing particle
(MIP))

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

gdje je:

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma_e m_e/M + (m_e/M)^2}$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$$



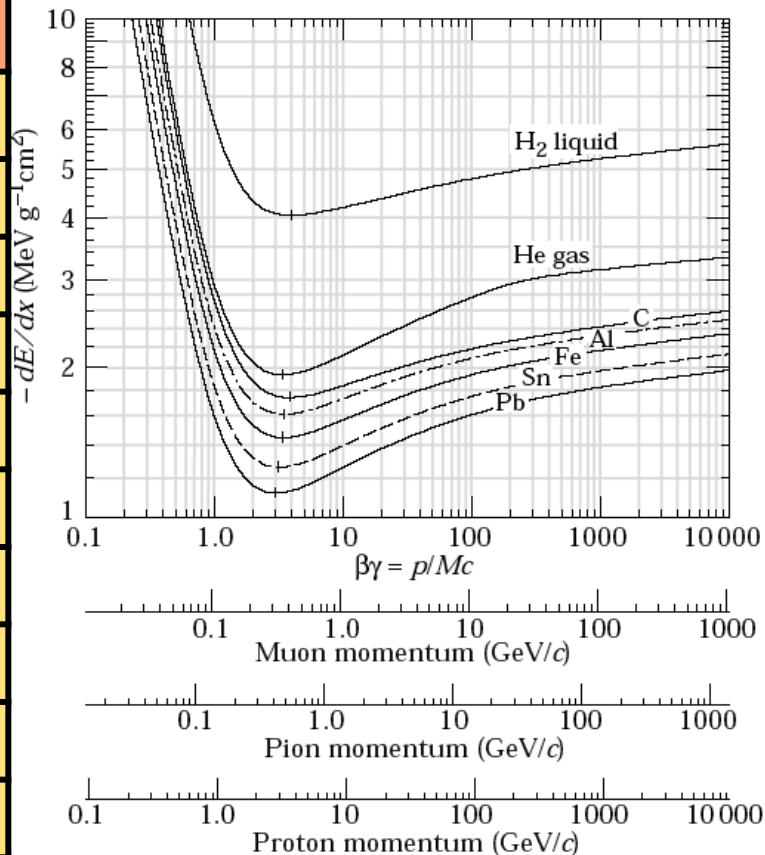
Međudjelovanje s materijom

■ Ionizacija

- Ovisnost o materijalu

Slaba ovisnost jer je: $Z/A \approx 0.5$:

Mater.	Z	A	Z/A	dE/dx min (MeVcm ² /g)	Gustoća (g/cm ³)
H ₂ (tekuć.)	1	1.008	0.992	4.034	0.0708
He	2	4.002	0.500	1.937	0.125
C	6	12.01	0.500	1.745	2.27
Al	13	26.98	0.482	1.615	2.70
Cu	29	63.55	0.456	1.403	8.96
Pb	82	207.2	0.396	1.123	11.4
W	74	183.8	0.403	1.145	19.3
U	92	238.0	0.387	1.082	19.0
Scint.			0.538	1.936	1.03
BGO			0.421	1.251	7.10
CsI			0.416	1.243	4.53
NaI			0.427	1.305	3.67



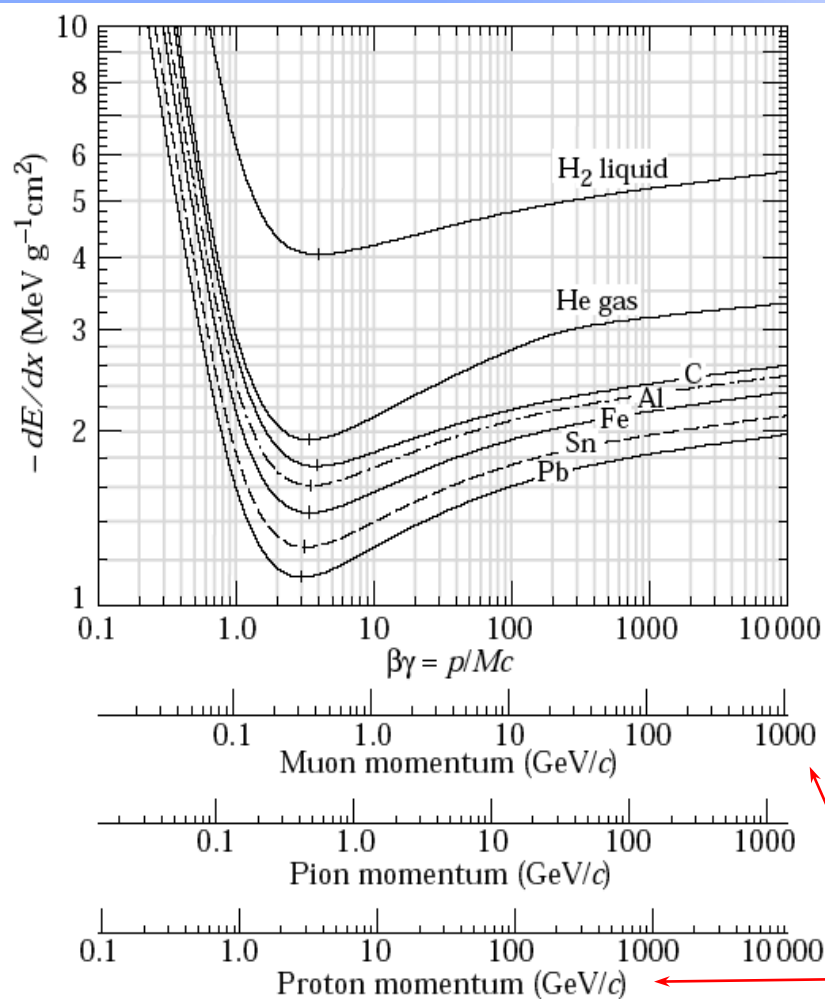
PDG, 2004
 Scintillator: $dE/dx|_{\min} \approx 2 \text{ MeV/cm}$
 Tungsten: $dE/dx|_{\min} \approx 22 \text{ MeV/cm}$



Međudjelovanje s materijom

■ Ionizacija

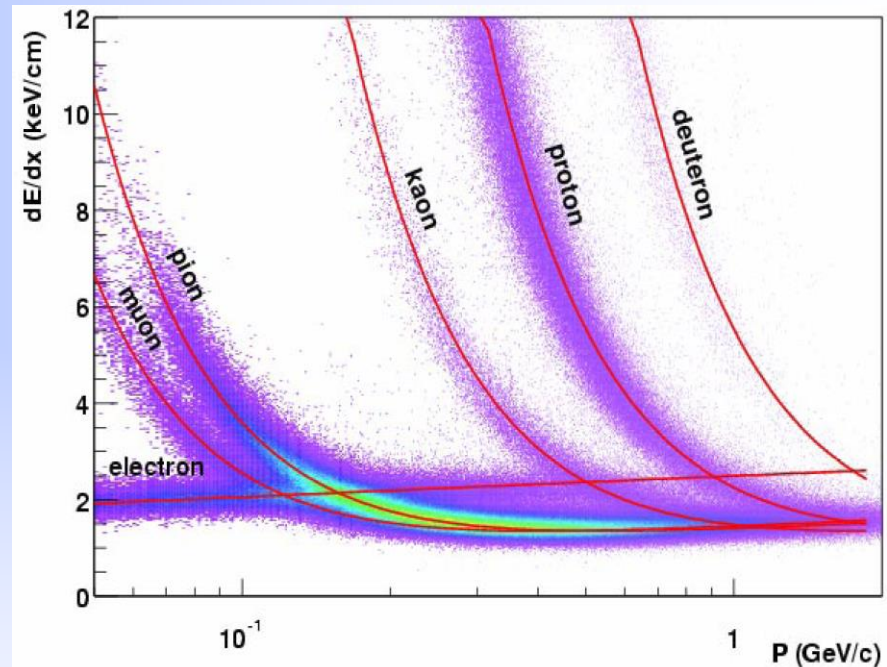
- Ovisnost o masi čestice



PDG,
2004

• STAR Time-Projection Chamber (TPC):

10% Methan / 90% Argon (2mbar iznad atmosferskog tlaka)



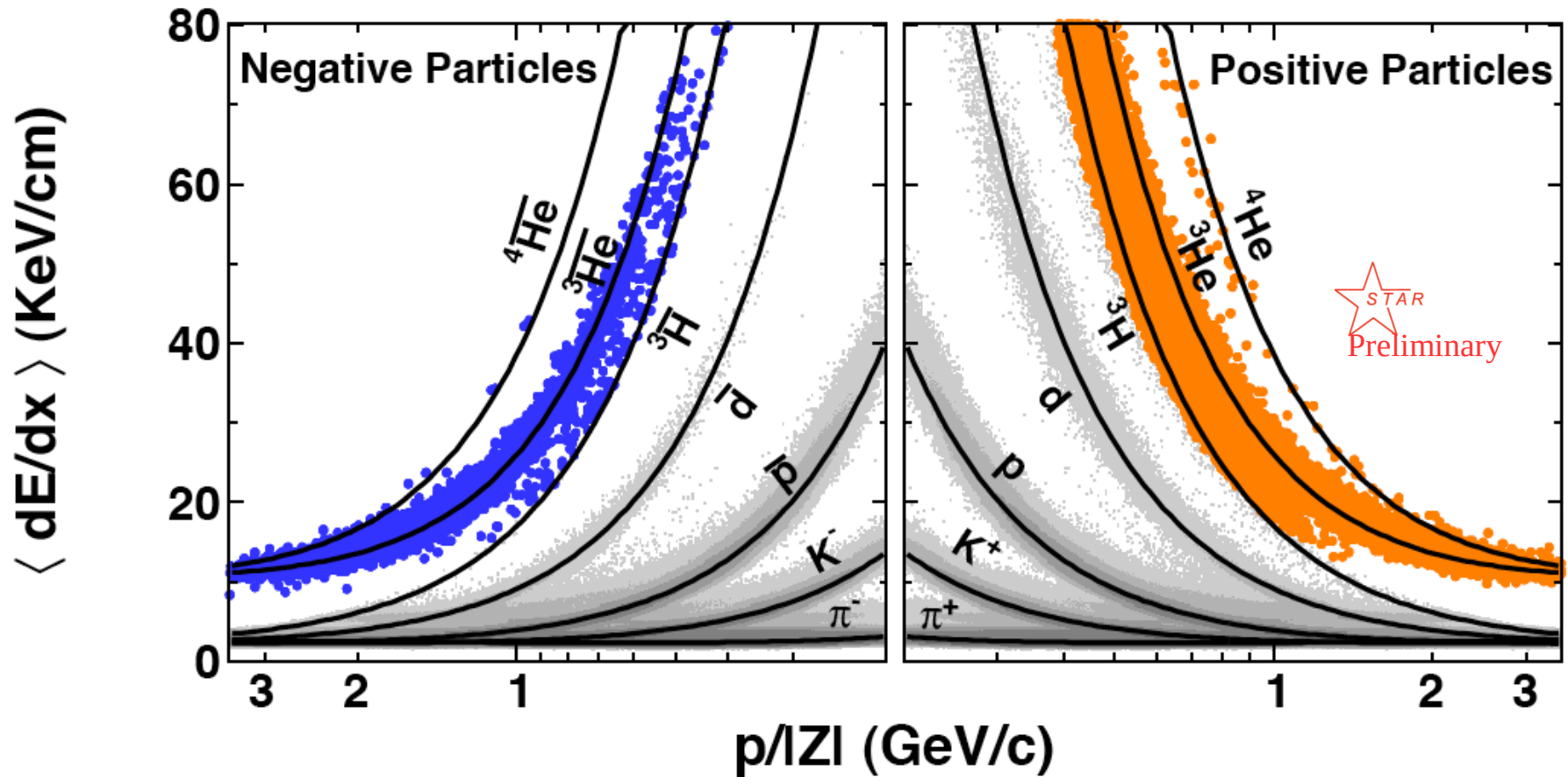
$$p = \beta\gamma Mc$$

- Minimum u $\beta\gamma \approx 3$ se dešava za fiksni impuls p na raznim mjestima u ovisnosti o masi čestice.
- To je način identifikacije čestica na malim impulsima.

• Primjer: $M_p/M_\mu \approx 10$



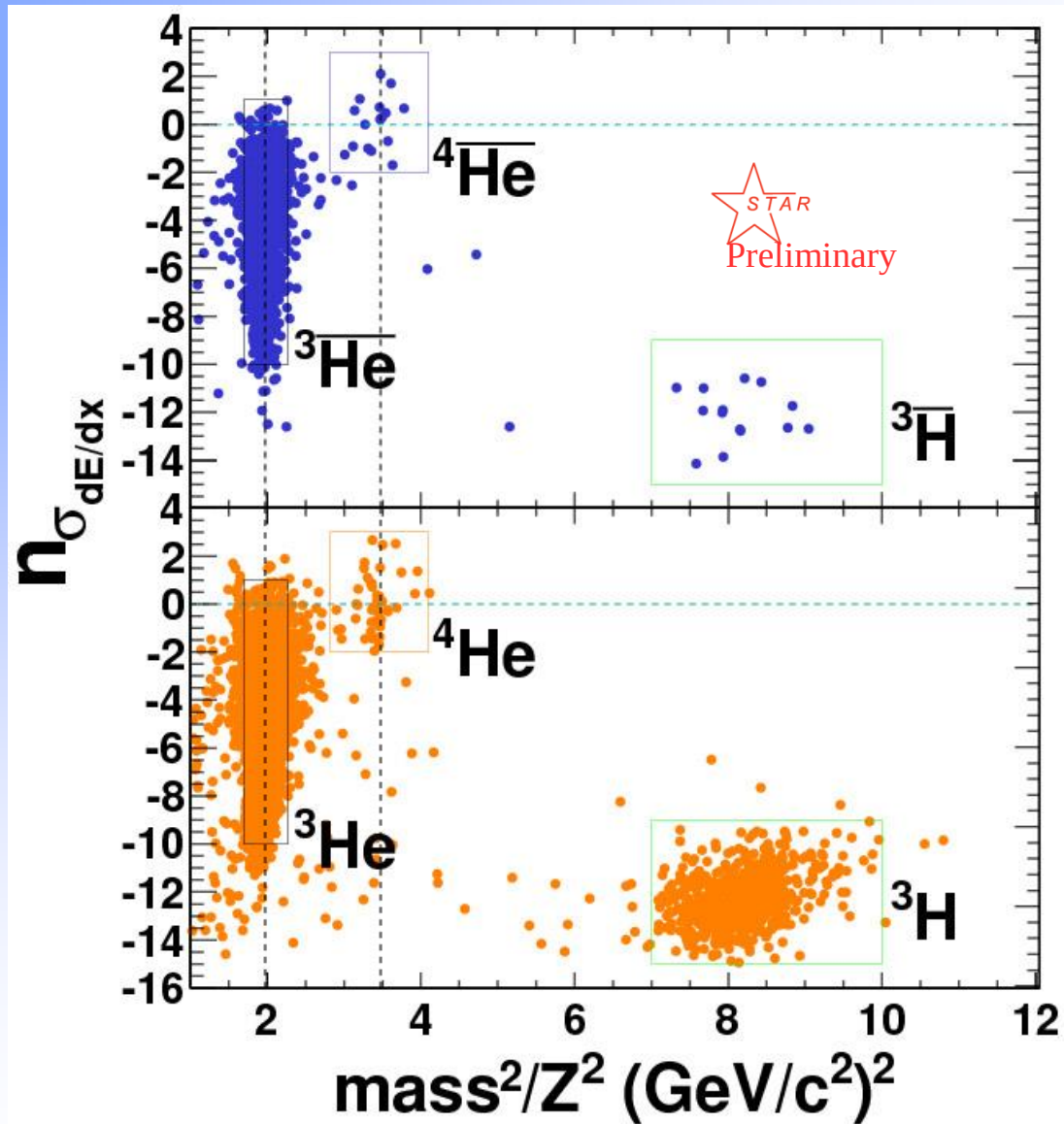
dE/dx vs Rigidity



High Level Trigger prepoznaje događaje s tragovima $|Z| = 2$



Kombinirano prepoznavanje čestica (TPC+TOF)



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.

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



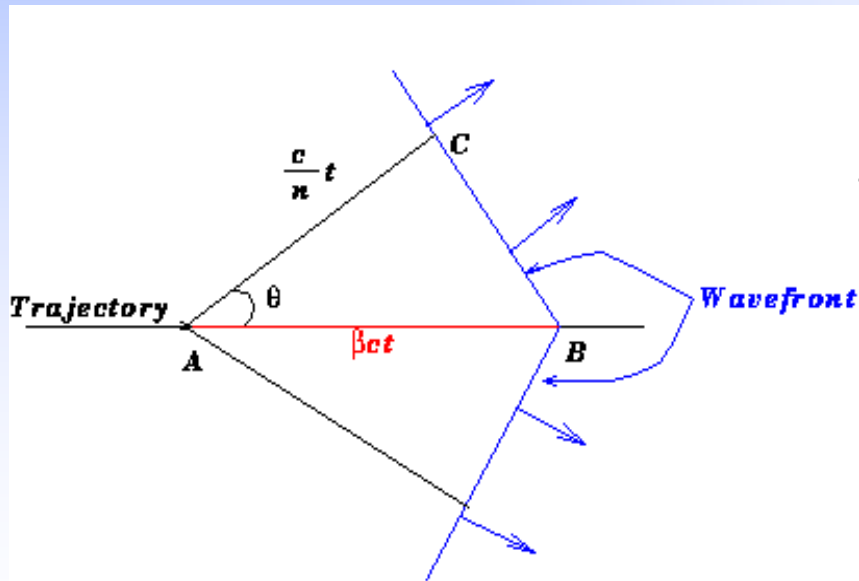
Čerenkovljevo zračenje

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.



βc = speed of particle

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



Konceptualno pitanje

Da li nabijena čestica pri ulasku u materijal napravi udarni val ?

- a) DA
- b) NE
- c) Ovisi o materijalu



Čerenkovljevi detektori

Svojstva čerenkovljevih detektora

- Mjerenjem kuta mjerimo brzinu
- Dominira plava svjetlost

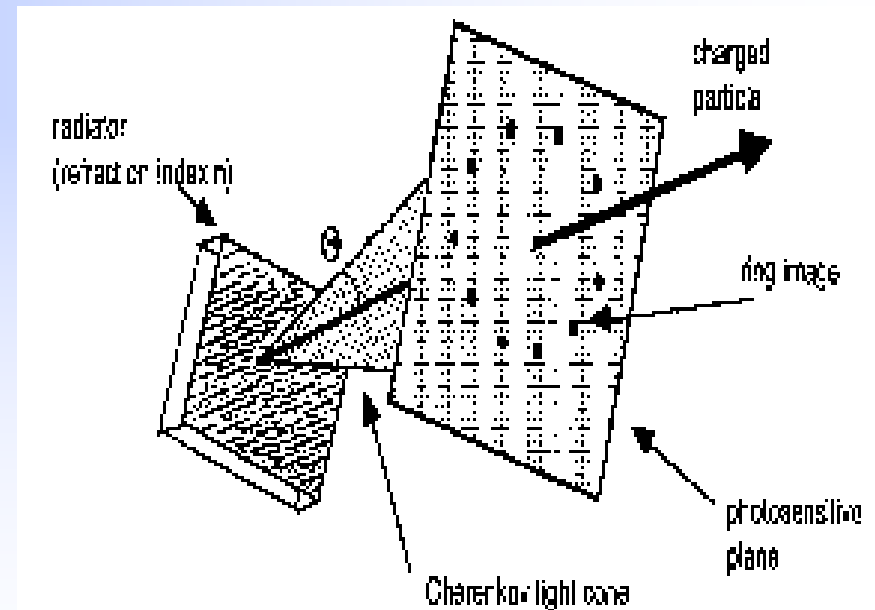
Primjena čerenkovljevih detektora

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

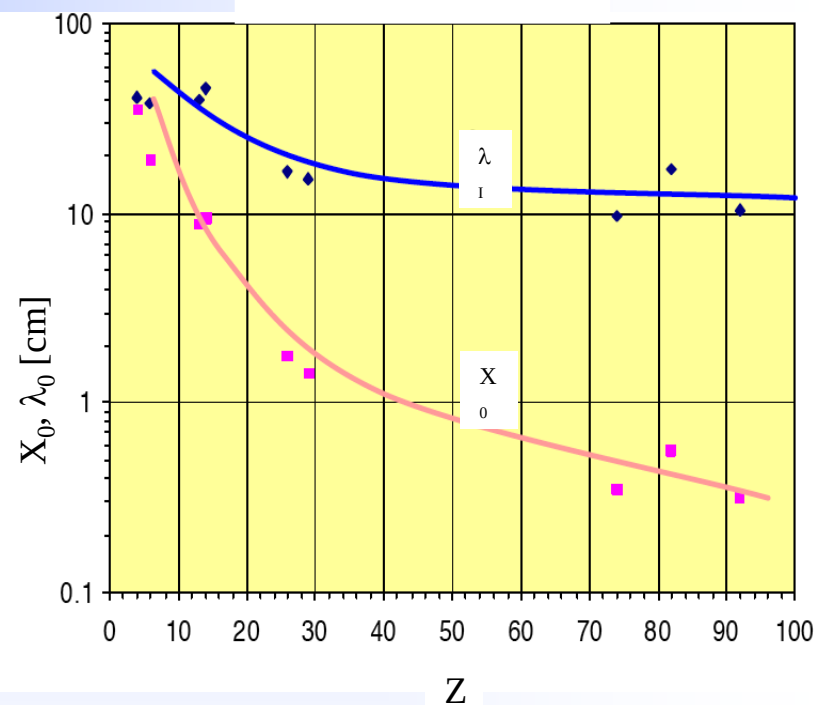
λ -valna duljina



Interakcija s materijom

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

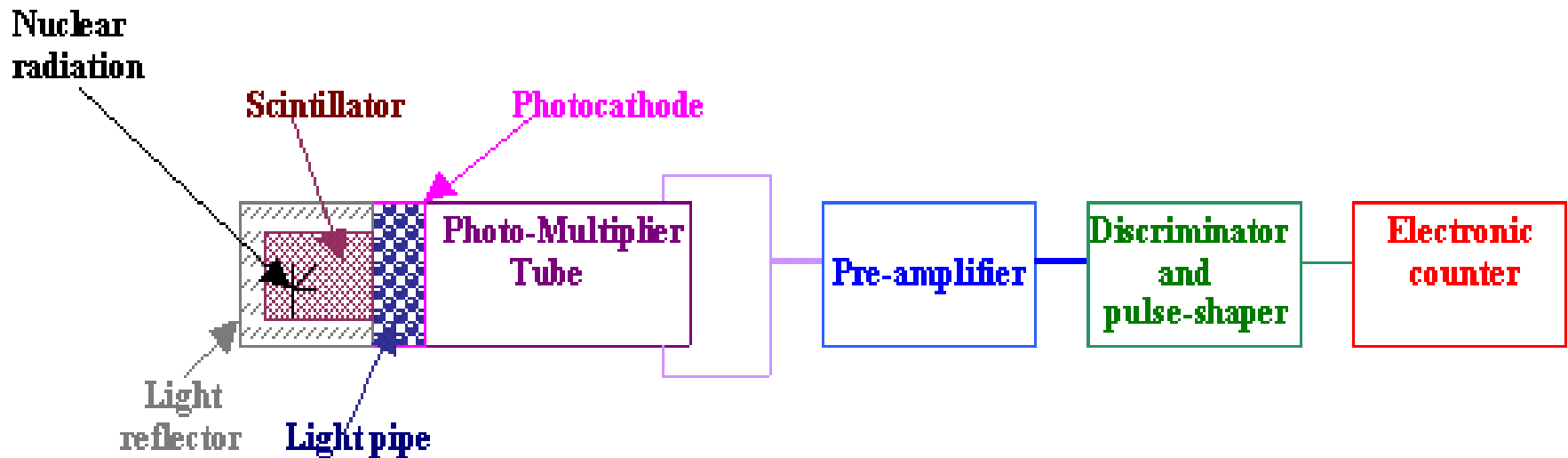
Materija	Z	A	Z/A	X_0 (cm)	λ_I (cm)	Gustoća (g/cm ³)
H ₂ (tek.)	1	1.00 8	0.99 2	866	718	0.0708
He	2	4.0 02	0.50 0	756	520	0.125
C	6	12.0 1	0.50 0	18.8	38.1	2.27
Al	13	26. 98	0.48 2	8.9	39.4	2.70
Cu	29	63. 55	0.45 6	1.43	15.1	8.96
Pb	82	207 .2	0.39 6	0.56	17.1	11.4
W	74	183. 8	0.40 3	0.35	9.58	19.3
U	92	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



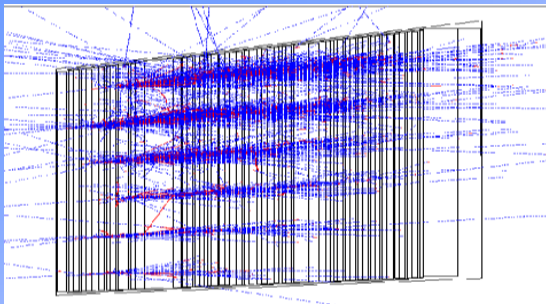
Uvod u detekciju čestica

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



Elektromagnetski kalorimetar

Zakočno zračenje i proizvodnja parova stvaraju u kaskadi elektromagnetski pljusak

Pretpostavimo da :

- E_0 - energija primarnog elektrona
- X_0 - radijacijska dužina
- Elektron nakon prolaska kroz X_0 emitira foton energije $\frac{E_0}{2}$
- Pri prolasku kroz još jednu X_0 foton se pretvori u e^-e^+ par (svaki od njih ima ene. $\frac{E_0}{4}$)
- Nakon t radijacijskih duljina imat ćemo $N = 2^t$ čestica (fotona, elektrona, pozitrona)

- Energija čestice na dubini t bit će
 $E(t) = E_0 / 2^t$

- Proces se nastavlja dok ne bude

$$E(t) = E_c$$

kad ionizacija počinje biti važna a zračenje prestaje.

- Maximum pljuska će se desiti na:

$$t = t_{\max} = \frac{\ln(E_0 / E_c)}{\ln 2}$$

- Broj čestica u maksimumu bit će:

$$N_{\max} = \exp[t_{\max} \ln 2] = \frac{E_0}{E_c}$$

- Suma duljina tragova u cijelom pljusk (u radijacijskim duljinama) je:

$$L \cong \frac{E_0}{E_c}$$



Hadronski kalorimetar

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

➤ Skala longitudinalnog razvoja ovisi o nukl. aps. duljini λ
(80 gcm⁻² (C) , 130 gcm⁻² (Fe), 210 gcm⁻² (Pb))

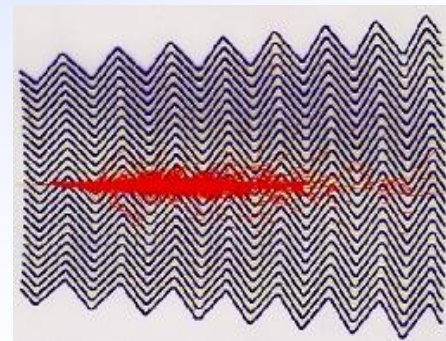
➤ λ je velik u odnosu na X_0 → Hcal su veliki u odnosu na Ecal

➤ Željezo-scintilator → longitud. ~2m, transverz. ~0.5 m

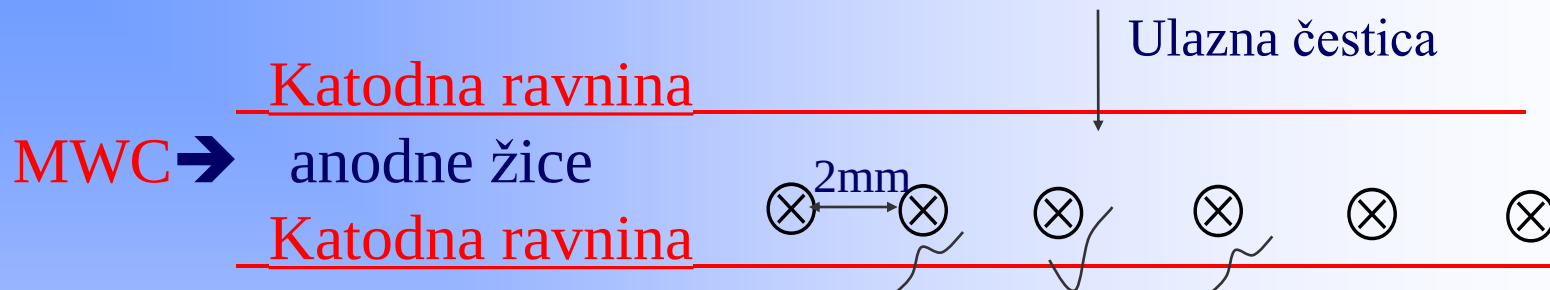
➤ U hadronskoj kaskadi 30 % energije se gubi

(razbijanje jezgre, nuklearna pobudjenja, evaporacija neutrona)

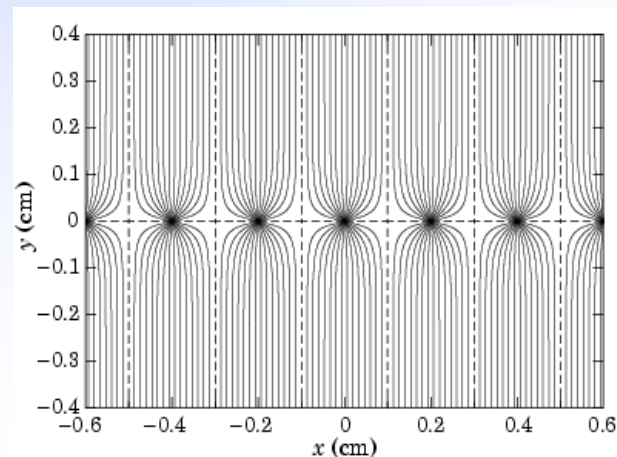
→ upotreba ²³⁸U za kaskadni medij



Mnogožičane komore



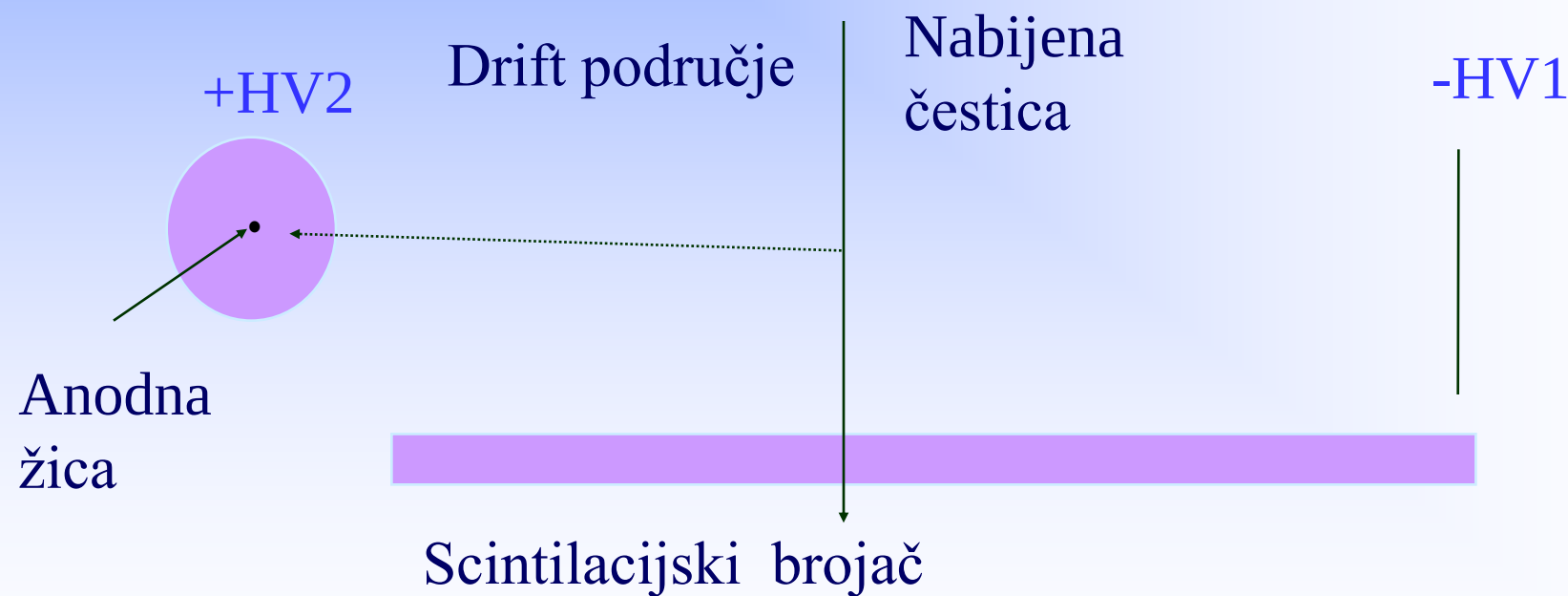
- Svaka žica djeluje kao nezavisni proporcionalni brojač
- Katode su na neg. pot. (2kV) dok su anode uzemljene
- Signal na žici koja okida je negativan i velik
- Signal na susjednim žicama je mali i pozitivan
- Prostorna rezolucija ~ 1 mm
- Razlučivanje više hitaca



Ostale ionizacijske komore

Driftne (vlačne) komore

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

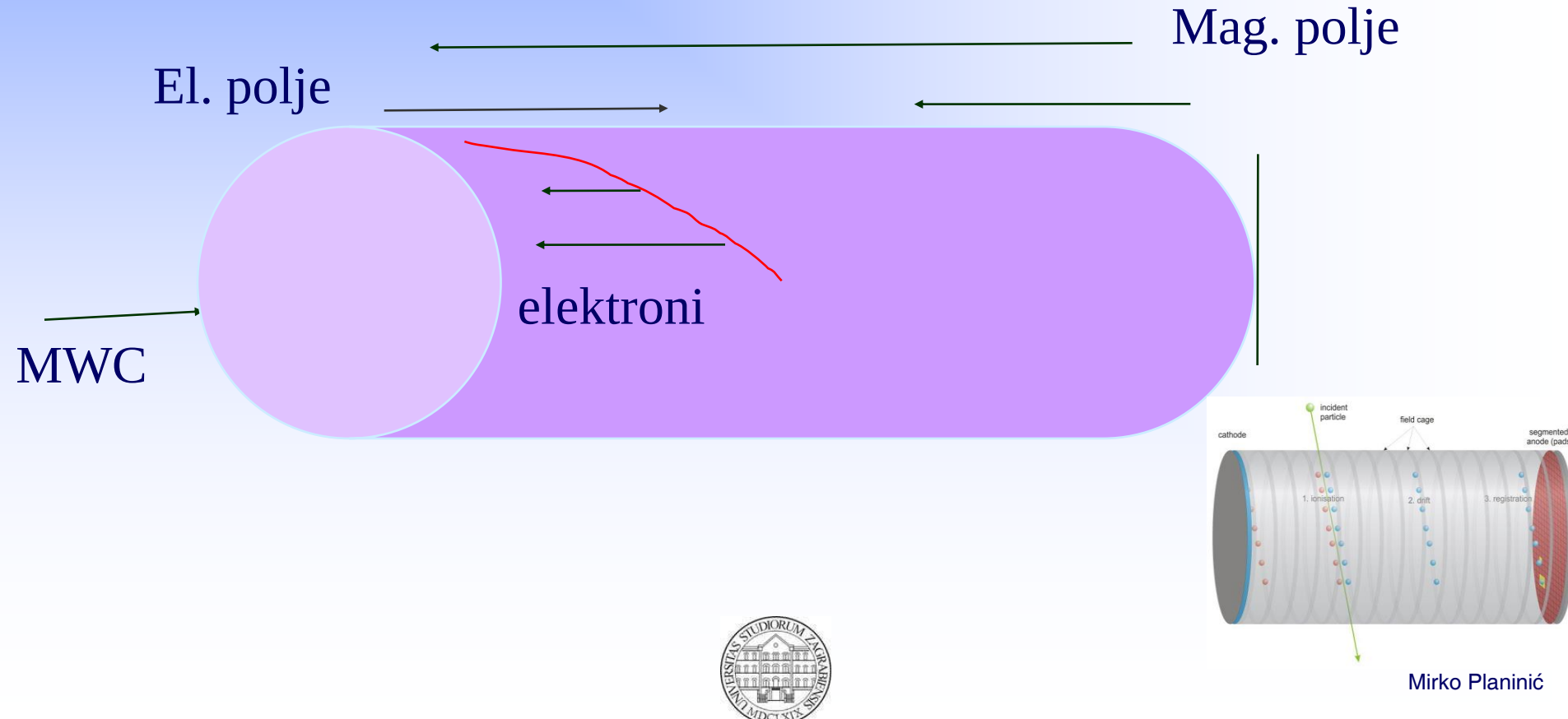


Ostale ionizacijske komore

Komore vremenske projekcije (time projection chamber)

➤ 3D tračni detektor

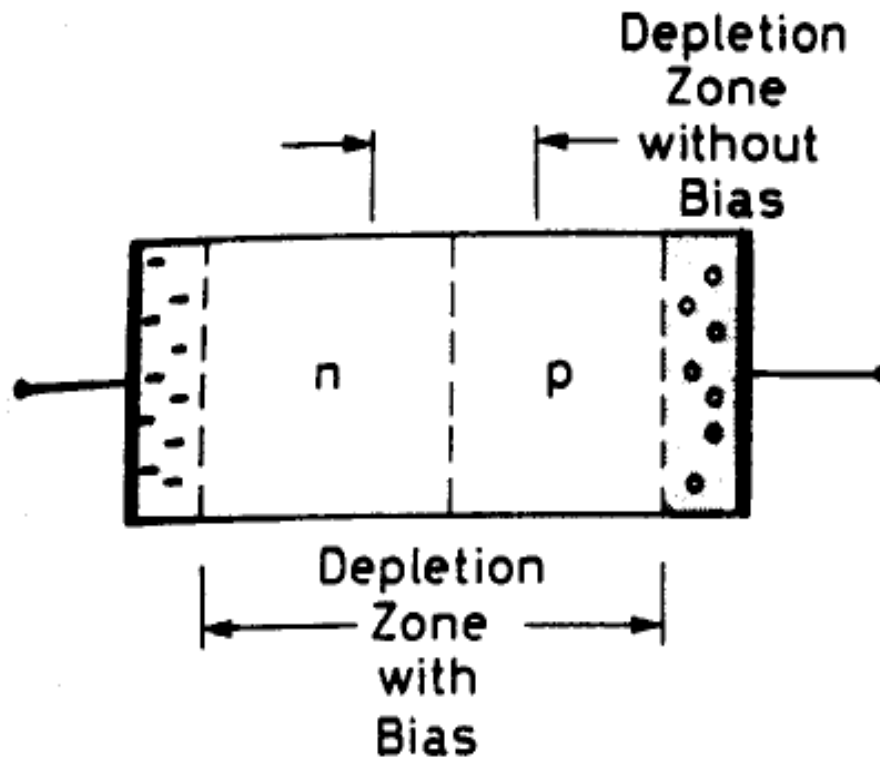
➤ Kombinacija vlačne i mnogožičane komore



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



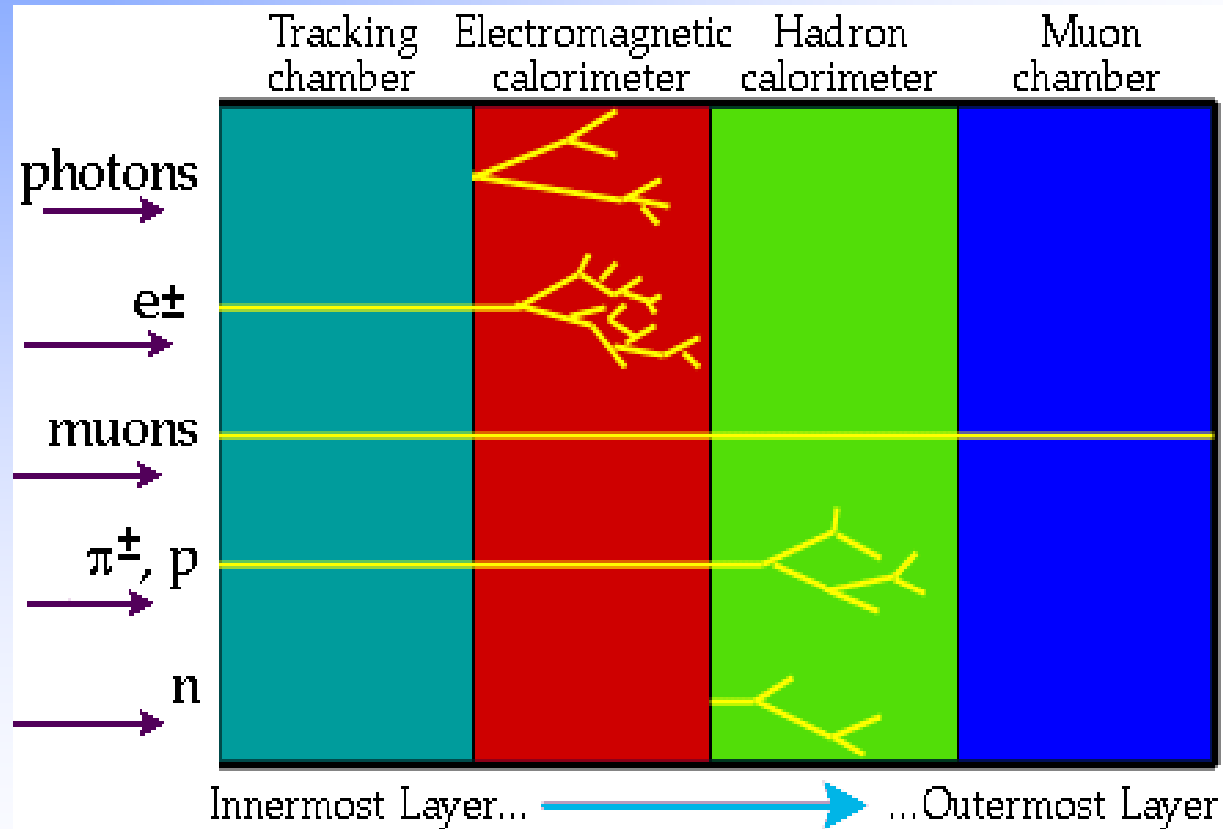
Poluvodički detektori (usporedba s ionizacijskim detektorima)

- $E_{\text{elektron} - \text{šupljina}} < E_{\text{elektron-ion}}$ ➔ 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



Hibridni detektori

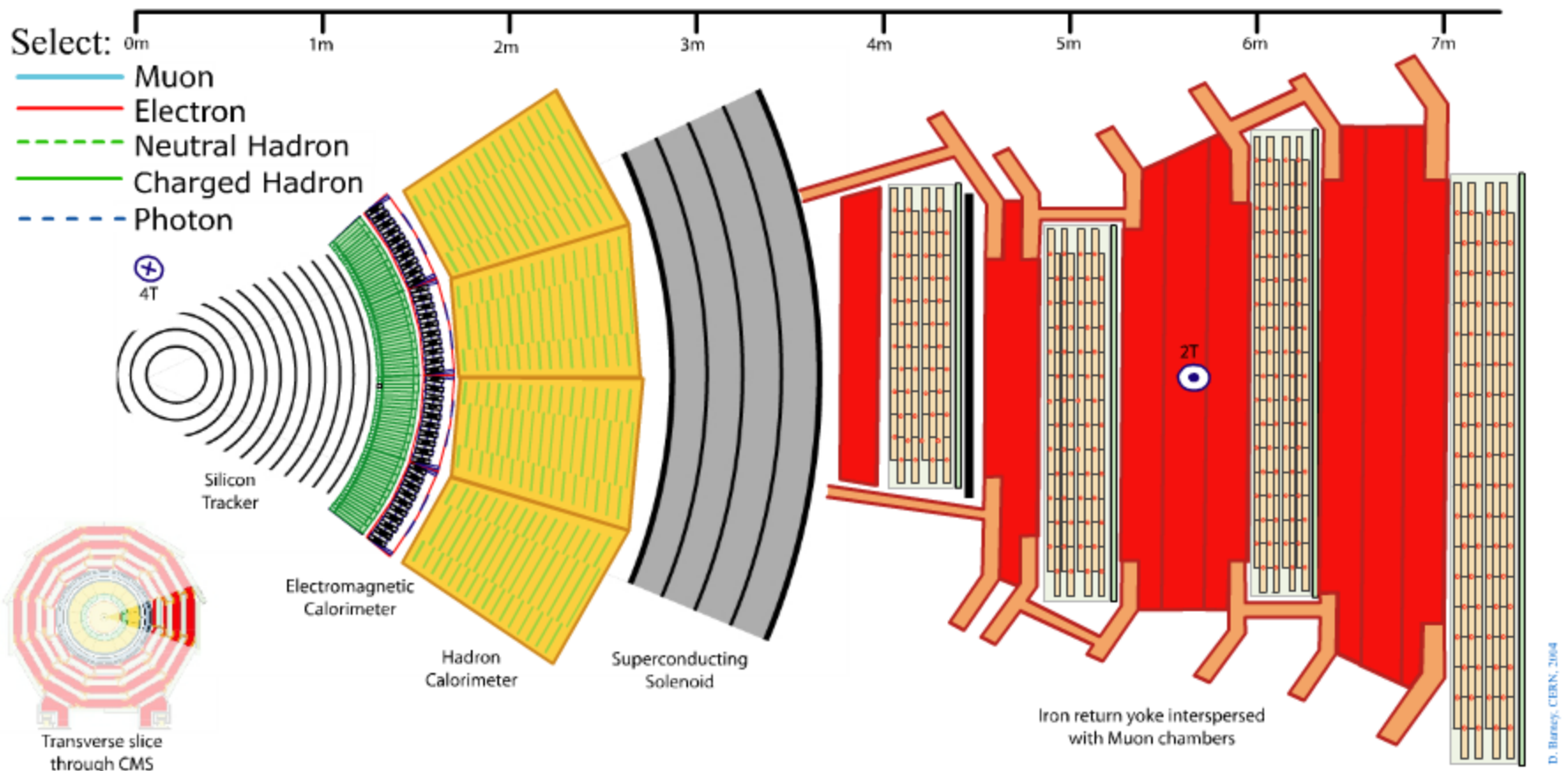
Eksperimenti u FEČ → Istovremena detekcija više čestica
Redoslijed detekcije čestica ilustriran je na slici:



Transverse slice through CMS detector

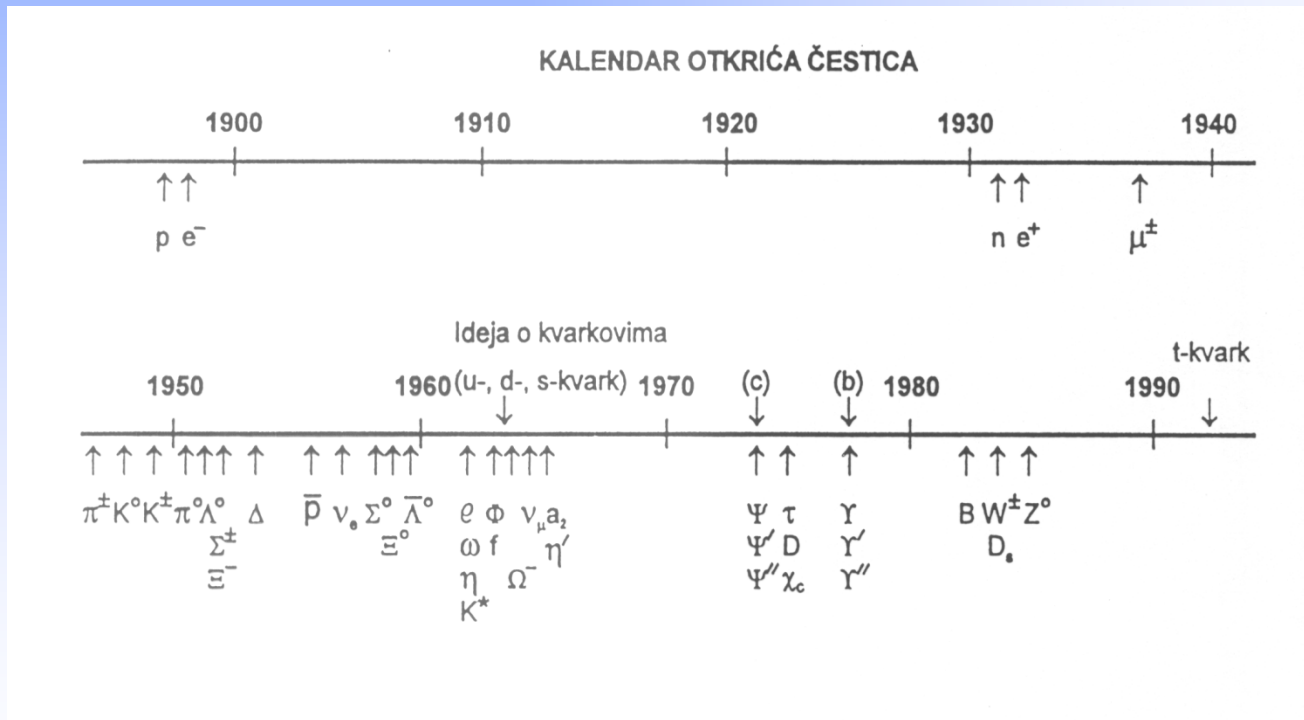
Click on a particle type to visualise that particle in CMS

Press “escape” to exit



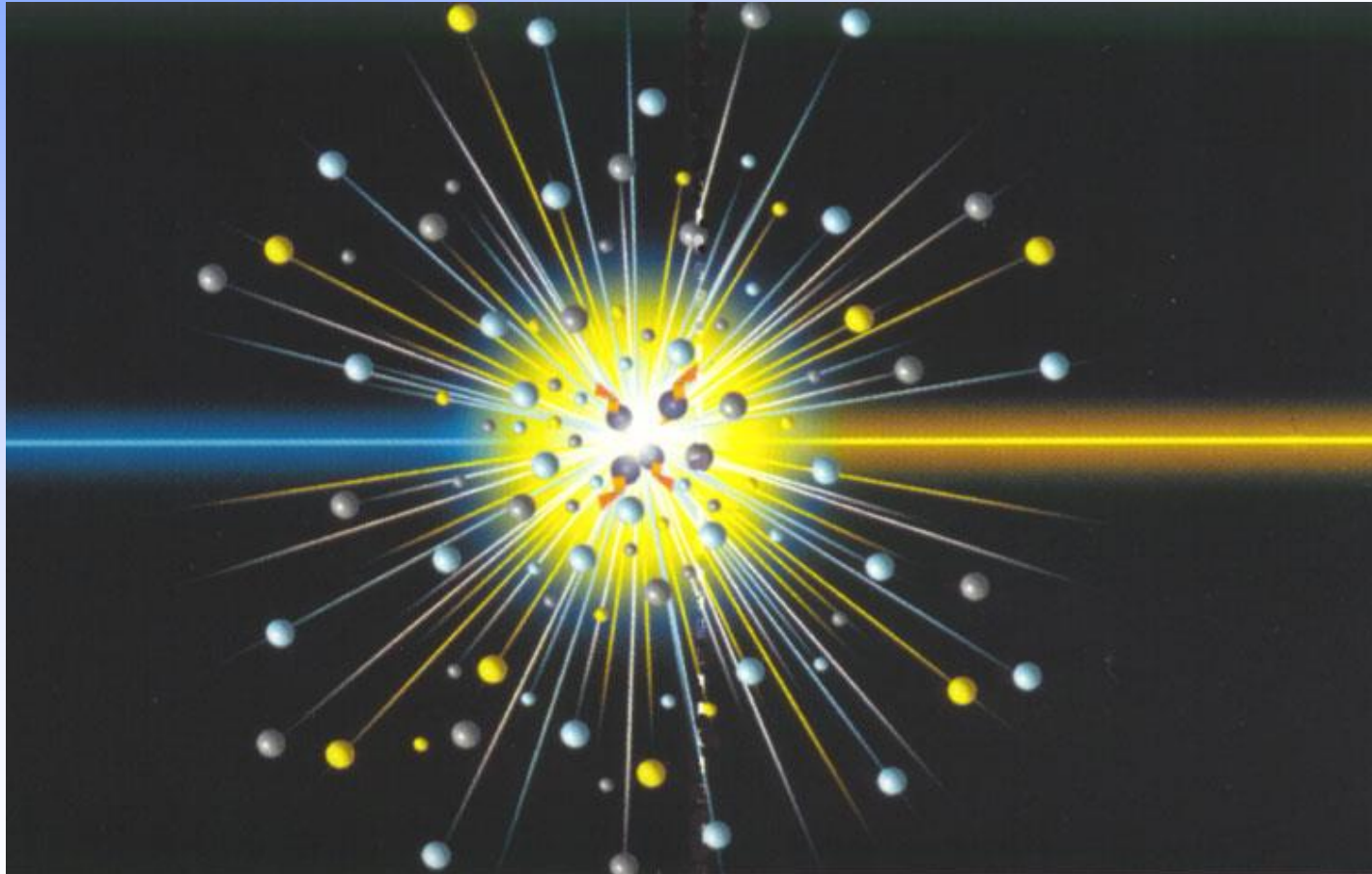
Ubrzivači i otkrića novih čestica

- Najvažnija otkrića novih čestica nakon primjene ubrzivača

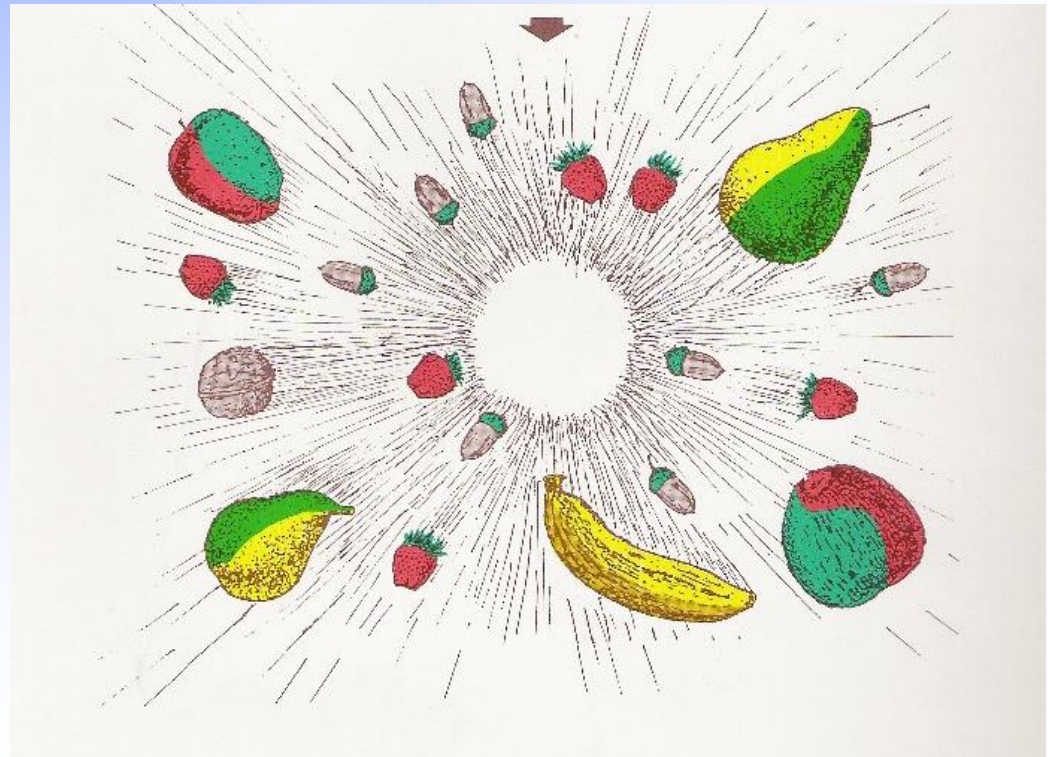
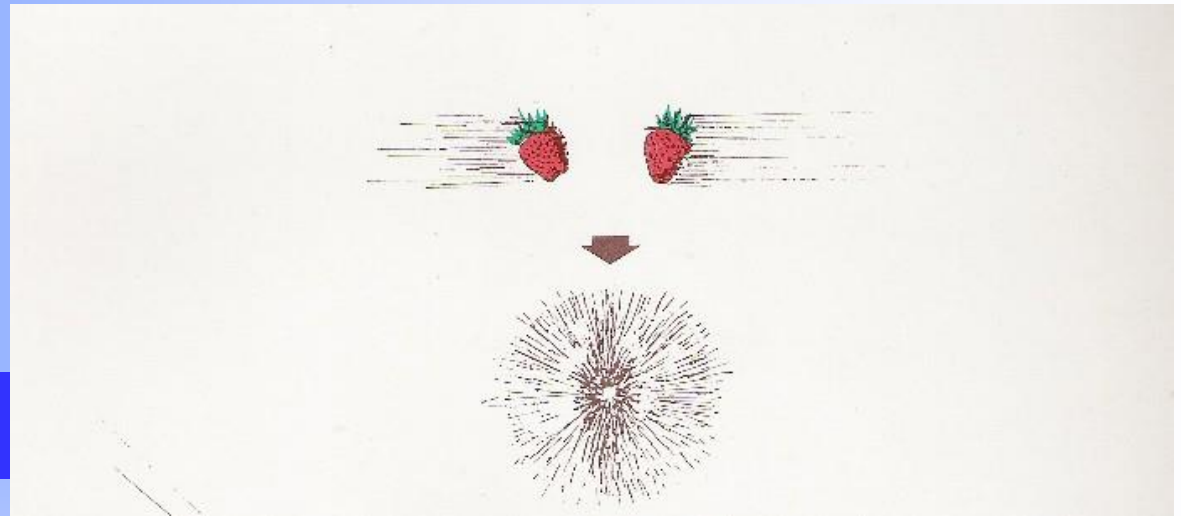


Za vidjeti najmanje čestice:
potrebne su najveće energije!

$$E = mc^2$$



$$E = mc^2$$

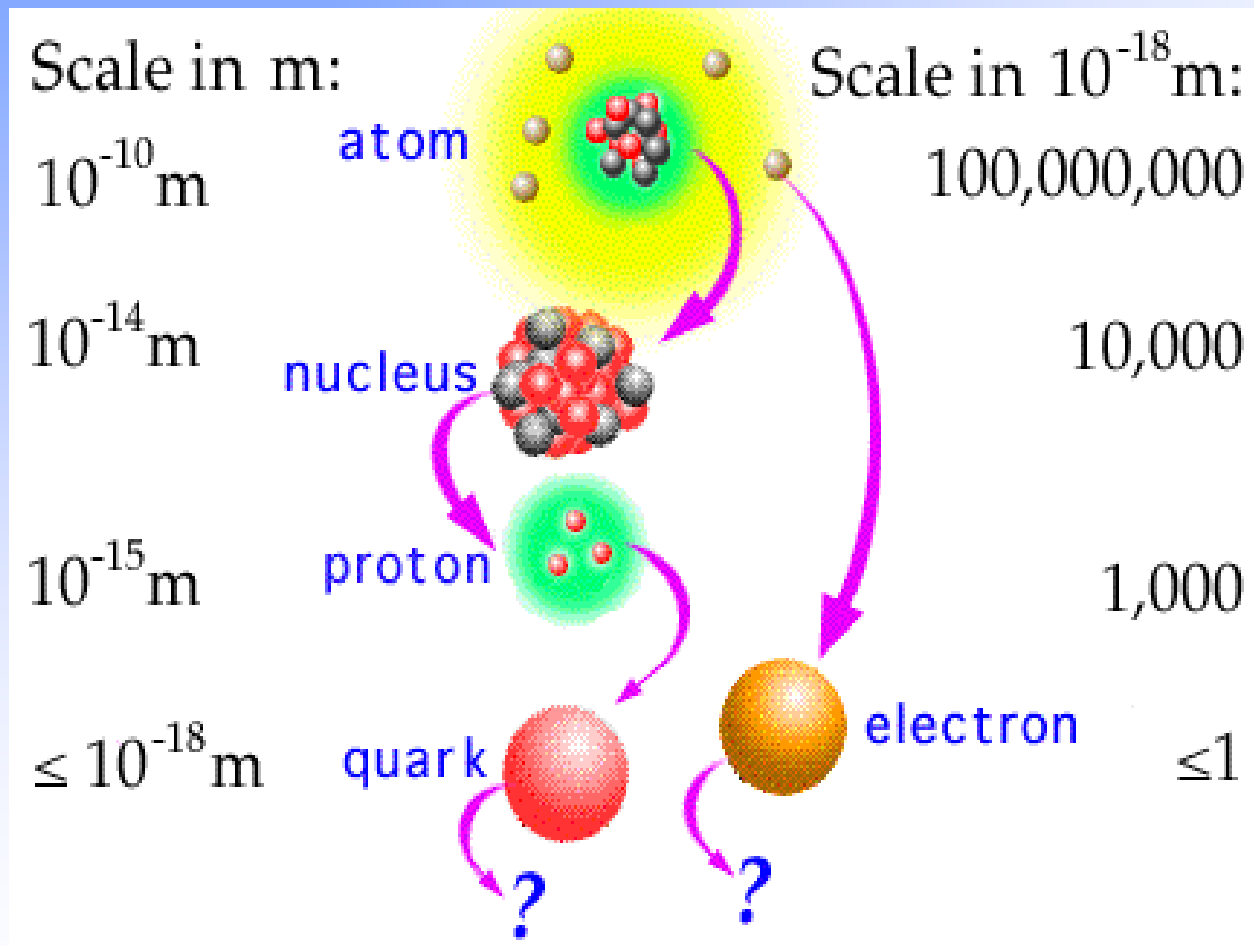


Uranjanje u subatomske svijet

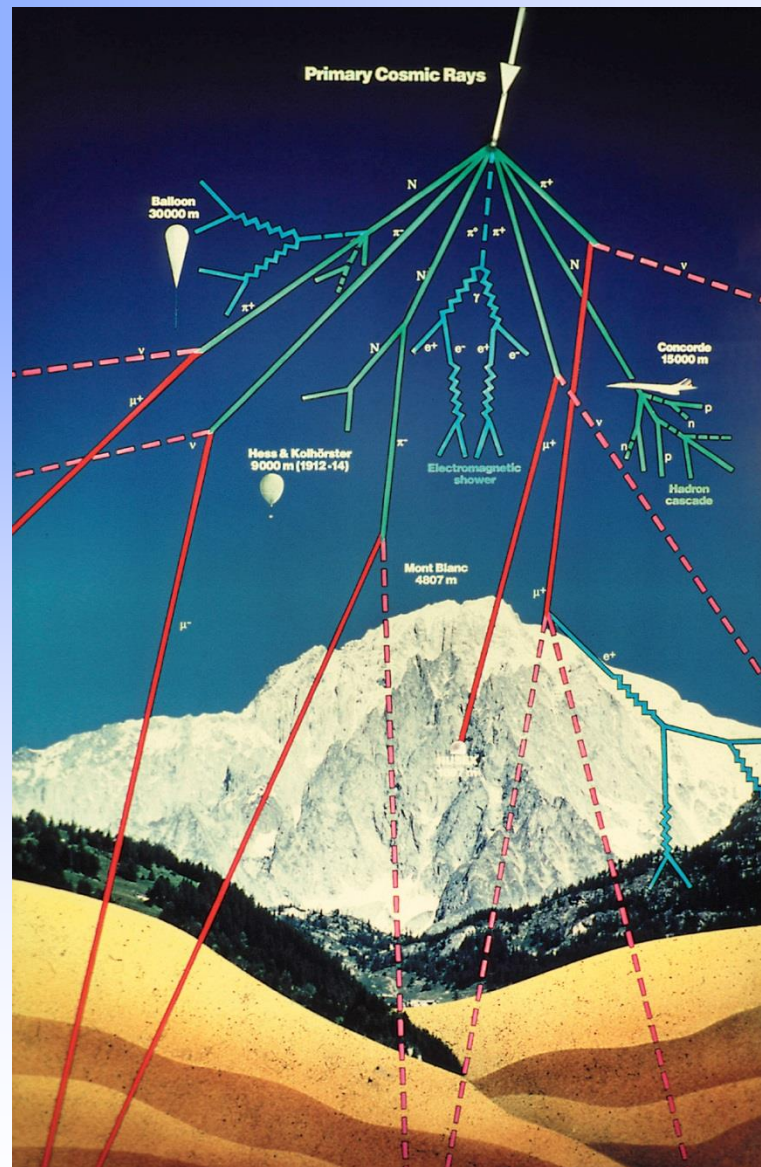
- Da bismo "elektronskim mikroskopom" postigli rezoluciju

$$\Delta x \cong 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

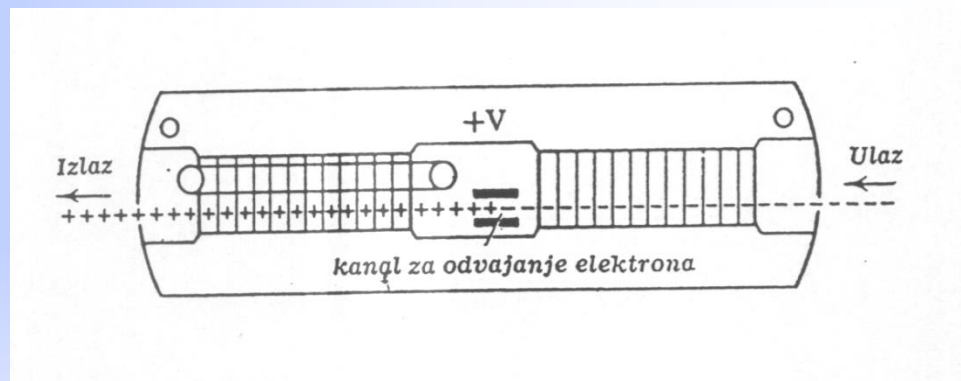
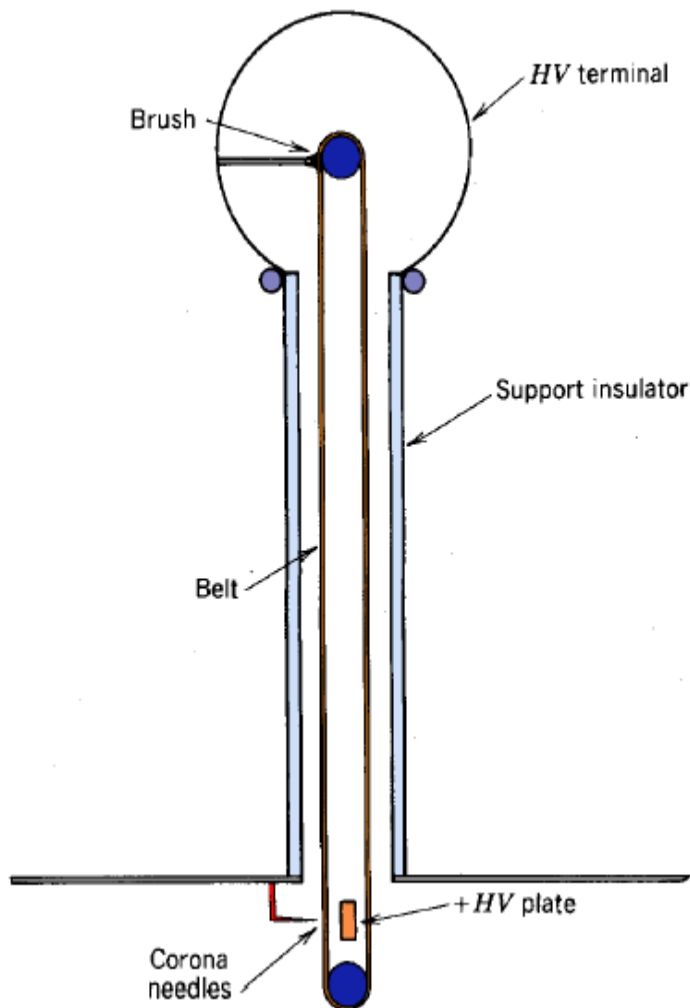
treba elektrone ubrzati na energiji $E \cong \frac{\hbar c}{\Delta x} \cong 1 \text{ GeV}$



Možemo li koristiti kozmičke zrake ?



Van de Graafov ubrzivač



Što je ograničavajući faktor?



Princip rada linearnog ubrzivača

■ SIMULACIJA



Konceptualno pitanje

Snop čestica u sudarivaču je:

- a) kontinuiran
- b) čestice dolaze u nakupinama



Pitanja koja se postavljaju ...

Koje čestice ćemo ubrzavati ?

Kružno ili linearno ?

Da li ćemo sudarati snop i čvrstu metu
ili snop na snop ?



Ograničavajući faktori kružnih ubrzivača

1) Gubitak energije zračenjem:

$$\frac{\Delta E}{2\pi R} = \frac{4\pi e^2 \beta^2 \gamma^4}{3R}$$

$$\gamma = \frac{E}{m} \qquad \beta = \frac{v}{c} \cong 1$$

2) Istraživanja na malim dimenzijama ➡ mali udarni presjek

Luminoznost L =broj čestica u jed. vrem./jedinica površine

Vjerojatnost događaja=udarni presjek * luminoznost

3) Raspoloživa energija:

$$s = (p_a + p_b)^2 \sim$$

$$E_a m_b$$

Za fiksiranu metu

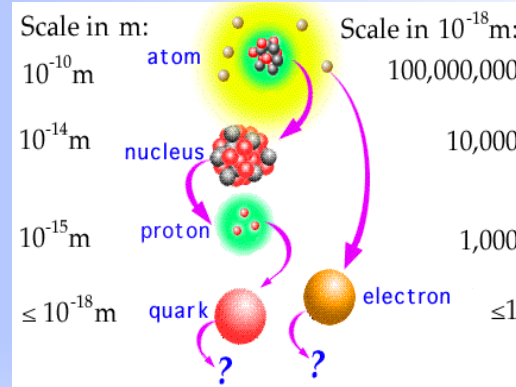
$$4E^2$$

Za sudarivač $E_a = E_b = E$

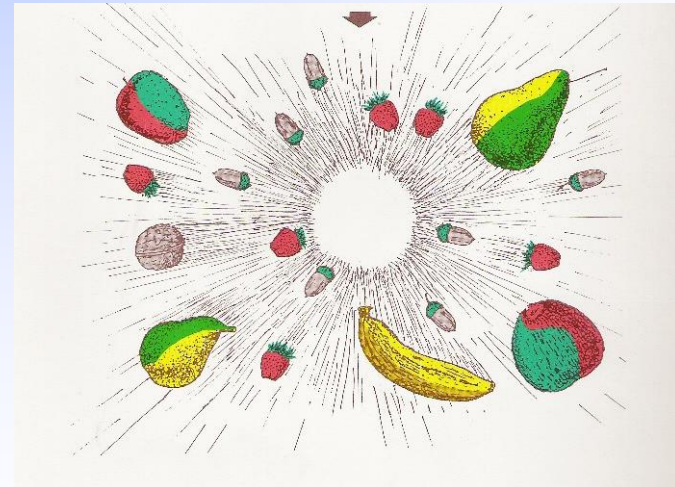
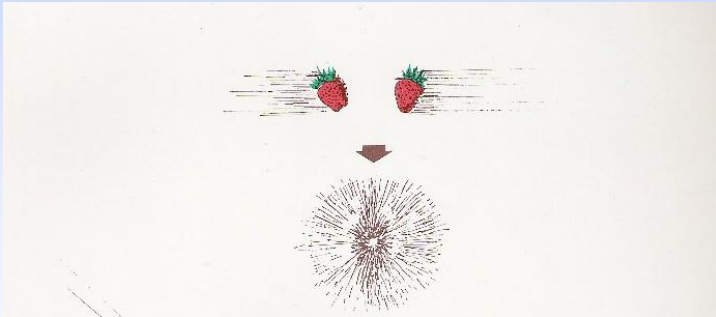


Podsjetnik na temeljne koncepte

1) gledanje malih dimenzija traži velike energije



2) masa je isto što i energija

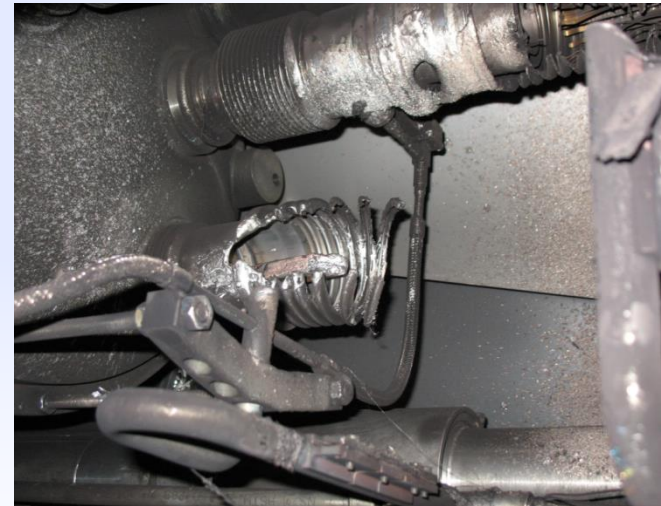


Podsjetnik na temeljne koncepte

3) Snop čestica koji kruži gubi energiju zračenjem

$$\Delta E \sim \frac{1}{R} \left(\frac{E_{SNOP}}{m} \right)^4$$

4) Ne treba odustati ako se pojave problemi



Hvala na pažnji!

