

# Vaje pri predmetu Eksperimentalna fizika osnovnih delcev

Rok Dolenc

19. oktober 2020

## 1 Interakcija delcev in fotonov s snovjo

### 1.1 Bethe-Blochova enačba

#### 1.1.1

Izračunaj energijske izgube za protone z  $p = 3$  GeV v svincu ( $\rho = 11.4$  g/cm<sup>3</sup>,  $Z = 82$ ,  $A = 207.2$ ,  $I = 823$  eV). Primerjaj s podatki na Sliki 1a.

Enačba 2.27 v [1]:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c_0^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e c_0^2 (\beta\gamma)^2 W_{MAX}}{I^2} - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

- $2\pi N_a r_e^2 m_e c_0^2 = 0.1535$  MeV cm<sup>2</sup>/g
- $r_e = 2.817 \cdot 10^{-13}$  cm
- $N_a = 6.022 \cdot 10^{23}$ /mol
- $I$  mean excitation potential  $\approx Z(12 + 7/Z)$  eV za  $Z < 13$ ;  $\approx Z(9.76 + 58.5Z^{-1.19})$  eV za  $Z \geq 13$
- $\delta, C$ : density, shell corection
- $W_{MAX} = \frac{2m_e c_0^2 (\beta\gamma)^2}{1 + 2\gamma(m_e/M) + (m_e/M)^2} \approx 2m_e c_0^2 (\beta\gamma)^2$

[Rešitev: 13.0 MeV/cm]

#### 1.1.2

Poišči minimum funkcije glede na  $\beta\gamma$  (ali  $\beta$ ). Primerjaj s Sliko 1a.

[Odvajanje v Mathematici:  $\beta\gamma = 2.867$ ]

#### 1.1.3

Izračunaj energijske izgube za protone z  $p = 3$  GeV v svinčevem fluoridu (PbF<sub>2</sub>,  $\rho = 7.77$  g/cm<sup>3</sup>) Podatki za F:  $Z = 9$ ,  $A = 19$ ,  $\rho = 1.58$  g/cm<sup>3</sup>.

Enačbi 2.38 in 2.39 v [1]:

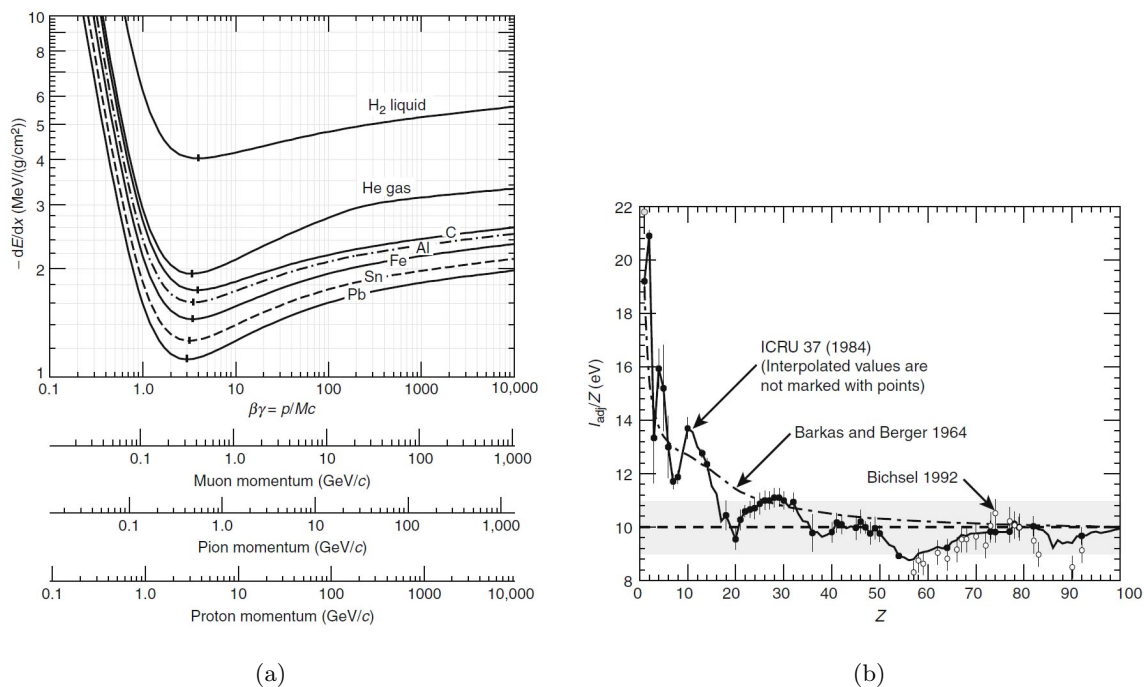
$$\left( \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)_{compound} = \frac{w_1}{\rho_1} \left( \frac{dE}{dx} \right)_1 + \frac{w_2}{\rho_2} \left( \frac{dE}{dx} \right)_2 + \dots$$
$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum a_i A_i}$$

[ $\approx 9.5$  MeV/cm]

#### 1.1.4

Iz  $-\frac{dE}{dx}$  (grobo - predpostavi konstantno izgubo energije) oceni, kakšna debelina svinca ustavi protone z  $p = 3$  GeV.

[170 cm]



Slika 1: (a) Ionization energy-loss rate in various materials; (b) Mean excitation potential [2].

## 1.2 Doseg

Iz slike 2a izračunaj, kako debel absorber iz svinca potrebujemo, da ustavimo protone z  $p = 3$  GeV. [156 cm]

## 1.3 Energijsko stresanje

Izračunaj najverjetnejšo energijsko izgubo ( $\Delta_p$ ) in širino porazdelitve energijskih izgub za pione z energijo 500 MeV v siliciju ( $Z = 14$ ,  $A = 28$ ,  $\rho = 2.32$  g/cm<sup>3</sup>) debeline 320  $\mu$ m. Primerjaj s podatki na Sliki 2b – zaradi majhne debeline Si je izračunana širina porazdelitva premajhna.

(enačbe za porazdelitev po Landau, npr. v [2], enačba 32.11)

[ $\xi = 6.18$  keV,  $\Delta_p = 85.6$  keV,  $w = 24.7$  keV]

## 1.4 Svetloba Čerenkova

Koliko fotonov Čerenkova nastane v 1 cm vode zaradi prehoda protona z energijo 2 GeV. Koliko fotonov zaznamo s fotodetektorjem, ki je občutljiv na svetlobo med 250 nm in 800 nm s povprečnim izkoristkom 10%.

(enačba 32.45. v [2])

[ $N = 356$ , zaznanih  $\approx 36$ ]

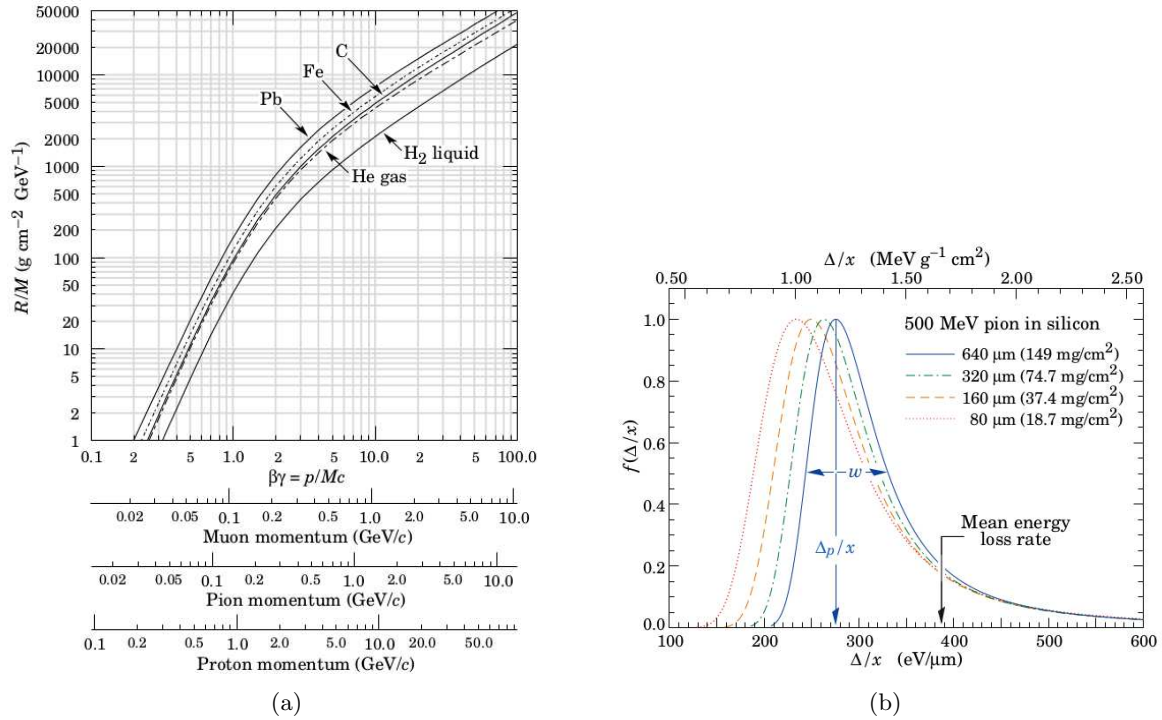
## 1.5 Kritična energija

Kakšna je kritična energija za elektrone v siliciju ( $Z = 14$ ), svincu ( $Z = 82$ ) in zraku ( $V(N_2)/V(O_2) = 4$ ).

Enačbe iz predavanj:

$$E_c \approx \begin{cases} \frac{710 \text{ MeV}}{Z+0.92}; & \text{plini} \\ \frac{610 \text{ MeV}}{Z+1.24}; & \text{trdne snove in tekočine} \end{cases}$$

[40 MeV, 7.3 MeV, 87 MeV]



Slika 2: (a) Range of heavy charged particles in various substances; (b) Straggling functions in silicon for 500 MeV pions [2].

## 1.6 Radiacijska dolžina

Kakšna je radiacijska dolžina v scintilatorju LSO ( $\text{Lu}_2\text{SiO}_5$ ,  $\rho = 7.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ ).

Enačbi 2.78 in 2.80 v [1]:

$$\frac{1}{L_{rad}} = 4Z(Z+1) \frac{\rho N_a}{A} r_e^2 \alpha [\ln(183Z^{-1/3}) + \dots]$$

$$\left( \frac{1}{\rho L_{rad}} \right)_{compound} = w_1 \frac{1}{\rho_1} \left( \frac{1}{L_{rad}} \right)_1 + w_2 \frac{1}{\rho_2} \left( \frac{1}{L_{rad}} \right)_2 + \dots$$

$$[L_{rad} = 1.08 \text{ cm}]$$

## 1.7 Večkratno sipanje $e^-$

### 1.7.1

Oceni za koliko se v Gausovi aproksimaciji večkratnega sipanja siplje žarek 8 GeV elektronov, v 1 mm debeli žarkovni cevi, če je cev narejena iz Cu ( $Z = 29$ ,  $A = 63.5$ ,  $\rho = 8.92 \text{ g}/\text{cm}^3$ ), Al ( $Z = 13$ ,  $A = 27$ ,  $\rho = 2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) ali Be ( $Z = 4$ ,  $A = 9$ ,  $\rho = 1.85 \text{ g}/\text{cm}^3$ ).

Enačbi 2.84 in 2.85 v [1]:

$$P(\sigma)d\Omega = \frac{2\sigma}{\sigma_0^2} e^{-\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}} d\sigma$$

$$\sigma_0 = z \frac{20 \text{ MeV}/c}{p\beta} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left( 1 + \frac{1}{9} \log_{10} \left( \frac{x}{X_0} \right) \right) \text{ rad}$$

$$[\text{Cu: } 0.57 \text{ mrad, Al: } 0.21 \text{ mrad, Be: } 0.093 \text{ mrad}]$$

### 1.7.2

Projekcijo odklona v eni koordinatni ravnini podaja enačba (Enačba 2.86 v [1]):

$$P(\sigma_x)d\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'_0} e^{-\frac{\sigma_x^2}{2(\sigma'_0)^2}} d\sigma_x$$

kjer je

$$\sigma_0^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 2(\sigma'_0)^2 \Rightarrow (\sigma'_0)^2 = \frac{\sigma_0^2}{2}$$

Ponovi, kako se izračuna konvolucija na primeru dveh Gausovih funkcij.

## 1.8 Interakcija fotonov s snovjo

### 1.8.1

Nariši porazdelitev po energiji za Comptonsko sipane elektrone (v Mathematici, MatLabu...).

Enačba 2.109 v [1] ( $s = T/(h\nu)$ ):

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{\pi r_e^2}{m_e c_0^2} \frac{1}{\gamma^2} \left[ 2 + \frac{s^2}{\gamma^2(1-s)^2} + \frac{s}{1-s} \left( s - \frac{2}{\gamma} \right) \right]$$

### 1.8.2

Kolikšen bo delež fotoefekta v scintilatorju LSO ( $\text{Lu}_2\text{SiO}_5$ ,  $\rho = 7.4 \text{ g/cm}^3$ ) za anihilacijske (511 keV) fotone? Vrednosti presekov lahko najdemo v [5]. [34%]

### 1.8.3

Kolikšen delež anihilacijskih fotonov lahko zaznamo s tipično debelino (25 mm) kristala LSO, ki se uporablja v napravah za pozitronsko tomografijo? [87%]

### 1.8.4

Kolikšen delež anihilacijskih fotonov lahko zaznamo s tipično gamma kamero: 1 cm kristala NaI ( $\rho = 3.67 \text{ g/cm}^3$ )? [28%]

### 1.8.5

Če uporabimo gamma kamero iz prejšnje naloge za energije za katere je predvidena (fotoni z  $^{99m}\text{Tc}$ : 140.5 keV), kolikšen delež lahko zaznamo? [91%]

## 1.9 Interakcija nevtronov s snovjo

### 1.9.1

Vaja iz [1], str. 63: Po kolikšnem številu trkov se 1 MeV nevtroni upočasnijo do termalnih energij (0.025 eV) v ogljiku in po kolikšnem v vodiku?

Enačbi 2.152 in 2.151 v [1]:

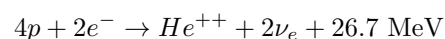
$$n = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_0}{E'}$$
$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

[C:  $n = 111$ ; H:  $n = 17.5$ ]

## 1.10 Nevtrini

### 1.10.1

Oceni fluks solarnih nevtrinov na površju Zemlje. Upoštevaj da površje Zemlje prejema od Sonca  $1.3 \text{ kW/m}^2$  energije in računaj, kot da vsa energija izhaja iz reakcije:



[ $\Phi = 6 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]

### 1.10.2

Kolikšno maso detektorja potrebujemo, da v njem v enem letu dobimo 1000 interakcij nevtrinov? Privzemi vrednost fluksa iz prejšnje naloge in interakcijski presek  $\sigma = 10^{-20}$  barna. Računaj za detektor, ki ga sestavlja vodik.

$$[m = 88 \text{ kg}]$$

### 1.10.3

V eksperimentu T2K na Japonskem pospeševalnik J-PARC ustvari žarek nevtrinov s fluksom  $\Phi = 2 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-2}\text{leto}^{-1}$ . Žarek je usmerjen v 295 km oddaljen detektor nevtrinov Super-Kamiokande, ki zaznava interakcije nevtrinov v 22.5 kt vode. Kolikšno število dogodkov dobimo v detektorju v enem letu, če je interakcijski presek  $\sigma = 3 \cdot 10^{-43} \text{ m}^2$ .

$$[N = 810]$$

## 2 Ionizacijski detektorji

### 2.1 Ionizacijska komora

#### 2.1.1

Kakšna je energijska ločljivost ionizacijske celice debeline 10 cm, za MIP delec ( $dE/dx \approx 2 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ ), če je celica napolnjena z magičnim plinom ( $\approx 75\% \text{ Ar } (\rho = 1.66 \text{ g/L}) + 25\% \text{ izobutan } (\rho = 2.5 \text{ g/L})$ ). Ostali podatki so  $w_{Ar} = 26 \text{ eV}$ ,  $F_{Ar} = 0.2$ ,  $w_{C_4H_{10}} = 23 \text{ eV}$ ,  $F_{C_4H_{10}} \approx 0.2$  (Tabeli 6.1 in 6.2 v [1]).

$$[R = 1.1\%, R_{FWHM} = 2.7\%]$$

### 2.2 Proporcionalni števec

#### 2.2.1

Energijska ločljivost se zaradi statističnih procesov pri pomnoževanju poslabša na (Enačba 6.22 v [6]):

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2} = \sqrt{\frac{w(F+b)}{E}}$$

kjer so  $w$  povprečna energija potrebna za nastanek para ion-elektron,  $F$  Fano faktor,  $E$  deponirana energija in  $b$  konstanta, ki predstavlja varianco pomnoževanja. Kakšna je energijska ločljivost s pomnoževanjem za enako statistiko in plin kot v prejšnji nalogi ( $b \approx 0.5$ )?

$$[R_{FWHM} = 4.9\%]$$

#### 2.2.2

Kolikšno je električno polje tik ob žici v cilindričnem proporcionalnem števcu, če  $a = 0.008 \text{ cm}$ ,  $b = 1 \text{ cm}$  in  $V = 2000 \text{ V}$ ? Kakšno napetost bi potrebovali, da bi dosegli enako polje v ploščatem števcu z  $d = 1 \text{ cm}$ ?

$$[5.18 \cdot 10^6 \text{ V/m}, 51.8 \text{ kV}]$$

#### 2.2.3

Oceni, kakšna je največja amplituda napetosti, ki jo lahko dobimo iz cilindričnega proporcionalnega števca iz prejšnje naloge ( $a = 0.008 \text{ cm}$ ,  $b = 1 \text{ cm}$  in  $V = 2000 \text{ V}$ ). Za dolžino števca vzemimo  $l = 10 \text{ cm}$ , za mobilnost ionov pa tipično vrednost  $\mu = 1 \text{ cm}^2 \text{ atm/Vs}$ . Nastali naboj najprej oceni iz števila primarnih ionizacijskih parov iz naloge 2.1.1, kot da pri tej napetosti še ni pomnoževanja v plinu.

Inducirana napetost (Enačba 6.38 v [1]):

$$V(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 l} \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right)$$

kjer je

$$t_0 = \frac{a^2 \pi \epsilon_0 p}{\mu C V_0}$$

Čas zbiranja ionov - drif time (Enačba 6.33 v [6]):

$$T = t_0(b^2 - a^2)/a^2$$

Uporabna količina je tudi čas do polovične višine signala (Enačba 6.36 v [6]):

$$t_{1/2} = \frac{a}{a+b}T$$

$$[V(T) = -2.1 \cdot 10^{-4} \text{ V}]$$

## 2.2.4

Zgornji primer ni povsem realističen, saj ne upošteva pomnoževanja v plinu, do katerega pride pri danih parametrih. Oceni pomnoževanje ( $M$ ) v detektorju iz zgornjega primera s pomočjo enačbe (enačba 6.8 v [6]):

$$\ln M = \frac{V}{\ln(b/a)} \frac{\ln 2}{\Delta V} \left( \ln \frac{V}{p \cdot a \cdot \ln(b/a)} - \ln K \right)$$

kjer so  $\Delta V$  potencialna razlika skozi katero potuje elektron med zaporednima tkoma,  $K$  minimalen  $E/p$  potreben za pomnoževanje in  $p$  tlak. Uporabimo vrednosti za 90% Ar + 10% CH<sub>4</sub>:  $\Delta V = 23.6 \text{ V}$ ,  $K = 4.8 \cdot 10^4 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{atm})$  ter  $p = 1 \text{ atm}$ .

Kolikšno je pomnoževanje, če radij anodne žičke zmanjšamo na polovico?

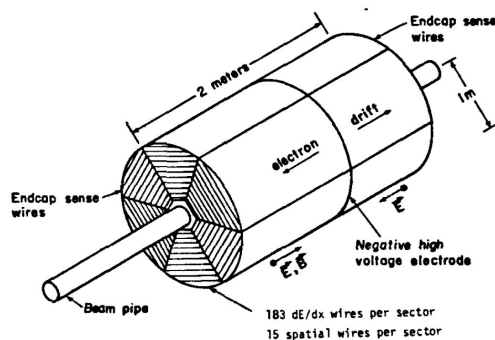
$$[M(a = 0.008 \text{ cm}) = 2.5, M(a = 0.004 \text{ cm}) = 860]$$

## 2.3 Time Projection Chamber (TPC)

### 2.3.1

Oceni prostorsko ločljivost PEP-4 TPC-ja. Ta detektor sestavljata dva zrcalno simetrična dela, dolga 1 m in z radijem 1 m (Slika 3). Komora je napolnjena s plinom, ki je 80% Ar in 20% CH<sub>4</sub>, v njej pa je električno polje  $E = 750 \text{ V/cm}$  in magnetno polje  $B = 4 \text{ kG}$ , ki so ga pozneje nadgradili na  $B = 15 \text{ kG}$ . Oceni prispevek difuzije k prostorski ločljivosti vzdolž ( $\sigma_z$ ) in pravokotno ( $\sigma_{x,y}$ ) na magnetno polje, za primer obeh velikosti magnetnega polja.

Ostali podatki: hitrost nosilcev naboja (drift velocity)  $u = 5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ , efektivno število elektronov, ki prispevajo k signalu  $N = 175$ . Povprečni čas med trki lahko izračunamo iz enačbe  $\tau = (m \cdot \mu)/e$ .



Slika 3: A schematic drawing of the PEP-4 TPC.

$$[\sigma_z \approx 63 \mu\text{m}, \sigma_{x,y}(B = 4 \text{ kG}) \approx 61 \mu\text{m}, \sigma_{x,y}(B = 15 \text{ kG}) \approx 44 \mu\text{m}]$$

## 3 Polprevodniški detektorji

### 3.1

Izračunaj energijsko ločljivost 1 mm debelega silicijevega detektorja v primeru pravokotnega preleta MIP ( $dE/dx \approx 2 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ ) delca ( $T = 300 \text{ K}$ ). Kakšna bi bila ločljivost v primeru germanijevega detektorja pri  $T = 77 \text{ K}$ . Primerjaj z nalogo 2.1.1.

$$[\text{Si}: R = 0.088\%, R_{FWHM} = 0.21\%; \text{Ge}: R = 0.053\%, R_{FWHM} = 0.12\%]$$

### 3.2

Kakšna je energijska ločljivost detektorja iz naloge 1.3?

$$[R = 0.21\%]$$

### 3.3

Izračunaj razmerje v številu termalno generiranih parov elektron-vrzel v germaniju pri temperaturah 300 K in 77 K.

$$[n(300 \text{ K})/n(77 \text{ K}) = 1.3 \cdot 10^{17}]$$

### 3.4

Vzemi planaren germanijev detektor pri  $T = 77 \text{ K}$ , v katerem je homogeno električno polje z  $1000 \text{ V/cm}$ . Kolikšna je širina prostorske porazdelitve zaradi difuzije za elektron, ki je vzbujen v prevodni pas znotraj volumna detektorja, po  $1 \text{ cm}$  potovanja skozi detektor (mobilnost za elektrone v germaniju pri  $77 \text{ K}$  je  $3.6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ).

$$[\sigma = 36 \mu\text{m}]$$

### 3.5

Kolikšna je lahko največja gostota primesi nečistoč, da v detektorju iz prejšnje naloge lahko dobimo izpraznjeno področje debeline  $1 \text{ cm}$ .

$$[N_D = 1.8 \cdot 10^{10}]$$

### 3.6

Kakšen je zbrani naboj v planarnem silicijevem detektorju z izpraznjenim področjem debeline  $d = 1 \text{ mm}$  ob času  $t_1 = \tau \frac{\mu_h}{\mu_e} \ln \frac{d}{x_0}$ , za par elektron vrzel ki nastaneta na polovici debeline izpraznjenega področja ( $x_0 = 0.5 \text{ mm}$ ) in koncentracijo nečistoč  $N_a = 10^{13}/\text{cm}^3$ .

Enačbe za razvoj signala, npr. enačbe 10.28 - 10.37 v [1].

$$[Q_e = 0.5 \cdot e_0, Q_h = 0.14 \cdot e_0]$$

## 4 Scintilacijski detektorji

### 4.1

Izračunaj energijsko ločljivost za scintilatorja LSO in BGO, ki se uporabljata v pozitronski tomografiji (PET) z zaznavanje koincidenčnih žarkov gamma z energijo  $511 \text{ keV}$  ter za scintilator NaI(Tl), če ga uporabljamo v SPECT kameri za zaznavanje žarkov gamma z energijo  $140.5 \text{ keV}$ . Za pridelek fotonov vzemi:  $L_{LSO} = 30000 \text{ fotonov/MeV}$ ,  $L_{BGO} = 8000 \text{ fotonov/MeV}$ ,  $L_{NaI(Tl)} = 40000 \text{ fotonov/MeV}$ .

$$[\text{LSO: } R_{FWHM} = 1.9\%; \text{ BGO: } R_{FWHM} = 3.7\%; \text{ NaI(Tl): } R_{FWHM} = 3.1\%]$$

### 4.2

Primerjaj časovno ločljivost PET skenerjev, ki uporabljata LSO in BGO scintilatorje. Prispevek scintilatorja k časovni ločljivost pet skenerja se skalira kot

$$\delta t \propto \sqrt{\frac{\tau}{N}}$$

kjer sta  $\tau$  scintilacijski razpadni čas ( $\tau_{LSO} = 40 \text{ ns}$ ,  $\tau_{BGO} = 300 \text{ ns}$ ) in  $N$  število scintilacijskih fotonov.

$$[\delta t_{BGO}/\delta t_{LSO} = 5.3]$$

### 4.3

Kakšen je izkoristek scintilatorja, če po absorpciji delca z energijo  $1 \text{ MeV}$  v scintilatorju nastane  $20300$  fotonov z valovno dolžino  $447 \text{ nm}$ ?

$$[\epsilon = 5.6\%]$$

## 4.4

Izračunaj zgornjo mejo občutljivosti (maksimalno valovno dolžino) fotokatode z izstopnim delom 1.5 eV. Kakšna je največja valovna dolžina svetlobe, ki v siliciju ( $E_g(300K) = 1.12$  eV) še lahko povzroči nastanek para elektron-vrzel.

$$[\text{fotokatoda: } \lambda_{MAX} = 827 \text{ eV; Si: } \lambda_{MAX} = 1107 \text{ eV}]$$

## 4.5

Delec v scintilatorju NaI(Tl) pusti energijo 1 MeV. Ali lahko opazovalec z očesom na razdalji 10 cm od površine scintilatorja zazna nastali pulz svetlobe? Na temo prilagojeno oko lahko zazna pulz, če je v njem vsaj 10 fotonov, za odprtino zenice pa vzemi premer 3 mm.

$$[N_{\text{zaznanih}} = 2.25 < N_{MIN}]$$

## 4.6

Detektor je sestavljen iz scintilatorja NaI(Tl) in fotopomnoževalke. Kakšna je amplituda signala iz fotopomnoževalke za delec, ki v scintilatorju pusti energijo 1.2 MeV, če je izkoristek zbiranja svetlobe na fotopomnoževalko 80%, povprečni kvantni izkoristek fotopomnoževalke za nastalo scintilacijsko svetlobo 20%, ojačanje fotopomnoževalke  $10^5$ , kapacitivnost anode 100 pF in upornost anode  $10^5 \Omega$ ?

$$[U_{MAX} = 1.075 \text{ V}]$$

## 4.7

S scintilatorjem zaznavamo  $\alpha$  delce z energijo 5 MeV. V scintilatorju se absorbira  $10^6$  delcev/s, pri čemer z izkoristkom 3% nastaja scintilacijska svetloba z valovno dolžino 420 nm. Z izkoristkom 80% zbiramo svetlobo na fotodiodi, ki ima pri 420 nm kvantni izkoristek 75%. Izračunaj tok skozi fotodiodo, če jo uporabljamo v tokovnem načinu.

$$[I = 4.9 \text{ nA}]$$

# 5 Identifikacija delcev (PID)

## 5.1 Meritve časa preleta (TOF)

Z detektorjem TOF (time-of-flight) ločujemo pione ( $m(\pi) = 140$  MeV) od kaonov ( $m(K) = 493$  MeV) na razdalji  $L = 2$  m. Kakšna je razlika v časih preleta pri gibalnih količinah 2 GeV/c in 4 GeV/c?

$$\Delta t = \frac{L}{\beta_1 c} - \frac{L}{\beta_2 c} = \frac{L}{c} \left[ \sqrt{1 + \frac{(m_1 c^2)^2}{(pc)^2}} - \sqrt{1 + \frac{(m_2 c^2)^2}{(pc)^2}} \right]$$

$$[\Delta t = 183 \text{ ps (2 GeV/c); 46 ps (4 GeV/c)}]$$

## 5.2 Detektorji svetlobe Čerenkova

### 5.2.1 Pragovni števeci

Ali s pragovnim števcem svetlobe Čerenkova (Threshold Cherenkov Counter), ki kot sevalec uporablja aerogel z lomnim količnikom  $n = 1.010$ , lahko dobro ločimo pione od kaonov pri gibalni količini 1.5 GeV/c? Kaj pa pri 4 GeV/c?

$$\beta_t = \frac{1}{n}$$

$$[\text{da (1.5 GeV/c); ne (4 GeV/c)}]$$



### 5.2.2 Ring Imaging Cherenkov (RICH) counters

Z RICH detektorji lahko ločimo delce z različno hitrostjo preko razlike v kotu izsevane svetlobe Čerenkova. Kako dobro lahko ločimo pione od kaonov pri gibalni količini 4 GeV/c s *Proximity Focusing* RICH detektorjem, ki uporablja sevalec z lomnim količnikom  $n = 1.05$ ? Ločljivost meritve za posamezn dogodek (prelet delca) je

$$\sigma_{Track} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{N_{pe}}}$$

kjer sta  $\sigma_0$  ločljivost za posamezn foton (izmerjena vrednost 14 mrad) in  $N_{pe}$  število zaznanih fotonov v dogodku (v povprečju 10).

$$\cos\theta_C = \frac{1}{\beta n} \rightarrow \theta_C(\pi) - \theta_C(K) = 22.6 \text{ mrad}$$

$$\sigma_{Track} = \frac{14 \text{ mrad}}{\sqrt{10}} = 4.427 \text{ mrad}$$

$$\text{moč ločevanja} = \frac{\theta_C(\pi) - \theta_C(K)}{\sigma_{Track}} = 5.1$$

[5· $\sigma$ ]

## 6 Kalorimetrija

### 6.1 Elektromagnetni kalorimetri

Z železnim (Fe:  $\rho = 7.87 \text{ g/cm}^3$ ,  $Z = 26$ ,  $A = 55.85$ ) kalorimetrom želimo zajeti 95% energije elektrona z vstopno energijo  $E_0 = 10 \text{ GeV}$ . Najmanj kolikšni morata biti vzdolžna in prečna dimenziji kalorimetra?

$$\text{Vzdolžna: } t_{95} \approx t_{MAX} + 0.08 \cdot Z + 9.6$$

$$\text{Prečna: } R_M \approx \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0$$

$$t_{MAX} \approx \frac{1}{\ln 2} \ln \frac{E_0}{E_c}$$

[ $X_0 = 1.76 \text{ cm}$  ( $13.9 \text{ g/cm}^2$ );  $E_c = 22.4 \text{ MeV}$ ;  $t_{MAX} = 8.8$  ( $\cdot X_0: 15.5 \text{ cm}$ );  $t_{95} = 20.5$  ( $\cdot X_0: 36.1 \text{ cm}$ );  $R_M = 1.65 \text{ cm}$ ]

### 6.2 Hadronski kalorimetri

Z železnim kalorimetrom želimo zajeti 95% energije hadrona z vstopno energijo  $E_0 = 10 \text{ GeV}$ . Najmanj kolikšni morata biti vzdolžna in prečna dimenziji kalorimetra?

$$\text{Vzdolžna: } t_{95} \approx t_{MAX} + 2.5 \cdot (E_0[\text{GeV}])^{0.13}$$

$$\text{Prečna: } R_M \approx \lambda_I$$

$$t_{MAX} \approx 0.2 \cdot \ln(E_0[\text{GeV}]) + 0.7$$

$$\lambda_I \approx \frac{1}{\rho} 35A^{1/3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

[ $\lambda_I = 17 \text{ cm}$ ;  $t_{MAX} = 1.161$  ( $\cdot \lambda_I: 19.7 \text{ cm}$ );  $t_{95} = 4.53$  ( $\cdot \lambda_I: 77 \text{ cm}$ );  $R_M = 17 \text{ cm}$ ]

## Literatura

- [1] **W.R. Leo**, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer Verlag, Berlin 1994.
- [2] **Review of Particle Physics, 2014**  
(<http://pdg.lbl.gov/2015/download/rpp2014-Chin.Phys.C.38.090001.pdf>)
- [3] **Review of Particle Physics, 2018** (<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.98.030001>)
- [4] **Handbook of Particle Detection and Imaging**, edited by Claus Grupen, Irène Buvat, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg 2012
- [5] **XCOM crossection calculator** (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>)
- [6] **G.F. Knoll**, Radiation Detection and Measurement, J.Wiley, New York 1979.