

II Bonus di Fisica Nucleare e Subnucleare 1 - AA 2018/2019

29 Maggio 2019

NOME E COGNOME:	CANALE:

1. State progettando un esperimento ad un nuovo acceleratore di particelle, che sia in grado di rivelare segnali di nuova fisica in diverse tipologie di stato finale. Un esperimento di questo tipo è composto da una serie di rivelatori, disposti in simmetria cilindrica attorno all'asse di collisione dei fasci di particelle (ad LHC, protoni), che vengono utilizzati per ricostruire e identificare i diversi tipi di particelle prodotte nelle collisioni. Si propone la soluzione rappresentata in Figura 1 tramite la sezione centrale di questo cilindro; si hanno, dall'interno verso l'esterno:

- un tracciatore di particelle cariche, realizzato da tre strati di silicio spessi $d_1 = 1$ cm, immerso in un campo magnetico diretto lungo l'asse del cilindro $B = 2$ T;
- un calorimetro, realizzato da dieci blocchi di piombo di spessore $d_2 = 1$ cm, ciascuno intervallato da strati di argon liquido spessi $d_3 = 10$ cm (Figura 2, non in scala);
- il solenoide che genera il campo magnetico;
- uno spessore in ferro di 100 cm, per il ritorno del campo magnetico;
- uno spettrometro per muoni, composto da tre stazioni di misura della posizione, poste ad una distanza di 1 m l'una dall'altra.

Nel piano trasverso xy , dunque, una particella prodotta nel punto di interazione (PI) attraversa una regione con campo magnetico $B = 2$ T, ortogonale alla sua traiettoria, in cui si trovano tracciatore e calorimetro, passa nello spessore di ferro e quindi incontra le stazioni di misura delle coordinate x ed y , immerse in un campo magnetico uguale in direzione e modulo ma di verso opposto.

- a. Quanta energia perde nel calorimetro un muone che vi incide con 100 GeV di energia? E un pione carico che vi incide con 10 GeV di energia? Si può considerare costante la perdita di energia in funzione dell'energia.

Molti dei processi che volete misurare, come ad esempio i decadimenti del bosone di Higgs o il decadimento di ipotetiche particelle di nuova fisica, coinvolgono la produzione di muoni di energie che vanno dalla decina di GeV a qualche TeV. Volete valutare le prestazioni del vostro rivelatore nel ricostruire muoni di questo intervallo di energia.

Uno dei fondi principali alla ricostruzione di muoni di qualche GeV è costituito dal decadimento dei pioni carichi, ad esempio $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, in cui il pione viene ricostruito nel tracciatore interno, decade nel calorimetro o nel ferro, e produce un muone che viene ricostruito nello spettrometro per muoni. Questo fondo viene rigettato richiedendo che la direzione della traccia ricostruita nel tracciatore interno sia compatibile in angolo con la traccia ricostruita nello spettrometro, dopo aver attraversato il calorimetro ed il ferro del magnete. L'efficacia del metodo è influenzata quindi dalle fluttuazioni della traiettoria delle particelle nel materiale attraversato.

- b. Quali fluttuazioni (RMS) di angolo vi aspettate per muoni di energia 10 GeV nell'attraversare il calorimetro ed il ferro?

La ricerca di risonanze di massa ignota, che decadono in coppie muone-antimuone, richiede invece di conoscere con precisione la risoluzione in impulso dei muoni prodotti nel loro decadimento (da cui dipende, fra l'altro, la risoluzione sulla massa misurata della risonanza). L'impulso si ricava utilizzando le misure nello spettrometro per muoni per valutare la *sagitta*, ovvero la quantità s in Figura 3.

- c. Se la sagitta misurata è pari a $100 \mu\text{m}$, qual è l'impulso della particella incidente?

Si assuma che la massa del muone sia 105.6 MeV , la massa dell'elettrone 511 keV e la massa del pione 139.6 MeV . Nel calcolo delle perdite di energia per ionizzazione, si trascurino l'effetto densità e la correzione di shell. Si usino i valori in tabella per le proprietà dei vari materiali.

Soluzione:

- a. Dalla formula di Bethe

$$-\frac{dE}{dx} = 0.307 \text{ MeV/gcm}^2 \rho \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta} \right)^2 \left[\log \left(\frac{2m_e c^2 (\beta\gamma)^2}{\langle I \rangle} \right) - \beta^2 \right]$$

la perdita di energia per un muone risulta pari a 27.5 MeV in ciascuno strato di Piombo e 41.2 MeV in ciascuno strato di LAr, per una perdita di energia totale pari a $\Delta E = 10 * 27.5 \text{ MeV} + 9 * 41.2 \text{ MeV} = 645.8 \text{ MeV}$. Tenendo conto della dipendenza della perdita di energia dall'energia, il calcolo avrebbe fornito le seguenti perdite di energia per ionizzazione ed energie all'uscita da ciascuno strato:

strato	$\Delta E_{\mu}^{\text{ion}} (\text{MeV})$	$E_{\mu}^{\text{out}} (\text{MeV})$
Pb #0	27.49	99972.51
LAr #0	41.21	99931.30
Pb #1	27.49	99903.81
LAr #1	41.21	99862.60
Pb #2	27.49	99835.11
LAr #2	41.20	99793.90
Pb #3	27.49	99766.42
LAr #3	41.20	99725.22
Pb #4	27.49	99697.73
LAr #4	41.20	99656.53
Pb #5	27.48	99629.05
LAr #5	41.20	99587.85
Pb #6	27.48	99560.37
LAr #6	41.19	99519.18
Pb #7	27.48	99491.70
LAr #7	41.19	99450.50
Pb #8	27.48	99423.03
LAr #8	41.19	99381.84
Pb #9	27.48	99354.36

per un totale di 646 MeV persi dal muone.

Il pione perde, strato per strato:

strato	$\Delta E_{\pi}^{\text{ion}}(\text{MeV})$	$\Delta E_{\pi}^{\text{nucl}}(\text{MeV})$	$E_{\pi}^{\text{out}}(\text{MeV})$
Pb #0	20.16	518.84	8825.31
LAr #0	30.75	971.83	7822.74
Pb #1	19.66	433.43	7369.65
LAr #1	30.05	811.53	6528.06
Pb #2	19.16	361.69	6147.21
LAr #2	29.36	676.92	5440.93
Pb #3	18.66	301.46	5120.81
LAr #3	28.66	563.89	4528.26
Pb #4	18.16	250.89	4259.21
LAr #4	27.95	469.02	3762.24
Pb #5	17.65	208.45	3536.14
LAr #5	27.25	389.39	3119.51
Pb #6	17.14	172.84	2929.53
LAr #6	26.54	322.59	2580.40
Pb #7	16.63	142.97	2420.80
LAr #7	25.82	266.57	2128.40
Pb #8	16.11	117.93	1994.36
LAr #8	25.11	219.62	1749.64
Pb #9	15.60	96.94	1637.10
ferro	1373.05	1632.98	139.60

ovvero $10 \times 10^3 \text{ MeV} - 1637.10 \text{ MeV} \approx 8363 \text{ MeV}$.

- b. Quando passa nel calorimetro e nel ferro di ritorno, il muone attraversa rispettivamente $25.3X_0$ e $1 \text{ m}/(14 \text{ g/cm}^2/7.9 \text{ g/cm}^3) \approx 56.4X_0$, ovvero un totale di $81.7X_0$. Ne segue che la sua direzione devierà, a causa dello scattering multiplo, di un angolo la cui distribuzione ha una RMS (nello spazio) pari a

$$\langle \theta \rangle = \frac{21 \text{ MeV}}{\beta c |\mathbf{p}|} \sqrt{\frac{X}{X_0}} \approx \frac{21 \text{ MeV}}{1 \times 10 \text{ GeV}} \sqrt{81.7} \approx 19 \text{ mrad}.$$

- c. La sagitta può essere calcolata, nell'approssimazione di piccoli angoli, come:

$$s = R - R \cos \frac{\theta}{2} = R(1 - \cos \frac{\theta}{2}) = R \cdot 2 \sin^2 \frac{\theta}{4} \sim R \cdot 2 \frac{\theta^4}{16} = \frac{L^2}{8R^2}.$$

La relazione che lega l'impulso alla sagitta è quindi:

$$p = 0.3BR = 0.3B \frac{L^2}{8s} \sim 3 \text{ TeV}$$

2. Stabilire quali delle reazioni e decadimenti sotto indicati sono permessi e quali sono proibiti.
Per quelli proibiti, indicare tutti i numeri quantici (o le leggi di conservazione) che sono violati.
Per quelli permessi, indicare la forza che media l'interazione.

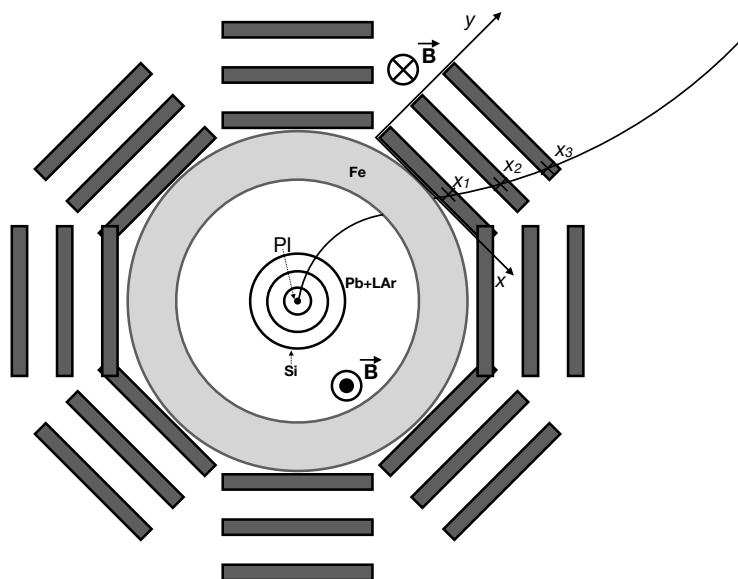


Figura 1: Sezione trasversale centrale del rivelatore dell'esercizio 1 (non in scala)

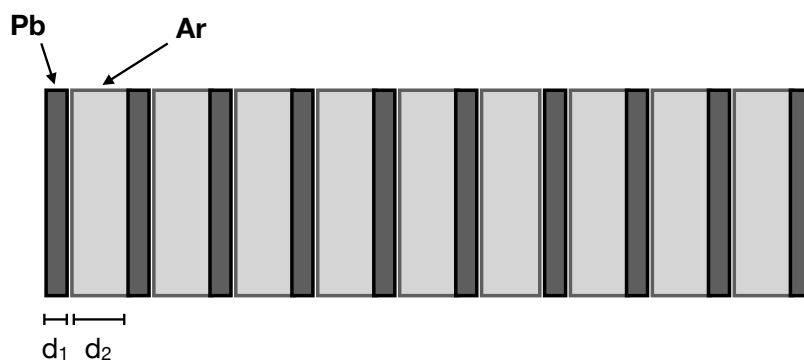


Figura 2: Sezione longitudinale del calorimetro dell'esercizio 1 (non in scala)

materiale	densità [g/cm ³]	indice di rifrazione medio	Z	A	potenziale medio di ecci- tazione [eV]	lunghezza di radia- zione [g/cm ²]	energia critica [MeV]	lunghezza di inte- razione nucleare [g/cm ²]
silicio	2.3		14	28	173	22	40	108
argon liquido	1.4	1.25	18	40	188	20	33	120
piombo	11.4		82	207	823	6	7	200
ferro	7.9		26	56	286	14	22	132
aria	0.0012	1	Z/A=0.5		86	37	88	90

Tabella 1: Caratteristiche dei materiali

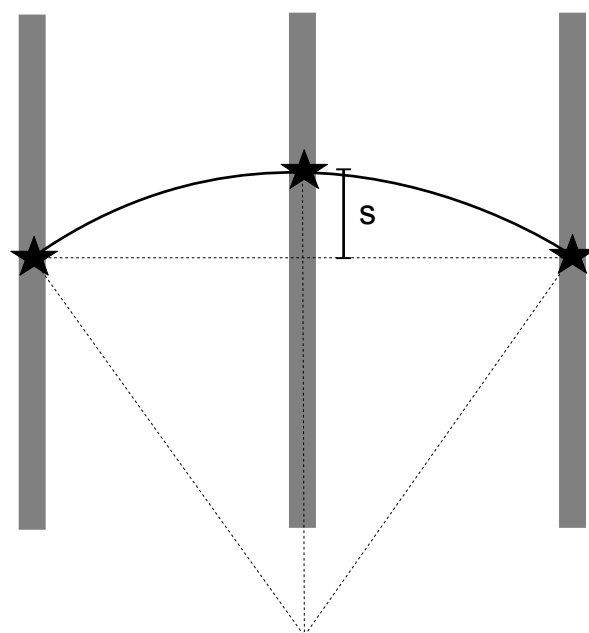


Figura 3: Definizione di sagitta

$$\text{a) } \pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$$

$$\text{b) } K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^0$$

$$\text{c) } \nu_\mu + p \rightarrow e^+ + n$$

$$\text{d) } e^+ + e^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$$

$$\text{e) } p + p \rightarrow \Sigma^+ + n + K^0 + \pi^+$$

$$\text{f) } \pi^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^+$$

$$\text{g) } \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\text{h) } K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu$$

$$\text{i) } \Lambda \rightarrow n + \pi^+ + \pi^-$$

$$\text{l) } \bar{K}^0 \rightarrow \pi^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\text{m) } \mu^- \rightarrow e^+ + e^- + \nu_\mu$$

$$\text{n) } \pi^0 \rightarrow \mu^- + e^+$$

Soluzione:

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

i)

l)

m)

n)