

## Large Hadron Collider (10 punti)

Prima di iniziare questo problema, leggi le istruzioni generali nella busta a parte.

In questo problema è discussa la fisica dell'acceleratore di particelle del CERN chiamato LHC (Large Hadron Collider). Il CERN è il più grande laboratorio di fisica delle particelle del mondo. Il suo scopo principale è quello di andare a fondo nelle leggi fondamentali della natura. Due fasci di particelle sono accelerati ad alte energie, guidati nell'anello dell'acceleratore da un forte campo magnetico e infine sono fatti scontrare uno con l'altro. I protoni non sono distribuiti uniformemente lungo la circonferenza dell'acceleratore, ma sono raggruppati in insiemi detti grappoli. Le particelle generate dalle collisioni vengono osservate tramite grandi rivelatori. Puoi trovare alcuni parametri di LHC nella tabella 1.

Anello di LHC	
Circonferenza dell'anello	26659 m
Numero di grappoli per ogni fascio di protoni	2808
Numero di protoni per grappolo	$1.15 \times 10^{11}$
Fasci di protoni	
Energia dei protoni	7.00 TeV
Energia nel centro di massa	14.0 TeV

Tabella 1: Valori numerici tipici dei parametri fondamentali di LHC.

I fisici delle particelle utilizzano unità di misura comode per energia, quantità di moto e massa.

L'energia è misurata in elettronvolt [eV]. Per definizione, 1 eV è la quantità di energia acquisita da una particella di carica elementare,  $e$ , che si muove attraverso una differenza di potenziale di un Volt ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ).

La quantità di moto è misurata in unità di  $\text{eV}/c$  e la massa in unità di  $\text{eV}/c^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto. Dato che 1 eV è una quantità di energia molto piccola, i fisici delle particelle usano spesso MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) o TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

La parte A riguarda l'accelerazione di protoni ed elettroni. La parte B tratta il riconoscimento delle particelle prodotte nelle collisioni al CERN.

### Parte A. Acceleratore LHC (6 punti)

#### Accelerazione:

Assumi che i protoni siano stati accelerati da una differenza di potenziale  $V$  tale che la loro velocità sia molto vicina a quella della luce e trascura ogni perdita di energia dovuta all'emissione di radiazione o a urti con altre particelle.

- |            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>A.1</b> | Trova l'espressione esatta per la velocità finale $v$ dei protoni in funzione del potenziale accelerante $V$ , e delle costanti fisiche. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

Il progetto per un esperimento futuro al CERN prevede di usare i protoni di LHC per farli scontrare con elettroni che hanno un'energia di 60.0 GeV.

- A.2** Per particelle con grande energia e piccola massa la deviazione relativa  $\Delta = (c - v)/c$  della velocità finale  $v$  dalla velocità della luce è molto piccola. Trova un'approssimazione al primo ordine per  $\Delta$  e calcola  $\Delta$  per elettroni con un'energia di 60.0 GeV usando il potenziale  $V$  che li ha accelerati e le costanti fisiche. 0.8pt

Torniamo ora ai protoni in LHC. Assumi che il tubo in cui si muove il fascio abbia forma di un anello.

- A.3** Ricava un'espressione per il campo magnetico uniforme  $B$  necessario per mantenere il fascio di protoni su una traiettoria circolare. L'espressione deve contenere solo l'energia  $E$  dei protoni, la lunghezza  $L$  della circonferenza, costanti fondamentali e numeri. Puoi usare opportune approssimazioni se il loro effetto è più piccolo della precisione data dal minimo numero di cifre significative. Calcola il campo magnetico  $B$  per un'energia del protone  $E = 7.00$  TeV, trascurando le interazioni tra i protoni. 1.0pt

## Potenza irradiata:

Una particella carica accelerata irradia energia sotto forma di onde elettromagnetiche. La potenza  $P_{\text{rad}}$  irradiata da una particella carica che compie un moto circolare a velocità angolare costante dipende solo dalla sua accelerazione  $a$ , dalla sua carica  $q$ , dalla velocità della luce  $c$  e dalla costante dielettrica del vuoto  $\epsilon_0$ .

- A.4** Utilizzando l'analisi dimensionale, trova un'espressione per la potenza irradiata  $P_{\text{rad}}$ . 1.0pt

La formula reale per la potenza irradiata contiene un fattore numerico  $1/(6\pi)$ ; inoltre, con una derivazione completamente relativistica si ricava un ulteriore fattore moltiplicativo  $\gamma^4$ , con  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Calcola  $P_{\text{tot}}$ , la potenza totale irradiata di LHC, per un'energia dei protoni di  $E = 7.00$  TeV (nota la tabella 1). Puoi usare le approssimazioni adeguate. 1.0pt

## Accelerazione lineare:

Al CERN, i protoni a riposo sono accelerati da un acceleratore lineare di lunghezza  $d = 30.0$  m attraverso una differenza di potenziale  $V = 500$  MV. Assumi che il campo elettrico sia uniforme. Un acceleratore lineare consiste di due armature come rappresentato in Figura 1.

- A.6** Determina il tempo  $T$  che i protoni impiegano a passare attraverso questo campo. 1.5pt

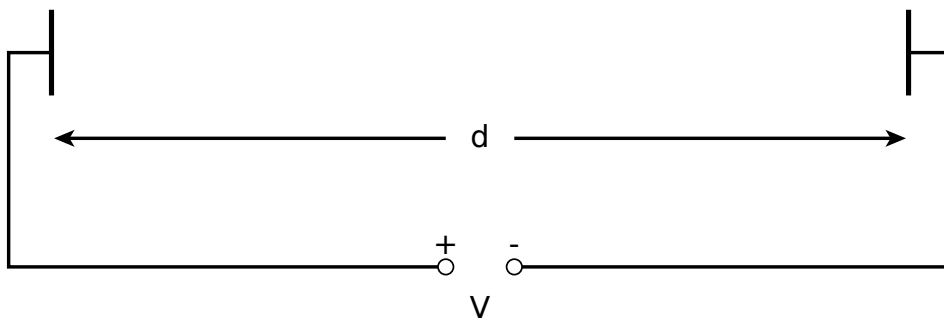


Figura 1: Rappresentazione dell'acceleratore lineare.

## Parte B. Riconoscimento delle particelle (4 punti)

### Tempo di volo:

Identificare le particelle ad alta energia generate nella collisione è importante per interpretare il processo di interazione. Un semplice metodo consiste nel misurare il tempo ( $t$ ) che una particella con quantità di moto nota impiega a percorrere una lunghezza  $l$  in un cosiddetto rivelatore Time-of-Flight (ToF). Le tipiche particelle che vengono identificate nel rivelatore sono elencate, insieme alle loro masse, in Tabella 2.

Particella	Massa [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deutone	1876
Protone	938
Kaone carico	494
Pione carico	140
Elettrone	0.511

Tabella 2: particelle con la loro massa.

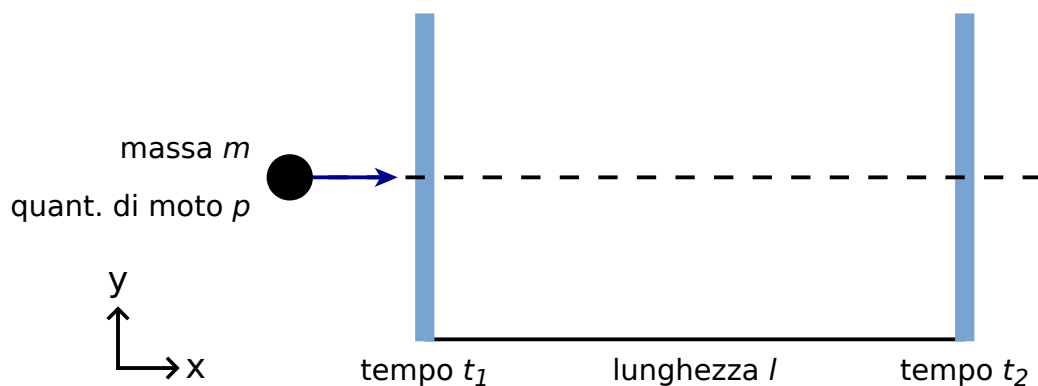
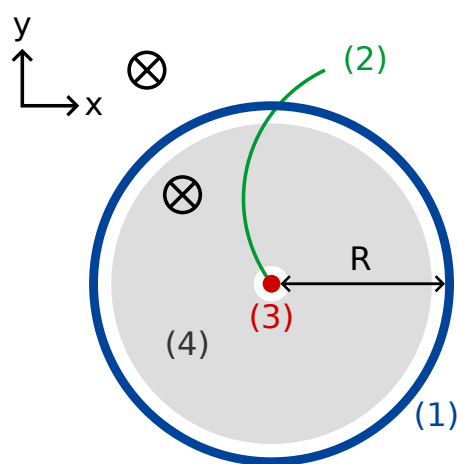


Figura 2: Rappresentazione schematica di un rivelatore time-of-flight.

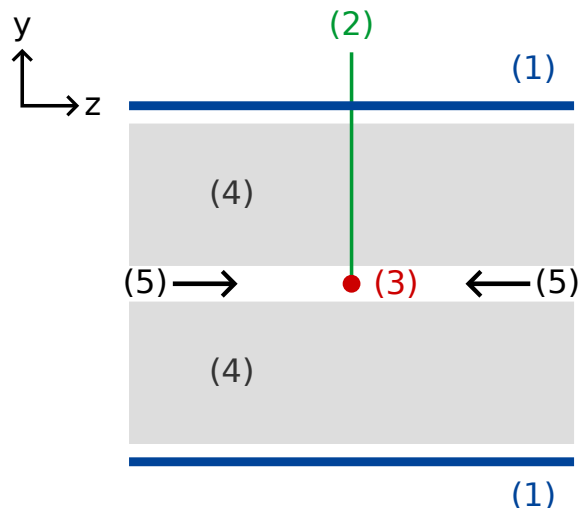
- B.1** Esprimi la massa  $m$  in funzione della quantità di moto  $p$ , della lunghezza di volo  $l$  e del tempo di volo  $t$ , assumendo che queste particelle abbiano carica elementare  $e$ , che viaggino con velocità vicina a  $c$  su percorsi rettilinei nel rivelatore ToF e che viaggino perpendicolarmente alle due armature (vedi Figura 2). 0.8pt

- B.2** Calcola la minima lunghezza  $l$  di un rivelatore ToF che permette di distinguere in modo certo un kaone carico da un pione carico, sapendo che la quantità di moto di entrambi è stata misurata ed è  $1.00 \text{ GeV}/c$ . Per una buona separazione è richiesto che la differenza tra i tempi di volo sia maggiore del triplo della risoluzione temporale del rivelatore. La tipica risoluzione di un rivelatore ToF è  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

Nella parte seguente, le particelle prodotte in un tipico rivelatore di LHC sono identificate in un rivelatore a due fasi composto da un tracciatore e da un rivelatore ToF. La Figura 3 mostra l'apparato in un piano trasversale e in un piano longitudinale ai fasci di protoni. Entrambi i rivelatori sono tubi che circondano la regione degli urti, con il fascio che passa nella parte centrale dei tubi. Il tracciatore misura la traiettoria di una particella carica che passa attraverso un campo magnetico la cui direzione è parallela ai fasci di protoni. Il raggio  $r$  della traiettoria permette di determinare la quantità di moto trasversale  $p_T$  della particella. Dato che l'istante della collisione è noto, il rivelatore ToF necessita solo di un tubo per misurare il tempo di volo che è misurato dal punto di collisione al tubo ToF. Questo tubo ToF è situato appena fuori dal tracciatore. In questa domanda puoi assumere che tutte le particelle create nell'urto viaggino perpendicolarmente ai fasci di protoni, cioè che le particelle che si creano nell'urto non abbiano una componente della quantità di moto nella direzione dei fasci di protoni.



piano trasversale



sezione della  
vista longitudinale al centro  
del tubo lungo la linea del fascio

- (1) - tubo ToF
- (2) - traiettoria
- (3) - punto di collisione
- (4) - tubo tracciatore
- (5) - fasci di protoni
- ⊗ - campo magnetico

Figura 3 : Configurazione sperimentale per l'identificazione di particelle con una camera di tracciamento e un rivelatore ToF. Entrambi i rivelatori sono tubi che circondano il punto di collisione nel mezzo. Sinistra: sezione trasversale perpendicolare alla linea dei fasci. Destra: sezione longitudinale parallela alla linea dei fasci. La particella viaggia perpendicolarmente alla linea dei fasci.

**B.3** Esprimi la massa della particella in funzione del campo magnetico  $B$ , del raggio  $R$  del tubo ToF, delle costanti fondamentali e delle quantità misurate: il raggio  $r$  della traiettoria e il tempo di volo  $t$ . 1.7pt

Abbiamo rivelato quattro particelle e vogliamo identificarle. Il campo magnetico nel tracciatore era  $B = 0.500$  T. Il raggio  $R$  del tubo ToF era  $3.70$  m. Qui sono riportate le misurazioni ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ):

Particella	Raggio della traiettoria $r$ [m]	Tempo di volo $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

<b>B.4</b>	Identifica le quattro particelle calcolando la loro massa.
------------	--

0.8pt