

Dov'è il neutrino? (10 punti)

Quando due protoni con alta energia si scontrano nel Large Hadron Collider (LHC), in conseguenza di questa collisione molte particelle possono essere prodotte, come elettroni, muoni, neutrini, quark e le loro rispettive anti-particelle. La maggior parte di queste particelle può essere osservata dal rivelatore di particelle posizionato attorno al punto di collisione. Ad esempio, i quark subiscono un processo chiamato *adronizzazione* che li trasforma in una pioggia di particelle subatomiche, chiamate "jet" (in italiano "getto di particelle").

Oltretutto, il forte campo magnetico presente nei rivelatori permette di curvare sensibilmente le traiettorie delle particelle cariche, persino quelle ad alta energia, in modo da poter determinare la loro quantità di moto. Il rivelatore ATLAS utilizza un sistema a solenoide superconduttore che produce un campo magnetico costante e uniforme di 2.00 Tesla nella parte interna del rivelatore che circonda la zona di collisione. Le particelle cariche con una quantità di moto al di sotto di un certo valore di soglia saranno curvate in modo così forte da farle girare indefinitamente nel campo magnetico e molto probabilmente non raggiungeranno il rivelatore. Data la sua natura, il neutrino non viene rivelato per niente, in quanto passa attraverso il rivelatore senza interagire.

Dati: Massa dell'elettrone a riposo, $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg; carica elementare, $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C;

Velocità della luce, $c = 3.00 \times 10^8$ m s⁻¹; Costante dielettrica del vuoto, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F m⁻¹

Parte A. La fisica del rivelatore ATLAS (4.0 punti)

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Ricava un'espressione per il raggio di ciclotrone, r , della traiettoria circolare di un elettrone su cui agisce una forza magnetica perpendicolare alla sua velocità ed esprimi questo raggio in funzione dell'energia cinetica dell'elettrone, K , del valore assoluto della sua carica, e , della sua massa, m , e del campo magnetico, B . Supponi che l'elettrone sia una particella classica non relativistica, cioè trascura gli effetti relativistici. | 0.5pt |
|------------|--|-------|

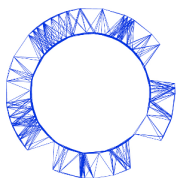
Gli elettroni prodotti all'interno del rivelatore ATLAS devono essere studiati in maniera relativistica. Tuttavia, la formula per il raggio del ciclotrone vale anche nel caso relativistico, a patto di considerare la quantità di moto relativistica.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.2 | Calcola il valore minimo della quantità di moto di un elettrone necessaria per uscire dalla parte interna del rivelatore in direzione radiale. La parte interna del rivelatore ha una forma cilindrica con un raggio di 1,1 metri e l'elettrone viene prodotto nel punto di collisione situato esattamente al centro del cilindro. Fornisci la tua risposta in MeV/ c . | 0.5pt |
|------------|---|-------|

Quando vengono accelerate in direzione perpendicolare alla loro velocità, le particelle relativistiche con carica e e massa a riposo m emettono radiazioni elettromagnetiche, chiamate radiazione di sincrotrone. La potenza delle radiazioni emesse è data da

$$P = \frac{e^2 a^2 \gamma^4}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

dove a è l'accelerazione e $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$.



- A.3** Una particella è chiamata ultrarelativistica quando la sua velocità è molto prossima alla velocità della luce. Per una particella ultrarelativistica, la potenza emessa può essere espressa come: 1.0pt

$$P = \xi \frac{e^4}{\epsilon_0 m^k c^n} E^2 B^2,$$

dove ξ è un numero reale, n, k sono numeri interi, E è l'energia della particella carica e B è il campo magnetico. Determina ξ, n e k .

- A.4** Nel limite ultrarelativistico, l'energia dell'elettrone varia in funzione del tempo secondo la legge: 1.0pt

$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \alpha E_0 t},$$

dove E_0 è l'energia iniziale dell'elettrone. Determina α in funzione di e, c, B, ϵ_0 e m .

- A.5** Considera un elettrone prodotto nel punto di collisione lungo la direzione radiale con un'energia di 100 GeV. Stima la quantità di energia che viene dispersa a causa della radiazione di sincrotrone fino a quando l'elettrone esce dalla parte interna del rivelatore. Esprimi la tua risposta in MeV. 0.5pt

- A.6** Trova un'espressione per la frequenza di ciclotrone dell'elettrone in funzione del tempo nel limite ultrarelativistico. 0.5pt

Parte B. Trova il neutrino (6.0 punti)

La collisione tra i due protoni mostrata in Figura 1 porta alla produzione di un quark top (t) e di un anti-quark top (\bar{t}), le particelle elementari più massive mai rivelate. Il quark top decade in un bosone W^+ e in un quark bottom (b), mentre l'anti-quark top decade in un bosone W^- e in un anti-quark bottom (\bar{b}). Nel caso illustrato in figura 1, il bosone W^+ decade in un anti-muone (μ^+) e un neutrino (ν), e il bosone W^- decade in un quark e un anti-quark. L'obiettivo di questo problema è di risalire alla quantità di moto del neutrino in tutte le sue componenti utilizzando la quantità di moto di alcune particelle rivelate. **Per semplicità, tutte le particelle e tutti i jet in questo problema saranno considerati privi di massa, ad eccezione del quark top e dei bosoni W^\pm .**

Le quantità di moto di tutte le particelle create nel decadimento del quark top possono essere determinate sperimentalmente (vedi Tabella), fatta eccezione per la componente lungo l'asse z della quantità di moto del neutrino. La quantità di moto totale delle particelle dello stato finale catturate dal rivelatore è zero solo sul piano trasversale (piano xy), e non lungo la linea di collisione (l'asse z). Quindi, è possibile ricavare la quantità di moto trasversale del neutrino (cioè lungo il piano xy) calcolando la quantità di moto mancante in questo piano.

Il 4 giugno 2015, l'esperimento ATLAS presso l'LHC ha registrato una collisione protone-protone alle 00:21:24 GMT + 1 come quella schematizzata nella Figura 1.

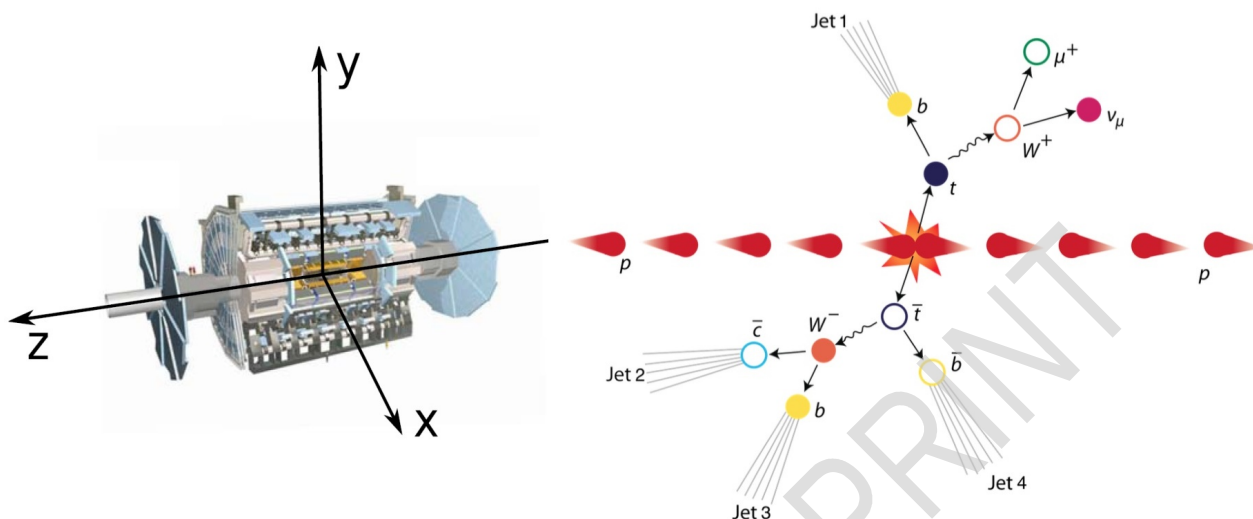
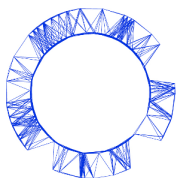


Figura 1. Rappresentazione schematica del sistema di coordinate all'interno del rivelatore ATLAS (sinistra) e di una collisione protone-protone (destra).

Le quantità di moto delle tre particelle finali prodotte dal decadimento del quark top, incluso il neutrino, sono descritte componente per componente nella tabella seguente.

Particella	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
anti-muone (μ^+)	-24.7	-24.9	-12.4
jet 1 (j_1)	-14.2	+50.1	+94.1
neutrino (ν)	-104.1	+5.3	—

- B.1** Trova un'equazione che leghi il quadrato della massa m_W^2 del bosone W^+ con le componenti della quantità di moto del neutrino e anti-muone elencate nella tabella precedente. Esprimi la tua risposta in termini delle quantità di moto trasversali del neutrino e dell'anti-muone,
- $$\vec{p}_T^{(\nu)} = p_x^{(\nu)} \hat{i} + p_y^{(\nu)} \hat{j} \quad \text{e} \quad \vec{p}_T^{(\mu)} = p_x^{(\mu)} \hat{i} + p_y^{(\mu)} \hat{j},$$
- e delle componenti delle loro quantità di moto lungo l'asse z , $p_z^{(\mu)}$ e $p_z^{(\nu)}$.

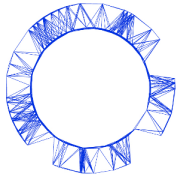
- B.2** Assumendo che la massa del bosone W^+ sia $m_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$, calcola le due possibili soluzioni per la quantità di moto del neutrino lungo l'asse z , cioè $p_z^{(\nu)}$. Dai la risposta in GeV/c .

- B.3** Calcola la massa del quark top per ciascuna delle due soluzioni precedenti. Dai la risposta in GeV/c^2 .

[Se non hai ricavato le due soluzioni in B.2, usa

$$p_z^{(\nu)} = 70 \text{ GeV}/c \quad \text{e} \quad p_z^{(\nu)} = -180 \text{ GeV}/c.]$$

Il numero normalizzato di eventi di collisione per la misurazione della massa di quark top (determina-



ta sperimentalmente), ha due componenti: il cosiddetto "segnale" (corrispondente al decadimento dei quark top) e il "background", o "sfondo" in italiano, (corrispondente agli eventi derivanti da altri processi che non includono i quark top). I dati sperimentali includono entrambi i processi, vedi Fig. 2.

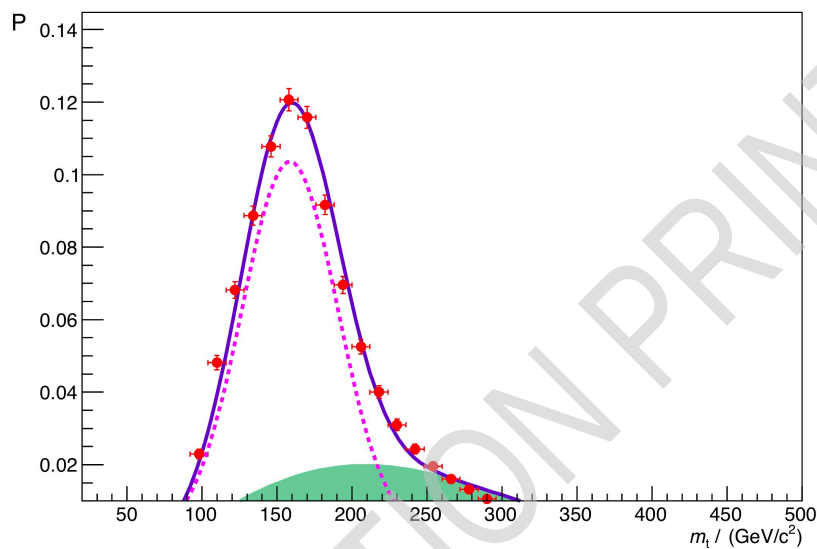


Figura 2. Distribuzione di massa dei quark top: la frequenza degli "Eventi", E , (campionati secondo intervalli di $12 \text{ GeV}/c^2$) è riportata nel grafico rispetto alla massa dei quark top. I punti corrispondono ai dati sperimentali. La linea tratteggiata corrisponde al "segnale" e la zona colorata al "background".

B.4 Secondo questa distribuzione di massa dei quark top, quale delle due soluzioni precedenti è più probabile che sia quella giusta? Stima la probabilità della soluzione più probabile. 1.0pt

B.5 Calcola la distanza percorsa dal quark top prima di decadere, utilizzando la soluzione più probabile. Supponi che il quark top abbia una vita media a riposo di $5 \times 10^{-25} \text{ s}$. 1.0pt