

Campionamento Sciame Atmosferici ad Alta Quota

Uno sciame elettromagnetico https://it.wikipedia.org/wiki/Sciame_di_particelle è un fenomeno prodotto da un elettrone o un fotone di alta energia mentre attraversa la materia generando una serie di particelle a cascata nel materiale fino a dissipare completamente l'energia della particella primaria.

Il processo dominante per un elettrone (o positrone) di alta energia nella materia è quello del Bremsstrahlung per cui la particella carica perde energia emettendo radiazione gamma. Il libero cammino medio per tale processo viene chiamato lunghezza di radiazione (X_0).

X_0 costituisce anche l'unità di misura per la perdita di energia per radiazione, in media si avrà ad una profondità x che l'energia residua sarà $E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$.

X_0 dipende dal materiale ma corrisponde ad una scala macroscopica:

- $X_0(Al) = 8.9 \text{ cm}$;
- $X_0(Pb) = 0.56 \text{ cm}$;
- $X_0(Aria) = 3.039 \times 10^4 \text{ cm}$ (303.9 m)

Come tutte le particelle cariche gli elettroni e i positroni perdono anche energia eccitando e ionizzando gli atomi lungo il percorso, un processo che su scale macroscopiche appare come continuo.

Il processo dominante per un fotone gamma (γ) è invece la produzione di coppie e^+e^- con un libero cammino medio pari a $\frac{9}{7} X_0$.

Modello di Rossi

Un modello semplificato dello sviluppo di uno sciame elettromagnetico è quello di Rossi, schematizzato in figura, e che vede i seguenti passi:

- ogni interazione avviene esattamente dopo una lunghezza di interazione;
- ogni particella secondaria eredita esattamente metà dell'energia della particella madre;
 - l'interazione di un e^\pm con energia E porta ad un γ ed un e^\pm entrambi di energia $\frac{E}{2}$;
 - l'interazione di un γ di energia E genera un e^+ ed un e^- , entrambi di energia $\frac{E}{2}$;
- il processo si arresta quando l'energia degli elettroni scende sotto il valore dell'energia critica E_c , che dipende dal materiale.

L'energia critica corrisponde all'energia per cui la perdita per ionizzazione eguaglia quella per radiazione.

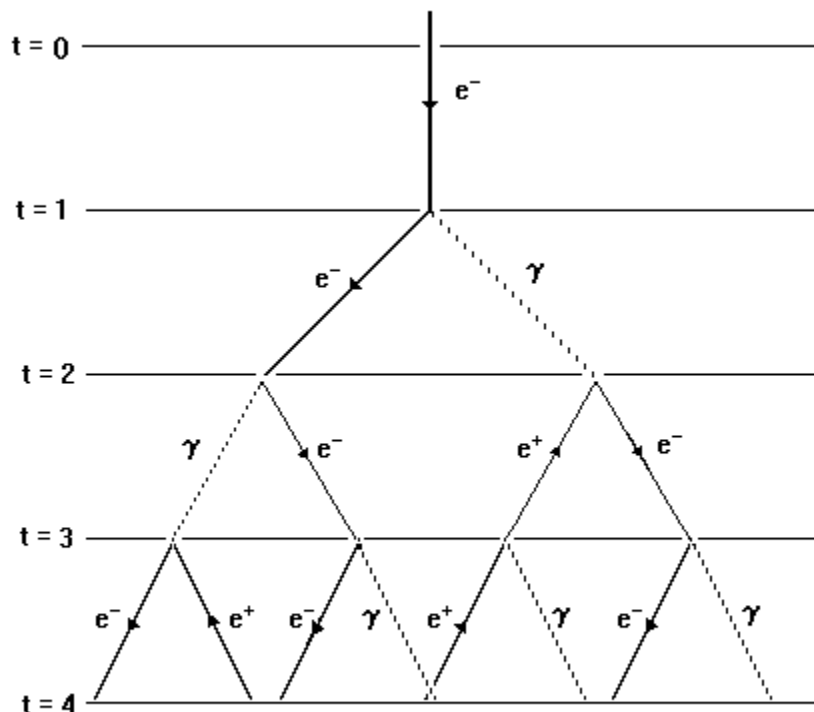
Esprimendo il percorso all'interno del materiale (x) in unità di lunghezze di radiazione $t = \frac{x}{X_0}$ abbiamo che durante lo sviluppo dello sciame:

- il numero di particelle sarà pari a $n = 2^t$
- data l'energia della particella incidente E_0 , l'energia di ogni particella sarà $E(t) = \frac{E_0}{2^t}$

Lo sciame raggiungerà il massimo di particelle, e quindi il massimo di energia depositata, per $E(t) = E_c$, dopo di che la moltiplicazione si arresterà.

Al momento della profondità al massimo dello sciame (t_{max}) possiamo quindi dire che $\frac{E_0}{E_c} = 2^{t_{max}}$

da cui $t_{max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$.



Sciame Atmosferisci ed Esperimenti di Campionamento ad Alta Quota

Particelle cosmiche di altissima energia interagiscono con l'atmosfera terrestre generando sciame di particelle all'interno dell'atmosfera stessa.

Per particelle primarie di energie sufficientemente alte lo sviluppo dello sciame può raggiungere la superficie terrestre. Diversi esperimenti studiano fotoni di altissima energia campionando lo sciame ad alta quota sulle montagne (~ 4000 m):

HAWC: <https://www.hawc-observatory.org/>

LHAASO: <http://english.ihep.cas.cn/lhaaso/>

Richieste

Si chiede di sviluppare in *python* una simulazione per una sciame atmosferico di altissima energia con un modello derivato da quello di Rossi secondo le seguenti specifiche:

1. l'inizio dello sciame si può assumere a quota 20 km;
2. il rivelatore è posto a quota 4000 m;
3. l'utente deve poter scegliere:
 - energia iniziale della particella (E_0)

- il passo di avanzamento, *step* (s), della simulazione in frazioni di X_0 ($s \in [0, 1]$)

4. ad ogni step:

- un e^\pm con $E > dE_{X_0} \cdot s$ perde un energia pari a $dE_{X_0} \cdot s$ per ionizzazione;
- un e^\pm con $E > E_c$ ha una probabilità pari a $1 - e^{-s}$ di emettere un fotone di bemsstrahlung;
- un γ con $E > 2m_e c^2$ ha una probabilità pari a $1 - e^{-\frac{7}{9}s}$ di interagire per produzione di coppia;
- un e^\pm con $E \leq dE_{X_0} \cdot s$ deve essere escluso dal computo per lo sviluppo successivo dello sciame;
- un γ con $E \leq 2m_e c^2$ lo sviluppo successivo dello sciame;

5. la simulazione dello sciame si arresta:

- quando raggiunge la quota del rivelatore
- quando non ci sono più particelle che possono depositare energia;

6. il programma deve poter fornire in uscita le seguenti informazioni:

- il numero di particelle dello sciame quando raggiunge il rivelatore;

Utilizzando la simulazione sviluppata, assumendo che ogni particella che attraversa il rivelatore lasci un segnale rivelabile (*hit*), studiare la risposta del rivelatore per un flusso di fotoni con spettro $P(E) = kE^{-2}$ nell'intervallo di energia 1-100 TeV per diverse direzioni di arrivo rispetto allo Zenith:

- 0 gradi;
- 20 gradi;
- 40 gradi.

Informazioni sulle caratteristiche rilevanti dell'atmosfera sono disponibili al seguente link:

https://pdg.lbl.gov/2023/AtomicNuclearProperties/HTML/air_dry_1_atm.html

Dovendo descrivere l'atmosfera ad alta quota con minore densità, si suggerisce di utilizzare un valore per la lunghezza di radiazione pari a 7×10^4 cm.

SUGGERIMENTI:

- l'unità di misura più conveniente per l'energia delle particelle dello sciame è il MeV.
- l'effetto dell'inclinazione rispetto alla verticale per la direzione della particelle è quello di aumentare la distanza da percorrere per raggiungere il rivelatore.
- la risposta del rivelatore va studiata su base statistica;