

# Identificazione di particelle nei raggi cosmici in calorimetri segmentati tridimensionalmente

## IFAE 2025

Incontri di Fisica delle Alte Energie



A.D. 1308  
**unipg**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Agenzia Spaziale Italiana

Claudio Brugnoni

XXXVIII ciclo dottorato  
Università degli Studi di Perugia

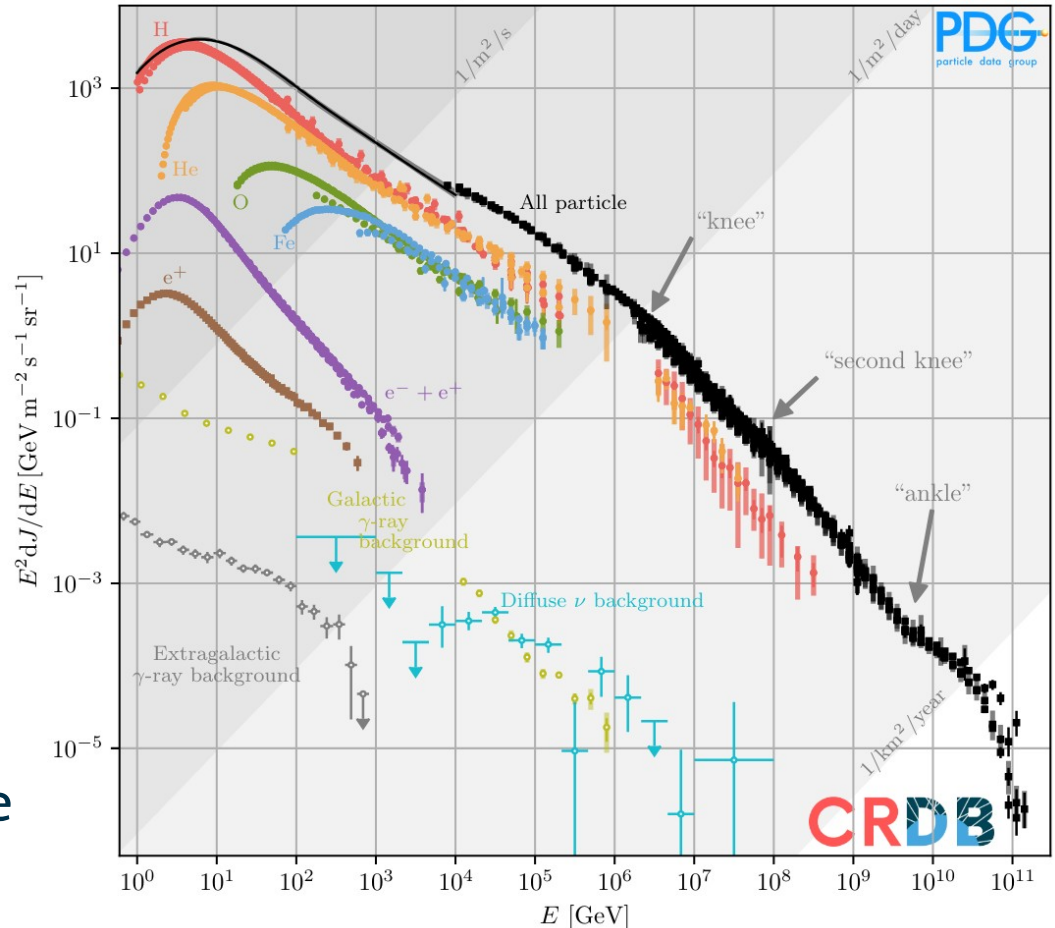
Lavoro finanziato da accordo ASI-INFN No. 2021-43-HH.0

# Raggi cosmici

**Particelle cariche (p, nuclei, e<sup>-</sup>, e<sup>+</sup>) altamente energetiche provenienti da sorgenti galattiche e extragalattiche.**

Possono essere osservati **direttamente nello spazio**, ma dimensioni limitate → impossibile studiare flussi troppo bassi

O **indirettamente a Terra**, ma perdendo informazioni sulle singole componenti

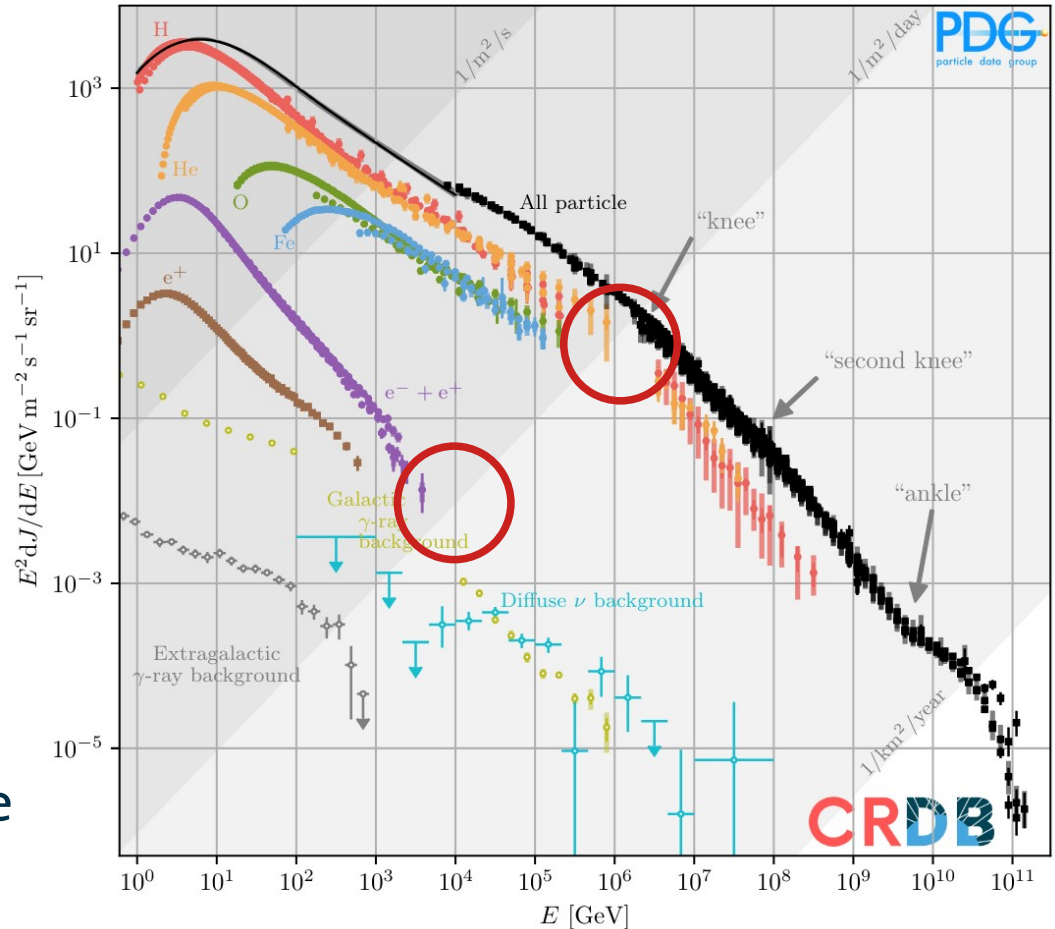


# Raggi cosmici

**Particelle cariche (p, nuclei, e<sup>-</sup>, e<sup>+</sup>) altamente energetiche provenienti da sorgenti galattiche e extragalattiche.**

Possono essere osservati **direttamente nello spazio**, ma dimensioni limitate → impossibile studiare flussi troppo bassi

O **indirettamente a Terra**, ma perdendo informazioni sulle singole componenti



# Rivelazione diretta raggi cosmici

## Spettrometri: (AMS-02)

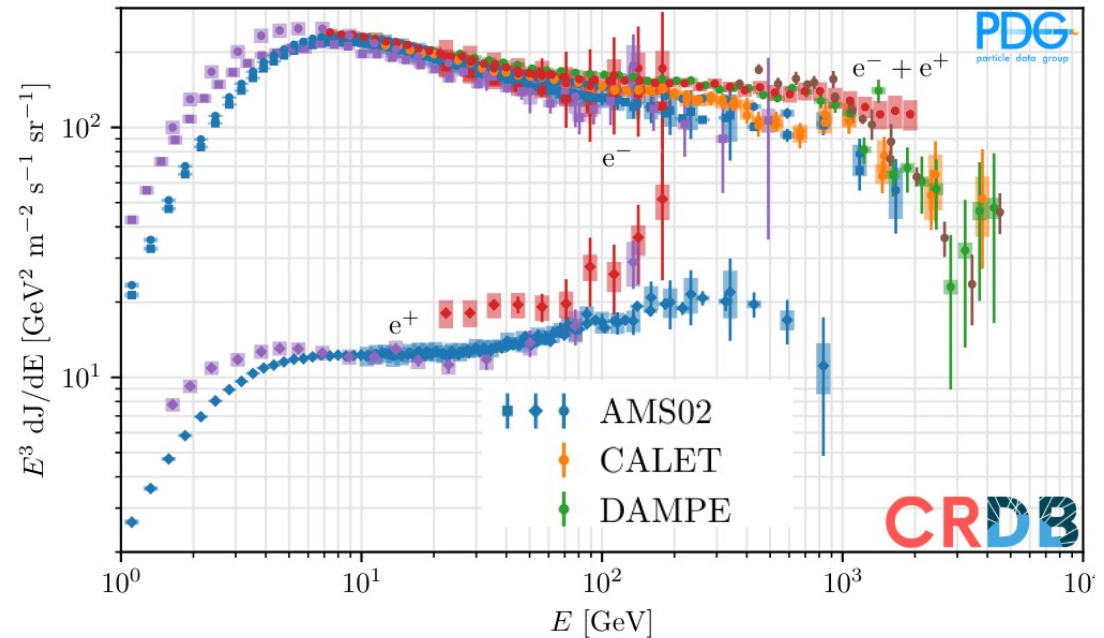
- misura del segno della carica

- $\frac{\sigma_p}{p} \propto p$

## Calorimetri: (DAMPE, CALET)

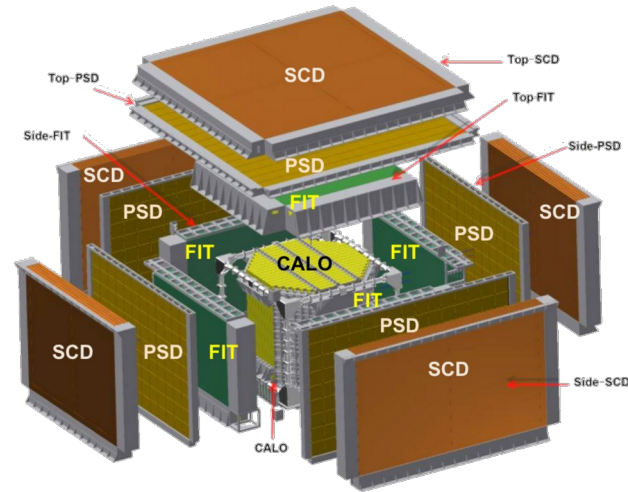
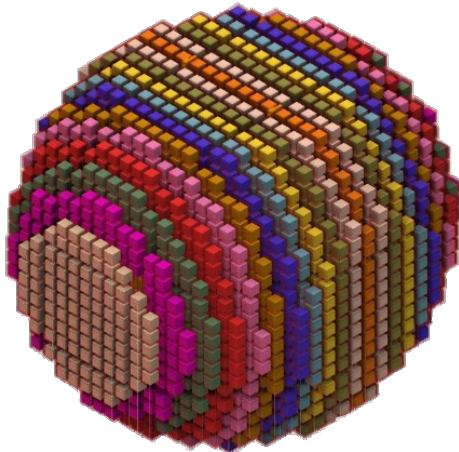
- Perdita informazione segno

- $\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$



# Esperimenti isotropi

Nuova generazione di esperimenti basata su rivelatori **più possibile isotropi**, in modo da **massimizzare l'accettanza** a parità di dimensioni.



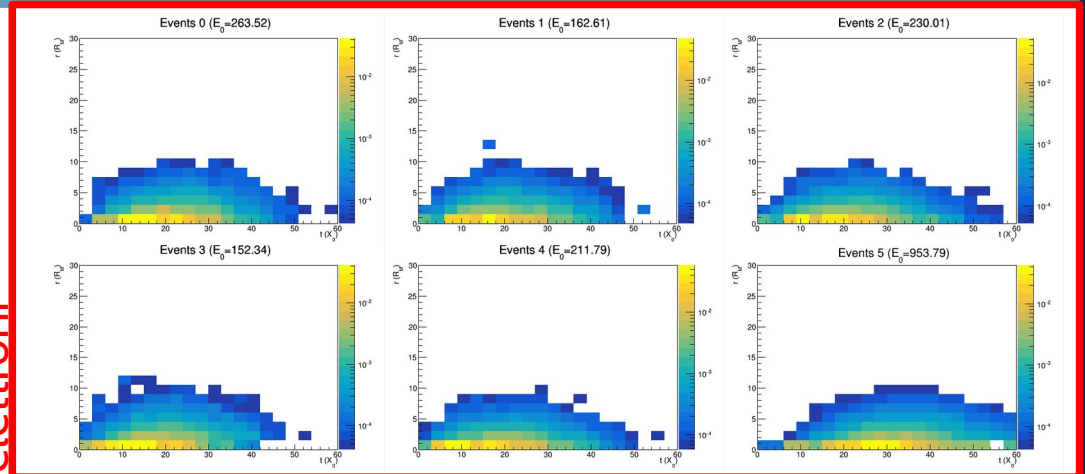
Fondamentali **calorimetri segmentati tridimensionalmente** come quelli previsti per **HERD** e **ALADInO**

# Discriminazione particelle

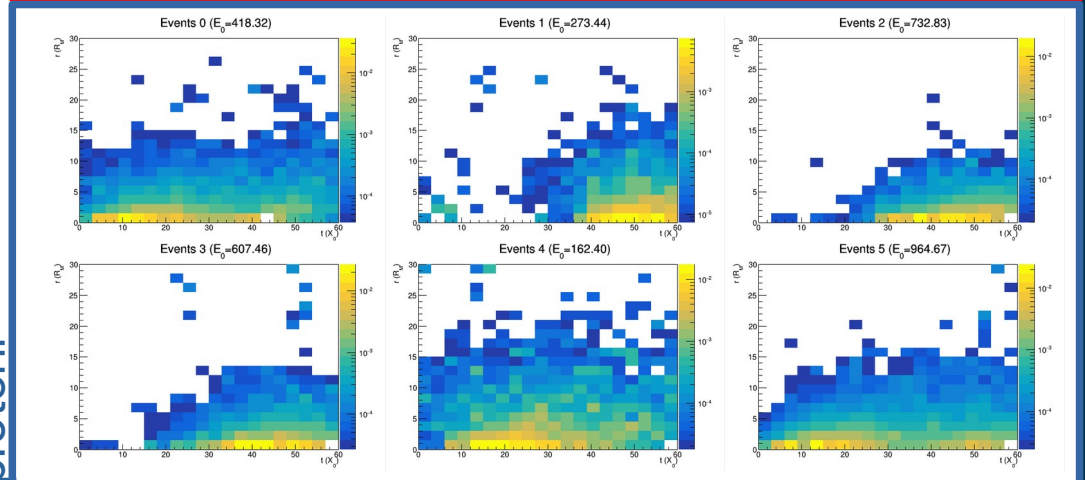
Non possiamo misurare il segno della carica, ma elettroni e adroni si comportano in modo diverso nel calorimetro

Segmentazione 3D permette di delineare con precisione la forma degli sciami

elettroni



protoni



# Test di Likelihood

Invece di studiare singole proprietà degli sciame (approccio più tradizionale) possiamo provare a confrontare l'intero **sviluppo dello sciame** con lo **sviluppo statisticamente atteso** per un evento elettromagnetico o adronico

Una funzione di densità di probabilità o pdf  $P(x)$  permette di **valutare la likelihood  $L$**  dell'ipotesi di elettrone  $e$  e di protone  $p$

$$L^e = \prod_i P(x_i | e)$$

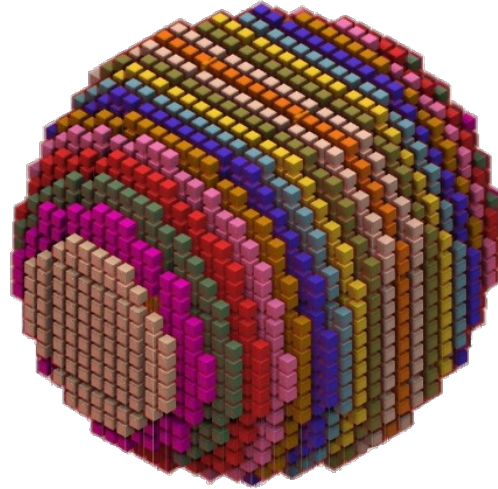
$$L^p = \prod_i P(x_i | p)$$

Per ricostruire la pdf  $P(x)$  possiamo iniziare dal **modellizzare lo sciame medio e la sua varianza**

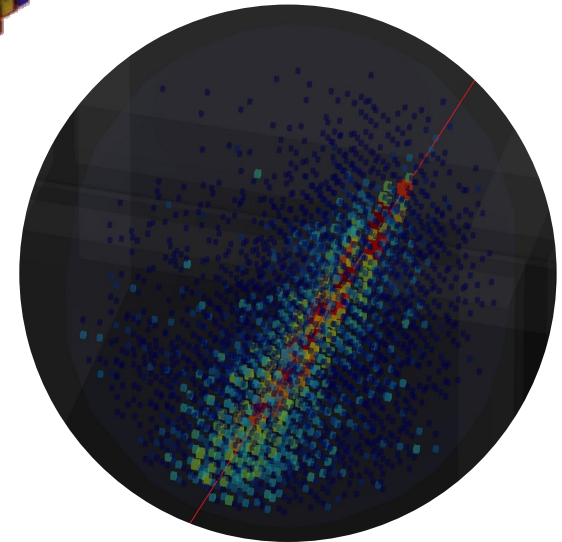


# Caso studio

**Calorimetro sferico di HERD:**  
**7400 cubi in LYSO con lato 3cm**  
Profondità totale di **55  $X_0$**



Simulato spettro  $E^{-1}$  da 100 GeV fino a 1 PeV  
di **elettroni e protoni isotropi**





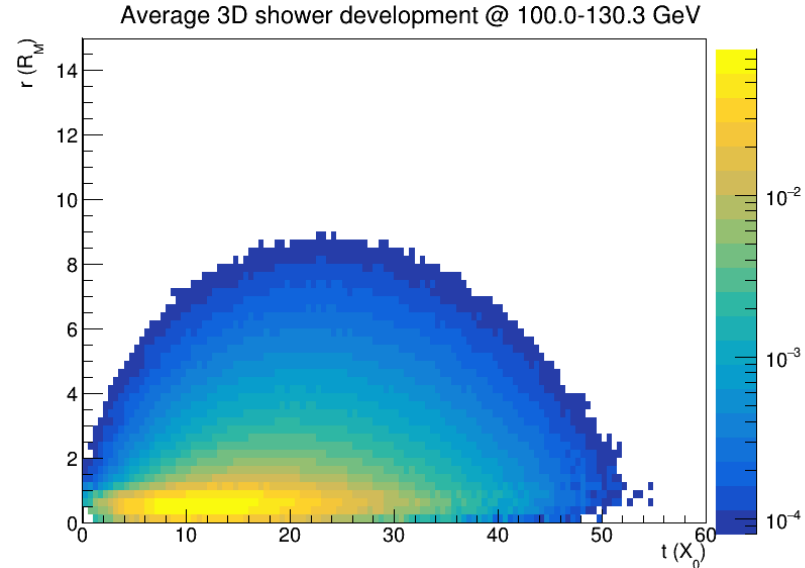
# Modellizzazione

Assumendo **simmetria cilindrica** degli sciame, lo sviluppo spaziale medio è fattorizzato in una componente **longitudinale (t)** e una **trasversale (r)**

$$\left\langle \frac{dE}{E_0 dt dr} \right\rangle = f(t, E_0) g(r, t, E_0)$$

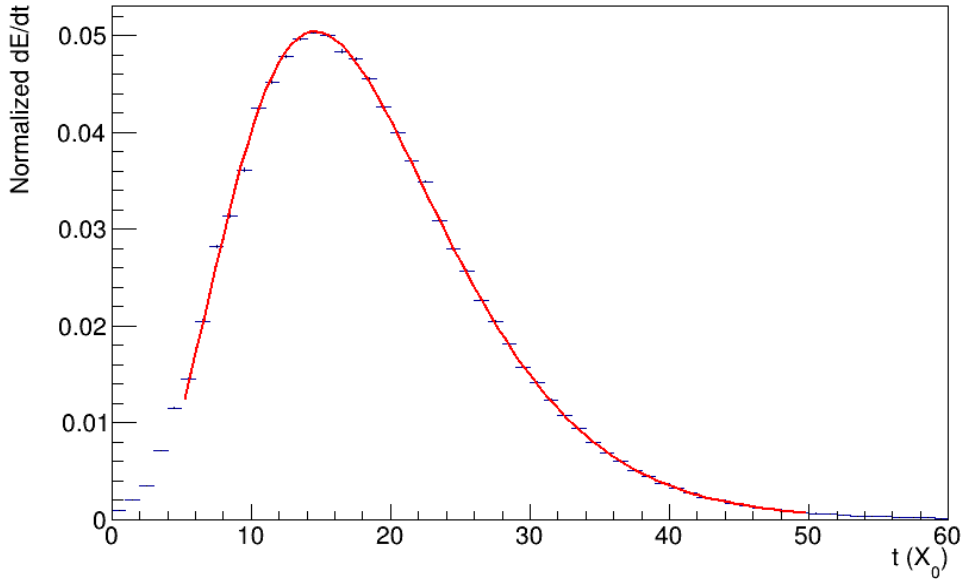
Una **prima semplice modellizzazione** è data dalla **mappatura degli sciame**, divisi per bin di energia depositata totale (totDep)

Per un modello più accurato andiamo a **fittare le componenti**



# Profilo longitudinale

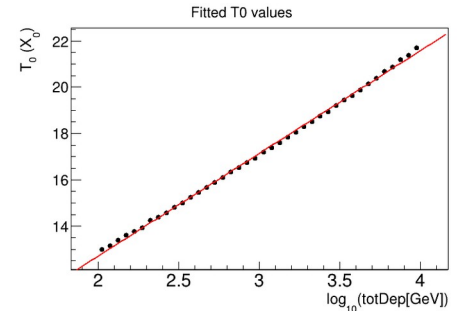
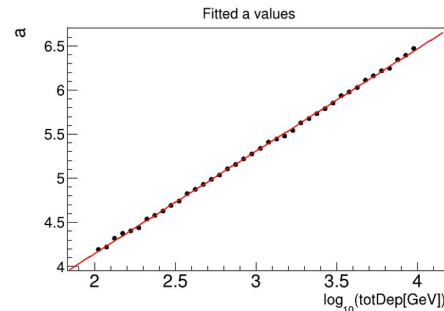
Average longitudinal shower development @ 251.2-281.8 GeV



I due parametri  $a$  e  $T_0$   
dipendono linearmente dal  
logaritmo dell'energia

$$f(t, E_0) = b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$

Dove  $b = \frac{a-1}{T_0}$

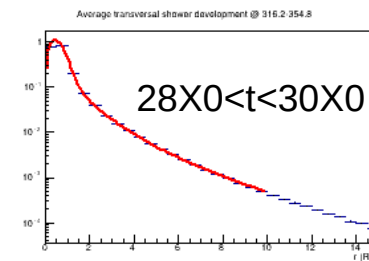
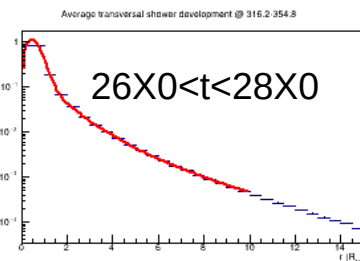
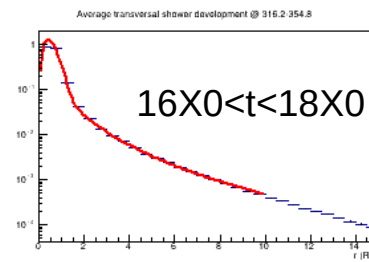
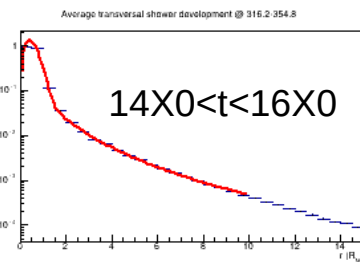
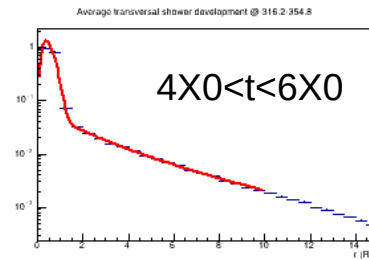
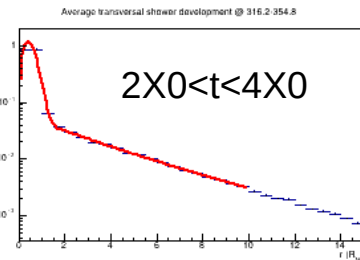
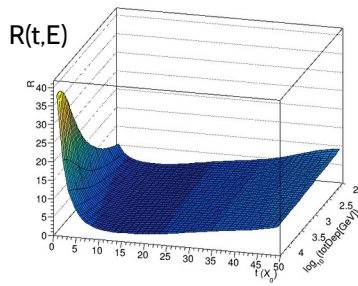
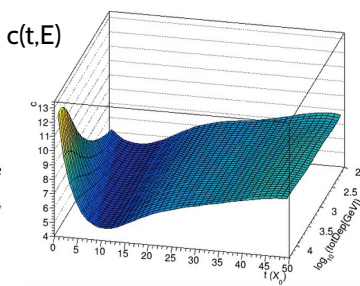
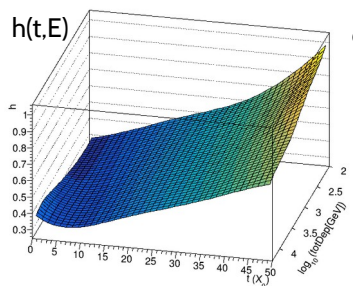


# Profilo trasversale

$$g(r, t, E_0) = r \left( 2A \frac{e^{-r^2/h}}{h} + B \left( \frac{R}{R+r} \right)^c \right)$$

I parametri dipendono sia dall'energia che dalla profondità  $t$  in modo non triviale

→ Sono stati perciò descritti con delle spline 2D

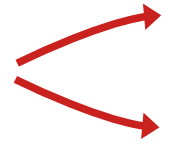


# Funzione densità di probabilità

Stessa procedura per **deposito quadrato medio**

→ abbiamo un modello dell'**andamento della varianza**


Per approssimare la **pdf** usiamo una funzione di **Poisson modificata**

$$P(E_i^m | E_i^e, \eta_i) = N(E_i^e) \frac{e^{-E_i^e/\eta_i} (E_i^e/\eta_i)^{E_i^m/\eta_i}}{\eta_i \Gamma(E_i^m/\eta_i + 1)}$$

$$E[E_i^m] = E_i^e$$
$$V[E_i^m] = E_i^e \eta_i$$

Il **parametro  $\eta$**  per adattarsi sia alla **media** che alla **varianza** modellizzate

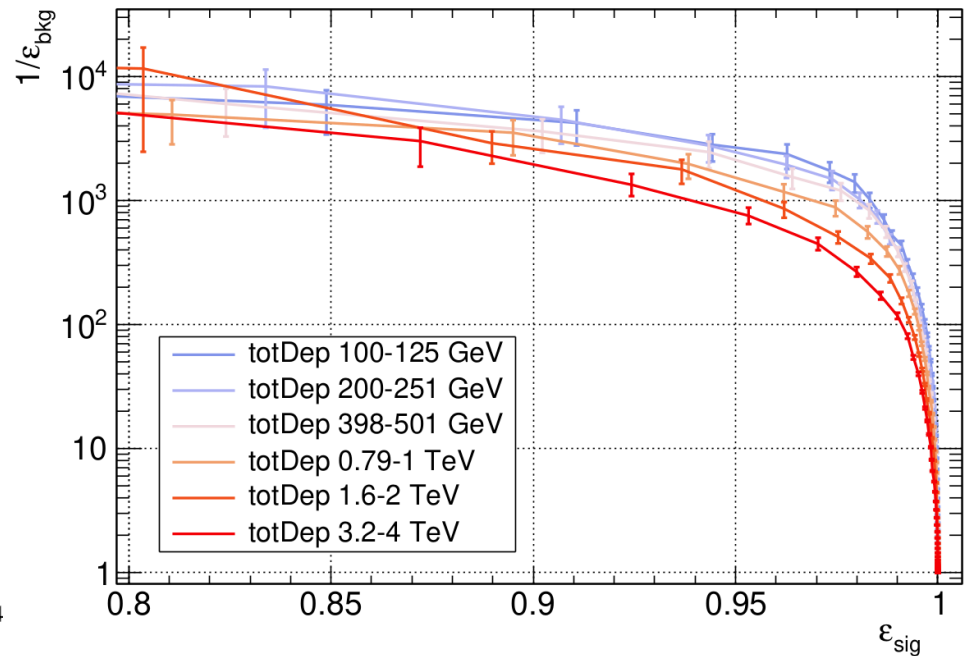
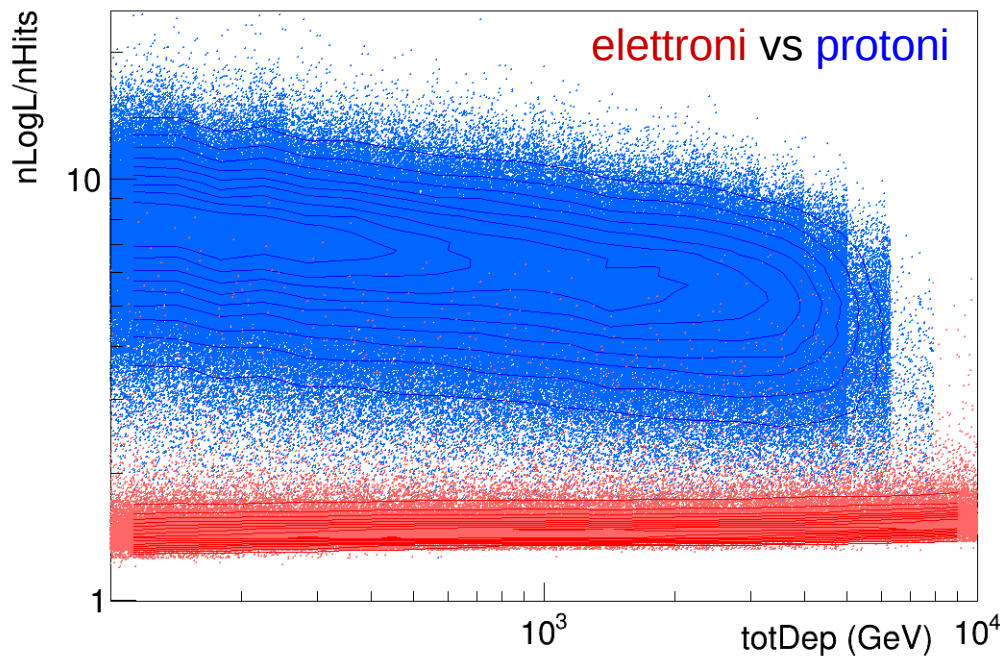
Questa pdf ci permette di testare la **likelihood  $L$**  di ciascuno sciame rispetto all'**ipotesi di elettrone**

$$L = \prod_i P(E_i^m | E_i^e, \eta_i)$$



Produttoria sui depositi energetici di uno sciame

# Reiezione



La likelihood di elettrone da sola fornisce **reiezione oltre  $10^3$**

# Prospettive future

- Integrazione di test rispetto a ipotesi adronica
- Estensione energie testate ( $> 10$  TeV)
- Studio evoluzione performance a più alte energie
- Studio costo computazionale della tecnica rispetto ad approcci machine learning