

# La fisica dei raggi cosmici

Prof.ssa Laura Valore  
Università di Napoli Federico II  
INFN Sezione di Napoli  
18 Febbraio 2025



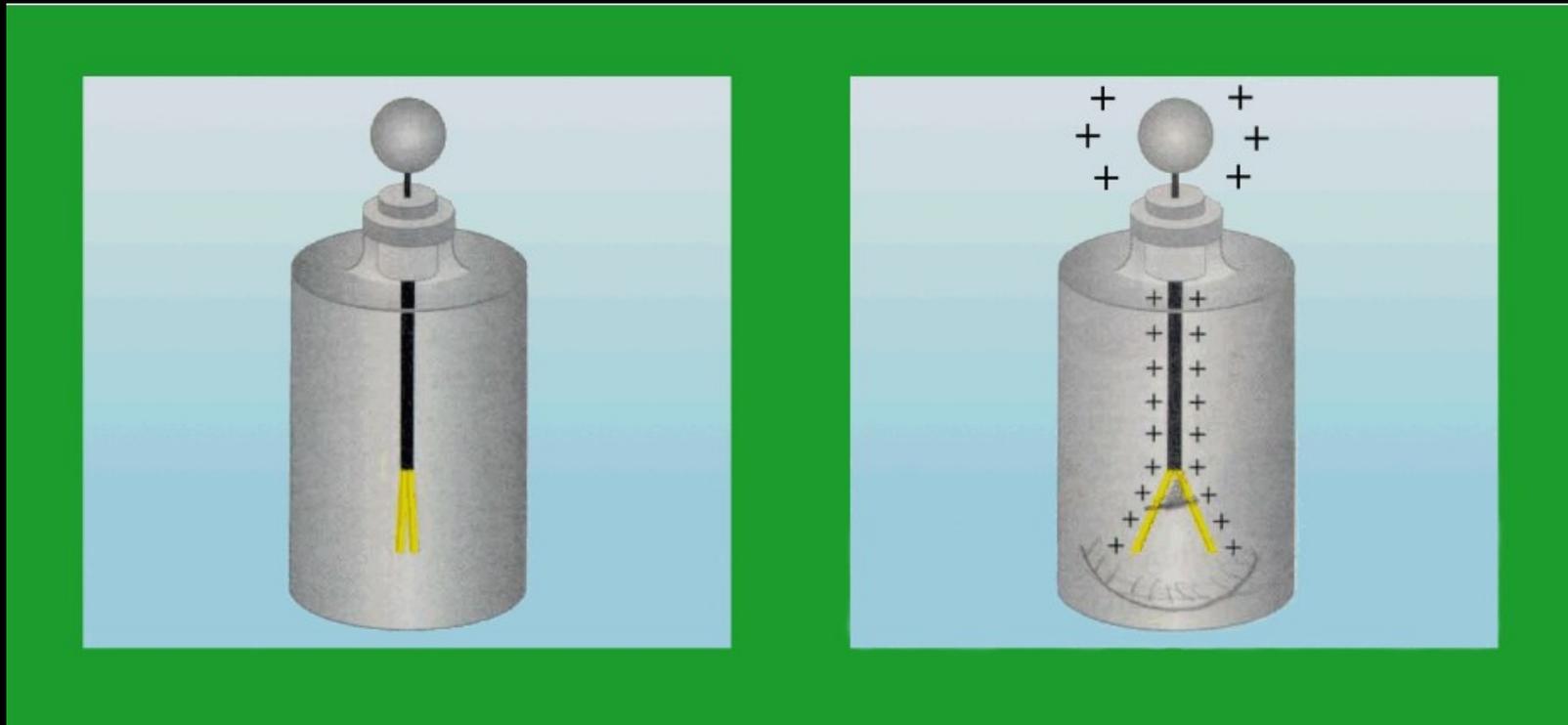
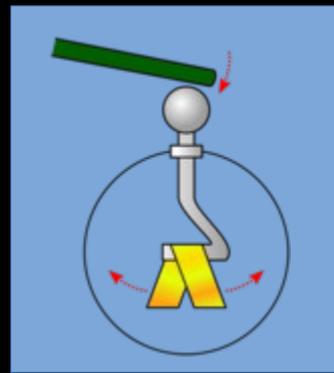
# Cosa sono i raggi cosmici?

Nuclei atomici prodotti nel cosmo che arrivano fino a noi sulla Terra

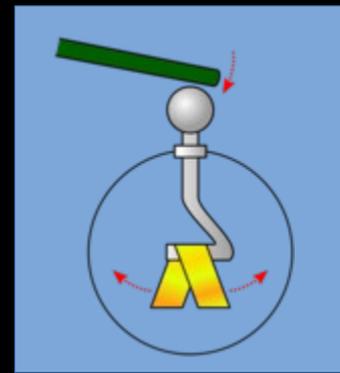


# Come sono stati scoperti?

Alessandro Volta, nel 1785 osservo' per la prima volta la scarica spontanea dell'elettroscopio



# Come sono stati scoperti?



In seguito alla scoperta della radioattività naturale di Pierre Curie e Marie Curie-Sklodowska a fine 1800, la scarica spontanea degli elettroscopi, già osservata da Volta nel 1785, fu attribuita ad una radioattività di origine terrestre

Domenico Pacini, nei primi anni del 1900, decise di verificare questa ipotesi attraverso esperimenti per misurare il livello di radiazioni a pochi metri sott'acqua, sia in mare che in lago. Scopri che diminuivano rispetto a quelle misurate in superficie, contraddicendo in questo modo l'ipotesi di una loro possibile origine terrestre!

*nota: cioè che esista nell'atmosfera una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno.*



La conferma definitiva dell'origine extra-terrestre della radiazione ionizzante venne qualche anno dopo dall'austriaco Victor Hess, che per questa scoperta vinse il Premio Nobel nel 1936.

Hess effettuò una serie di voli su pallone fino a 5300 m di quota, dimostrando che la radiazione aumentava con l'altezza.

Si è così capito che la radiazione proveniva dallo spazio!

# Che effetto hanno su di noi?

Il nostro corpo viene attraversato in ogni istante da radiazione naturale fatta di invisibili particelle elementari. **Ogni minuto, per ogni centimetro quadro del nostro corpo, in media passa una particella cosmica!**



# Cosa sono i raggi cosmici?

Nuclei atomici prodotti nel cosmo che arrivano fino a noi sulla Terra

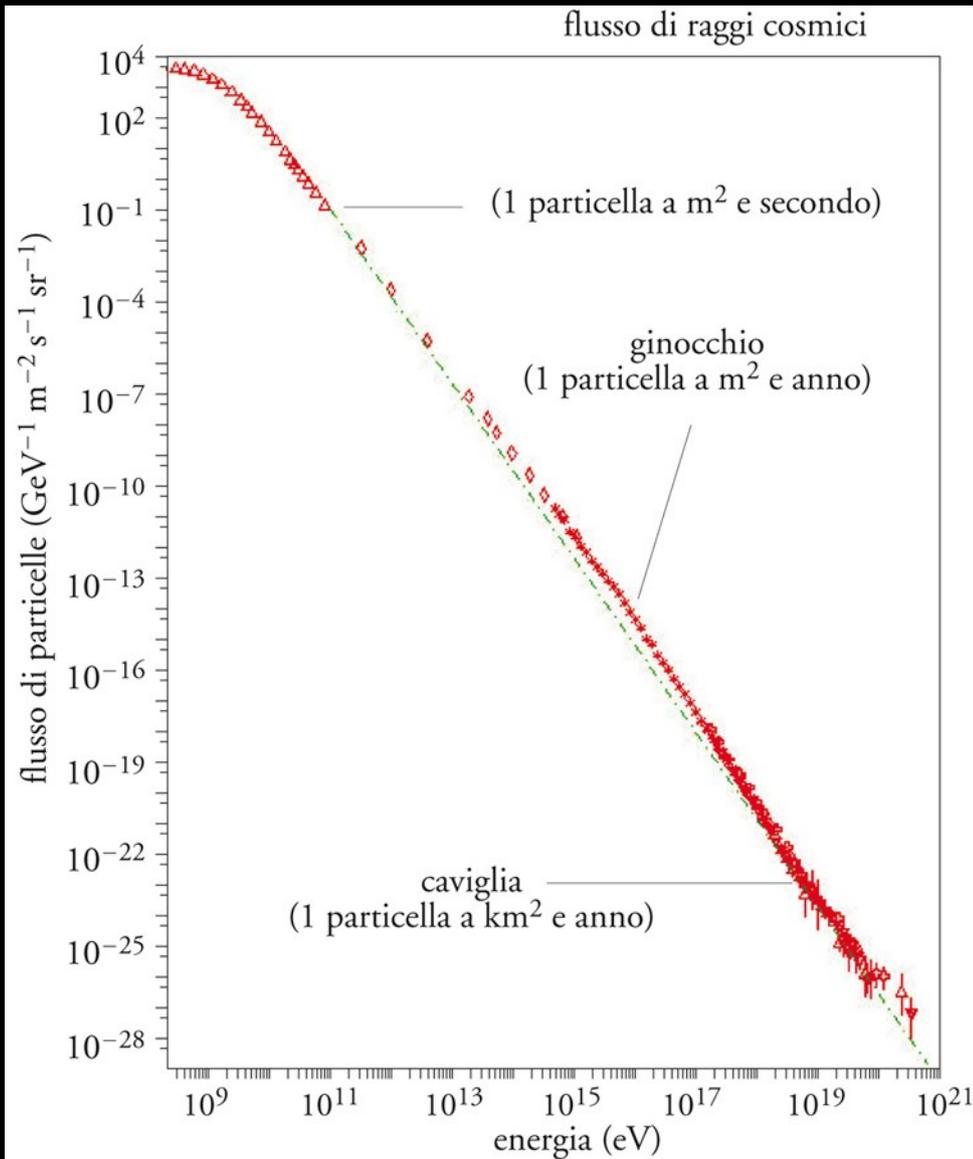
Cosa fanno al nostro corpo I raggi cosmici? Diventeremo tutti supereroi ?



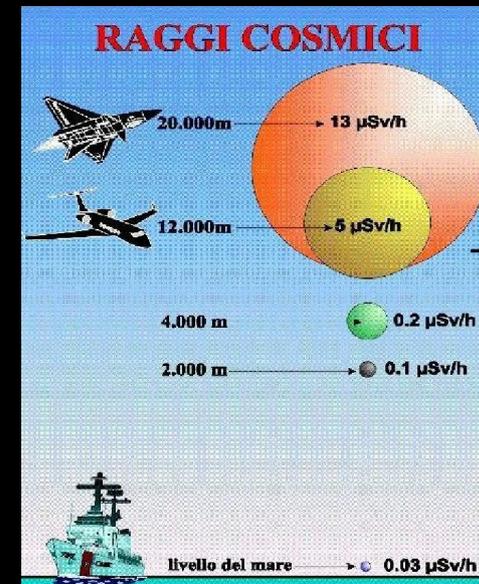
**NO!** L'umanità convive da sempre con i raggi cosmici ...  
quindi non c'è speranza di diventare supereroi!

# Lo spettro energetico dei raggi cosmici

## 32 decenni in flusso di particelle su 11 decenni in energia!



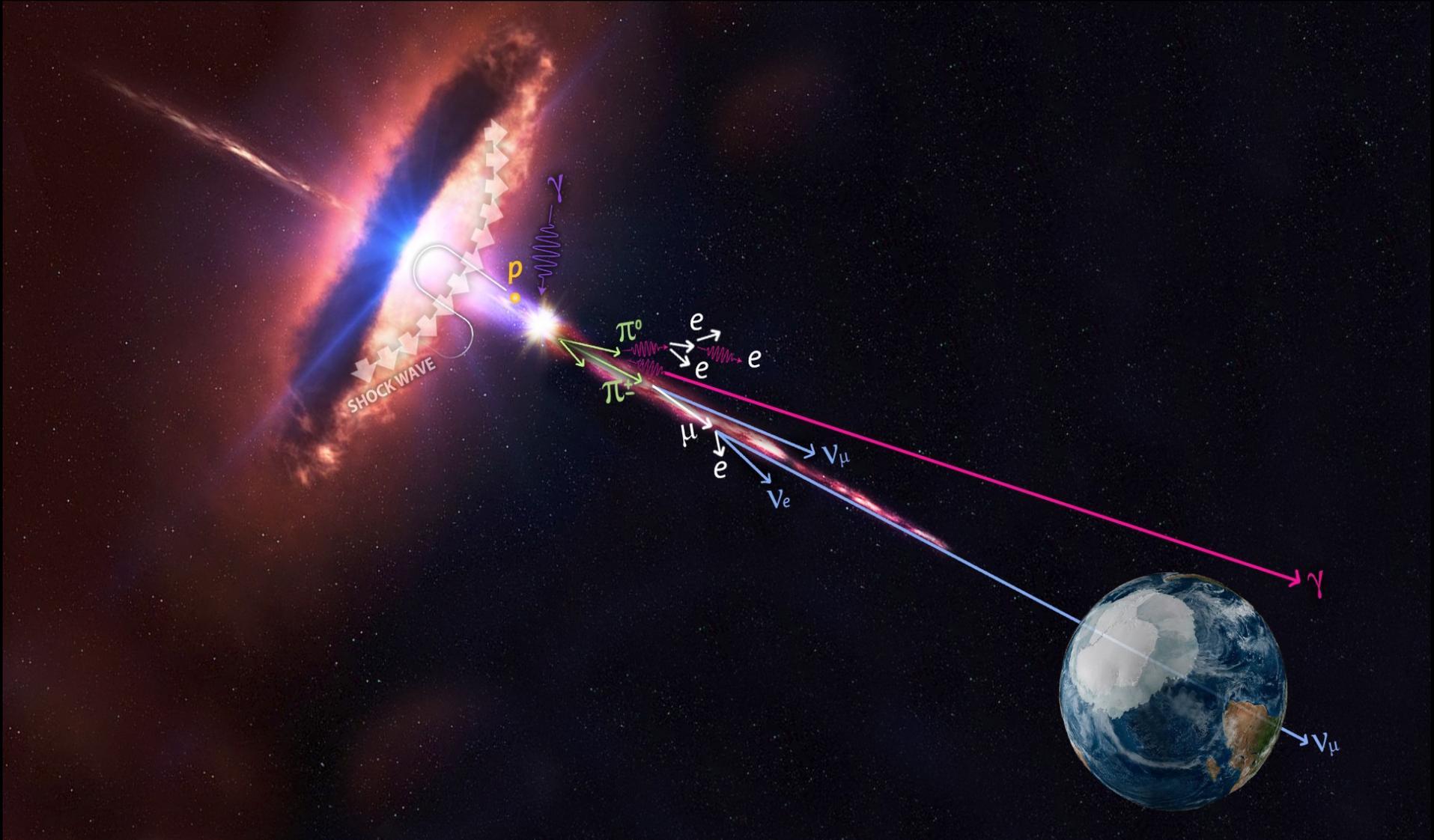
Alle altezze di volo di un aereo (10-12 km per un volo intercontinentale), siamo colpiti dalla radiazione cosmica in misura molto maggiore rispetto al suolo.



UHECR : Ultra High Energy Cosmic Rays  
 $E > 10^{18} \text{ eV}$

7  
 Quante particelle di energia  $10^{20} \text{ eV}$   
 ci attraversano?  
 Una ogni 200 milioni di anni!

# Lo studio dei raggi cosmici ha permesso di scoprire nuove particelle ed ha dato il via alla fisica delle particelle elementari



# Le particelle elementari: i mattoni dell'Universo





# Energie

$$E=mc^2$$

L'elettronvolt é l'unità di misura dell'energia usata in ambito astroparticellare da chi studia raggi cosmici.

Un elettronvolt è l'energia cinetica di un elettrone accelerato, da fermo, attraverso una differenza di potenziale di 1 volt nel vuoto. Corrisponde a un quantitativo molto piccolo di energia, pari all'inverso del numero di Coulomb:

$$1 \text{ eV} = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ GeV} = 1,602176634 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$1 \text{ PeV} = 1,602176634 \times 10^{-4} \text{ J}$$

$$10 \text{ EeV} = 1,602176634 \text{ J} \quad \rightarrow \text{ é una particella subatomica con energia di 1J !}$$

MA .... ricordate che la massa delle particelle di cui stiamo parlando è piccolissima, dunque è un quantitativo enorme!

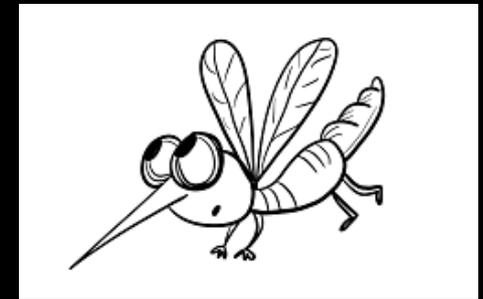
# Energie

1 GeV =  $10^9$  eV:  
energia che serve a creare un protone

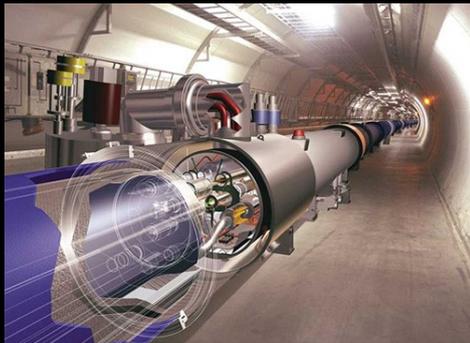


$$E=mc^2$$

7 TeV = 7000 GeV =  $7 \times 10^{12}$  eV:  
energia di un protone accelerato in un fascio di LHC;  
energia di una zanzara



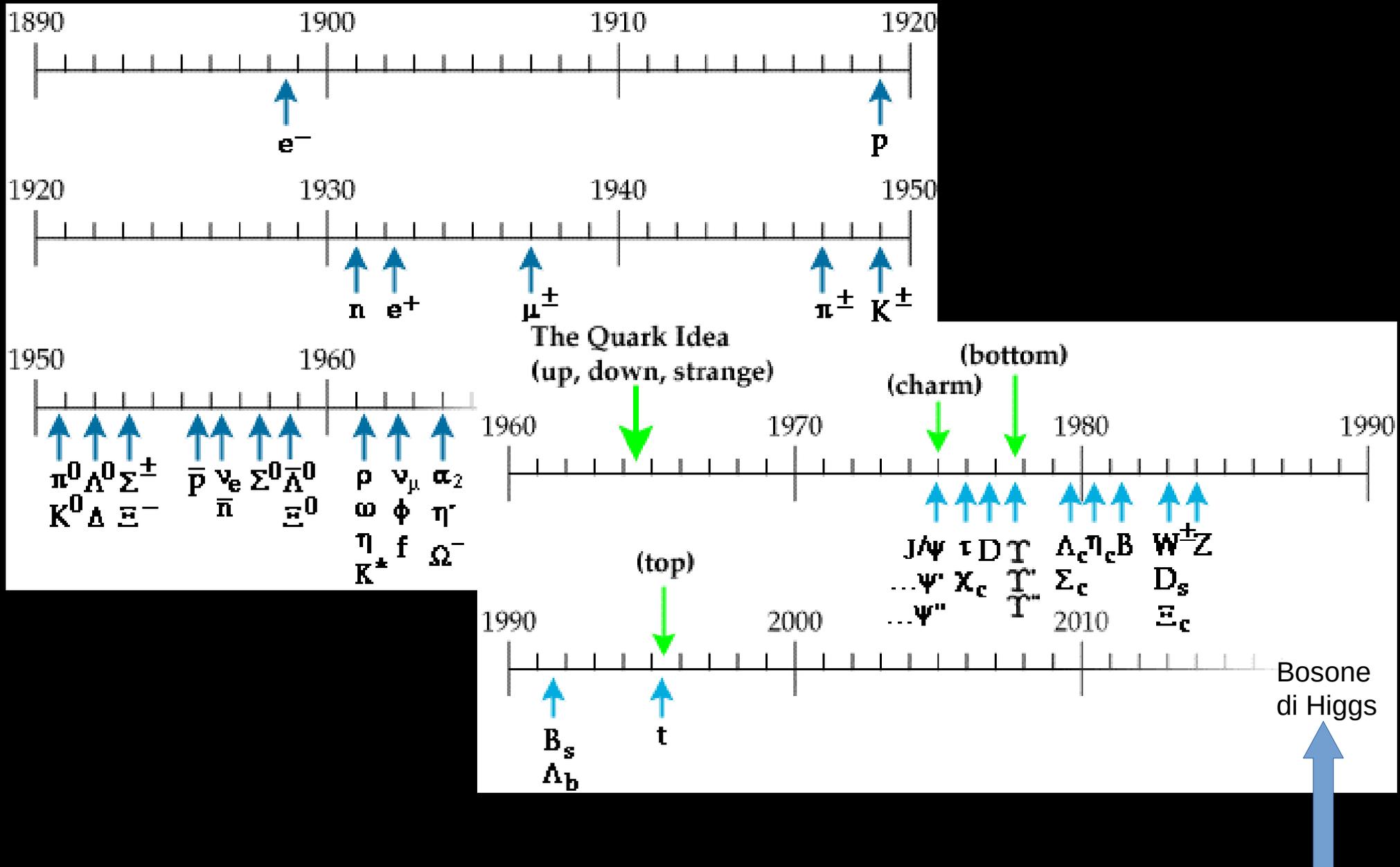
1 EeV =  $6 \times 10^{18}$  eV = 1 Joule:  
energia cinetica di una massa da  
100 g che cade da 1 m



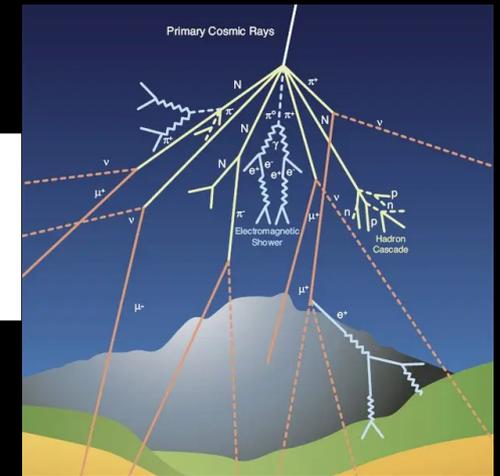
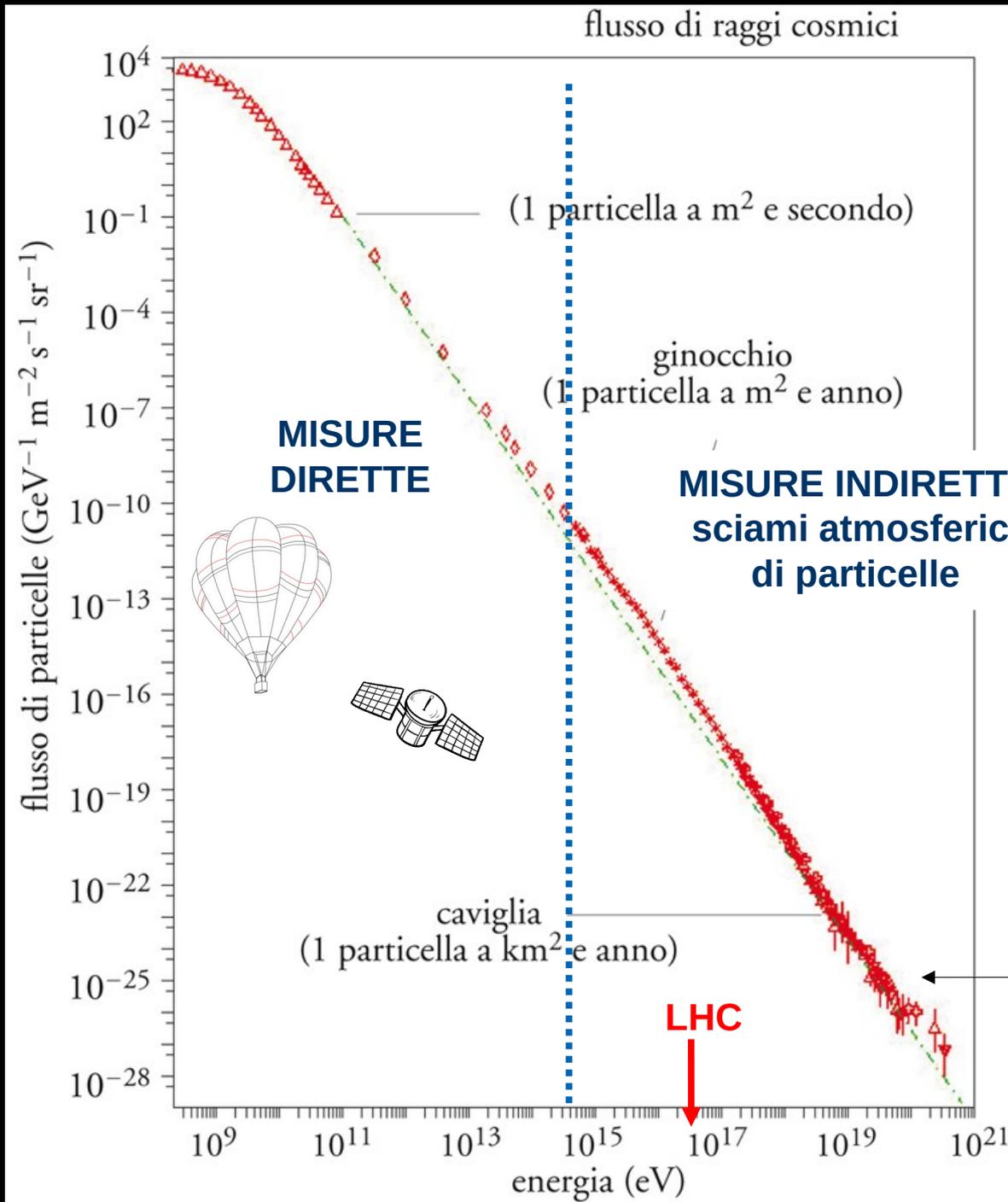
$10^{20}$  eV → energia massima misurata  
per una particella singola  
energia cinetica di una palla da  
tennisa lanciata da Sinner!



# Le particelle scoperte!



# Come riveliamo e studiamo i raggi cosmici



(1 particella per  $\text{km}^2$  al secolo)

# Le misure dirette

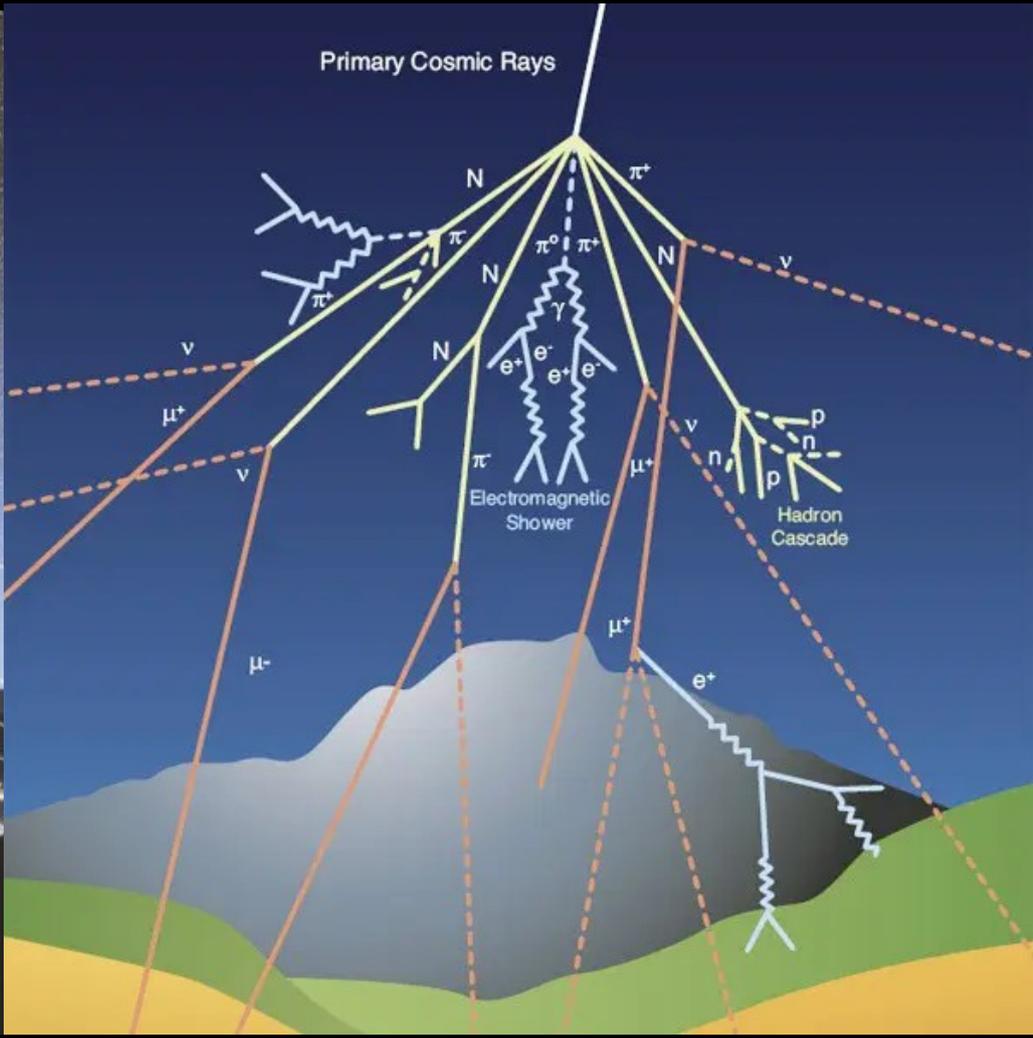
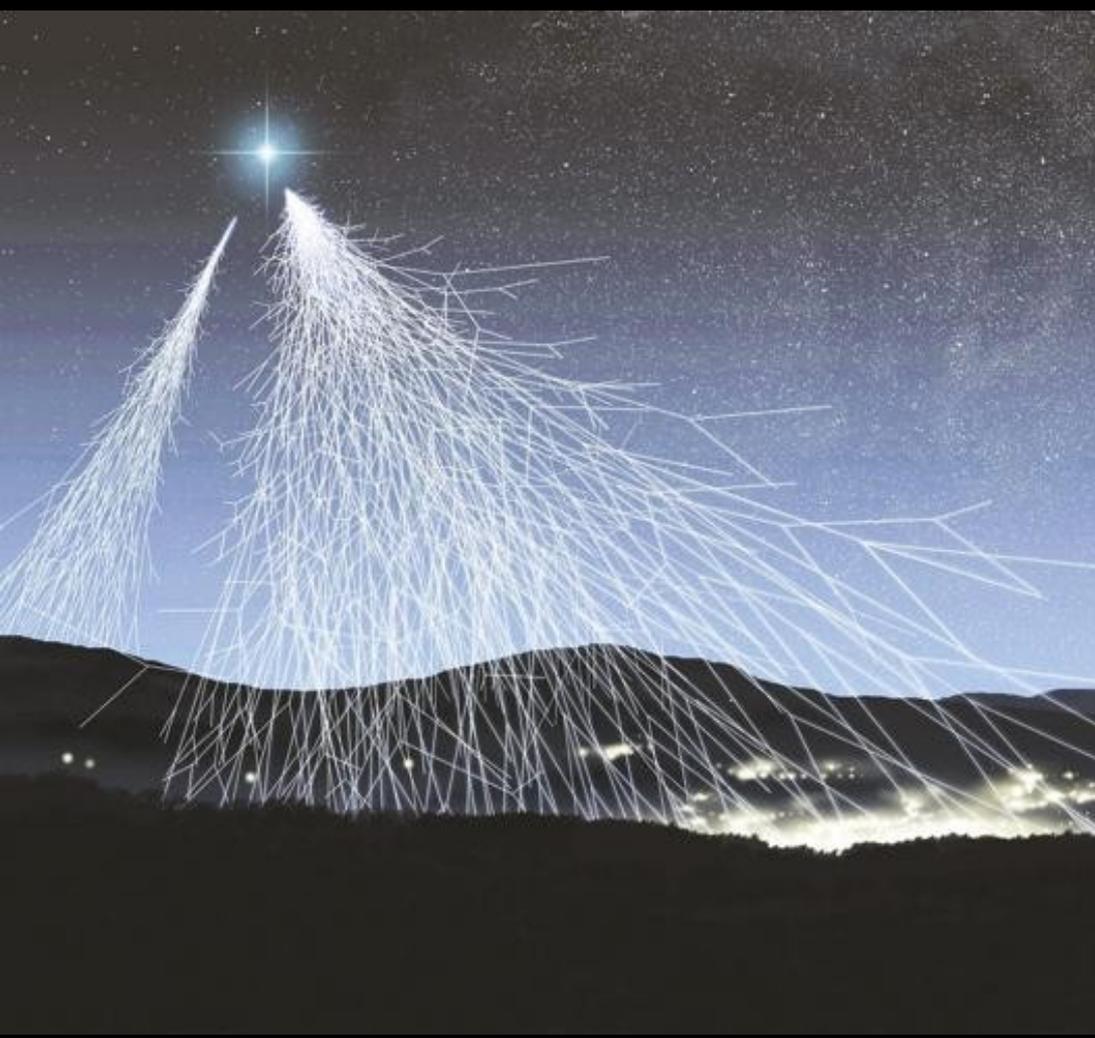
Fino a 10 TeV il flusso di raggi cosmici é abbastanza alto da permettere la misura diretta nello spazio!



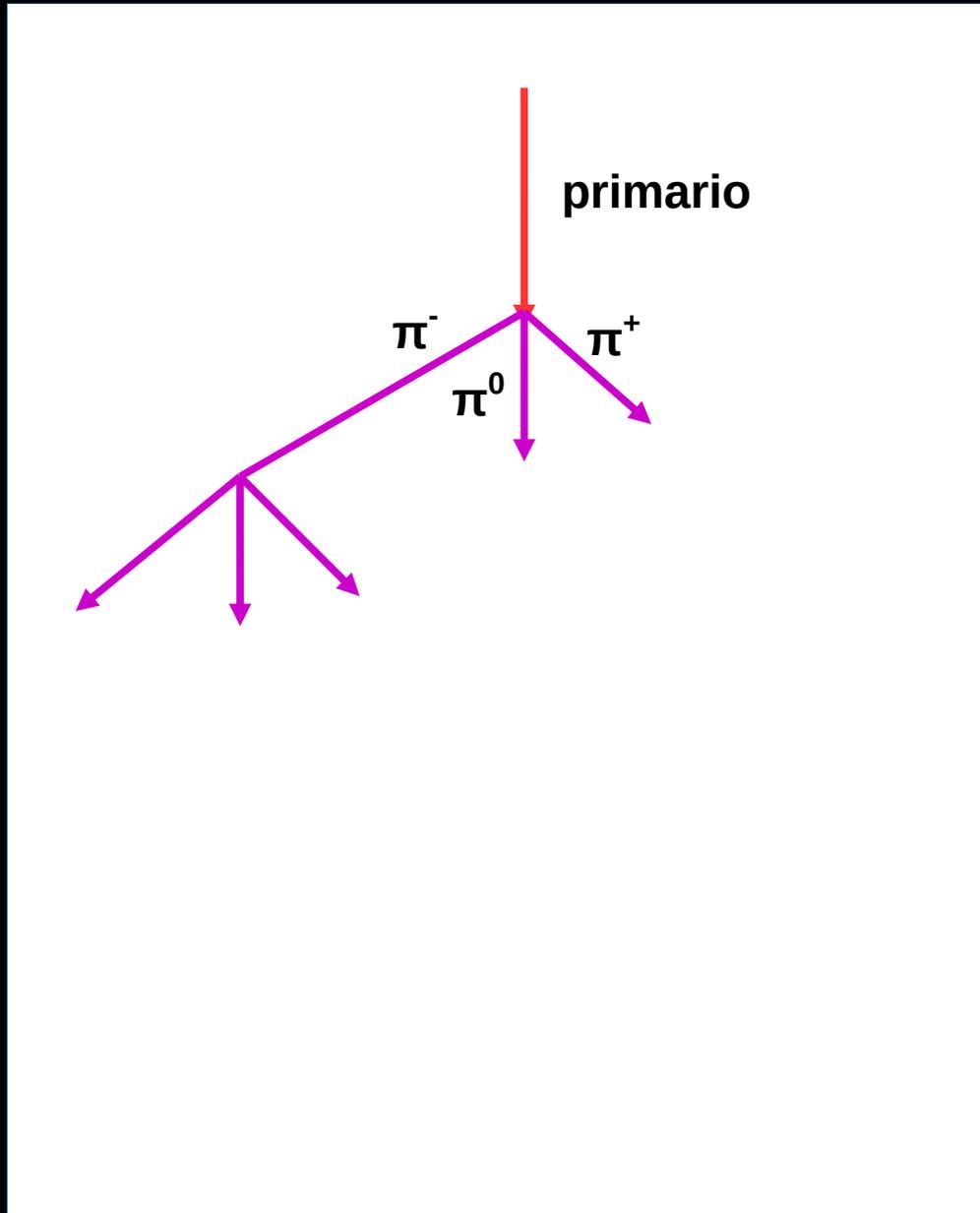
# Le misure indirette - sciami atmosferici estesi

Oltre i 10 TeV il flusso di raggi cosmici diventa troppo basso, per rivellarli direttamente con buona statistica si dovrebbero inviare nello spazio rivelatori troppo grandi!

Per questo motivo, ad alte energie si sfruttano **gli sciami atmosferici estesi**. I raggi cosmici primari interagiscono con l'atmosfera (principalmente con le molecole di azoto) e danno vita ad una cascata (sciame) di particelle secondarie che possono essere rivelate a terra.

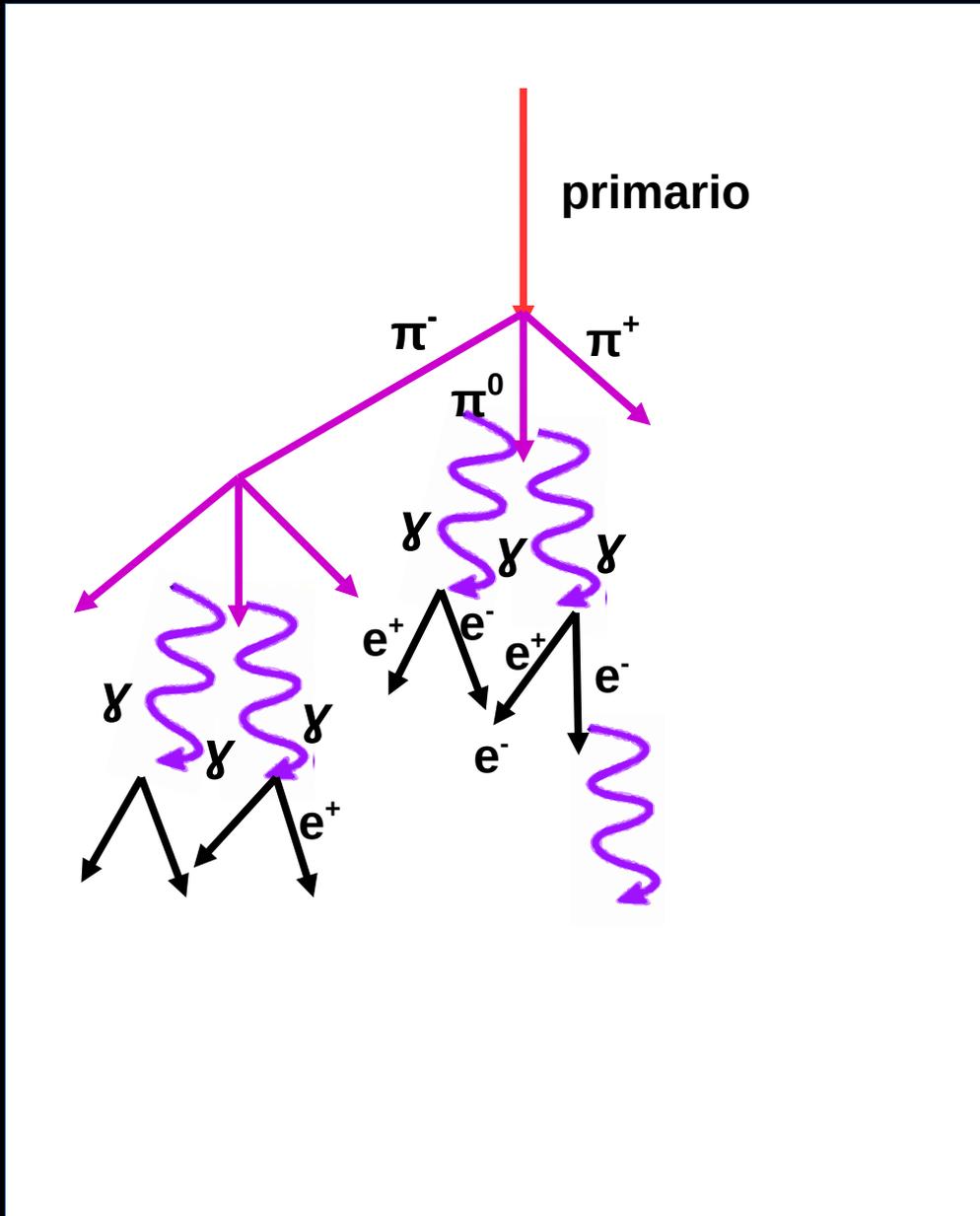


# Le particelle secondarie dello sciame



**COMPONENTE  
ADRONICA**  
prima ad estinguersi in  
atmosfera

# Le particelle secondarie dello sciame



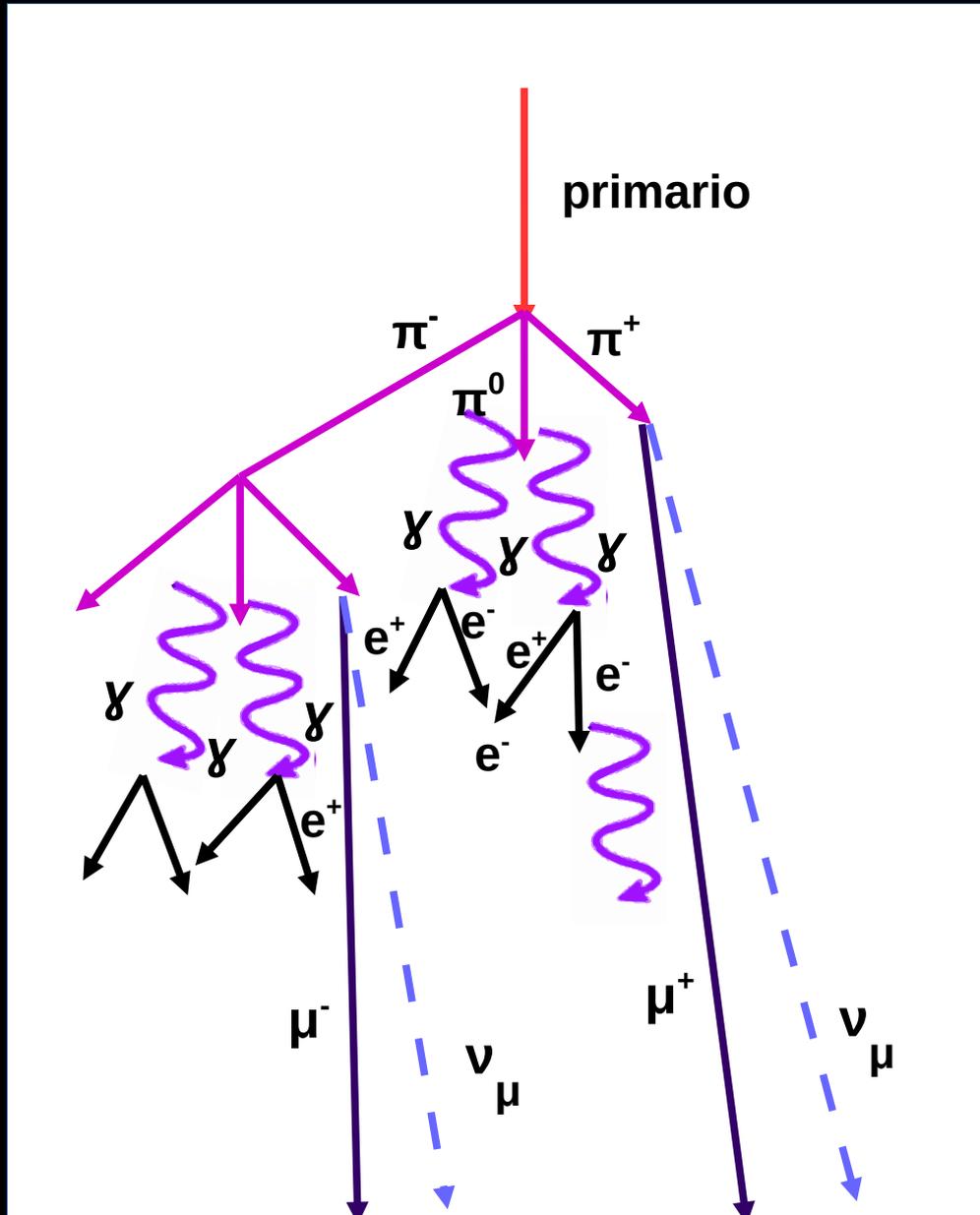
## COMPONENTE ADRONICA

prima ad estinguersi in  
atmosfera

## COMPONENTE ELETTROMAGNETICA

fotoni, coppie elettrone / positrone

# Le particelle secondarie dello sciame



## COMPONENTE ADRONICA

prima ad estinguersi in  
atmosfera

## COMPONENTE ELETTROMAGNETICA

fotoni, coppie elettrone / positrone

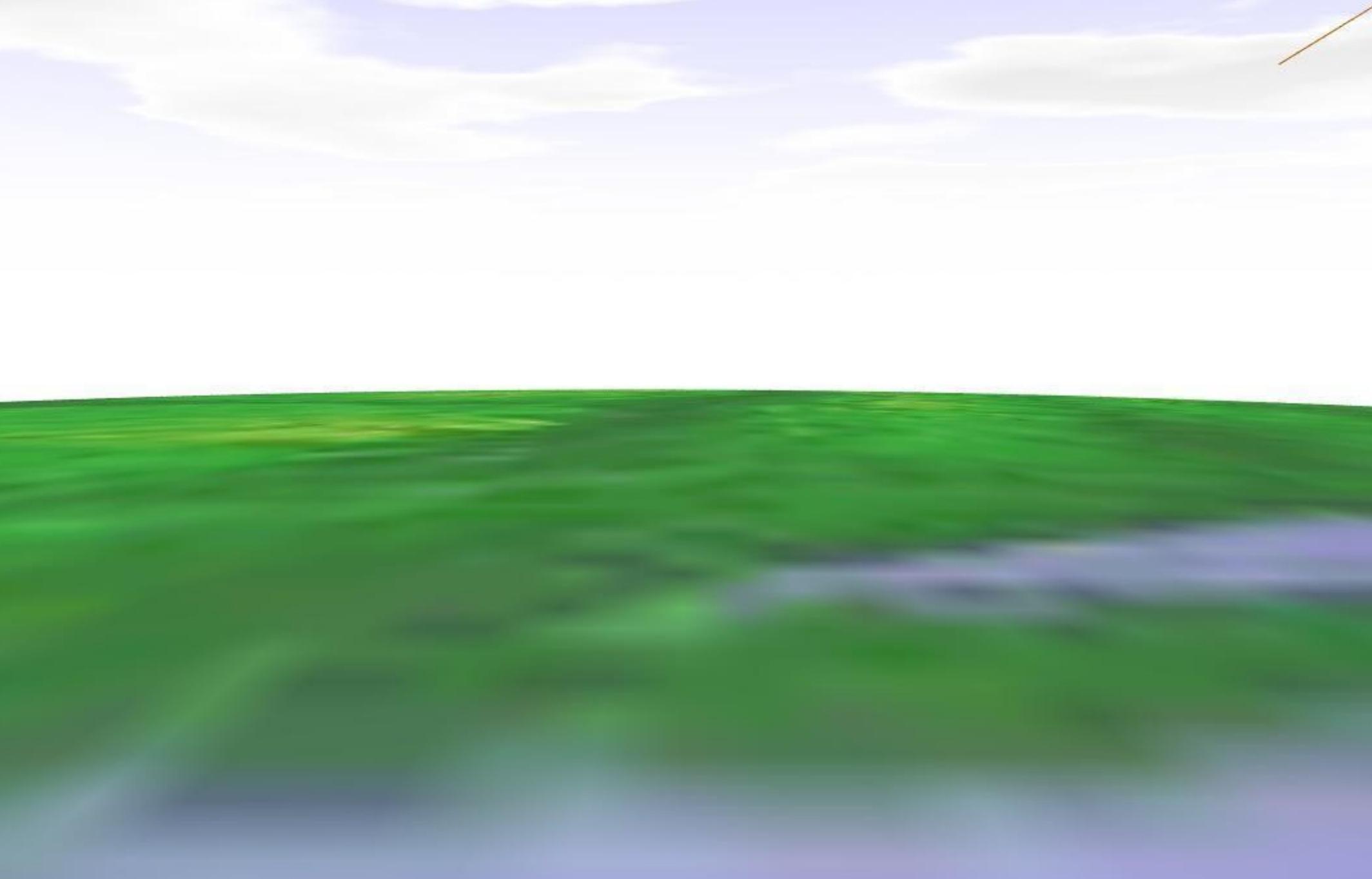
## COMPONENTE MUONICA

la più penetrante

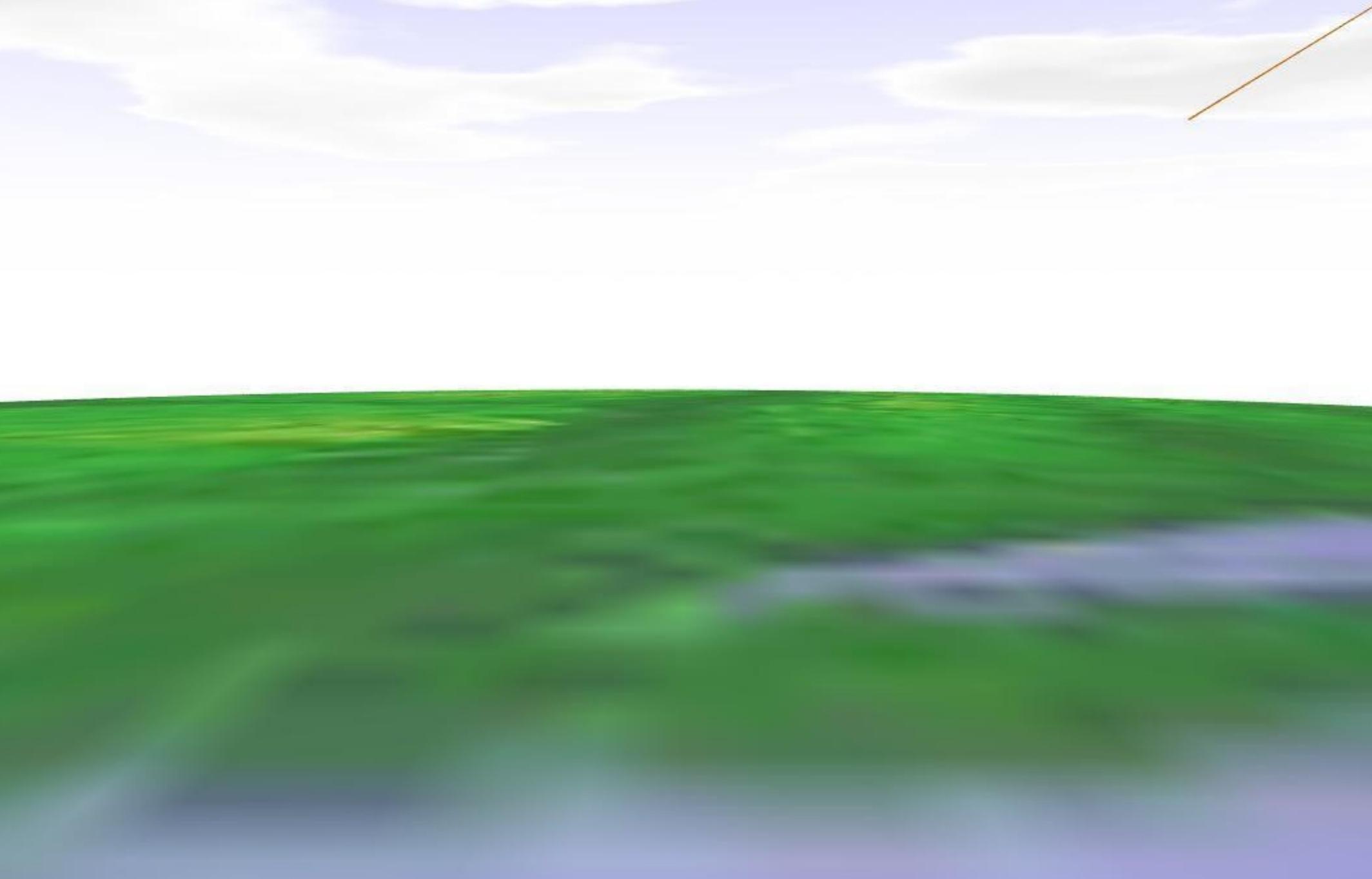
o sviluppo degli sciami in atmosfera



# o sviluppo degli sciami in atmosfera



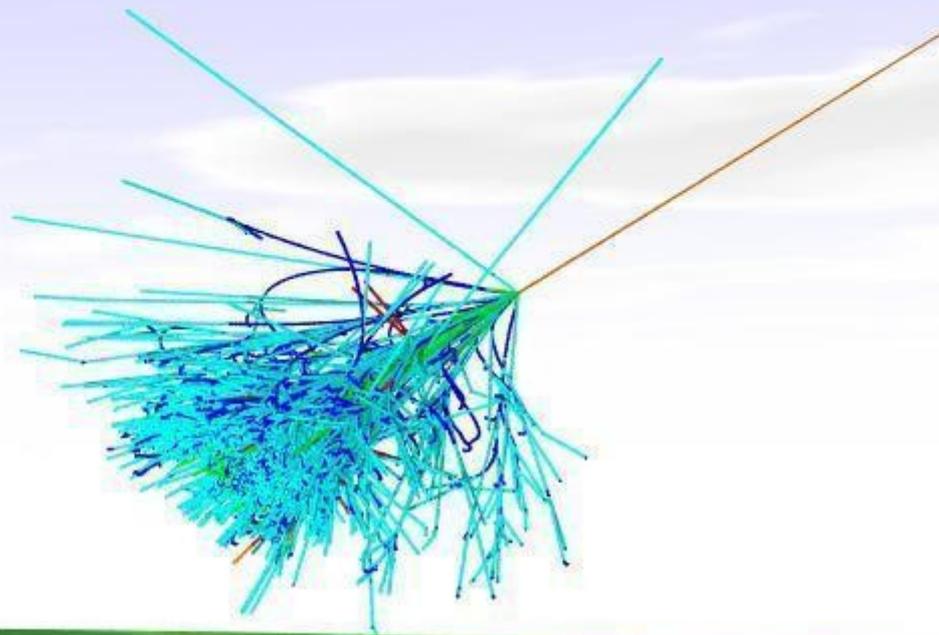
# o sviluppo degli sciami in atmosfera



# sviluppo degli sciame in atmosfera



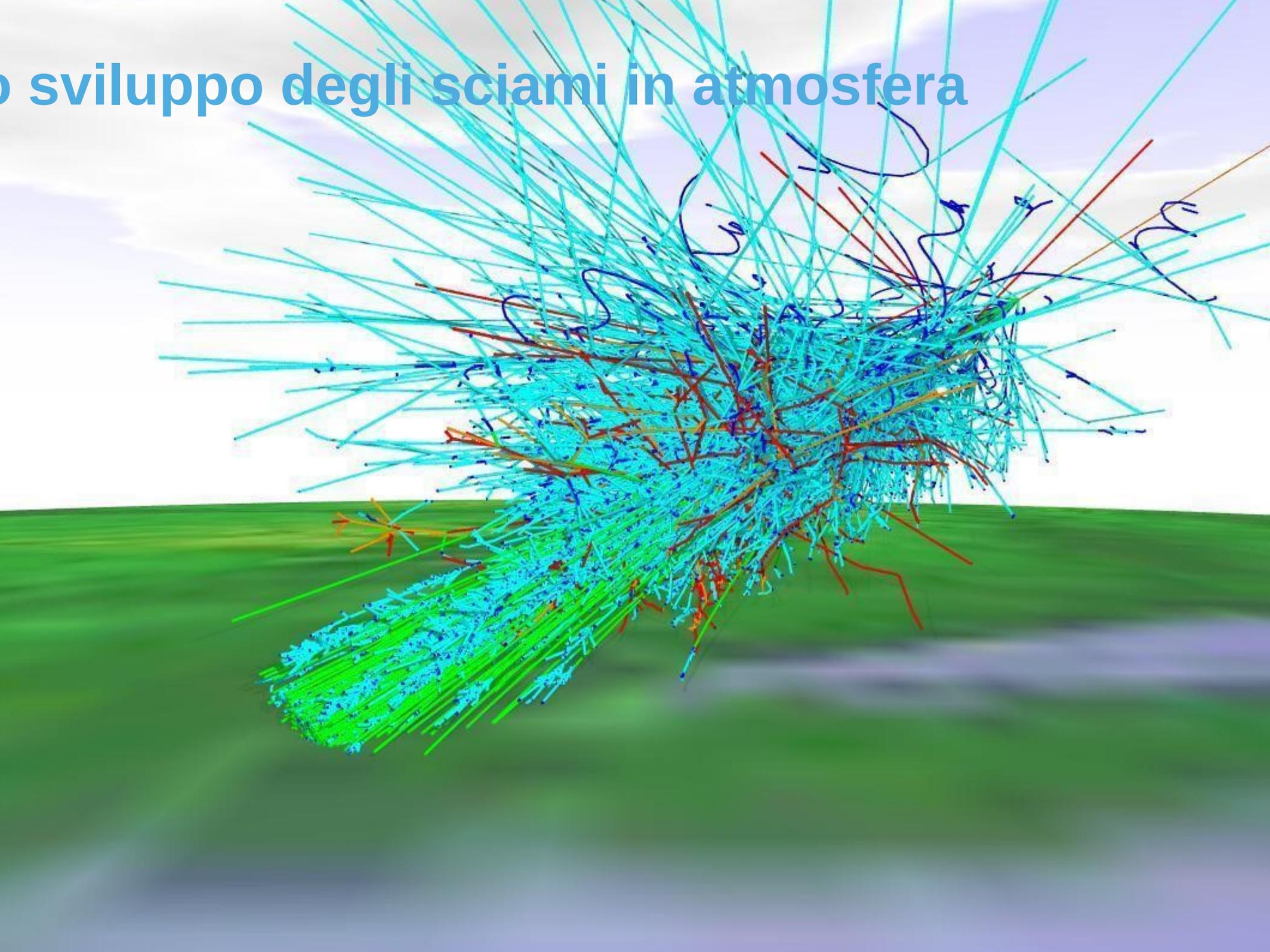
# sviluppo degli sciami in atmosfera



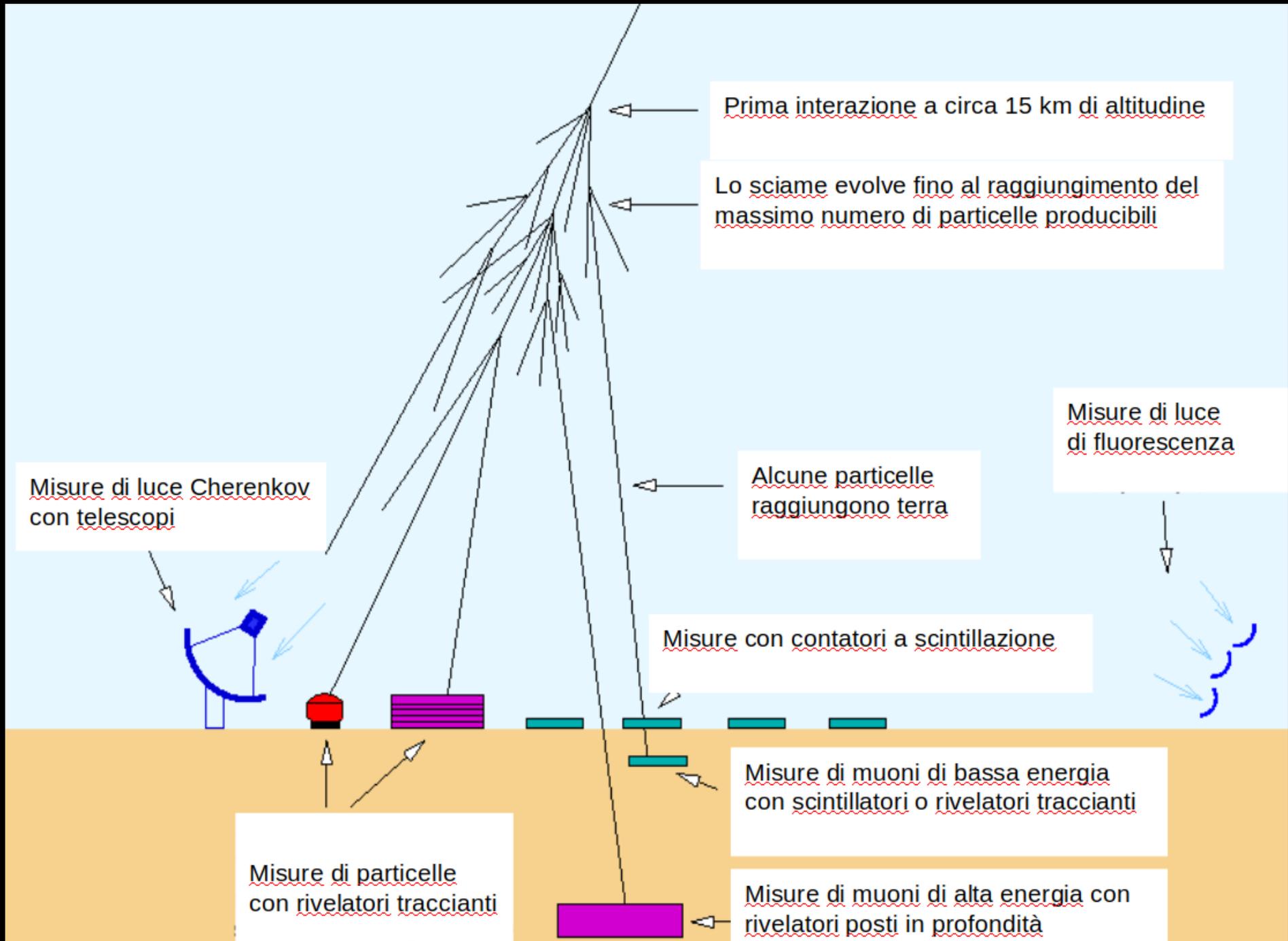
# sviluppo degli sciami in atmosfera



# sviluppo degli sciami in atmosfera



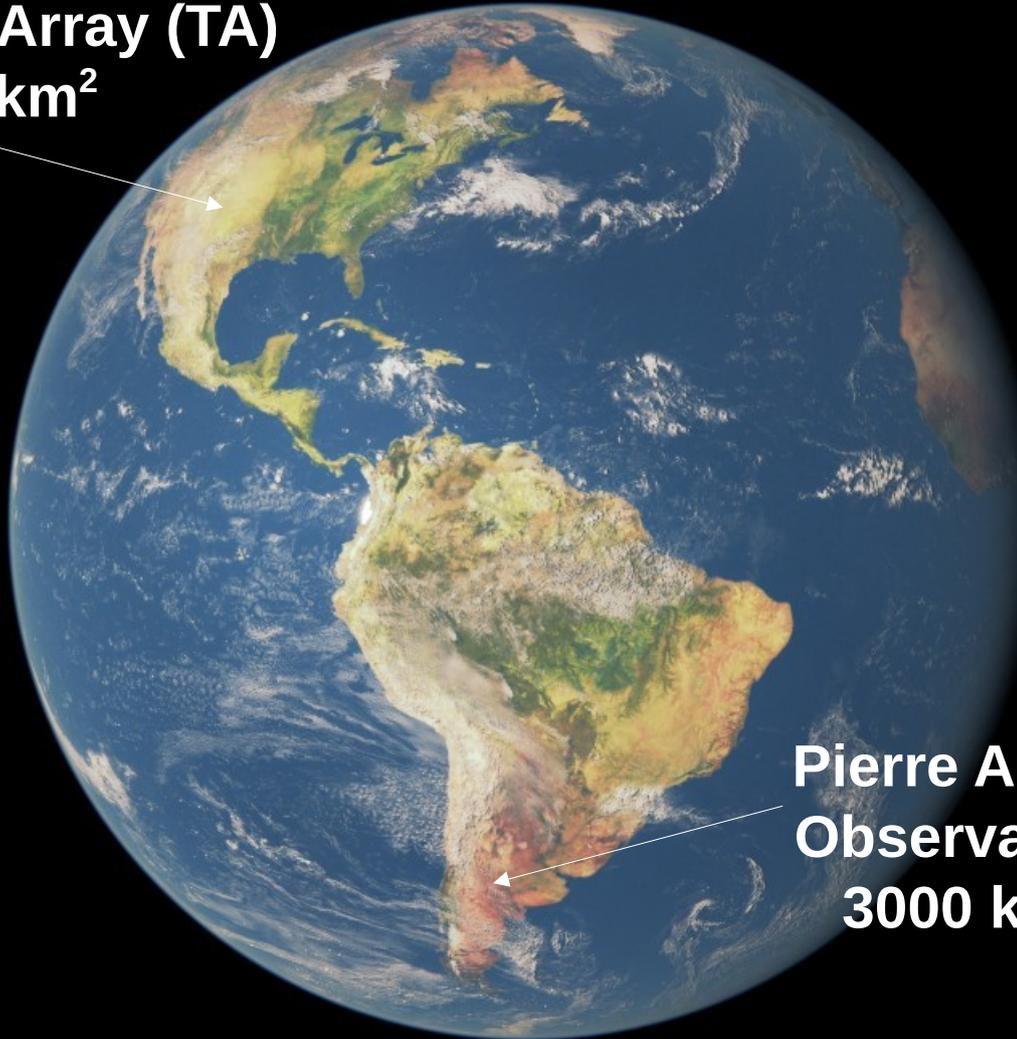
# Metodi di rivelazione indiretta dei raggi cosmici



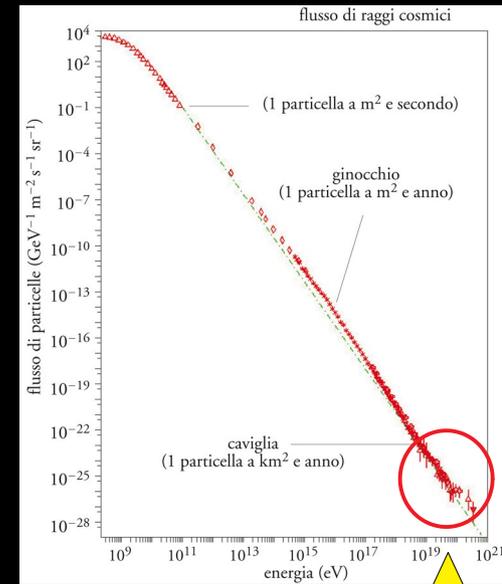
# I principali esperimenti per la misura indiretta

## Raggi cosmici di altissima energia ( $E > 10^{18}$ eV)

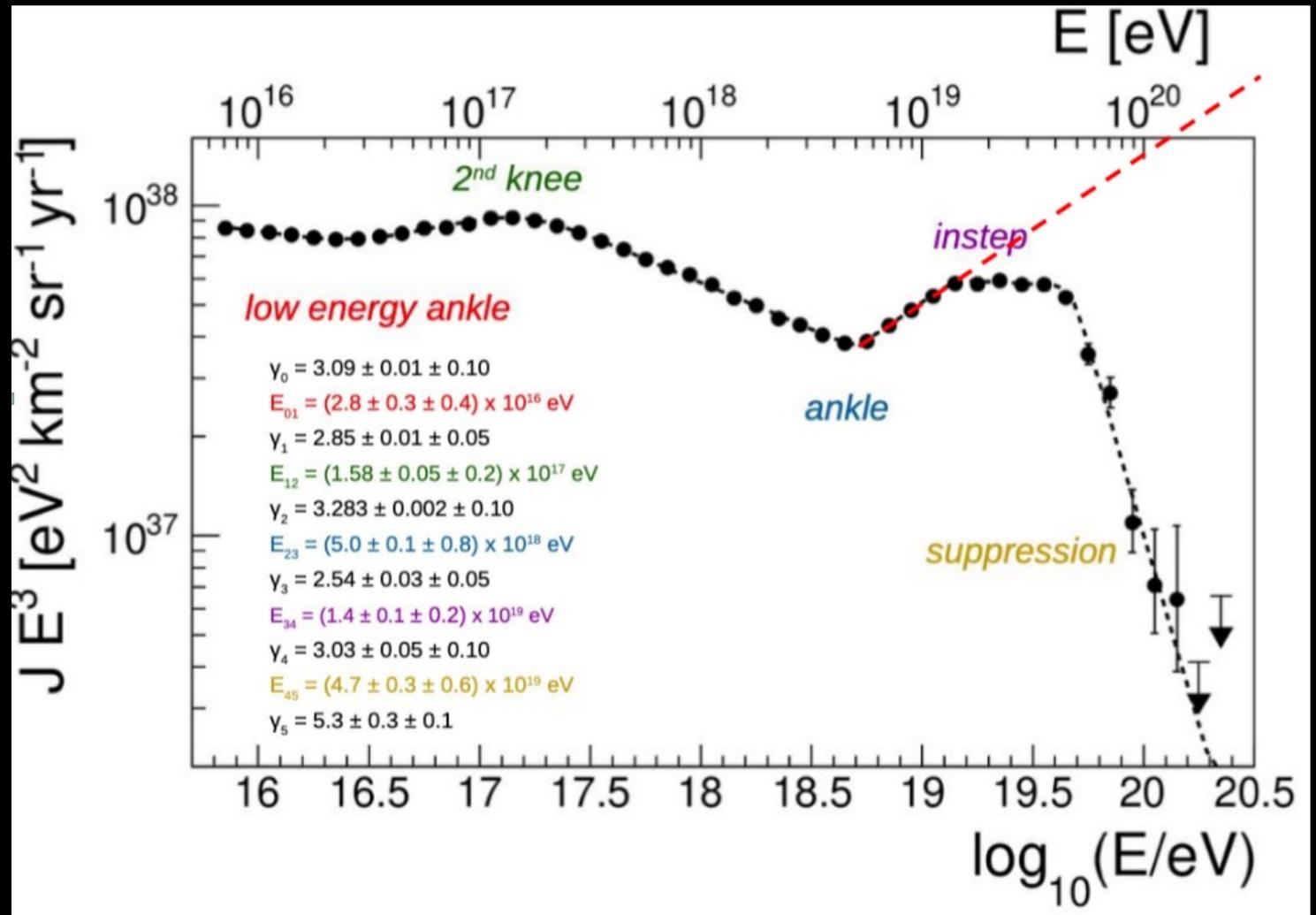
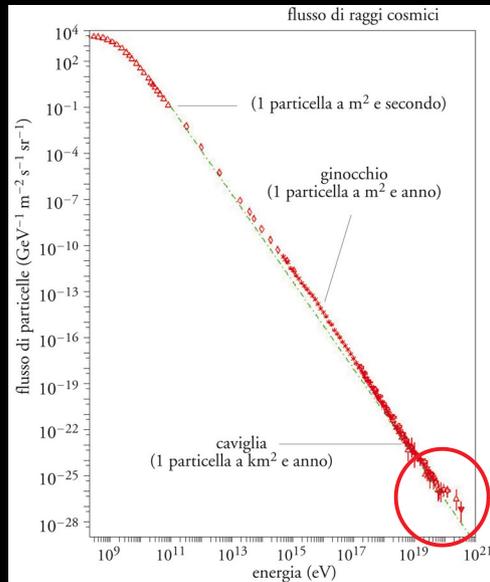
Telescope Array (TA)  
700 km<sup>2</sup>



Pierre Auger  
Observatory  
3000 km<sup>2</sup>



# La fine dello spettro dei raggi cosmici (cutoff)



# I principali esperimenti per la misura indiretta

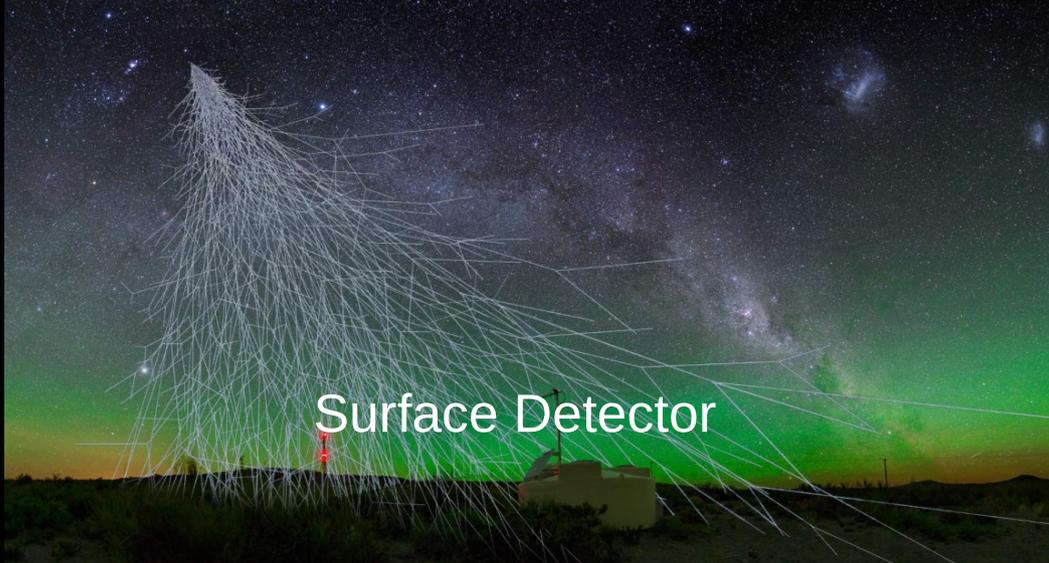
Raggi cosmici di altissima energia ( $E > 10^{18}$  eV)

L'Osservatorio Pierre Auger  
(Argentina)

Fluorescence Detector



Surface Detector



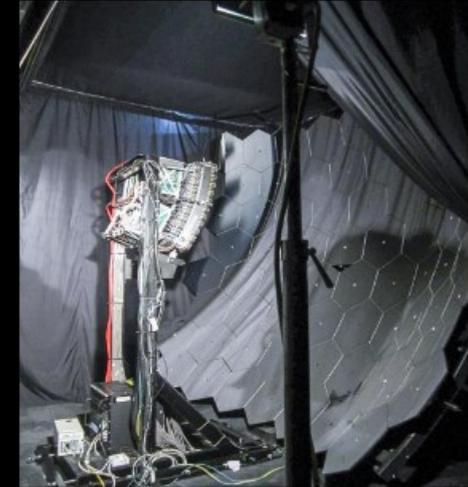
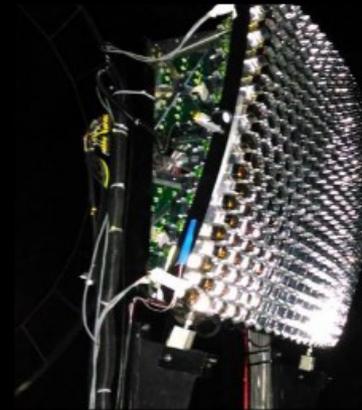
Telescope Array  
(Stati Uniti d'America)



# *Il Rivelatore di Fluorescenza*

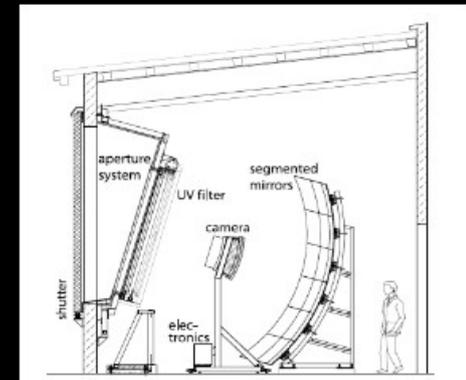
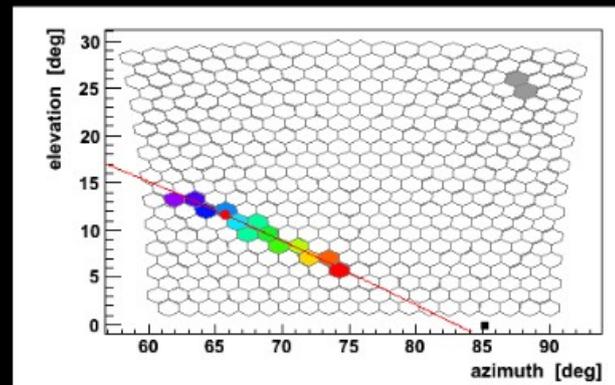


# Il Rivelatore di Fluorescenza



**27 telescopi  
posizionati in 4 siti ai lati del  
rivelatore di superficie**

**Ogni camera è formata da  
 $20 \times 22 = 440$  fotomoltiplicatori**



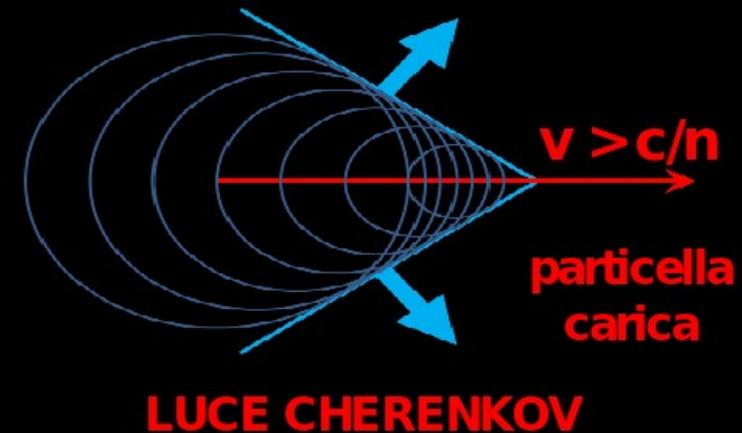
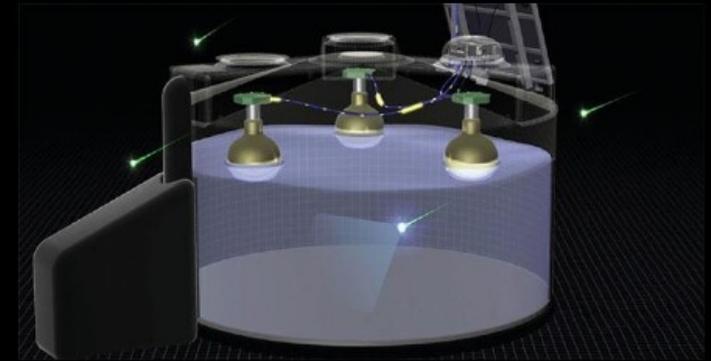
# *Il Rivelatore di Superficie*

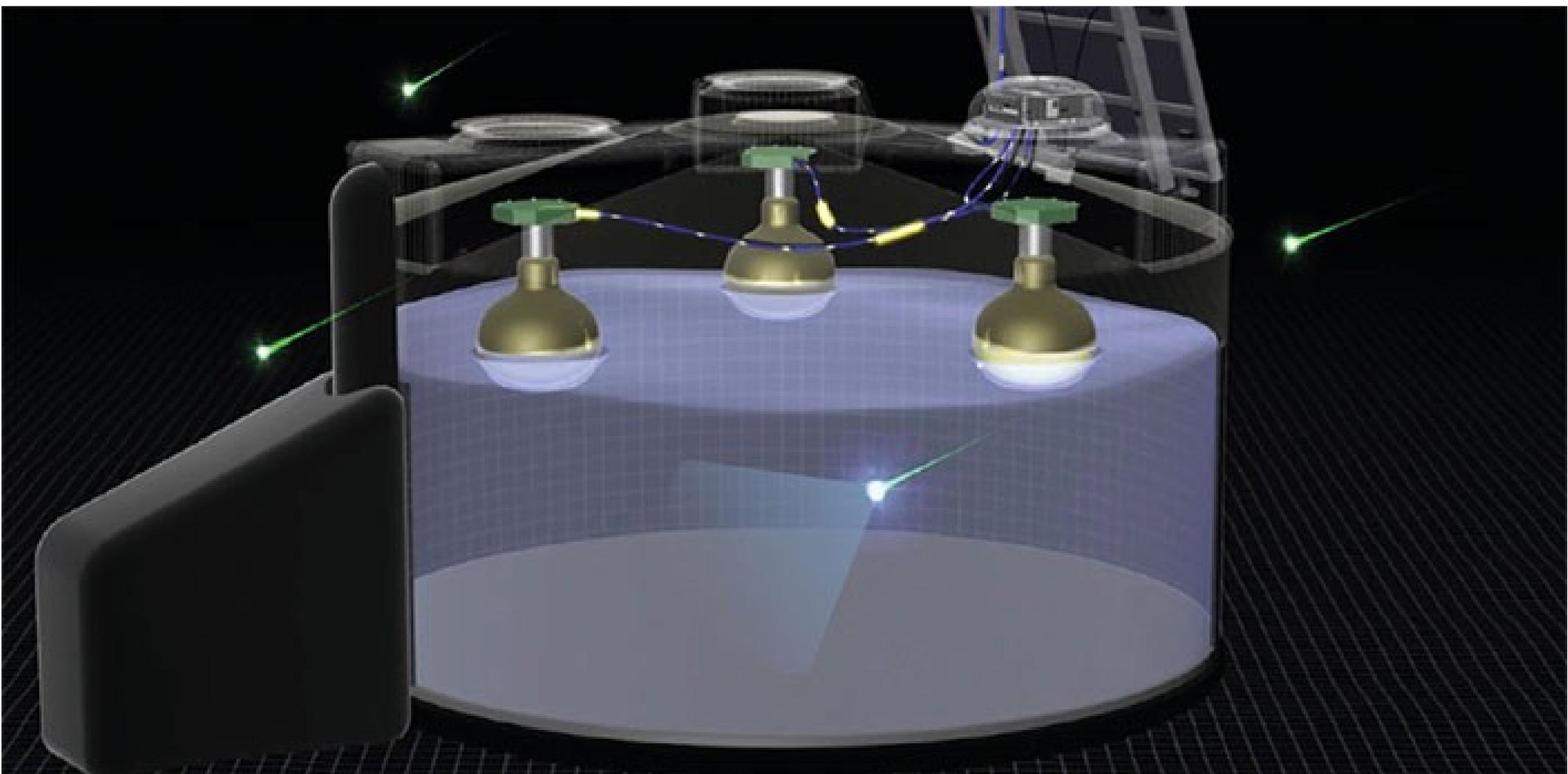


# Il Rivelatore di Superficie



**1660 rivelatori Cherenkov  
ad acqua distribuite i  
su di un'area di 3000 km<sup>2</sup>  
Distanziate 1500 m una dall'altra**

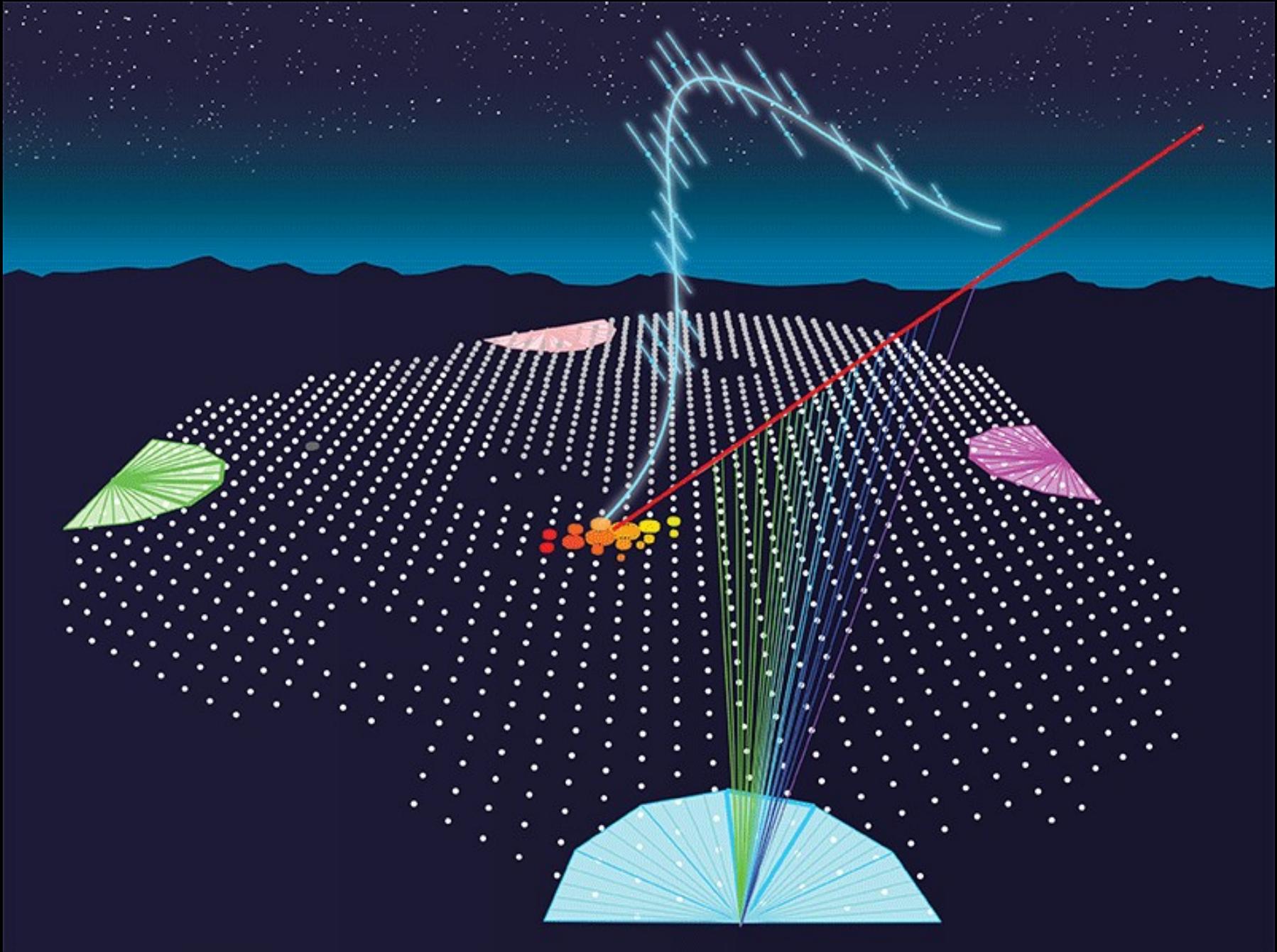




# L'Osservatorio Pierre Auger

## Raggi cosmici di altissima energia (UHECR)

<https://vimeo.com/88029390>

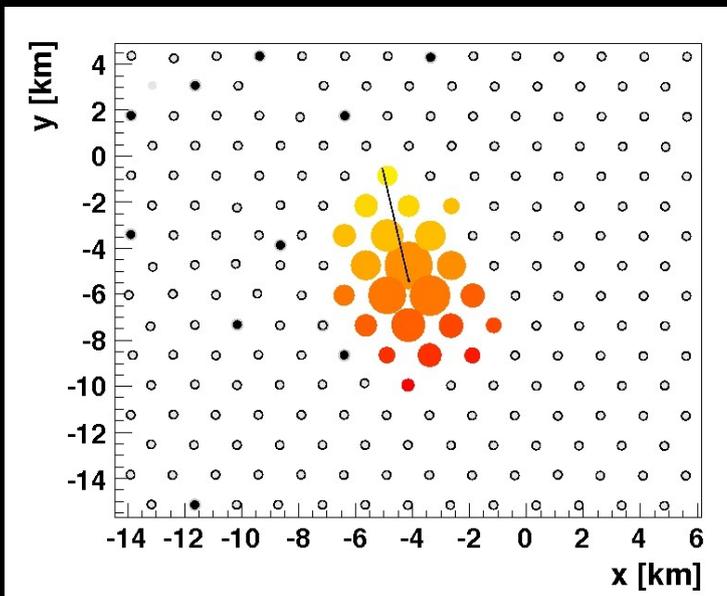
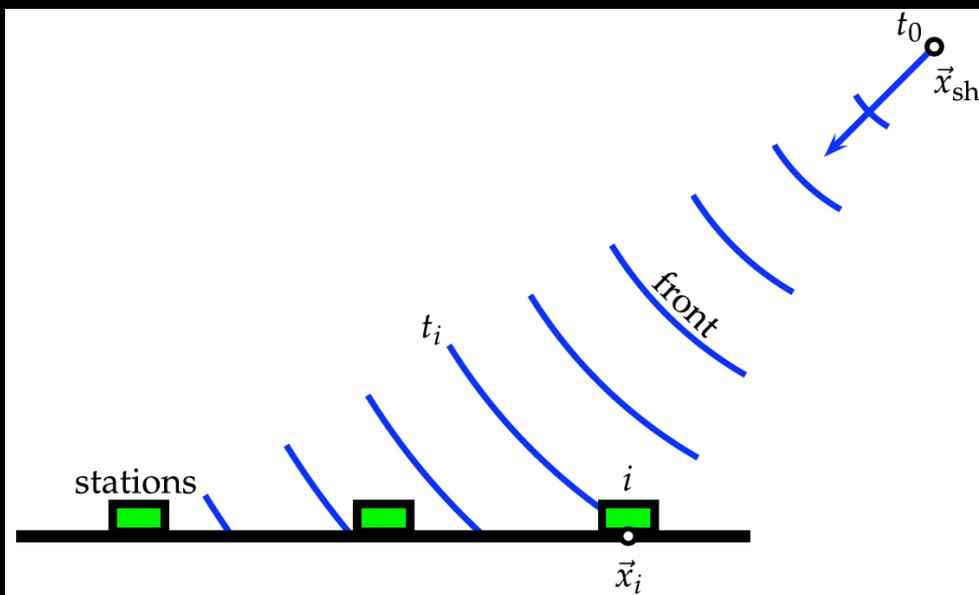
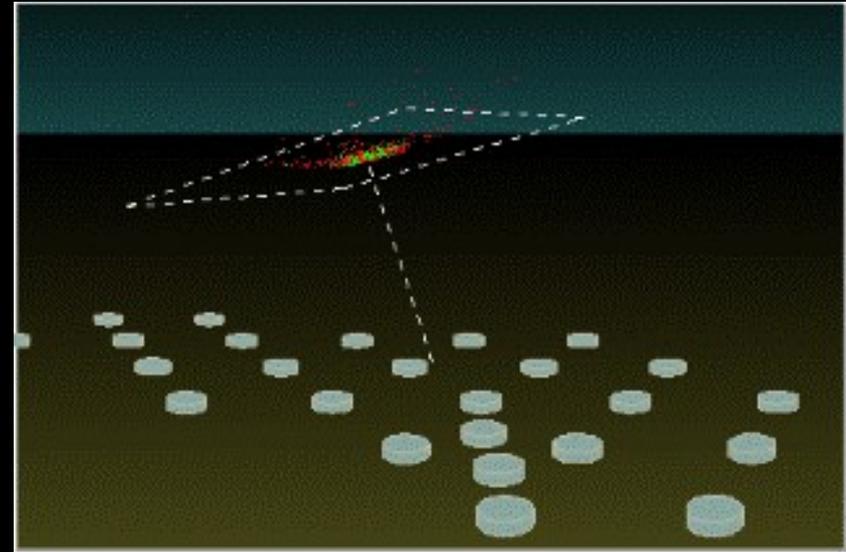


# L'Osservatorio Pierre Auger

## La tecnica di rivelazione ibrida : studio del fronte di particelle

Il rivelatore di superficie misura la densità di particelle che arrivano a terra (fronte dello sciame).

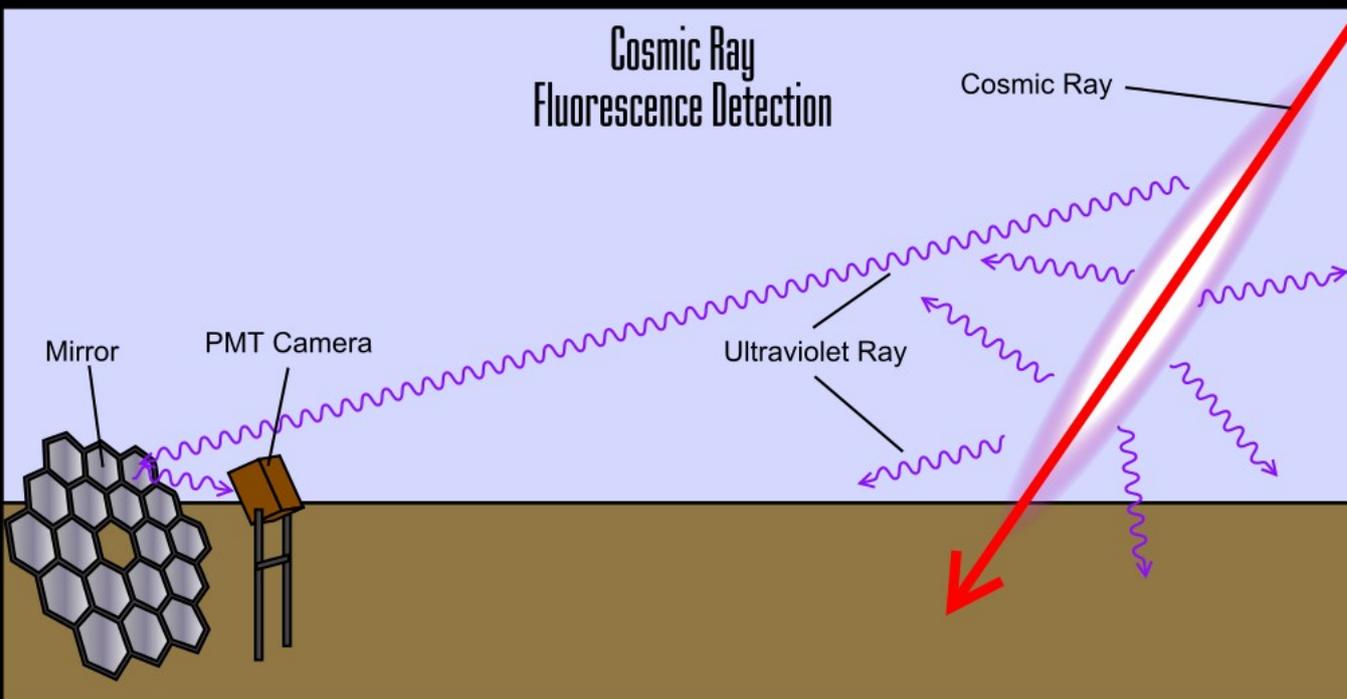
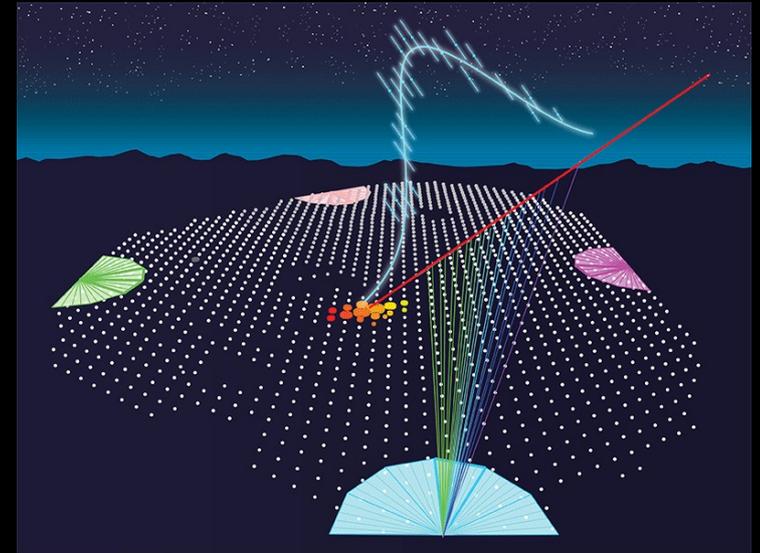
Si misurano il tempo di arrivo e la distribuzione laterale intorno all'asse



# L'Osservatorio Pierre Auger

## La tecnica di rivelazione ibrida : studio della luce prodotta in atmosfera

Il rivelatore di fluorescenza misura lo sviluppo in aria dello sciame, con la rivelazione della luce prodotta durante lo sviluppo (Auger FD)

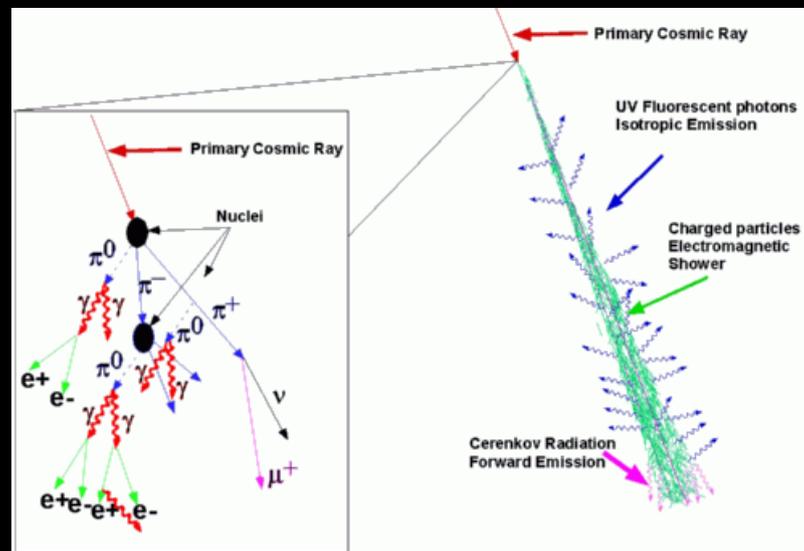
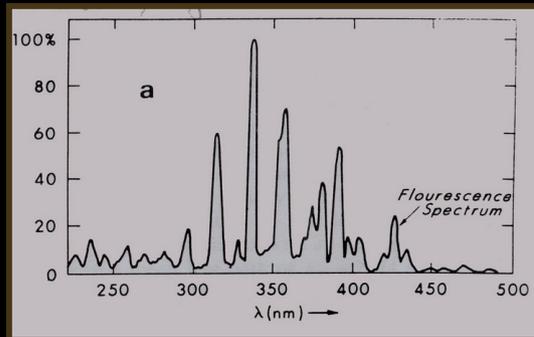


# Emissione di luce durante lo sviluppo dello sciame

## Luce di fluorescenza

Fotoni emessi dalle molecole di azoto a seguito dell'interazione con i primari cosmici

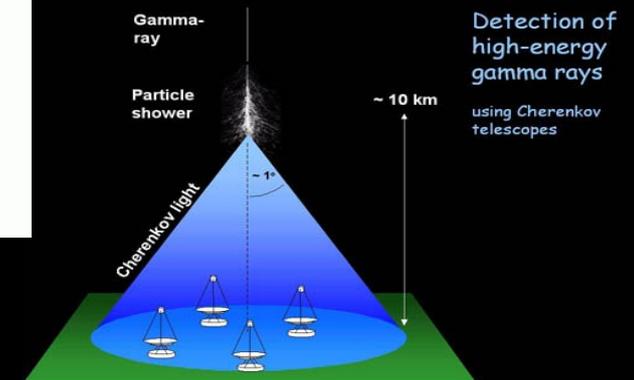
Emissione isotropa  
(uguale in tutte le direzioni!)



## Luce Cherenkov

Emessa dalle particelle cariche ultrarelativistiche dello sciame

Fortemente piccata in avanti!

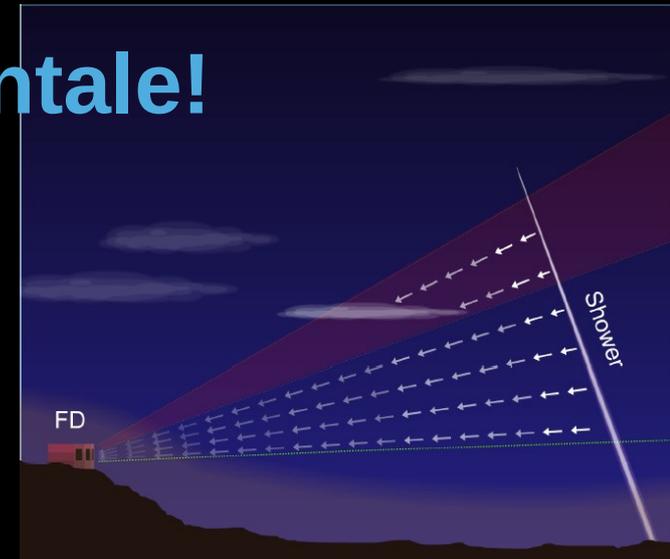


**L'atmosfera é parte del rivelatore!**

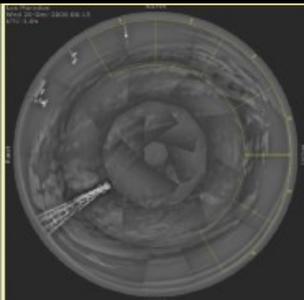
# Conoscere l'atmosfera é fondamentale!

E' il mezzo in cui lo sciame di particelle secondarie si sviluppa e raggiunge il suo massimo, ma anche il mezzo in cui la luce emessa é sia prodotta che attenuata fino ai rivelatori ...

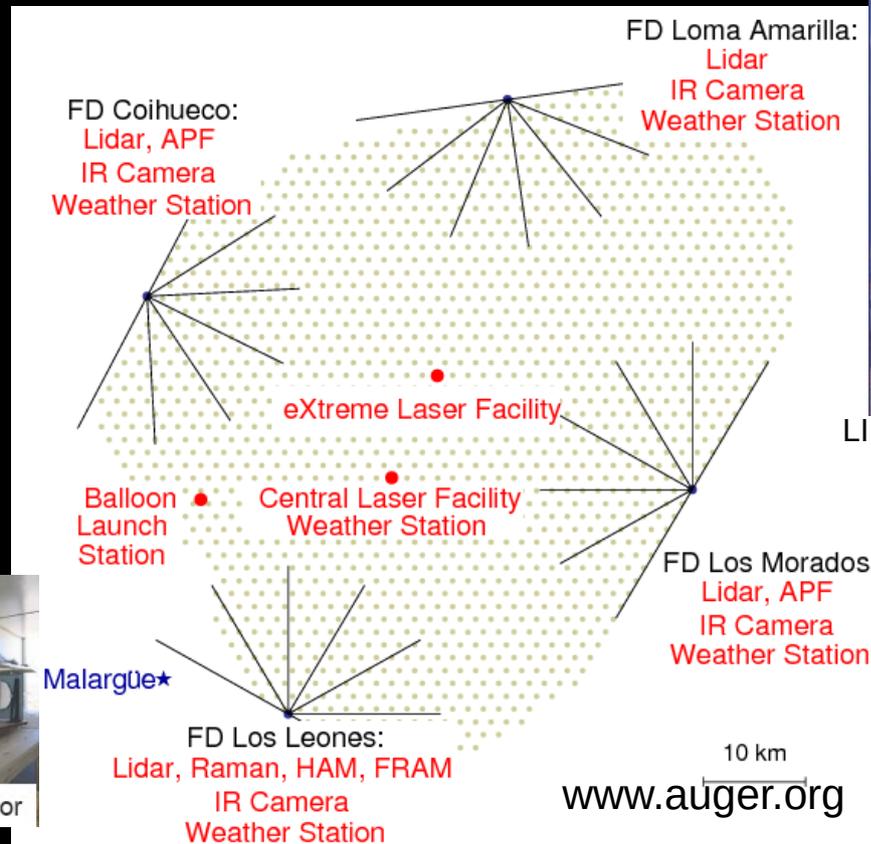
quindi va monitorata continuamente!



Central Laser Facility



Phase Function Monitor



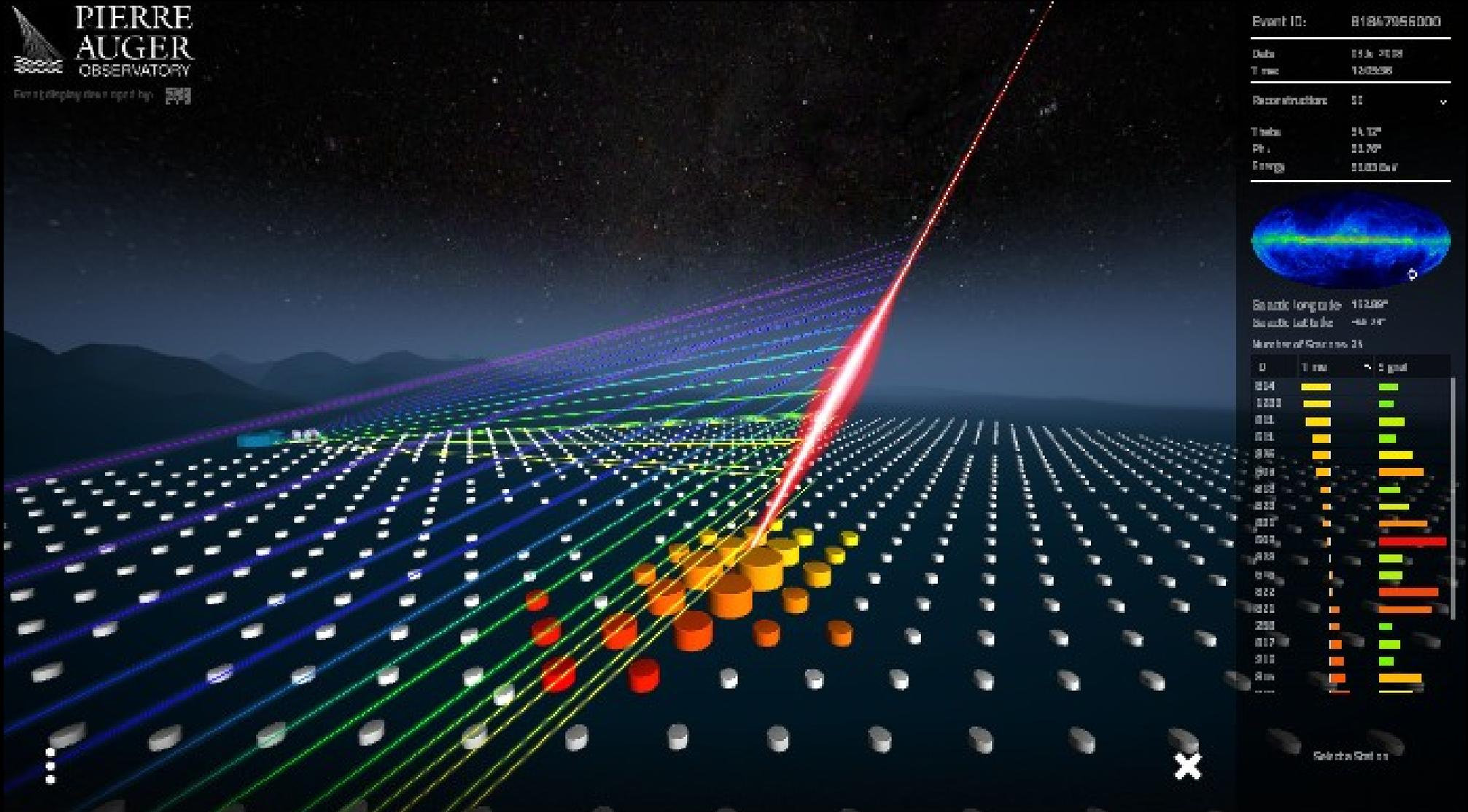
LID



FRAM

# L'Osservatorio Pierre Auger

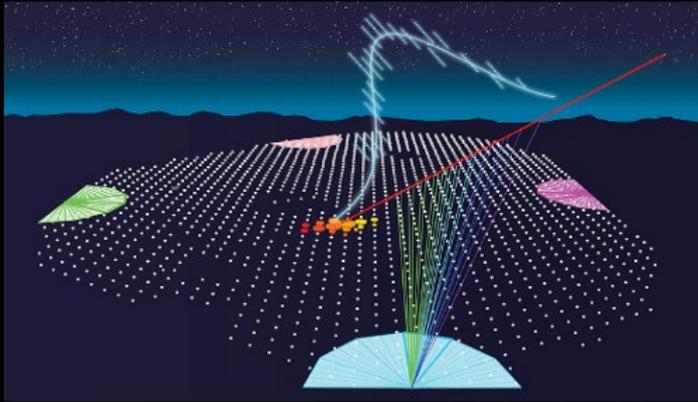
Raggi cosmici di altissima energia (UHECR) – ecco come osserverete eventi reali in occasione della Masterclass!



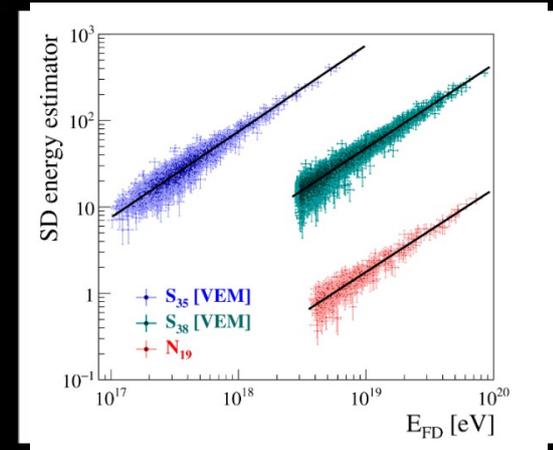
# L'Osservatorio Pierre Auger

## Perché 2 tecniche di rivelazione nello stesso posto?

### La ricostruzione ibrida degli sciami



Rivelatore di Superficie



Rivelatore di Fluorescenza



Duty cycle 100%



Misura "indiretta" dell'energia  
Calibrazione SD/FD



Scarsa sensibilità alla composizione  
in massa



Duty cycle 15%



Misura diretta "quasi-calorimetrica" dell'energia



Composizione in massa da  $X_{max}$

**La tecnica ibrida é proprio il punto di forza dell'osservatorio!**

# Cosa abbiamo imparato in 100 anni ... dalla scoperta di Victor Hess ad oggi

I raggi cosmici sono protoni e nuclei prodotti in fenomeni astrofisici estremi che arrivano fino a noi sulla Terra. La loro scoperta ha dato il via alla fisica delle particelle.

Ad energie fino a  $10^{18}$  eV sono di origine galattica (principalmente protoni). Oltre, sono prodotti fuori dalla nostra galassia!

Ad energie di  $10^{18}$  eV ed oltre (UHECR), non sono protoni come era atteso : si tratta di nuclei piu' pesanti!

Lo spettro energetico, dalle basse alle altissime energie, é stato costruito ma nuovi dettagli si stanno aggiungendo via via che le misure diventano sempre piu' precise!

## ... e cosa ci resta ancora da capire!

Trattandosi di particelle cariche, i raggi cosmici sono deviati dai campi magnetici che esistono nel cosmo, e quindi non possiamo usare la loro direzione di arrivo per identificare precisamente le sorgenti. Sappiamo pero' che molti UHECR arrivano da alcune regioni del cielo ...e la ricerca delle sorgenti continua!

I raggi cosmici di altissima energia sono, inaspettatamente, nuclei piu' pesanti. L'esperimento Auger é in fase di upgrade con rivelatori a scintillazione per poter misurare la composizione in massa con maggior precisione.

# Pierre Auger Observatory Open Data

March 2024 release

Following the [Auger Collaboration Open Data Policy](#), the Pierre Auger Open Data is the public release of 10% of the [Pierre Auger Observatory](#) cosmic-ray data published in recent scientific papers and at International conferences. The release also includes 100% of weather and space-weather data collected until 31 December 2020. This website hosts the datasets for download. Brief overviews of the [Pierre Auger Observatory](#) and of the [Auger Open Data](#) are set out below. An online event display to explore the released cosmic-ray events and example analysis codes are provided. An outreach section dedicated to the general public is also available.

All Auger Open Data have a DOI that you are required to cite in any applications or publications. These files are part of the main dataset whose DOI is [10.5281/zenodo.4487612](https://doi.org/10.5281/zenodo.4487612) and always points to the current version.



## [Datasets](#)

[the released datasets and their complementary data](#)



## [Visualize](#)

[an online look at the released pseudo raw cosmic-ray data](#)



## [Analyze](#)

[example analysis codes in online python notebooks to run on the datasets](#)



## [Catalog](#)

[of the highest-energy cosmic rays](#)



## [Outreach](#)

[a page dedicated to the general public](#)



# L'Osservatorio Pierre Auger

Quali caratteristiche del primario cosmico che ha generato lo sciame vogliamo "ricostruire"?

1. la sua energia
2. qual é la sua natura (sono protoni? O nuclei piu' pesanti?)
3. da quale direzione arriva → localizzazione sulla mappa del cielo

## Particelle cariche di energia estrema

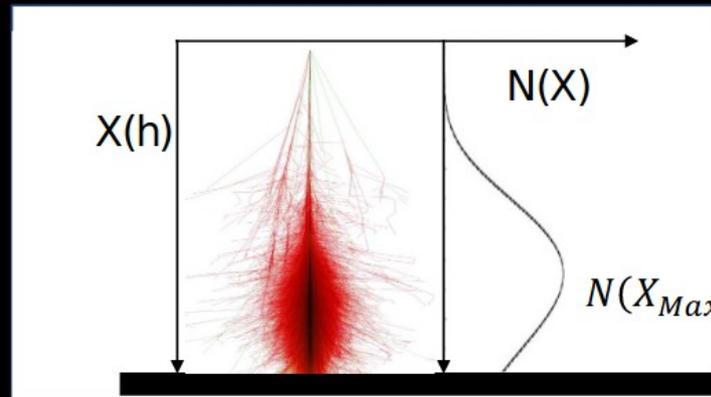
Come ricostruirne le caratteristiche?

### Sviluppo longitudinale

Rivelazione della luce di fluorescenza emessa per diseccitazione di  $N_2$  atmosferico dopo l'interazione con le particelle secondarie dello sciame

La quantità di luce di fluorescenza emessa è proporzionale all'energia dissipata nell'atmosfera dallo sciame

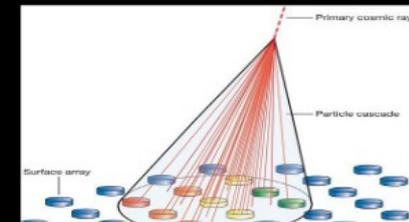
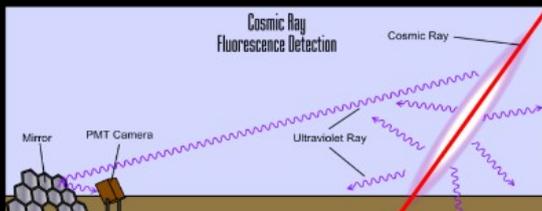
*$X_{max}$  dipende dalla massa del primario*



### Distribuzione laterale

Misura della densità delle particelle al livello del suolo ( $e, \gamma, \mu$ )

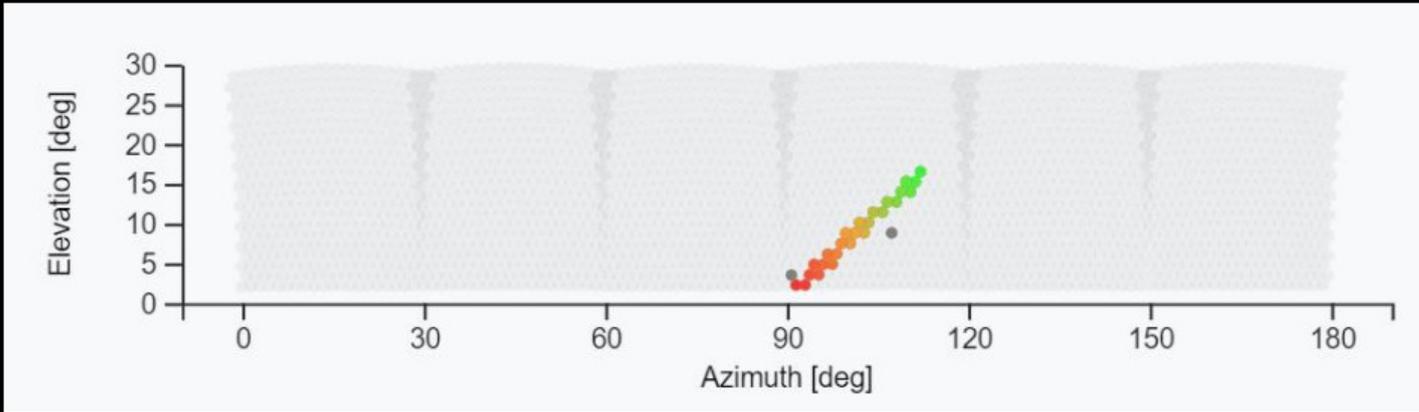
La distribuzione di particelle al suolo dipende dall'energia e dalla massa della particella che ha generato lo sciame



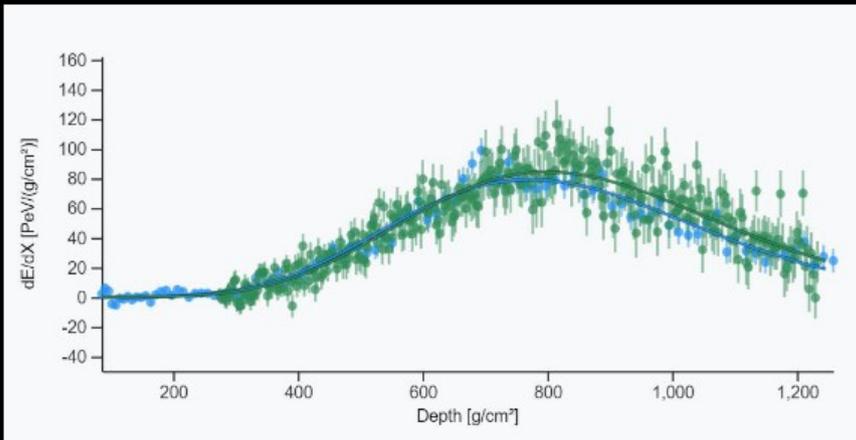
# L'Osservatorio Pierre Auger

## FD (Fluorescence Detector) : come funziona?

### Il Rivelatore di Fluorescenza



Traccia dello sciame in atmosfera

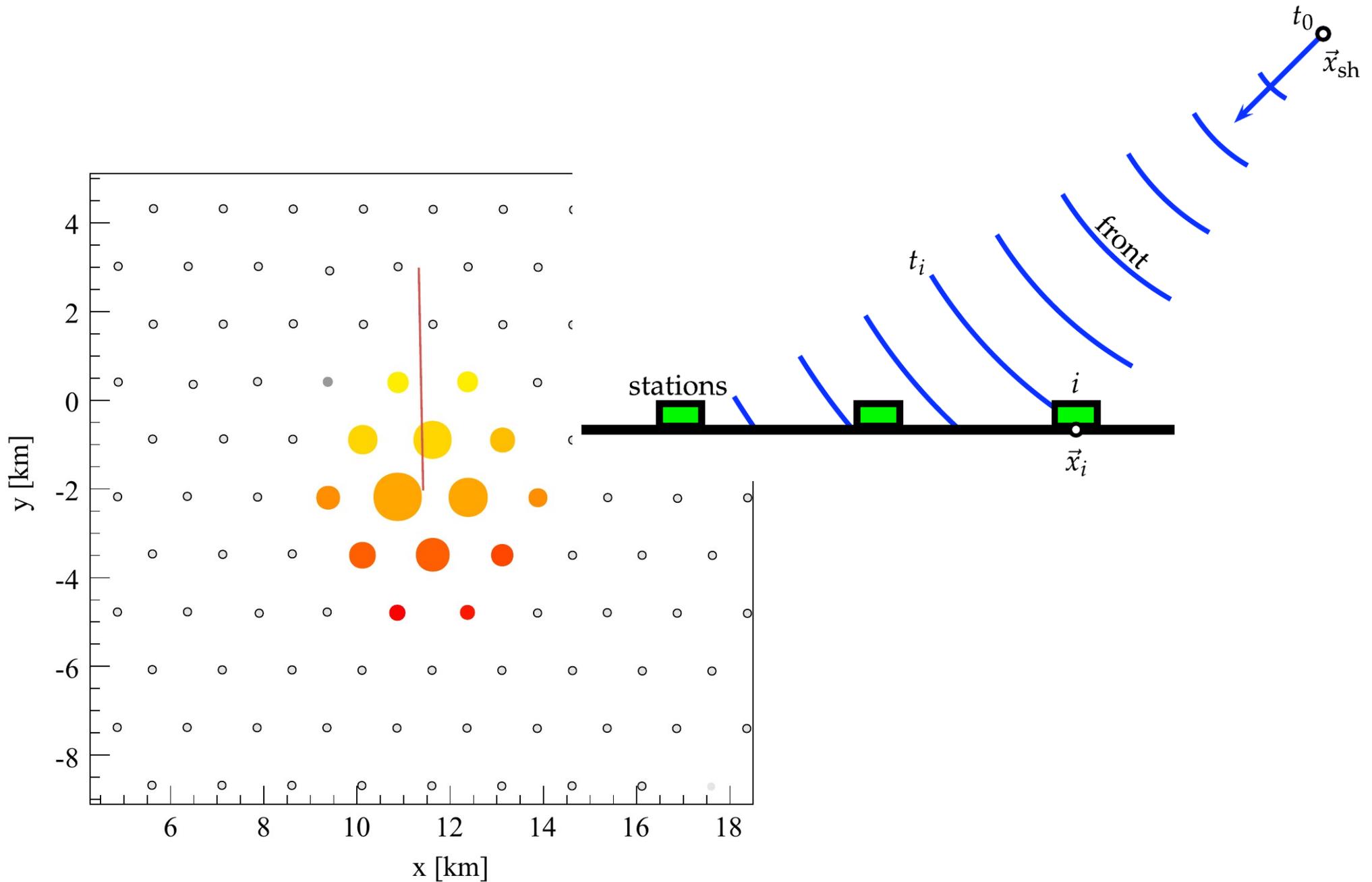


Energia depositata dallo sciame in atmosfera



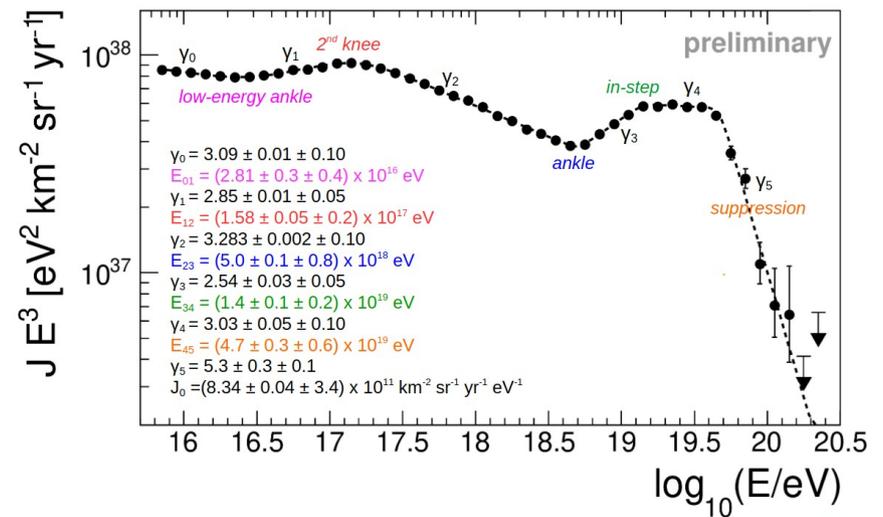
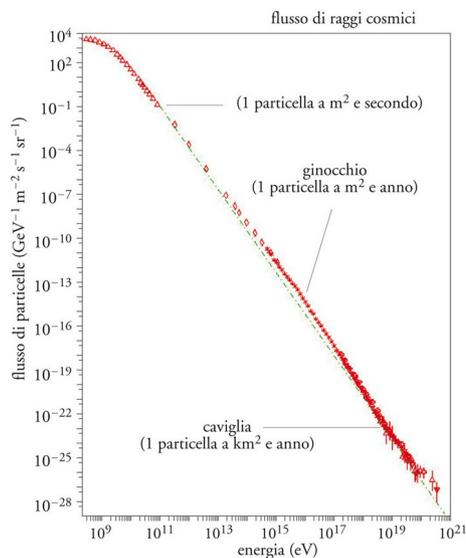
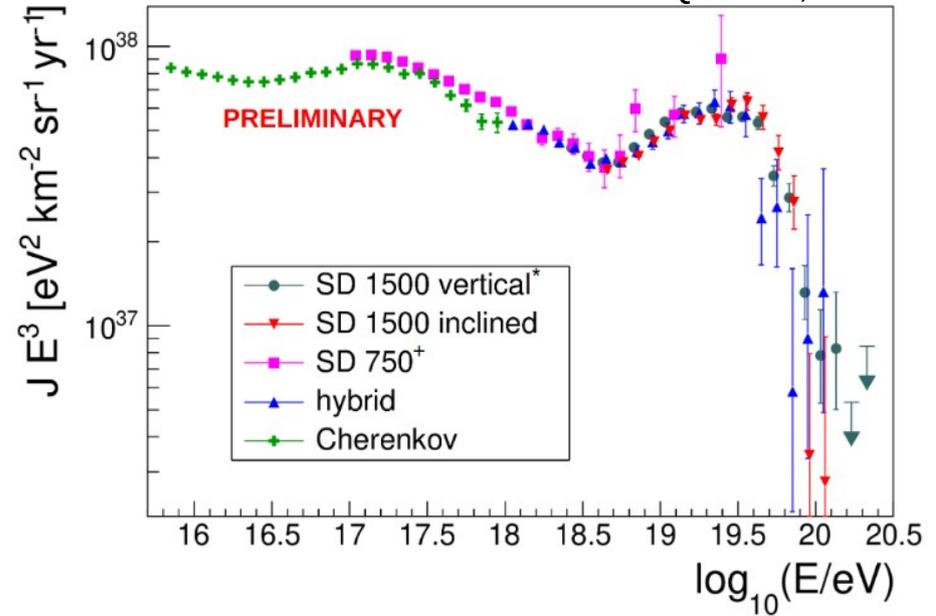
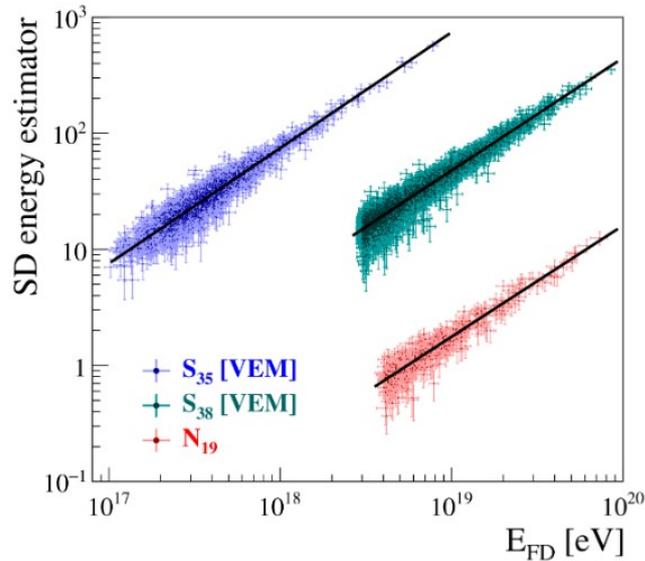
Energia, Xmax

# *Impronta dello Sciame a Terra*

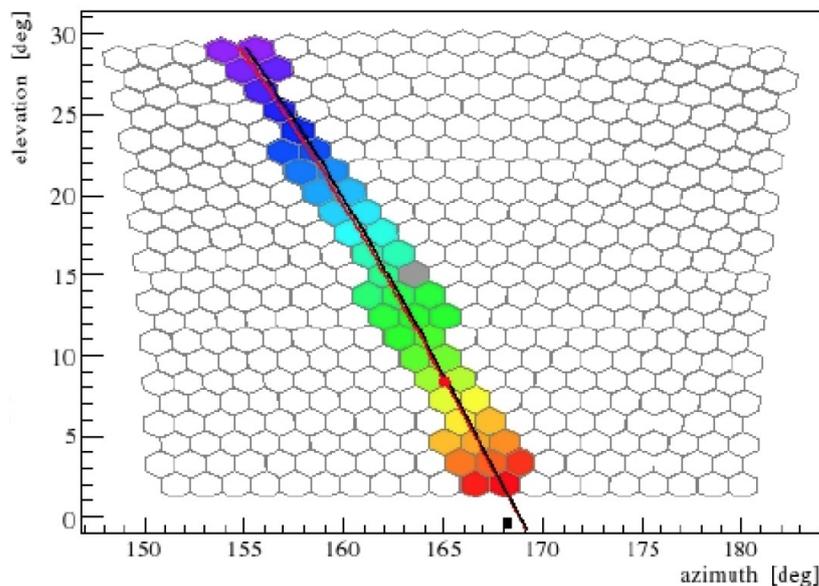


# Rivelazione Ibrida: Intercalibrazione + Spettro

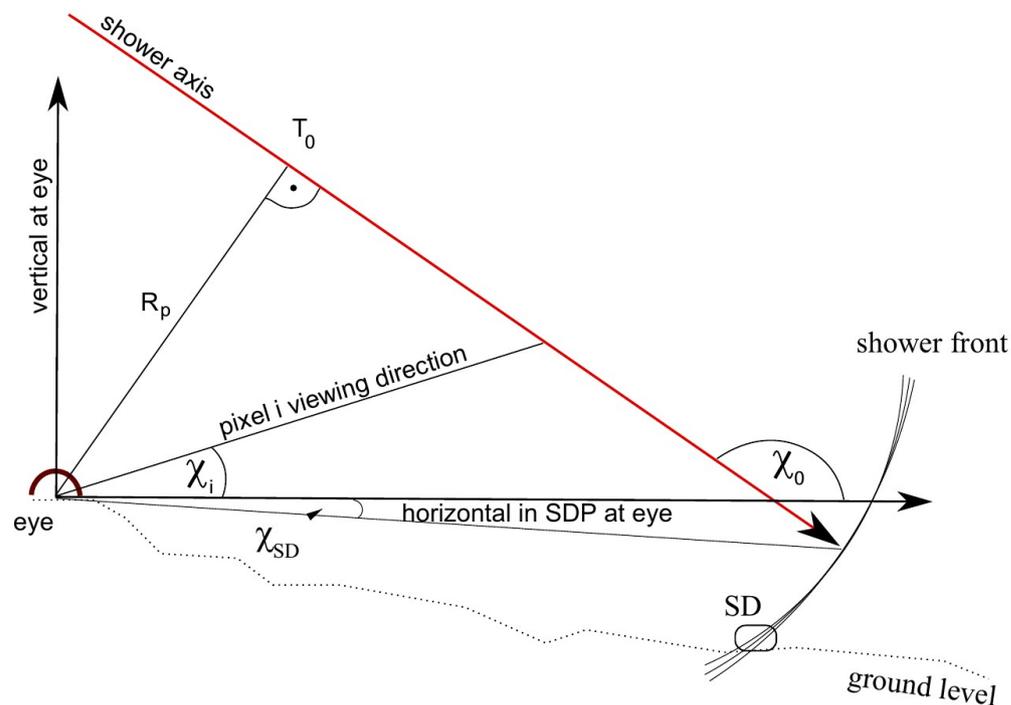
Q. Luce, UHECR 2022



# Ricostruzione Geometria dello Sciame



**Traccia di uno sciame sulla camera:**  
matrice di 440 PMT



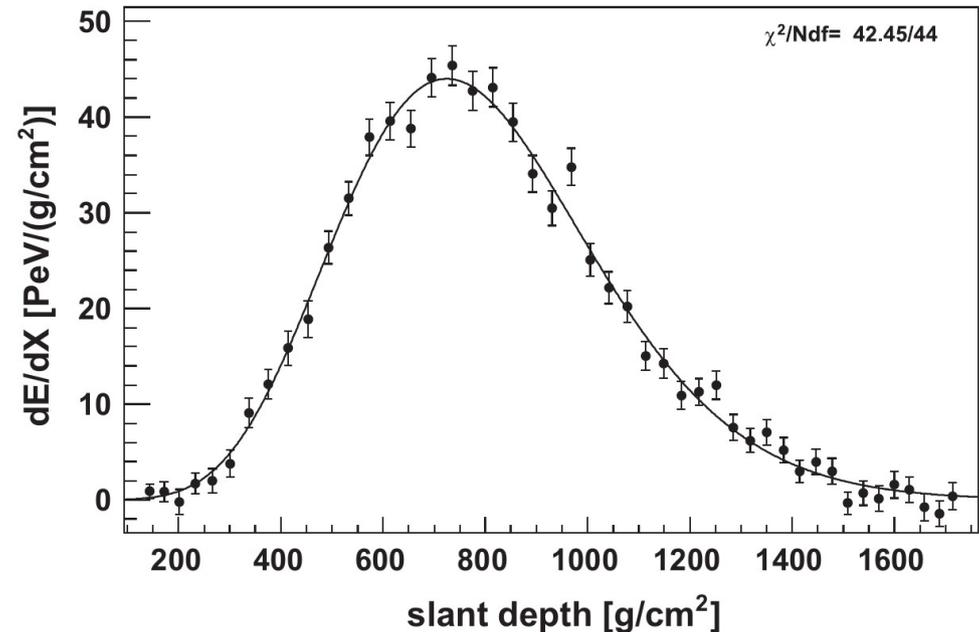
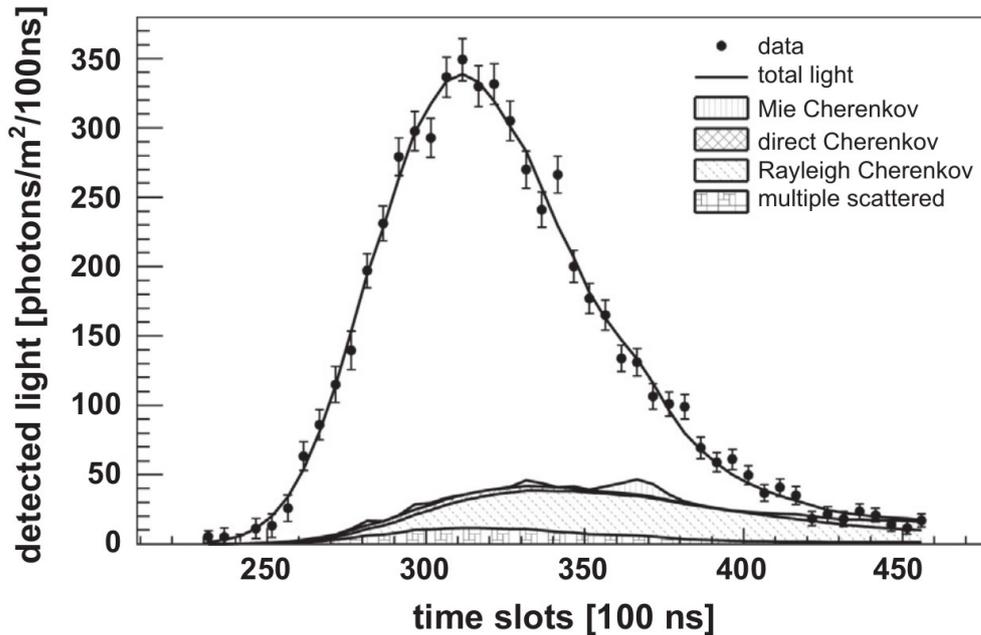
**SDP (Shower Detector Plane):**  
piano contenente l'asse dello sciame e il telescopio di fluorescenza.  
La proiezione di uno sciame sulla camera evolve lungo lo SDP  
→ in questo piano, conoscendo i tempi di arrivo del segnale in ciascun pixel, ricostruiamo l'asse dello sciame.

# Profilo Longitudinale e Misura di Energia

Da luce (numero di fotoni)  
raccolta in funzione del tempo

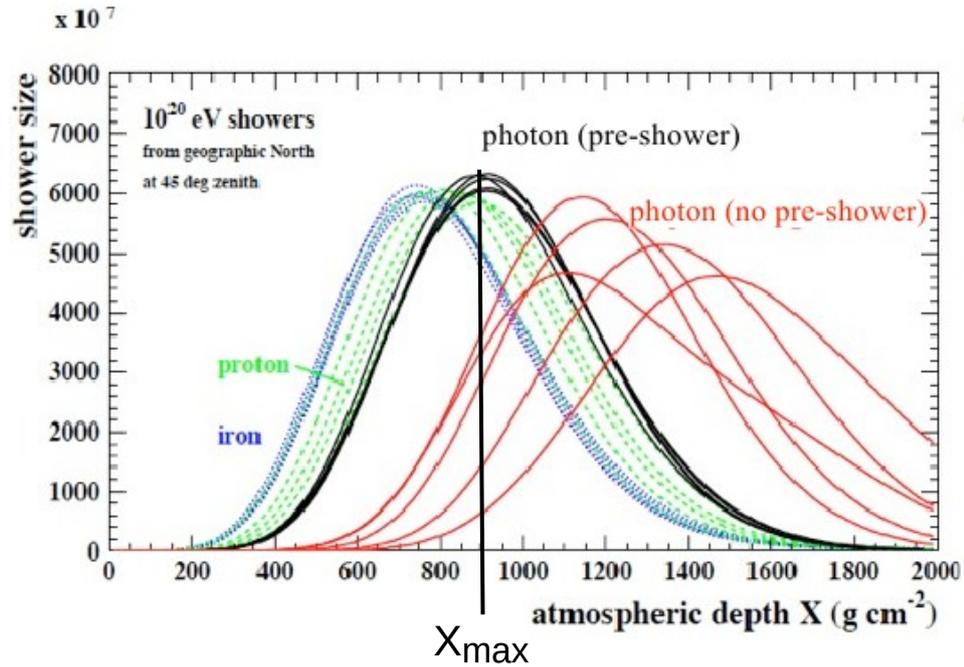


A energia depositata da uno  
sciame in funzione della  
profondità atmosferica.

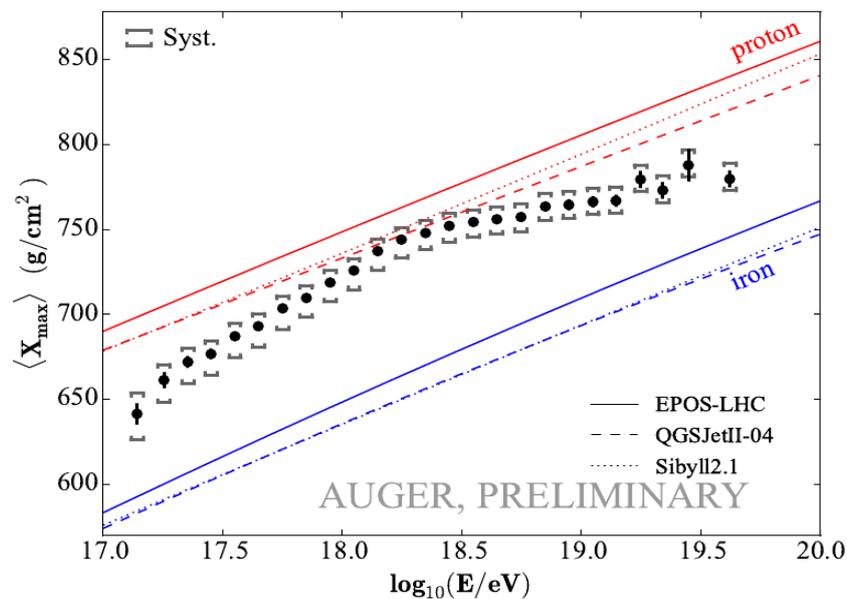


Dal fit di questo profilo, otteniamo  
l'energia del primario (misura diretta)

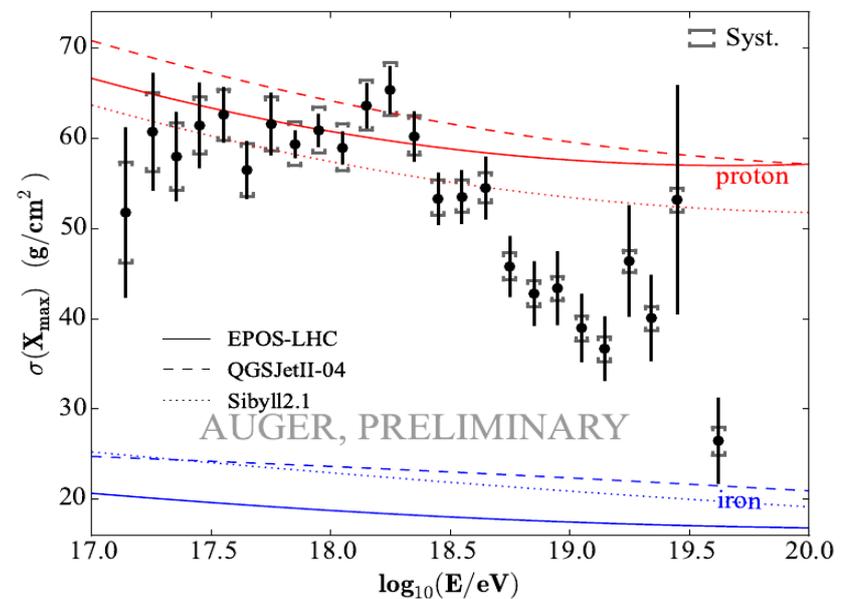
# Misura di Composizione Chimica



Average of  $X_{\text{max}}$

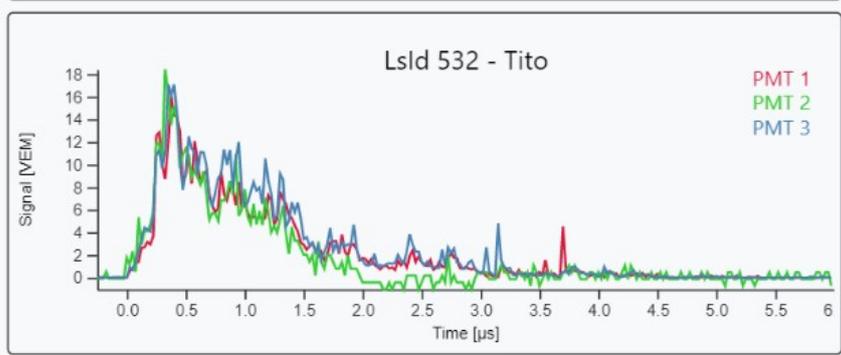


Std. Deviation of  $X_{\text{max}}$

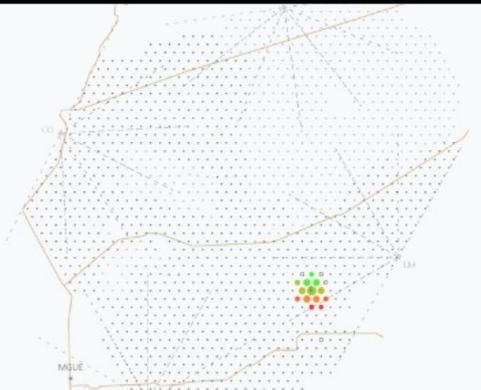
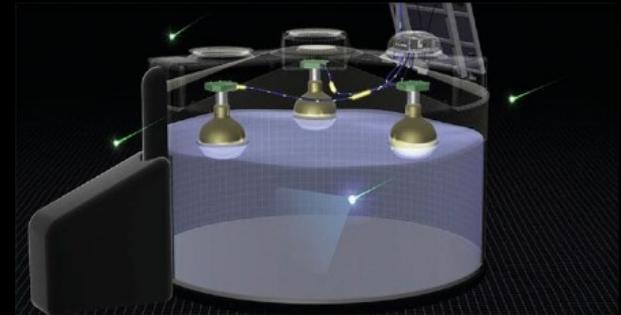


# L'Osservatorio Pierre Auger

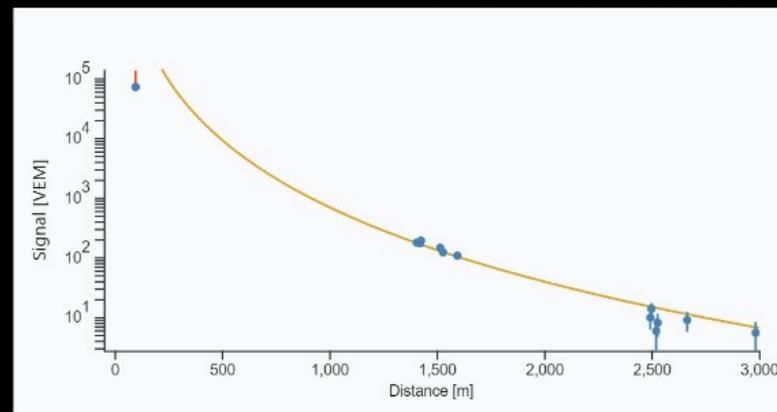
## SD (Surface Detector) : come funziona?



Segnali dei PMT



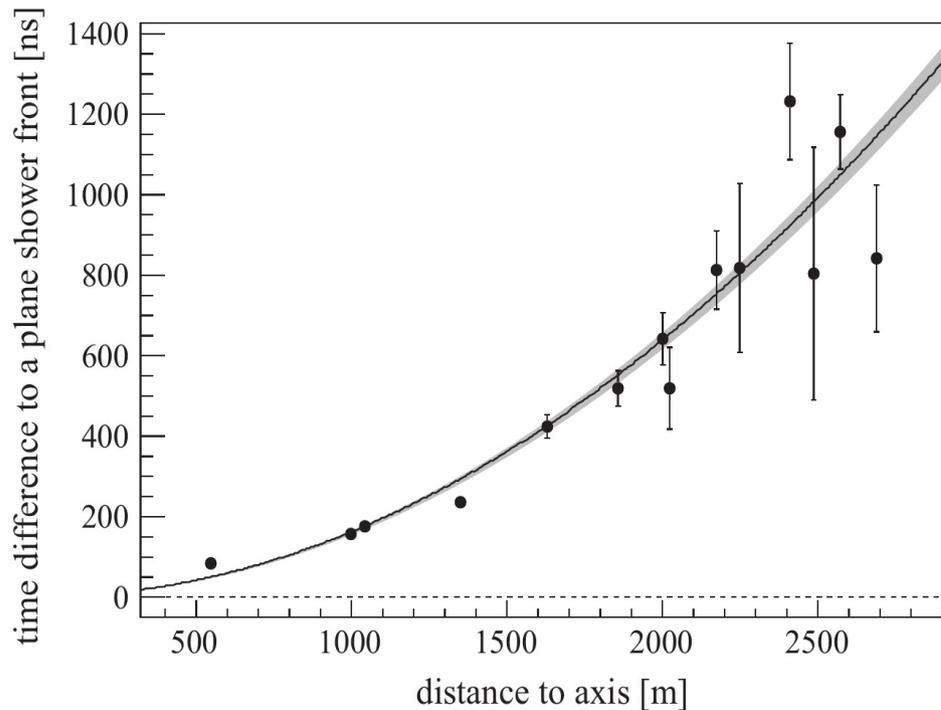
Traccia dello sciame a terra



Distribuzione laterale

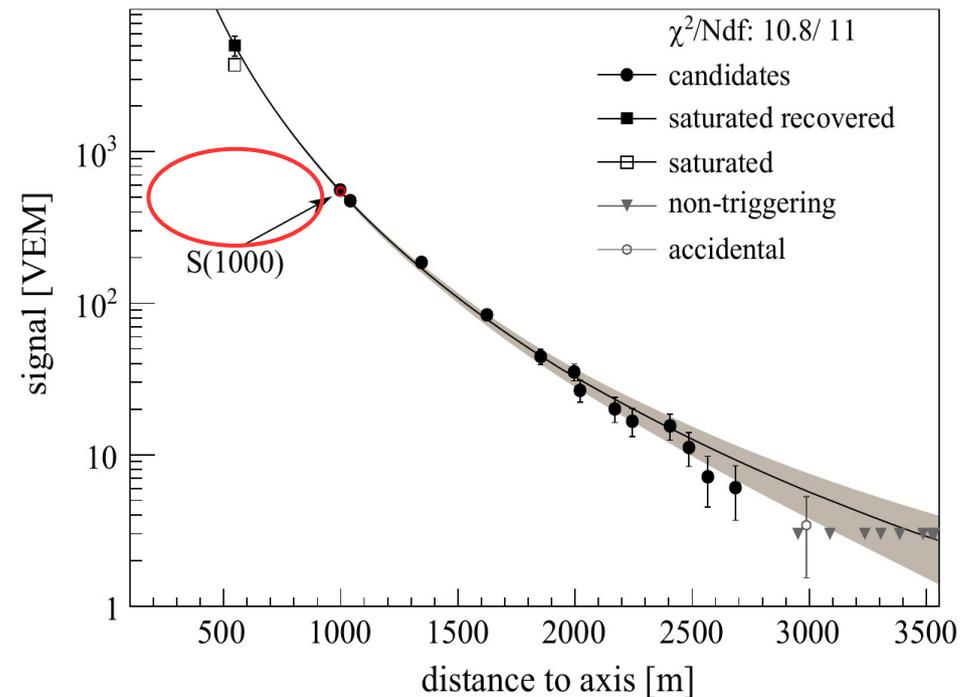
# Profilo Trasversale

Informazioni su direzione di arrivo del primario cosmico



La distribuzione temporale di rivelazione permette di ricostruire l'asse dello sciame (**direzione** di arrivo del primario!)

Informazioni su energia primario



La stima dell'**energia** ottenuta col rivelatore di superficie é indiretta, ovvero dipende dai modelli di interazione adronica che sono estrapolati dalle misure ottenute ad LHC ad energie molto piu' basse.

# Arrival directions above 32 EeV

Pierre Auger Collab. The Astrophys. J. 935 (2022)170

## Search for localized excesses

not specifying a priori the targeted regions of the sky

### Approach

- ▶ Investigate binomial probability to measure the cumulative number of events (Nobs) given the expected on average from isotropic simulations (Nexp)
- ▶ Scan in energy threshold in [32; 80] EeV, step of 1 EeV
- ▶ Scan in top-hat search angle  $\Psi$  in [1°; 30°], steps of 1°

### Most significant local excess over whole observable sky

$$E_{\text{th}} \geq 41 \text{ EeV}, \Psi = 24^\circ$$

$$(\alpha, \delta) = (196.3^\circ, -46.6^\circ), (l, b) = (305.4^\circ, 16.2^\circ)$$

Nobs = 153 events, Nexp = 97.7 events from isotropy

**Local p-value  $3.7 \times 10^{-8}$ , Li&Ma significance =  $5.4\sigma$**

**Global p-value = 3%**

(after accounting the scan, penalty factor  $\sim O(10^5)$ )

The **dataset above 32 EeV is available for public use** with the code to reproduce the results ([here](#))

