

**Welcome to the**

**PIERRE  
AUGER**  
OBSERVATORY

**Masterclasses**

# L'Esperimento Pierre Auger

rivelazione e studio dei raggi cosmici  
di altissima energia (UHECR)



**Prof. Laura Valore**  
Università di Napoli Federico II  
INFN Sezione di Napoli  
24 Marzo 2023

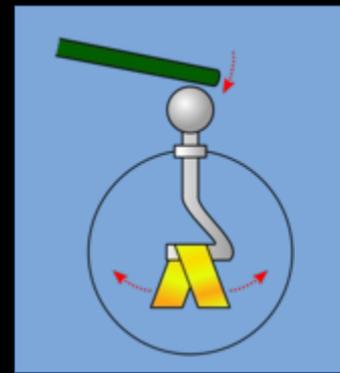


# Cosa sono i raggi cosmici?

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



# 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. Scoprì che diminuivano rispetto a quelle misurate in superficie, contraddicendo in questo modo l'ipotesi di una loro possibile origine terrestre!



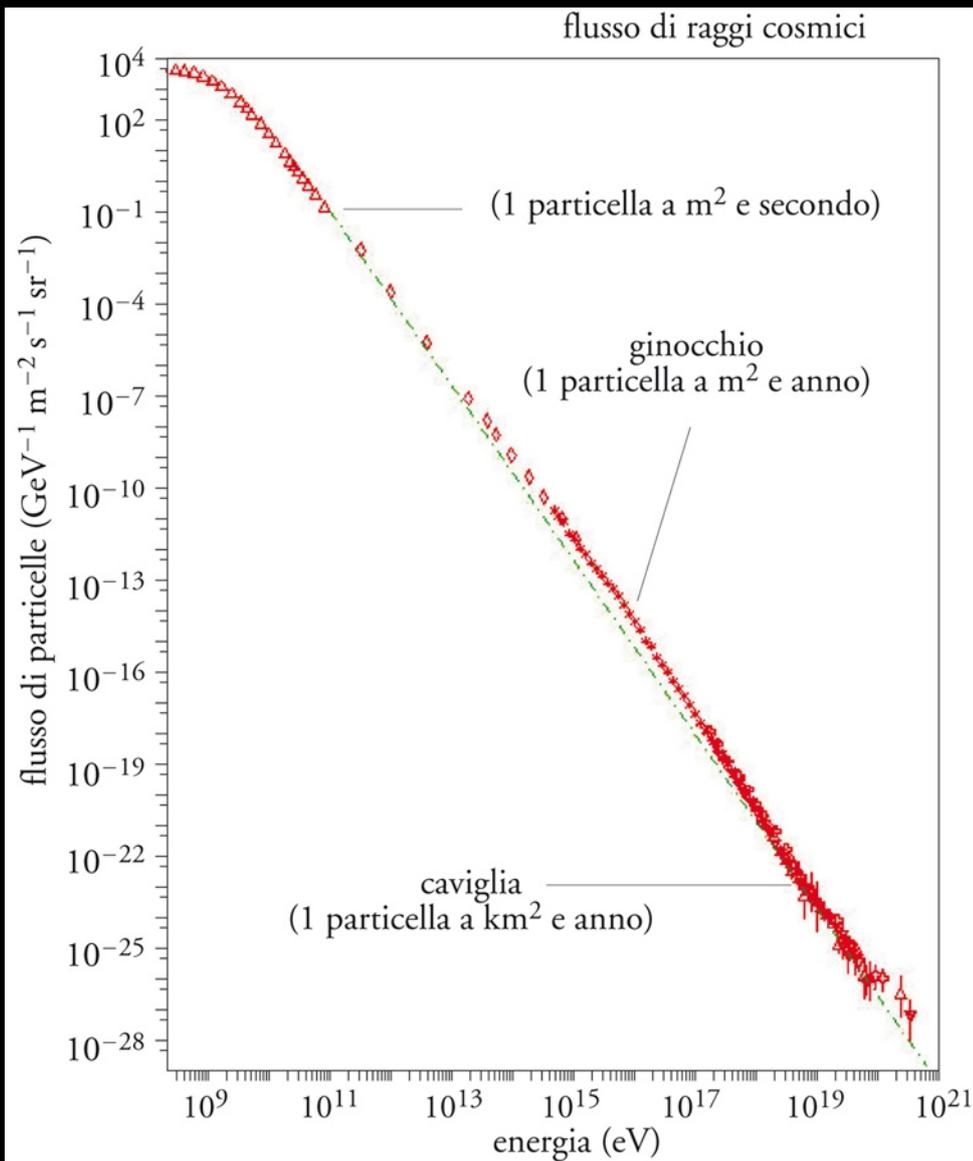
La conferma definitiva dell'origine extra-terrestre della radiazione ionizzante venne qualche anno dopo dall'austriaco Victor Hess, che per questa scoperta vinse il Premio Nobel nel 1936.

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

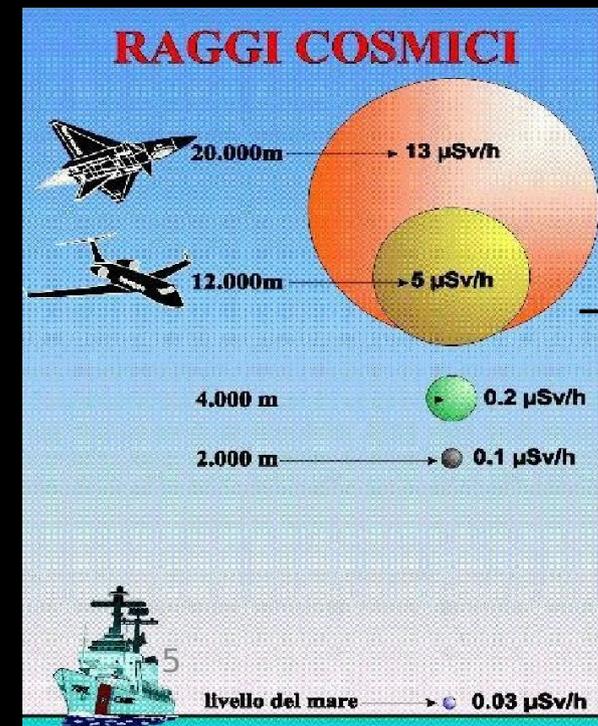
Si è così capito che la radiazione proveniva dallo spazio!

# Lo spettro energetico dei raggi cosmici

## 32 decadi in flusso di particelle su 11 decadi 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.



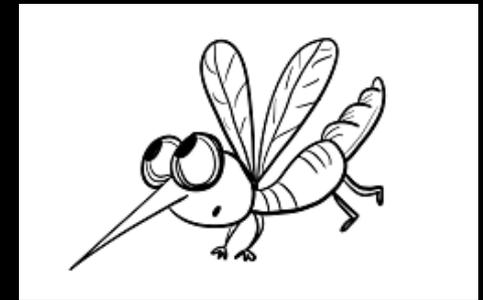
# Energie

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



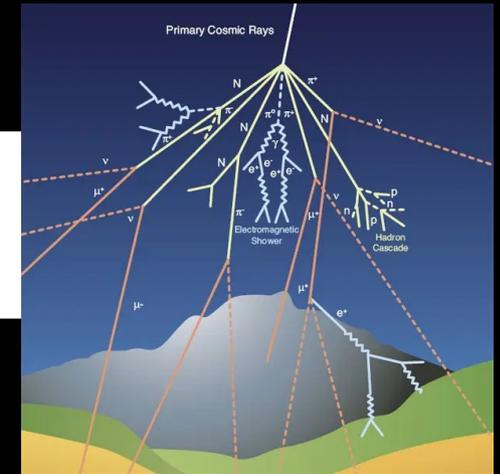
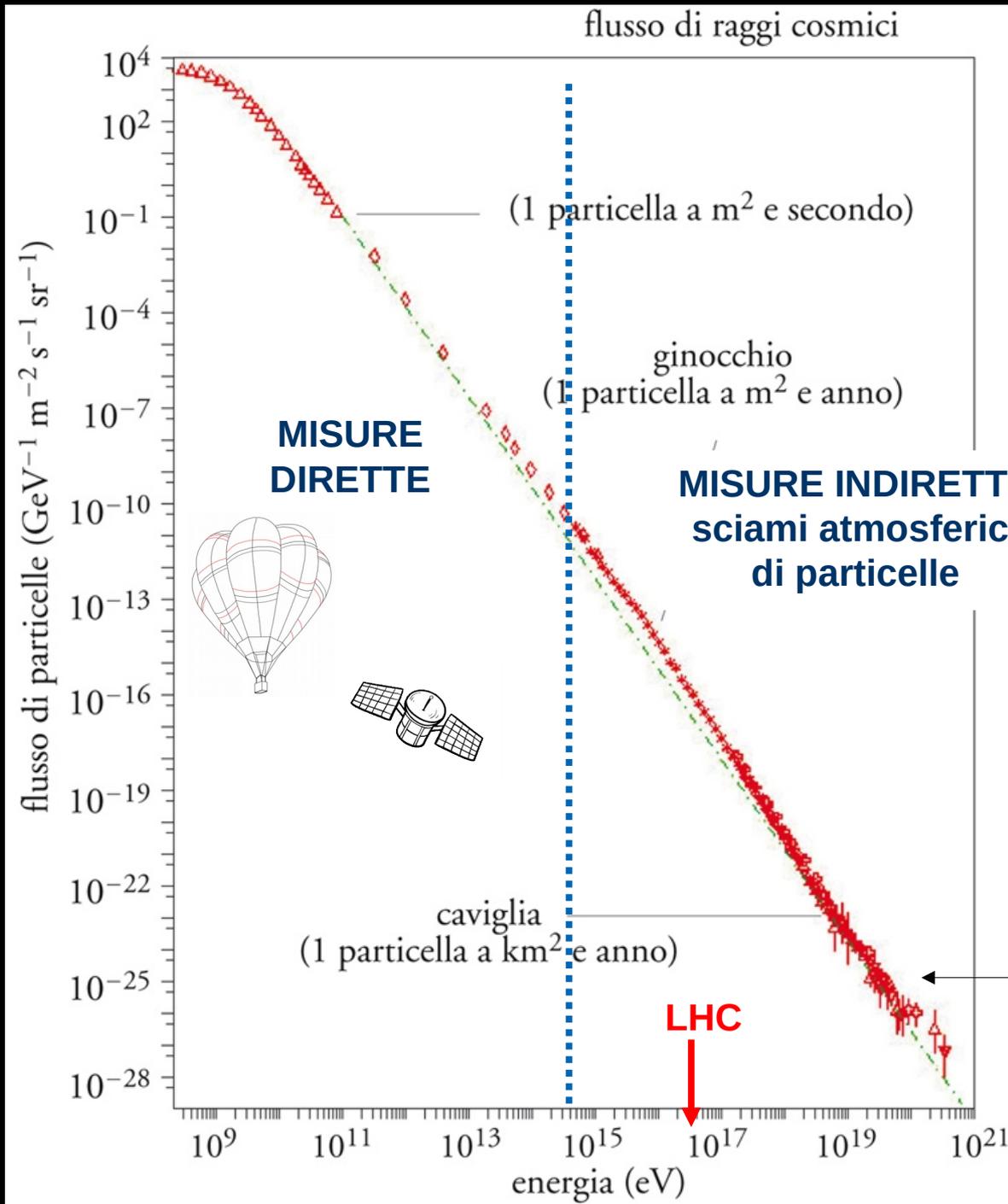
1 EeV =  $6 \times 10^{18}$  eV = 1 Joule:  
energia cinetica di una massa da  
100 g che cade da 1 m



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



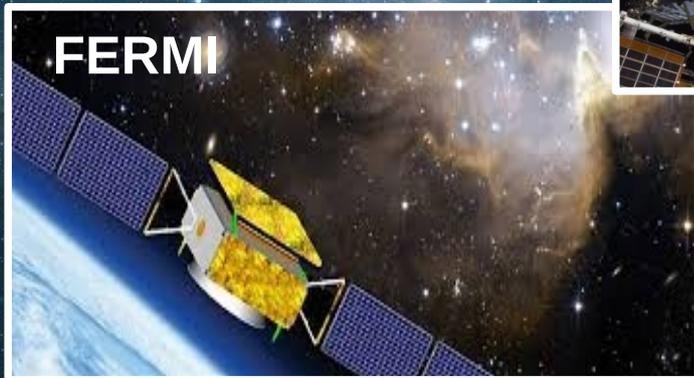
# Come riveliamo e studiamo i raggi cosmici



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

# Le misure dirette

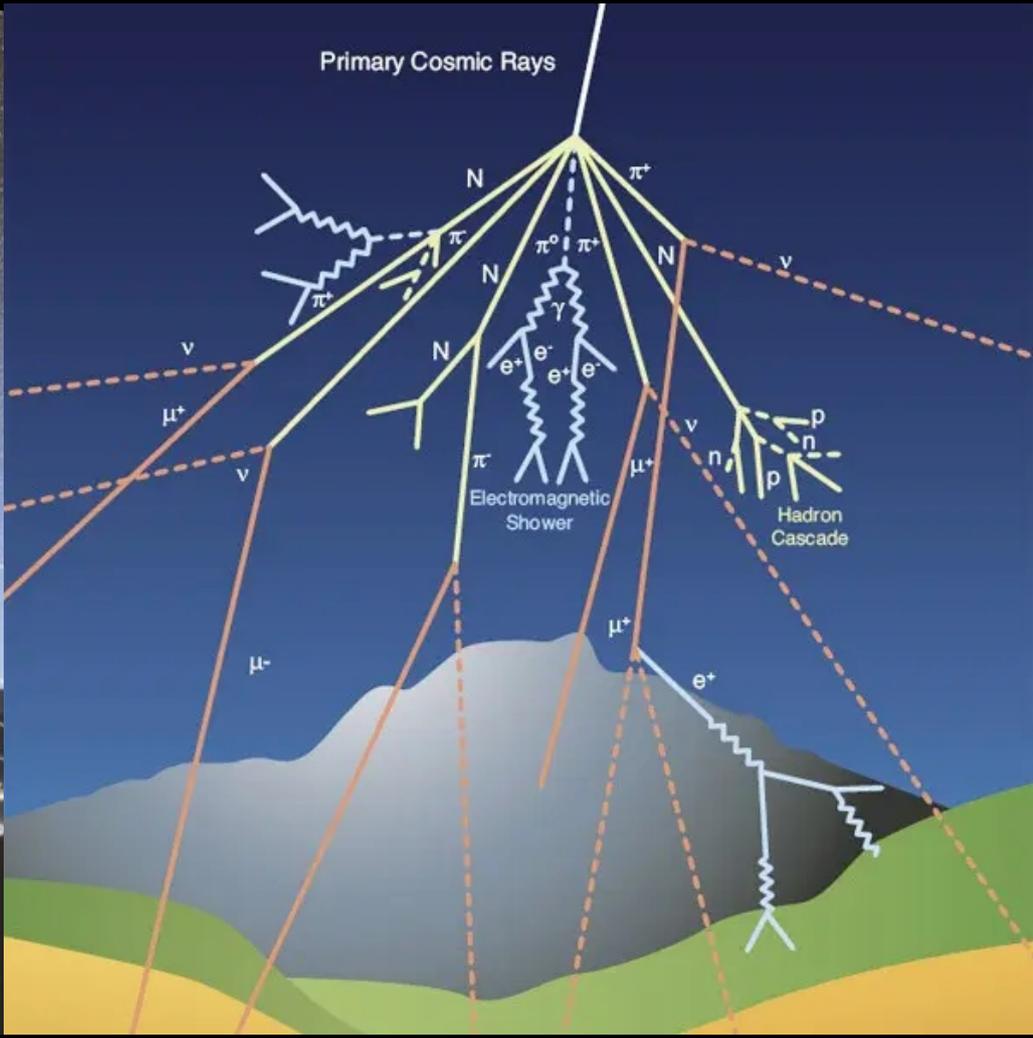
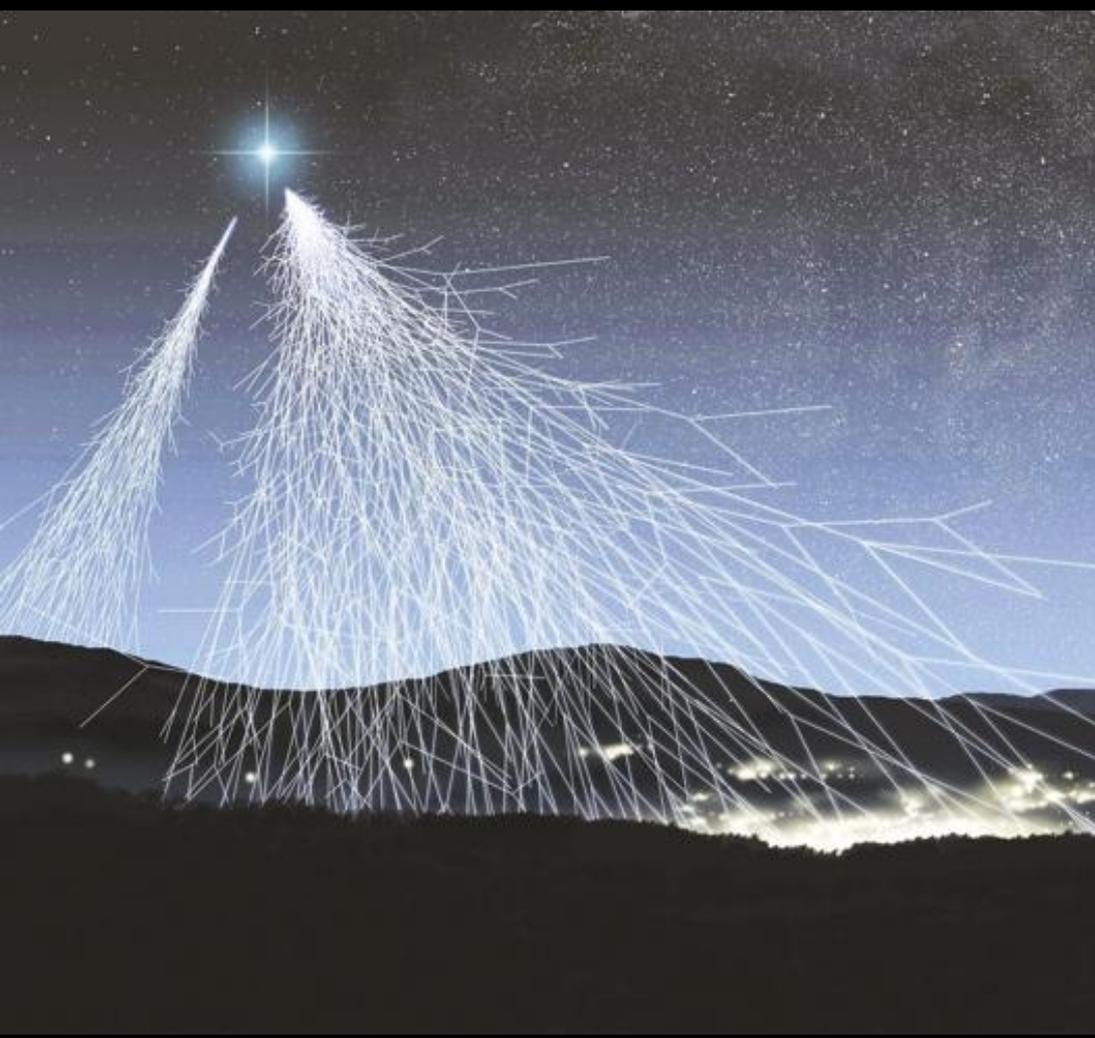
Fino a 10 TeV il flusso di raggi cosmici é abbastanza alto da permettere la misura diretta dallo spazio!



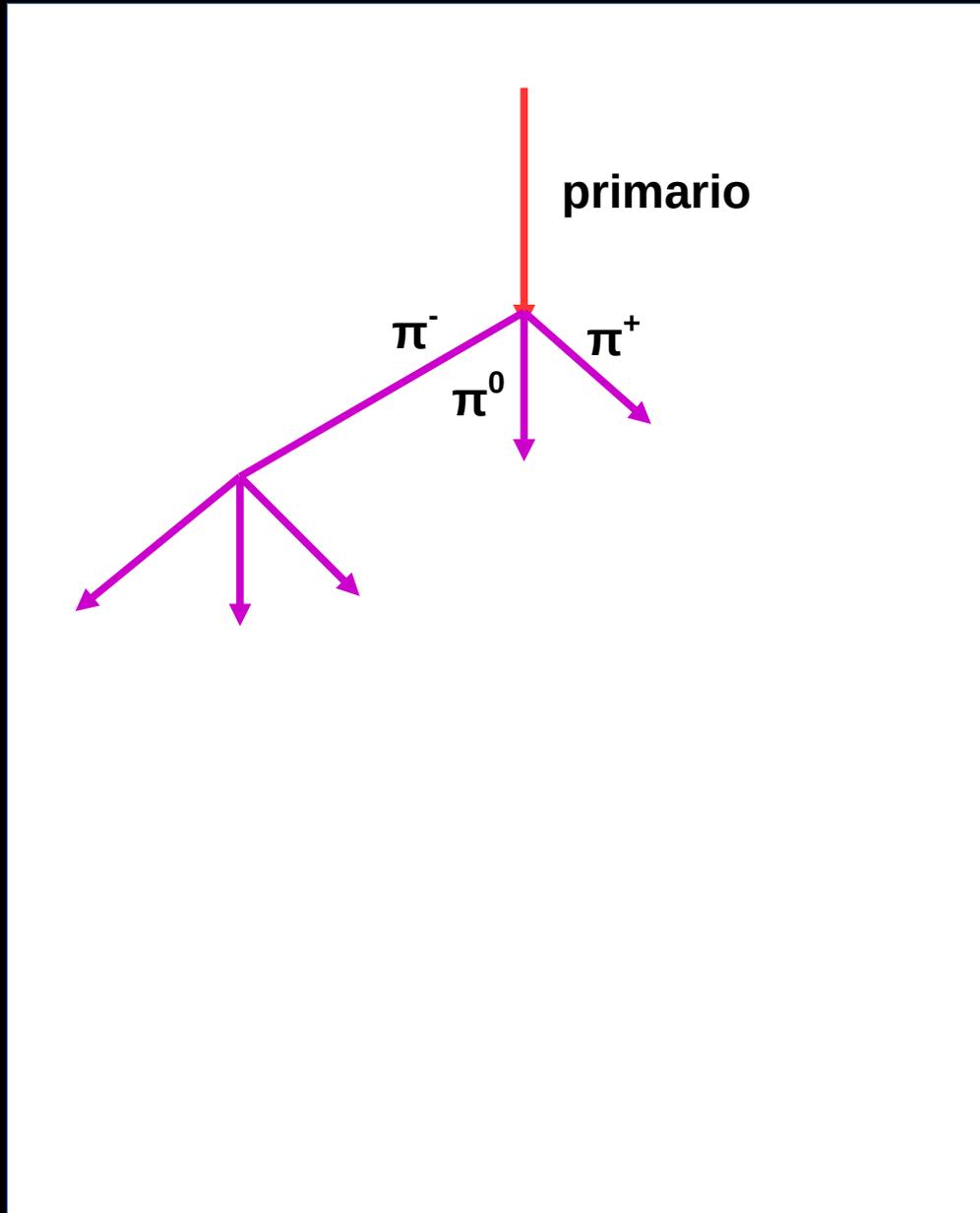
# Le misure indirette - sciami atmosferici estesi

Oltre i 10 TeV il flusso di raggi cosmici diventa troppo basso, per rivelarli 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.

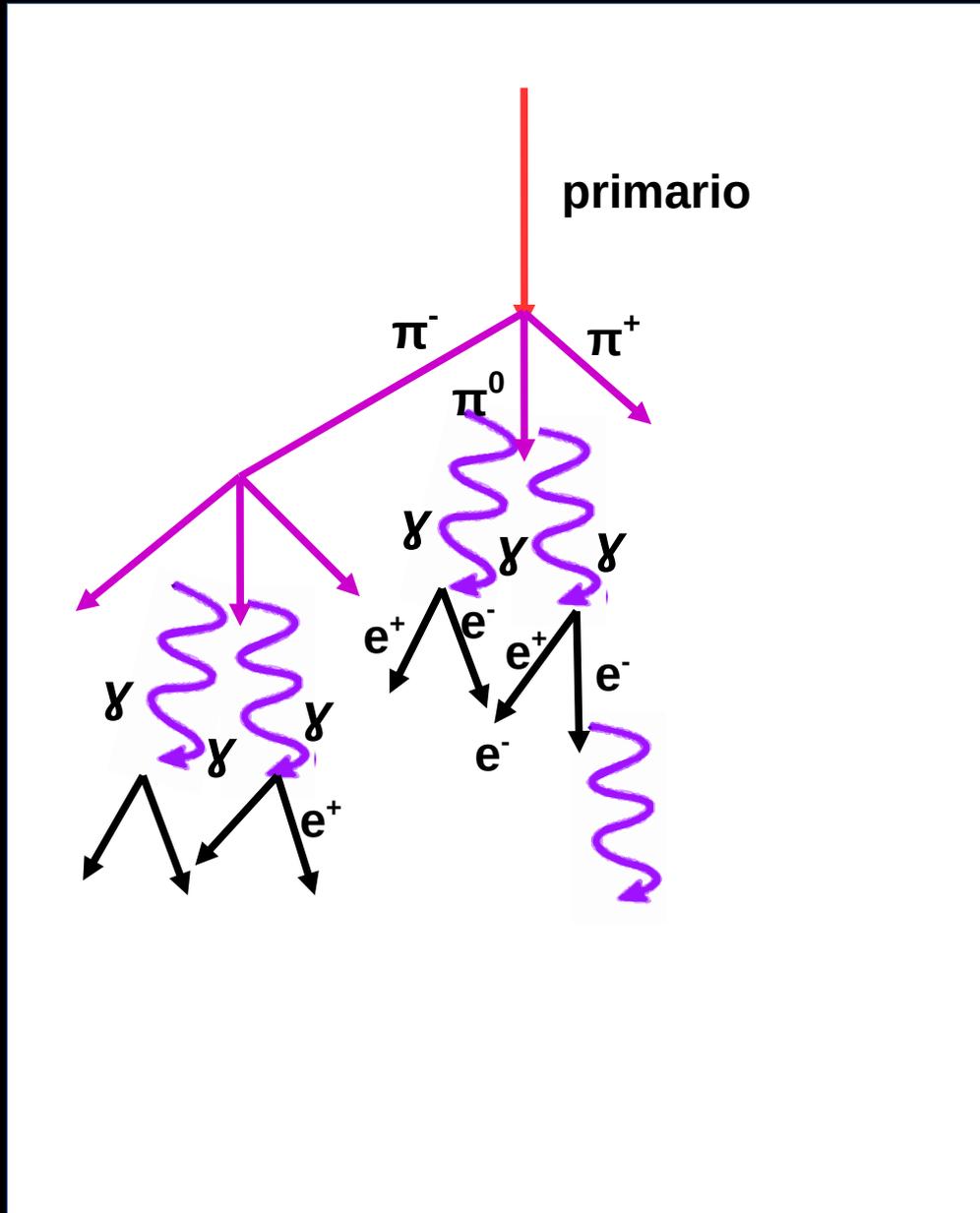


# Le particelle secondarie dello sciame



**COMPONENTE  
ADRONICA**  
prima ad estinguersi in  
atmosfera

# Le particelle secondarie dello sciame



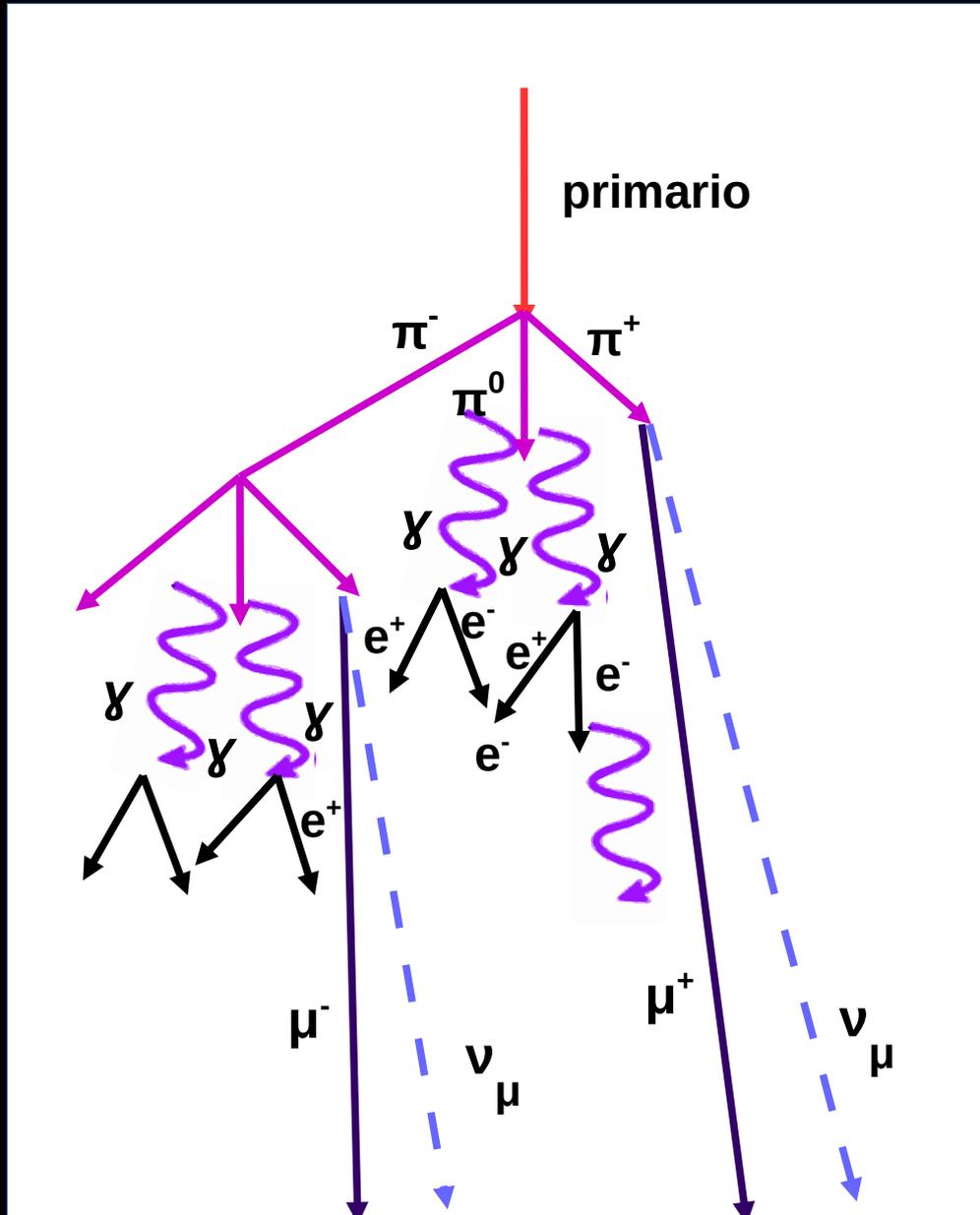
## COMPONENTE ADRONICA

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



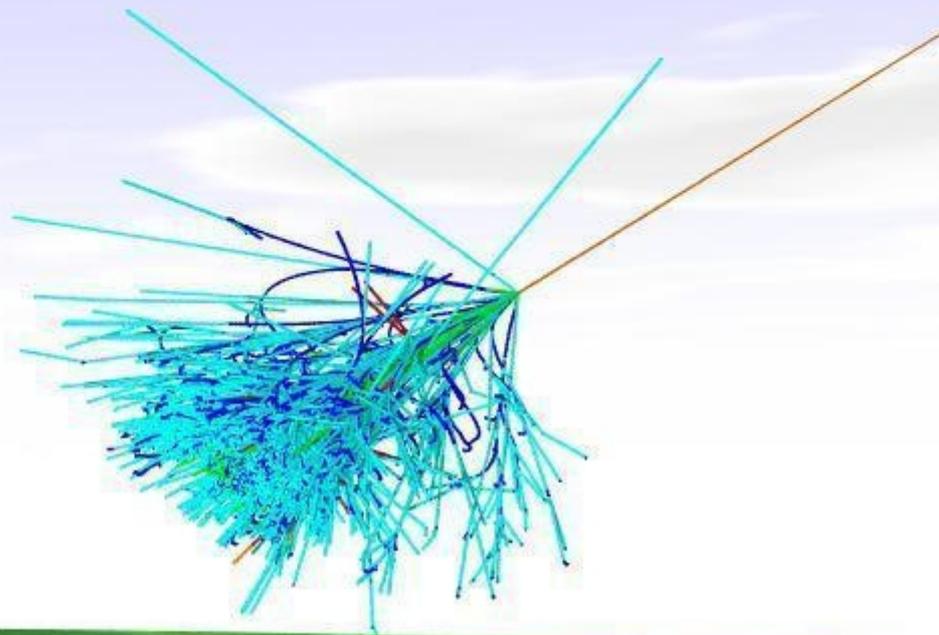
# o sviluppo degli sciami in atmosfera



# sviluppo degli sciami in atmosfera



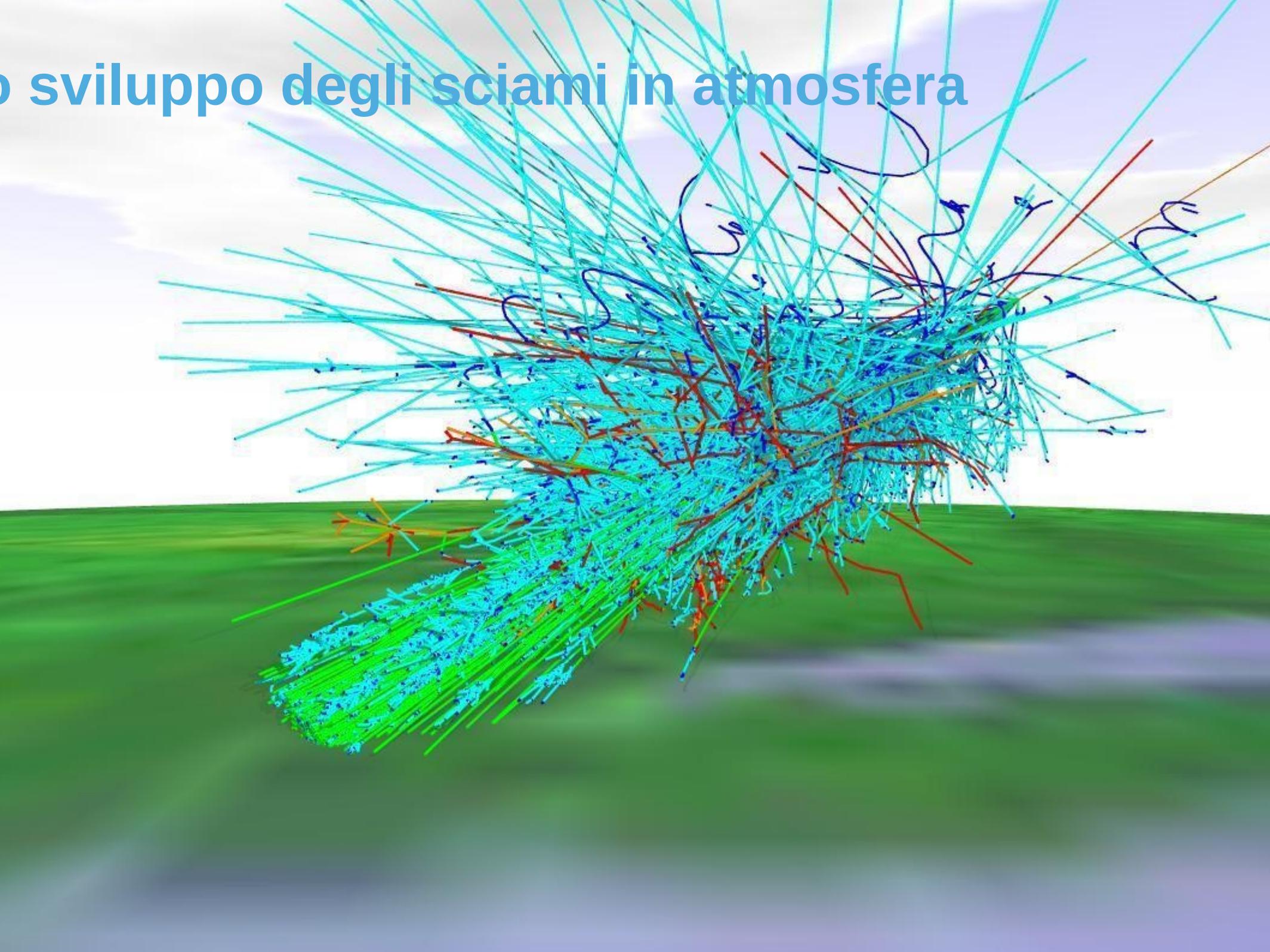
# sviluppo degli sciami in atmosfera



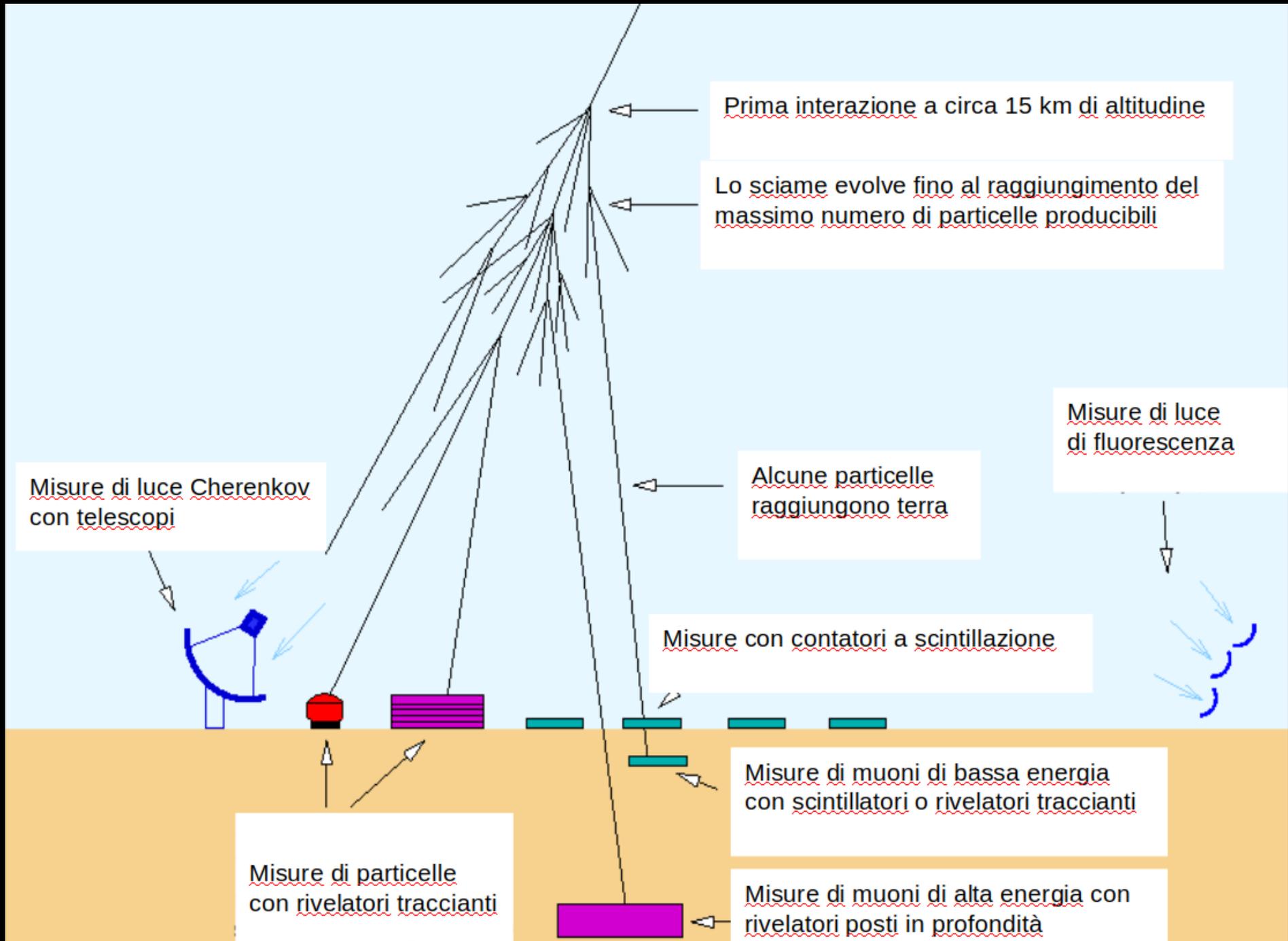
# sviluppo degli sciami in atmosfera



o sviluppo degli sciami in atmosfera



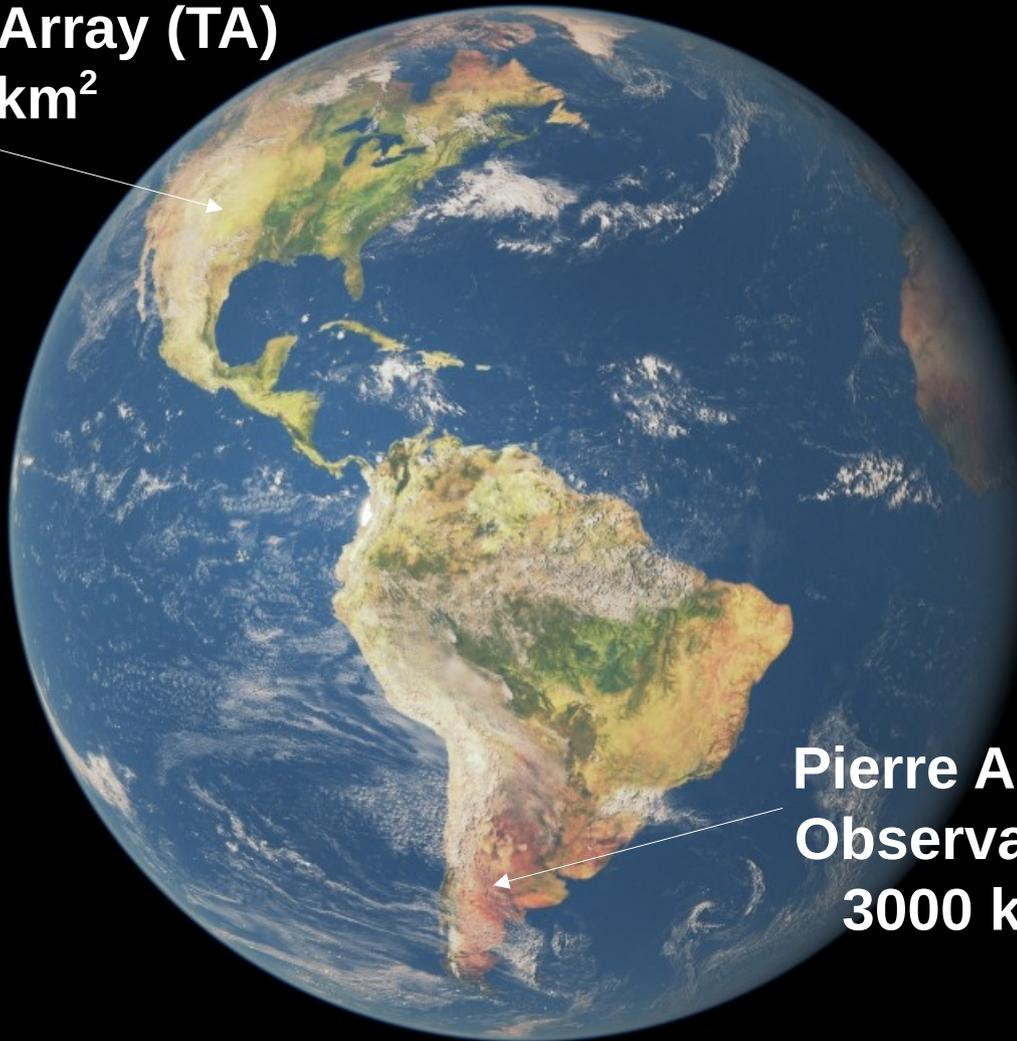
# Metodi di rivelazione indiretta dei raggi cosmici



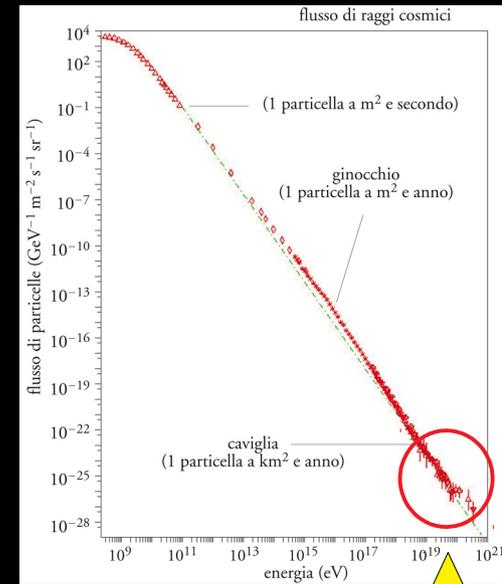
# I principali esperimenti per la misura indiretta

Raggi cosmici di altissima energia  $\rightarrow$  UHECR  $\rightarrow$   $E > 10^{18}$  eV

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



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



# I principali esperimenti per la misura indiretta

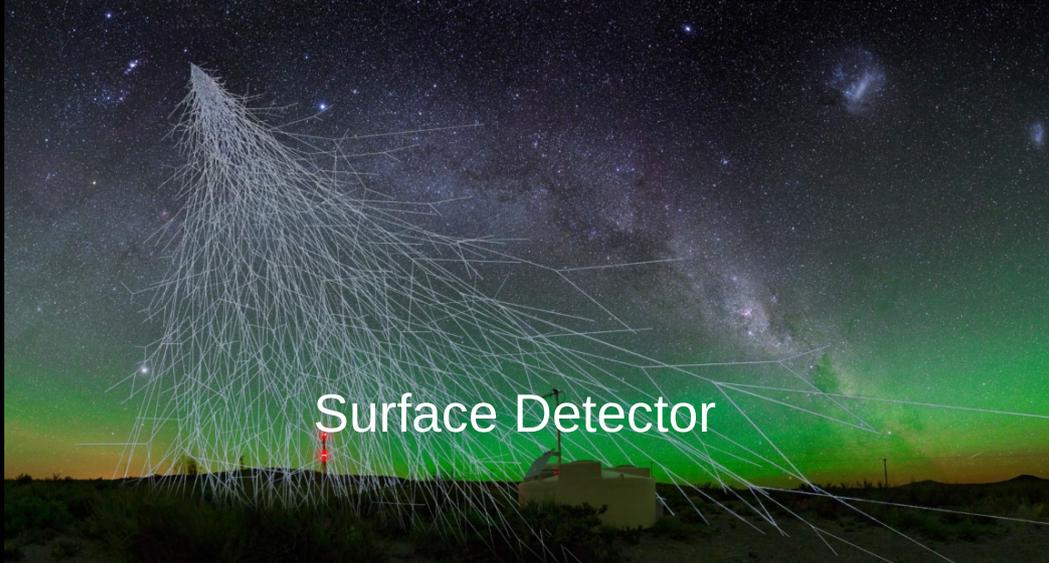
Raggi cosmici di altissima energia ( $E > 10^{18}$  eV)

L'Osservatorio Pierre Auger  
(Argentina)

Fluorescence Detector



Surface Detector

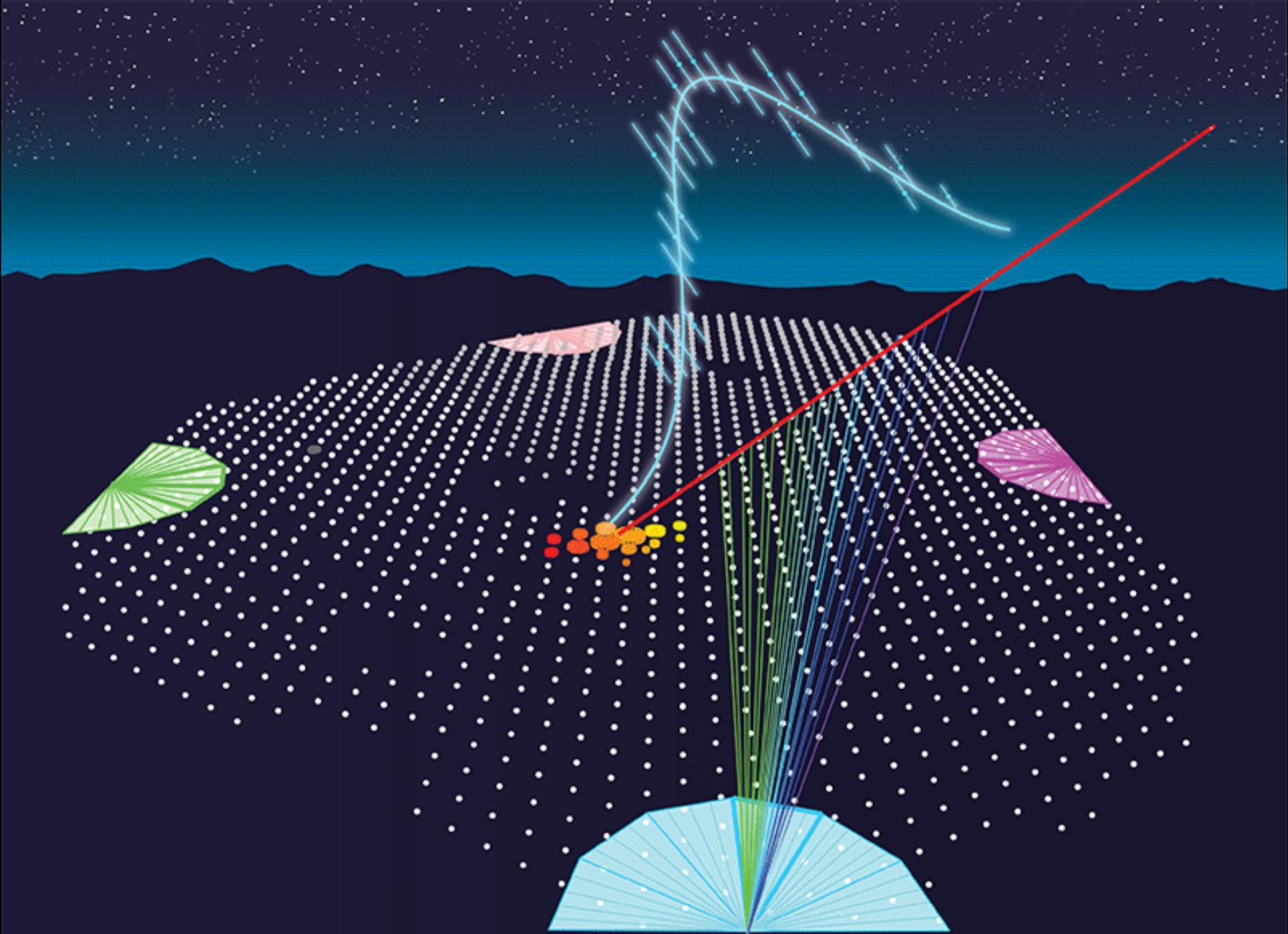


Telescope Array  
(Stati Uniti d'America)



# L'Osservatorio Pierre Auger

## Raggi cosmici di altissima energia (UHECR)

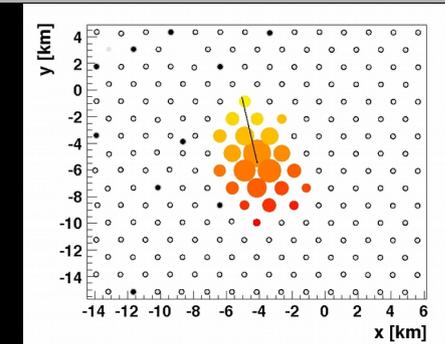
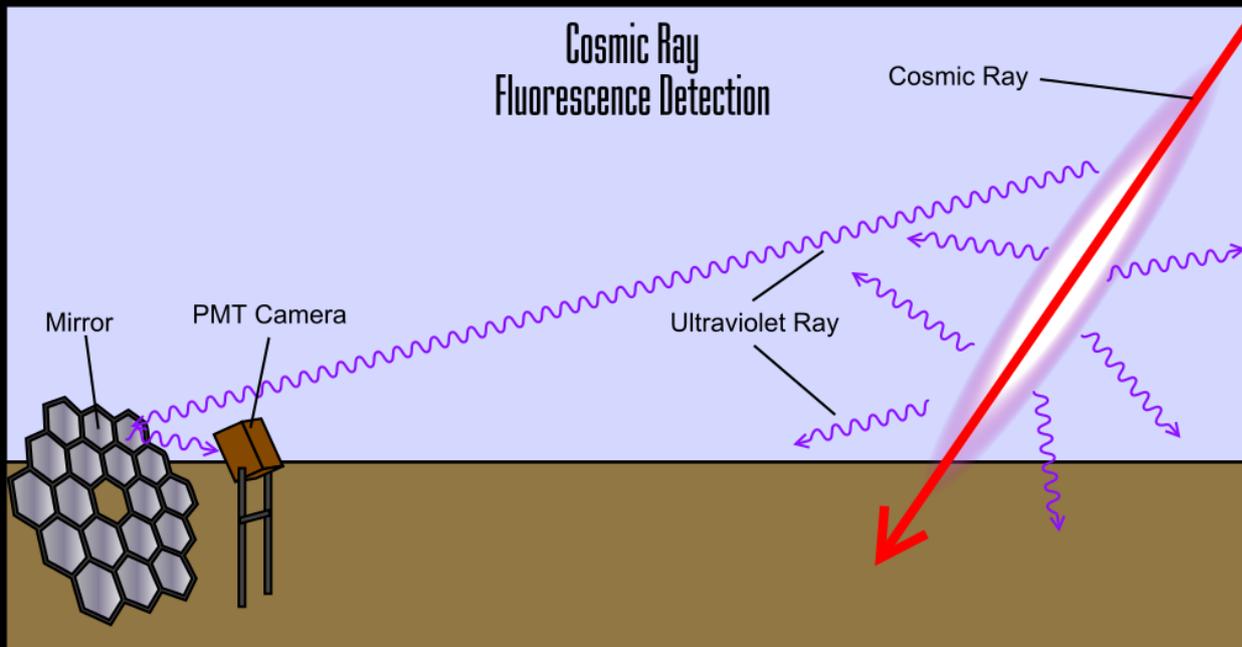
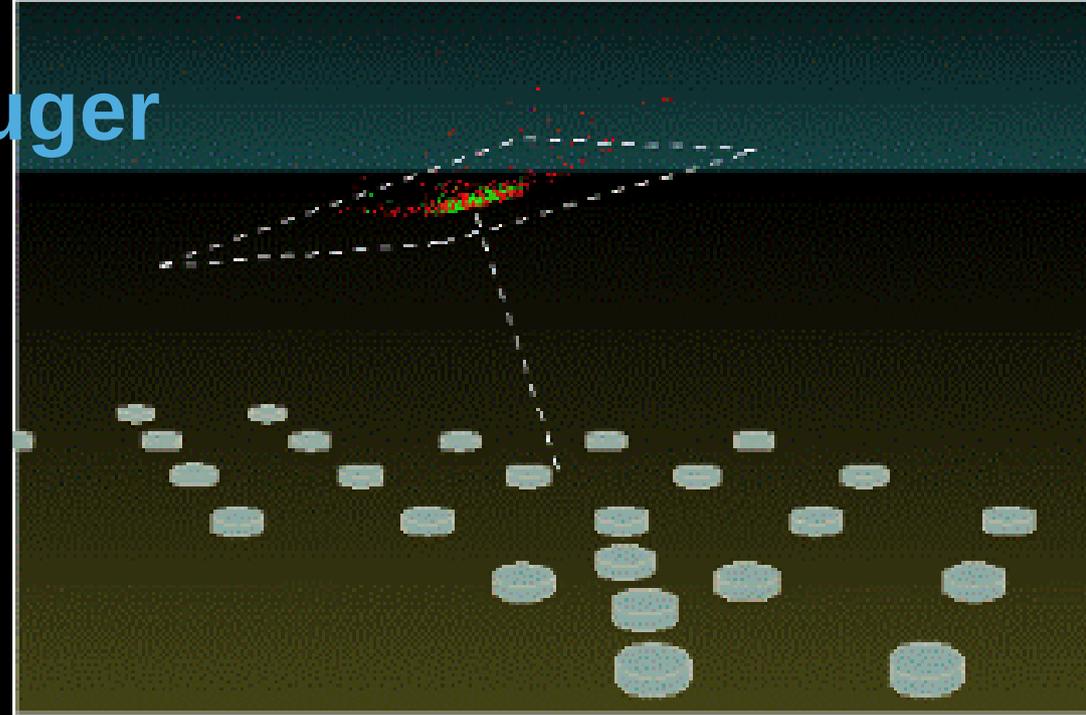


# L'Osservatorio Pierre Auger

## La tecnica di rivelazione ibrida

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



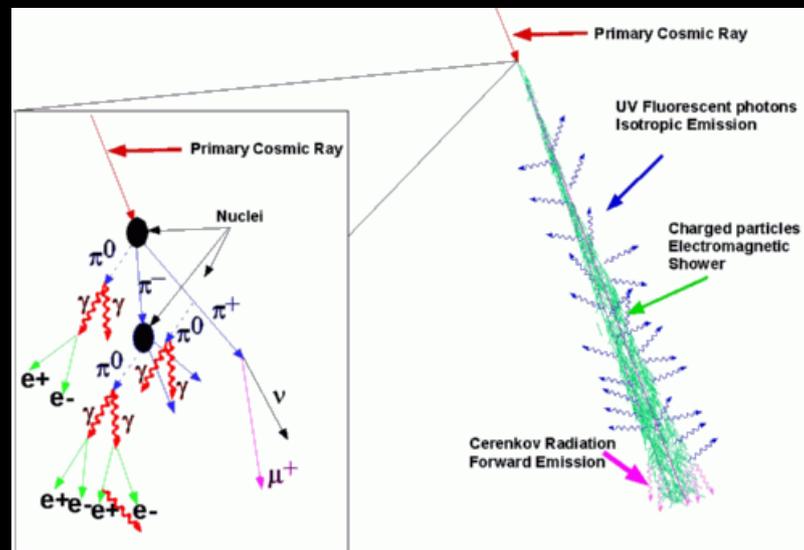
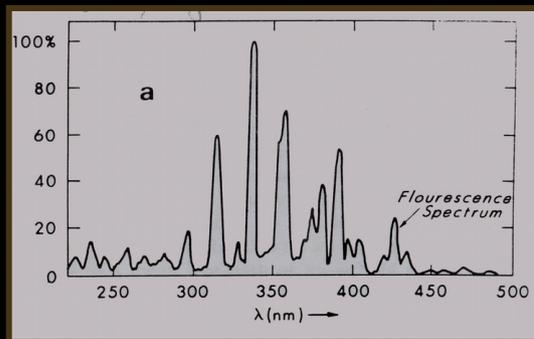
Il rivelatore di fluorescenza misura lo sviluppo in aria dello sciame, attraverso la rivelazione della luce prodotta durante lo sviluppo

# 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

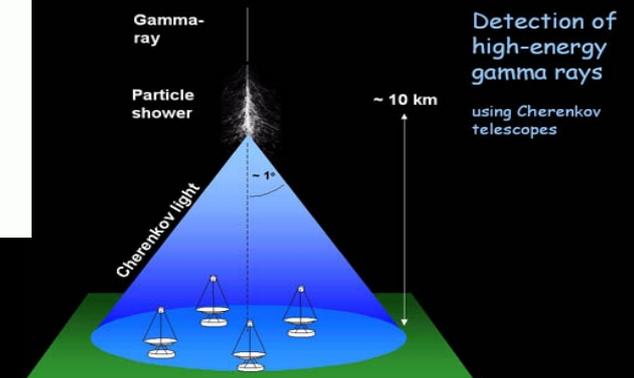
Emissione isotropa  
(uguale in tutte le direzioni!)



## Luce Cherenkov

Emessa dalle  
particelle cariche  
ultrarelativistiche  
dello sciame

Fortemente piccata in  
avanti!



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

# 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

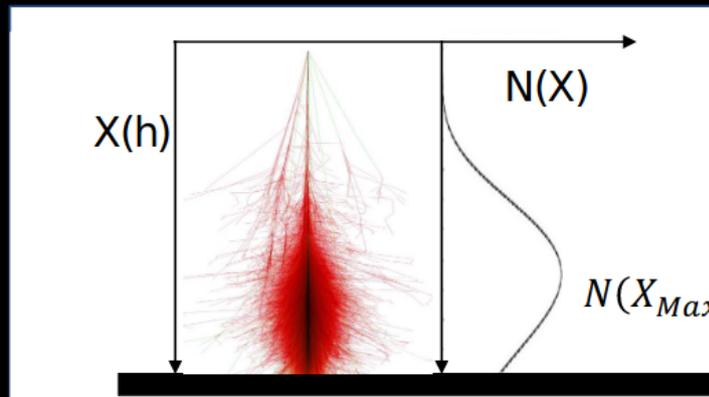
Come ricostruirne le caratteristiche?

### 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

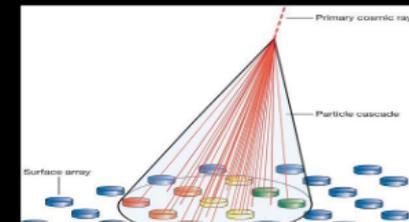
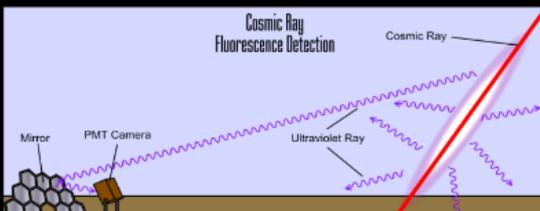
*$X_{max}$  dipende dalla massa del primario*



### Distribuzione laterale

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

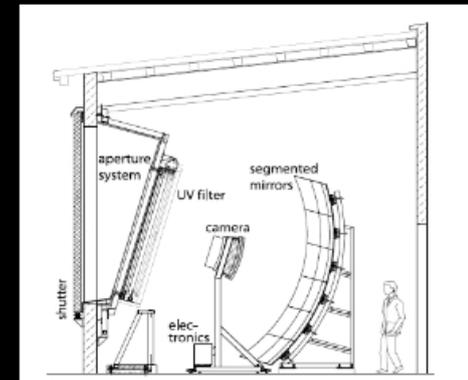
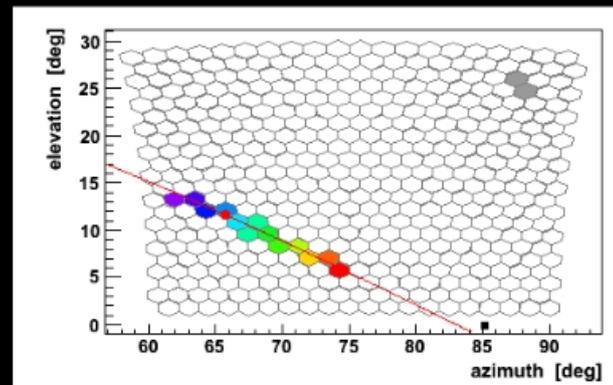
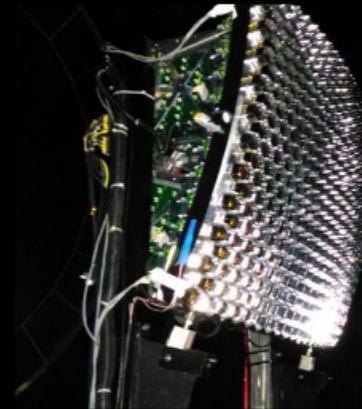
La distribuzione di particelle al suolo dipende dall'energia e dalla massa della particella che ha generato lo sciame



# *Il Rivelatore di Fluorescenza*



# Il Rivelatore di Fluorescenza



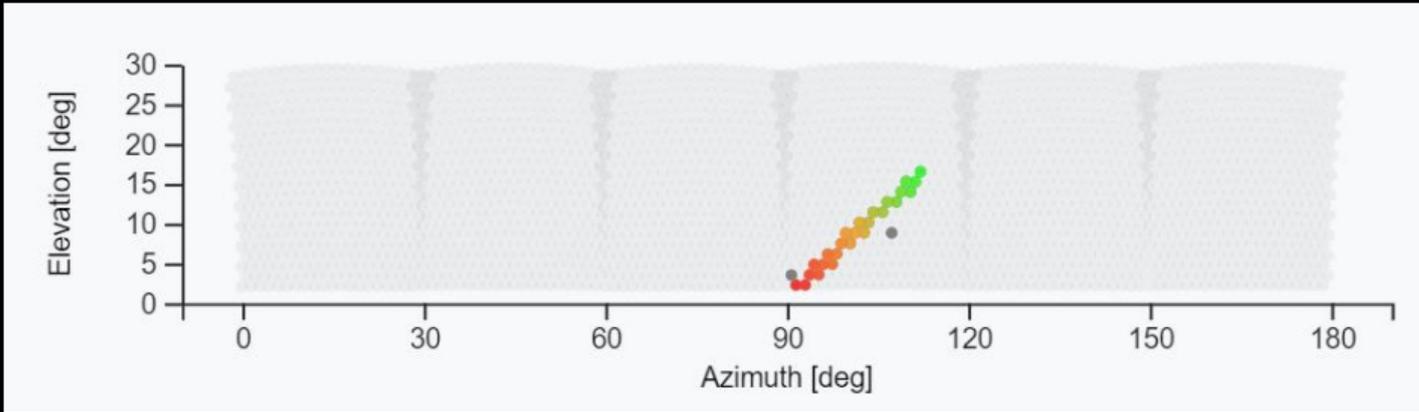
**27 telescopi  
posizionati in 4 siti ai lati del  
rivelatore di superficie**

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

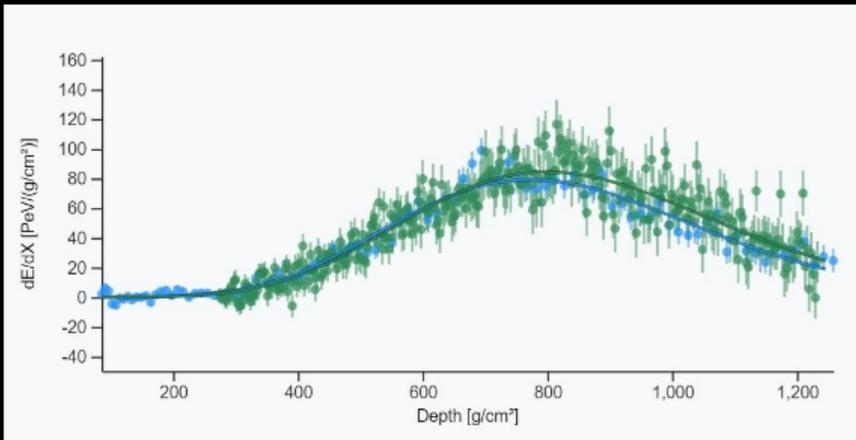
# L'Osservatorio Pierre Auger

## FD (Fluorescence Detector) : come funziona?

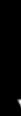
### Il Rivelatore di Fluorescenza



Traccia dello sciame in atmosfera

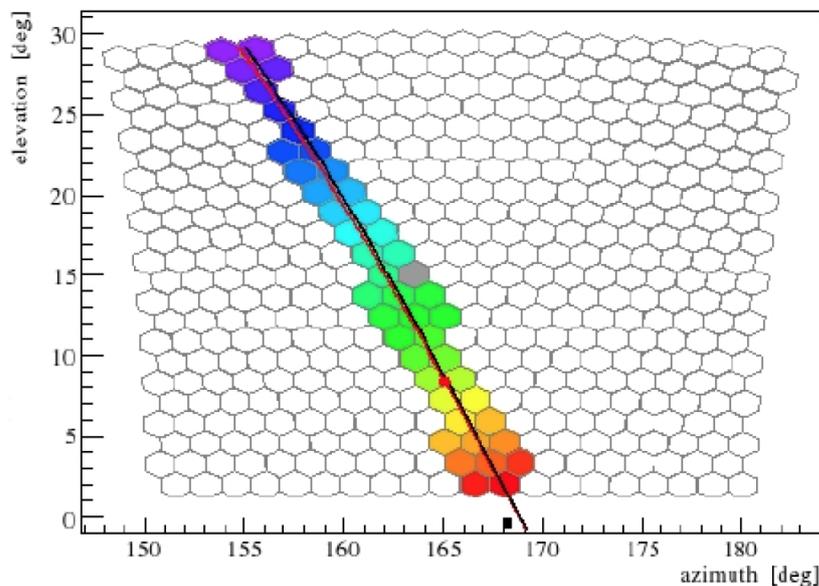


Energia depositata dallo sciame in atmosfera

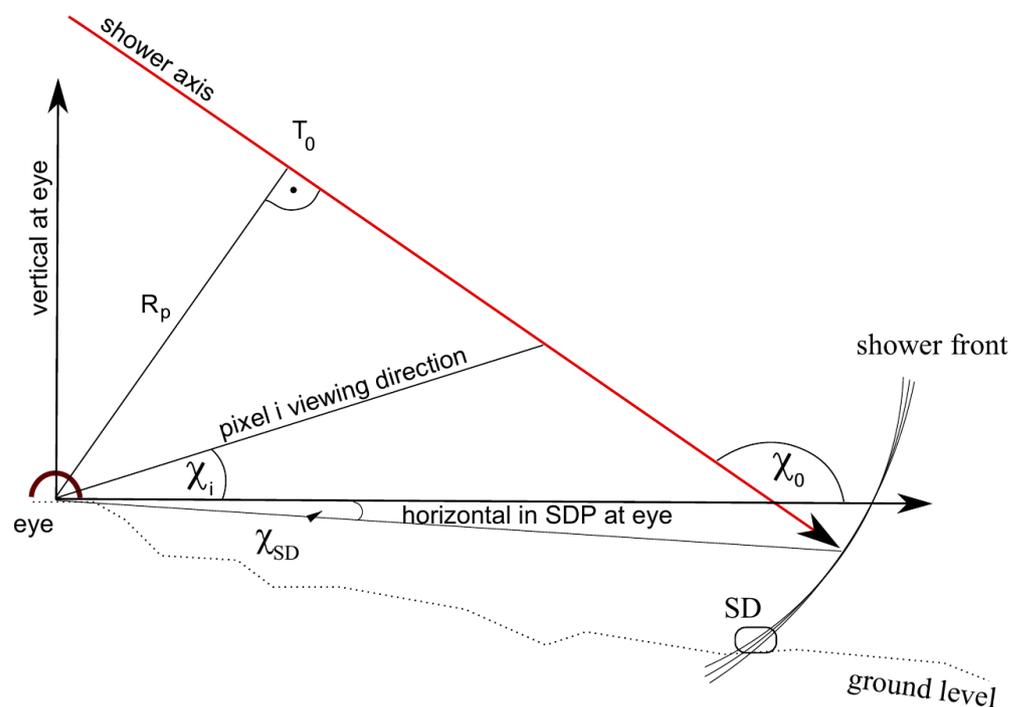


Energia, Xmax

# Ricostruzione Geometria dello Sciame



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



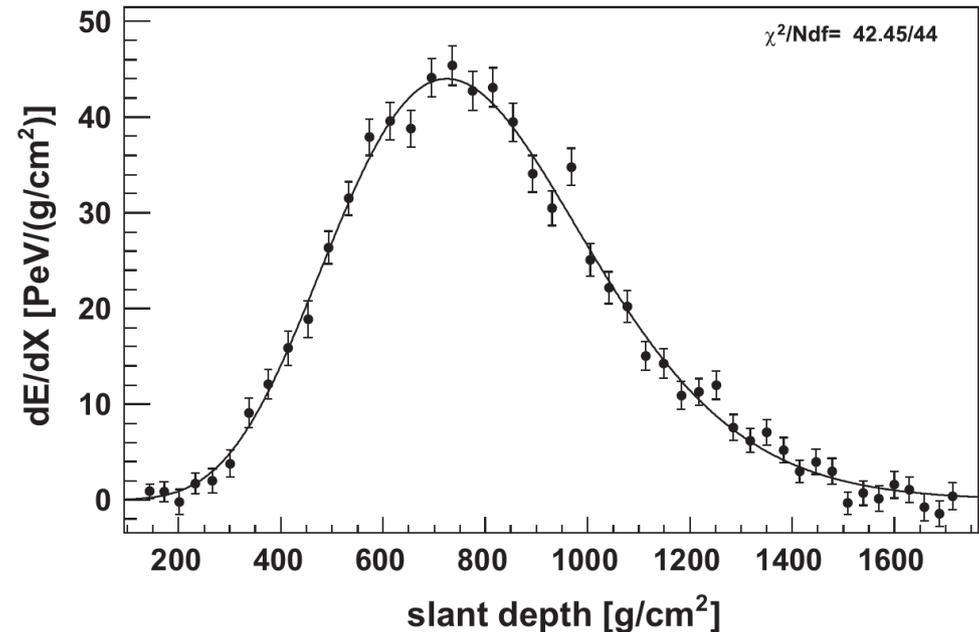
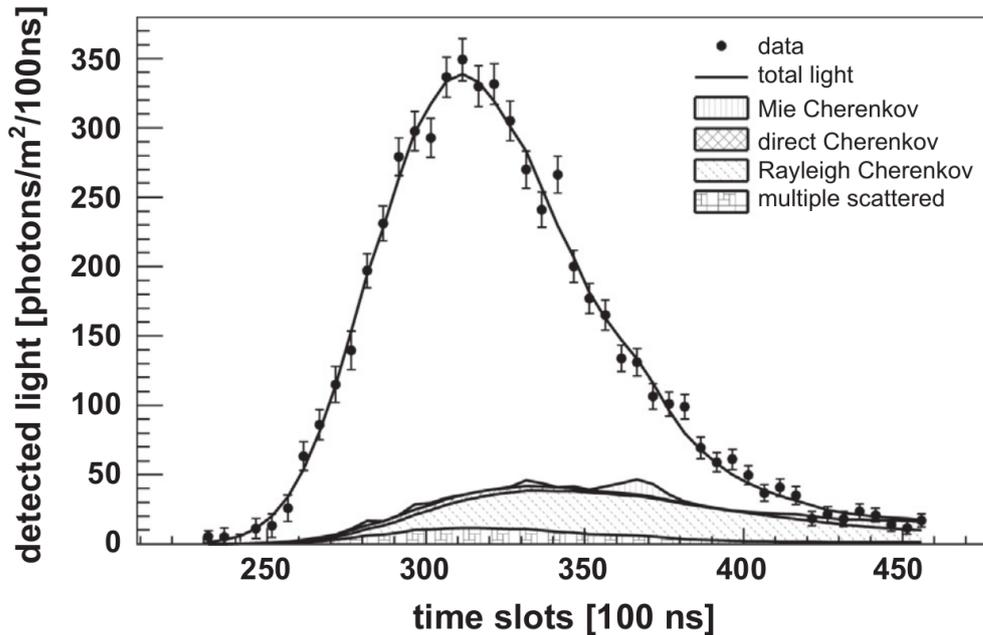
**SDP (Shower Detector Plane):**  
piano contenente l'asse dello sciame e il telescopio di fluorescenza.  
La proiezione di uno sciame sulla camera evolve lungo lo SDP  
→ in questo piano, conoscendo i tempi di arrivo del segnale in ciascun pixel, ricostruiamo l'asse dello sciame.

# Profilo Longitudinale e Misura di Energia

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

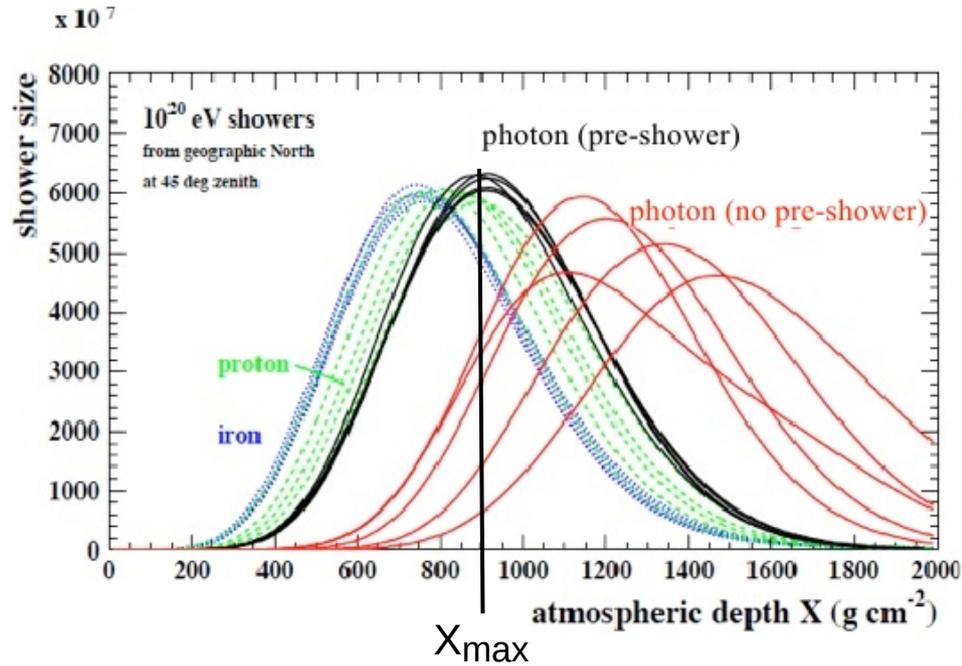


A energia depositata da uno  
sciame in funzione della  
profondità atmosferica.

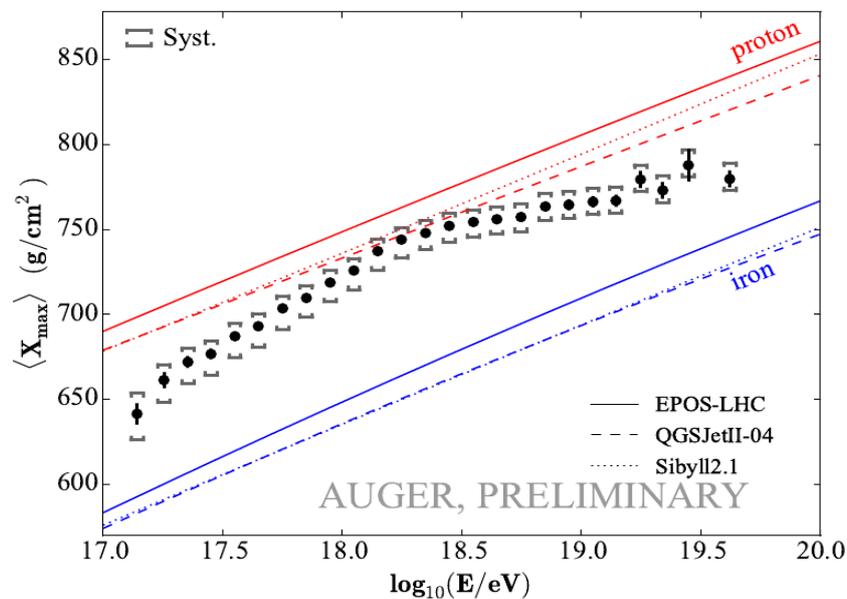


Dal fit di questo profilo, otteniamo  
l'energia del primario (misura diretta)

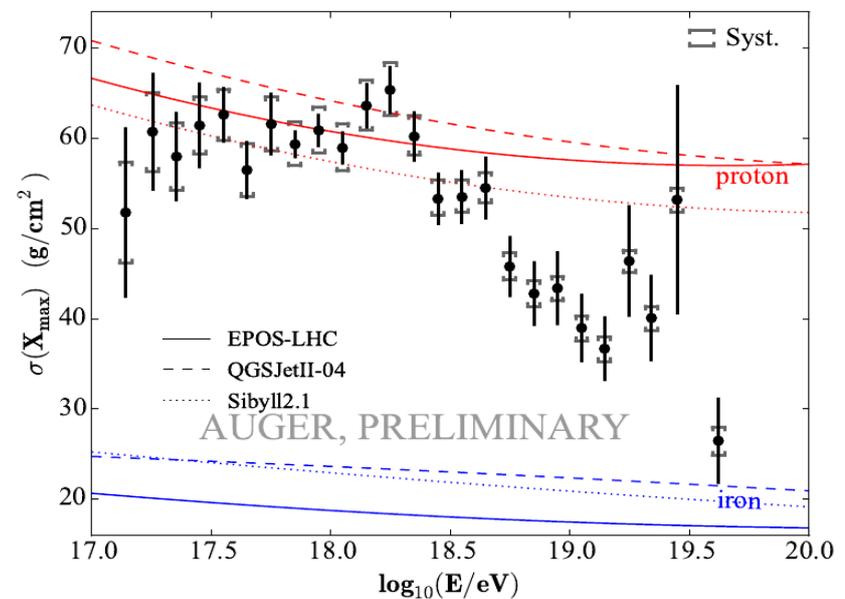
# Misura di Composizione Chimica



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



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



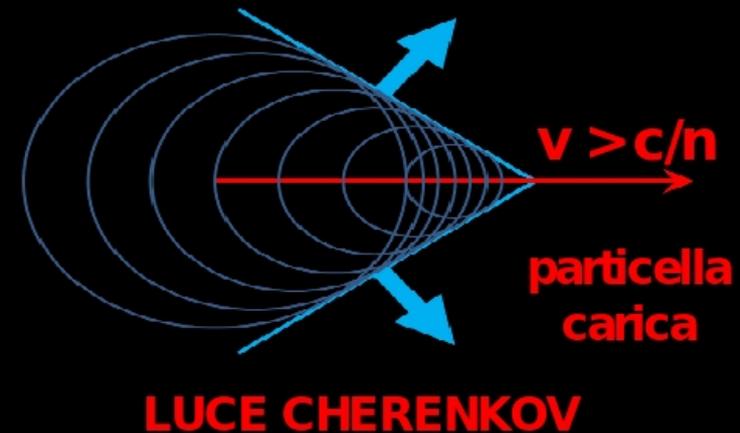
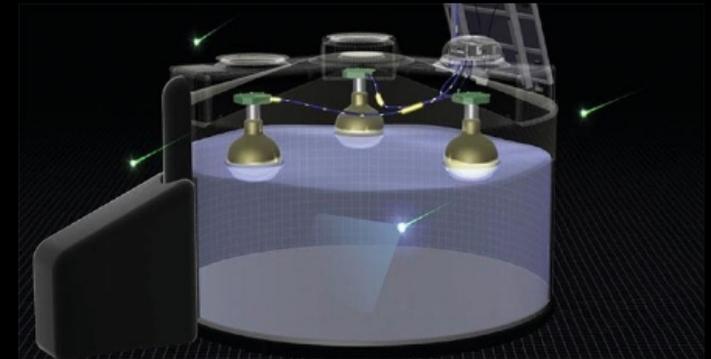
# *Il Rivelatore di Superficie*

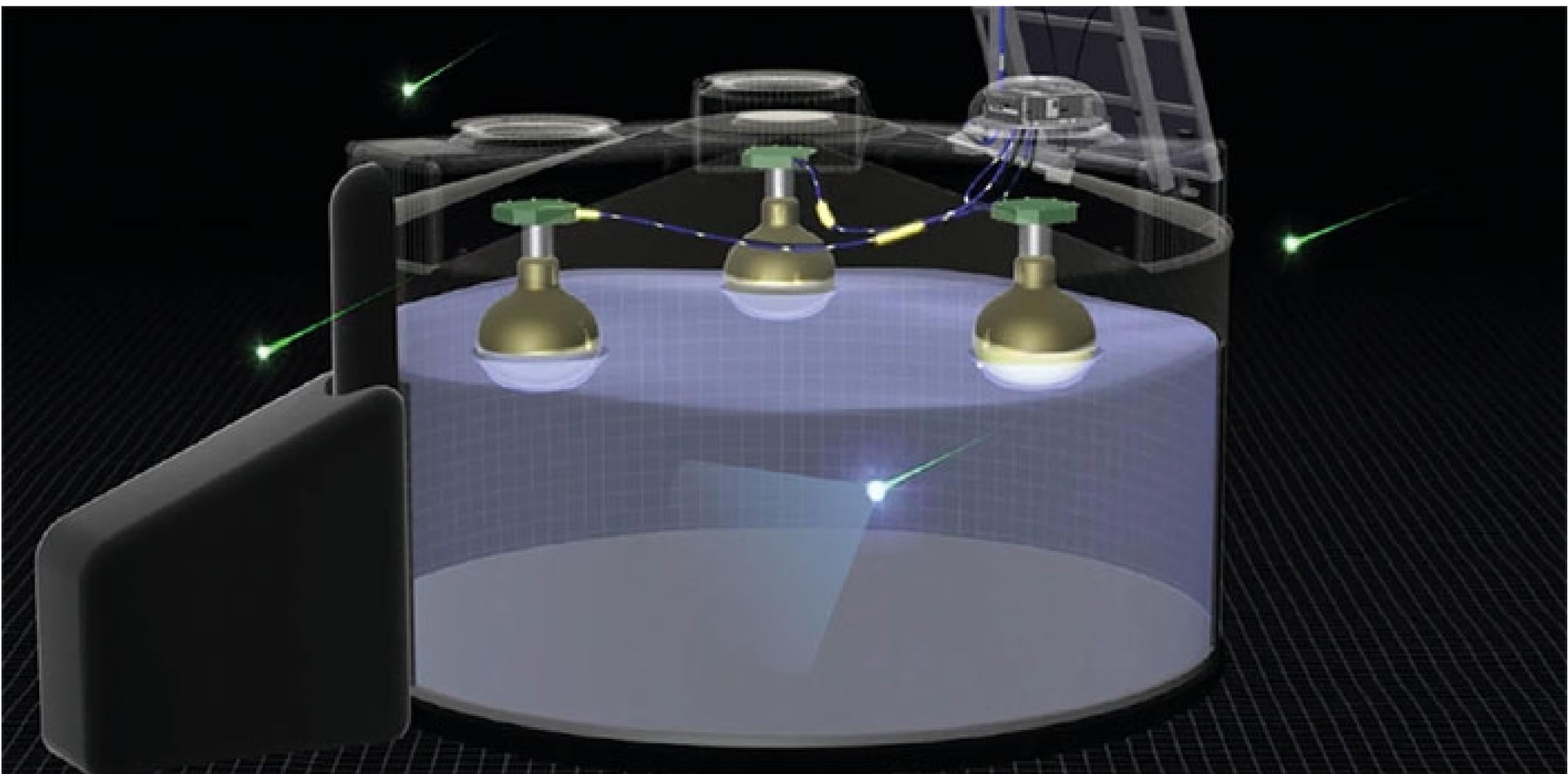


# Il Rivelatore di Superficie

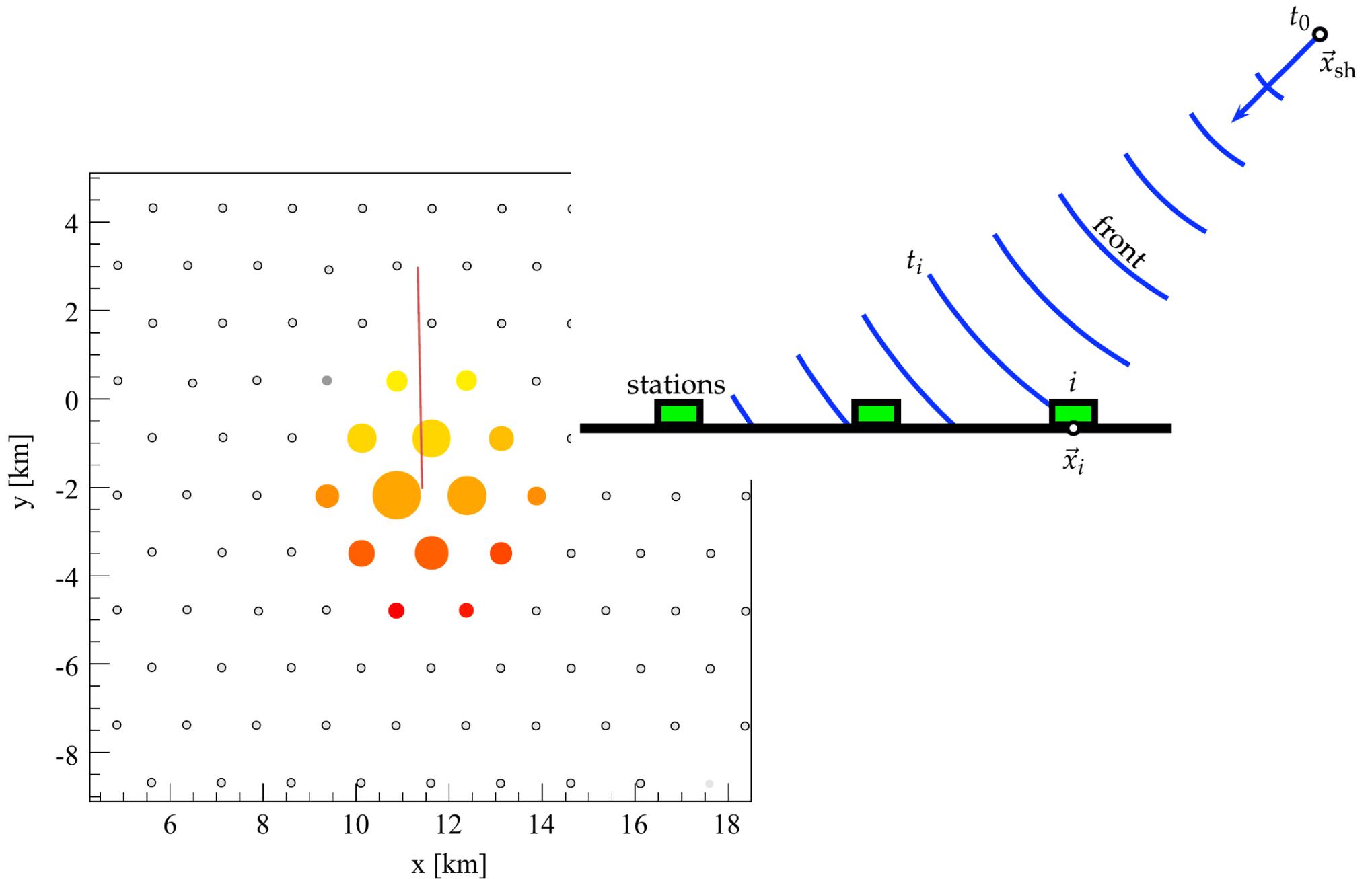


**1660 rivelatori Cherenkov  
ad acqua distribuite i  
su di un'area di 3000 km<sup>2</sup>  
Distanziate 1500 m una dall'altra**



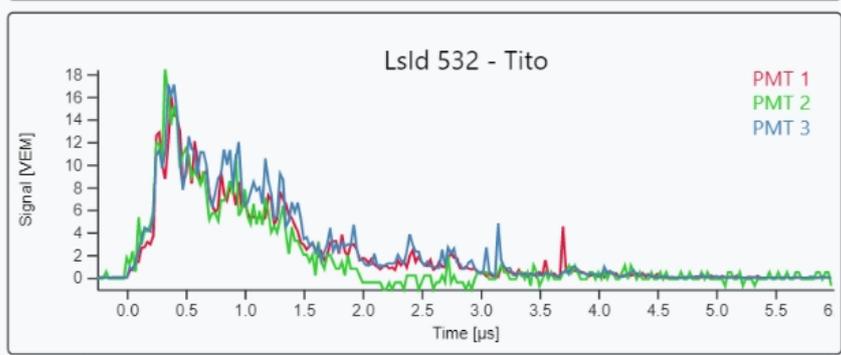


# *Impronta dello Sciame a Terra*

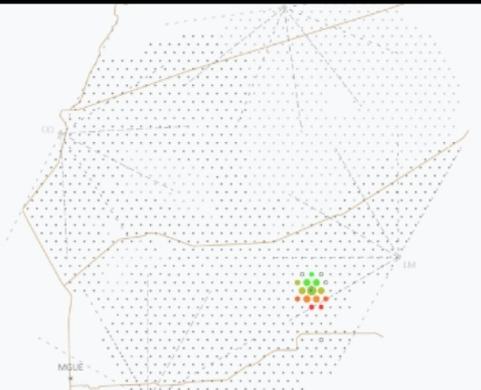
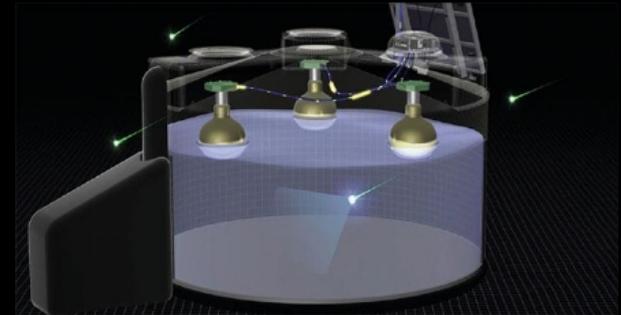


# L'Osservatorio Pierre Auger

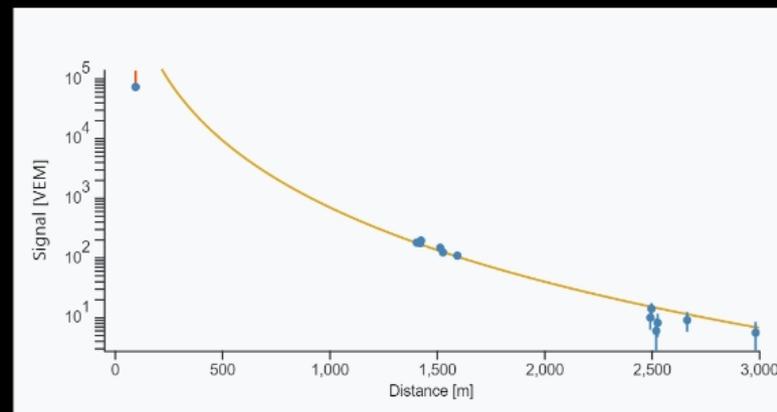
## SD (Surface Detector) : come funziona?



Segnali dei PMT



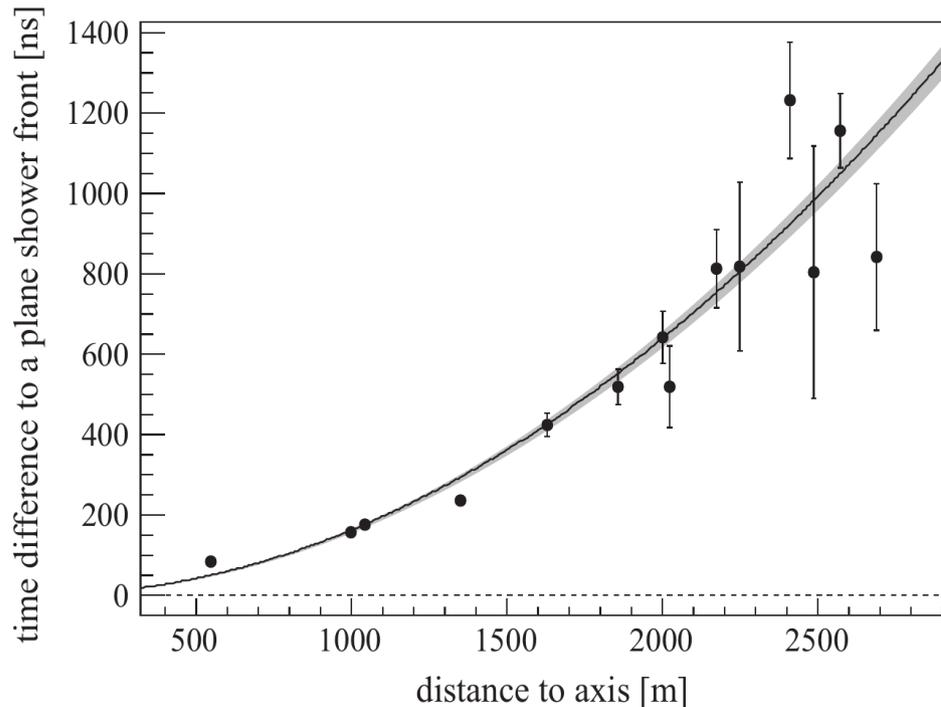
Traccia dello sciame a terra



Distribuzione laterale

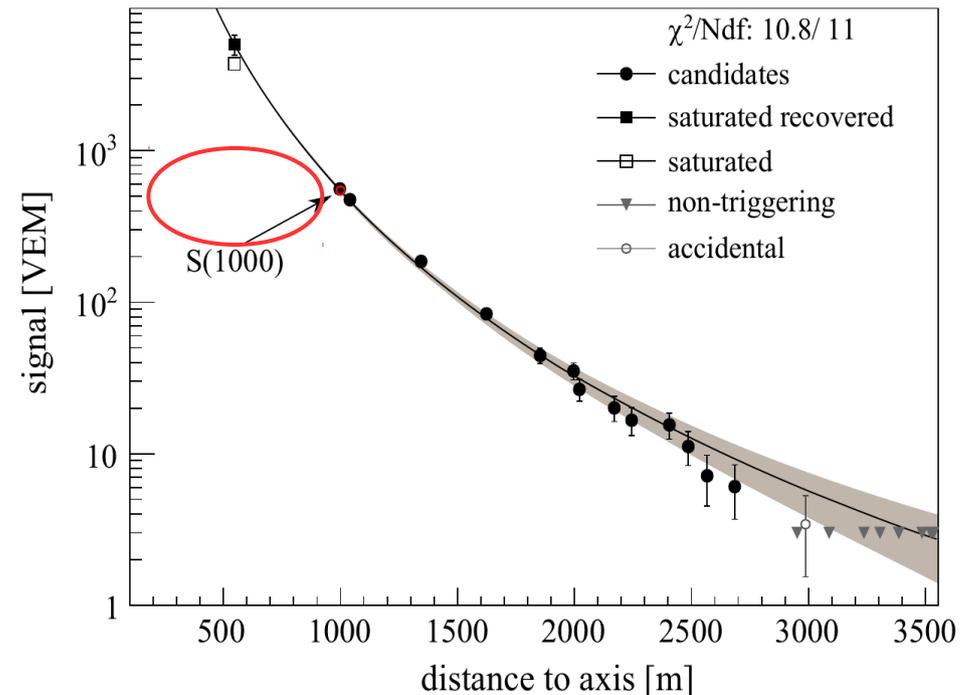
# Profilo Trasversale

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

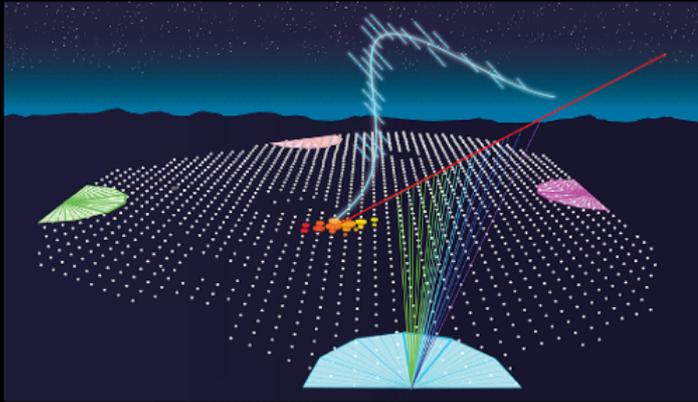


La stima dell'**energia** ottenuta col rivelatore di superficie é indiretta, ovvero dipende dai modelli di interazione adronica che sono estrapolati dalle misure ottenute ad LHC ad energie molto piu' basse.

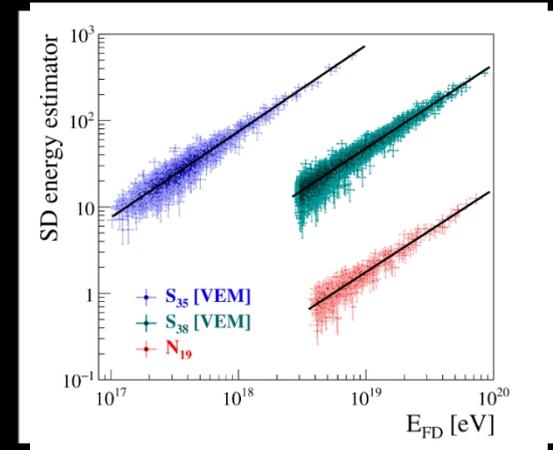
# L'Osservatorio Pierre Auger

## 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

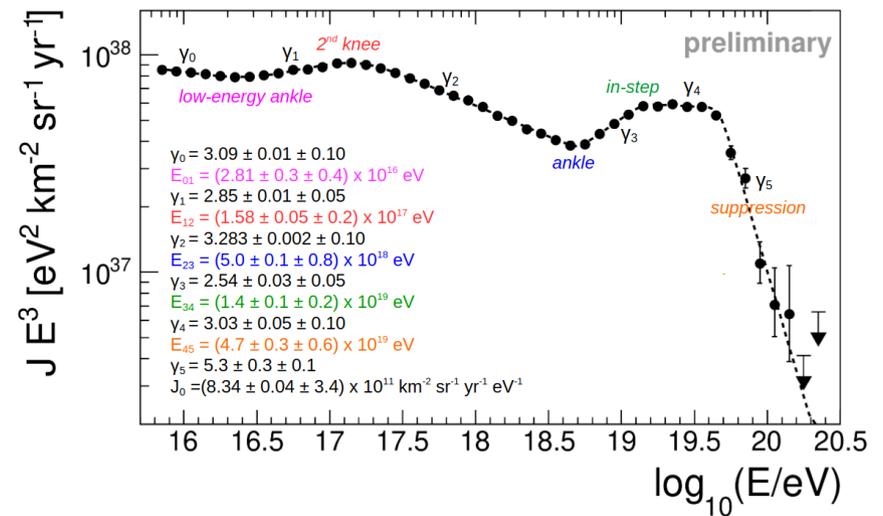
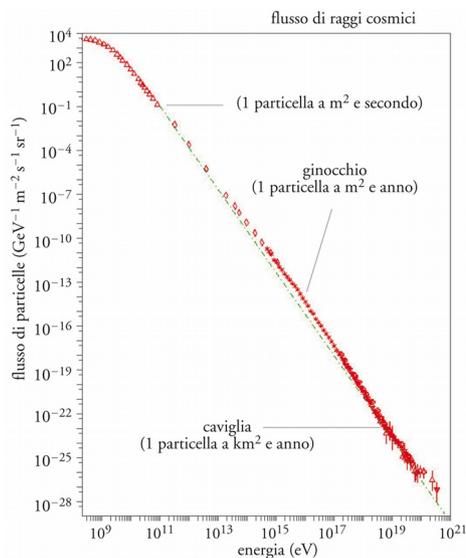
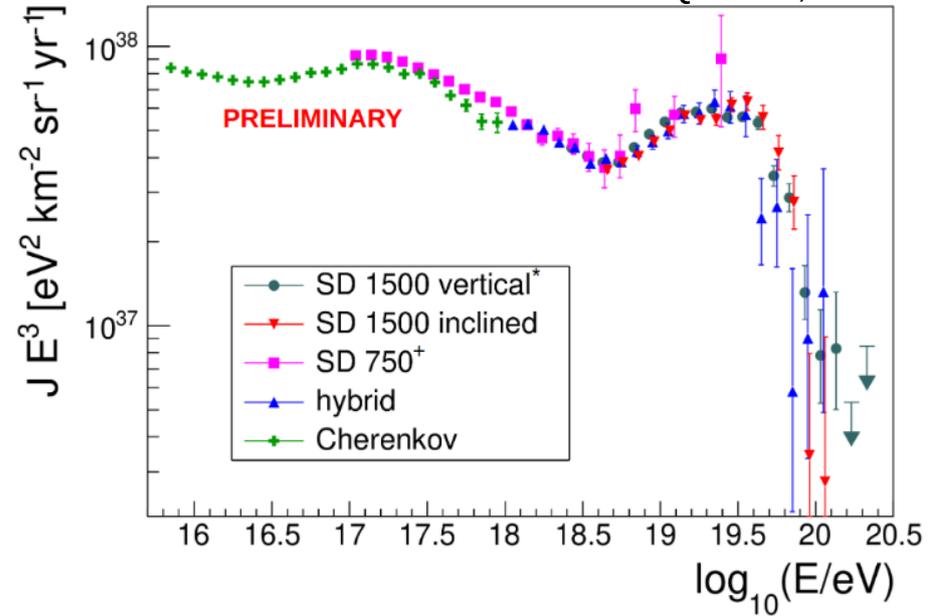
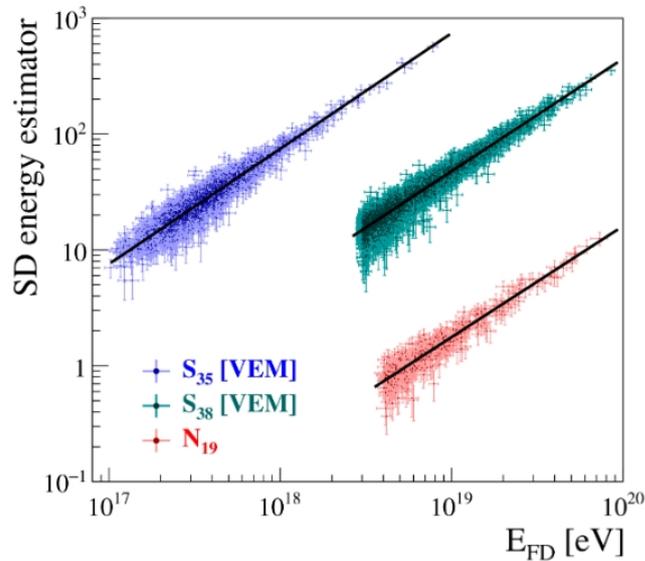


Composizione in massa da  $X_{max}$

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

# Rivelazione Ibrida: Intercalibrazione + Spettro

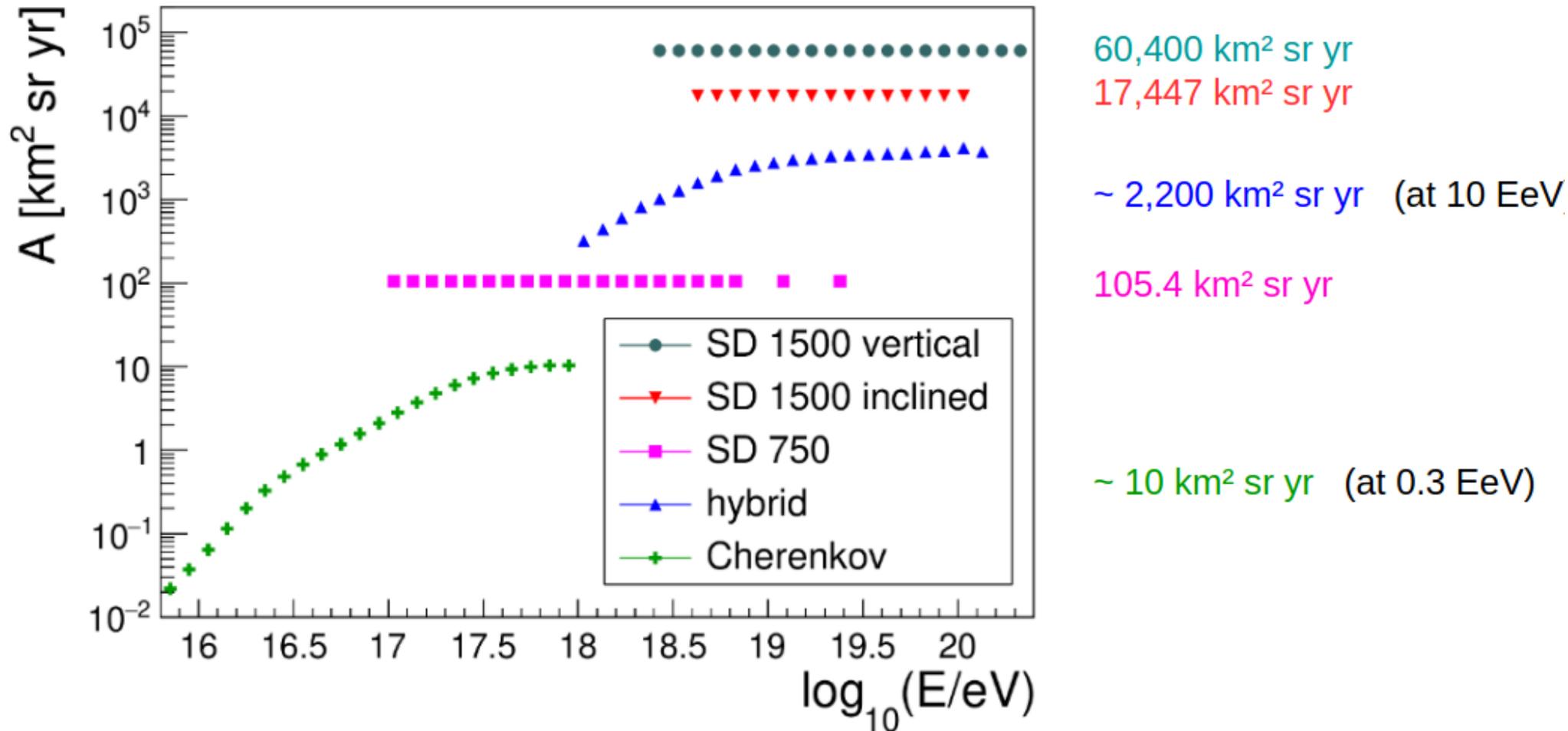
Q. Luce, UHECR 2022



# Exposure of the detectors

**Surface Detectors:** above energy threshold, it reduces to a geometrical problem  
→ count of **active hexagon cells** and **independent of energy**

**Fluorescence Detectors:** exposure from detailed MC simulation of FD events including the status of atmosphere and detector → **increase with energy**



# 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

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

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

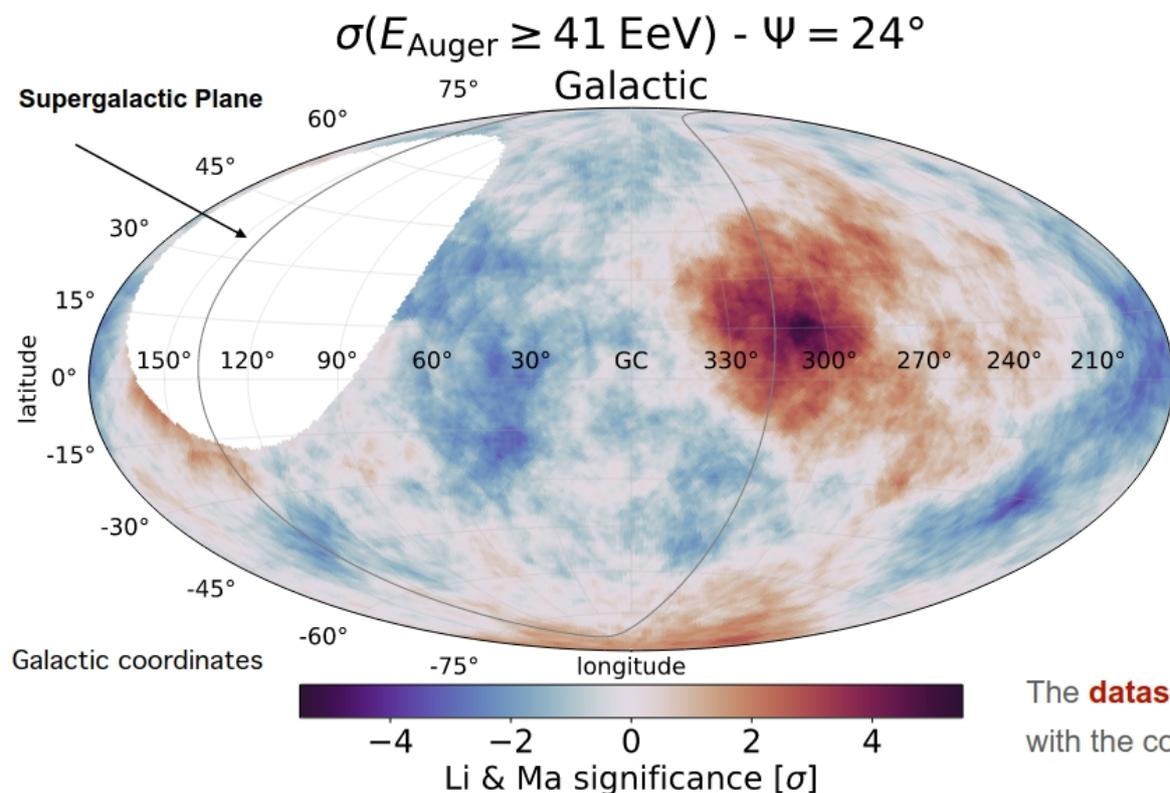
Nobs = 153 events, Nexp = 97.7 events from isotropy

**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](#))



Welcome to the

PIERRE  
AUGER  
OBSERVATORY

## Masterclasses

### INTERNATIONAL MASTERCLASSES 2023

The masterclasses with the Pierre Auger Observatory in the IMC2023 will be held on three different days:

Europe - **18.03.2023**

Europe - **24.03.2023**

Europe - **04.04.2023**

### International Masterclass 24/03/2023

24 MARCH 2023

**Braga - PT**

**Naples - IT**

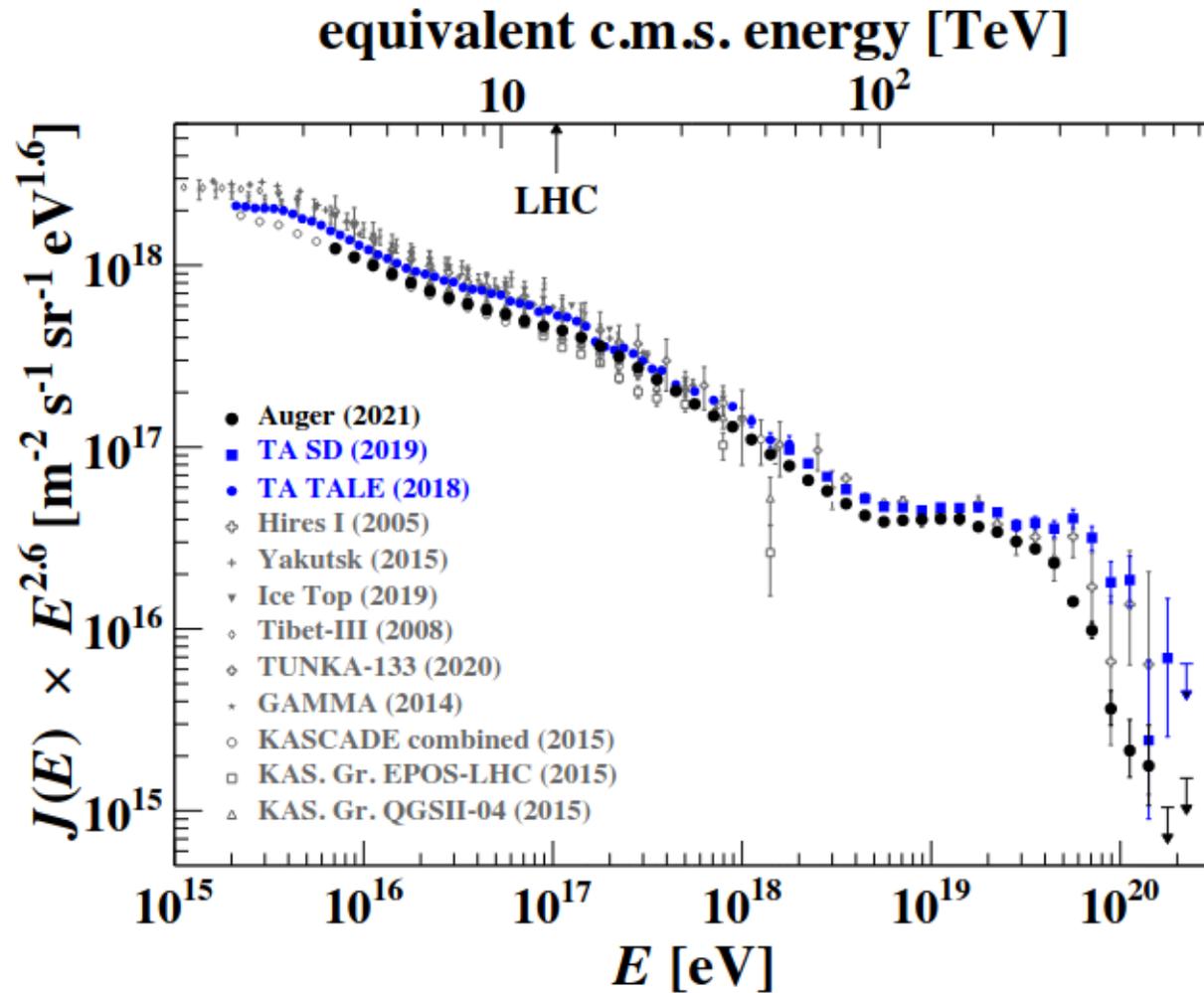
**Prague - CZ**

**Lecce - IT**

**Opava - CZ**

# Backup

# Confronto Auger - TA



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

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

Ad energie fino a  $10^{15}$  eV sono di origine galattica (principalmente protoni). Oltre, sono prodotti fuori dalla nostra galassia!

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

Lo spettro energetico che avete visto all'inizio é stato costruito e capito nel dettaglio.

## ... 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. Cio' che sappiamo, é che molti arrivano da una regione dell'Universo intorno all'AGN Centaurus A... la ricerca 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.

**Grazie per l'attenzione!**