

INTERNATIONAL COSMIC DAY

La fisica dei raggi cosmici

Prof.ssa Laura Valore
Università di Napoli Federico II
INFN Sezione di Napoli
26 Novembre 2024

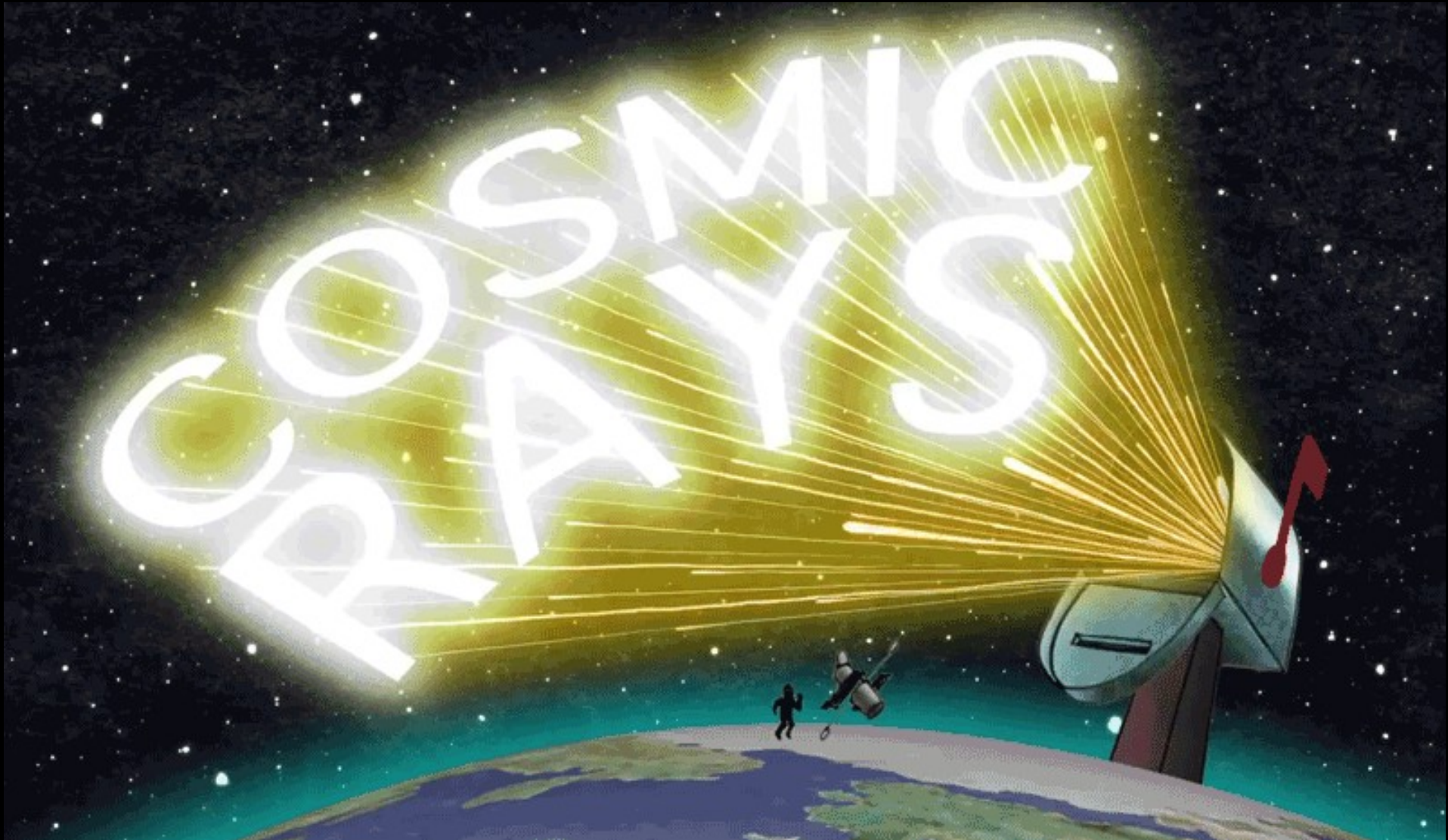


In cooperation with
many networks and partners



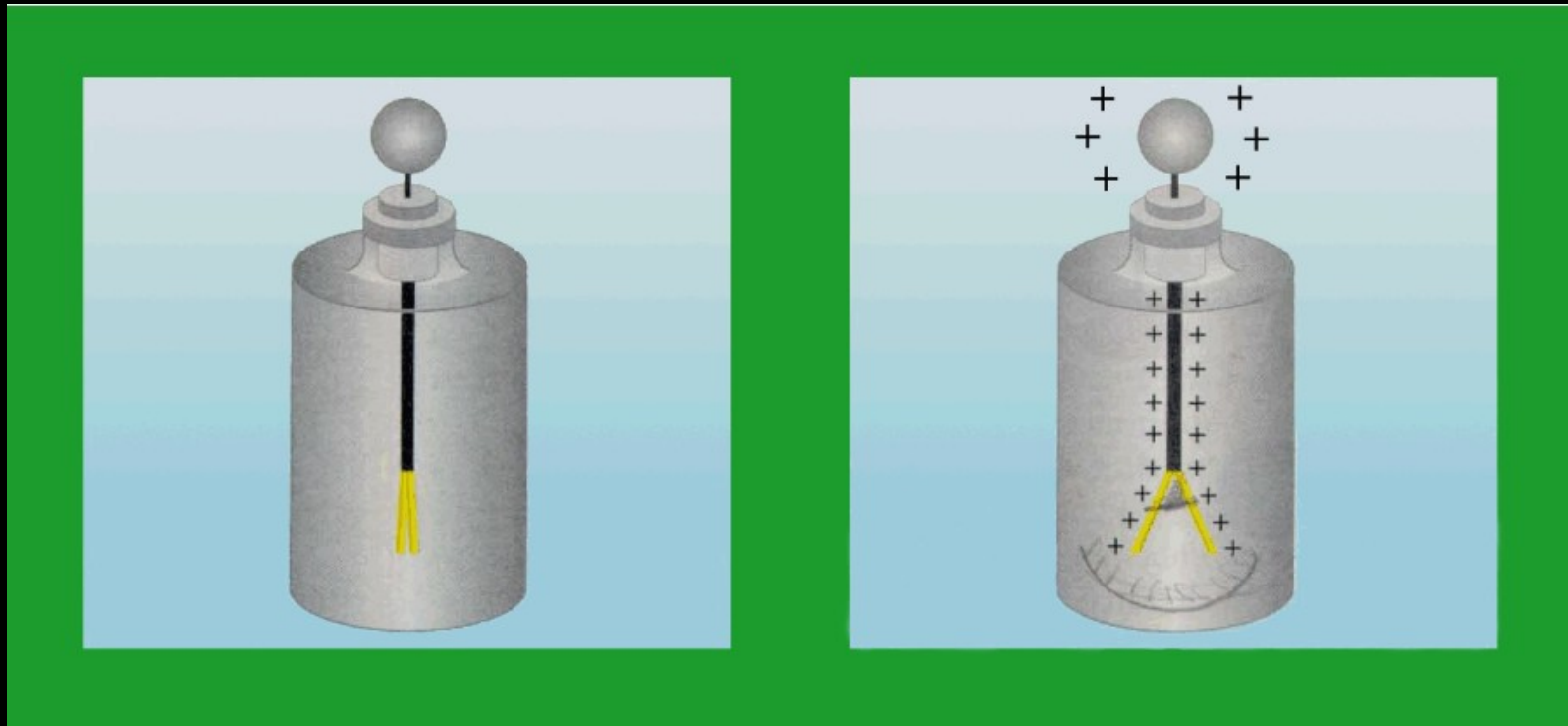
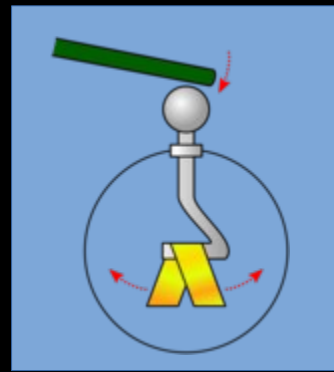
Cosa sono i raggi cosmici?

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

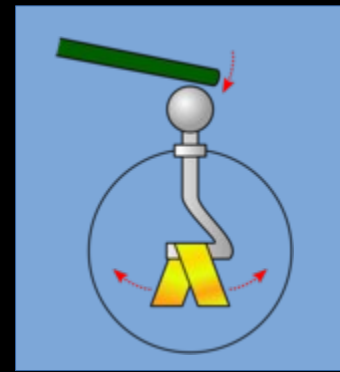


Come sono stati scoperti?

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



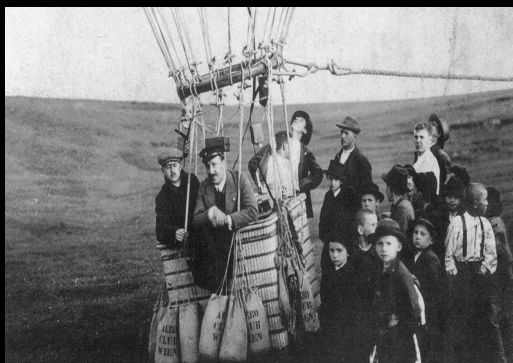
Come sono stati scoperti?



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. Scoprì 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

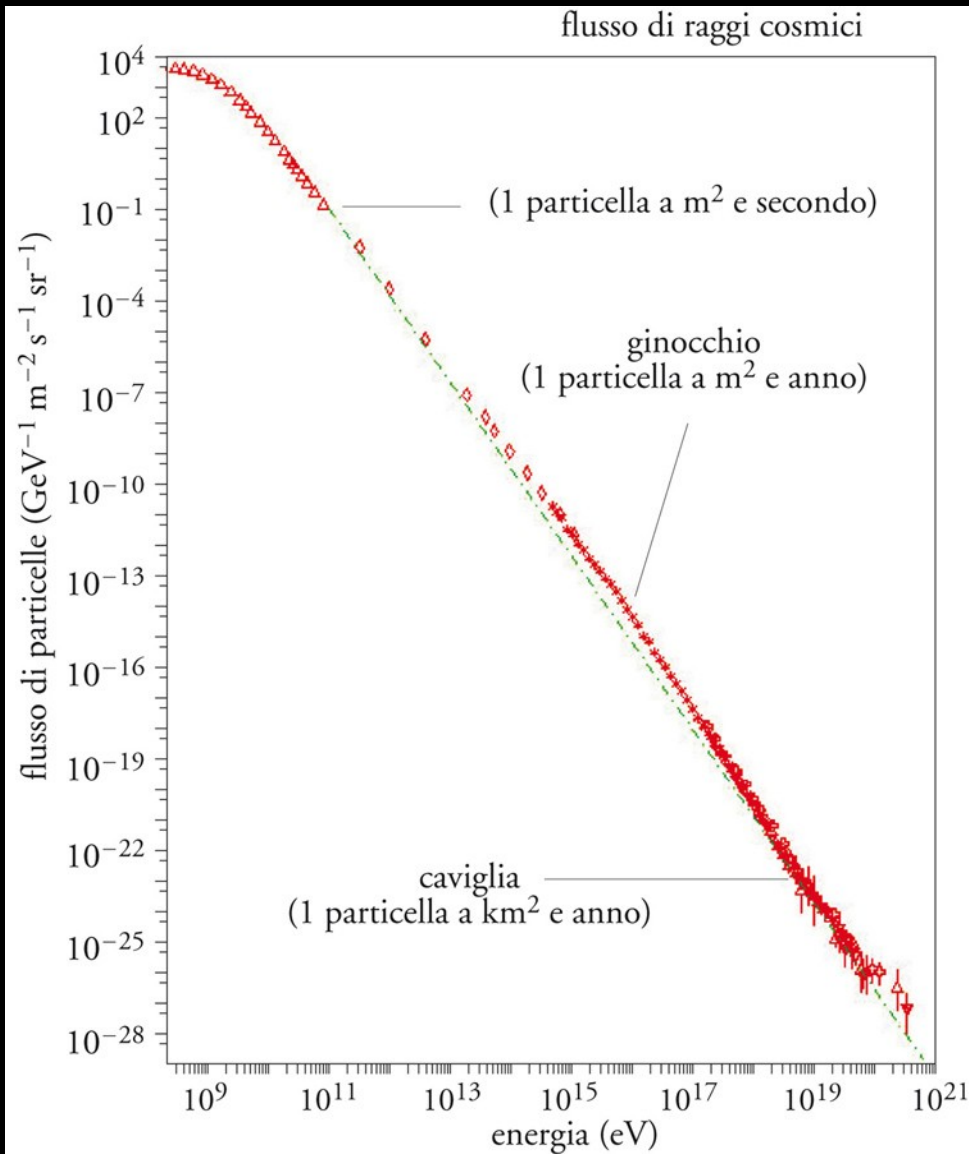
Cosa fanno al nostro corpo I raggi cosmici? Diventeremo tutti supereroi ?



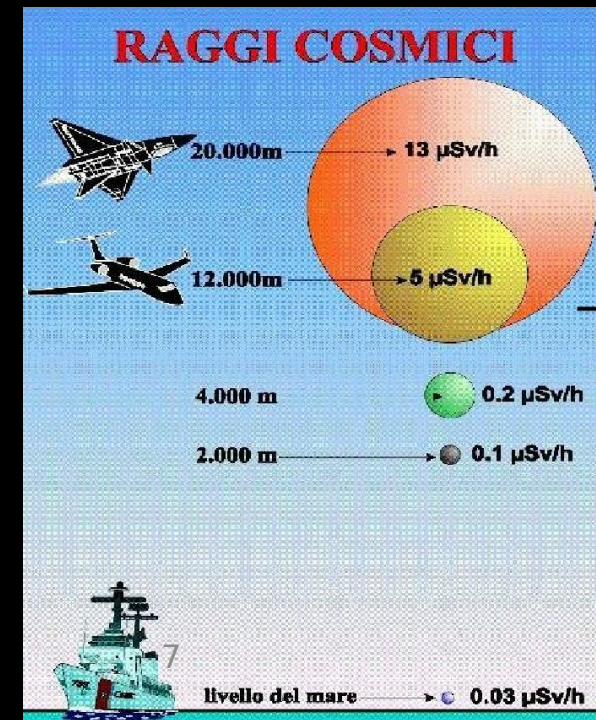
NO! L'umanità convive da sempre con i raggi cosmici ...
quindi non c'è speranza di diventare supereroi!

Lo spettro energetico dei raggi cosmici

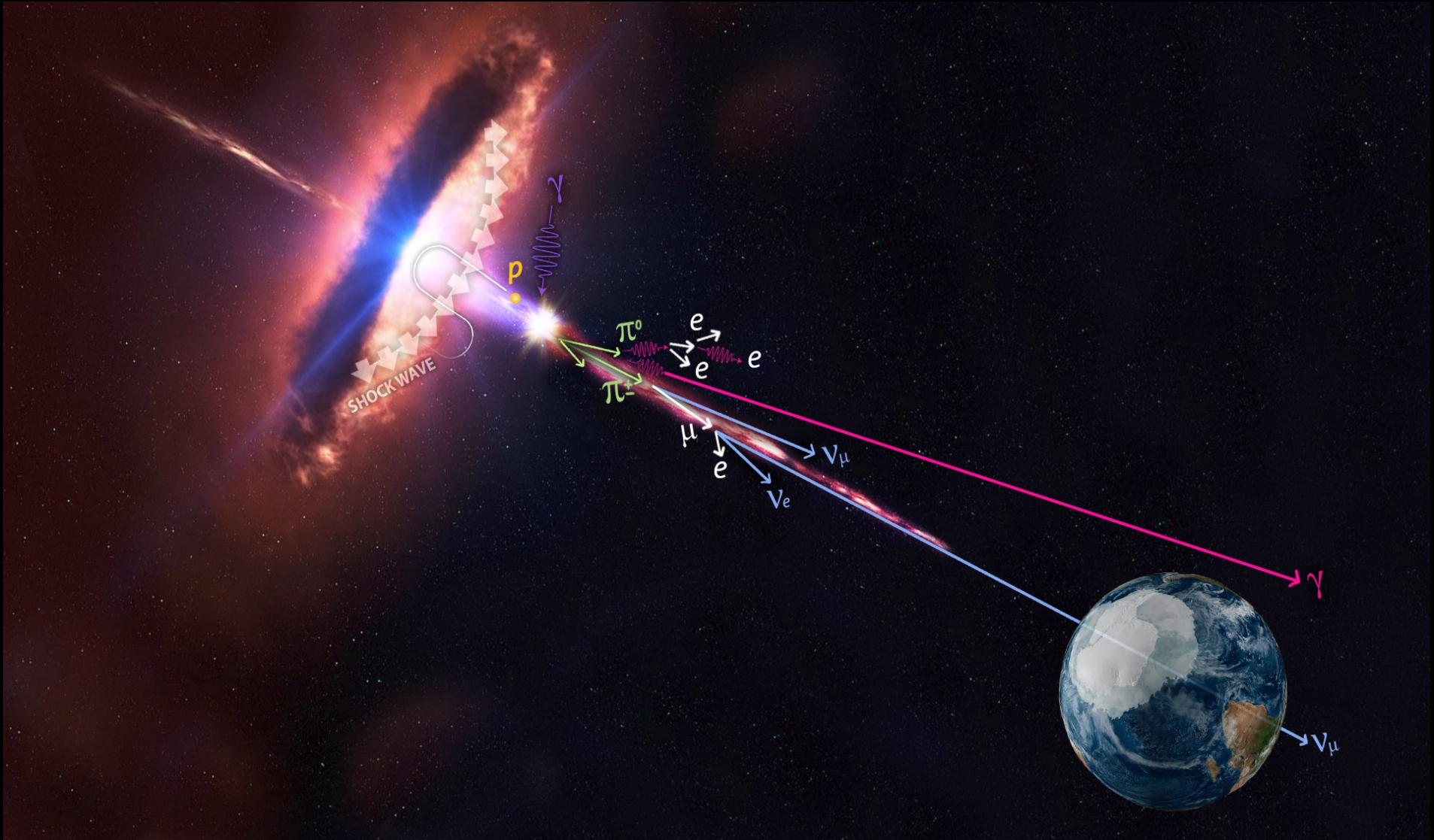
32 decadi in flusso di particelle su 11 decadi in energia!



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.



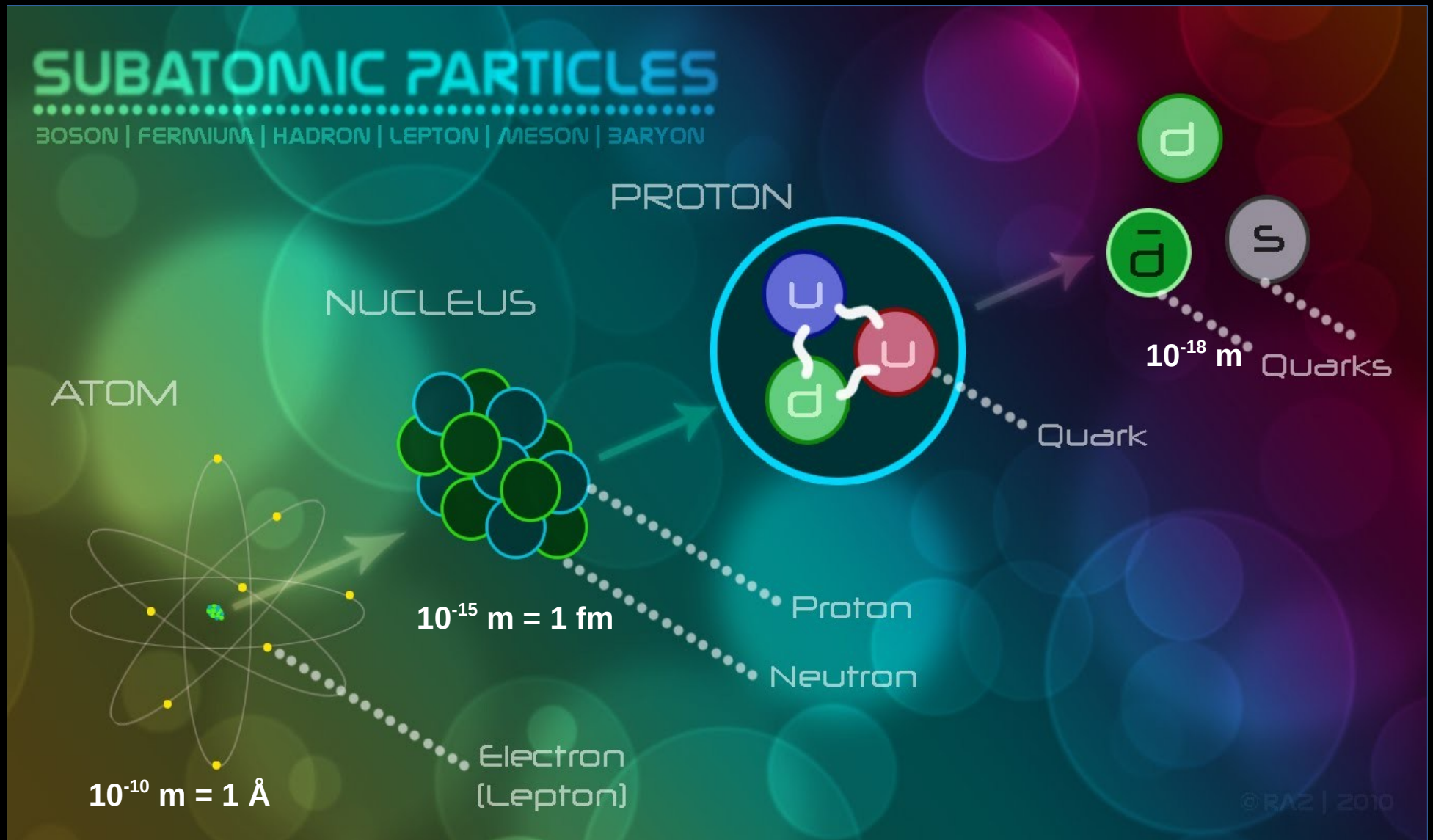
Lo studio dei raggi cosmici ha permesso di scoprire nuove particelle ed ha dato il via alla fisica delle particelle elementari



Le particelle elementari: i mattoni dell'Universo



Dall'atomo ai quarks



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 1 volt (cioè J/C) moltiplicato per la carica di un elettrone; corrisponde a un quantitativo molto piccolo di energia, pari all'inverso del numero di Coulomb:

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

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

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

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

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

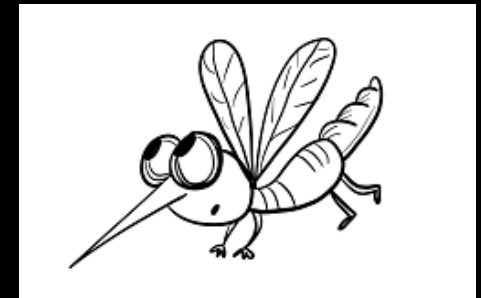
Energie

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

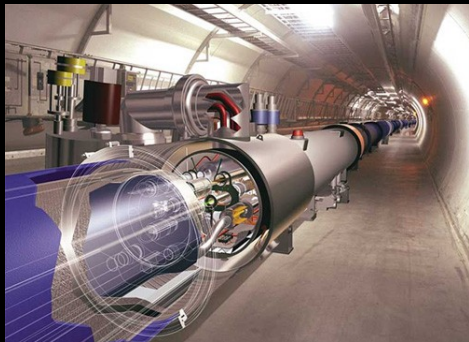


$$E=mc^2$$

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



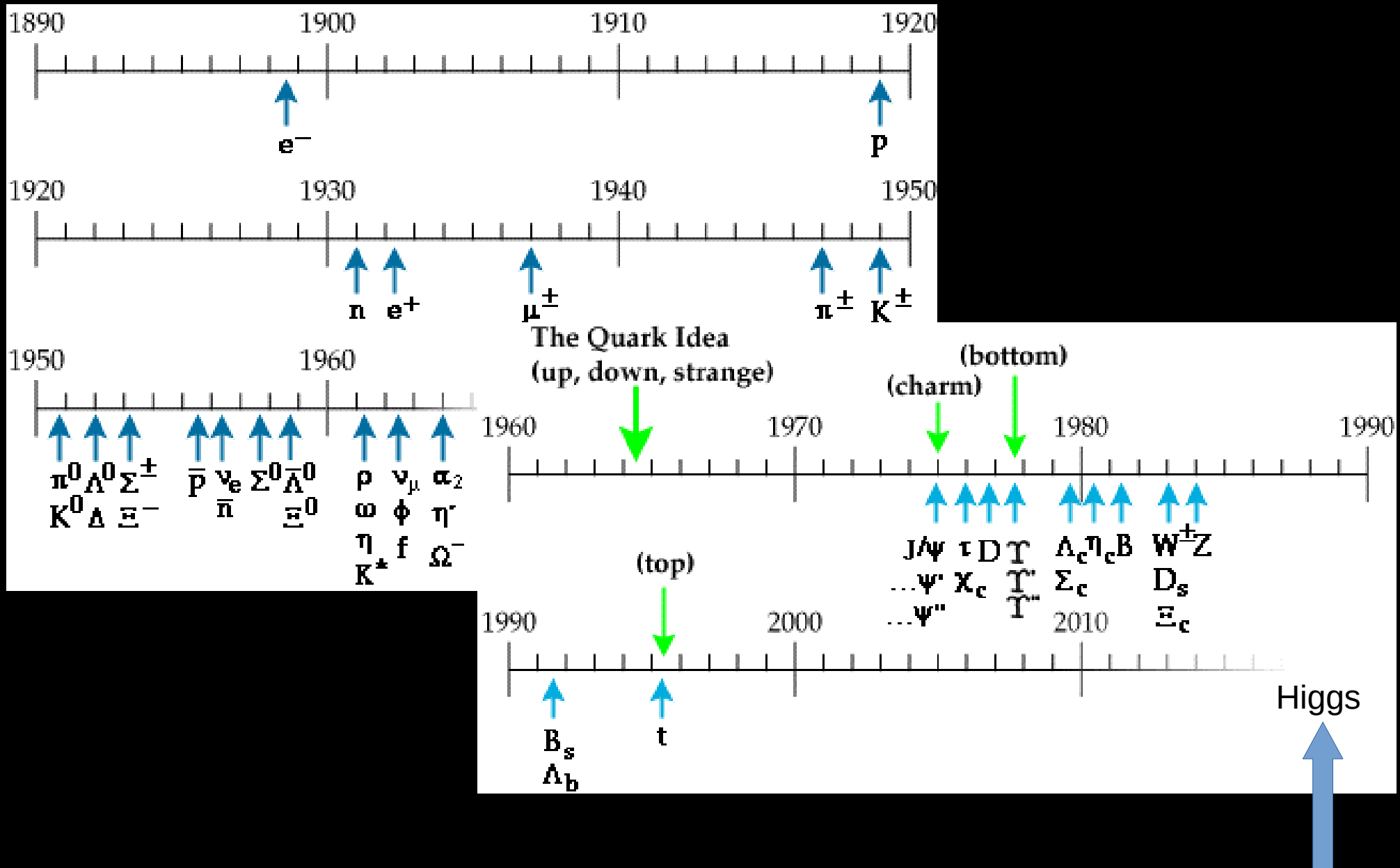
1 EeV = 6×10^{18} eV = 1 Joule:
energia cinetica di una massa da
100 g che cade da 1 m



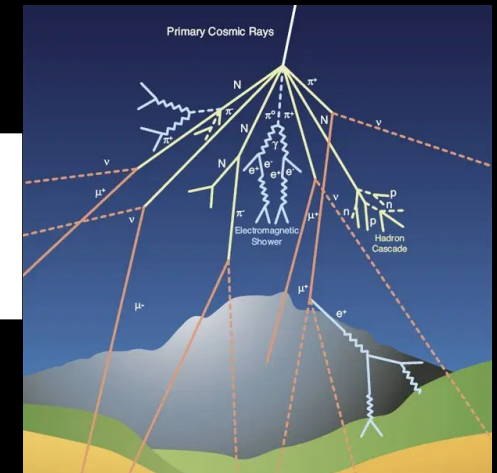
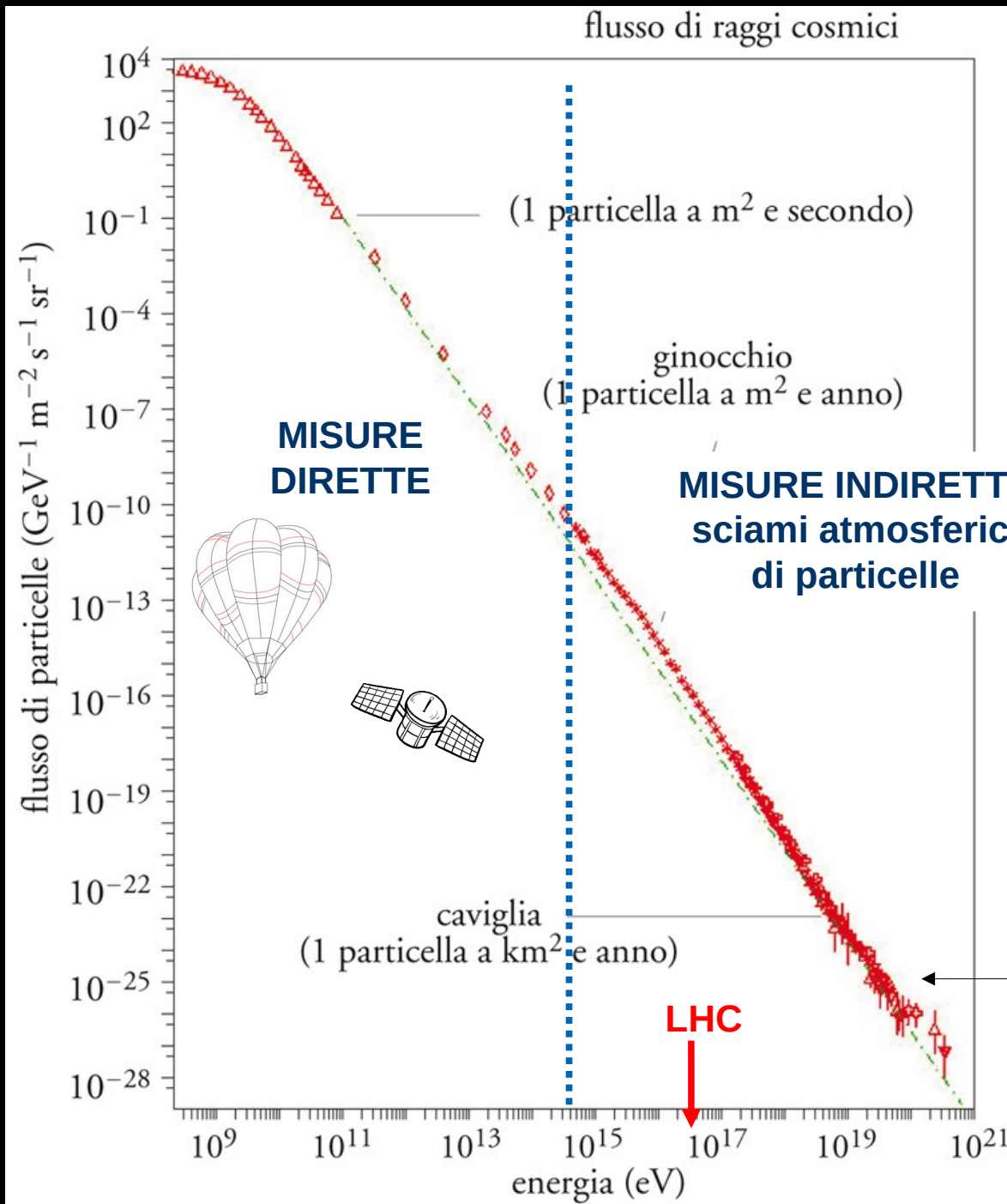
10^{20} eV → energia massima misurata
per una particella singola
energia cinetica di una palla da
tennisa lanciata da Sinner!



Le particelle scoperte!



Come riveliamo e studiamo i raggi cosmici



(1 particella per km^2 al secolo)

Le misure dirette

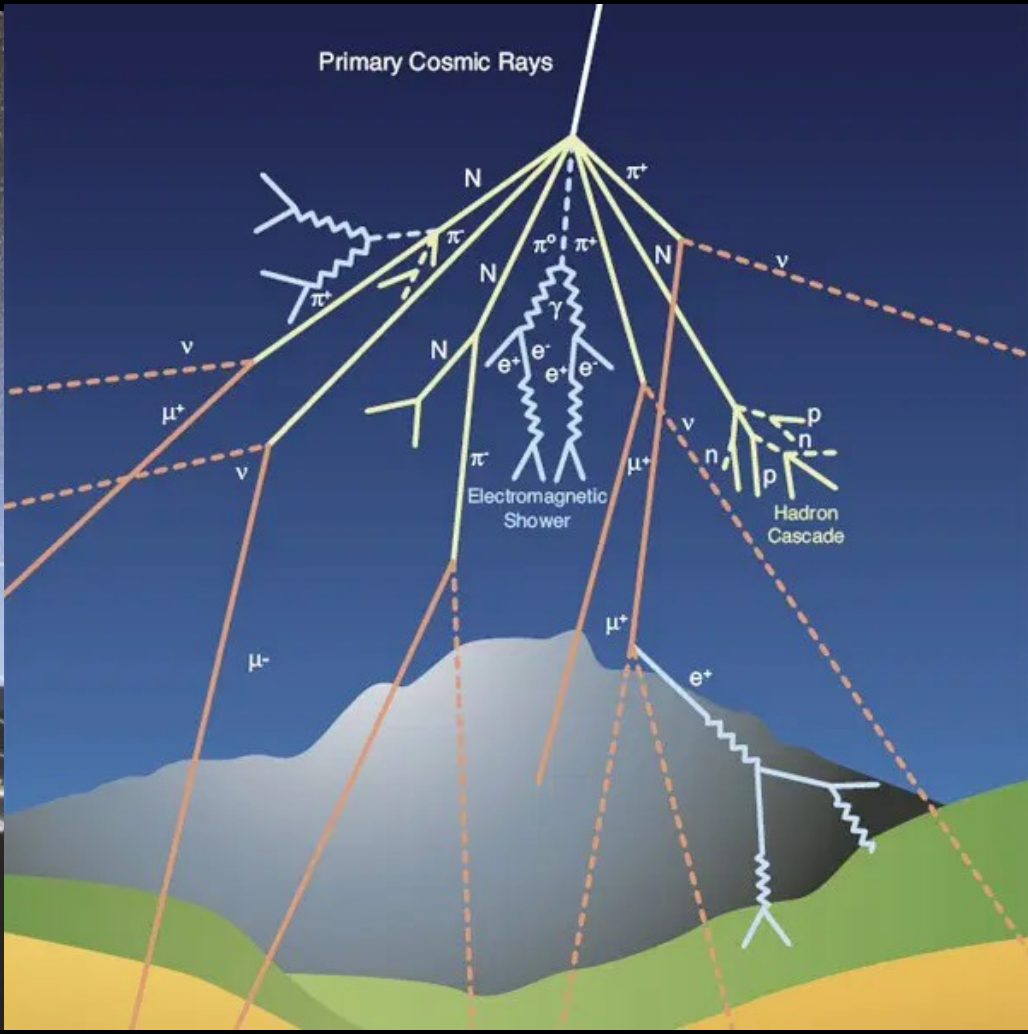
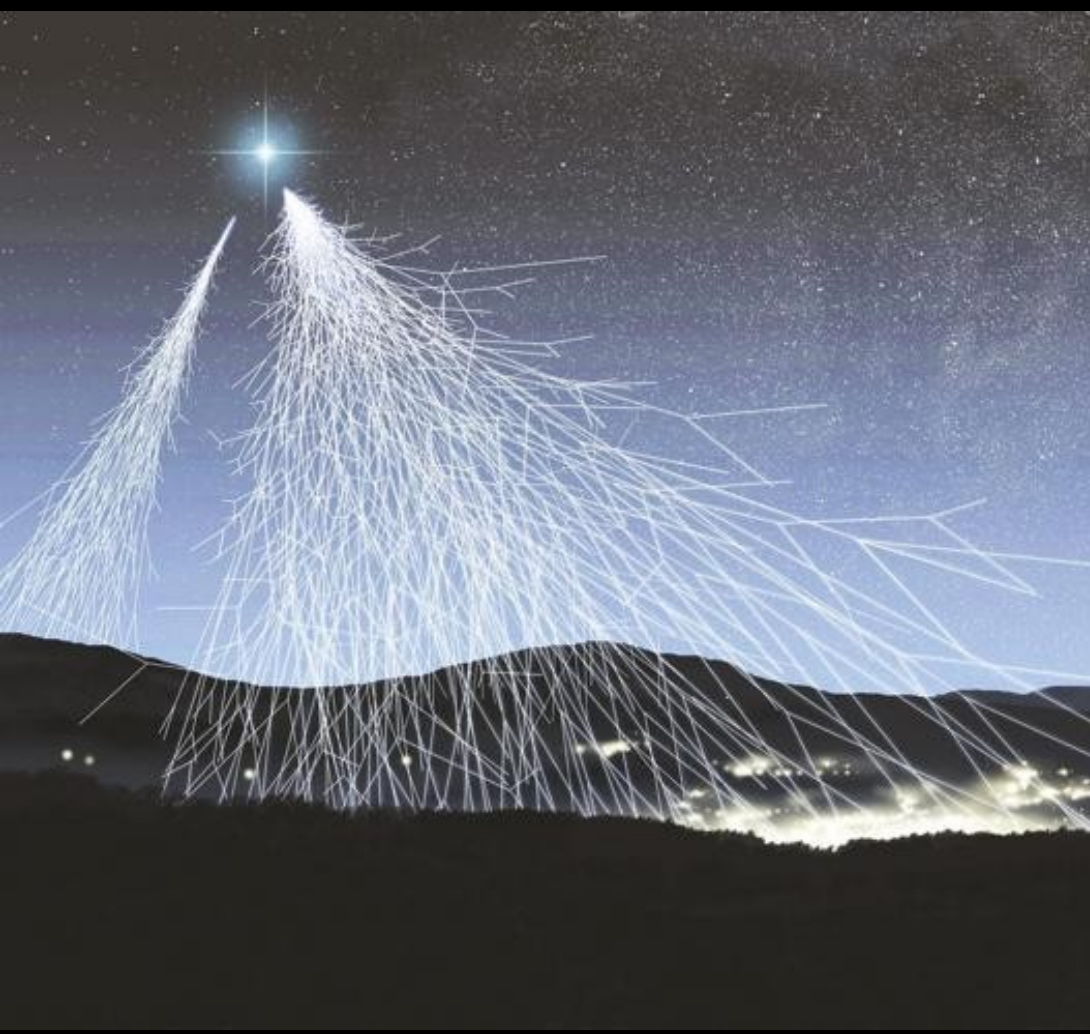
Fino a 10 TeV il flusso di raggi cosmici é abbastanza alto da permettere la misura diretta dallo spazio!



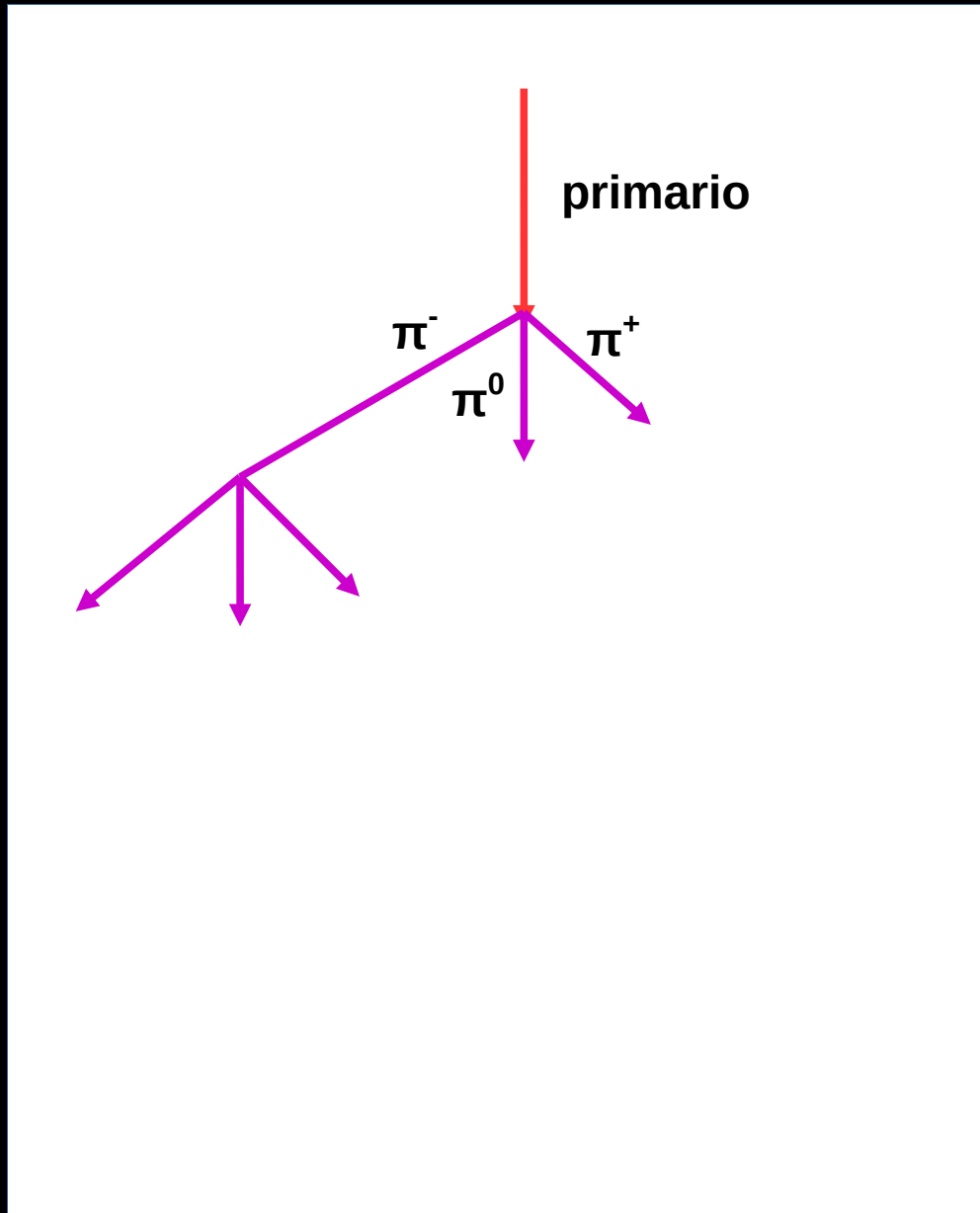
Le misure indirette - sciami atmosferici estesi

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.

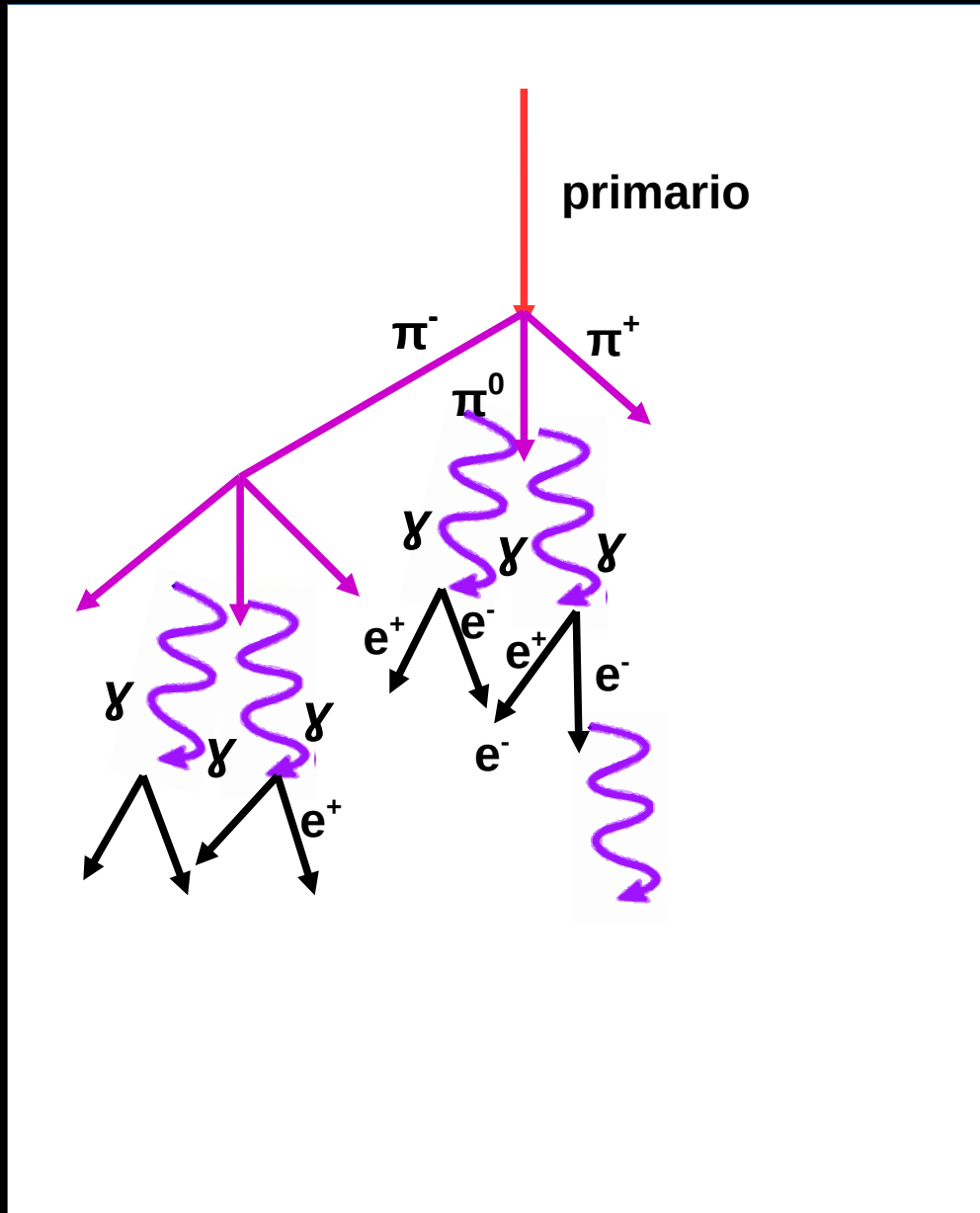


Le particelle secondarie dello sciame



**COMPONENTE
ADRONICA**
prima ad estinguersi in
atmosfera

Le particelle secondarie dello sciame



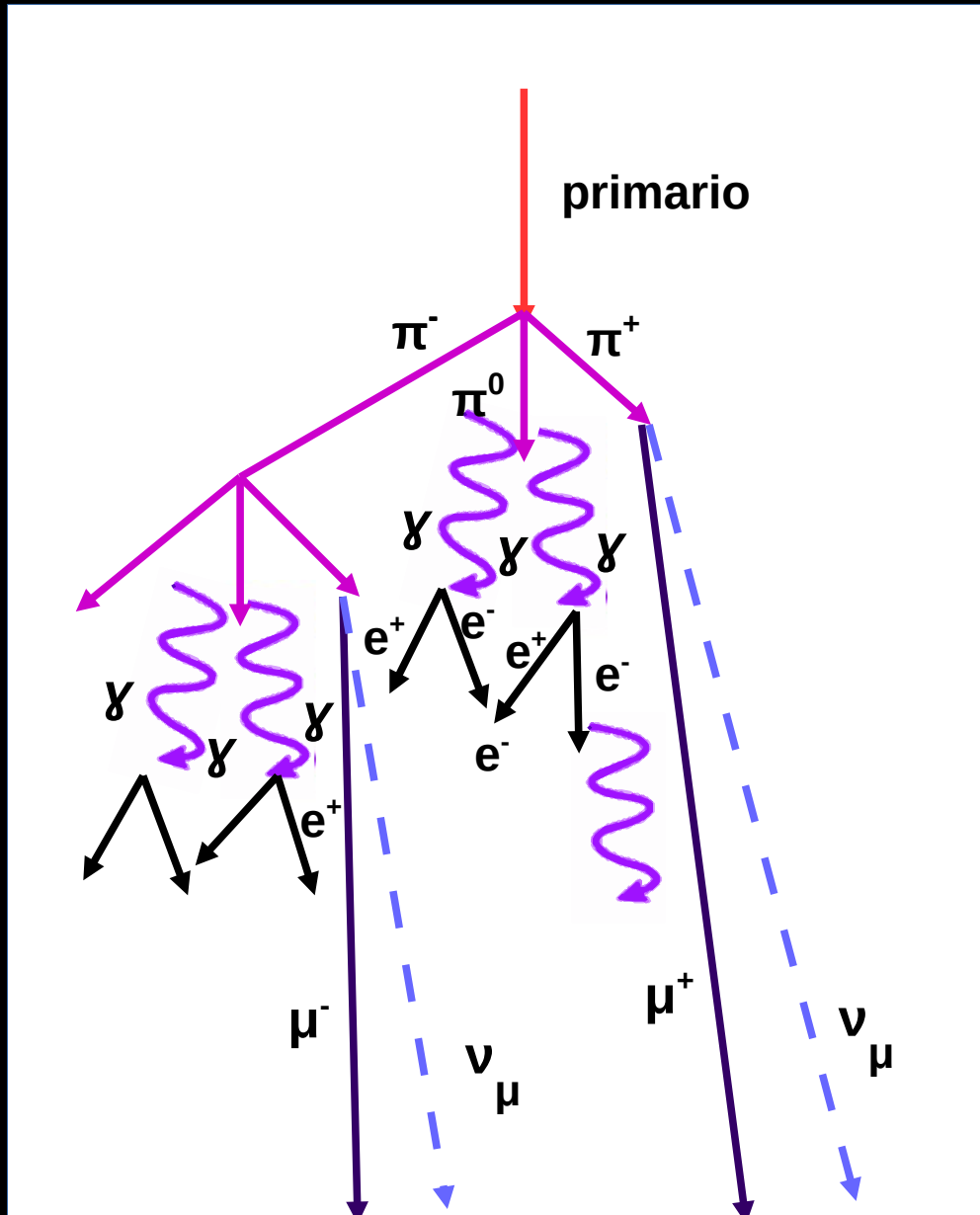
COMPONENTE ADRONICA

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

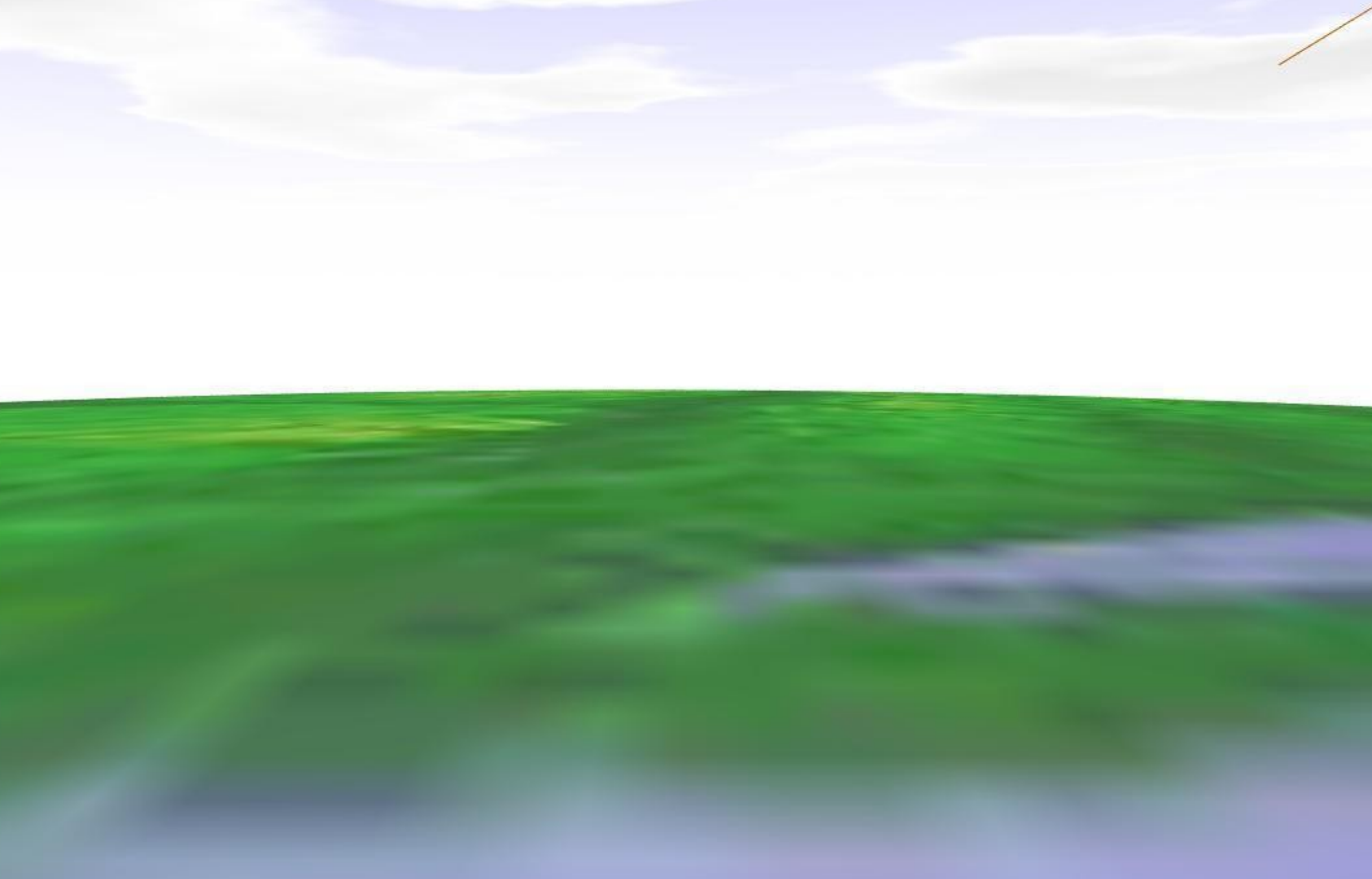
COMPONENTE MUONICA

la più penetrante

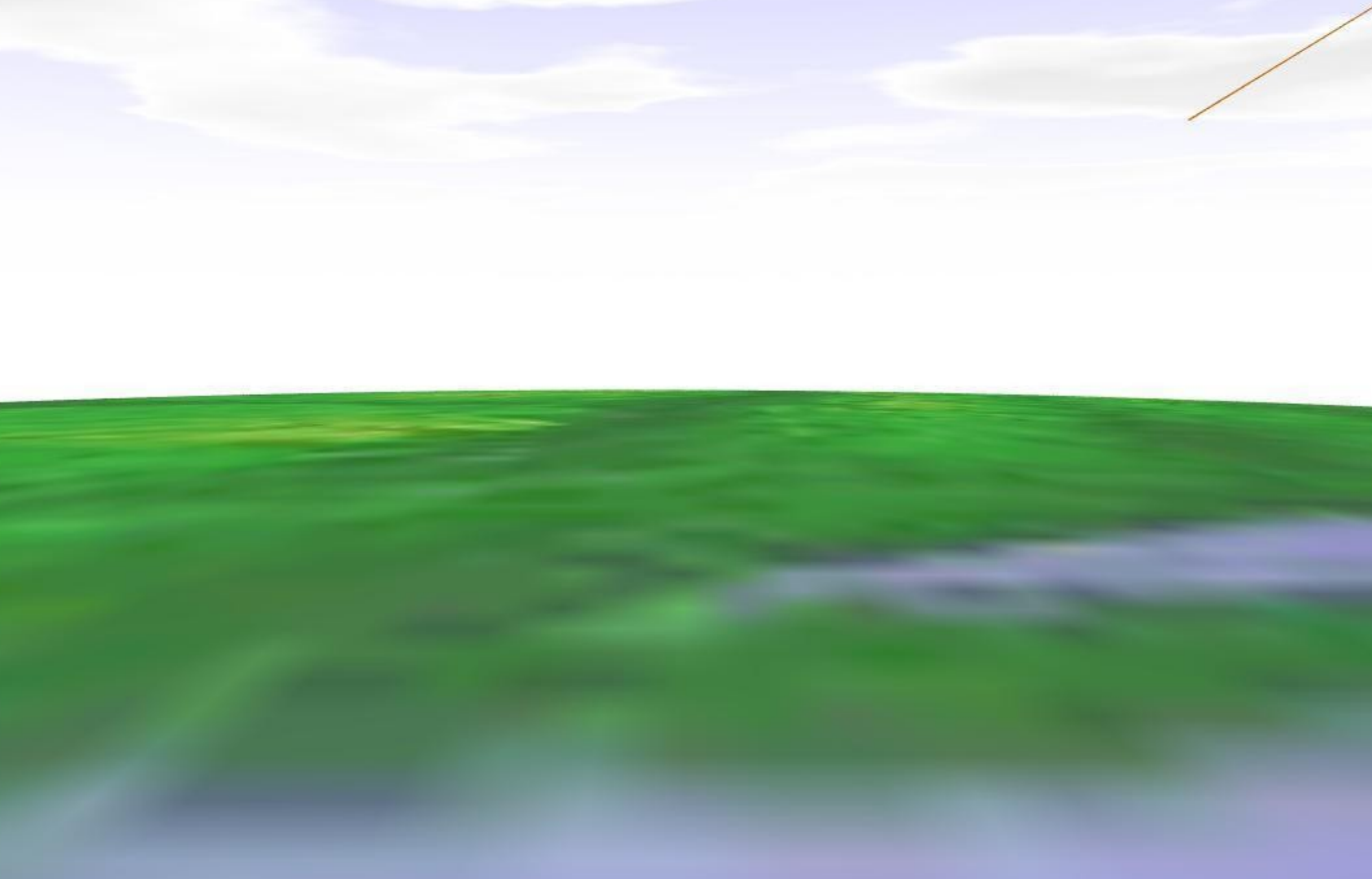
o sviluppo degli sciami in atmosfera



o sviluppo degli sciami in atmosfera



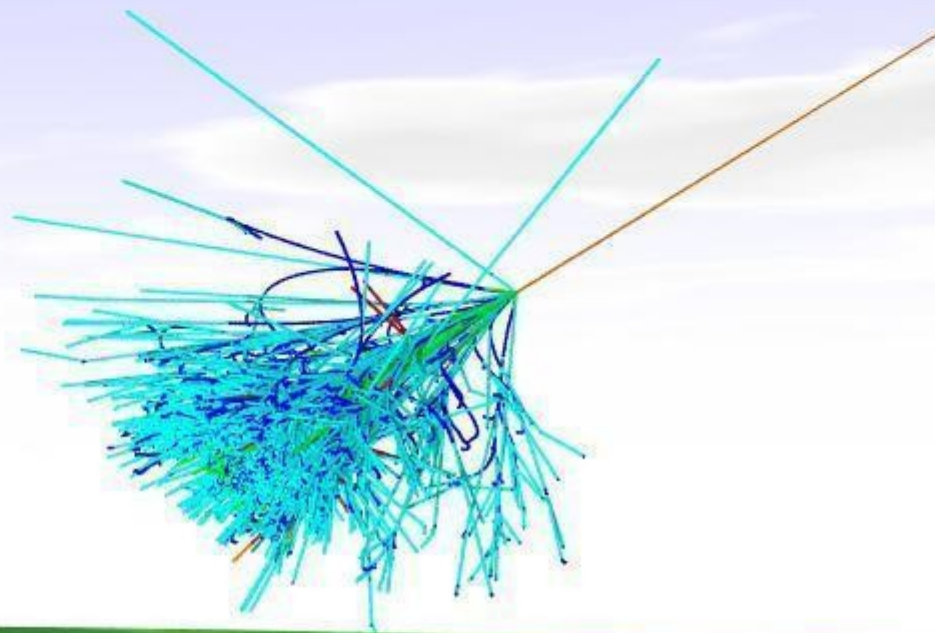
o sviluppo degli sciami in atmosfera



o sviluppo degli sciame in atmosfera



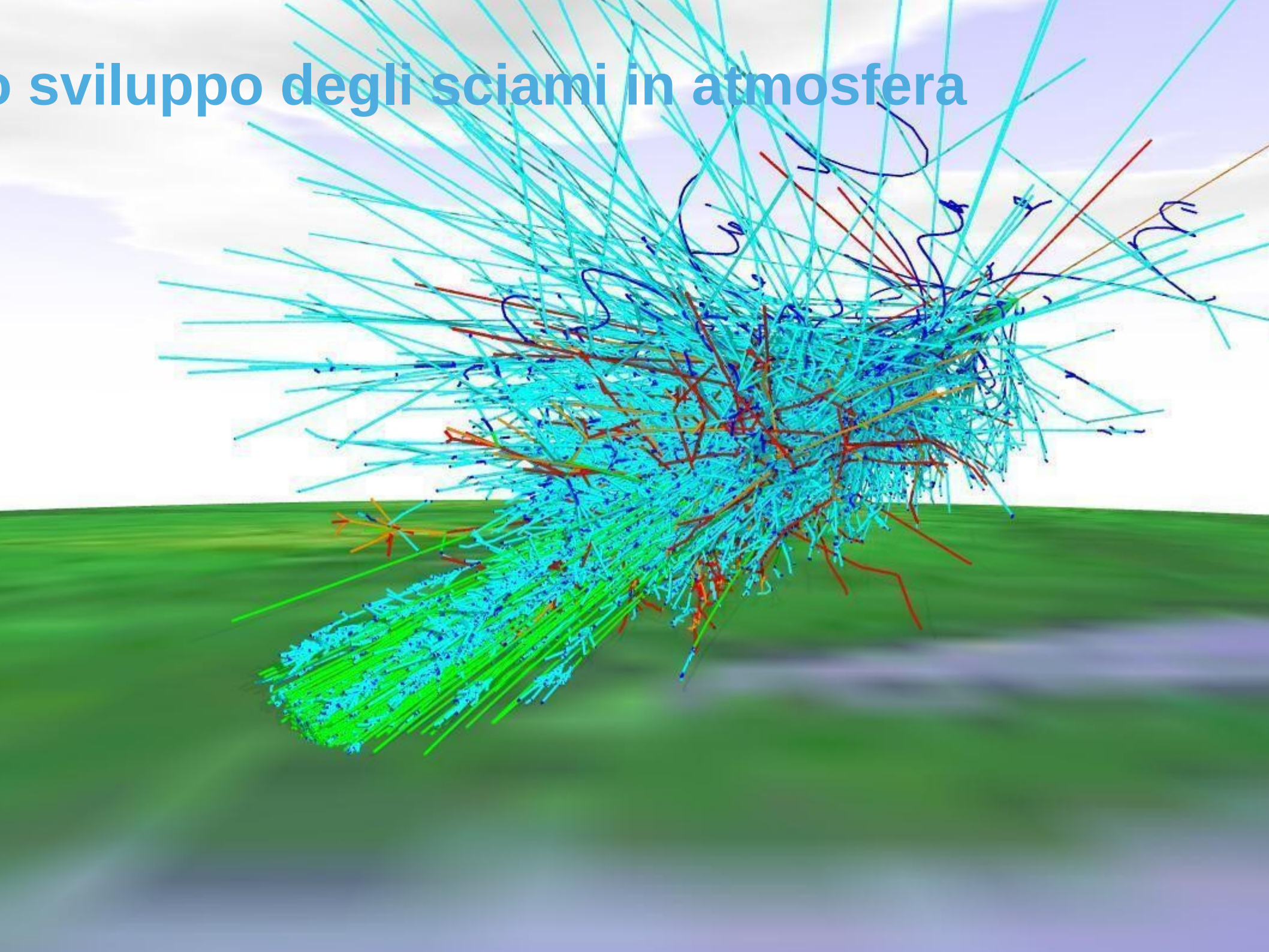
sviluppo degli sciami in atmosfera



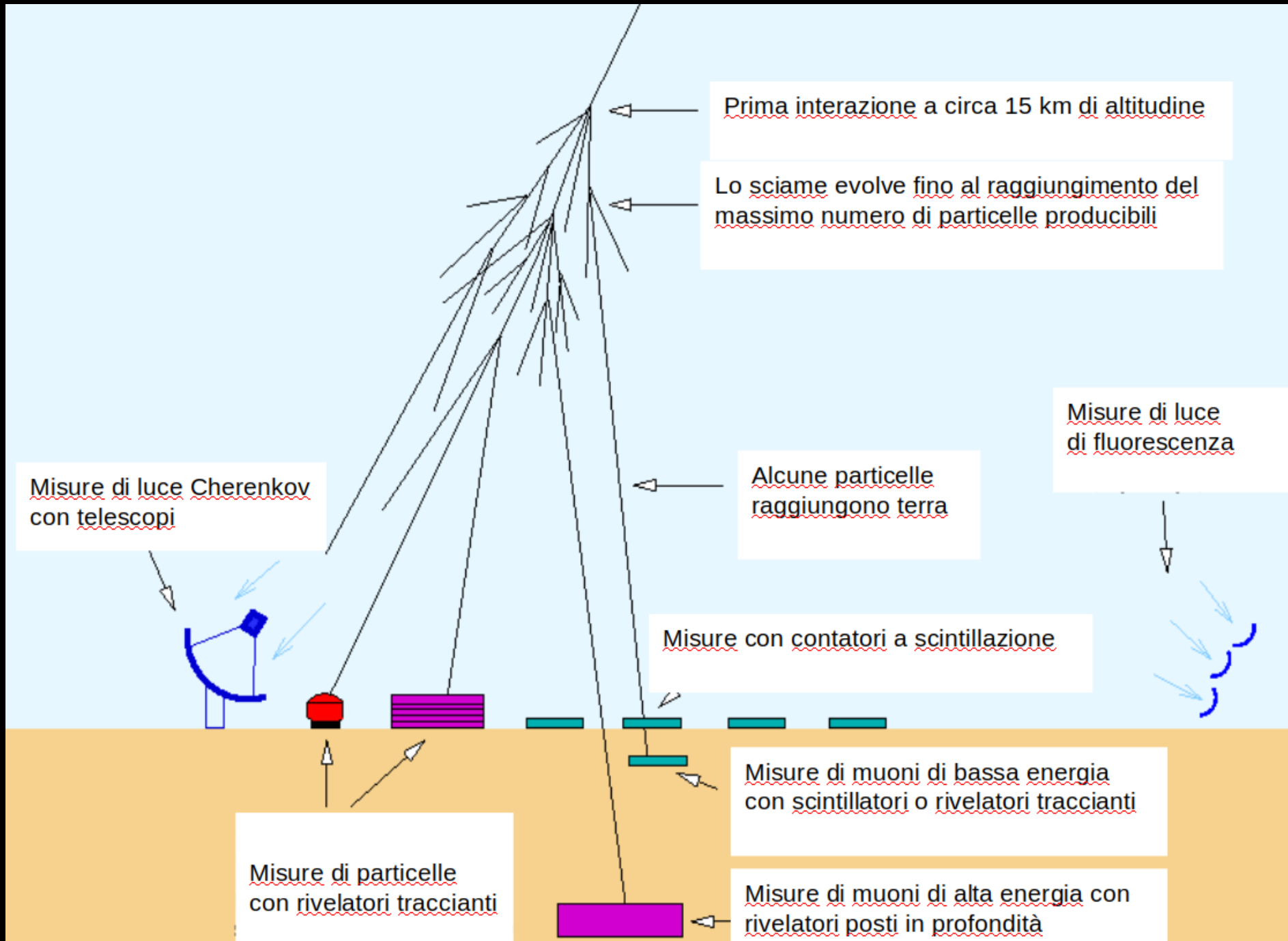
sviluppo degli sciami in atmosfera



sviluppo degli sciami in atmosfera



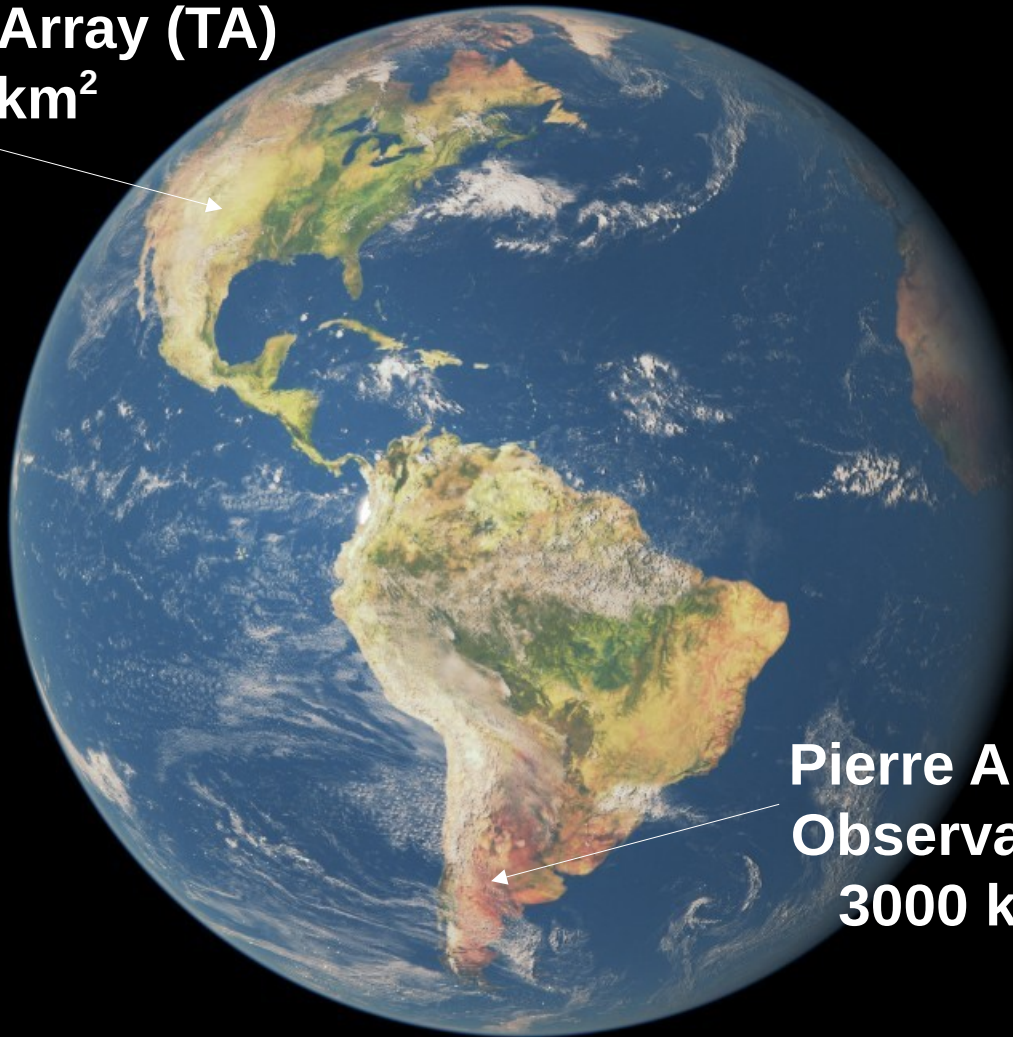
Metodi di rivelazione indiretta dei raggi cosmici



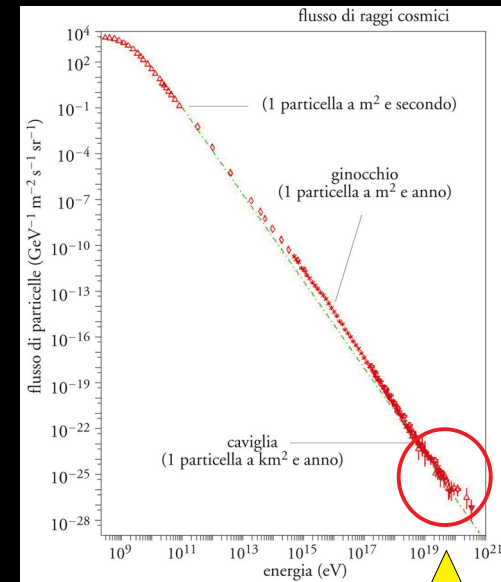
I principali esperimenti per la misura indiretta

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

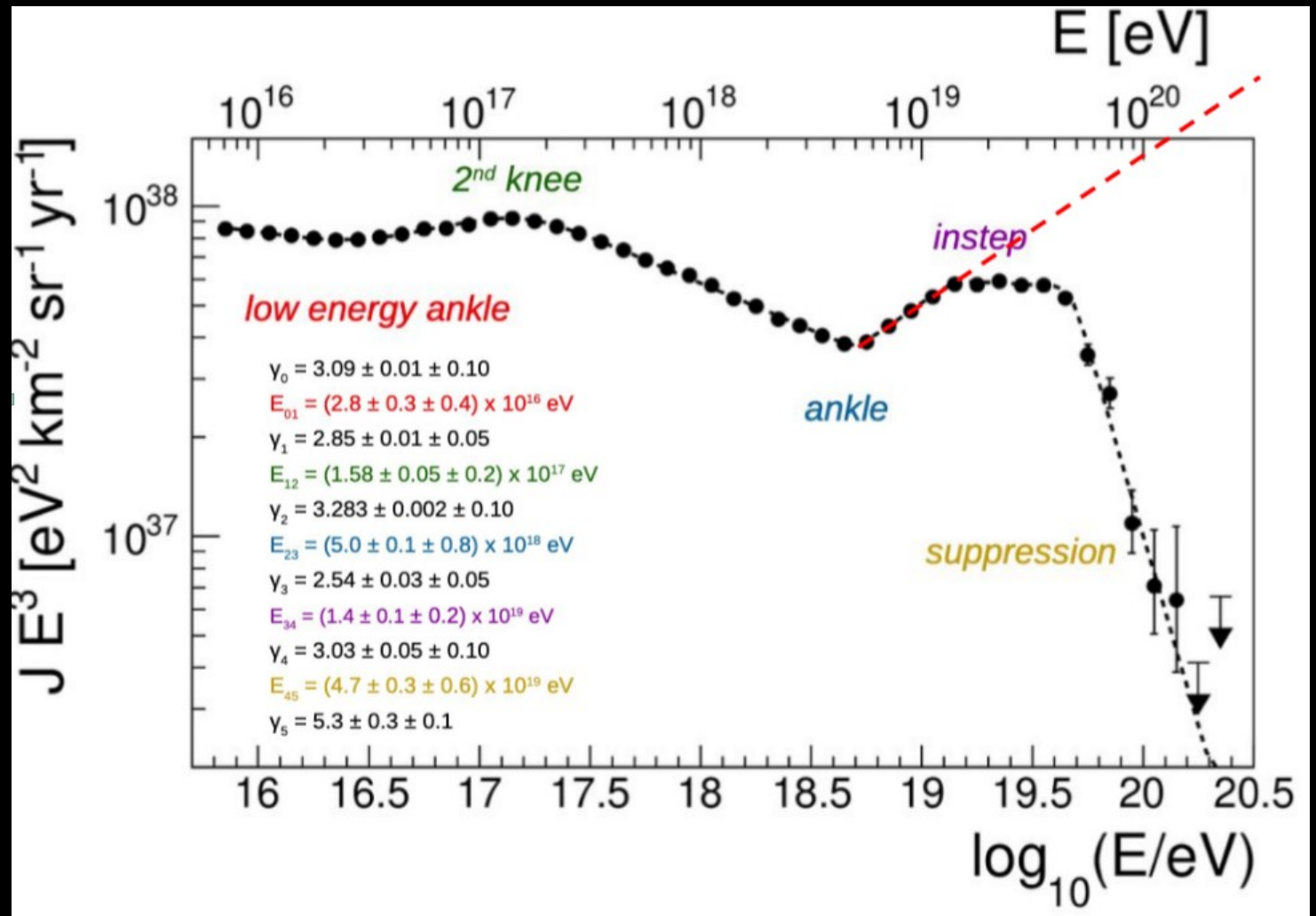
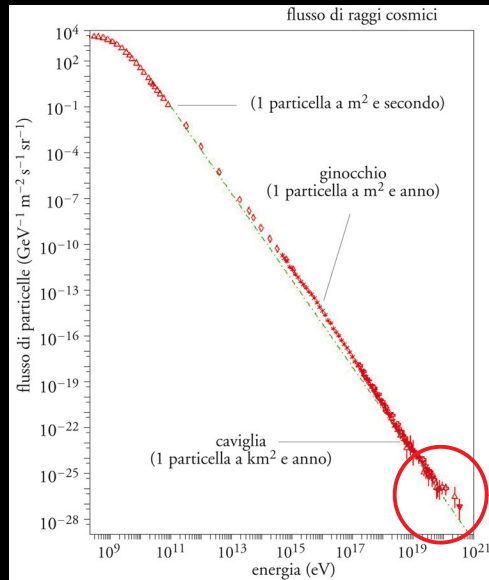
Telescope Array (TA)
700 km²



Pierre Auger
Observatory
3000 km²



La fine dello spettro dei raggi cosmici (cutoff)



I principali esperimenti per la misura indiretta

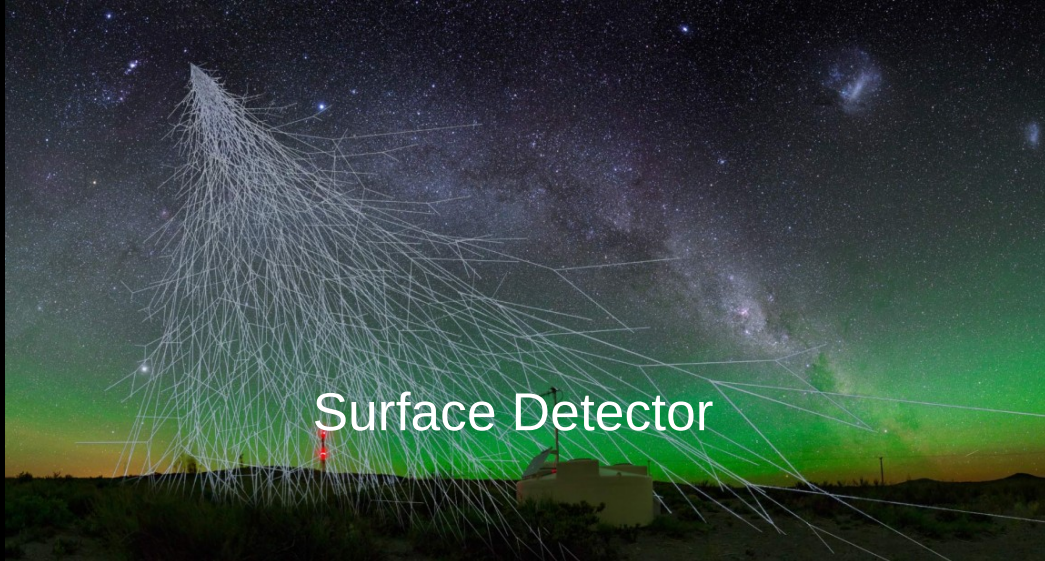
Raggi cosmici di altissima energia ($E > 10^{18}$ eV)

L'Osservatorio Pierre Auger
(Argentina) <https://vimeo.com/88029390>

Fluorescence Detector



Surface Detector

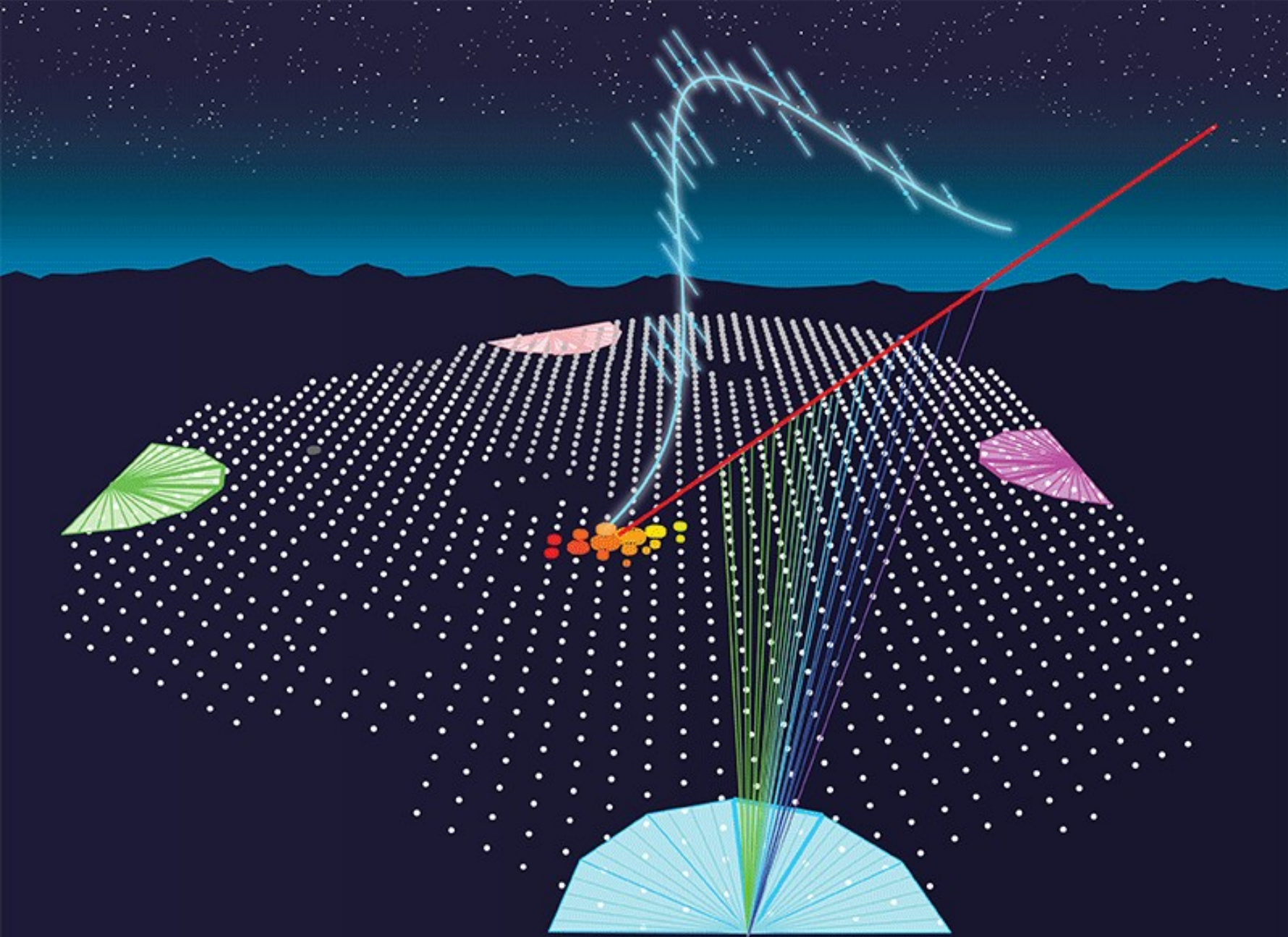


Telescope Array
(Stati Uniti d'America)



L'Osservatorio Pierre Auger

Raggi cosmici di altissima energia (UHECR)

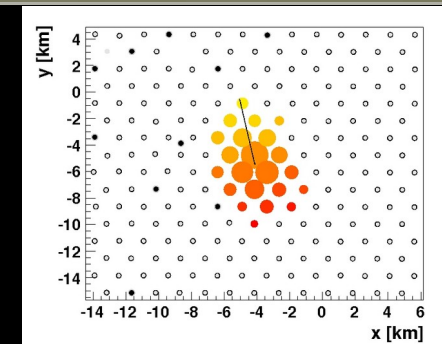
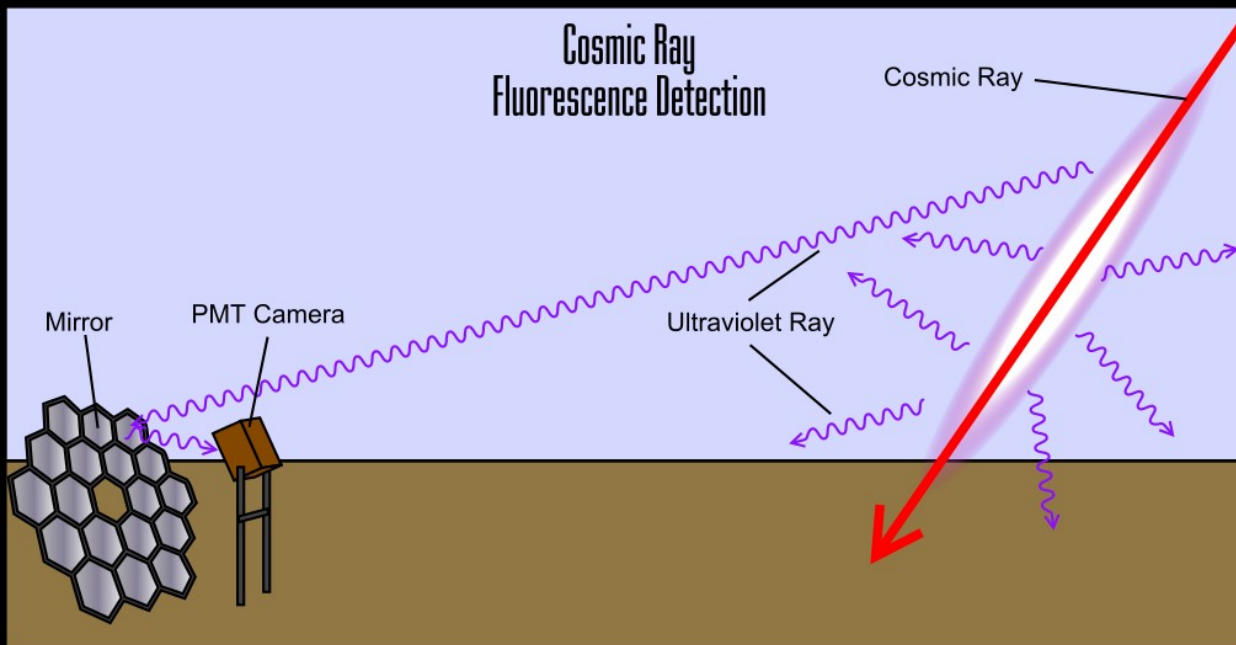
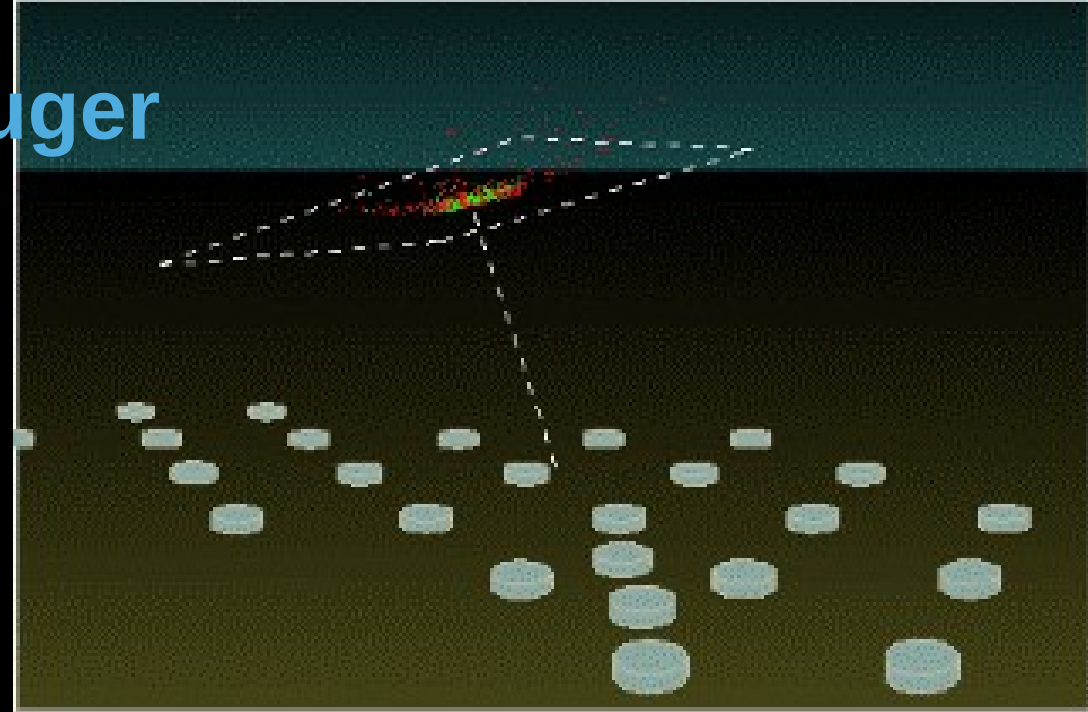


L'Osservatorio Pierre Auger

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



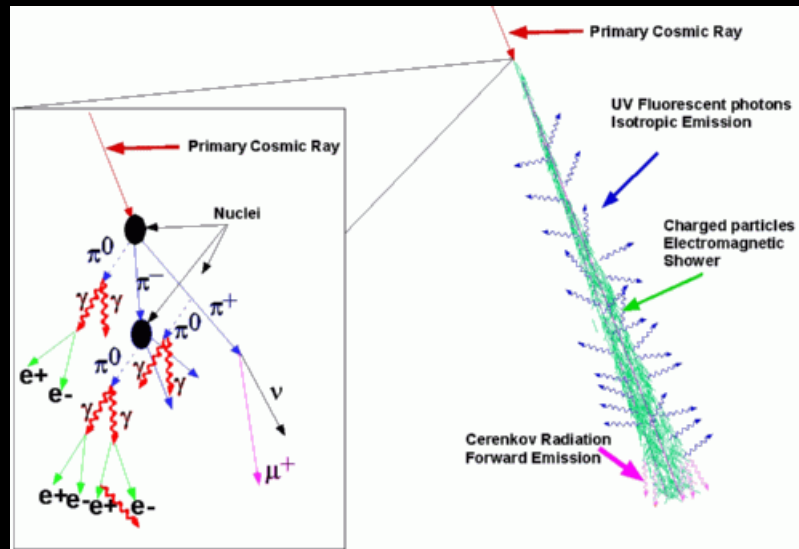
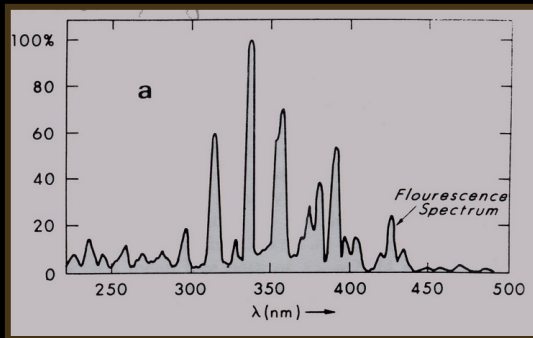
Il rivelatore di fluorescenza misura lo sviluppo in aria dello sciame, attraverso la rivelazione della luce prodotta durante lo sviluppo

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

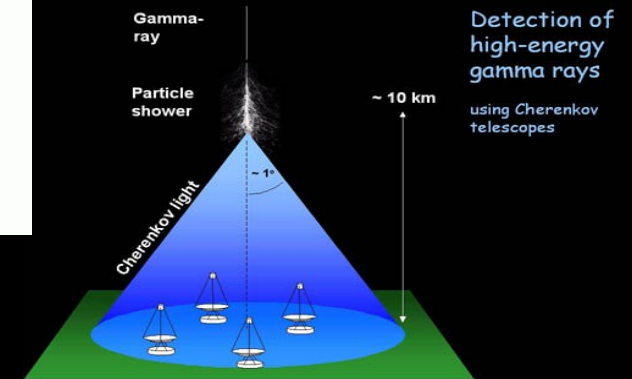
Emissione isotropa
(uguale in tutte le direzioni!)



Luce Cherenkov

Emessa dalle
particelle cariche
ultrarelativistiche
dello sciame

Fortemente piccata in
avanti!

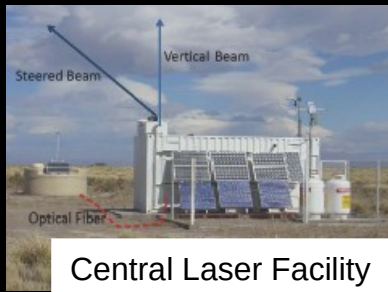
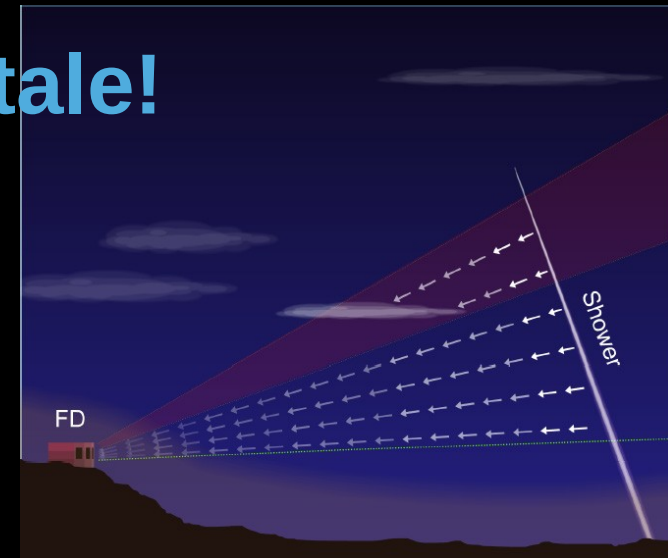


L'atmosfera é parte del rivelatore!

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 ...

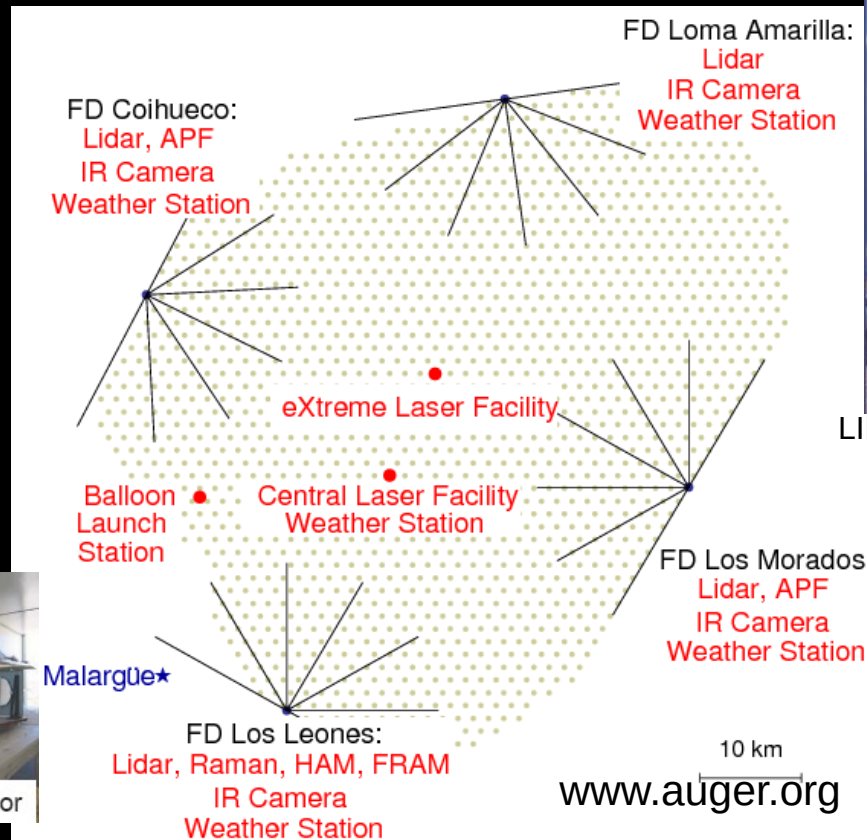
quindi va monitorata continuamente!



Central Laser Facility



Phase Function Monitor



LID



FRAM

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.