



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



DSFC
Dipartimento
di Scienze Fisiche
e Chimiche



I RAGGI COSMICI

Francesco Salamida
Università dell'Aquila & LNGS



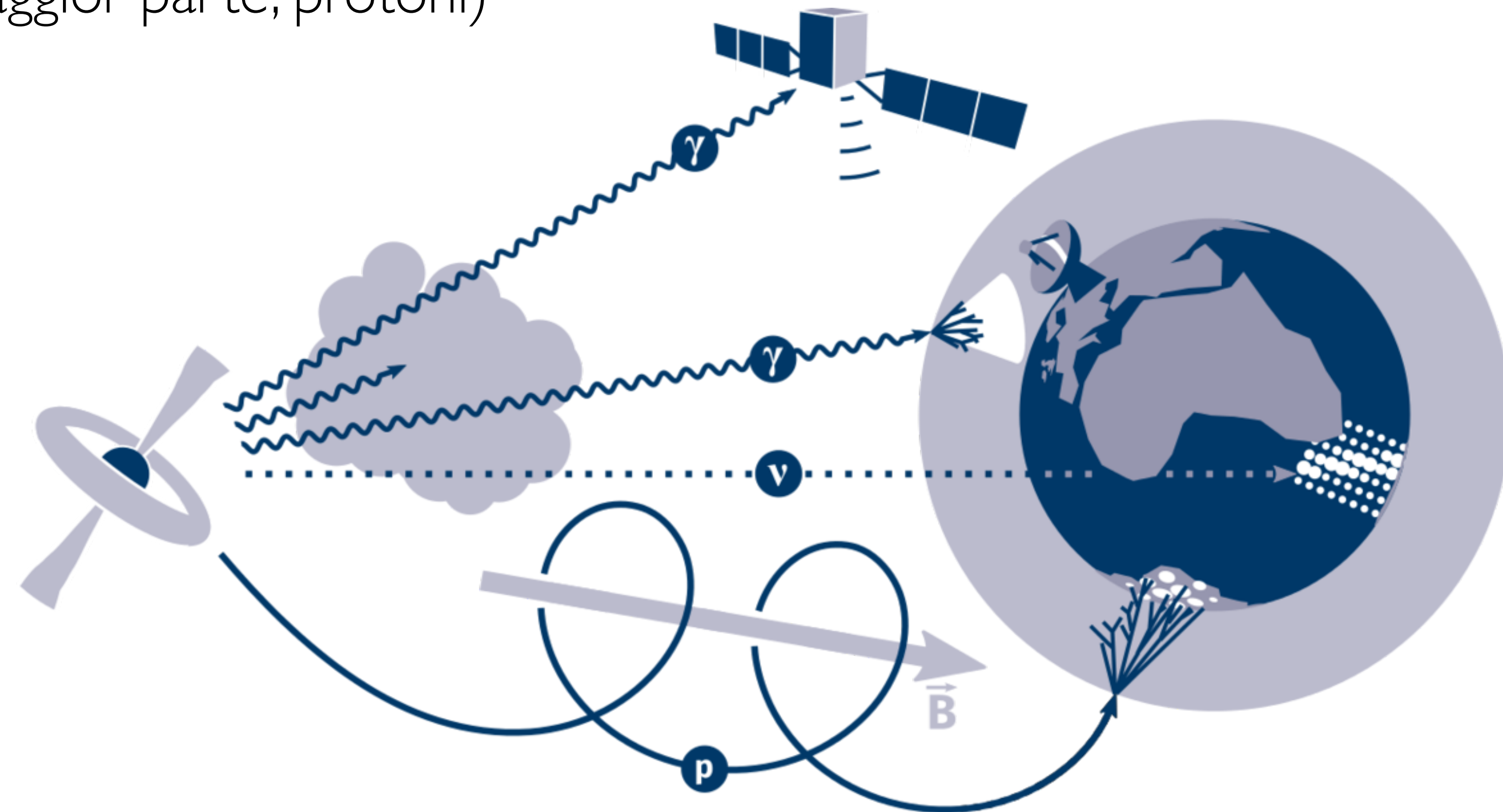
I RAGGI COSMICI

Che cosa sono i raggi cosmici?

- Particelle subatomiche (atomi ionizzati: per la maggior parte, protoni)

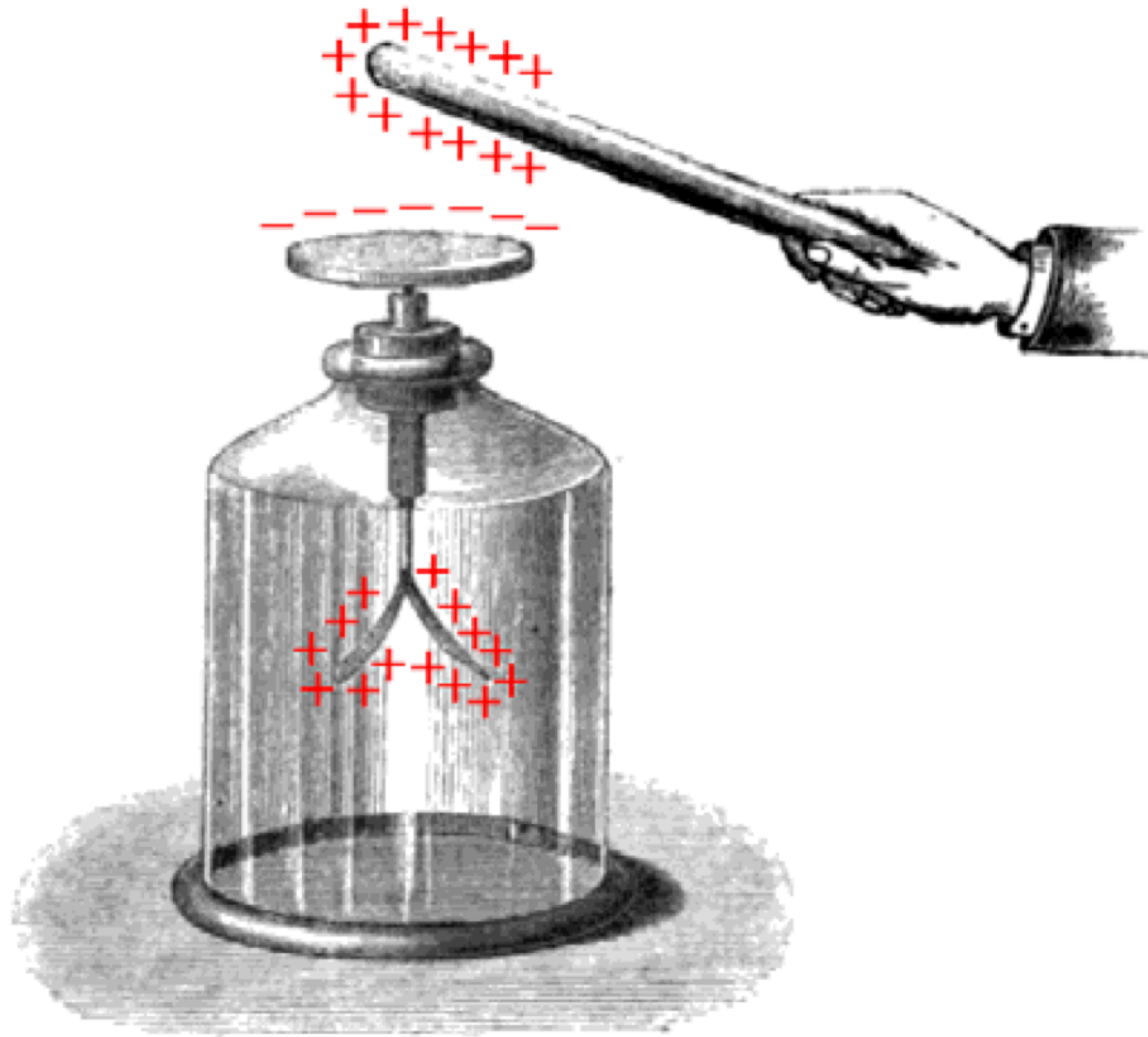
Perché studiamo i raggi cosmici?

- Possono avere energie non raggiungibili sulla Terra
- Costituiscono un modo complementare per studiare fenomeni fisici/astrofisici (sorgenti, spazio interstellare e intergalattico, interazioni)
- Devono essere schermati per permettere lo studio di eventi rari (neutrini, materia oscura)
- I Raggi Cosmici causano errori nell'elettronica, i computer infatti sono soggetti a un errore per 256 MB di RAM al mese a causa dei Raggi Cosmici (IBM).
- Hanno delle implicazioni non banali sulla nostra vita (e.g viaggi nello spazio)



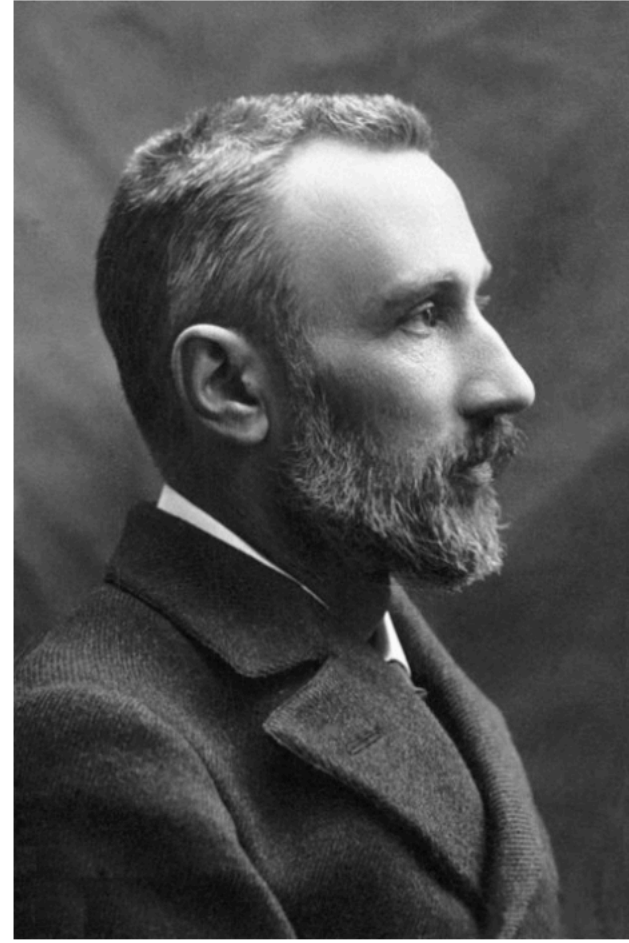
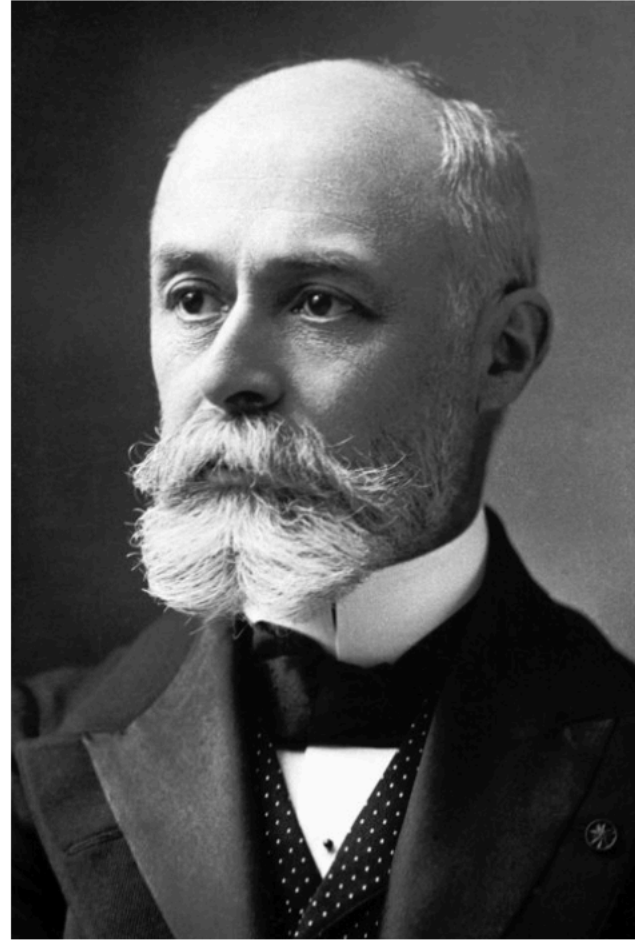
INTRODUZIONE: UN PO' DI STORIA

EVIDENZE OSSERVATIVE

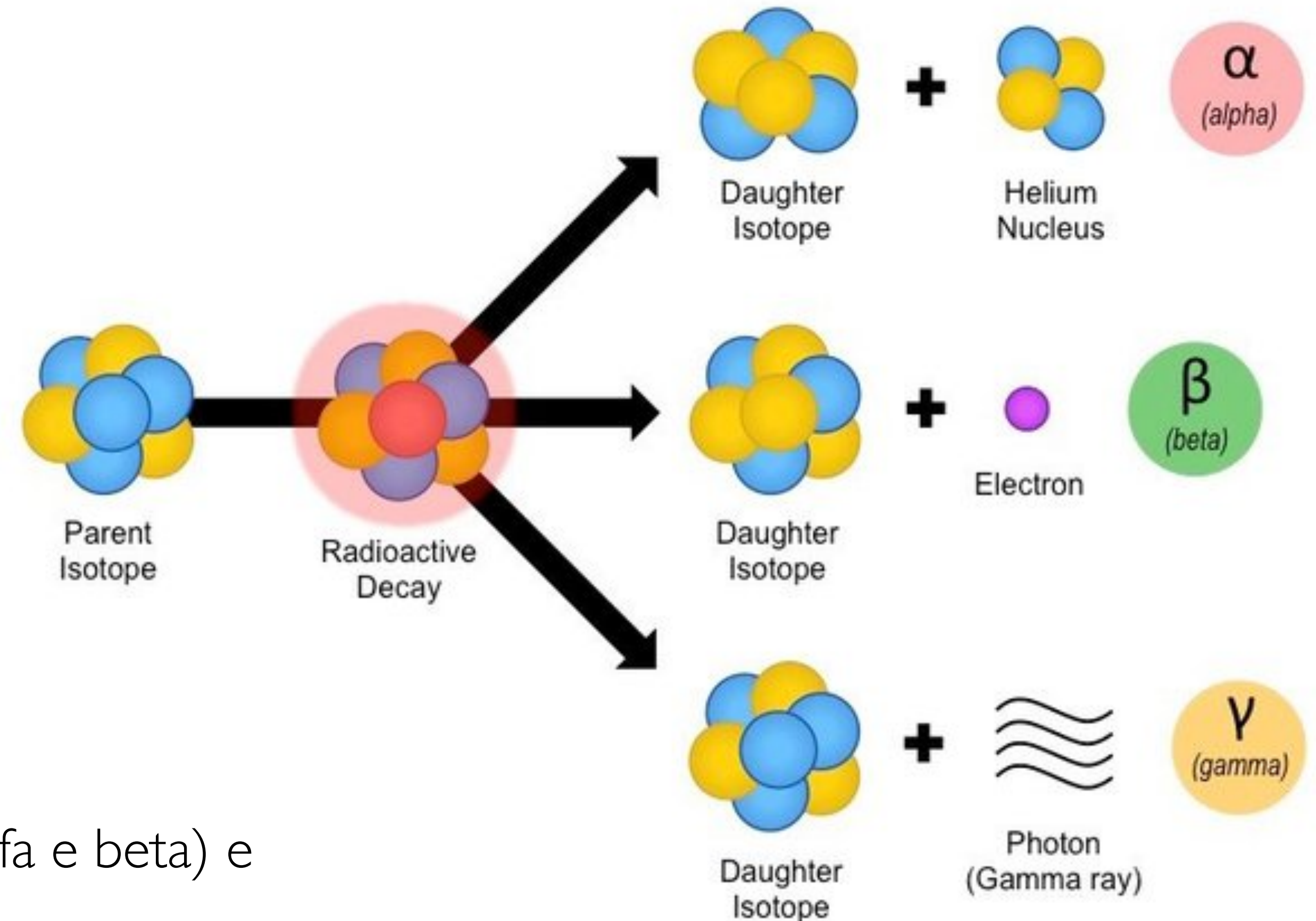


- L'elettroscopio, se caricato e lasciato isolato per qualche tempo, si scarica: perché?
- Effetto noto già ai tempi di Coulomb, cioè alla fine del 1700

POSSIBILE SPIEGAZIONE

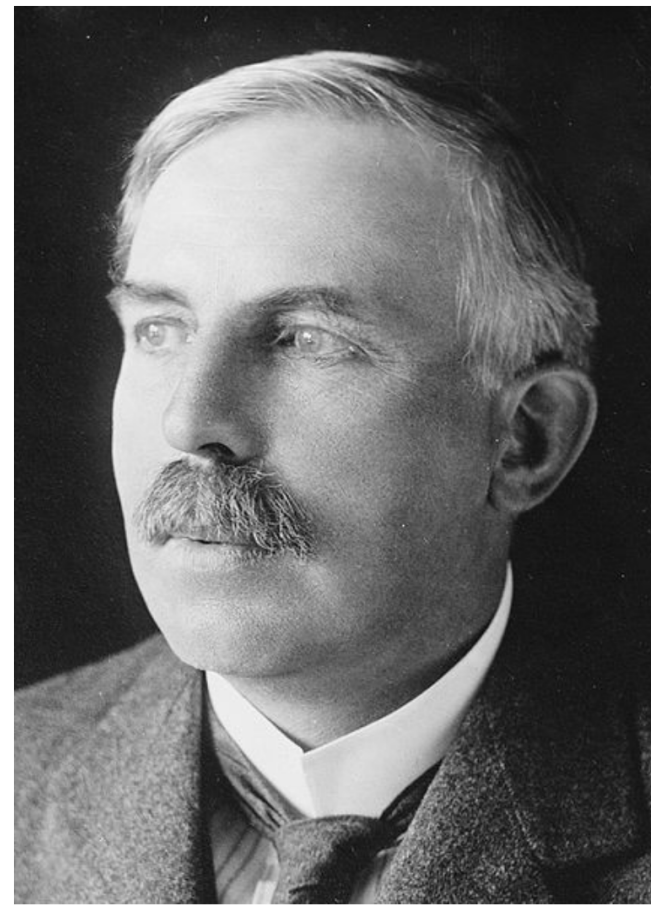


Henri Bequerel - Pierre Curie - Marie Curie
Nobel 1903

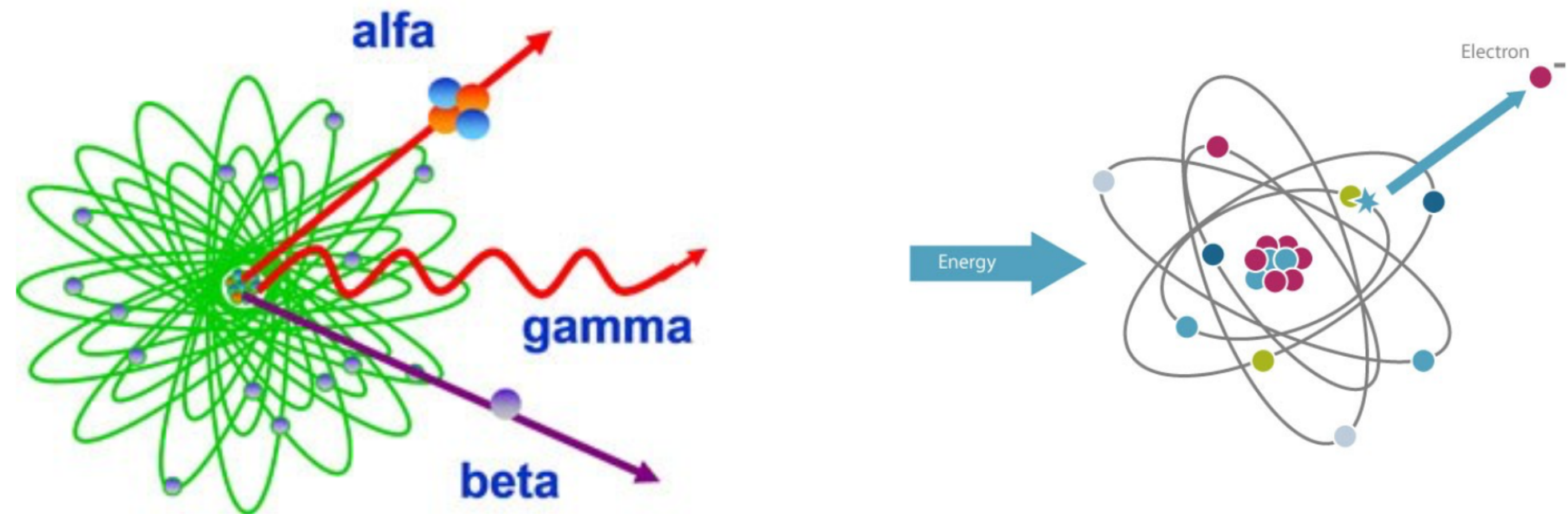


- Ogni materiale contiene nuclei radioattivi
- I nuclei radioattivi emettono particelle cariche (alfa e beta) e neutre (gamma)
- Possibile spiegazione: radioattività naturale

POSSIBILE SPIEGAZIONE



Ernest Rutherford
Nobel 1908



- Le particelle cariche attraversando la materia strappano gli elettroni atomici esterni: ionizzazione
- Nell'elettroscopio le cariche + (ioni) o - (elettroni) sono attratte dalle foglie dell'elettroscopio e azzerano la carica.

VERIFICHE SPERIMENTALI



Theodor Wulf
1868 - 1946

a 300 m attesi
~0.4 ioni/cm³



3.5 ioni/cm³

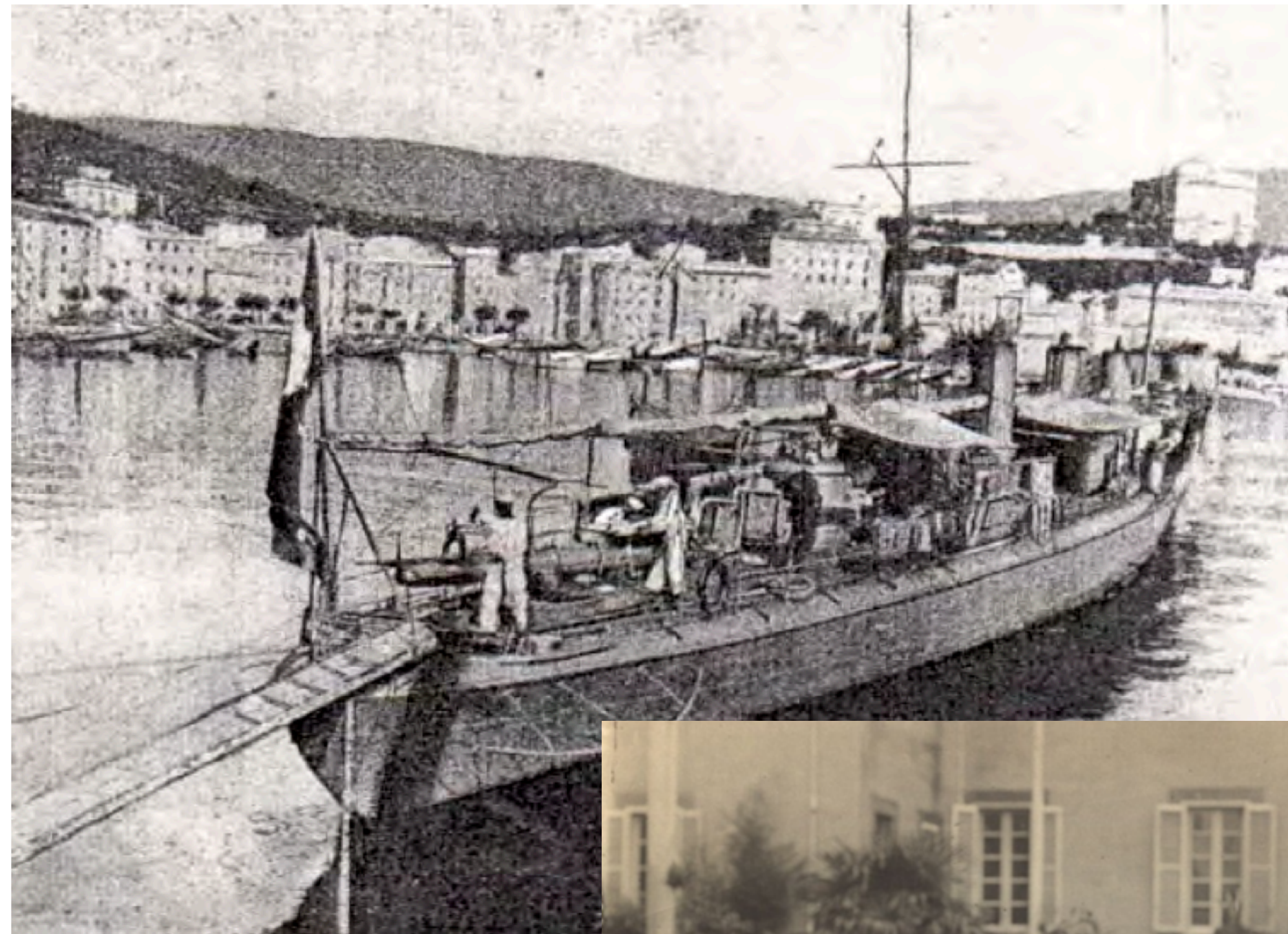
6 ioni/cm³

- Ionizzazione specifica = Numero coppie e-ione / Volume
 - Maggiore la ionizzazione specifica \Rightarrow più veloce è la scarica dell'elettroscopio.
- La radiazione più penetrante (gamma) si riduce a $\sim 1/3$ dopo 80 m: a 310 m ci si aspetta che la ionizzazione specifica sia quasi nulla.
- Si trova invece che la ionizzazione si riduce (circa $1/2$) ma molto meno del previsto!
- Ci sono particelle ionizzanti che non vengono dalla Terra ?

VERIFICHE SPERIMENTALI



Domenico Pacini
1878 - 1934



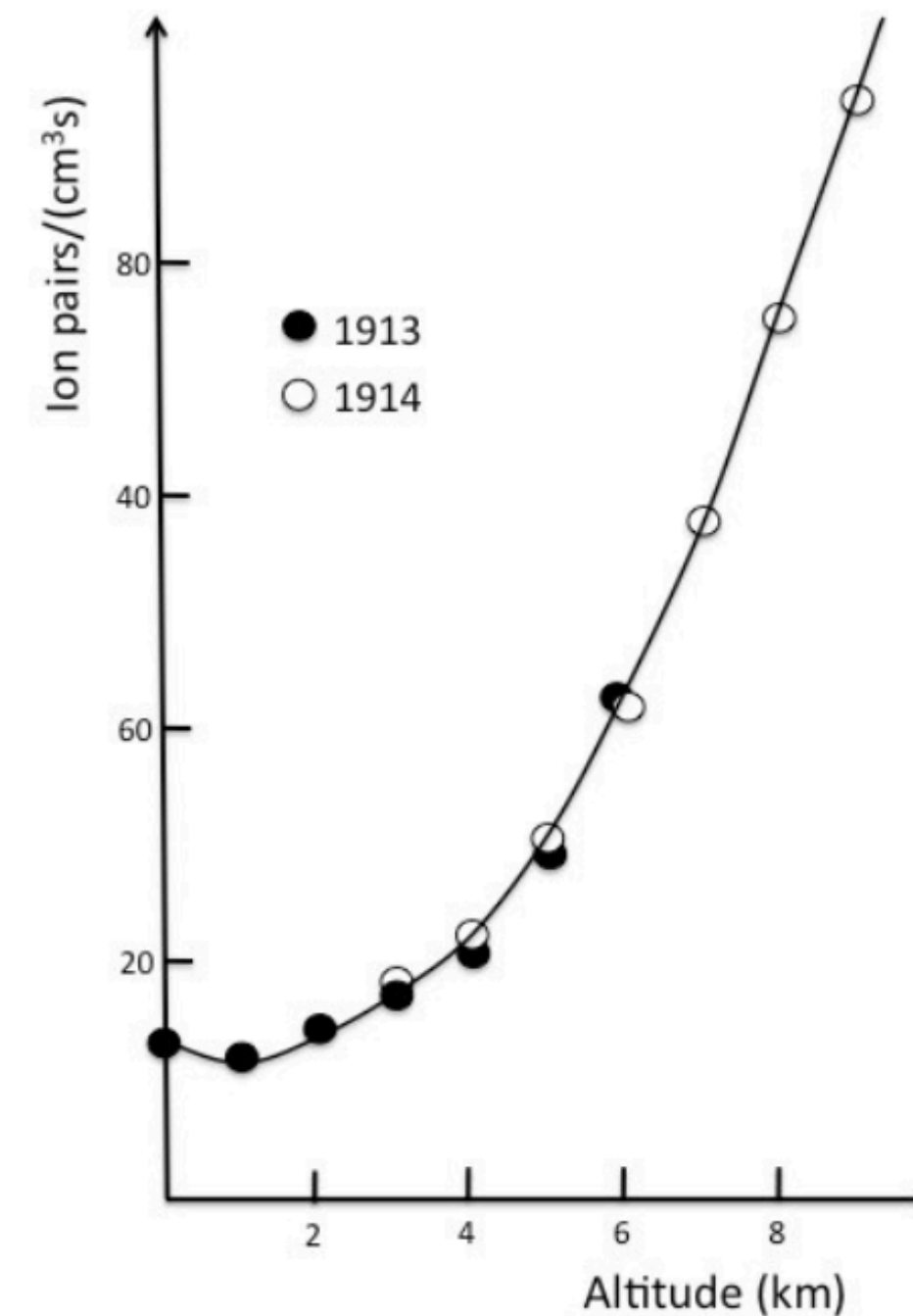
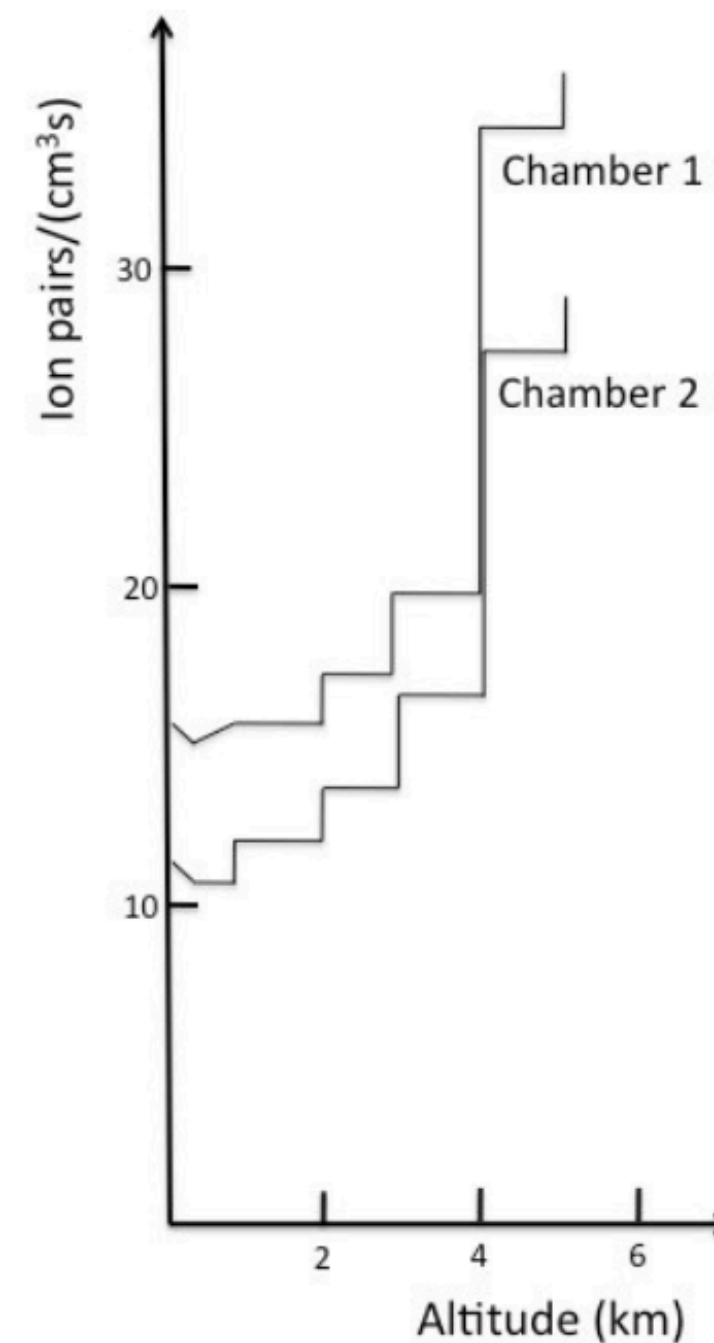
- Misure di ionizzazione specifica con un elettroscopio
~ 3m sotto il livello del mare (Livorno) e successivamente del lago (Bracciano).
- Trova che è minore di quella alla superficie e dunque “viene da sopra!”



VERIFICHE SPERIMENTALI



Victor Hess
1883 - 1964
Nobel 1936

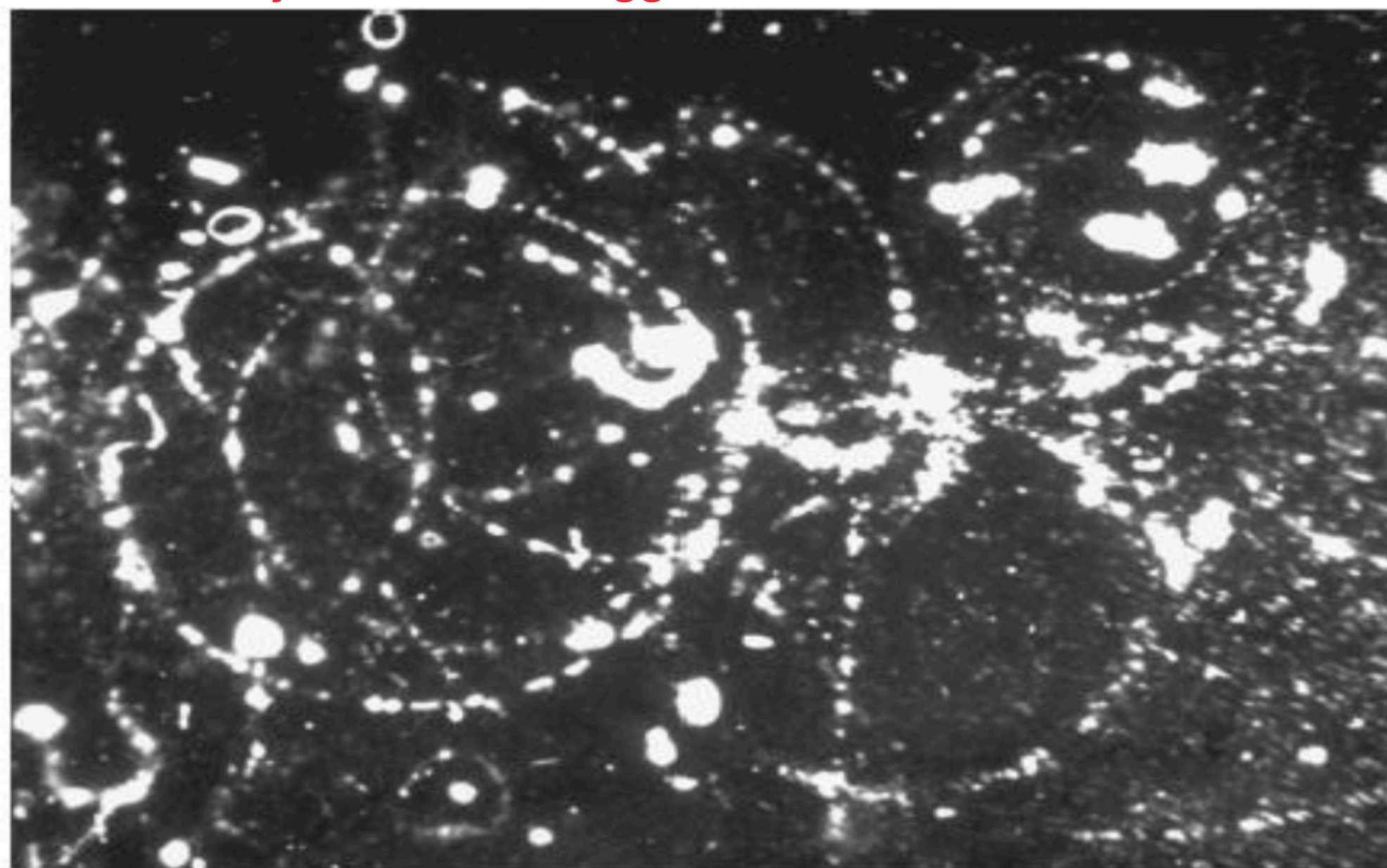


- Hess raggiunge i 5200 metri a bordo della mongolfiera "Böhmen" (Boemia).
- Stabilisce in modo inequivocabile che la radiazione ionizzante viene dall'alto!
- Nel 1913–1914, Werner Kolhörster conferma i risultati estendendo la misura a 9 km

FOTONI O PARTICELLE ?

- 1930, Bruno Rossi: se la radiazione cosmica è costituita da particelle cariche, si possono osservare effetti dovuti al campo geomagnetico terrestre
- Controversia tra Millikan (ipotizza che si tratti di fotoni) e Compton (ipotizza che si tratti di particelle cariche)

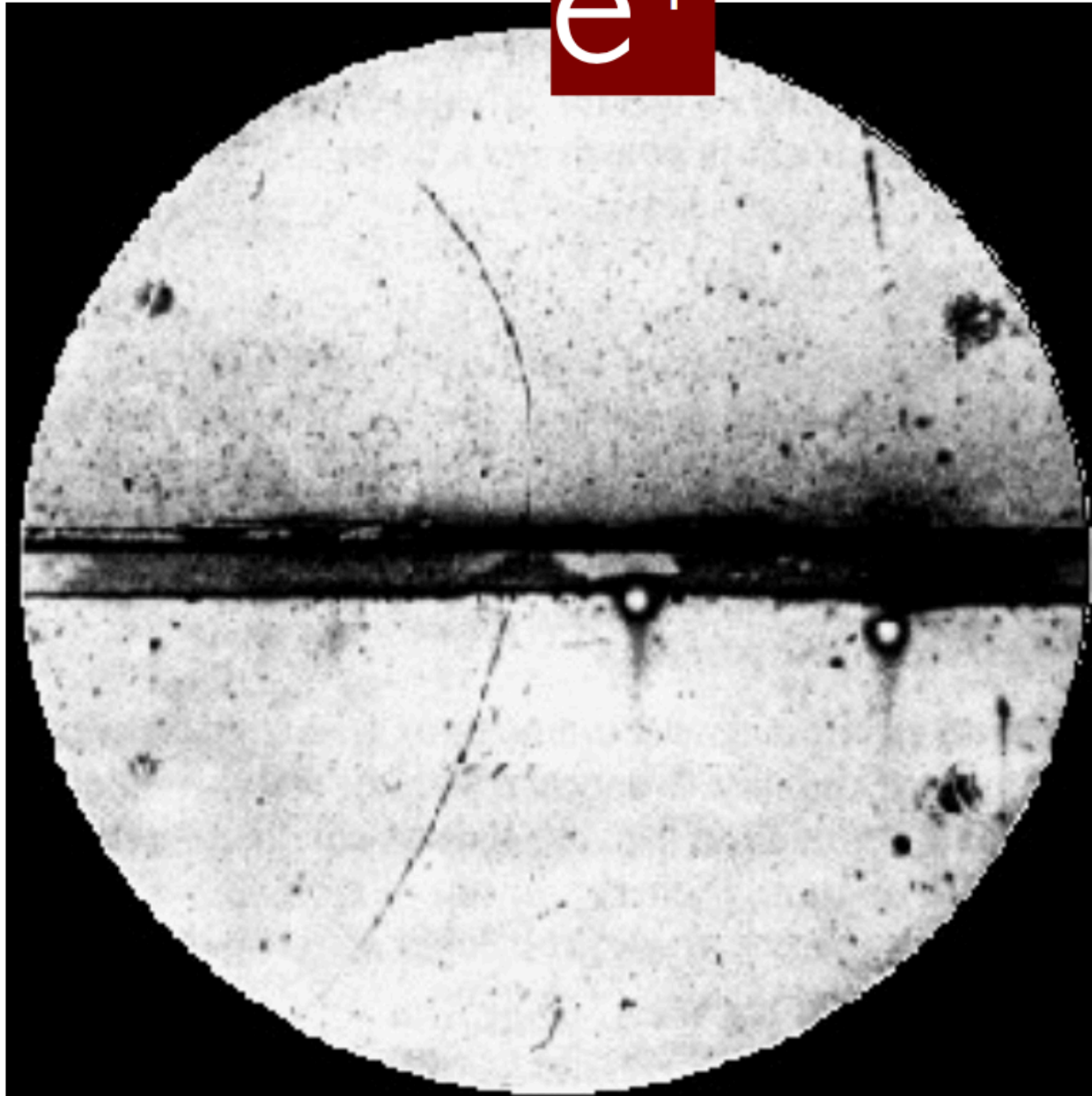
D. Skobeltsyn, evento da raggi cosmici in camera a bolle, 1927



- 1932: primi esperimenti con contatori Geiger-Mueller usati in coincidenza
- Compton, esperimenti indipendenti, 60 fisici in tutto il mondo
- Conferma: i raggi cosmici sono particelle cariche

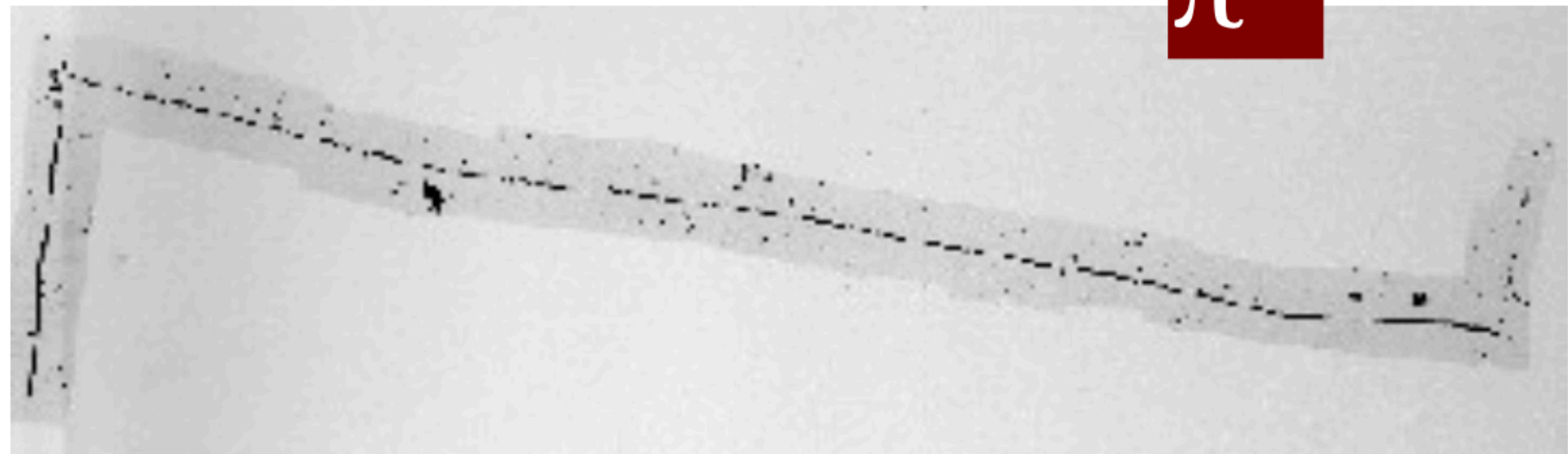
NUOVE SCOPERTE

e^+



- 1932: Carl Anderson scopre il positrone
- 1937: Neddermeyer e Anderson scoprono il muone
- Prima degli anni '50 costituiscono il principale strumento di studio della Fisica delle Particelle

π^+

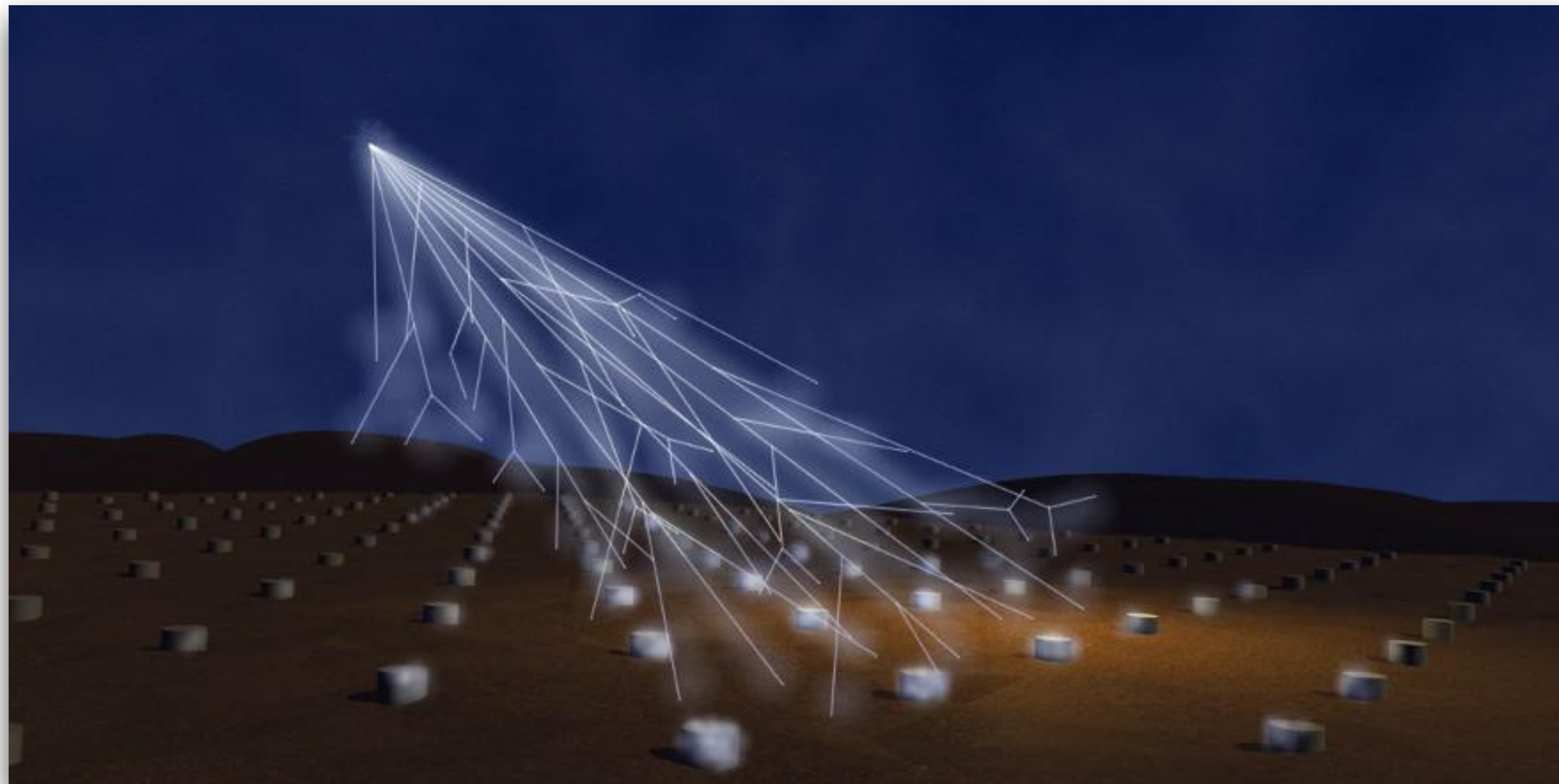


ENERGIE ESTREME

- 1934: Bruno Rossi misura particelle in coincidenza temporale a grandi distanze (~centinaia di metri): prima evidenza di uno sciame atmosferico esteso
- 1938-39: Pierre Auger osserva per la prima volta uno sciame atmosferico esteso di energia 10^{13-14} eV
- 1962: Linsley e Scarsi osservano i raggi cosmici a energie ultra-alte

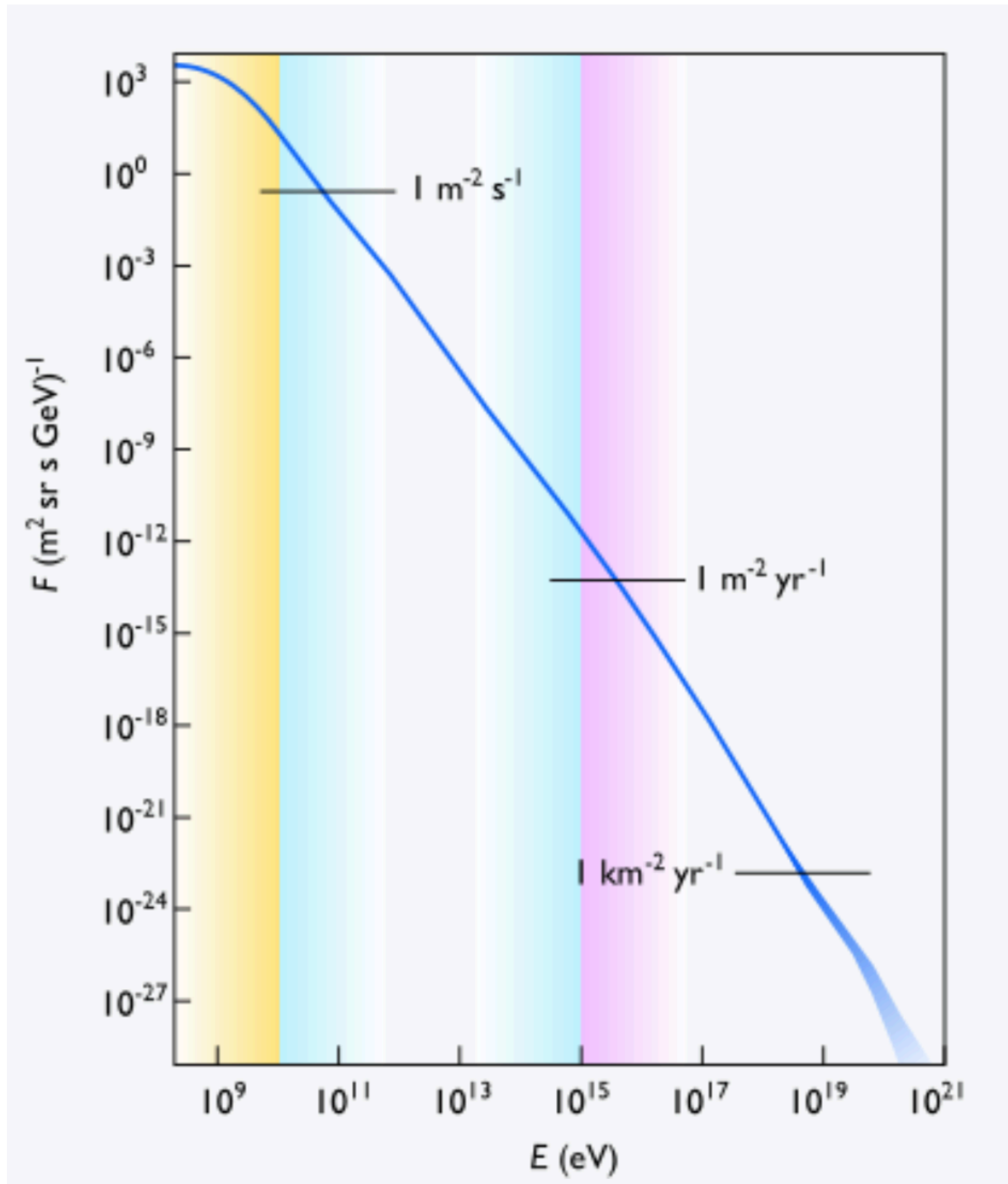


Bruno Rossi
1905 - 1993



I RAGGI COSMICI: MISURE E TEORIA

COSA SI MISURA ?



Unità di misura in Fisica delle Particelle

Un elettronvolt (eV) è l'energia cinetica acquisita da un elettrone accelerato da un campo elettrico di un volt

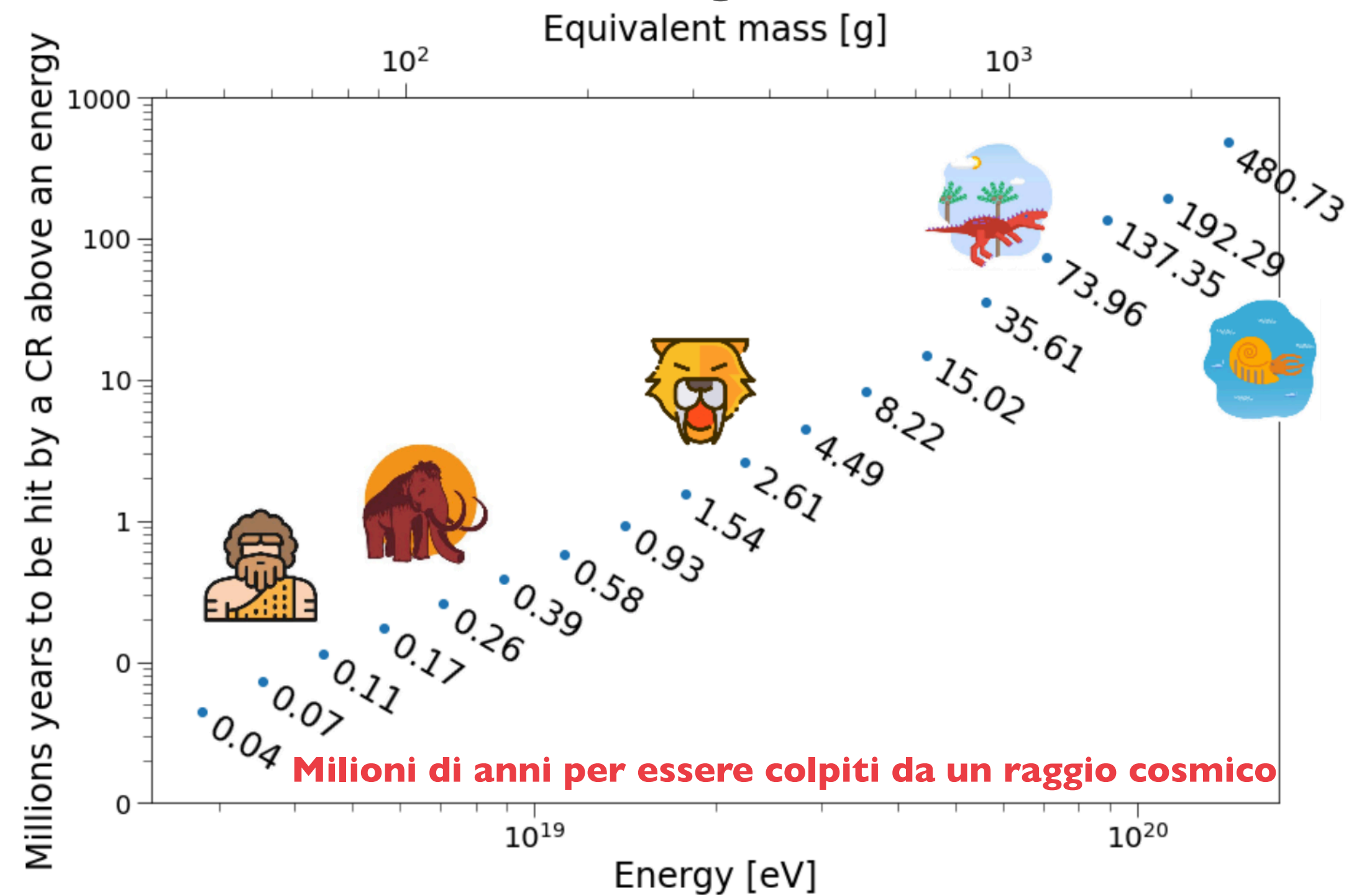
$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$$

Una zanzara ha una energia cinetica di $\sim 1 \text{ TeV}$



ACCELERATORI NATURALI DI PARTICELLE

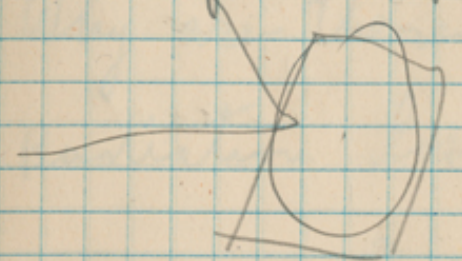
137

Dec 4 1948

Theory of cosmic rays

a) Energy acquired in collisions against cosmic magnetic fields

Non relativistic case



MV^2

(M = mass of particle V = velocity of moving field)

(Proof: Head on collision gives energy gain)

$$\frac{M}{2}(v+2V)^2 - \frac{Mv^2}{2} = \frac{M}{2}(4vV + 4V^2) =$$

$$= M(2vV + 2V^2) \quad \text{Prob.} = \frac{v+V}{2v}$$

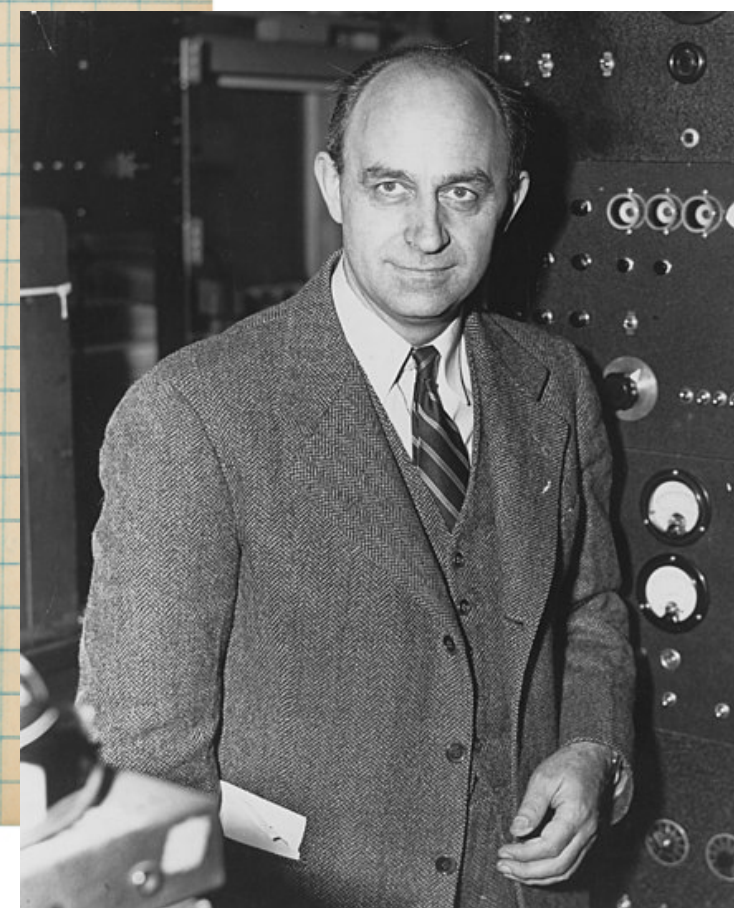
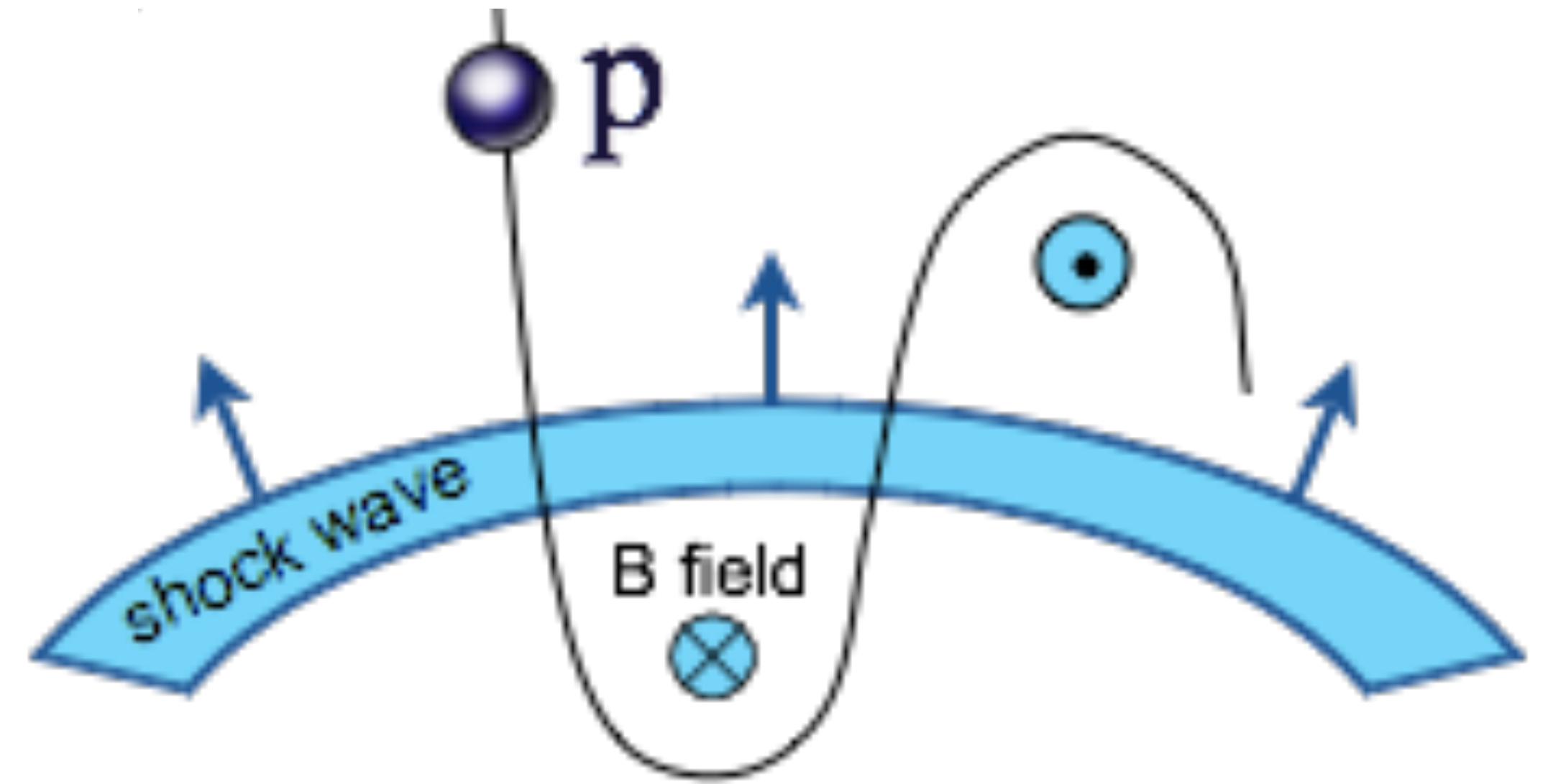
Running after collision (prob. = $\frac{v-V}{2v}$) gives energy gain

$$M(-2vV + 2V^2)$$

Average gain order

$$\frac{MV^2}{w\beta^2}$$

Relativistic: order

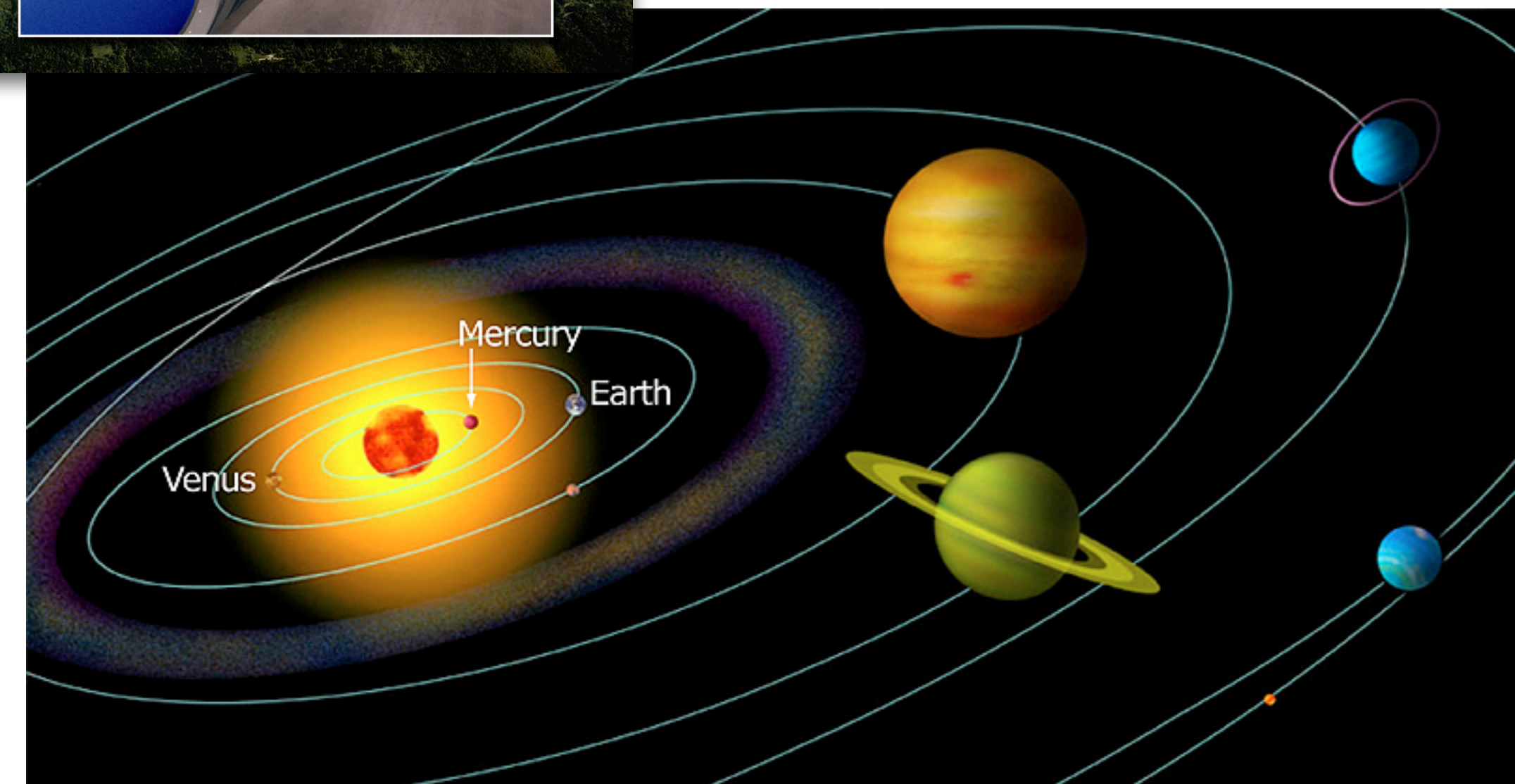
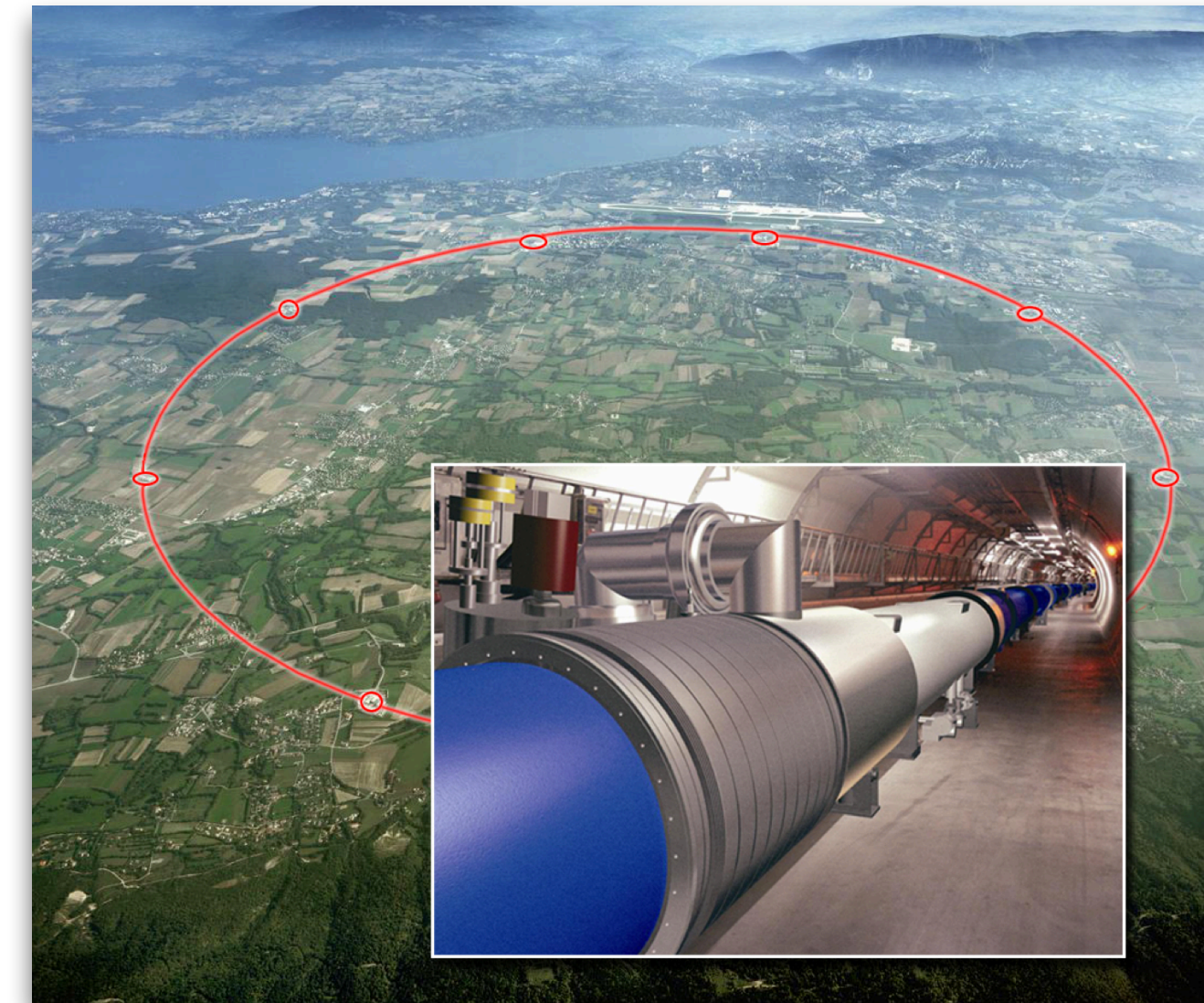
$$\frac{w\beta^2}{w\beta^2}$$


Enrico Fermi
1901 - 1954
Nobel 1938

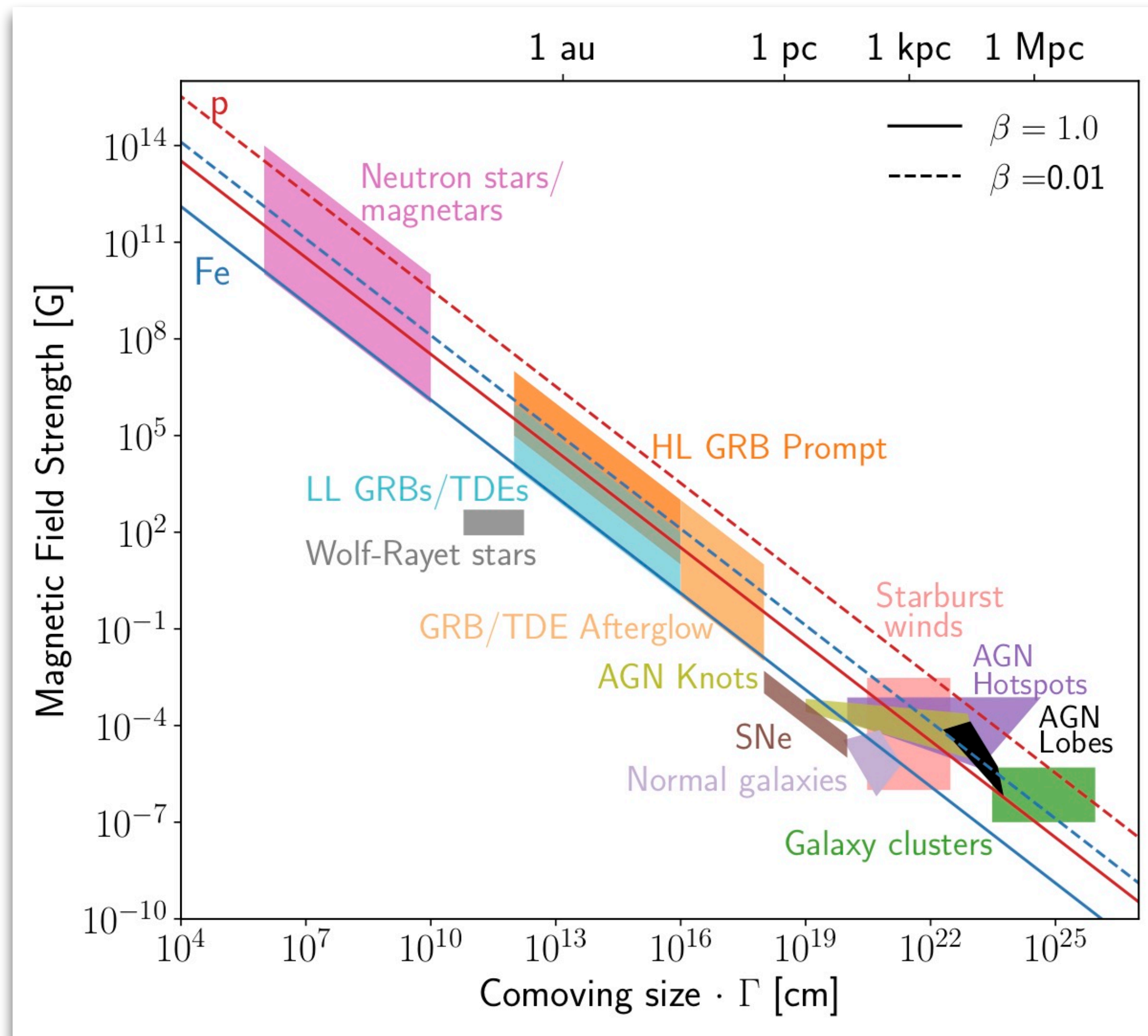
ACCELERATORI NATURALI DI PARTICELLE

Circonferenza di LHC 27 km

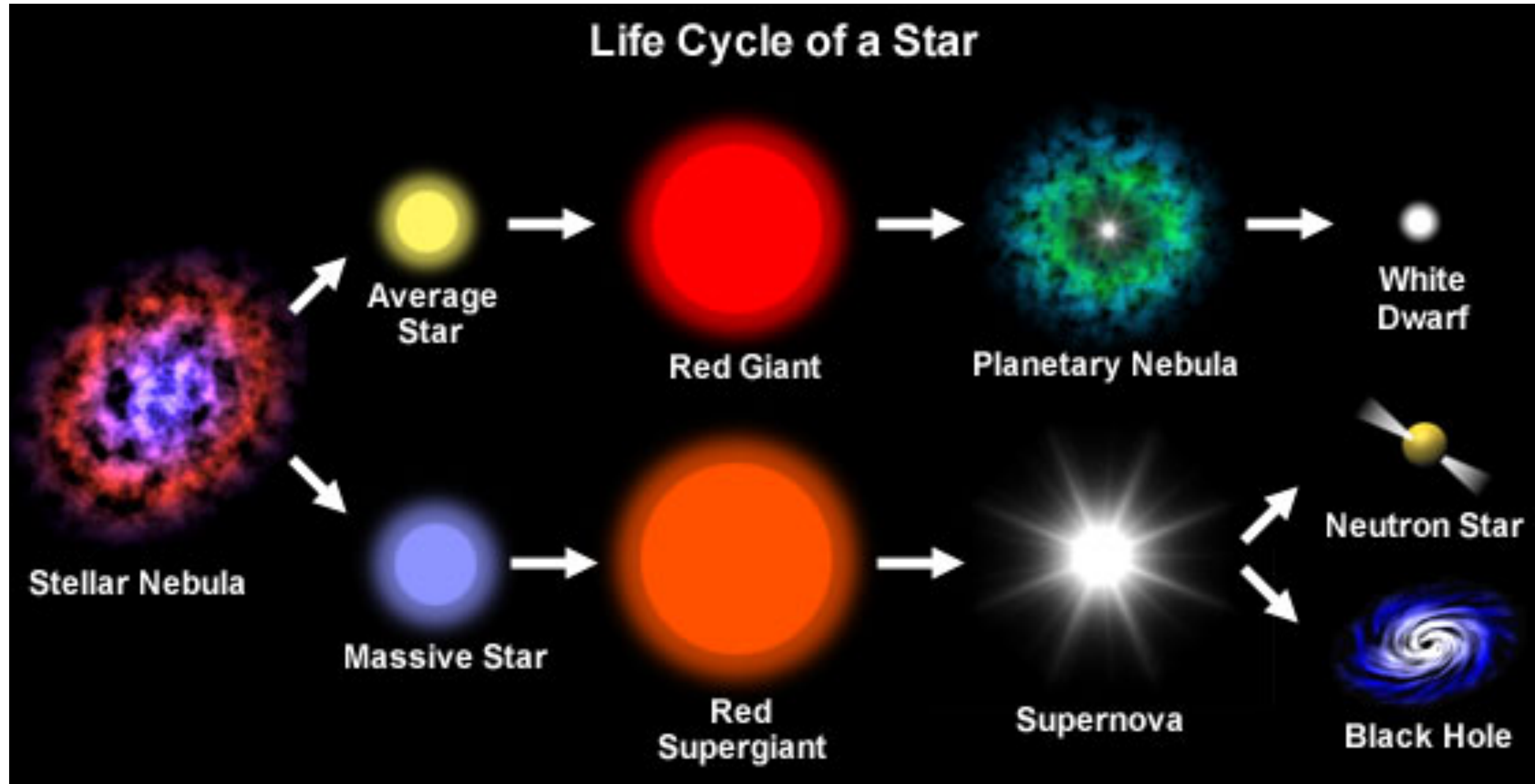
$$E_{\max} \propto qBR$$



Orbita di Mercurio 360 000 000 km

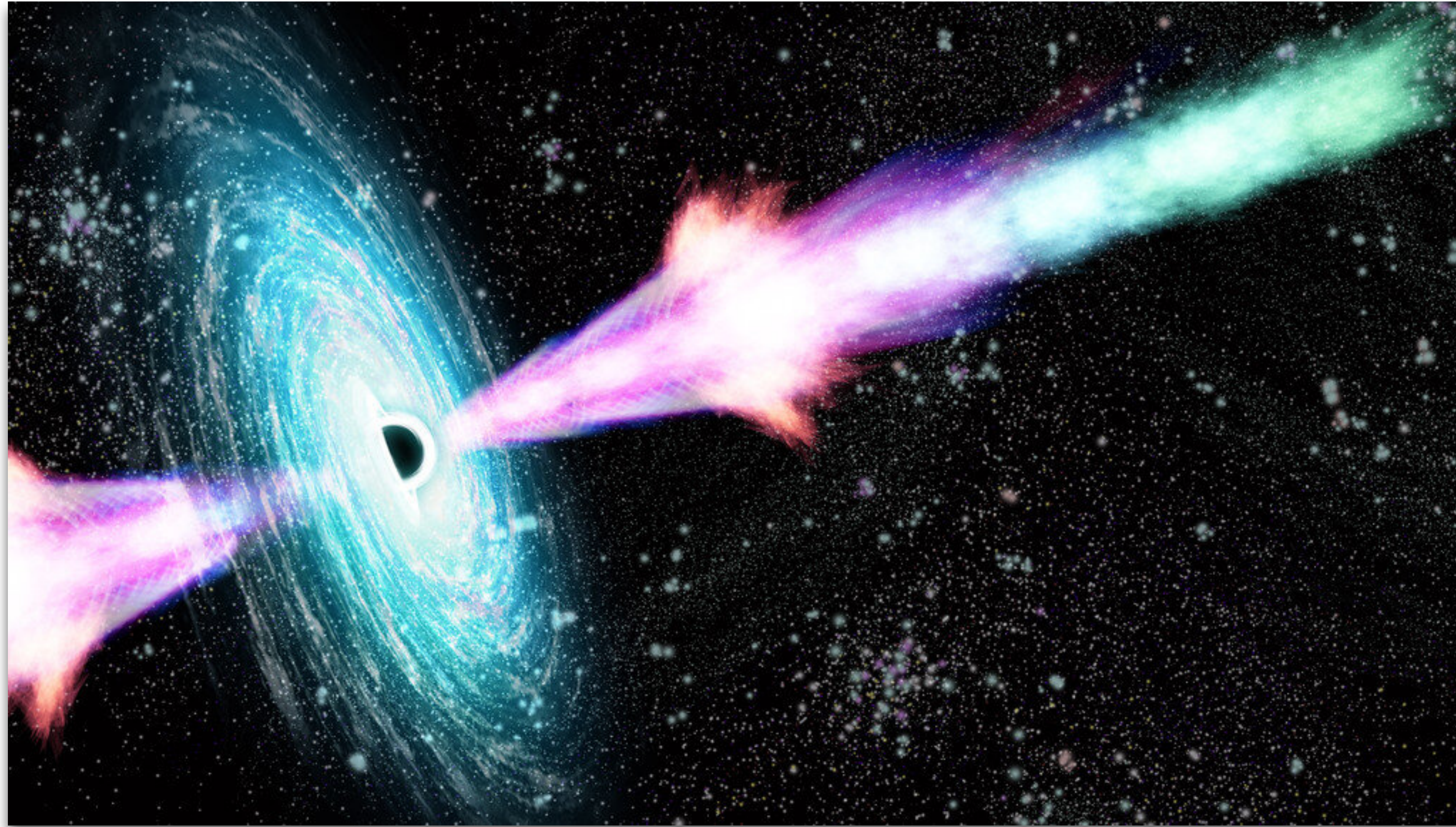


ACCELERATORI NATURALI DI PARTICELLE

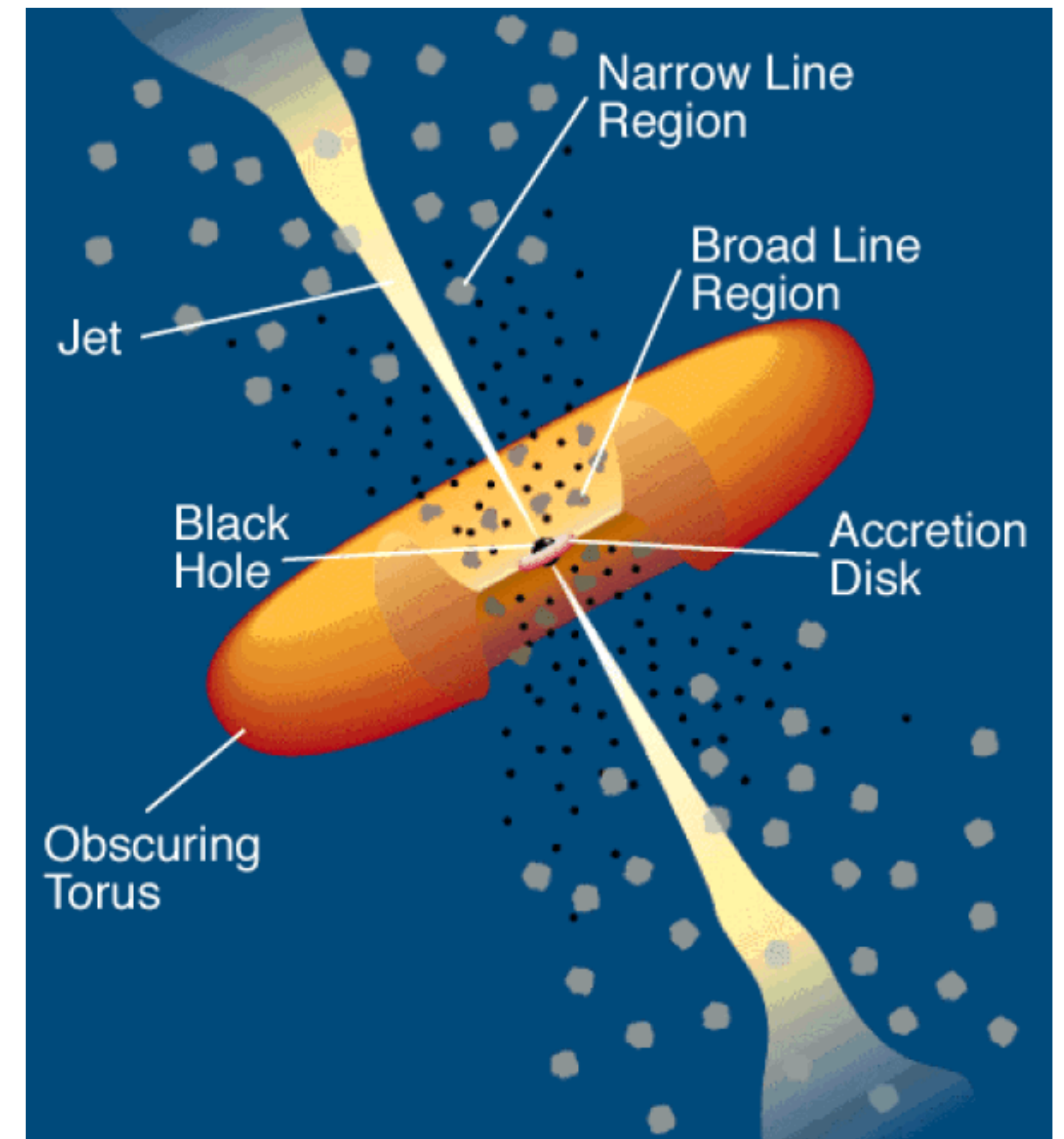


Resti di Supernovae

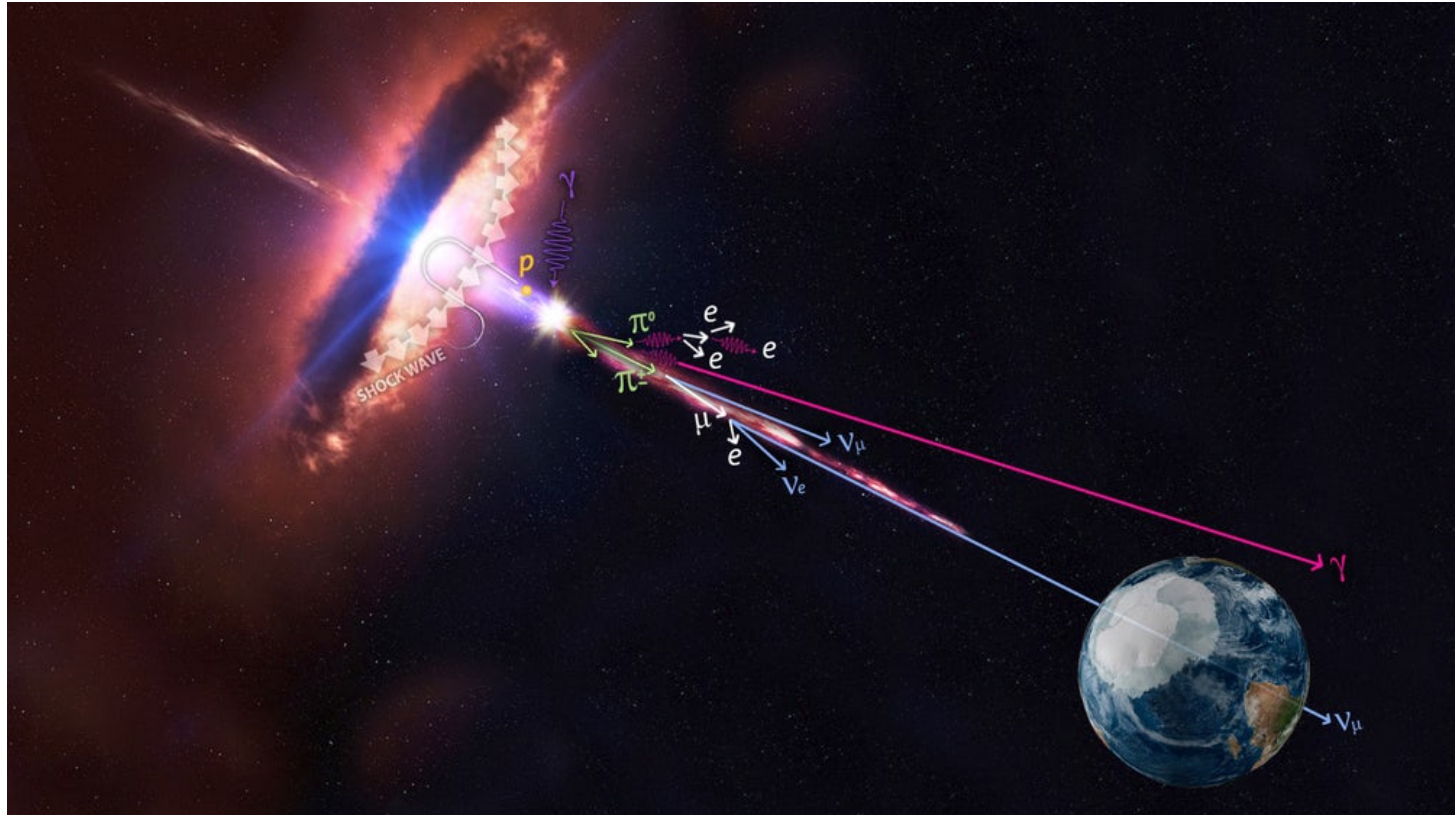
ACCELERATORI NATURALI DI PARTICELLE



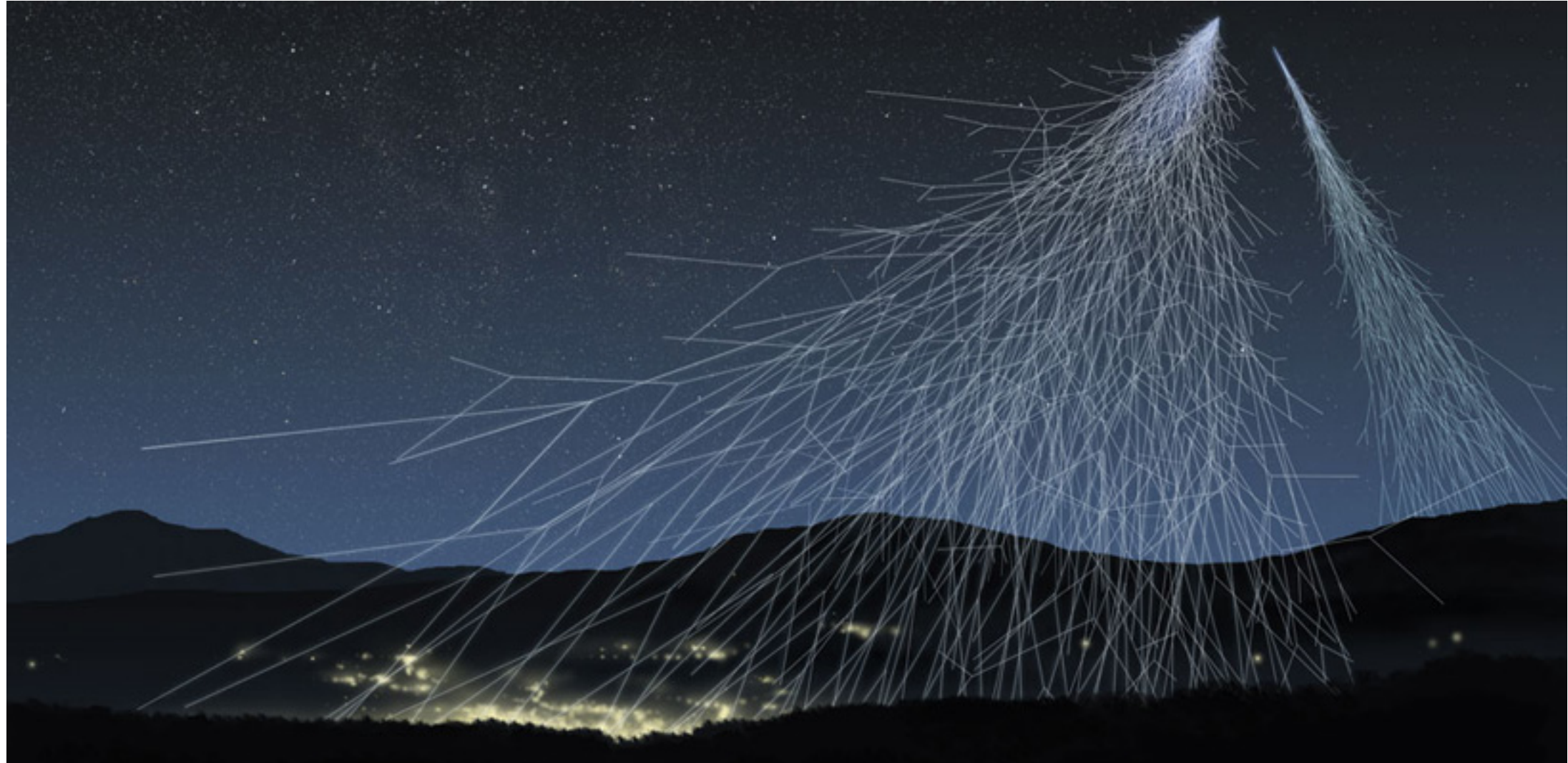
Nuclei galattici attivi



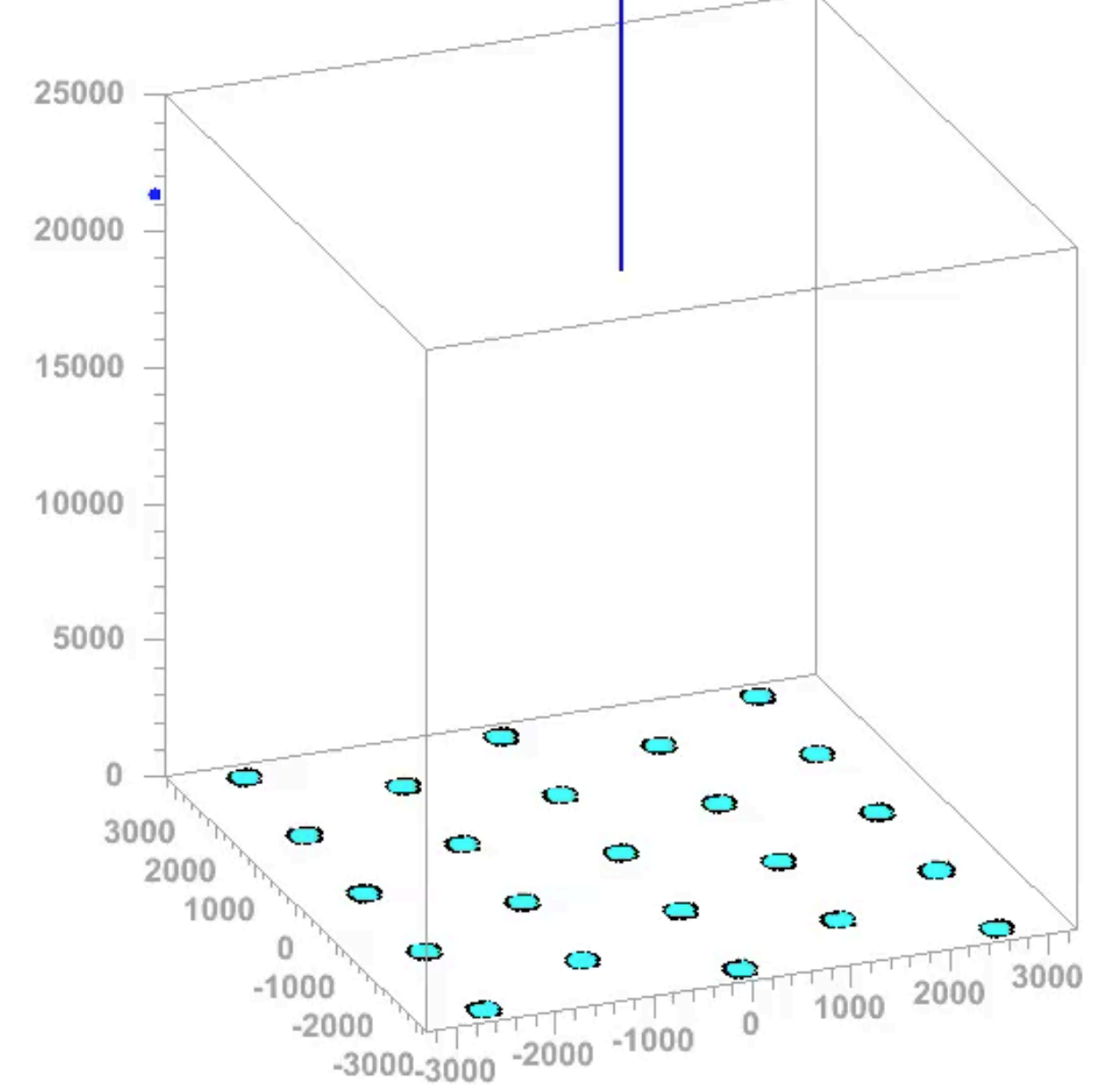
NELLO SPAZIO EXTRAGALATTICO



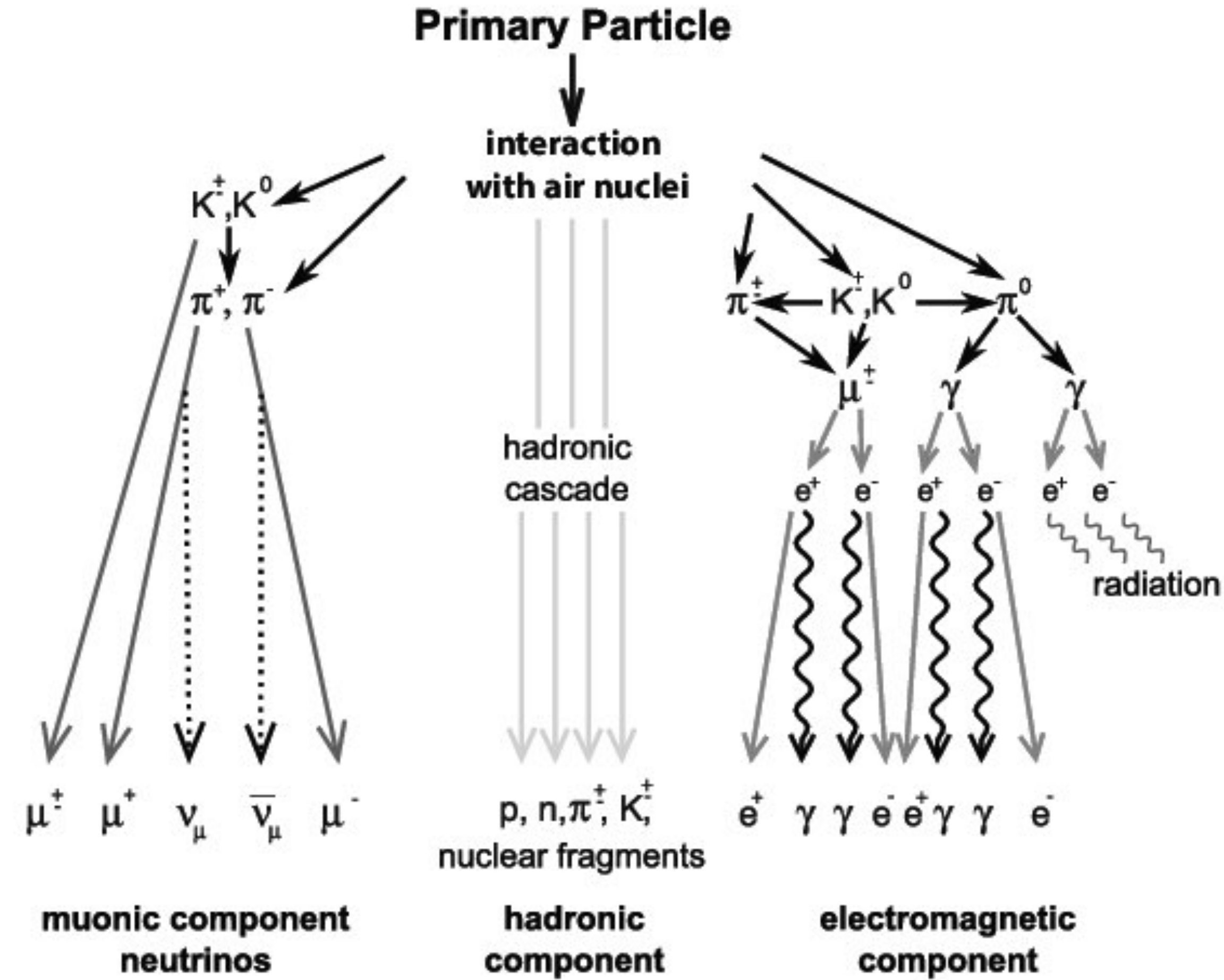
IN ATMOSFERA



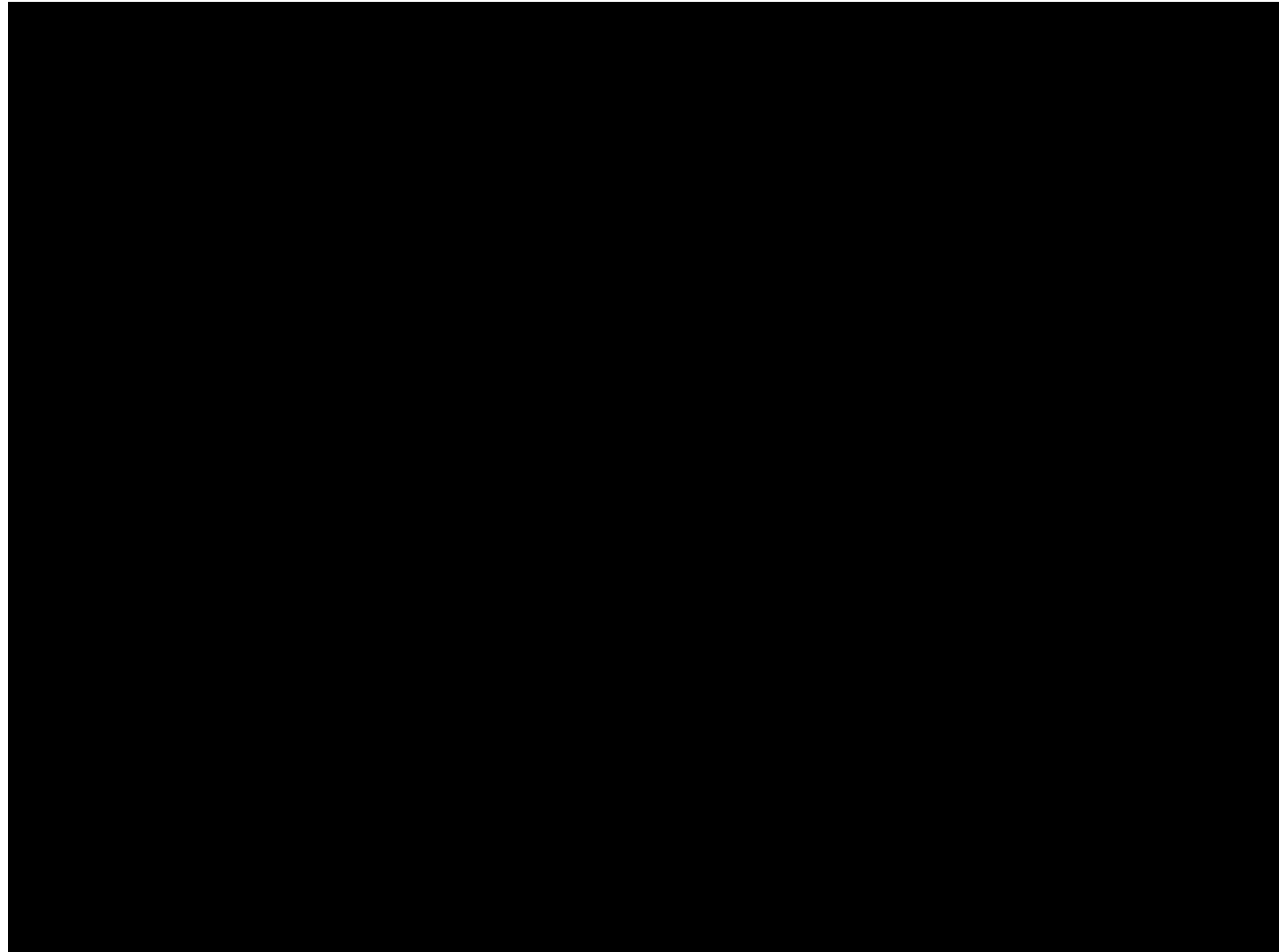
hadrons muons electrs neutrs 0.00 · 10⁻⁶ sec Proton 10¹⁴ eV
 21311 m



J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlruhe

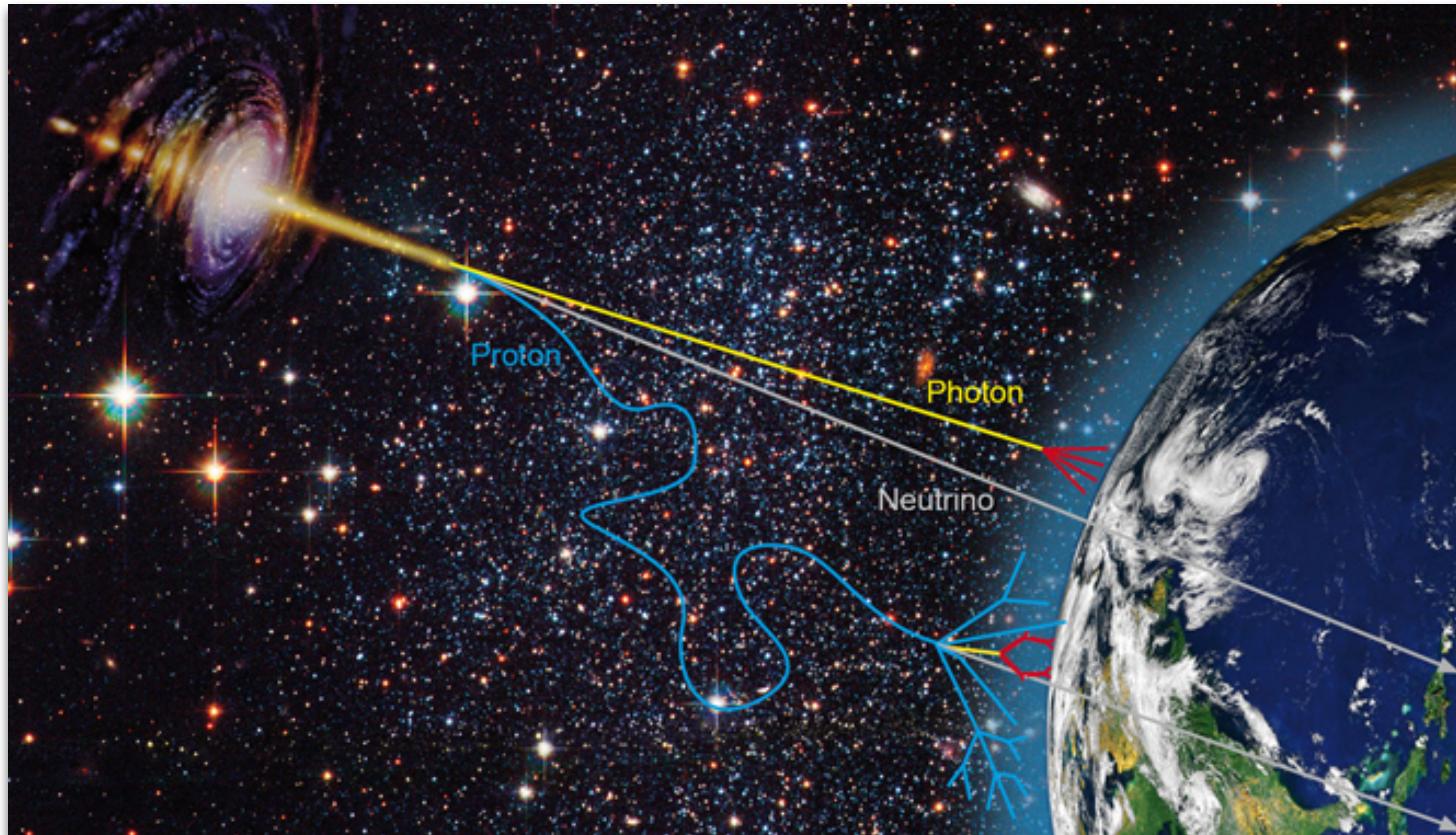


IL LUNGO VIAGGIO DEI RAGGI COSMICI



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

COSA VOGLIAMO MISURARE ?



- Energia
- Direzione di arrivo
- Specie nucleare

PIERRE AUGER OBSERVATORY

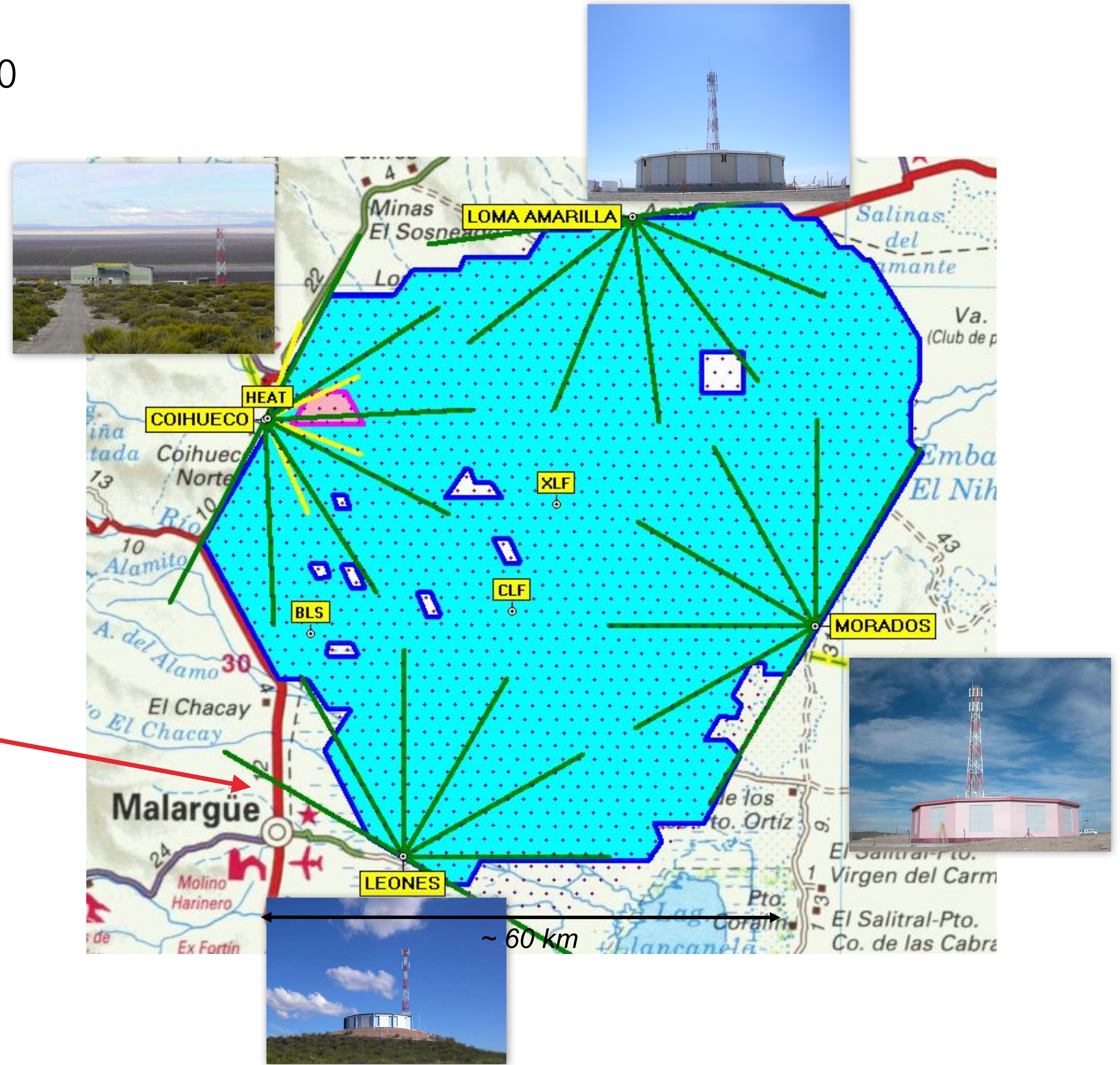
Rivelatori di Superficie

1660 rivelatori di luce Cherenkov disposti su 3000 km² in una griglia di 1.5 km

Rivelatori di Fluorescenza

4 edifici con 6 telescopi per ogni edificio

Sistemi di monitoraggio atmosferico



PIERRE AUGER OBSERVATORY



CONTIAMO LE PARTICELLE

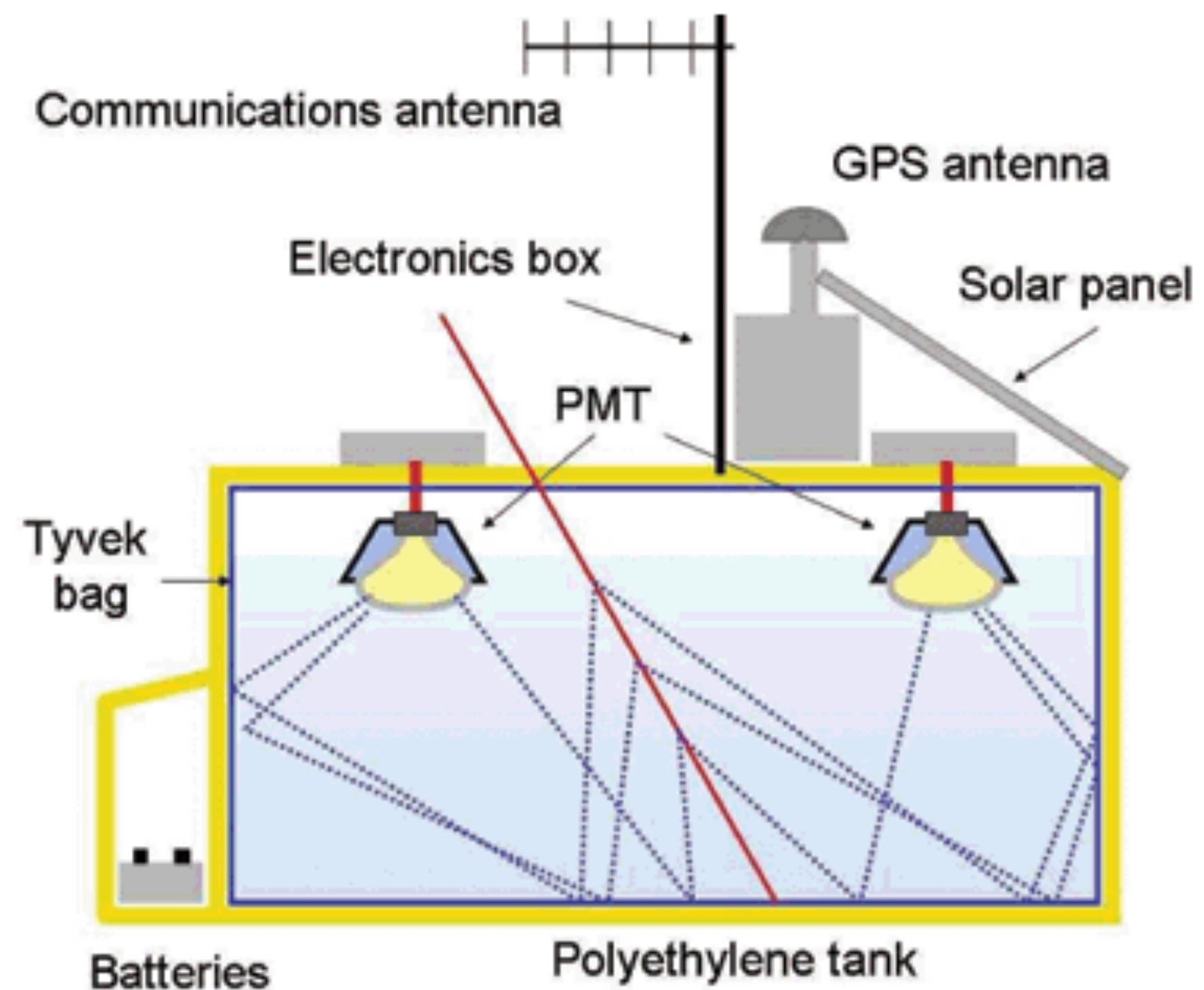
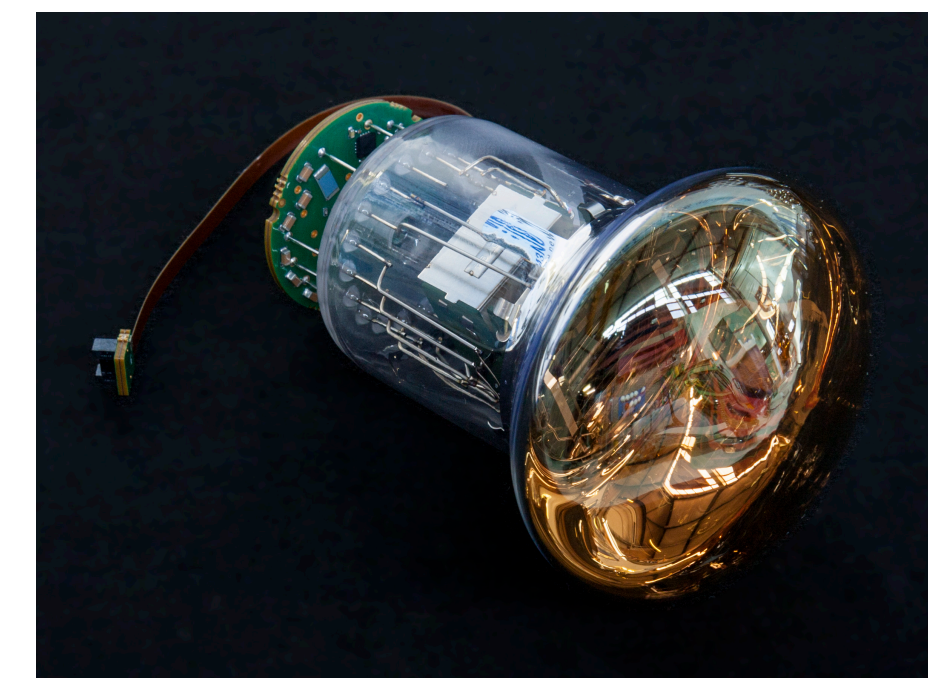
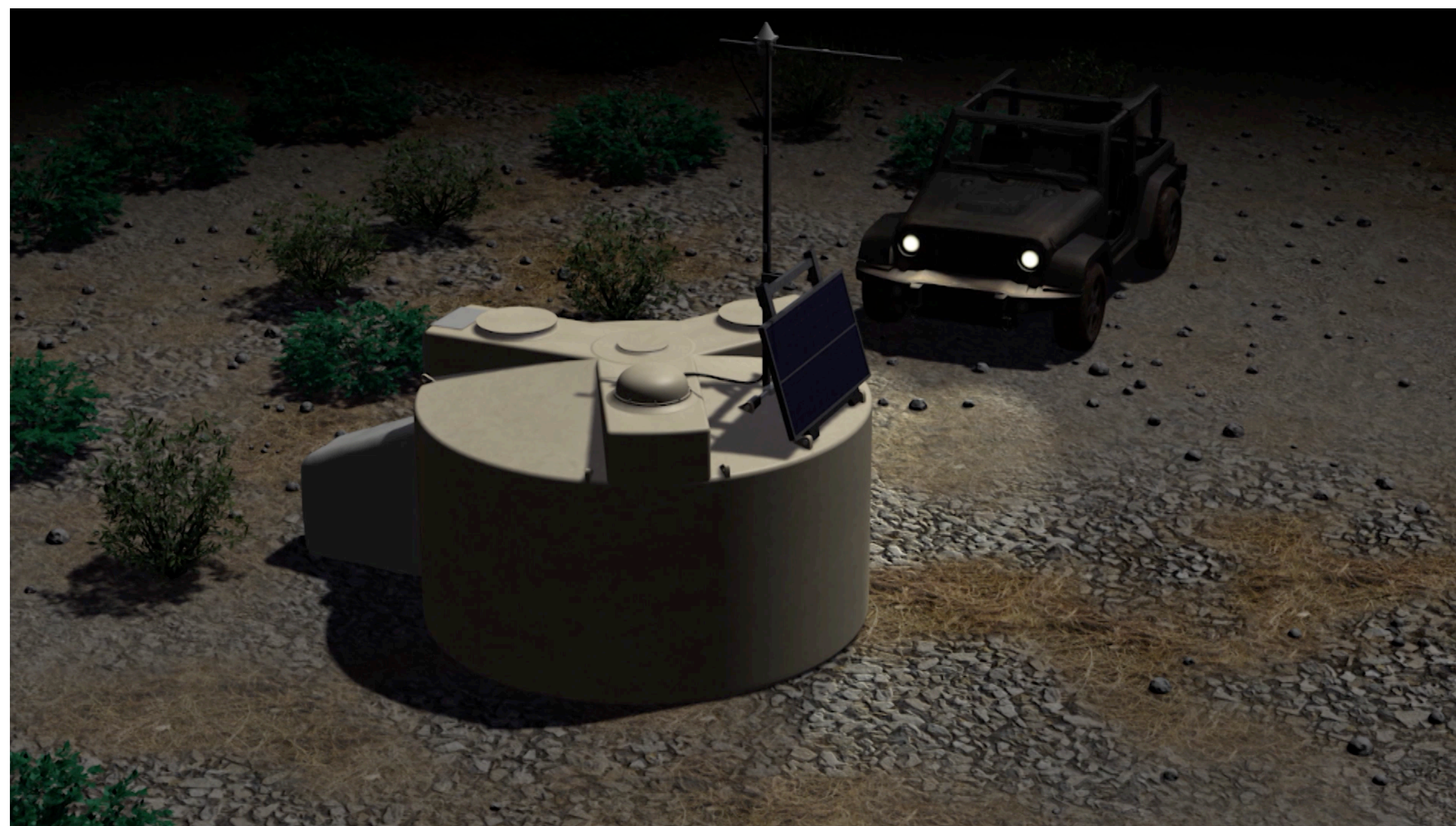
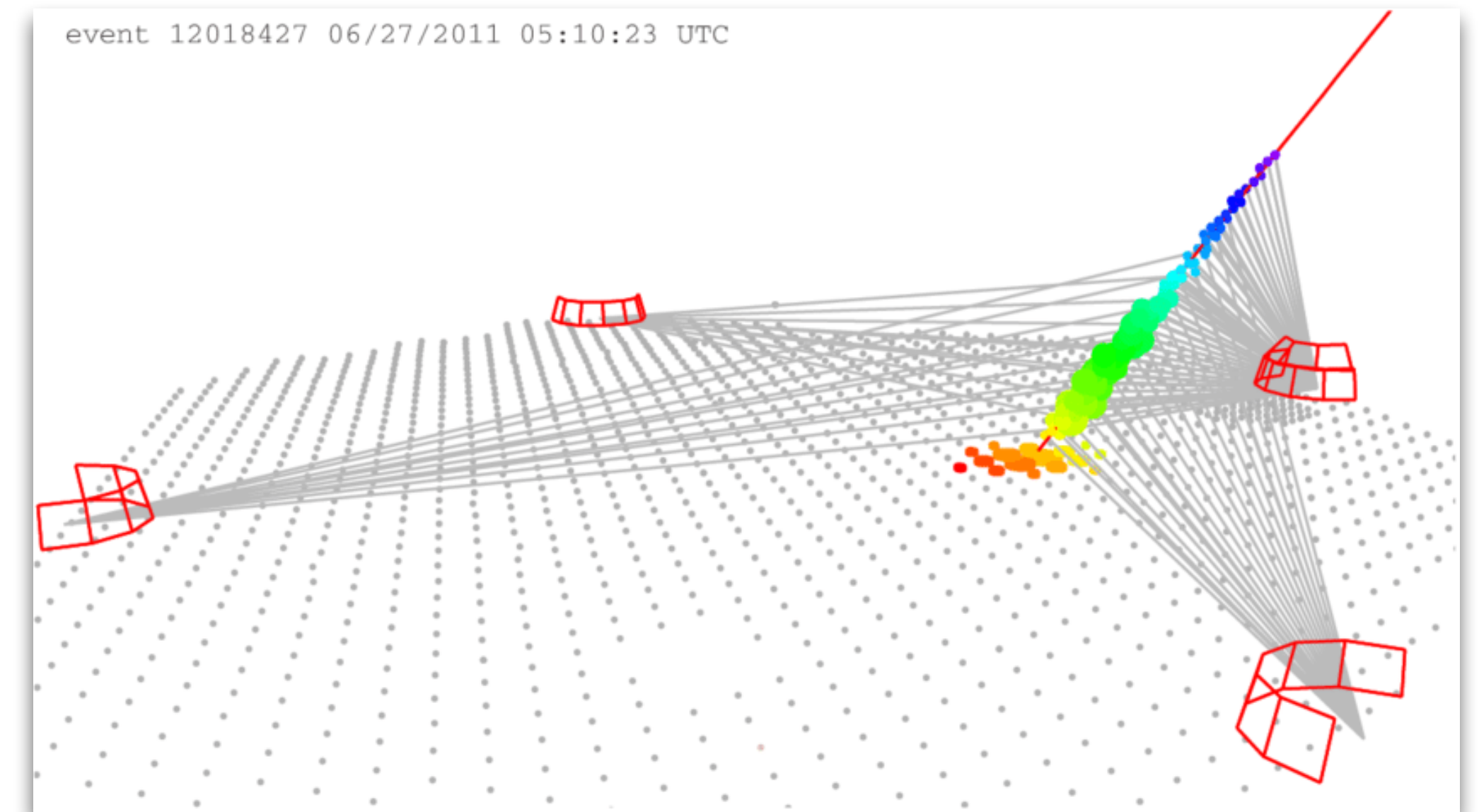
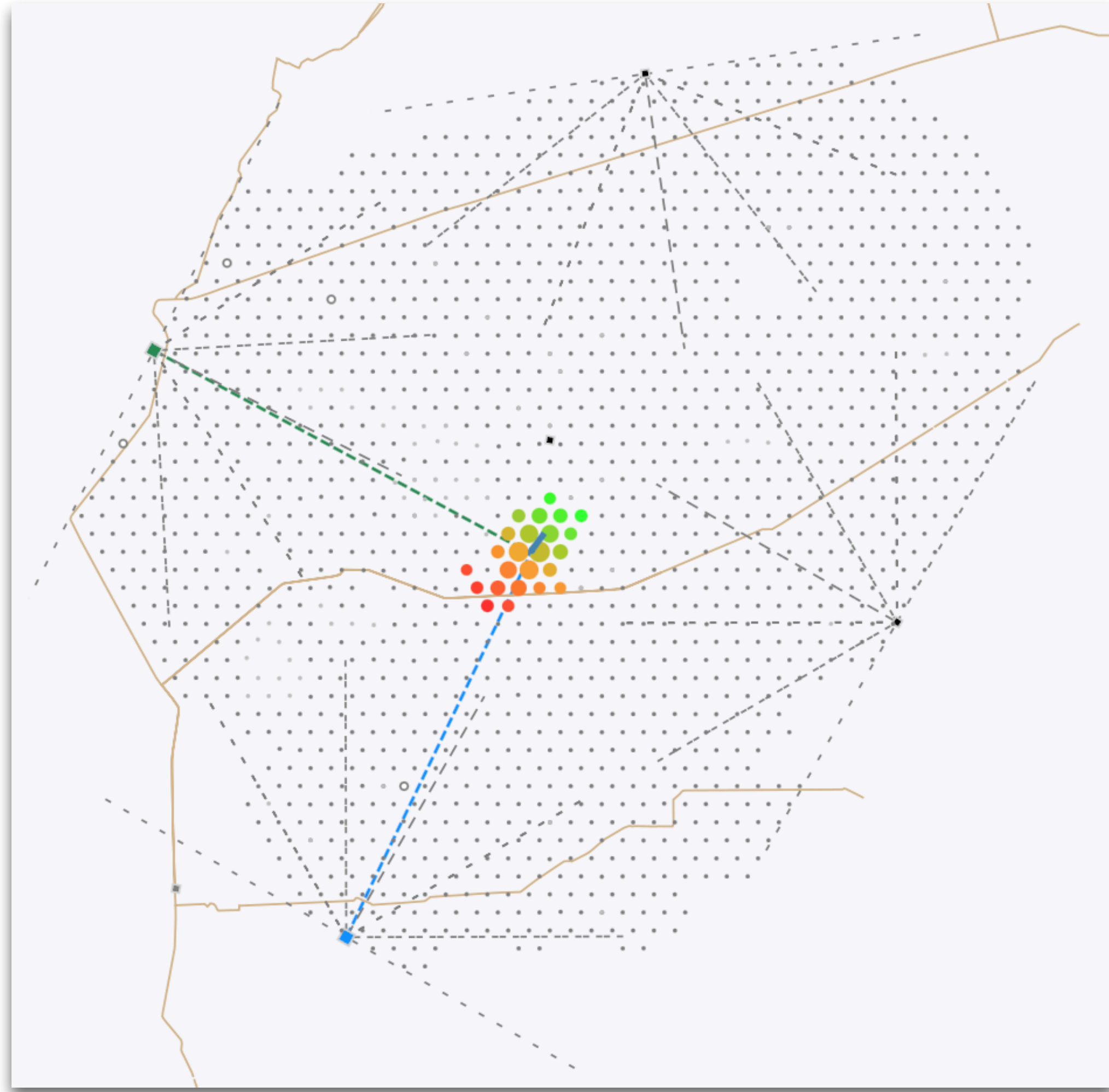


FIG. 2: A schematic view of the Cherenkov water tanks, with the components indicated in the figure.



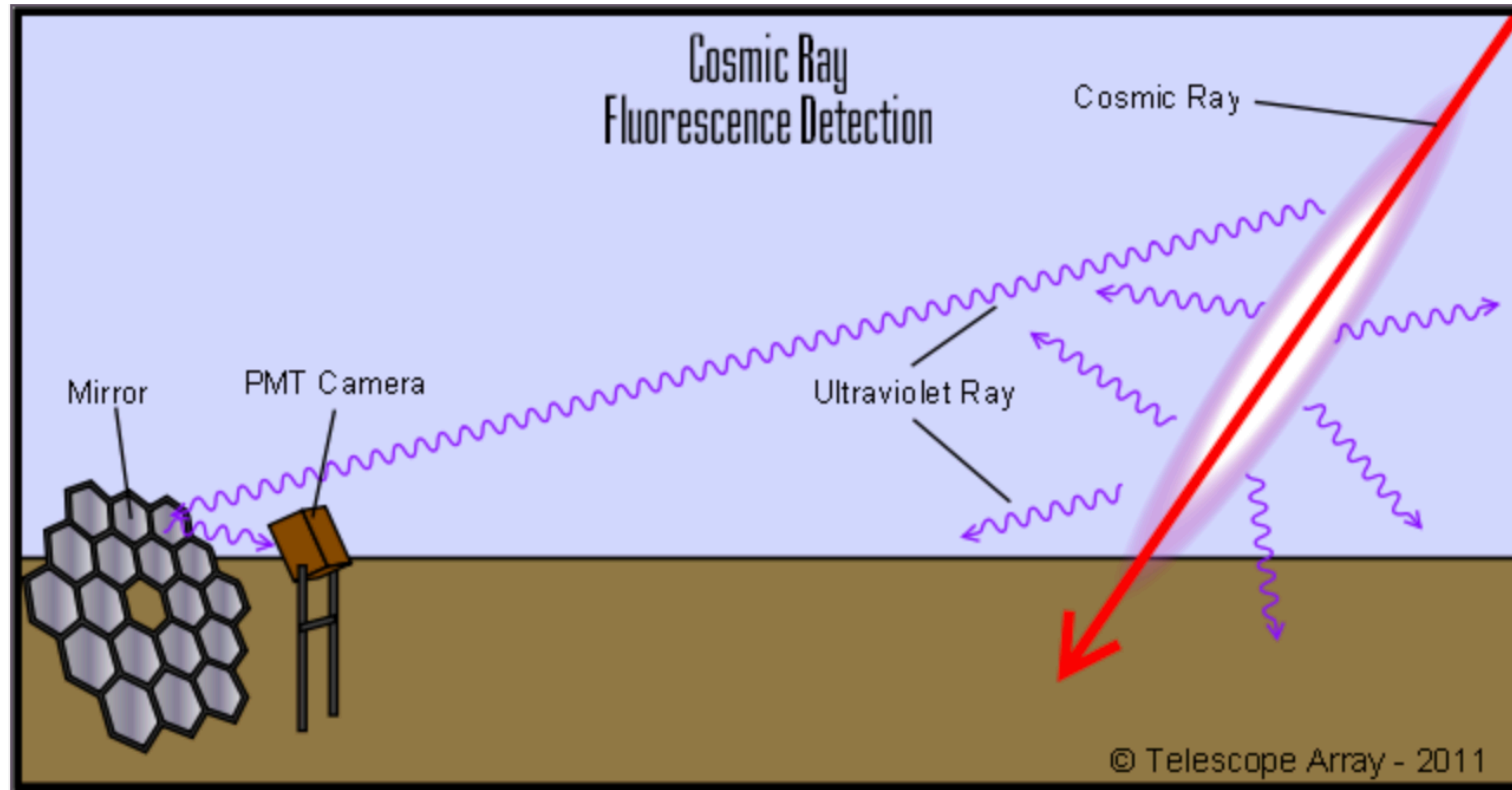
- Dalla luce Cherenkov: **energia**

DETERMINIAMO LA DIREZIONE DI ARRIVO



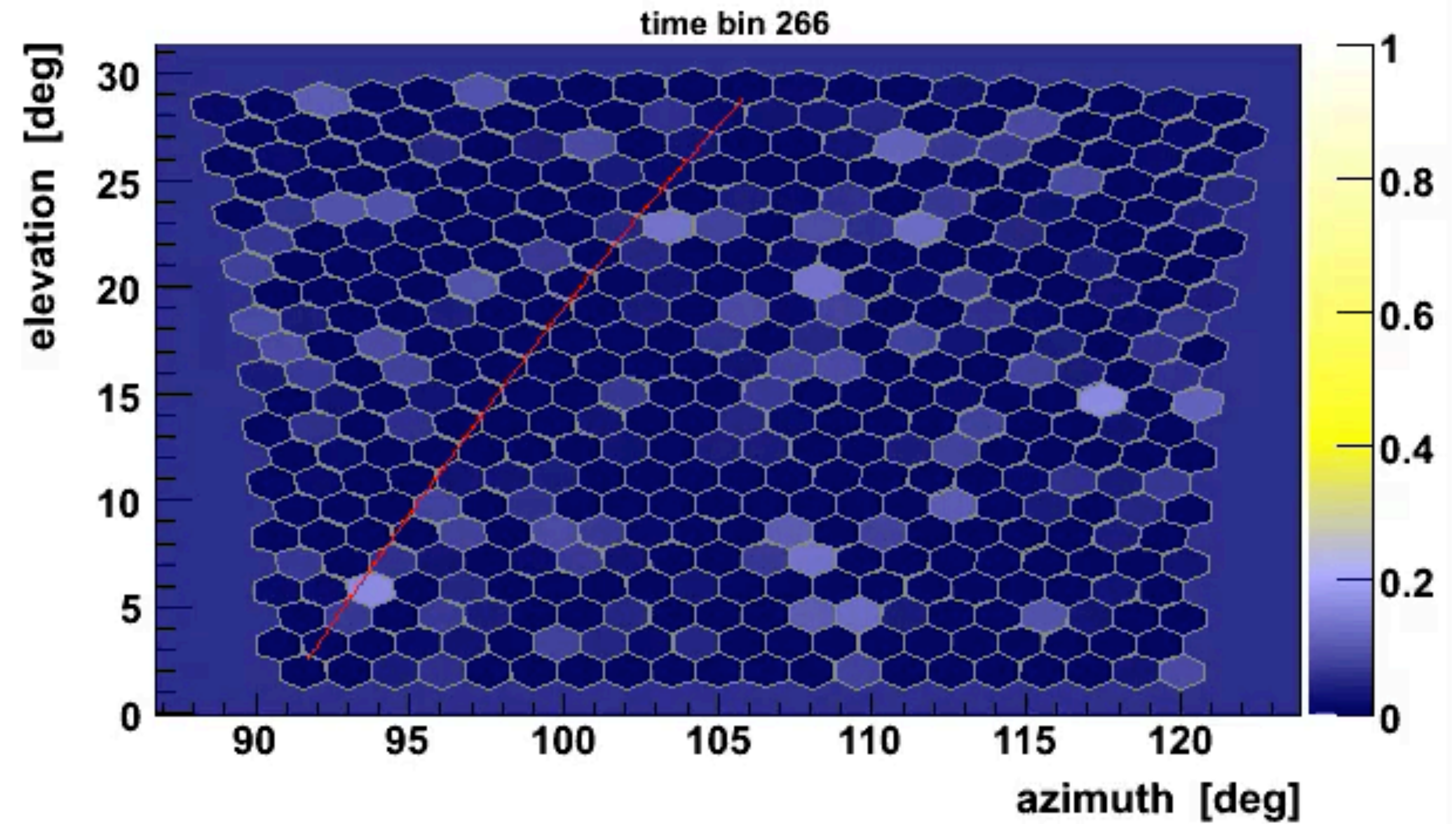
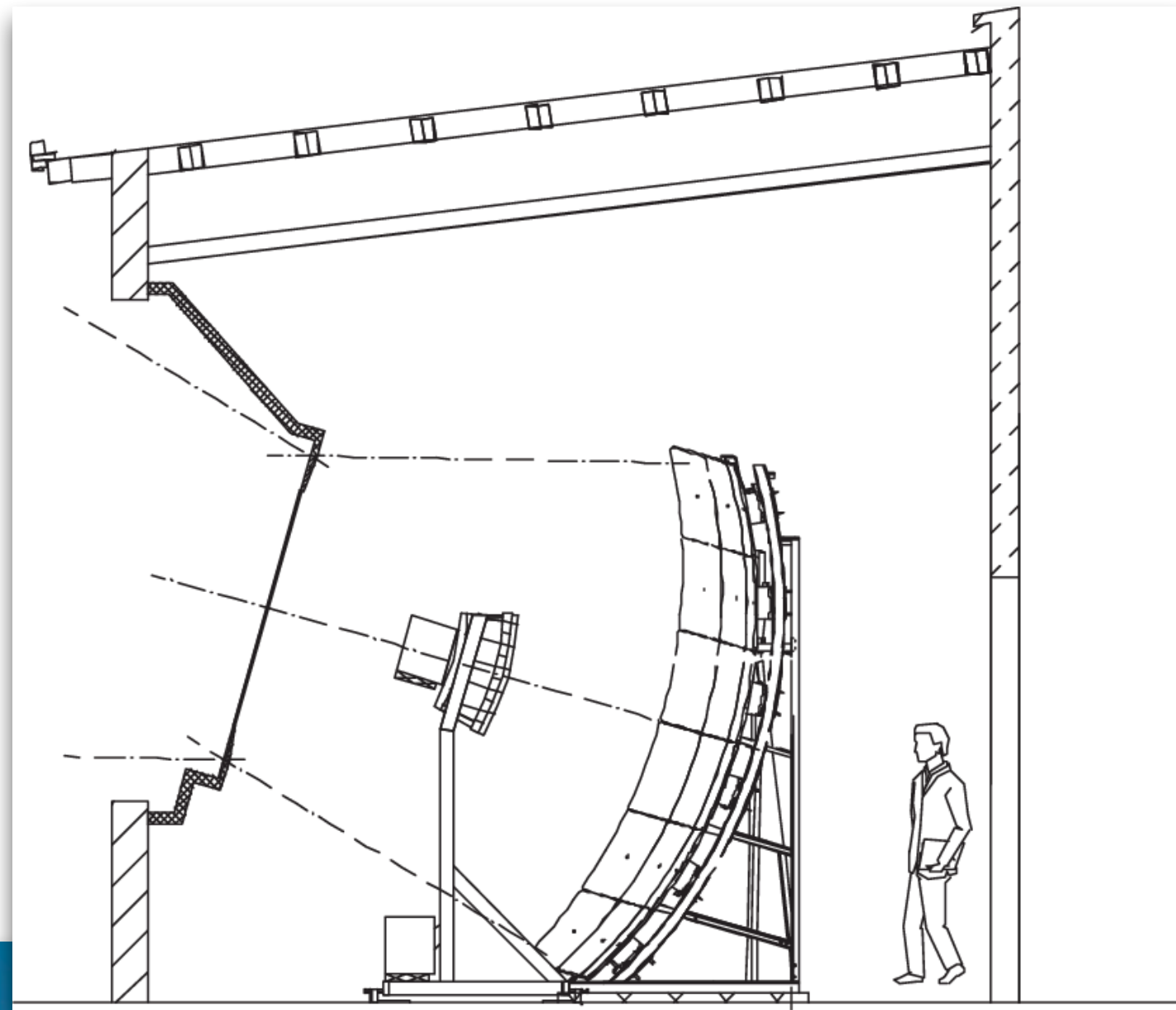
- Dalla geometria della cascata di particelle e/o dal tempo di arrivo: **direzione** di arrivo

OSSERVIAMO GLI EFFETTI DEL PASSAGGIO IN ATMOSFERA



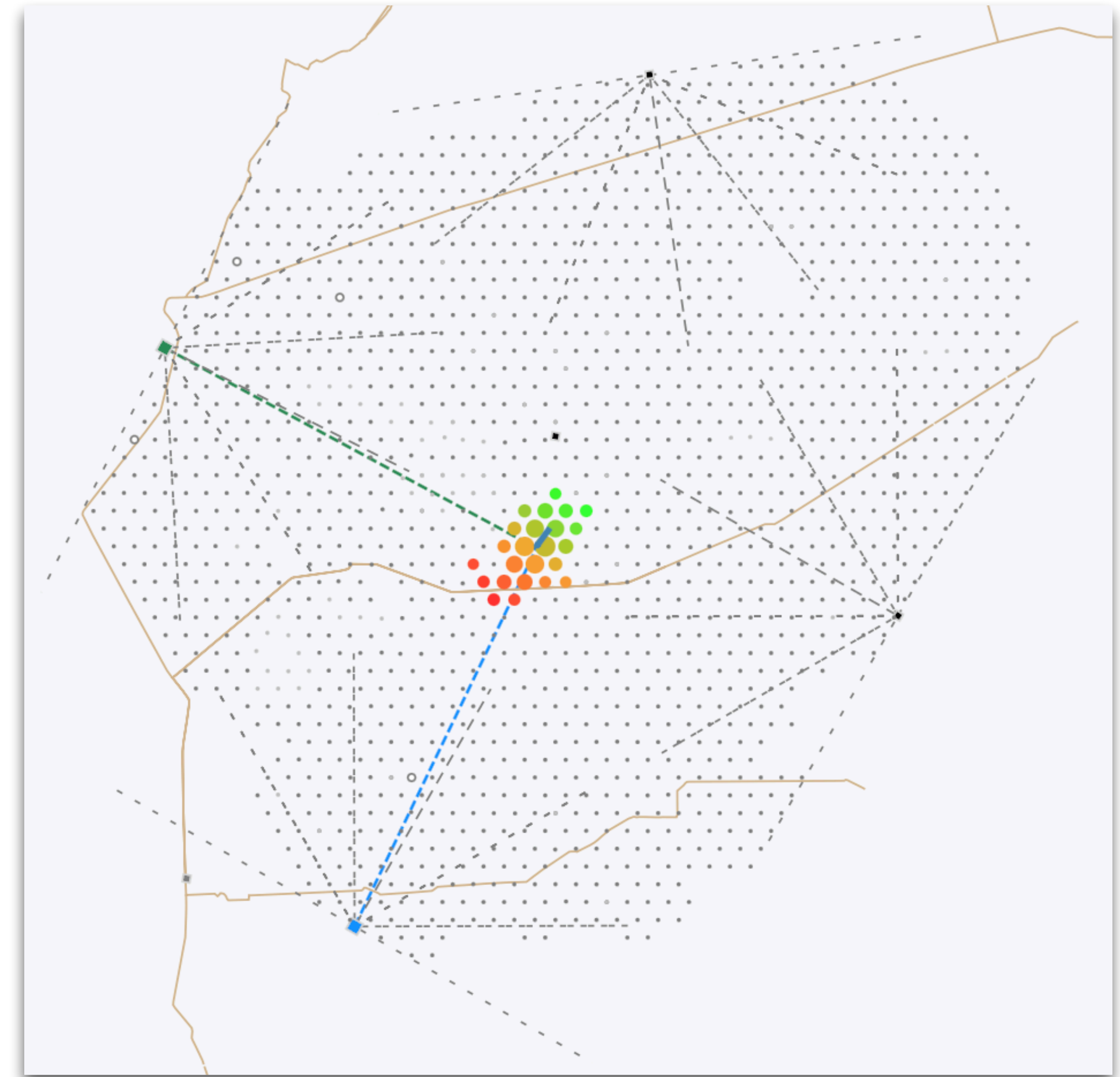
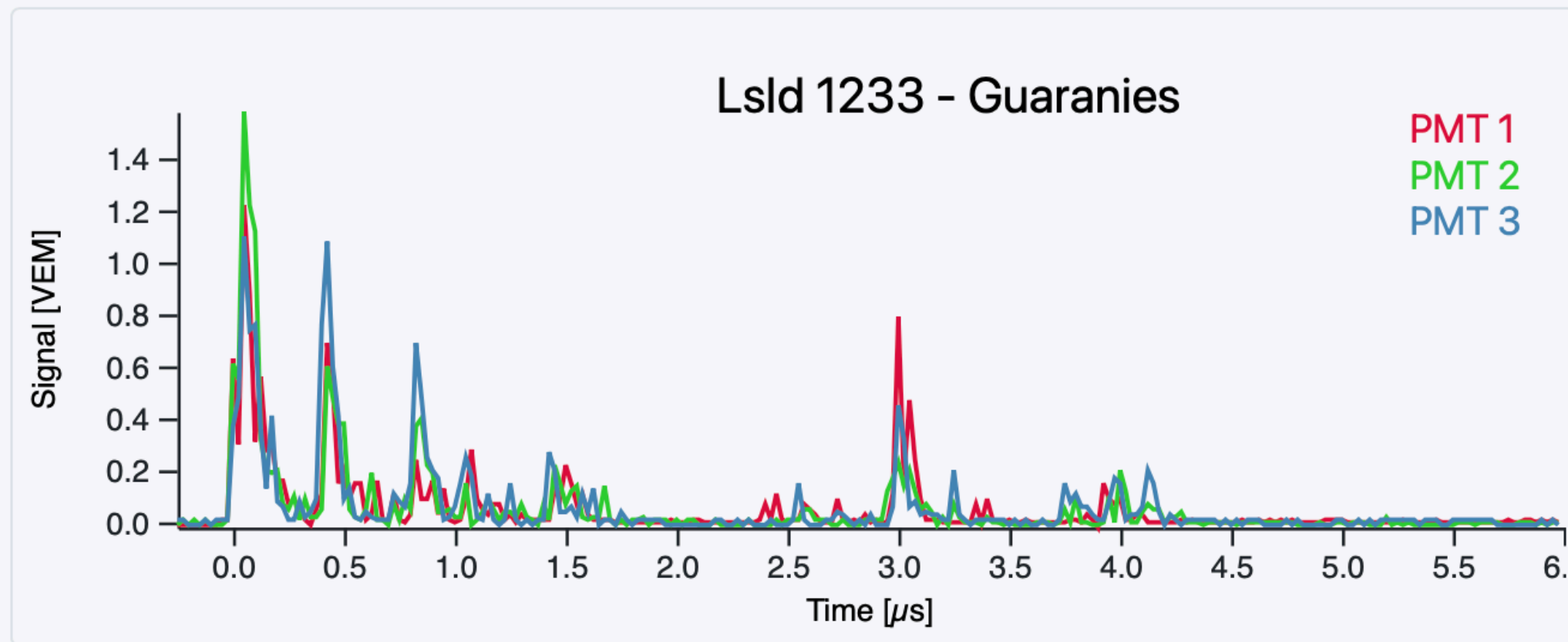
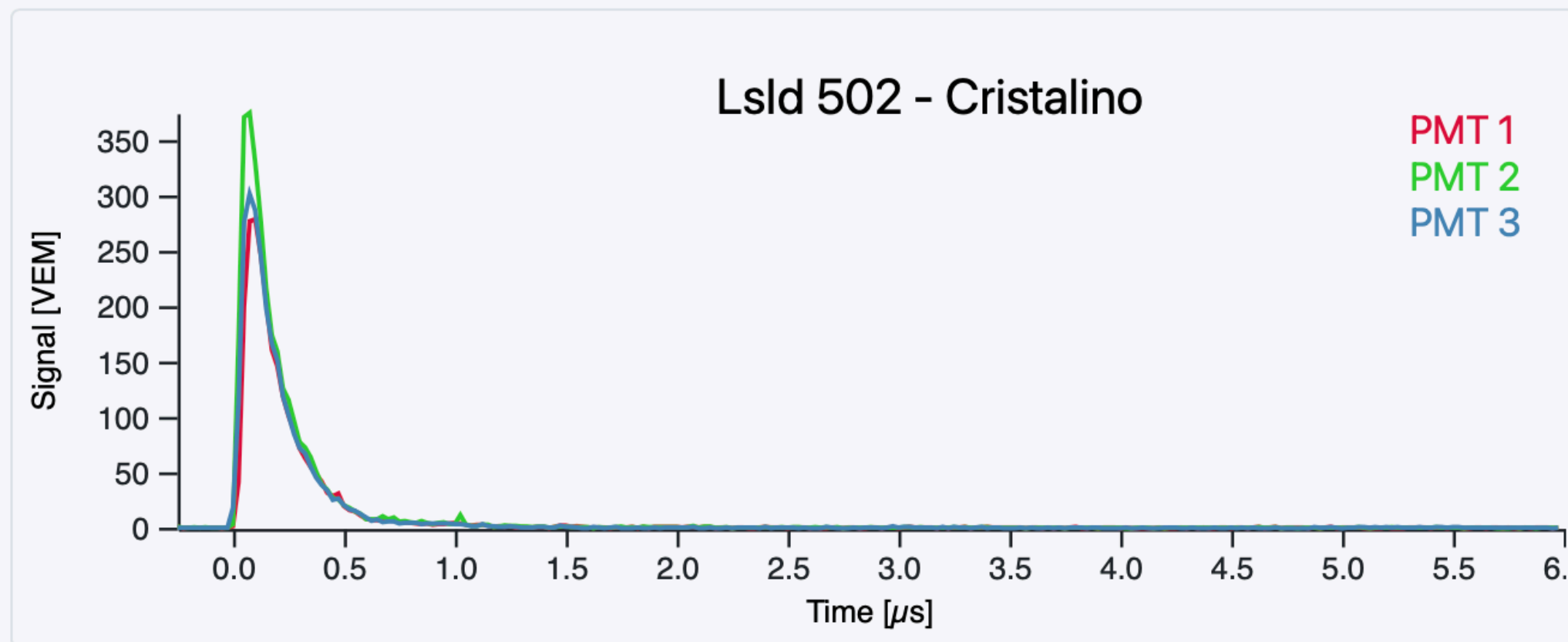
- Dalla luce UV emessa nel passaggio in atmosfera: la **specie nucleare**

OSSERVIAMO GLI EFFETTI DEL PASSAGGIO IN ATMOSFERA



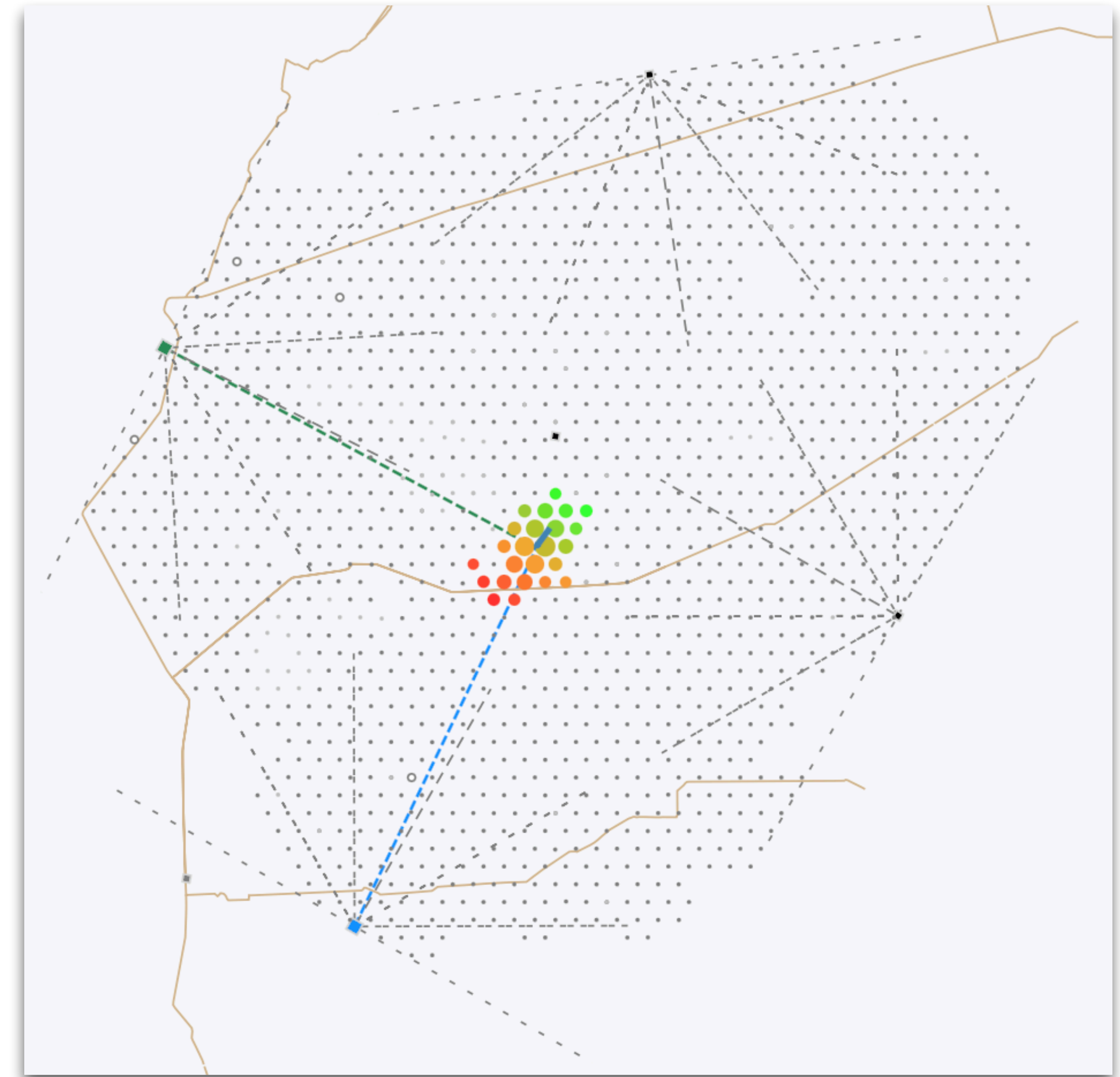
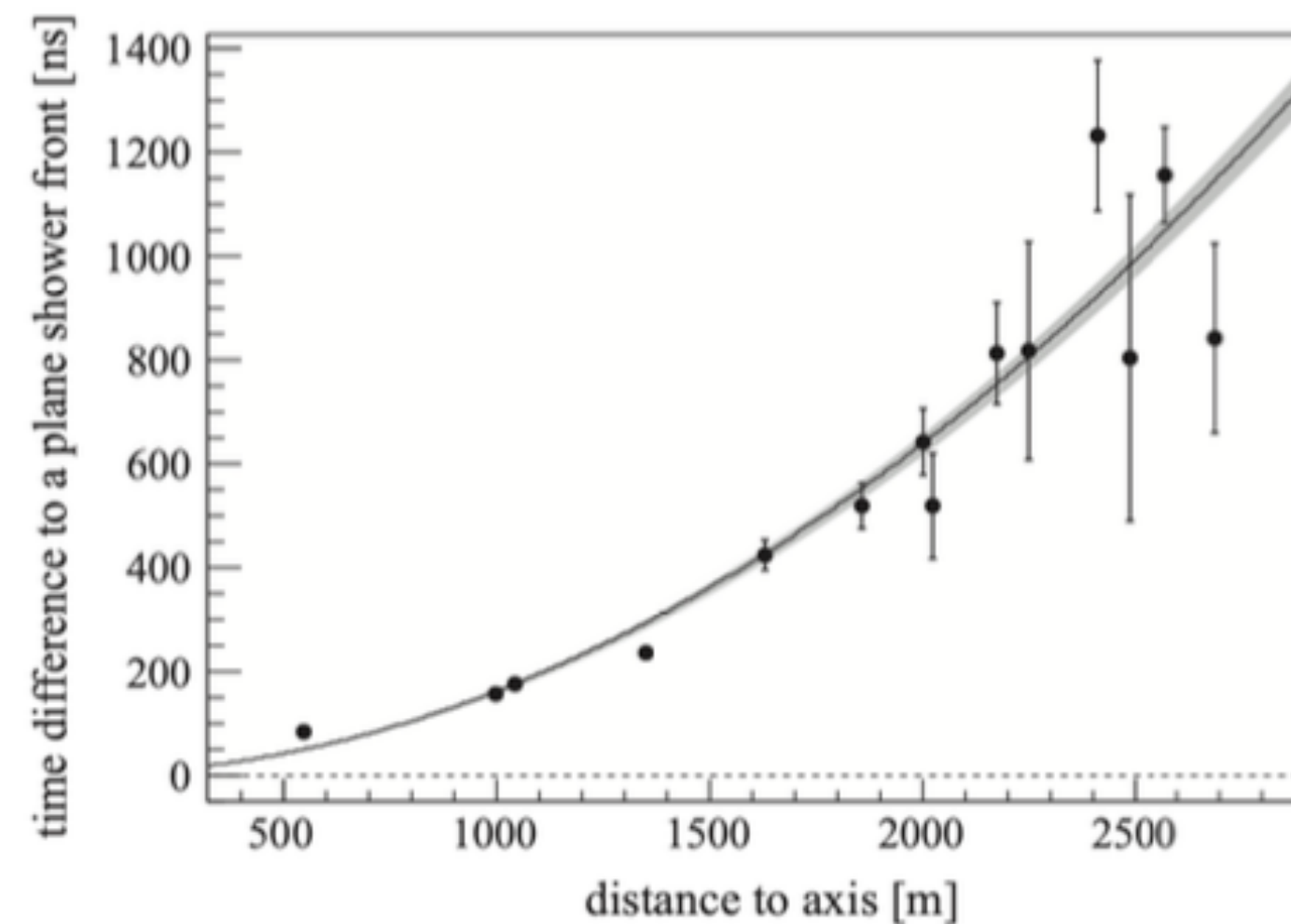
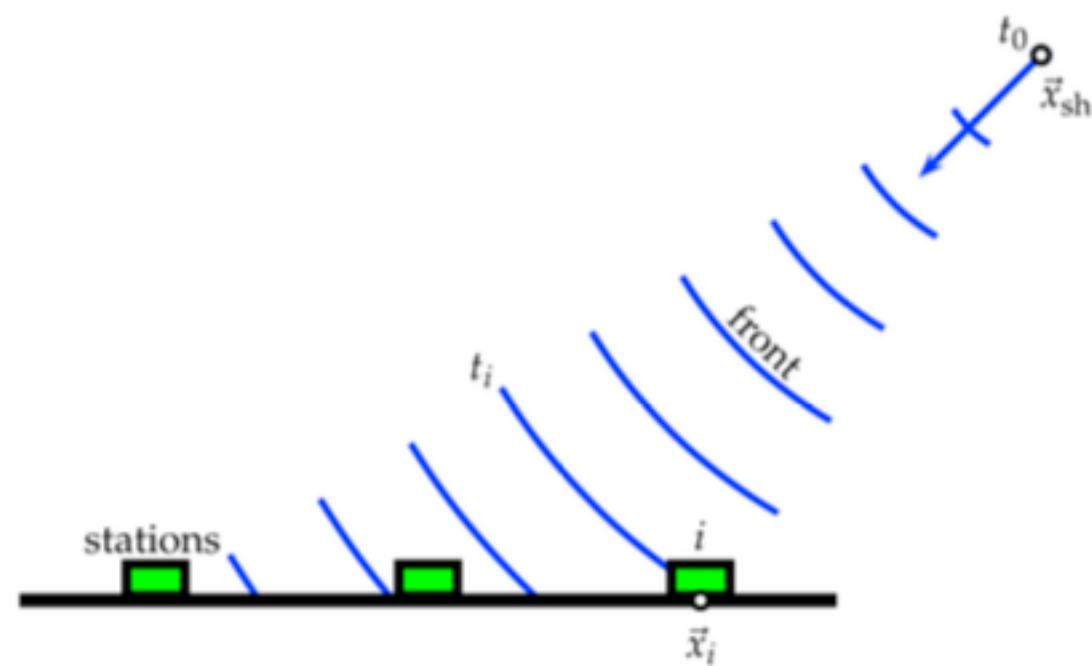
ANALISI DATI

RIVELATORI DI SUPERFICIE



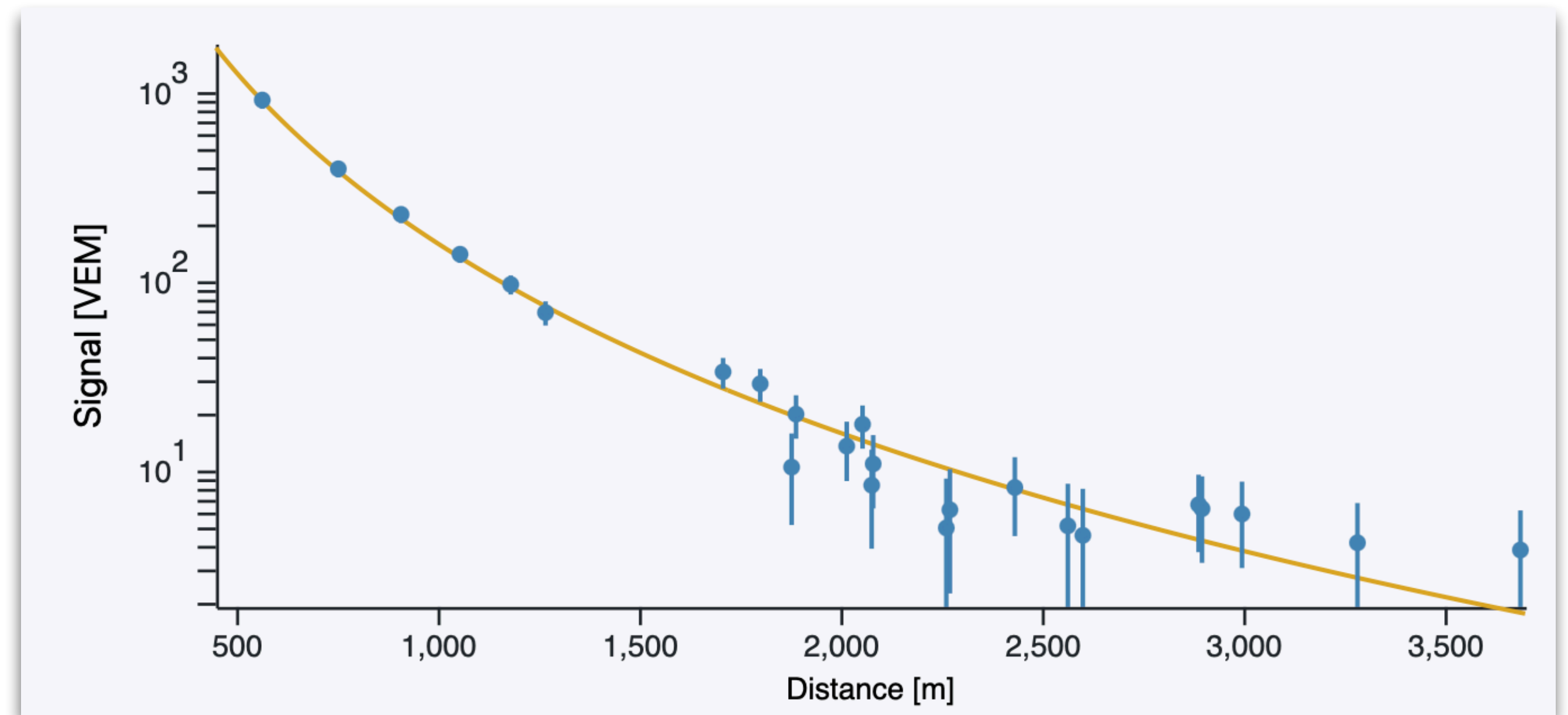
RIVELATORI DI SUPERFICIE

- Sviluppo laterale dello sciame
 - **Differenza temporale:** i rivelatori più distanti dall'asse dello sciame vengono raggiunti più tardi dal fronte dello sciame
- Individuiamo il rivelatore con segnale maggiore
- Individuiamo il rivelatore raggiunto per primo/ultimo dal fronte dello sciame



RIVELATORI DI SUPERFICIE

- Sviluppo laterale dello sciame
- Intensità del segnale: i rivelatori più distanti dall'asse dello sciame misurano un numero minore di particelle
- Ogni punto corrisponde al segnale in un rivelatore di superficie (3 PMT)
- La linea corrisponde alla funzione matematica che riproduce meglio l'andamento dei punti



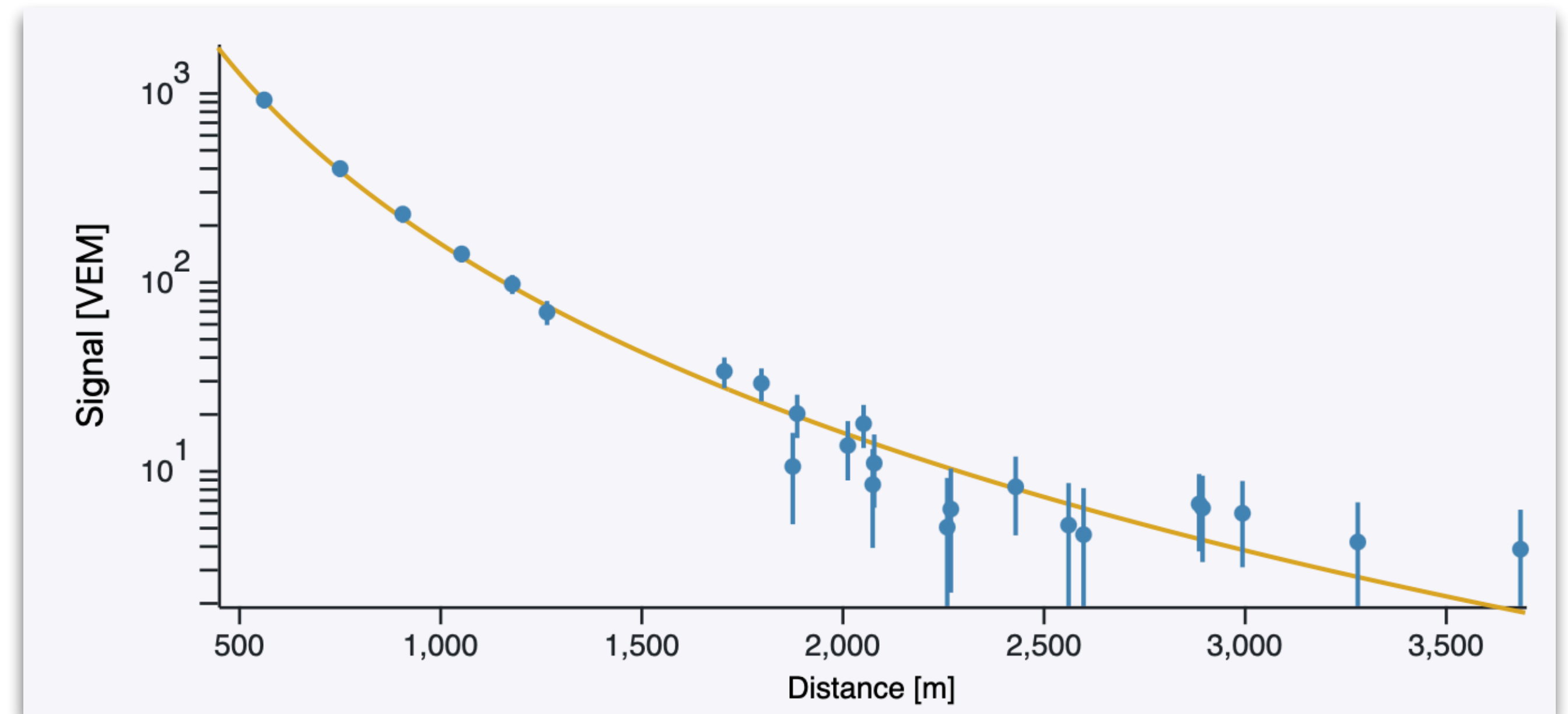
$$S(r) = a \left(\frac{r}{r_s} \right)^{-b} \left(1 + \frac{r}{r_s} \right)^{-b}$$

- a, b: parametri da variare
- r_s (fissato) dipende dallo spaziamento tra i rivelatori di superficie

RIVELATORI DI SUPERFICIE

- Come possiamo quantificare l'accordo tra la funzione matematica e i punti sperimentali?
- Al variare dei parametri (a,b) calcoliamo

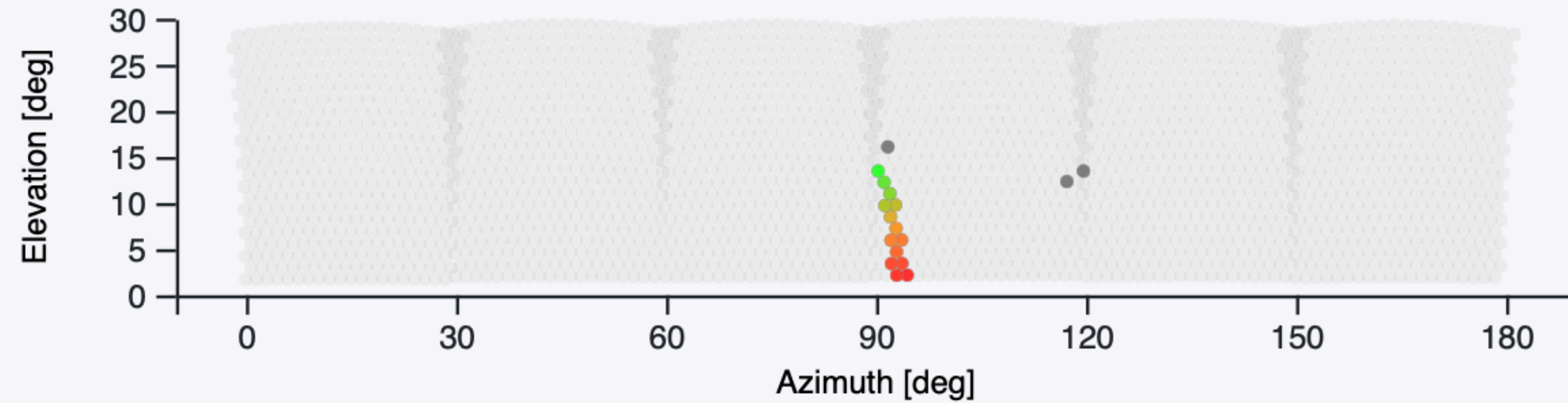
$$\chi^2 = \sum \frac{(S(r)_{exp} - S(r)_{teo})^2}{\sigma(S(r)_{exp})^2}$$



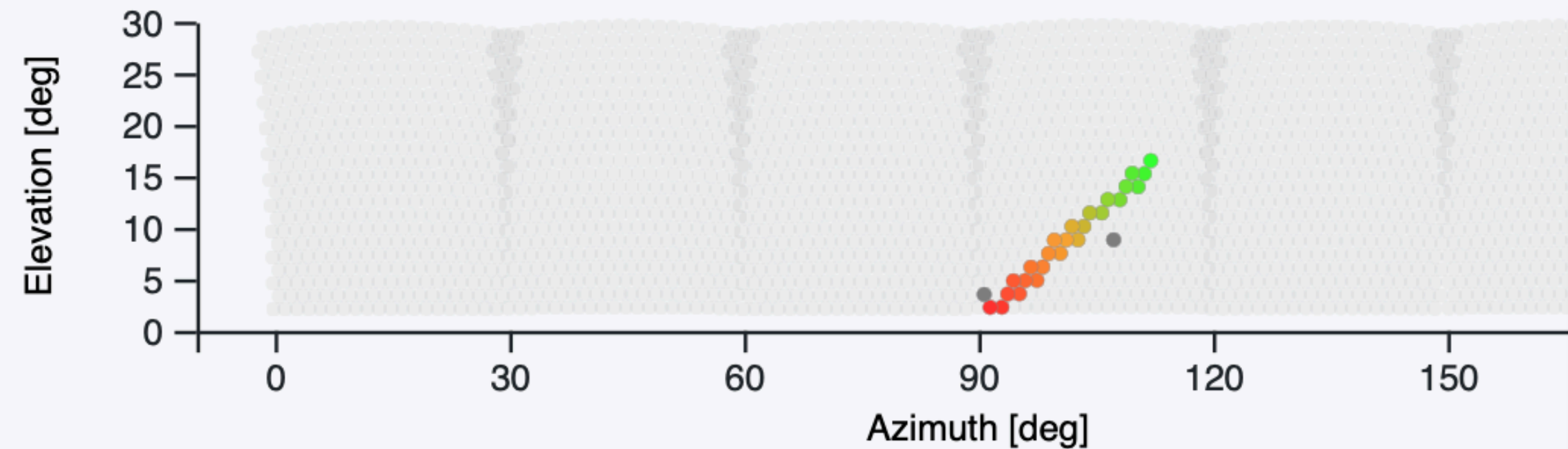
- Per ogni coppia di parametri, abbiamo un valore del chi²; la coppia di parametri per cui il chi² è minimo identifica la funzione matematica che meglio riproduce i dati

RIVELATORI DI FLUORESCENZA

Camera view for Los Leones

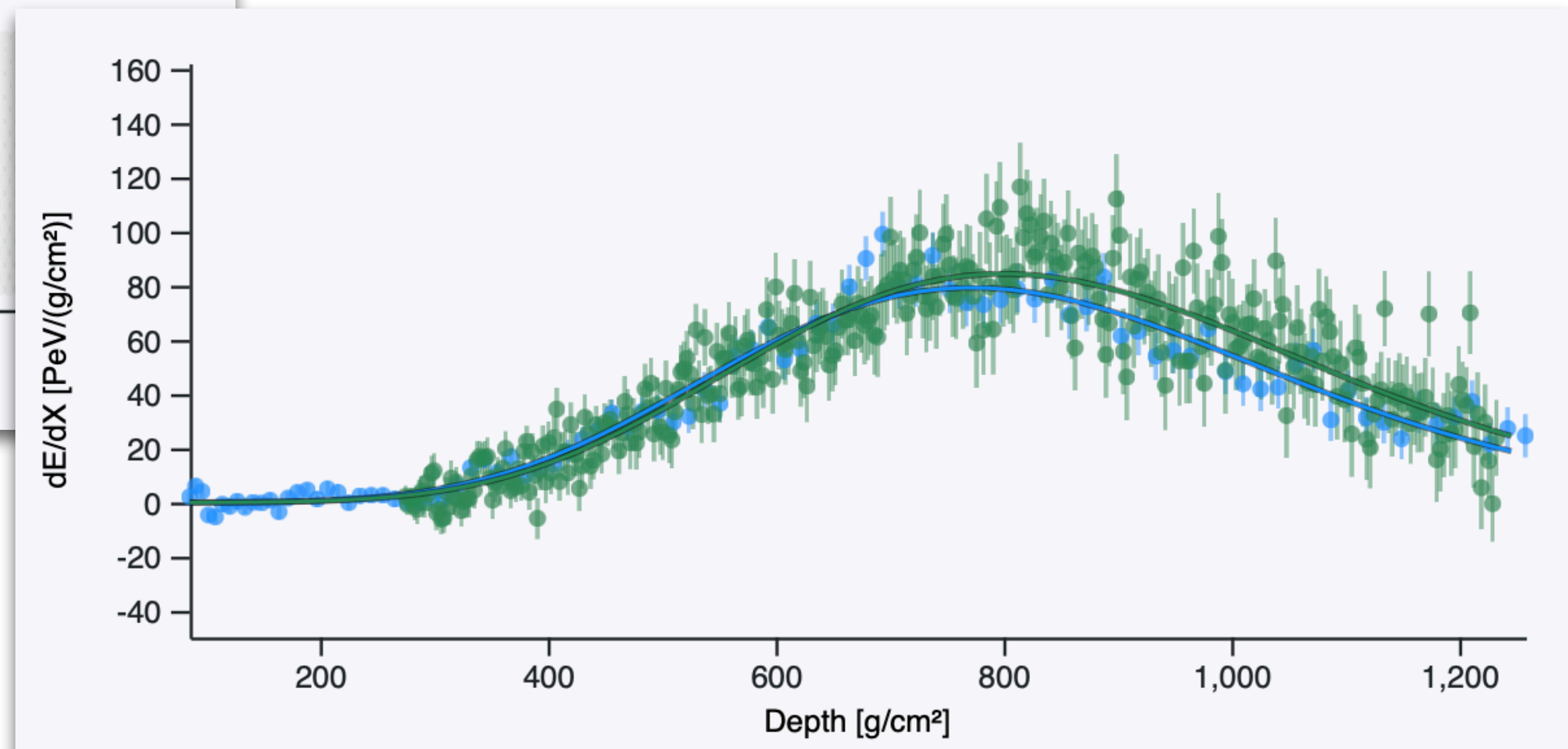


Camera view for Coihueco



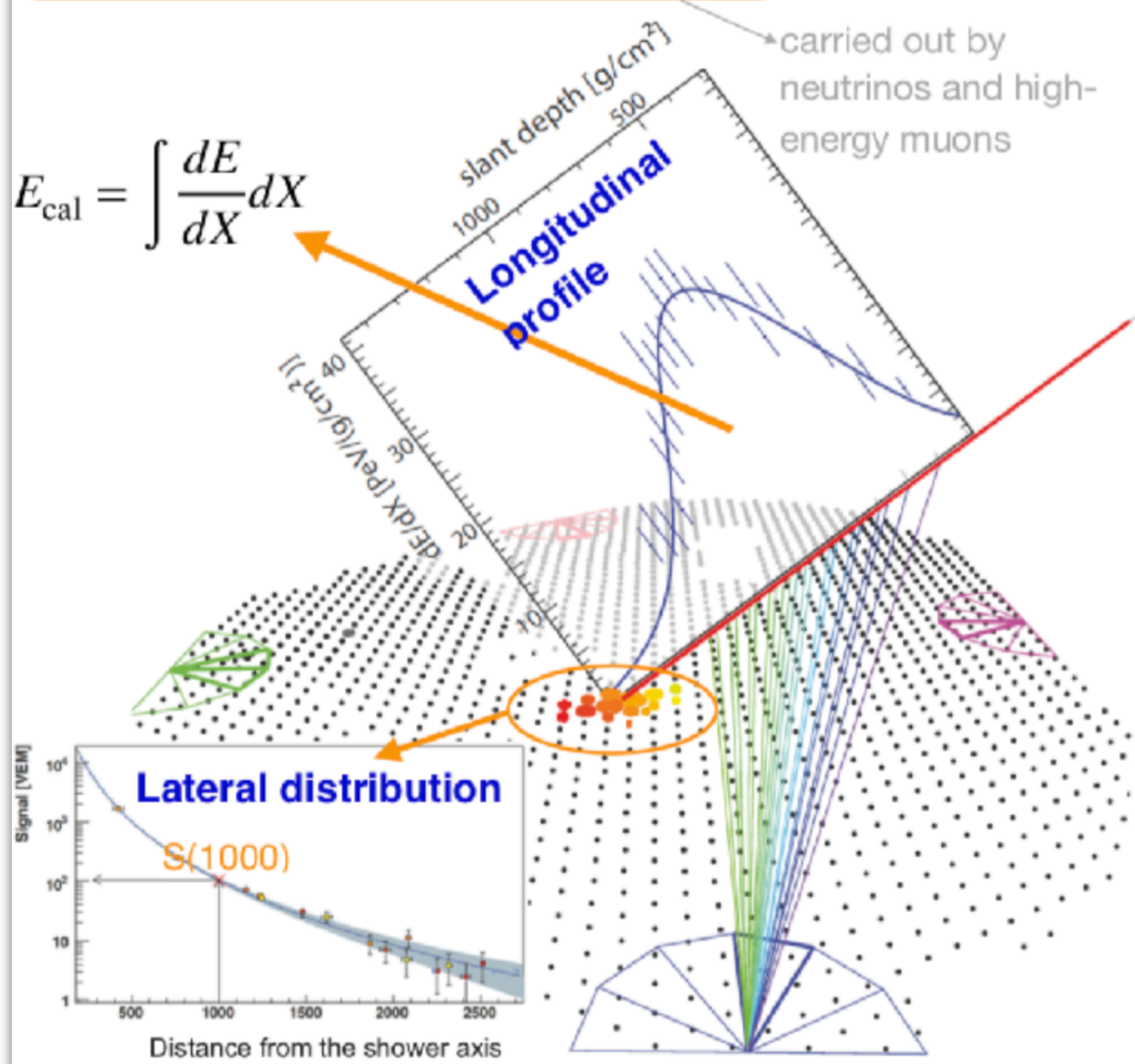
- Sviluppo longitudinale dello sciame

- Il procedimento di analisi dei dati è simile a quello precedente; ciò che cambia è la funzione matematica

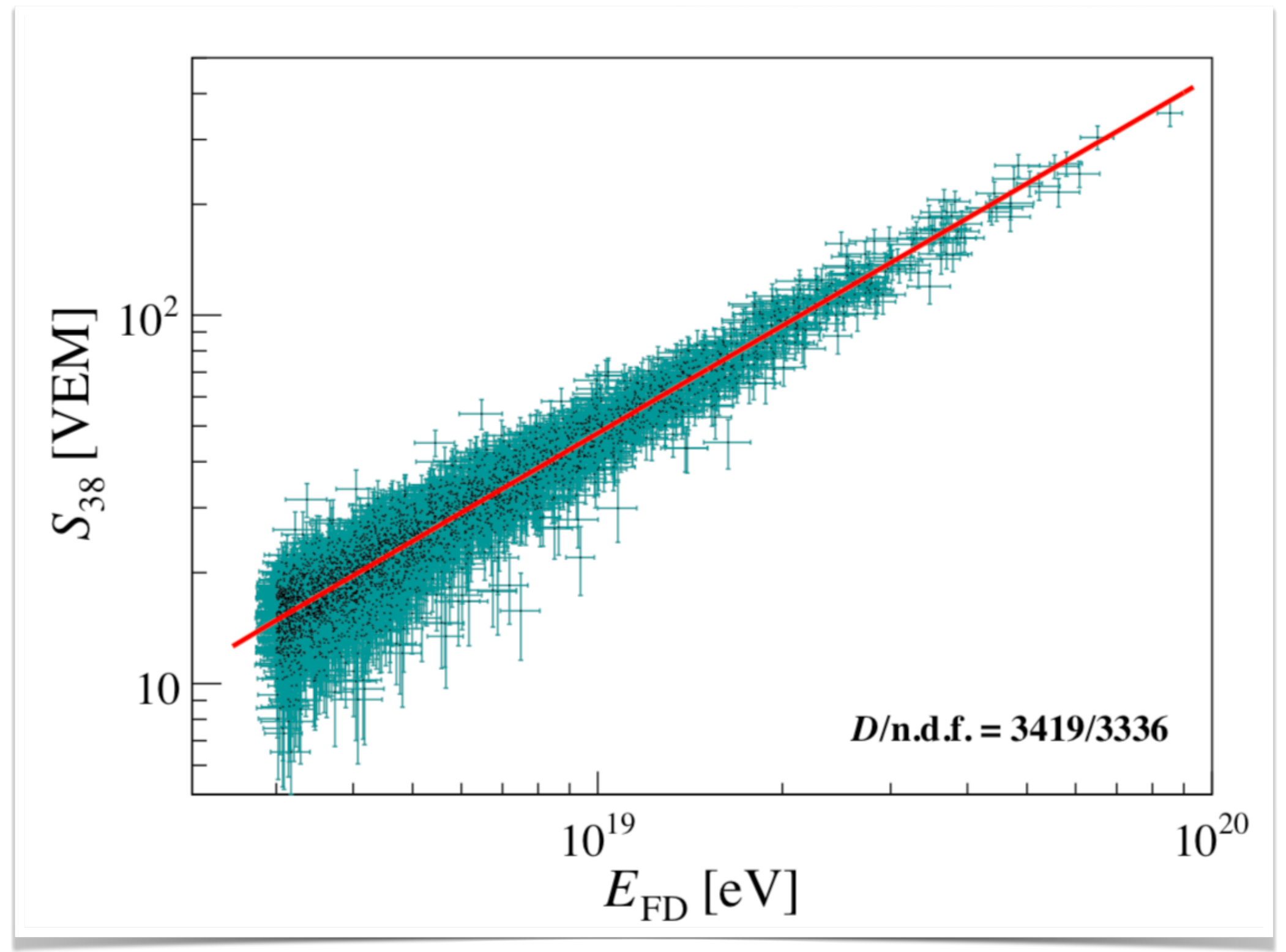


TECNICA IBRIDA

Total energy: $E_{FD} = E_{cal} + E_{invisible}$



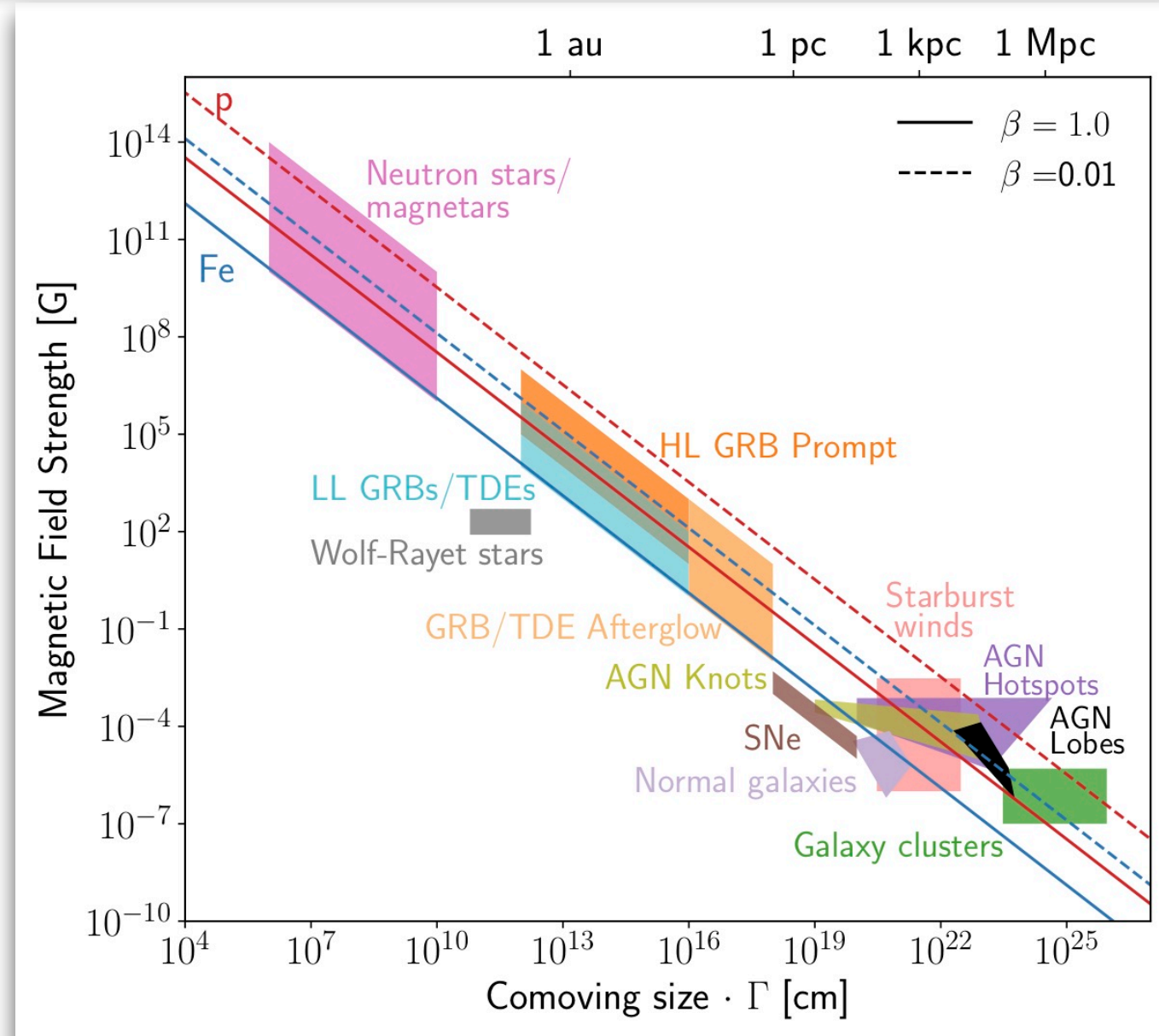
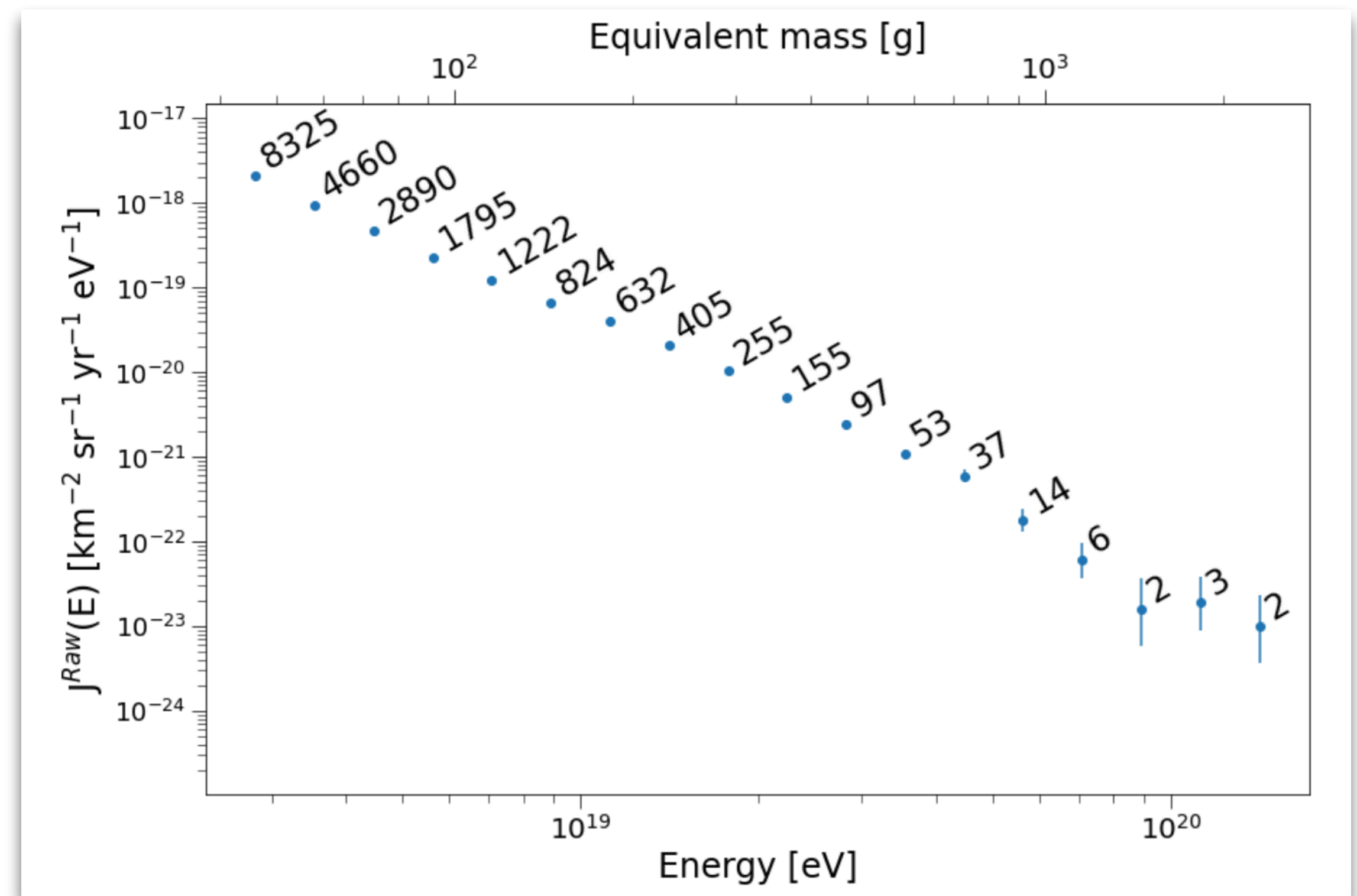
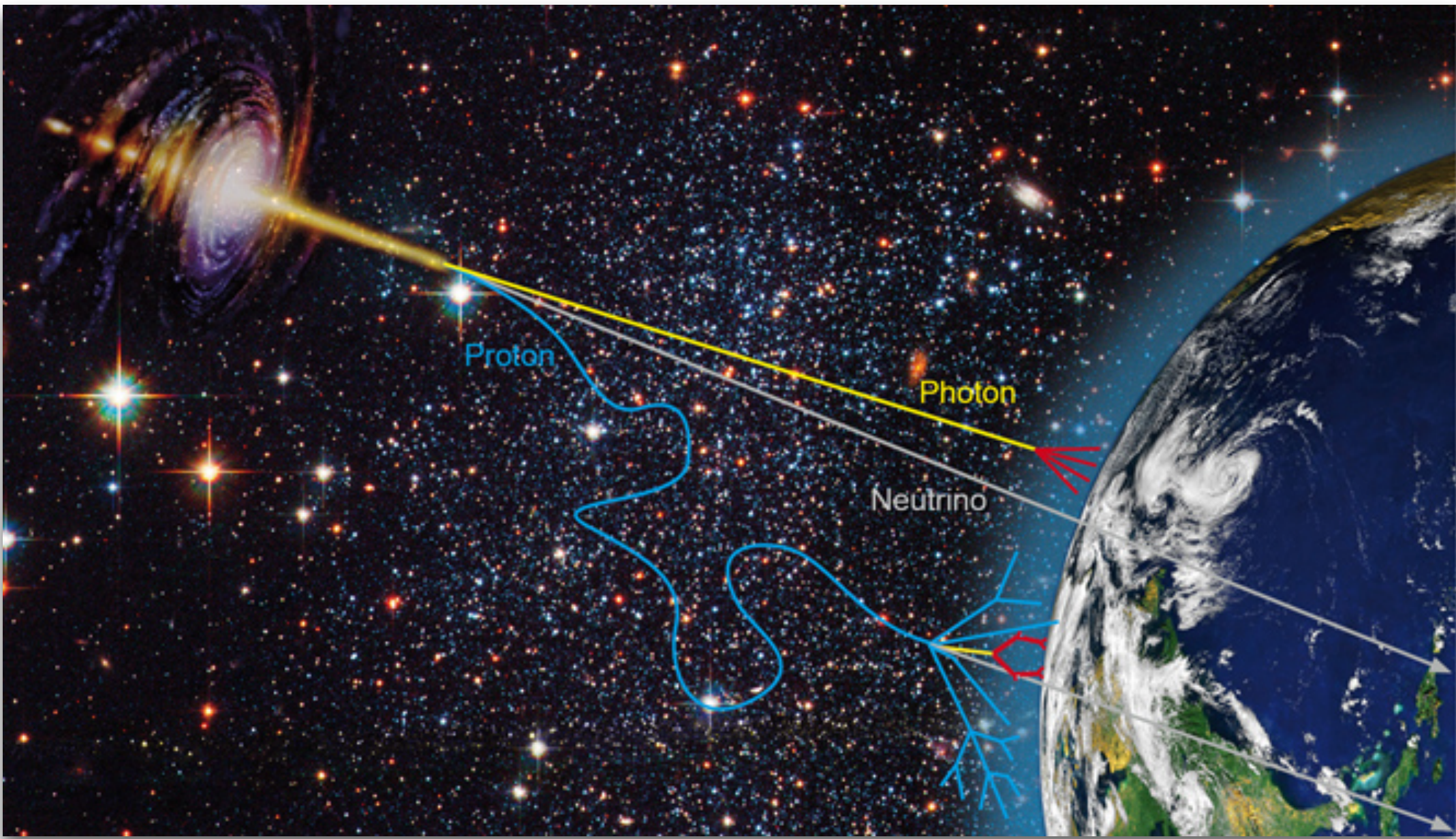
shower size at ground = energy estimator



Auger, PRD 2020

PRINCIPALI RISULTATI

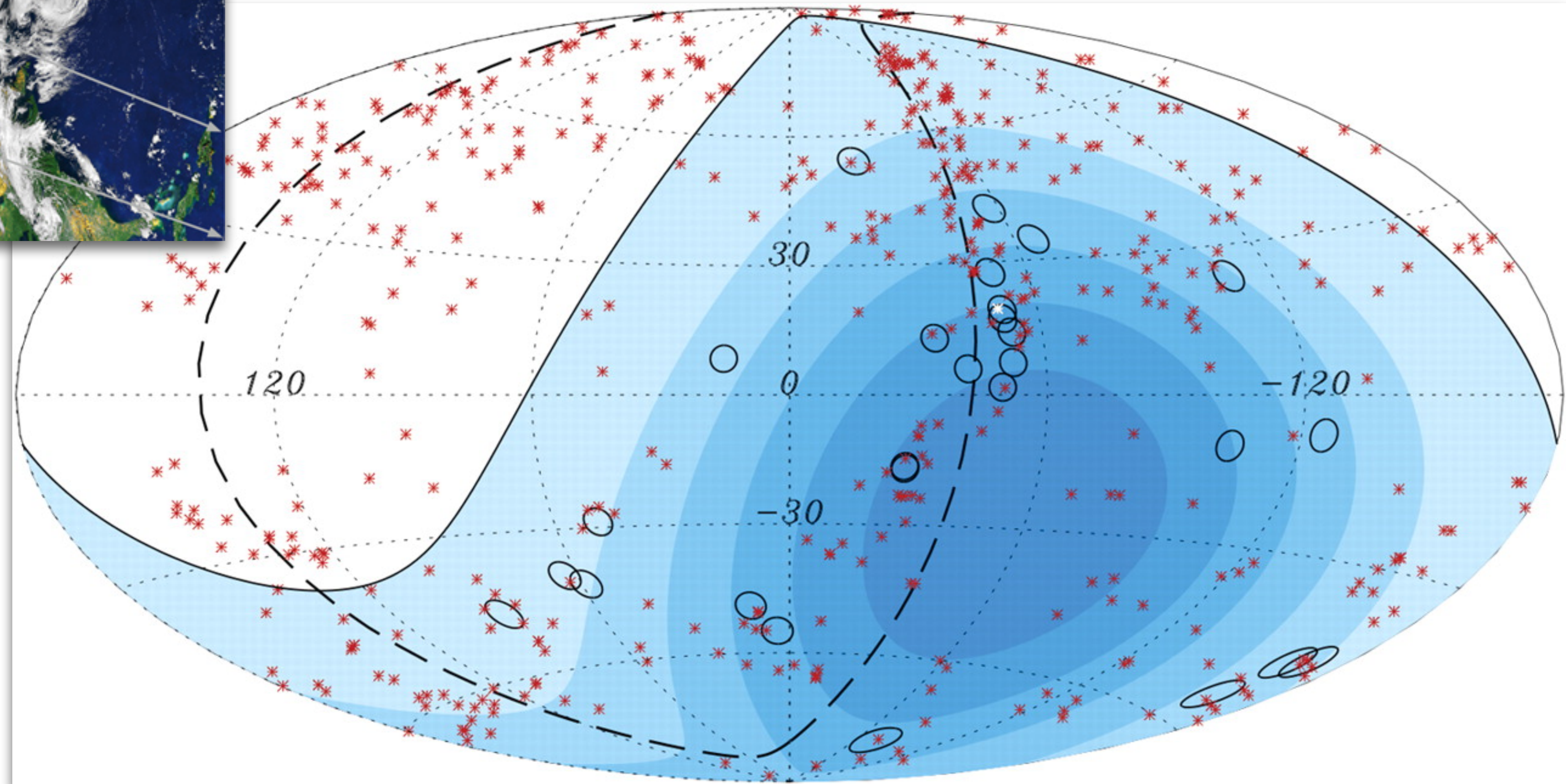
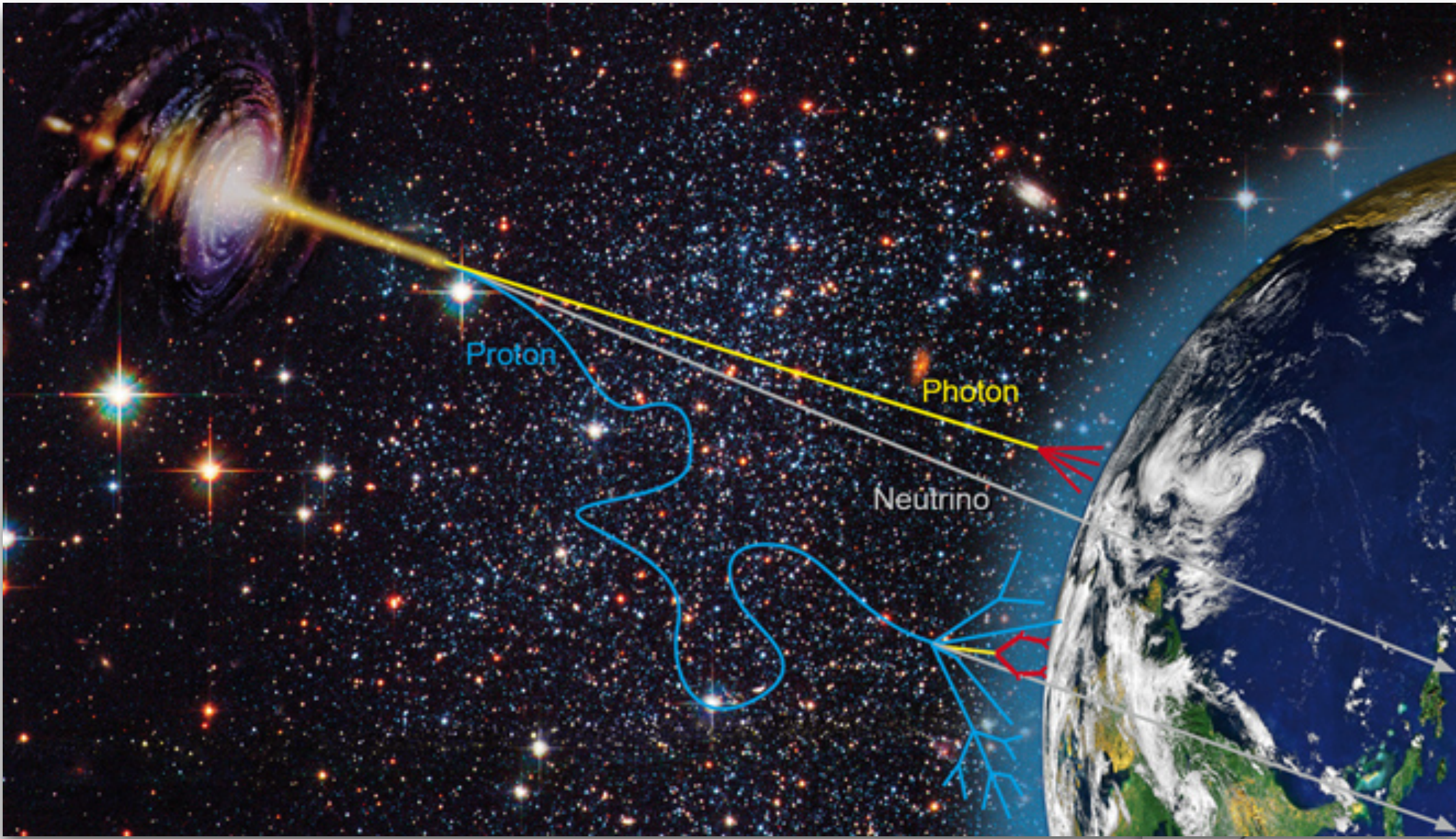
ENERGIA DEI RAGGI COSMICI



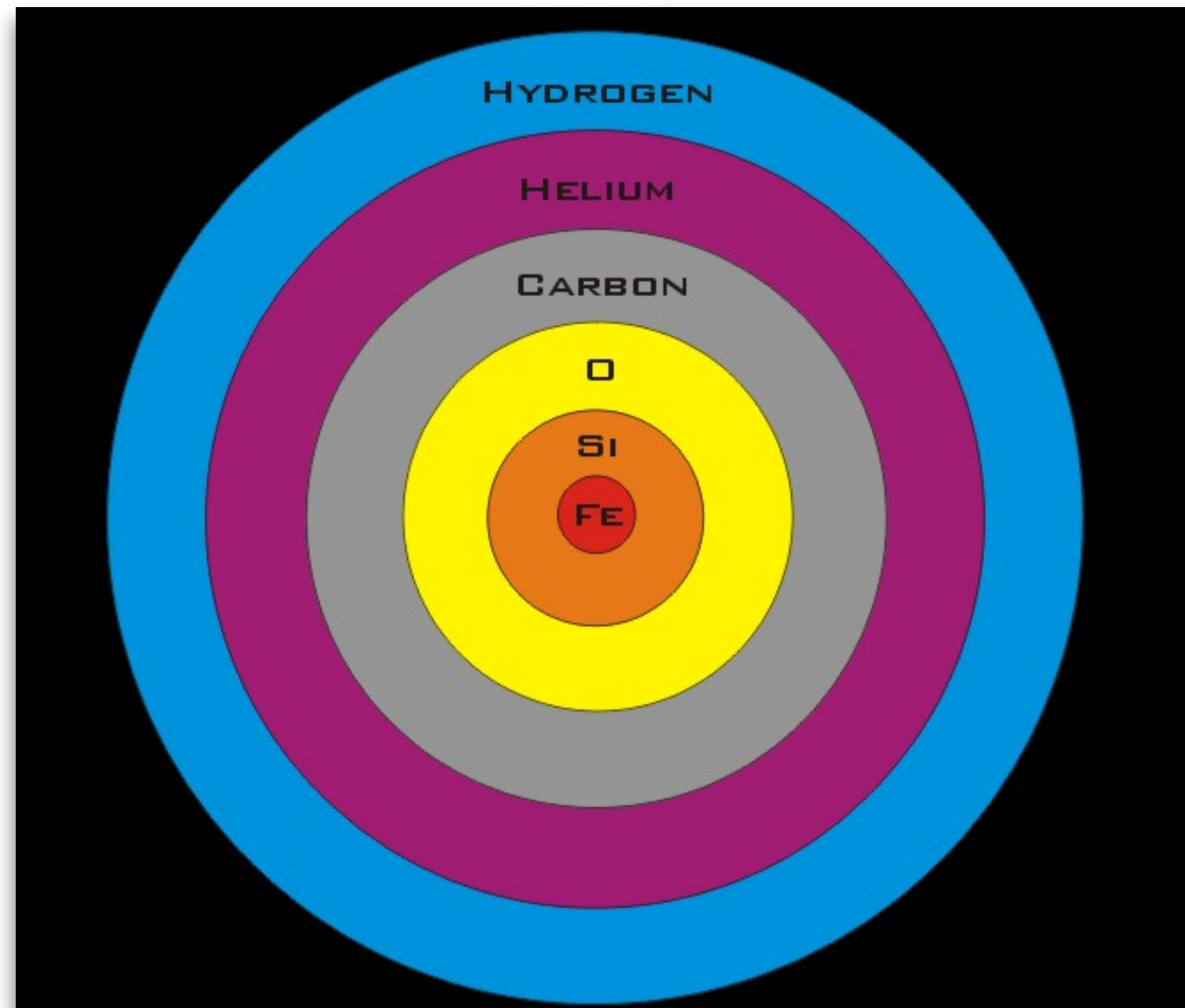
- **Energia** delle particelle a terra
 - Energia della particella che ha generato la cascata di particelle in atmosfera
 - Energia della particella all'uscita dalla sorgente
 - Potenza delle possibili sorgenti

POSIZIONE DELLE SORGENTI

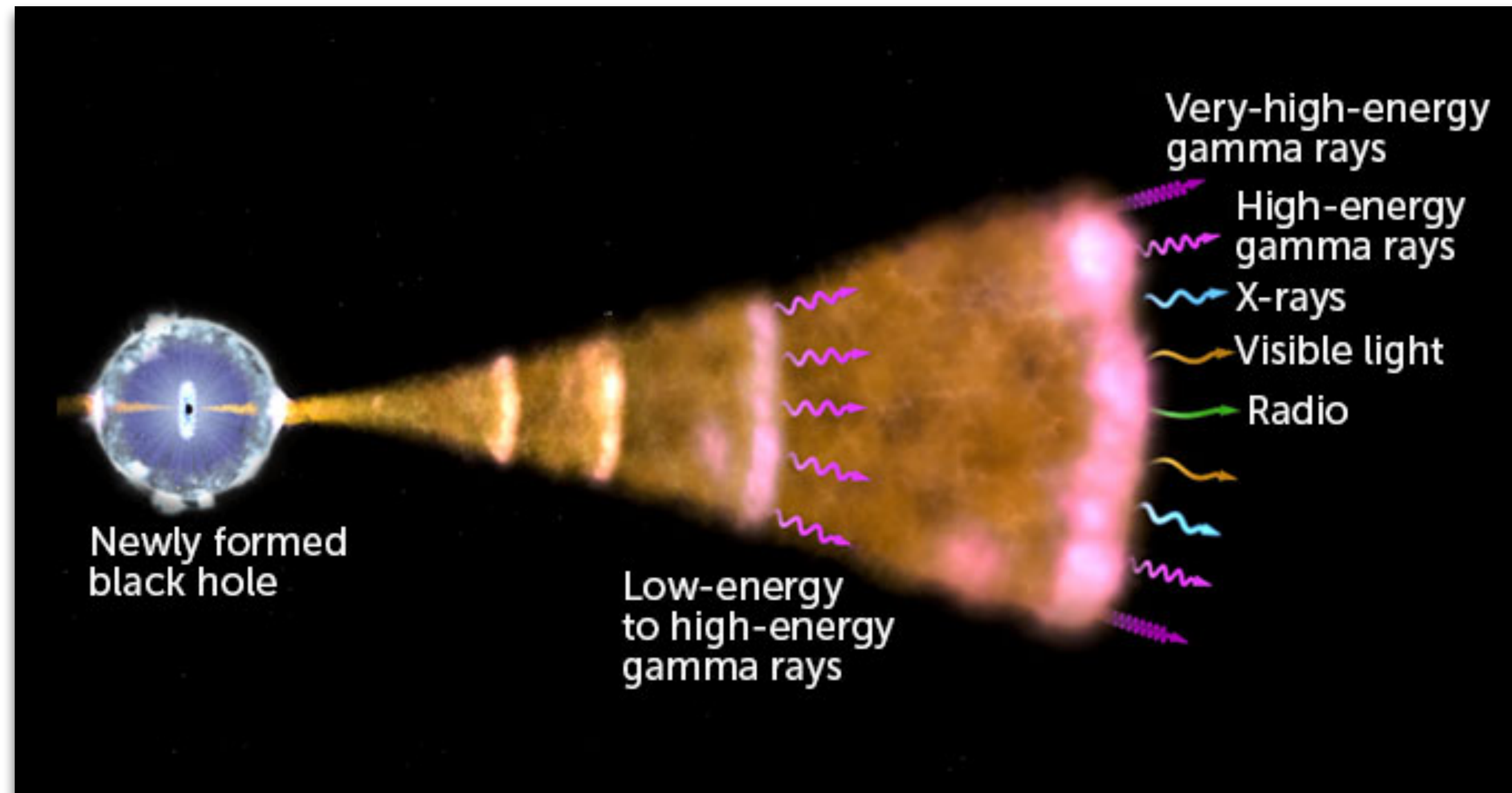
- **Direzione** della cascata di particelle -> posizione dell'acceleratore cosmico



NATURA DEI RAGGI COSMICI



- **Specie nucleare:** quali possibili sorgenti possono accelerare una certa specie nucleare

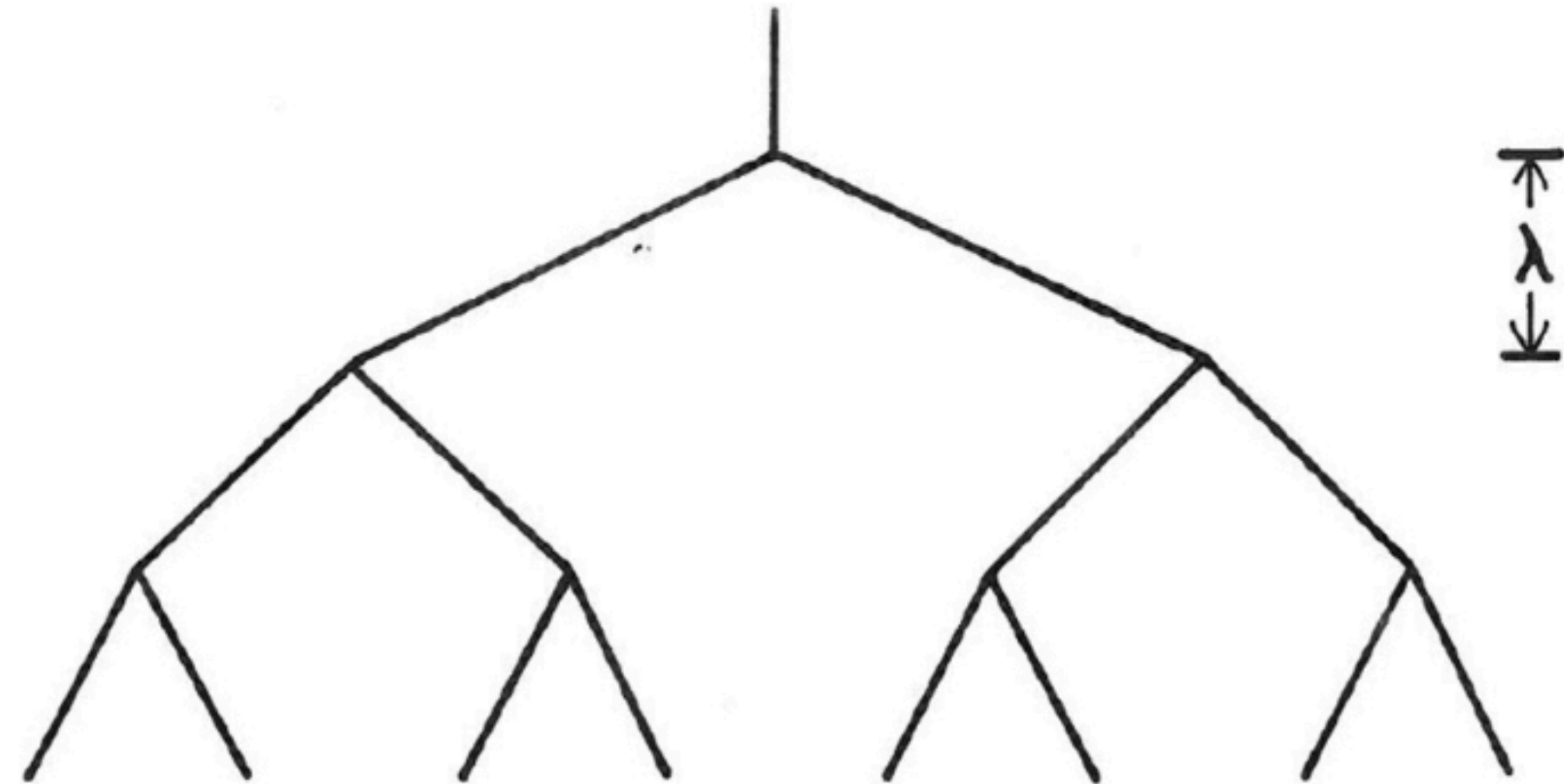


NATURA DEI RAGGI COSMICI

Modello di Heitler per le cascate elettromagnetiche in atmosfera

$$N(X) = 2^{X/\lambda}$$

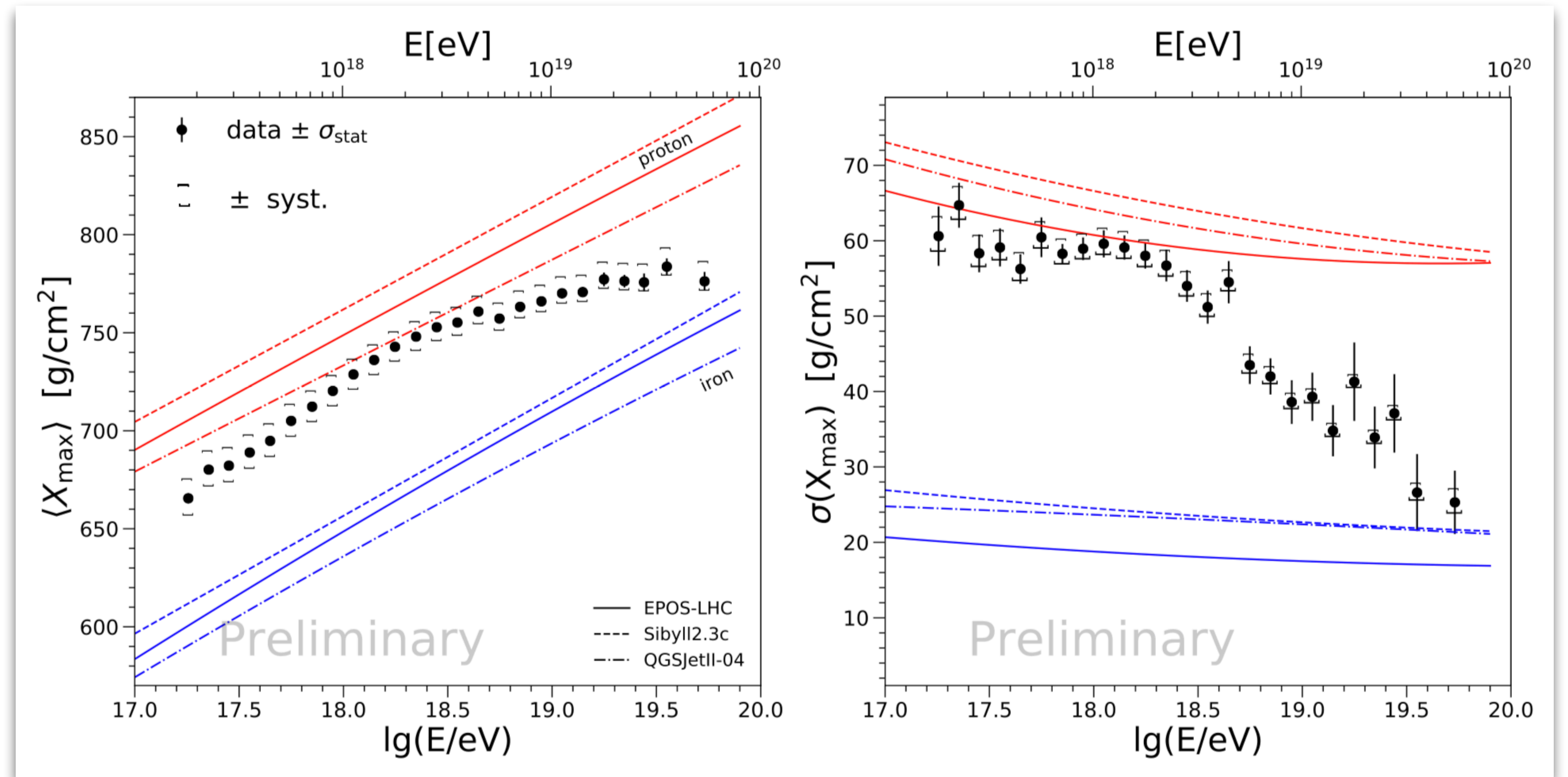
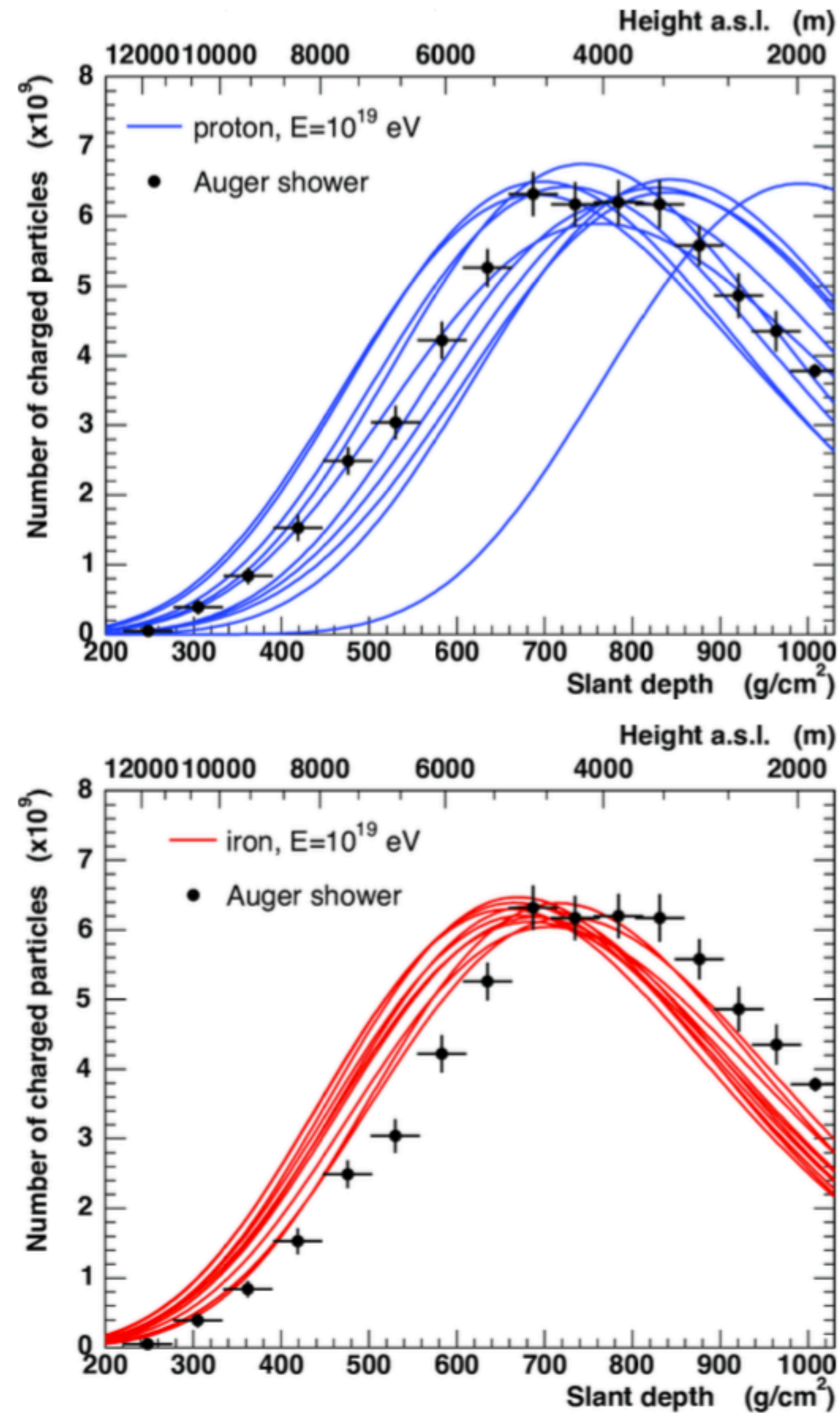
$$E(X) = \frac{E_0}{N(X)}$$



$$N(X_{\max}) = \frac{E_0}{E_c}, \quad E_c = 87 \text{ MeV}$$

$$X_{\max} = \lambda \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$

NATURA DEI RAGGI COSMICI

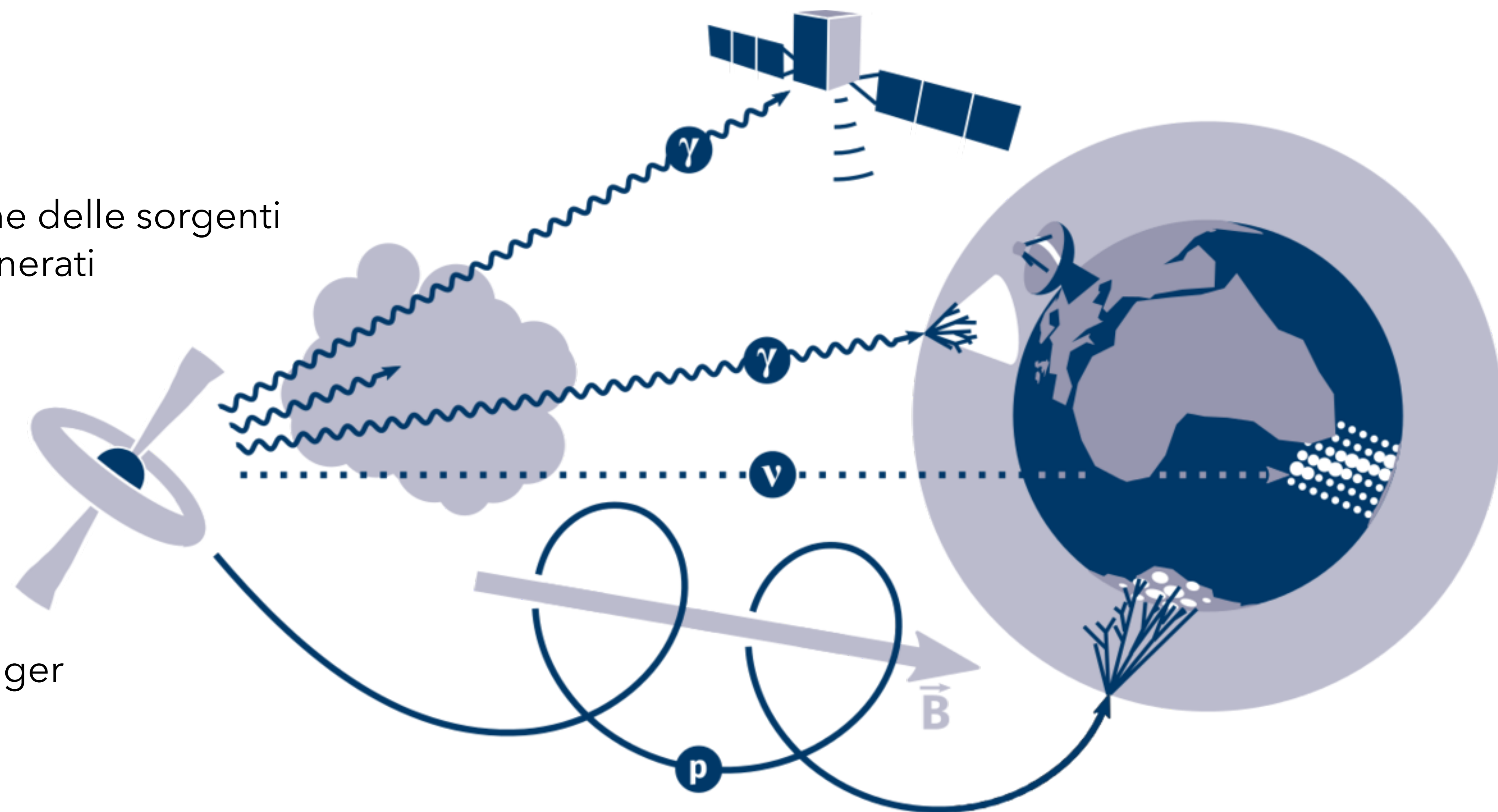


CONCLUSIONI

Dalle misure dei raggi cosmici a Terra:

- Energia
- Direzione di arrivo
- Specie nucleare

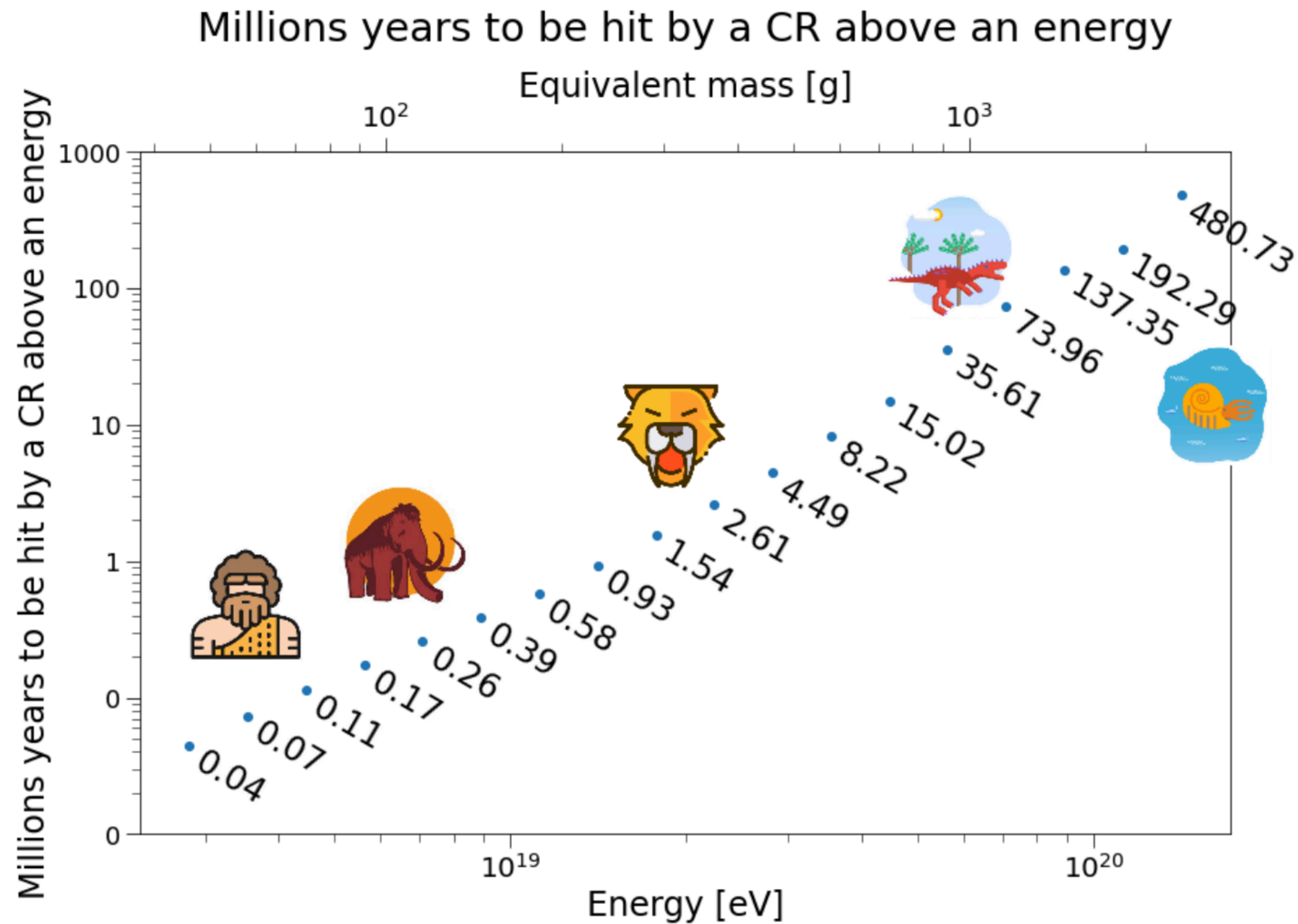
conosciamo le caratteristiche delle sorgenti astrofisiche che li hanno generati



Non solo raggi cosmici...

- Astrofisica multi-messenger
- Neutrini
- Fotoni
- Onde gravitazionali

BACKUP SLIDES

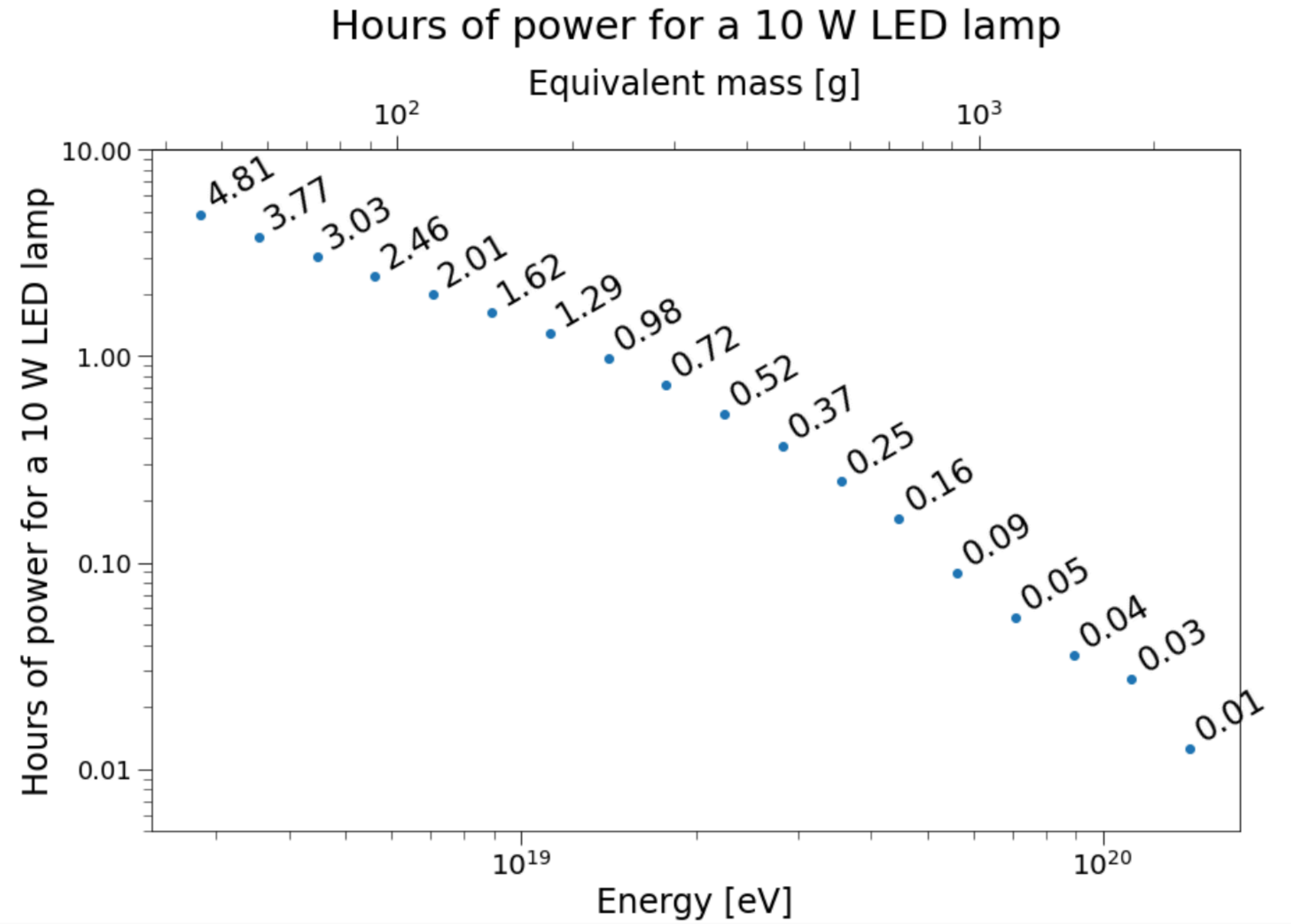


Time to be hit by a cosmic ray

How many million years would an astronaut have to wait to be hit by a particle above a specific energy (area of astronaut ~ 1 square meter)?

For the most extreme energies the waiting time is similar to that since the time of the first dinosaurs! For example: one must wait two hundred million years to be hit by a cosmic ray above 10^{20} eV but only forty thousand years to be hit by a cosmic ray above 2.5×10^{18} eV.

This shows why we need such large arrays to detect these extraordinary particles and why direct detection in space is not possible at such high energies. Ultra high energy cosmic rays are RARE!



What is the total energy carried by cosmic rays?

What is the total energy carried by cosmic rays on the whole observatory (3000 km^2) in more than 15 years? For how many hours could we light a lamp of 10 W using this energy? See the number on the y-axis and the numbers near the points.

The energy flux of cosmic rays at such energies is extremely small. We could power a LED lamp for less than 5 hours using the energy of all cosmic rays collected over an area of 3000 km^2 after 15 years of operation.

Despite the huge energies for the single particles the overall flux of energy is tiny and it is not useful to try to harvest it.