

Riccardo Rando
Dipartimento di Fisica e Astronomia &
Centro di Ateneo di Studi e Attività Spaziali
- Università di Padova
&
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
- Sezione di Padova

riccardo.rando@unipd.it

I raggi cosmici: cosa sono e come osservarli

Cosa sono i raggi cosmici?

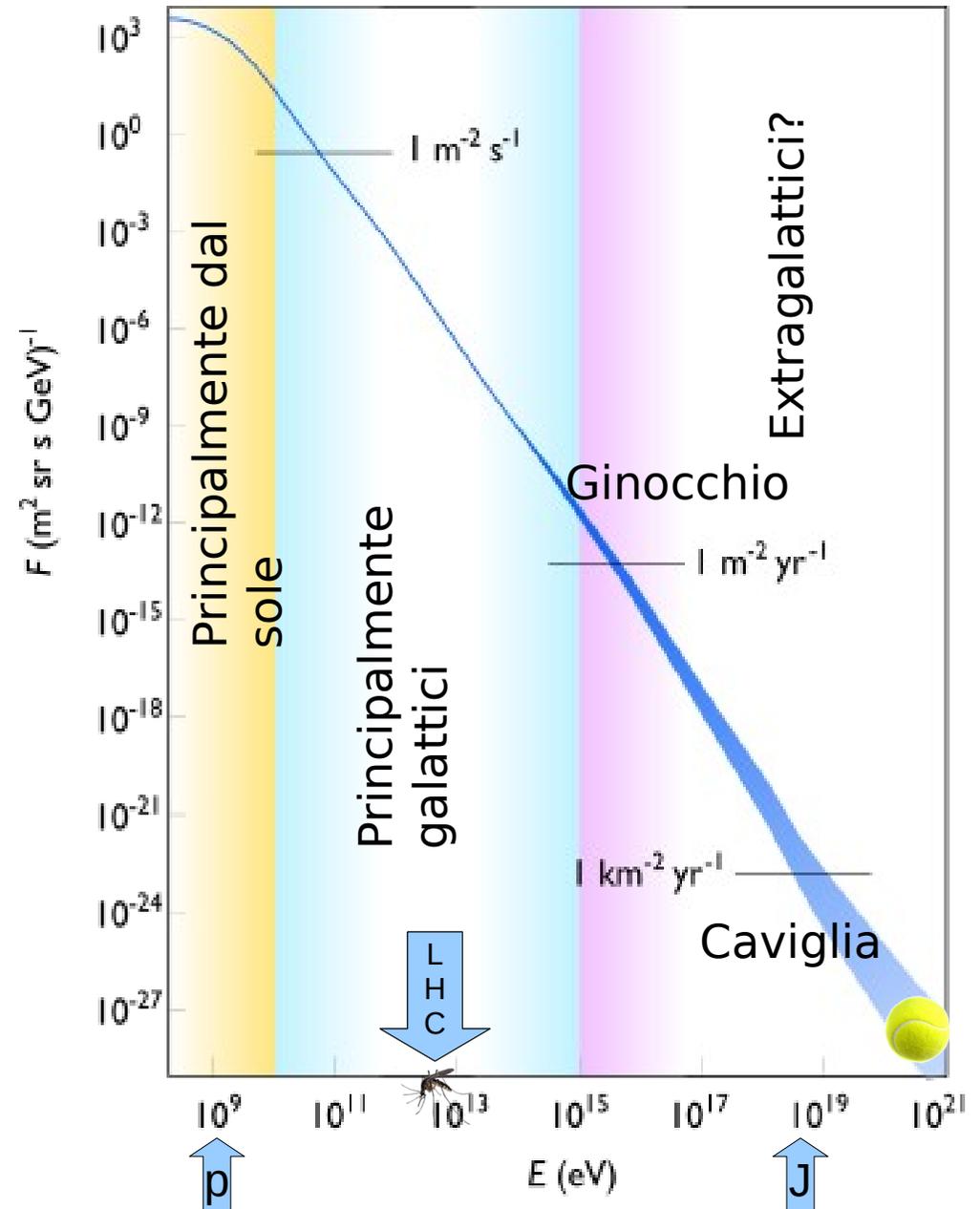
Sono **particelle** atomiche/subatomiche che arrivano sulla Terra

- principalmente **protoni** (~90%)
- nuclei di **elio** (~9%)
- **elettroni** (~1%)
- **raggi gamma** (~0.1%)

Il flusso diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia

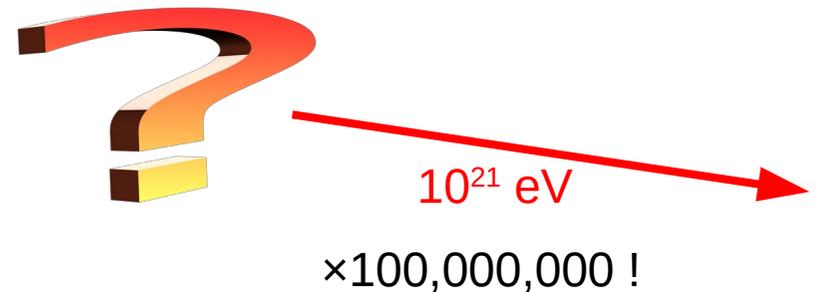
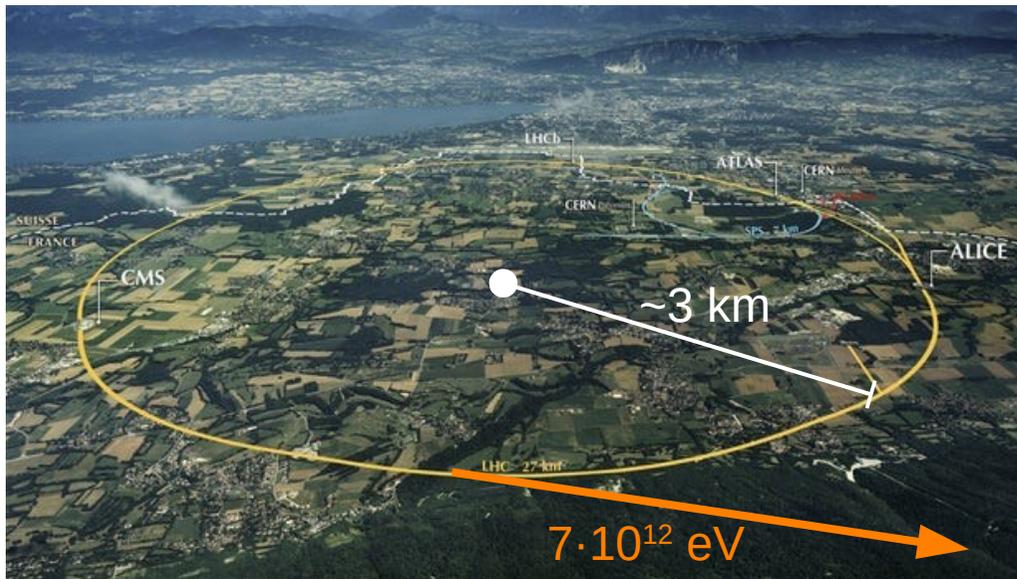
Una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con la stessa energia di una pallina da tennis ben lanciata.

- Energie 100 milioni di volte più grandi delle energie che riusciamo a produrre sulla Terra (ex: al CERN)



Energie

- **1 GeV = 10^9 eV** : energia minima per creare un **protone** (relazione di Einstein $E=mc^2$)
- **7000 GeV = $7 \cdot 10^{12}$ eV = 7 TeV** : energia di un **protone accelerato** in un fascio di LHC (energia cinetica di una zanzara)
- **$6 \cdot 10^{18}$ eV = 1 Joule** : energia cinetica di una massa di 1 kg che cade da 10 cm di altezza
- **10^{21} eV**: energia cinetica di una palla da tennis ben lanciata (sono le più grandi energie mai misurate in una particella singola, oltre **cento milioni di volte più alte delle energie dei fasci di LHC al CERN**)

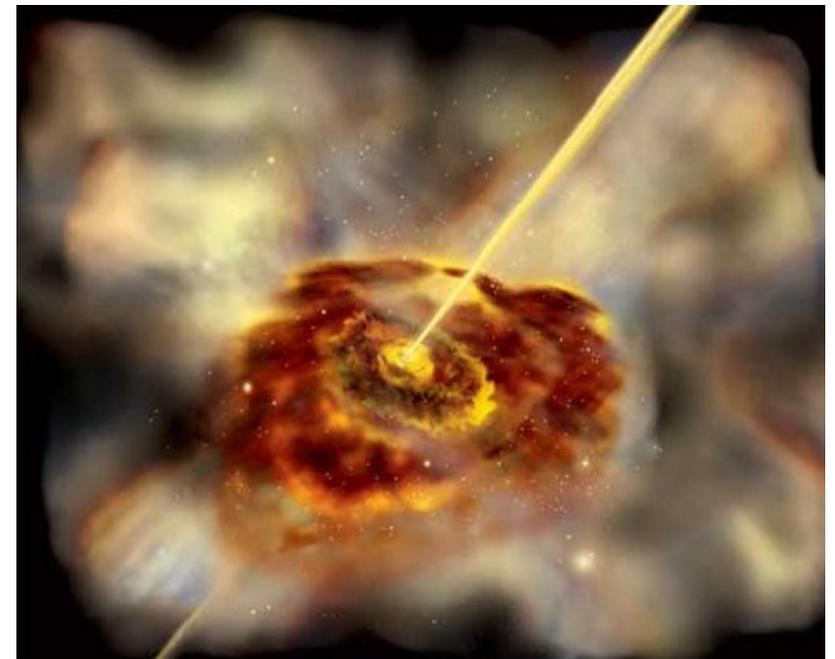
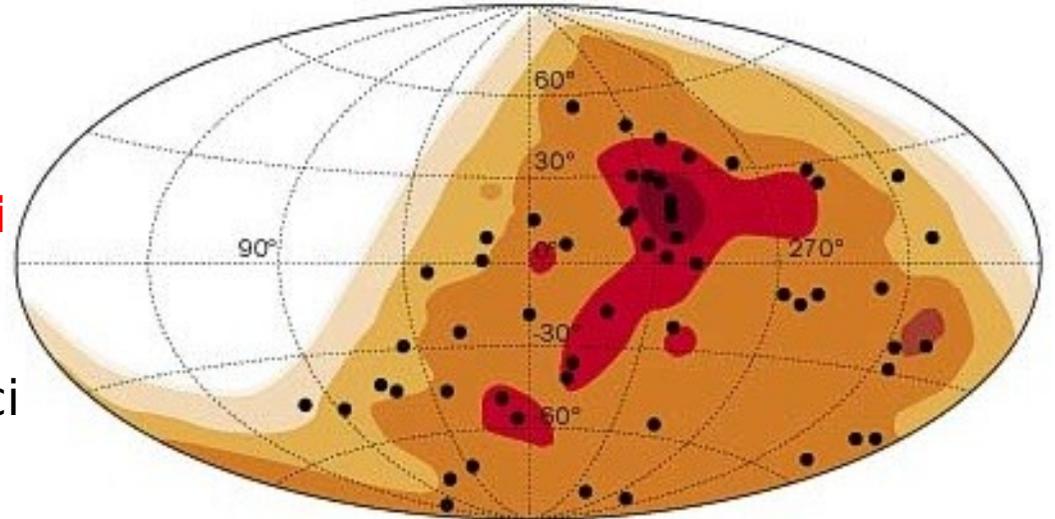


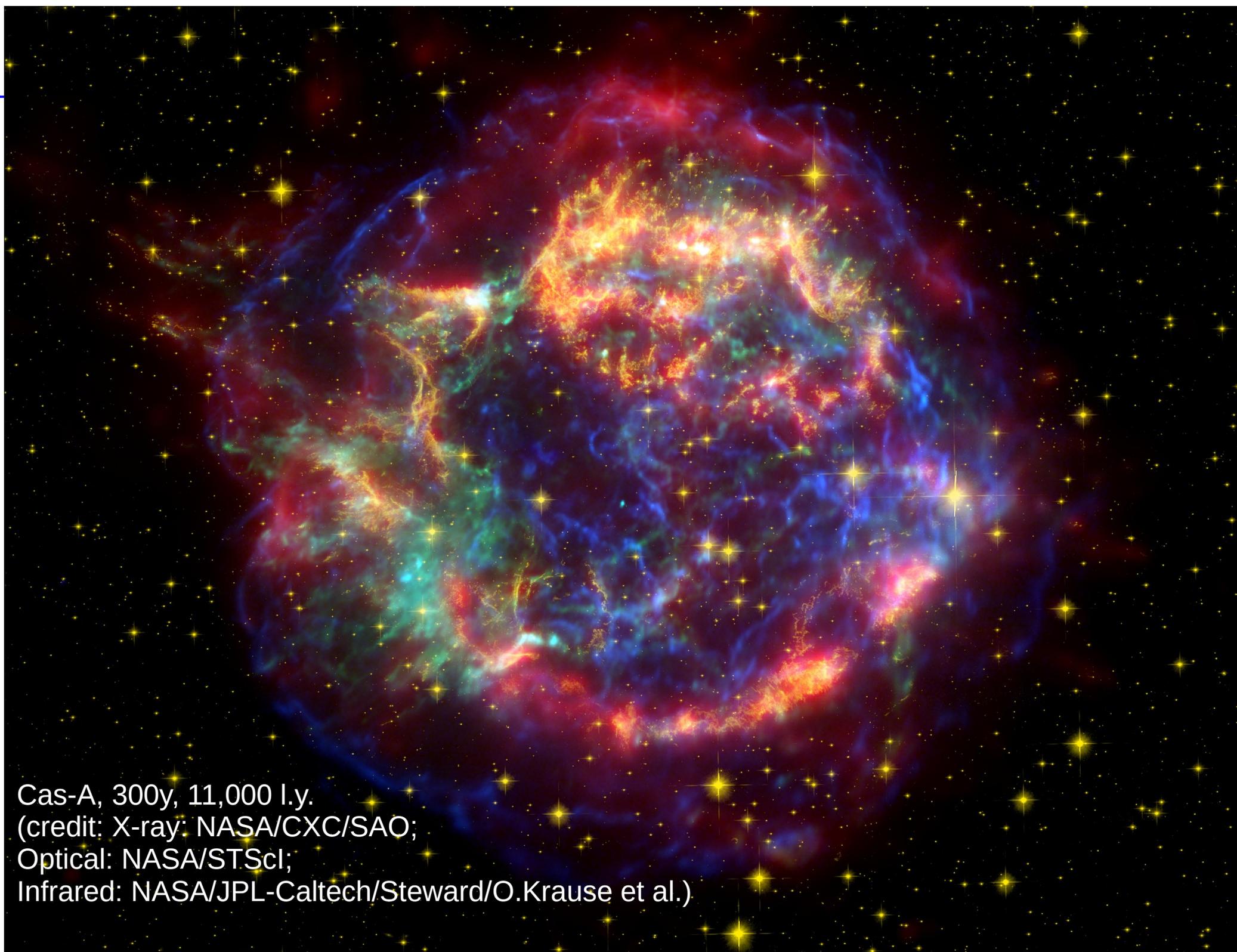
Origine

Abbiamo capito che le loro energie sono prodotte da **collassi gravitazionali**:

Meno di 10^{15} eV: probabilmente **galattici** (resti di supernova)

Sopra 10^{15} eV: probabilmente **extragalattici** (buchi neri super-massicci al centro delle galassie)





Cas-A, 300y, 11,000 l.y.
(credit: X-ray: NASA/CXC/SAO;
Optical: NASA/STScI;
Infrared: NASA/JPL-Caltech/Steward/O.Krause et al.)

M87, 240,000 l.y.
(credit: NASA-HUBBLE)



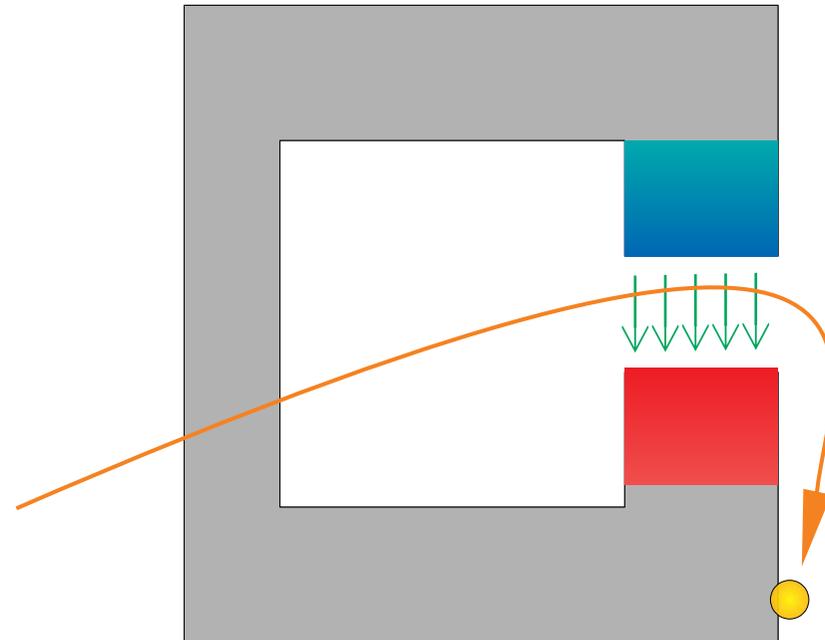
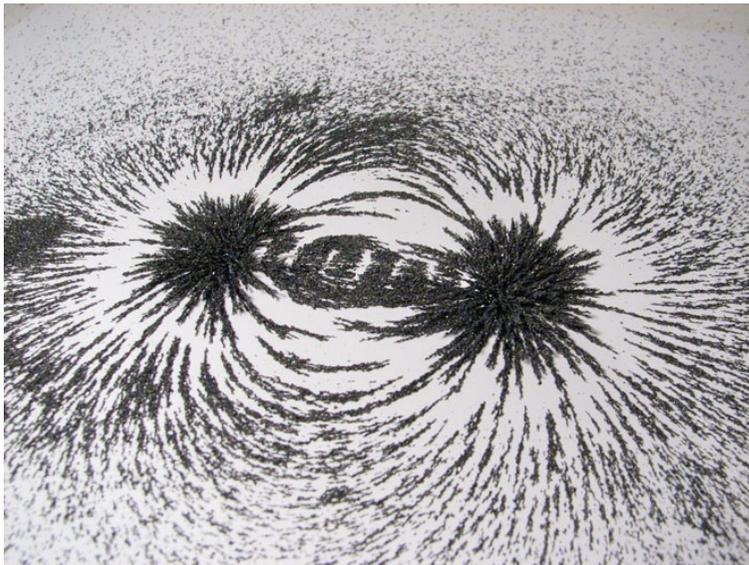
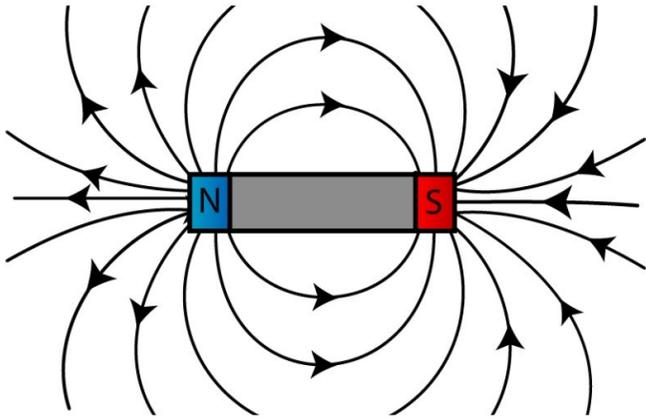
Viaggio

Dalla loro sorgente i raggi cosmici devono giungere fino a noi

Il loro viaggio dipende fortemente dalle loro caratteristiche: massa e soprattutto **carica elettrica**

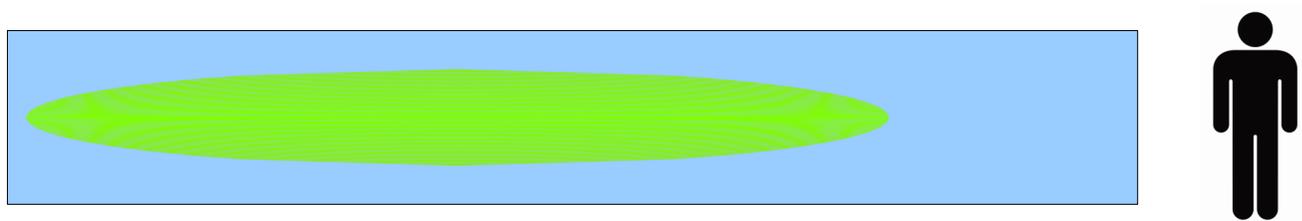
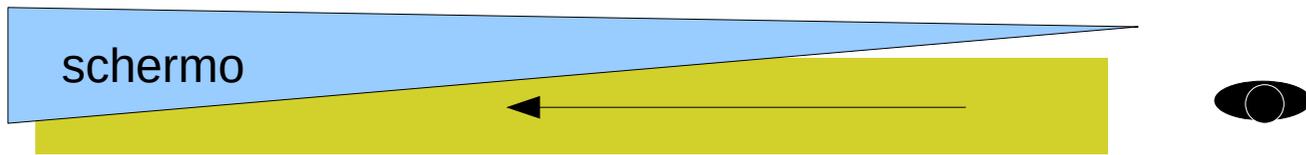
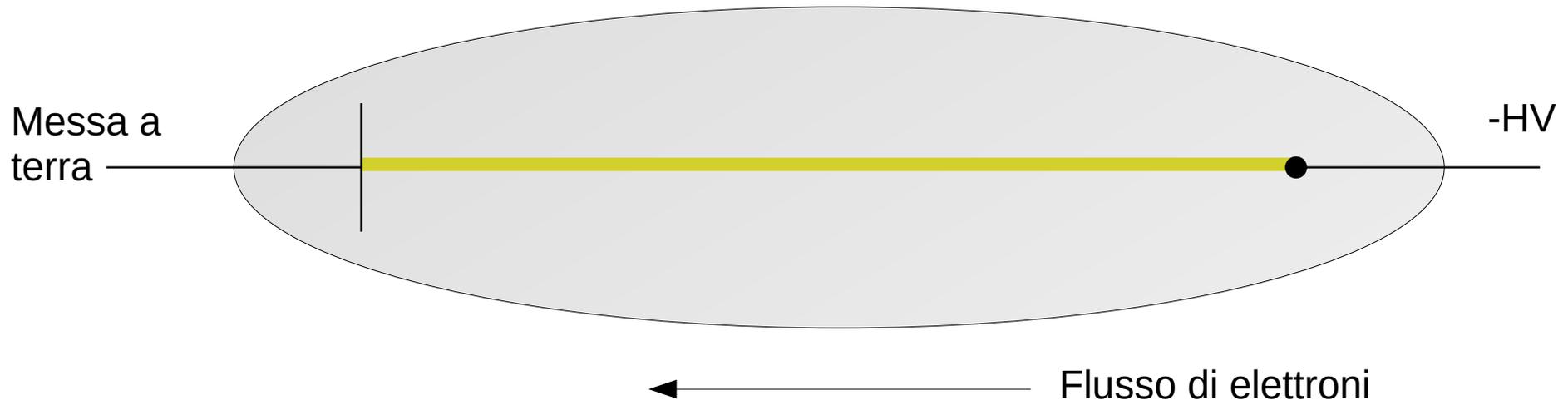
Le particelle prive di carica viaggiano in linea retta (possono essere assorbite da ostacoli)

Le particelle cariche sono soggette alla **forza di Lorentz**: i campi magnetici le fanno **curvare**

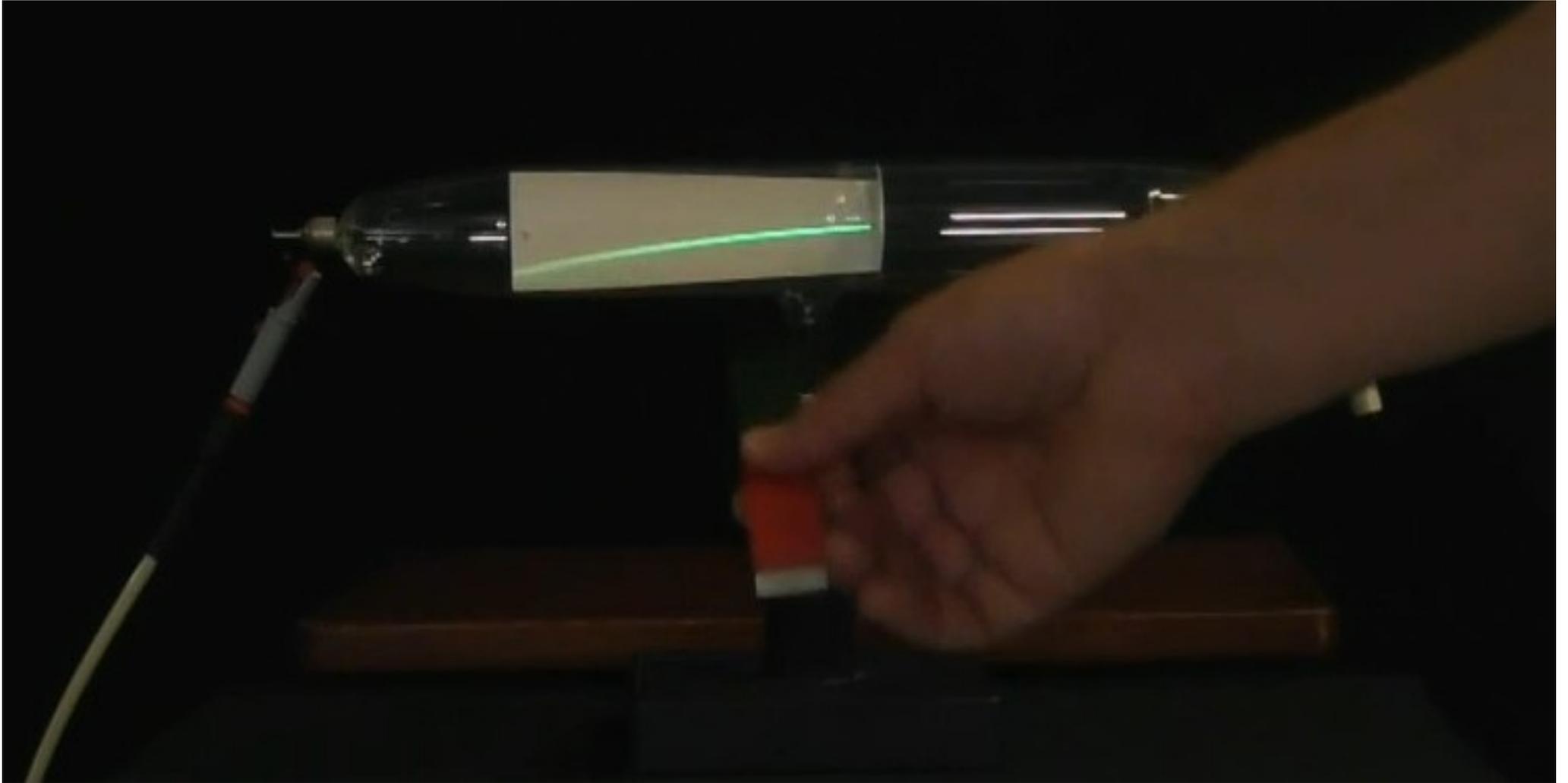


Fissato il campo, la curvatura dipende da massa, **carica** e **velocità**

Tubo catodico



Esperimento: tubo catodico



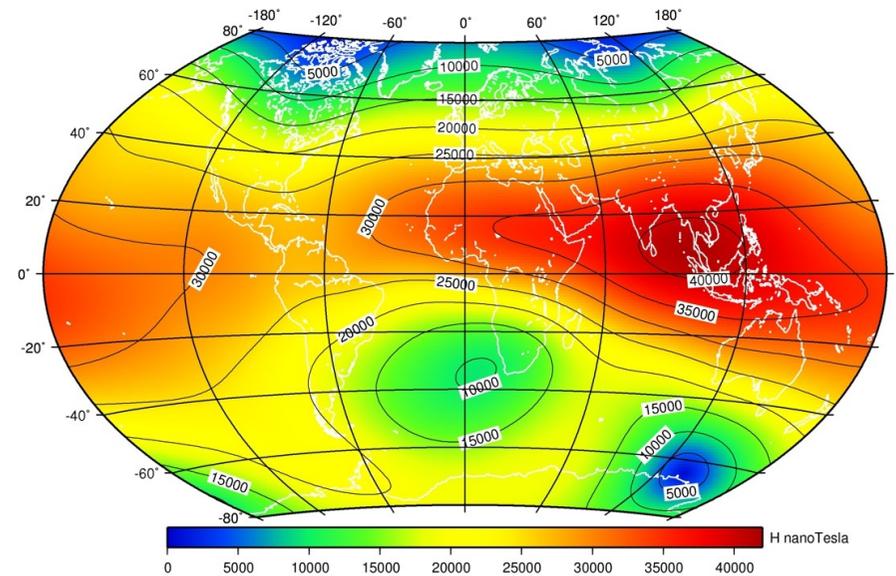
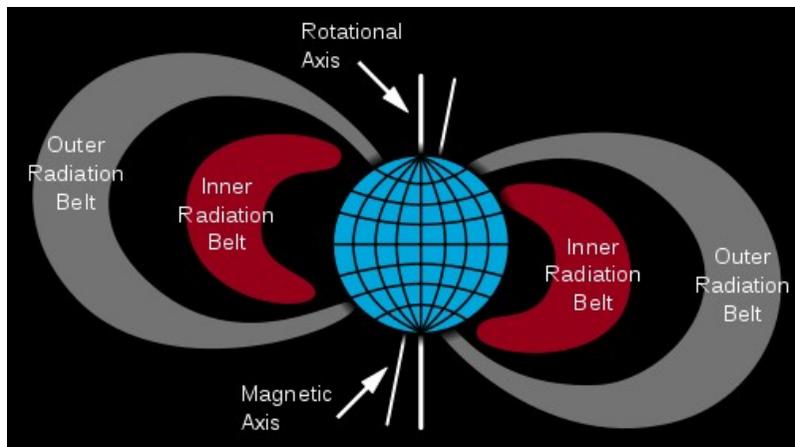
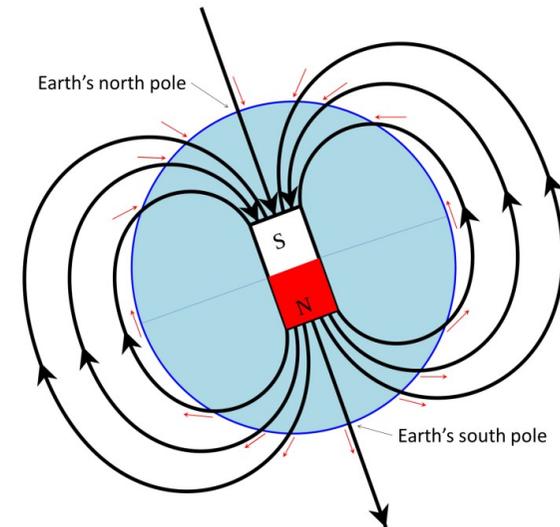
<https://www.youtube.com/watch?v=xntCkPJAp54>

Schermo magnetico

Il campo magnetico terrestre è simile a quello generato da una barra magnetizzata (inclinato e spostato rispetto il centro)

- Alcune particelle cariche verranno **respinte** (a bassa energia, o meglio *rigidità* → massa/carica)
- Alcune rimangono **intrappolate** (“fasce radioattive”)
- Alcune riusciranno a **passare** e a raggiungere l’atmosfera

Dipende dall’intensità del campo: dipenderà da dove mi trovo



NB: 90% dell’atmosfera entro 16 km

Atmosfera

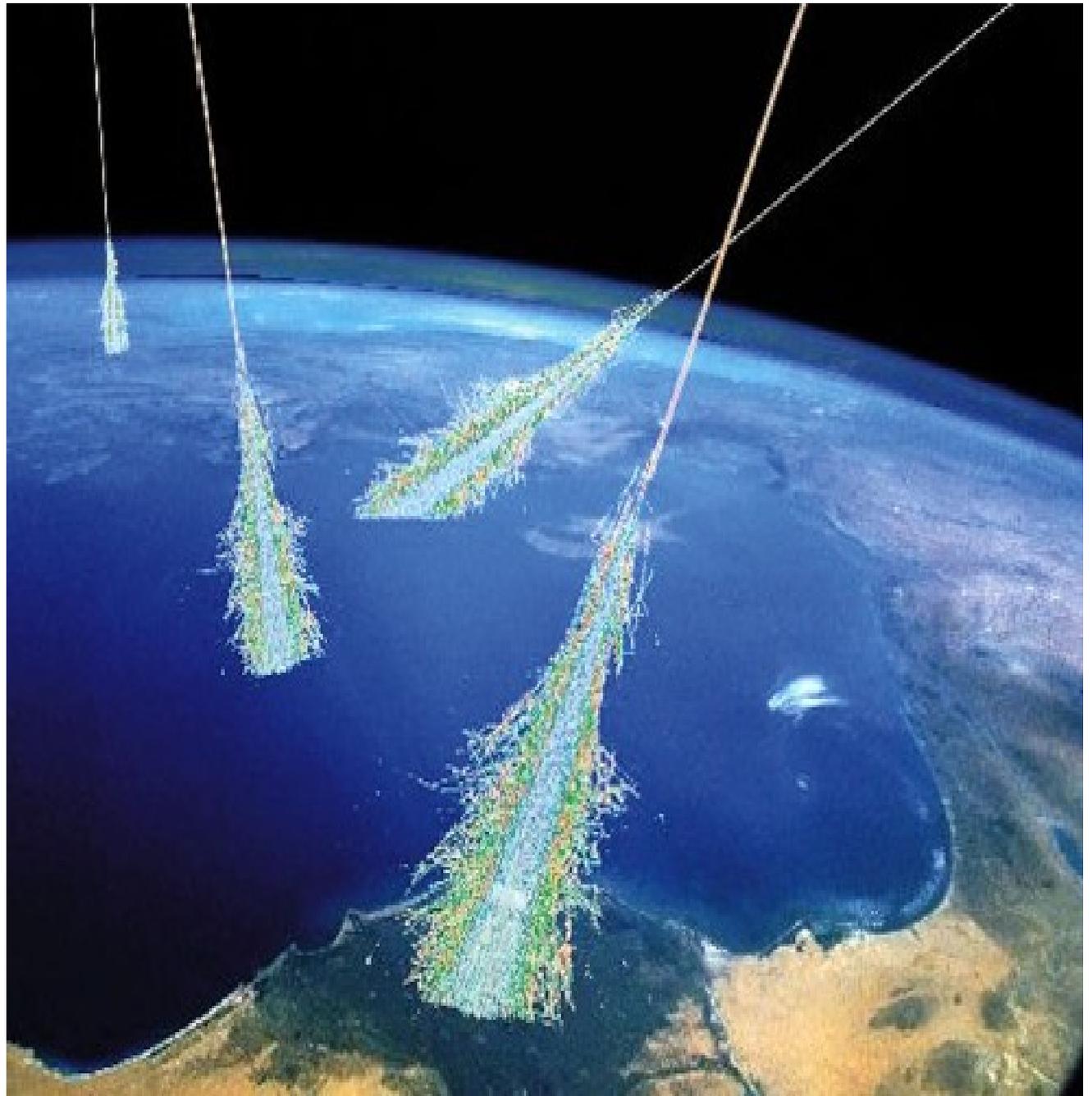
Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera, sono assorbiti, ma generando **particelle secondarie**

Queste a loro volta sono assorbite e ne producono altre, fino a che le energie scendono abbastanza per avere assorbimento senza produzione

Si formano **sciami** nella parte superiore dell'atmosfera

L'atmosfera ci protegge da questa radioattività (a cui è più esposto chi vive in alta montagna e chi viaggia spesso in aereo)

Giungono **fino al livello del mare** principalmente particelle secondarie. **Se voglio vedere le primarie devo uscire dall'atmosfera**



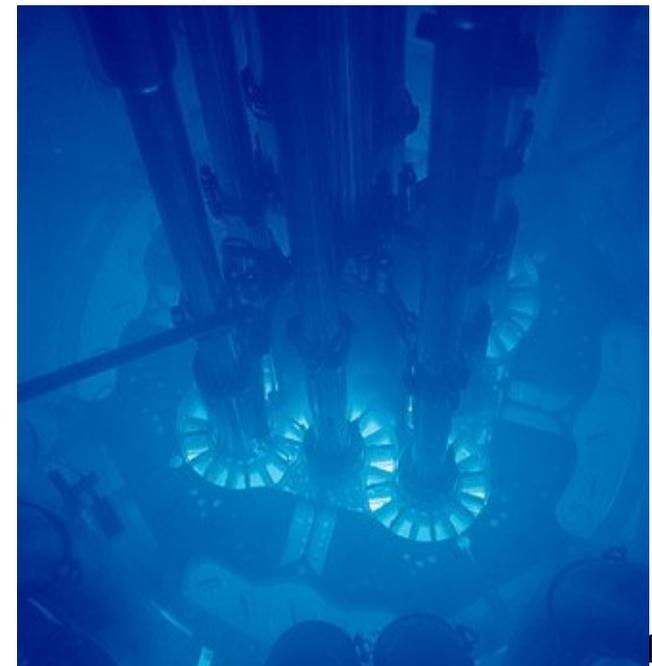
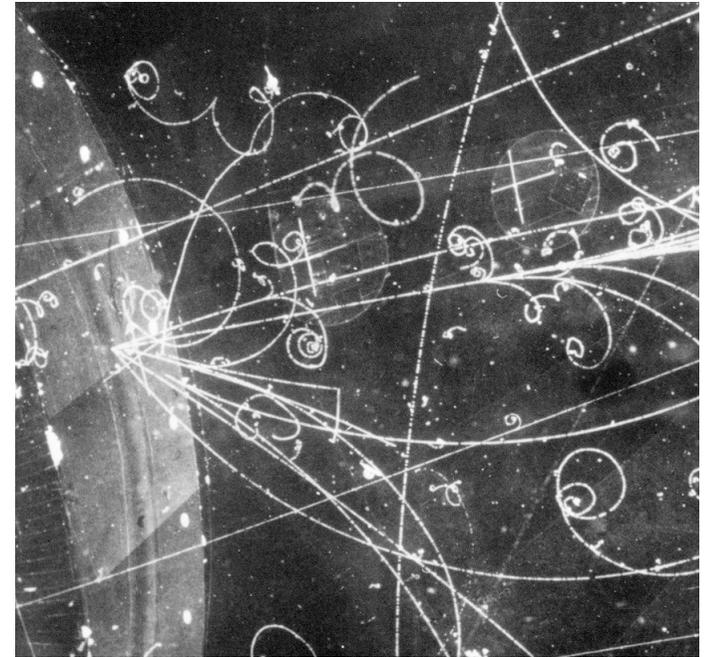
Come osservarli, a grandi linee

1) **ionizzazione**: le particelle cariche che si muovono in un mezzo strappano gli elettroni agli atomi del materiale, ad esempio osservo un segnale elettrico o luminoso 🖱

2) **radiazione Cherenkov**: particelle che si muovono a velocità maggiore di quella della luce nel mezzo emettono un segnale luminoso

Vari altri meccanismi, ma questi sono i principali, e quelli che menzioneremo oggi

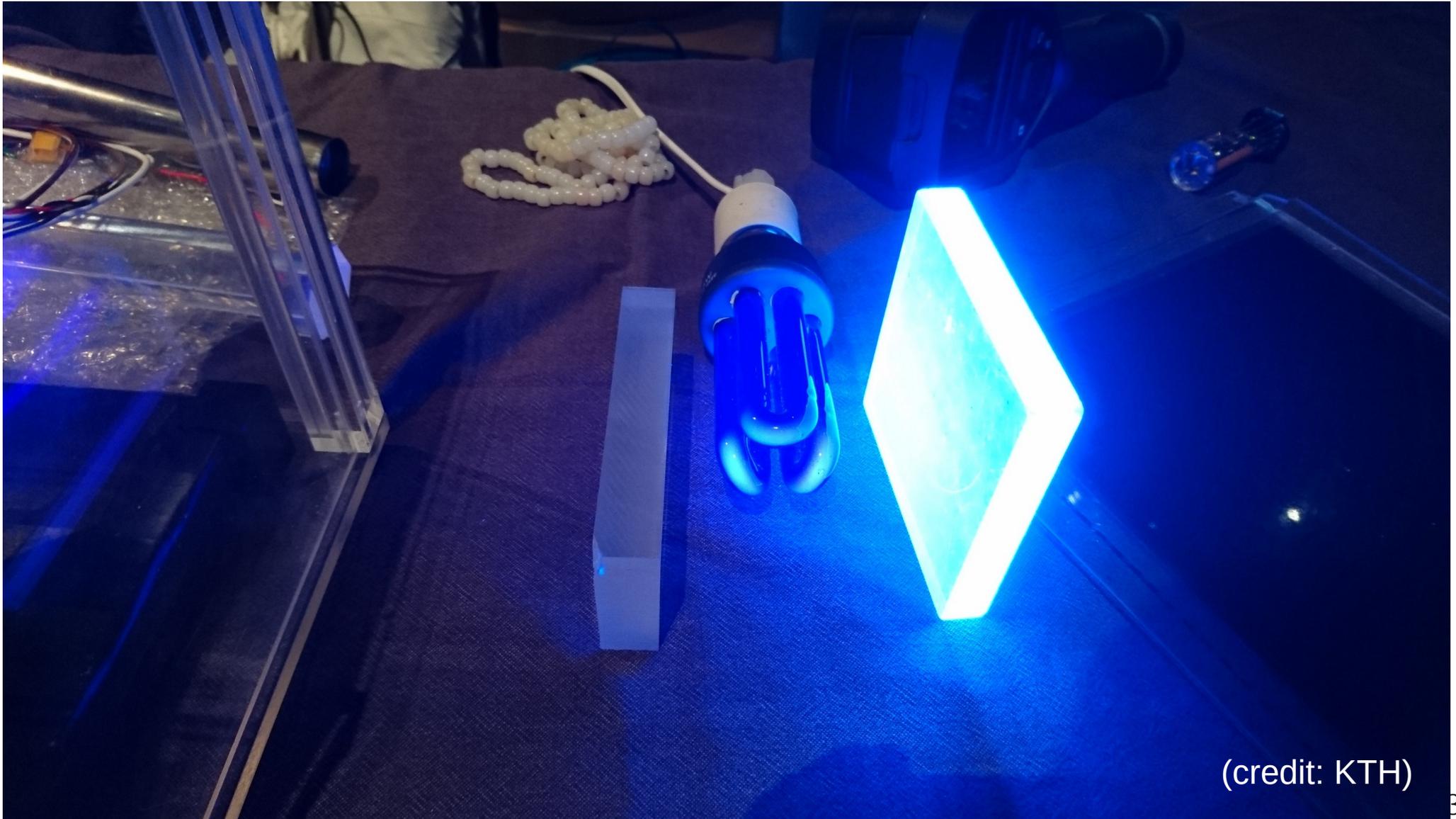
Ricordate: posso sfruttare la **produzione di secondari** e non osservare direttamente il raggio cosmico, ma la sua **interazione con il materiale** che causa l'emissione di particelle secondarie (es: luce)



Scintillatori

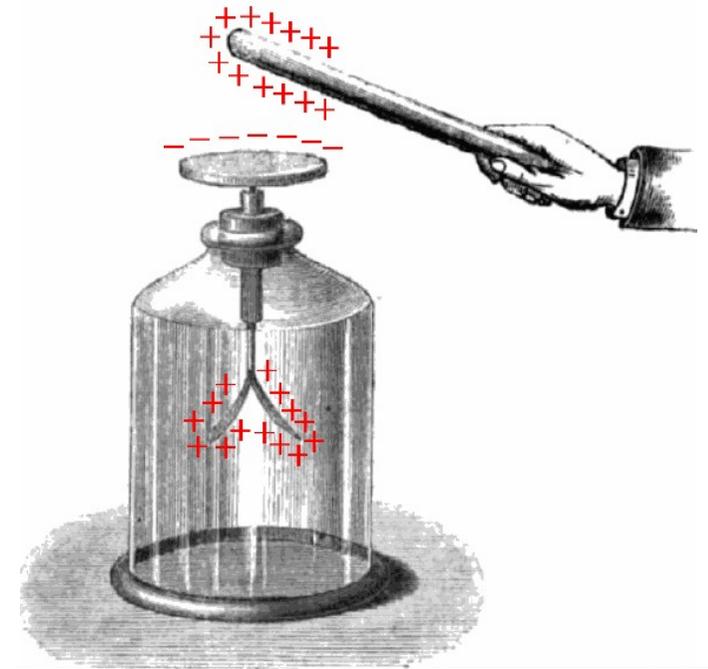
La ionizzazione produce luce visibile

Sono nel telescopio che userete voi: misurerete **il flusso di cosmici secondari in funzione dell'angolo dalla verticale**



(credit: KTH)

Scarica spontanea di un elettroscopio



1785: Coulomb scoprì che un elettroscopio carico, anche se perfettamente isolato, si scarica

1900: Le scoperte di Marie (33 anni) e Pierre Curie consentono di concludere che questa scarica spontanea è dovuta alla **radioattività naturale**



Radioattività naturale

Radioattività naturale: campioni di elementi radioattivi emettono “raggi” capaci di penetrare la materia (ad es: impressionare lastre fotografiche)

Si osserva però un **livello costante di radioattività anche in assenza di elementi radioattivi**

Da dove viene questa radioattività naturale?

- Dal suolo?
- Dal Sole?
- Dall'atmosfera?
- Dallo spazio?

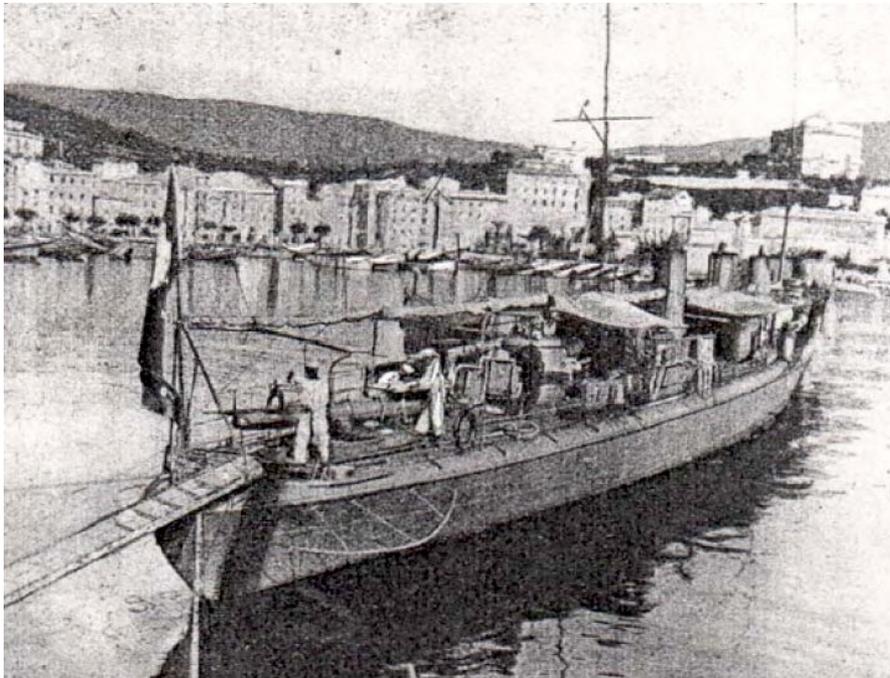
Nel primo decennio del '900 l'opinione dominante era che venisse dal suolo



Prime misure di radioattività

Padre Wulf (~1910): misurare la radioattività sulla torre Eiffel e confrontarla con il suolo
Radiazione **dimezza salendo di ~330 m** (ci si aspettava che dimezzasse ogni ~80 m)
Interpretato come conferma dell'opinione prevalente: la radioattività viene dal suolo

~300 m



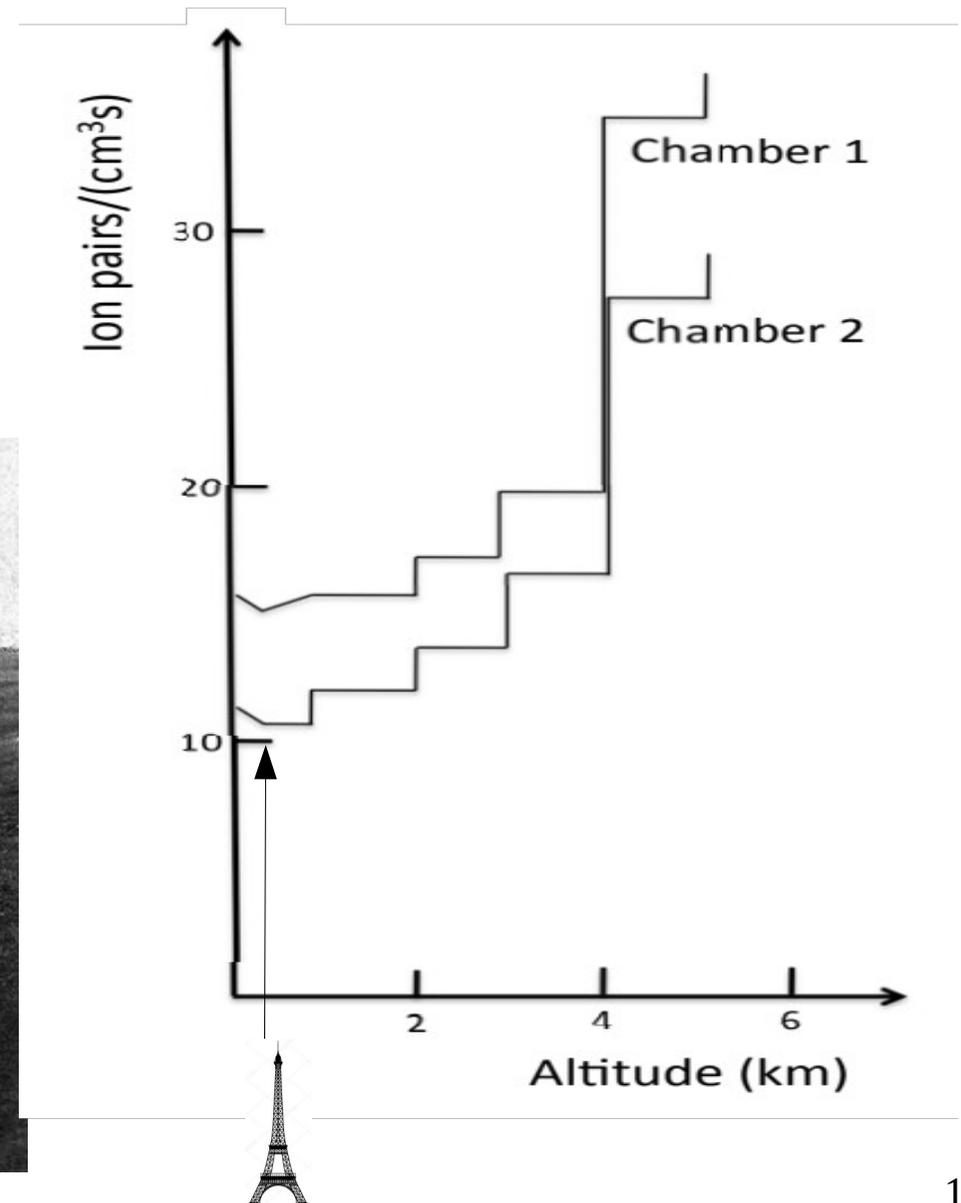
Pacini (1908): a disposizione il caccia-torpediniere "Fulmine", messo a disposizione dalla Regia Marina
A 3 metri di profondità a Livorno (e poi in ottobre a Bracciano) osserva una **riduzione del 20%** della radioattività

Victor Hess (~1912)

Victor Hess (1912): 7 voli in pallone, fino a 5300 metri

I risultati mostrano che la radioattività cresce rapidamente oltre i 3000 metri

Hess conclude che parte della radiazione viene dal suolo, e parte dall'alto (fuori dalla Terra)



Il dopoguerra

- **Voli su pallone** e **laboratori sulle montagne**
- Roma, immediatamente dopo la guerra: laboratorio al Plateau Rosa
- Padova, primi anni '50: il laboratorio del Fedaia (sotto la diga che raccoglie l'acqua di disgelo della Marmolada)
 - Strumentazione di Rossi, Bassi, Someda
 - Primo elettromagnete per la misura di quantità di moto dalla curvatura (lo vedete fuori in giardino al DFA)
 - Visite di Fermi, Blackett, Powell

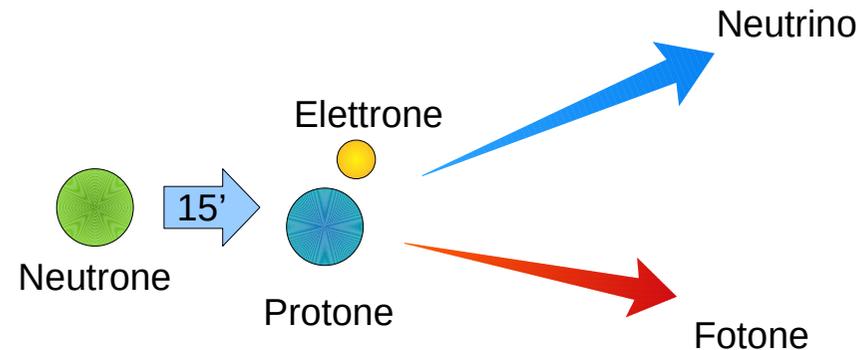
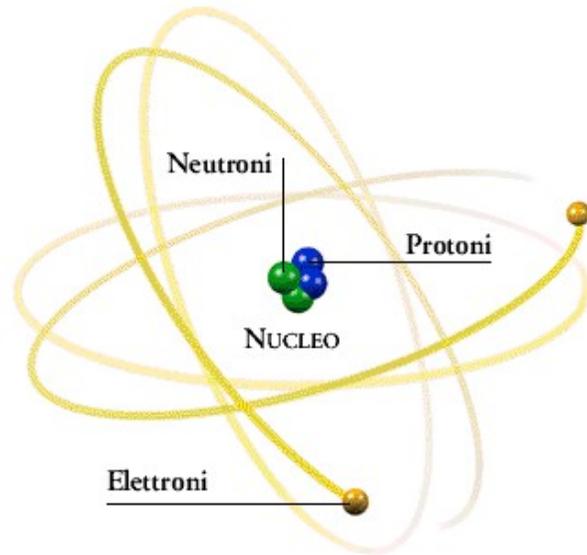
Poi inizia l'era degli acceleratori,
e uno zoo di particelle...

LABORATORIO RAGGI COSMICI



Come si osservano OGGI?

Vediamo di dare un'occhiata a come si fanno osservazioni di raggi cosmici oggi!
Cerchiamo di focalizzarci su alcuni in particolare, le più "comuni"



nome	Massa (m_e)	Carica (e)
Elettrone	1	-1
Protone	~2000	+1
Fotone	0	0
Neutrino	<0.0000001	0

NB: i neutrini sono meno familiari perché interagiscono molto debolmente. Ogni secondo ci attraversano 400 mila miliardi di neutrini provenienti dal Sole!
Noi emettiamo 4000 neutrini al secondo, prodotti dal decadimento del potassio.

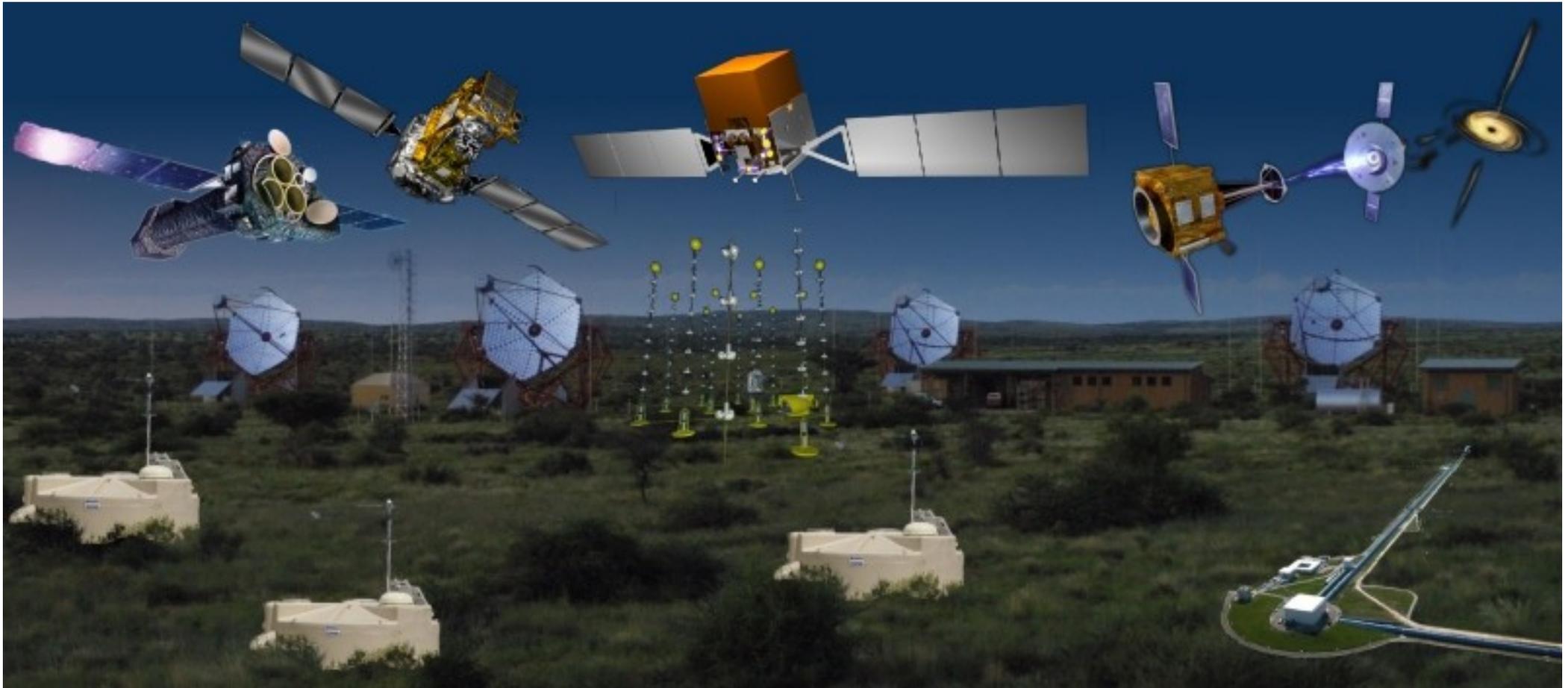
+ muone: "cugino" dell'elettrone, 200x massa

Osservazioni dirette o indirette

Posso andare incontro ai raggi cosmici **primari**, oltre la barriera dell'atmosfera, e osservarli **direttamente**

Oppure posso osservare dal livello del mare il lampo di luce prodotto dalla loro interazione con l'atmosfera e particelle **secondarie** (misure **indirette**)

Per i neutrini il problema è diverso: arrivano, e molti, ma **devo riuscire a misurarli!**



Telescopi Cherenkov

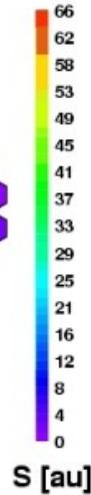
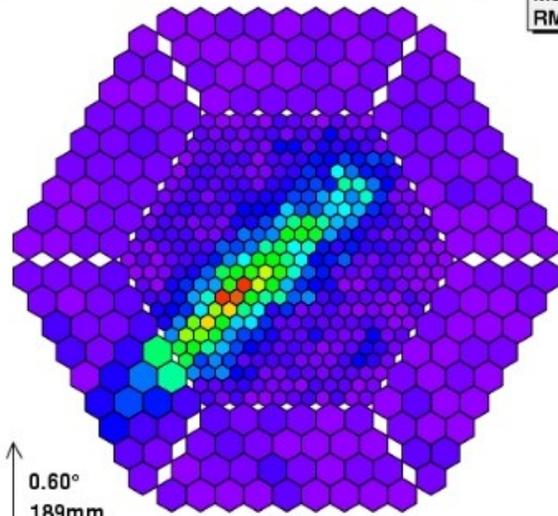
Disegnati per osservare gli sciame **causati da fotoni** di energie tipiche $\sim 10^{12}$ eV
Per loro gli sciame da particelle cariche sono un fondo da eliminare
Forniscono una misura dei flussi in atmosfera

Es: MAGIC/CTA
isole Canarie
Altitudine 2200 metri



Event #3932 of Run #47738 (09.01.2005 05:31:46.760)

Signal density
Mean 7.064
RMS 10.87





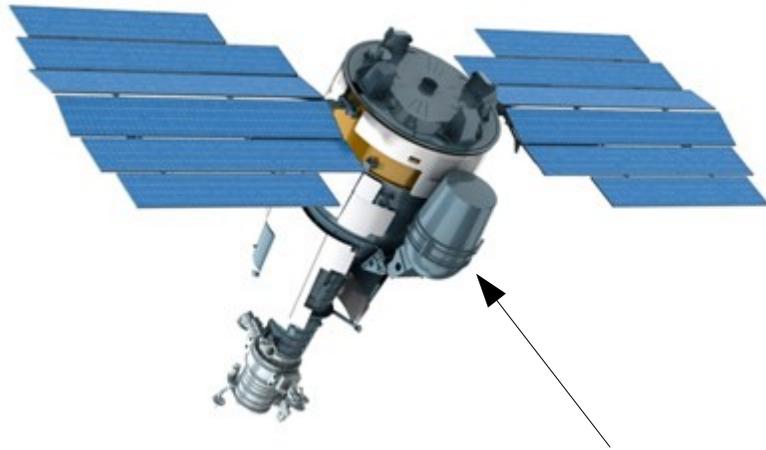
(credit: CTAO)

Misure in orbita

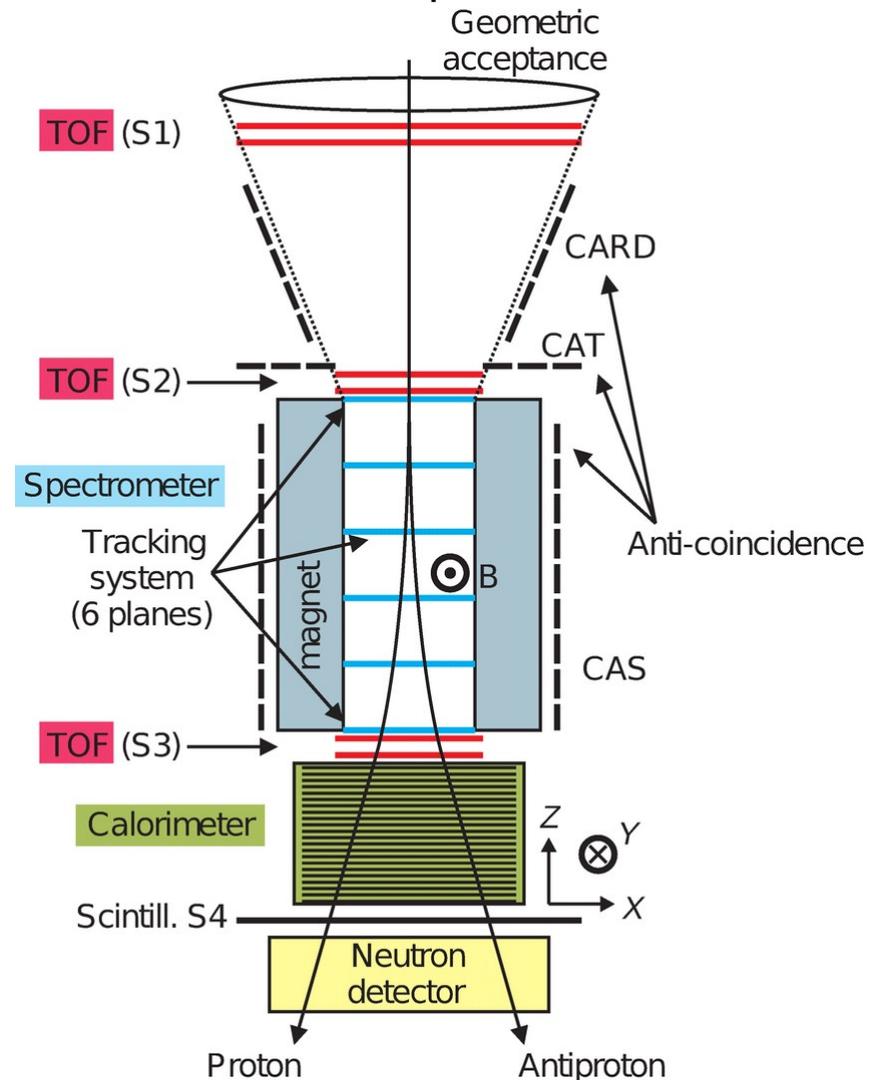
Alzandosi al di sopra dell'atmosfera si possono misurare direttamente le particelle
Lavoriamo nel regime di **energie di provenienza solare o al più galattica**

A quote basse (~500 km) c'è ancora lo schermo magnetico della Terra, in più c'è l'effetto analogo del Sole e anche di campi magnetici interni alla Galassia, per cui la direzione originale non è sempre facilmente ricostruibile

Numerosi satelliti, dedicati e non
Es: PAMELA



Energie: 10^8 – 10^{12} eV
Origine solare / galattica

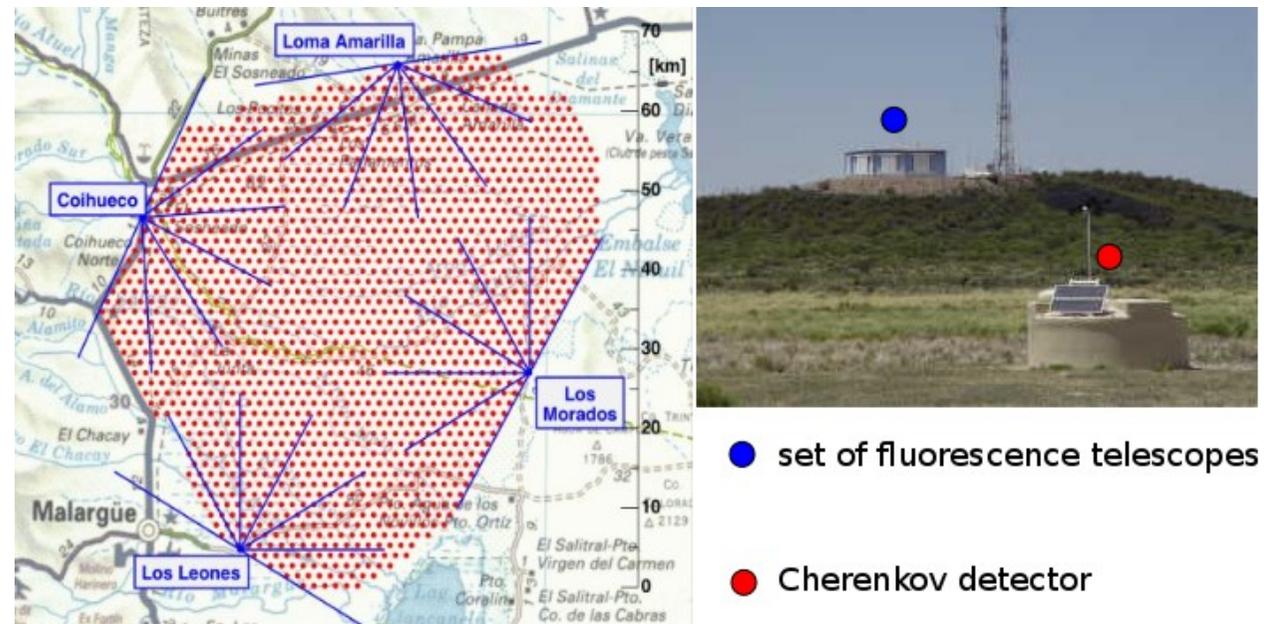


Conclusione

- I raggi comici: un puzzle ancora da risolvere
- Esperimenti a varie scale, da piccola a enorme
- Dal giardino di casa allo spazio
- Ottimo “primo esperimento” per iniziare



Muon hunter: ~10 cm



Pierre Auger: ~70 km