

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](mailto:riccardo.rando@unipd.it)

# I raggi cosmici: cosa sono e come osservarli

INFN Sezione di Padova – 14 Novembre 2023

# Cosa sono i raggi cosmici?

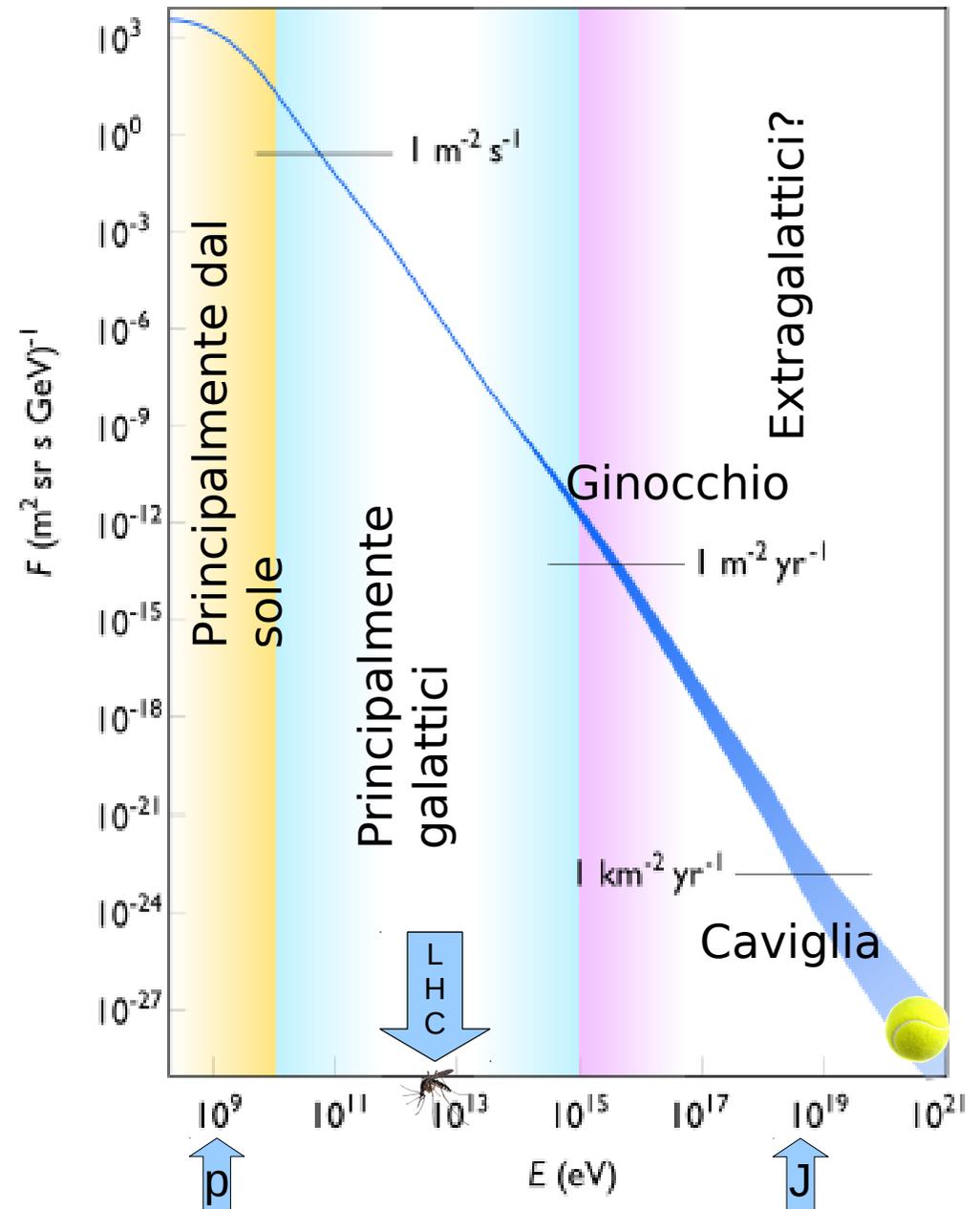
Sono **particelle** atomiche/subatomiche che arrivano sulla Terra

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

Il flusso diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia

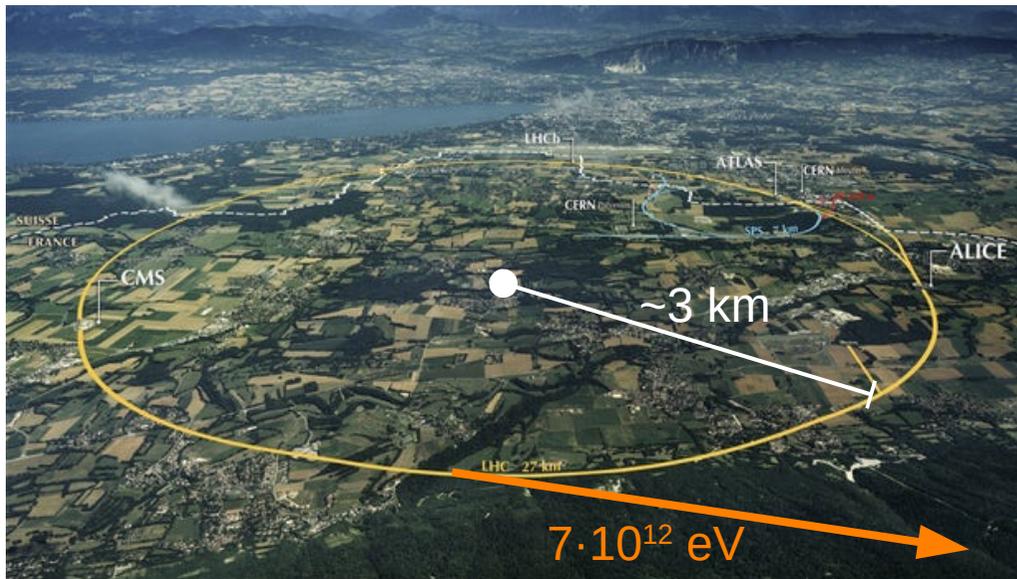
**Una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con la stessa energia di una pallina da tennis ben lanciata.**

- 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**)

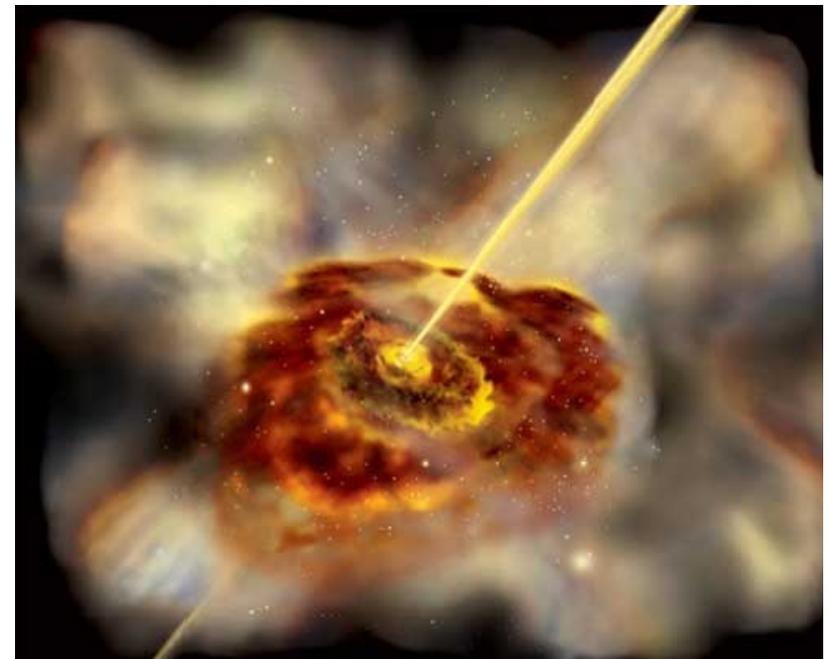
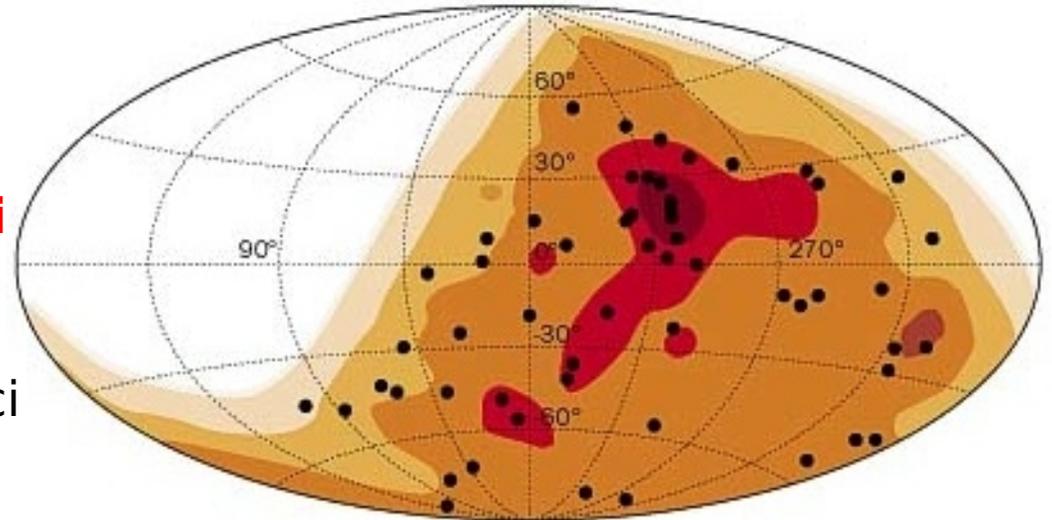


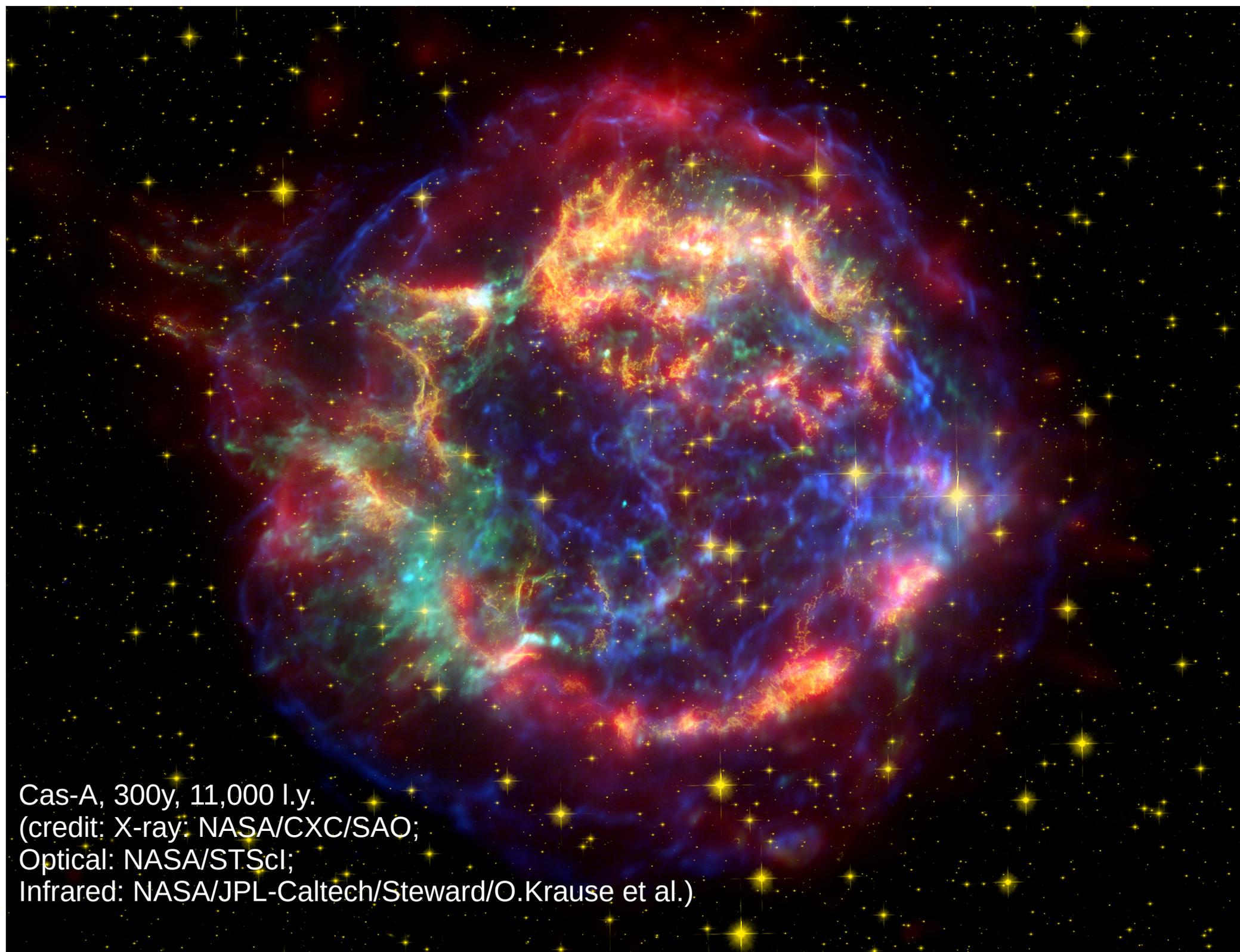
# Origine

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)



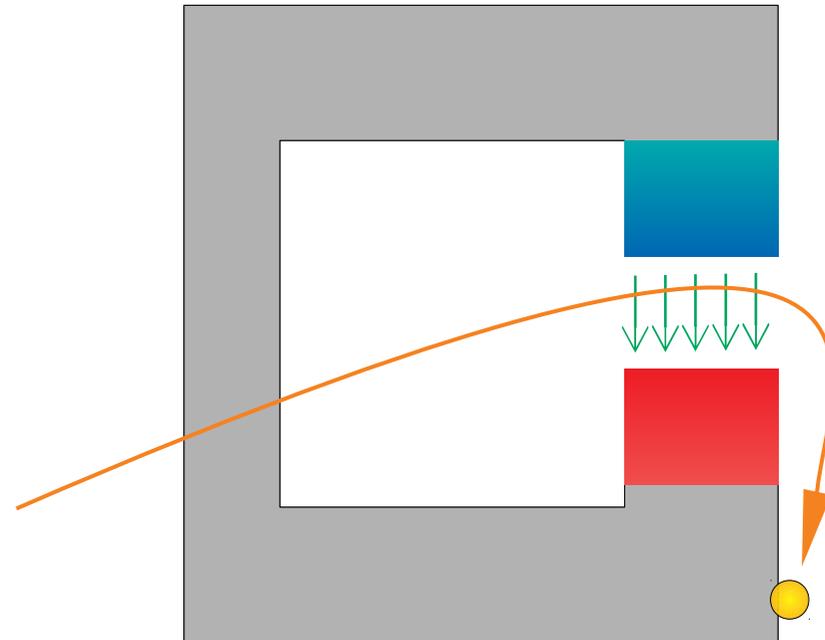
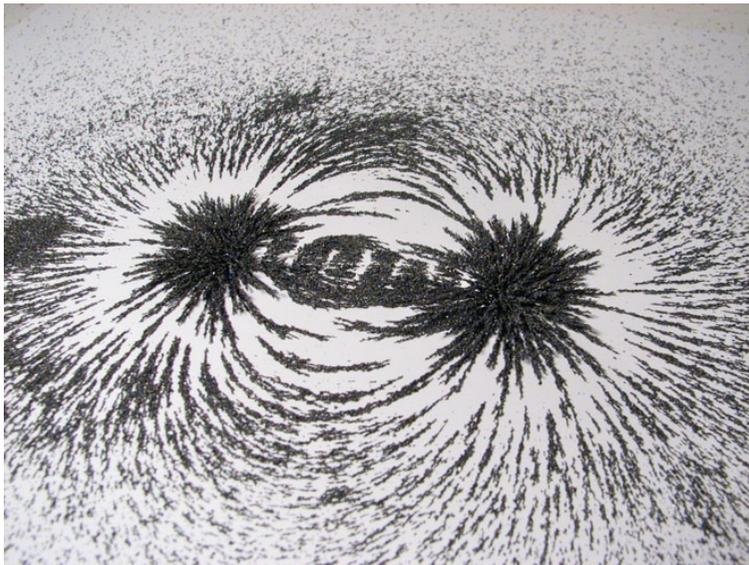
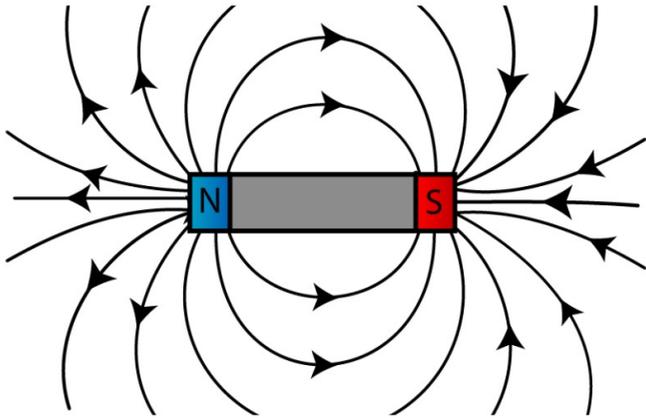
# Viaggio

Dalla loro sorgente i raggi cosmici devono giungere fino a noi

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

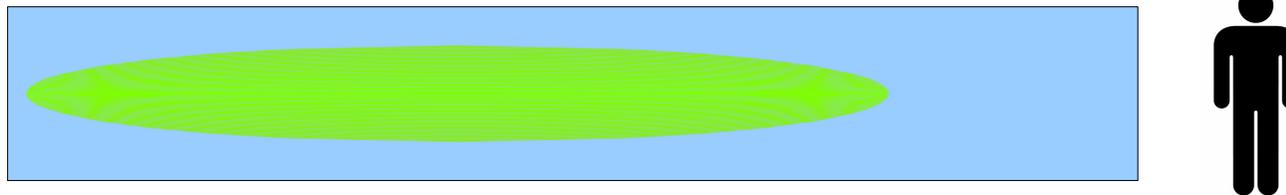
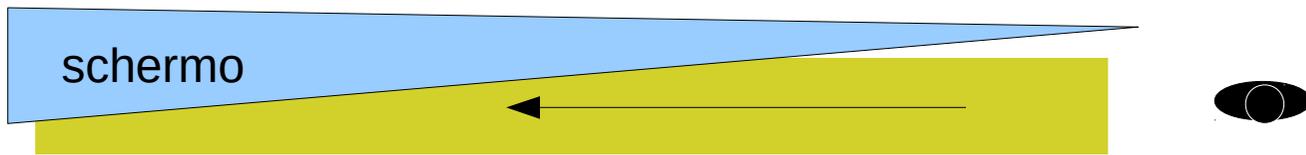
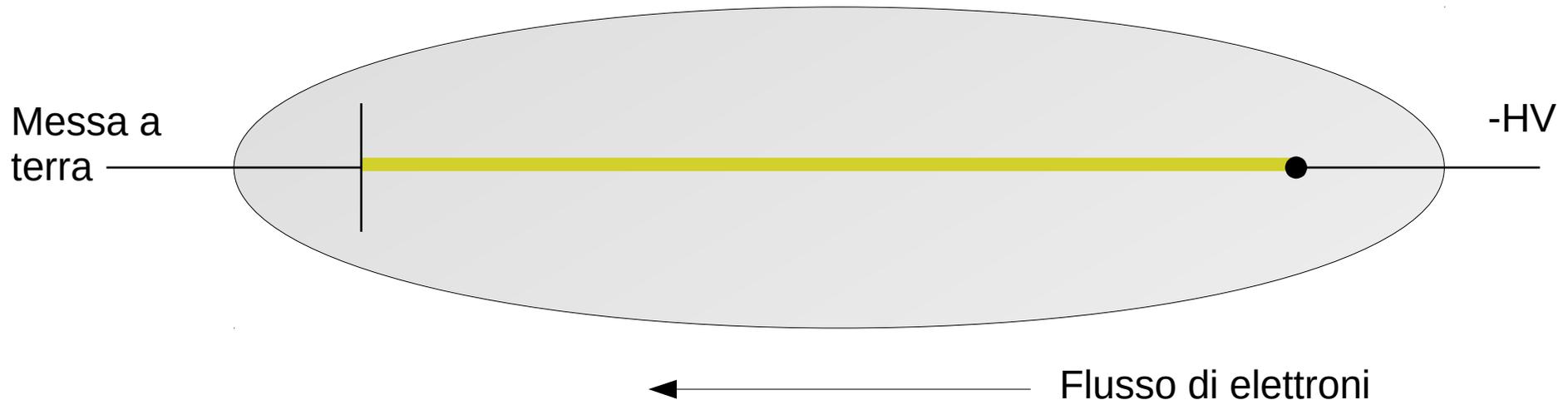
Le particelle prive di carica viaggiano in linea retta (possono essere assorbite da ostacoli)

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



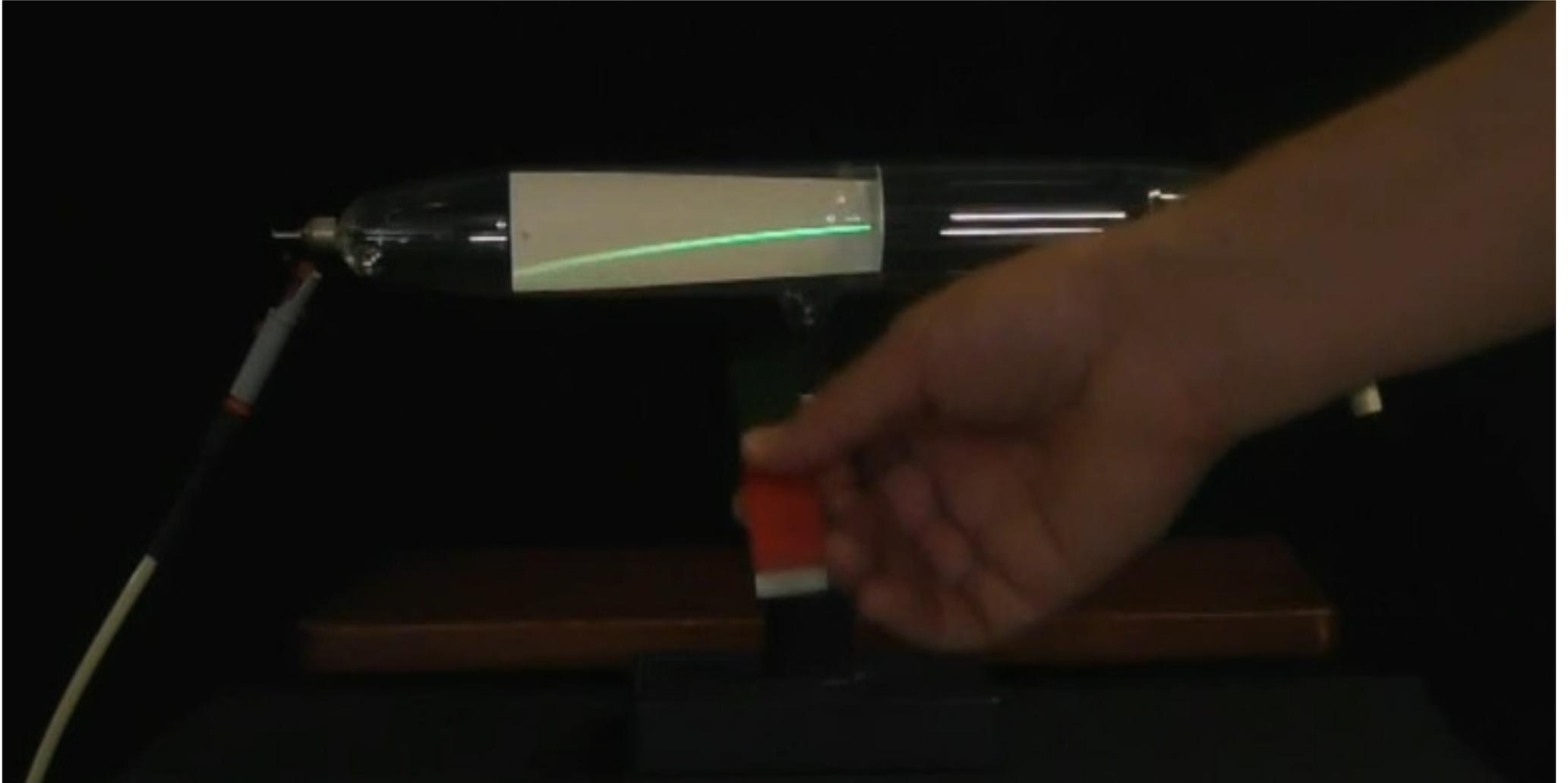
Fissato il campo, la curvatura dipende da massa, **carica** e **velocità**

# Tubo catodico



## Esperimento: tubo catodico

---



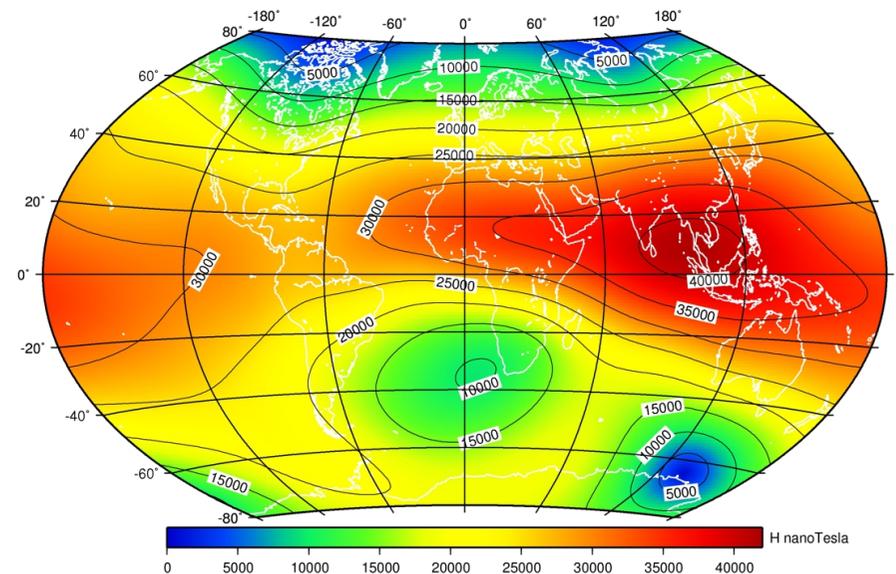
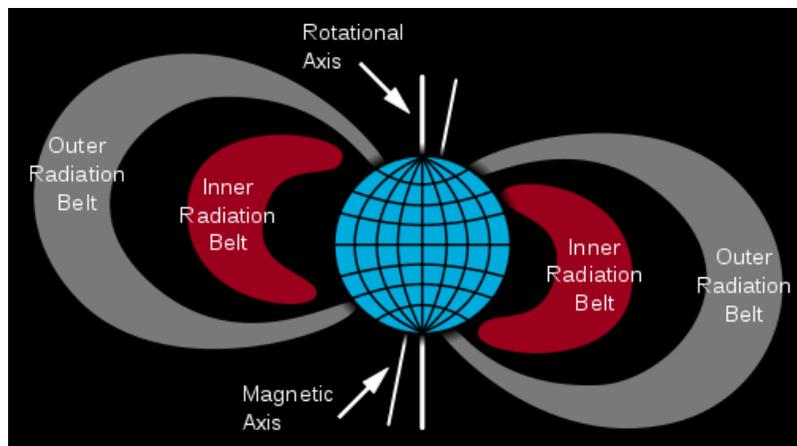
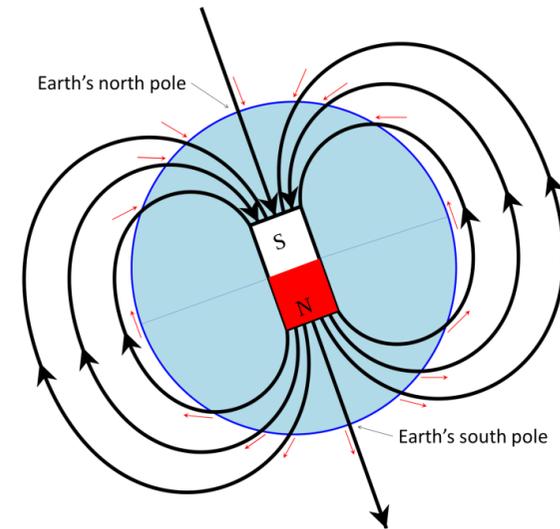
<https://www.youtube.com/watch?v=xntCkPJAp54>

# 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

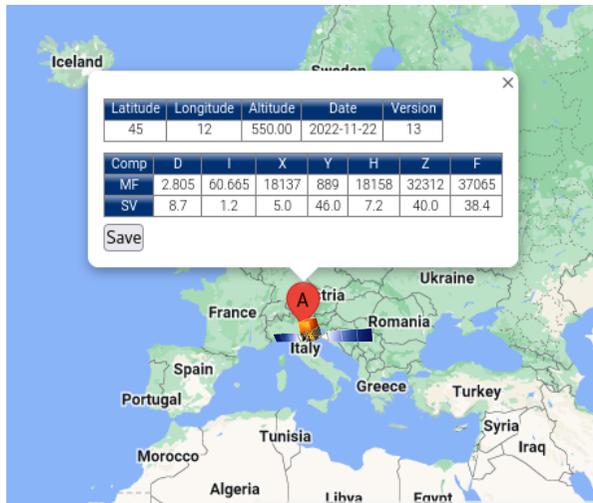
Dipende dall’intensità del campo: dipenderà da dove mi trovo



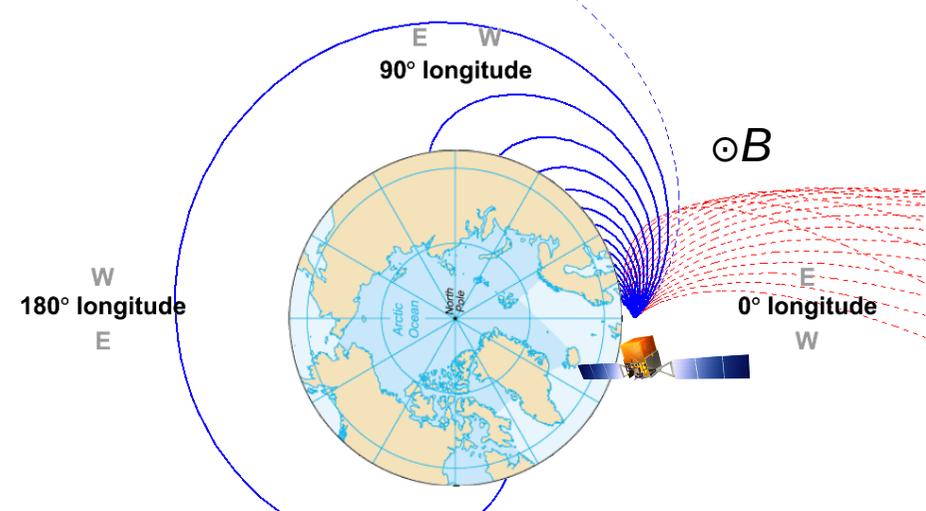
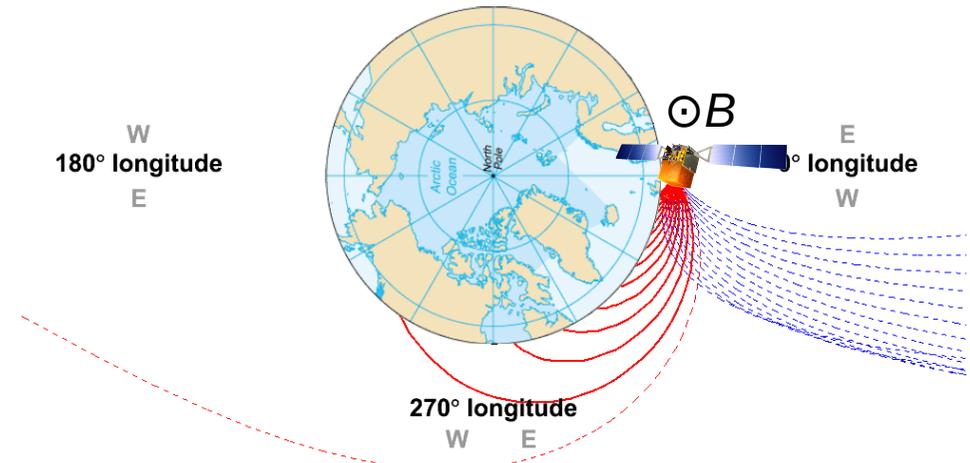
NB: 90% dell’atmosfera entro 16 km

# Effetto Est-Ovest

Dato un punto in orbita terrestre e la locale direzione del campo magnetico (es. S → N): un tipo di carica è ammesso (arriva “dall’alto”) mentre l’altro è bloccato (arriva “dal basso”)



Particelle che arrivano da Ovest:  
+ ammessi, - bloccati



Particelle che arrivano da Est:  
- ammessi, + bloccati

# Atmosfera

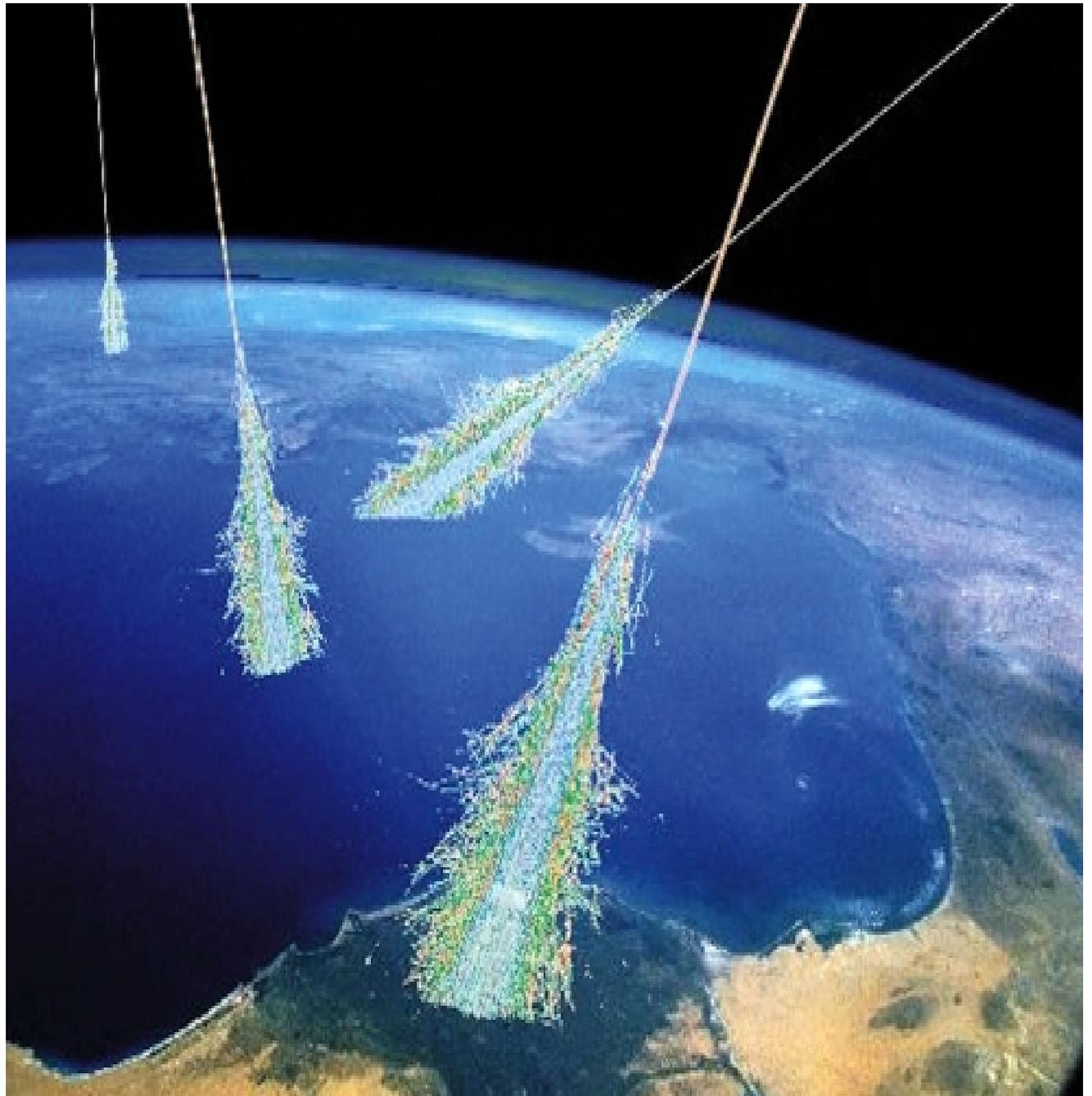
Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera, sono assorbiti, ma generando **particelle secondarie**

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**



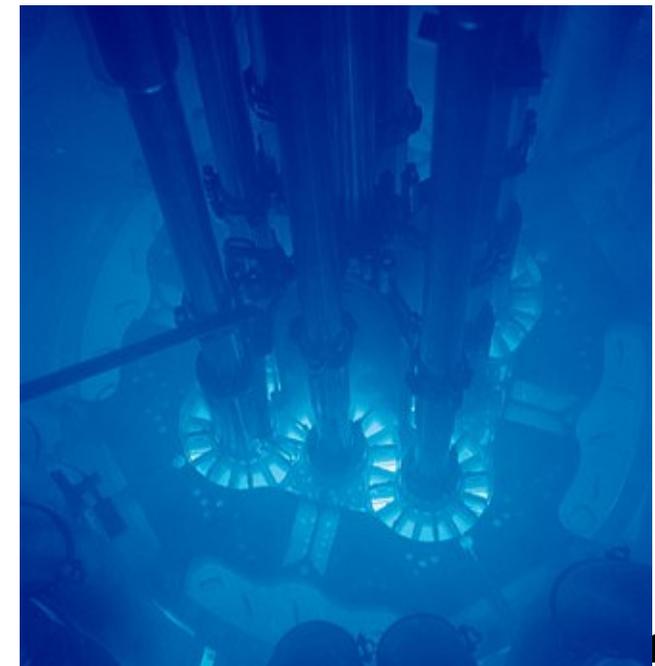
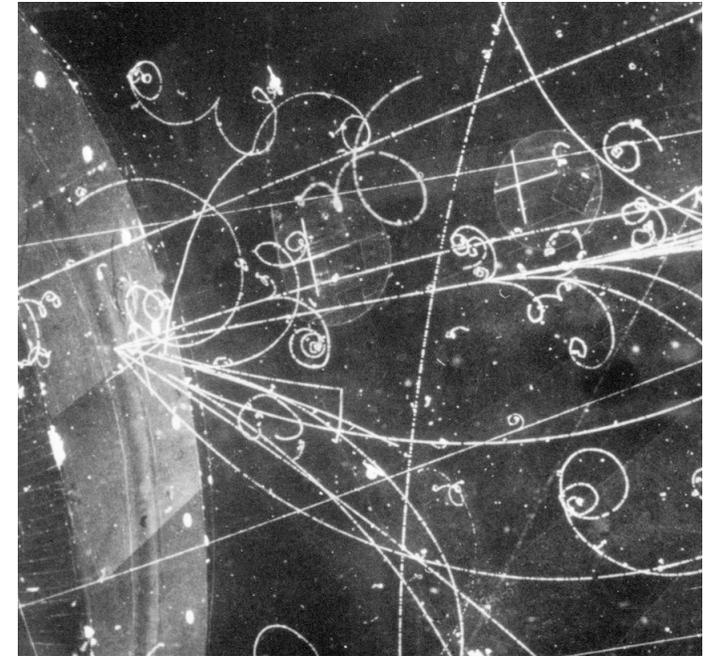
## Come osservarli, a grandi linee

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

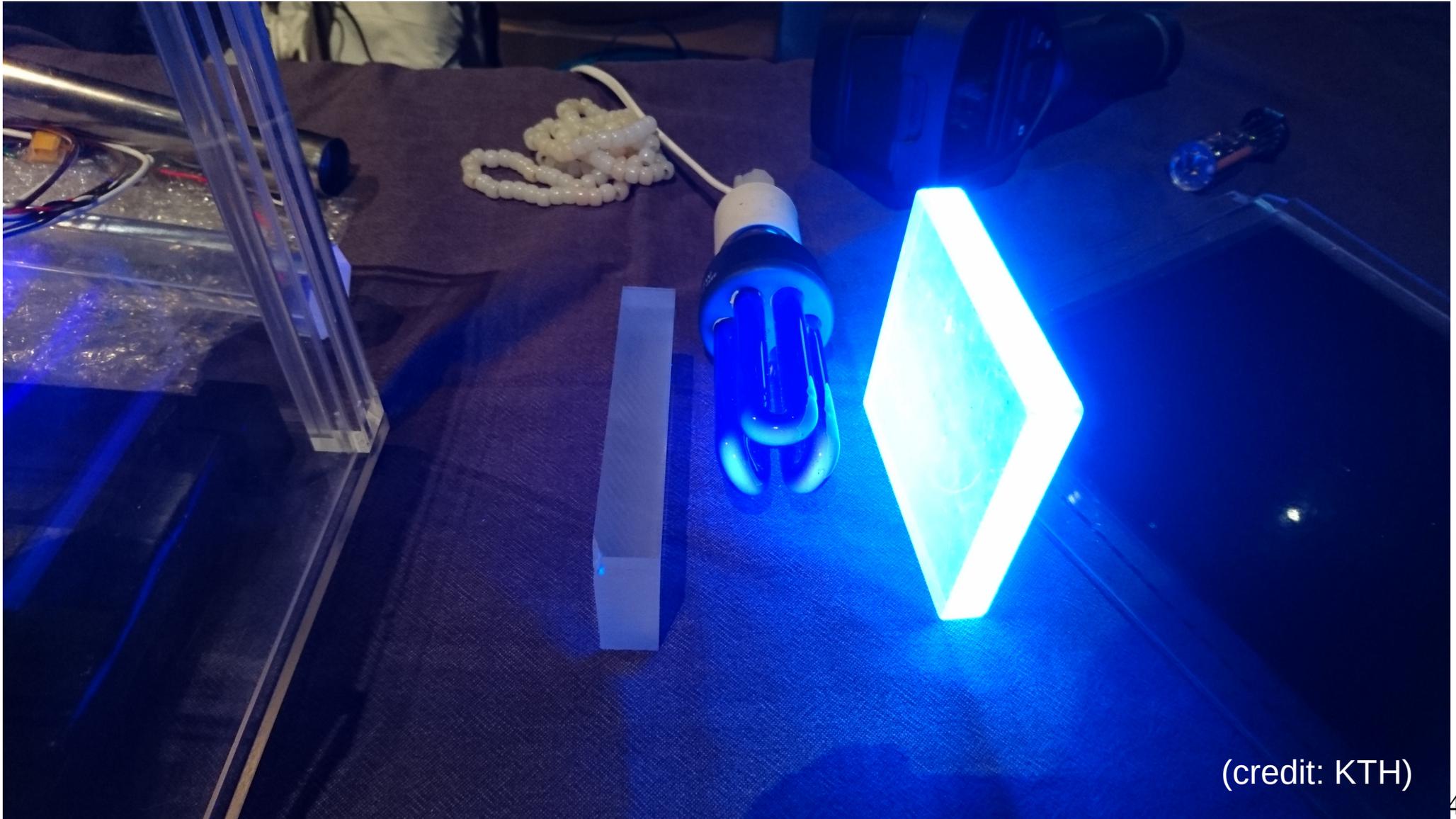
Ricordate: posso sfruttare la **produzione di secondari** e non osservare direttamente il raggio cosmico, ma la sua **interazione con il materiale** che causa l'emissione di particelle secondarie (es: luce)



# Scintillatori

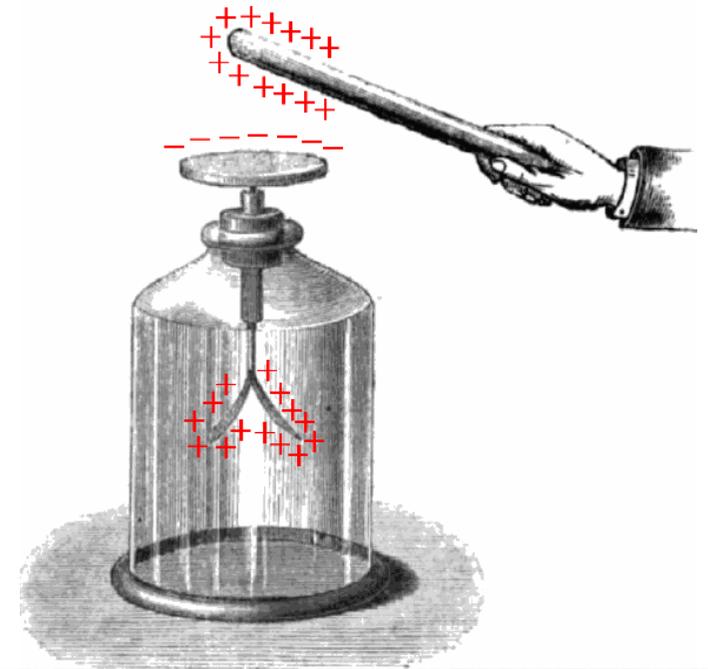
La ionizzazione produce luce visibile

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?

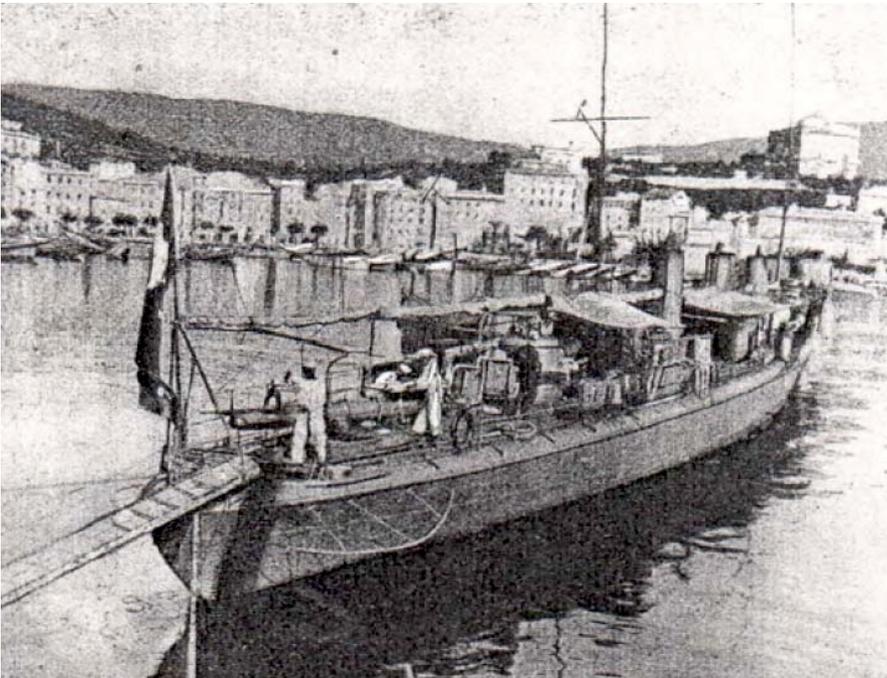
Nel primo decennio del '900 l'opinione dominante era che venisse dal suolo



## 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



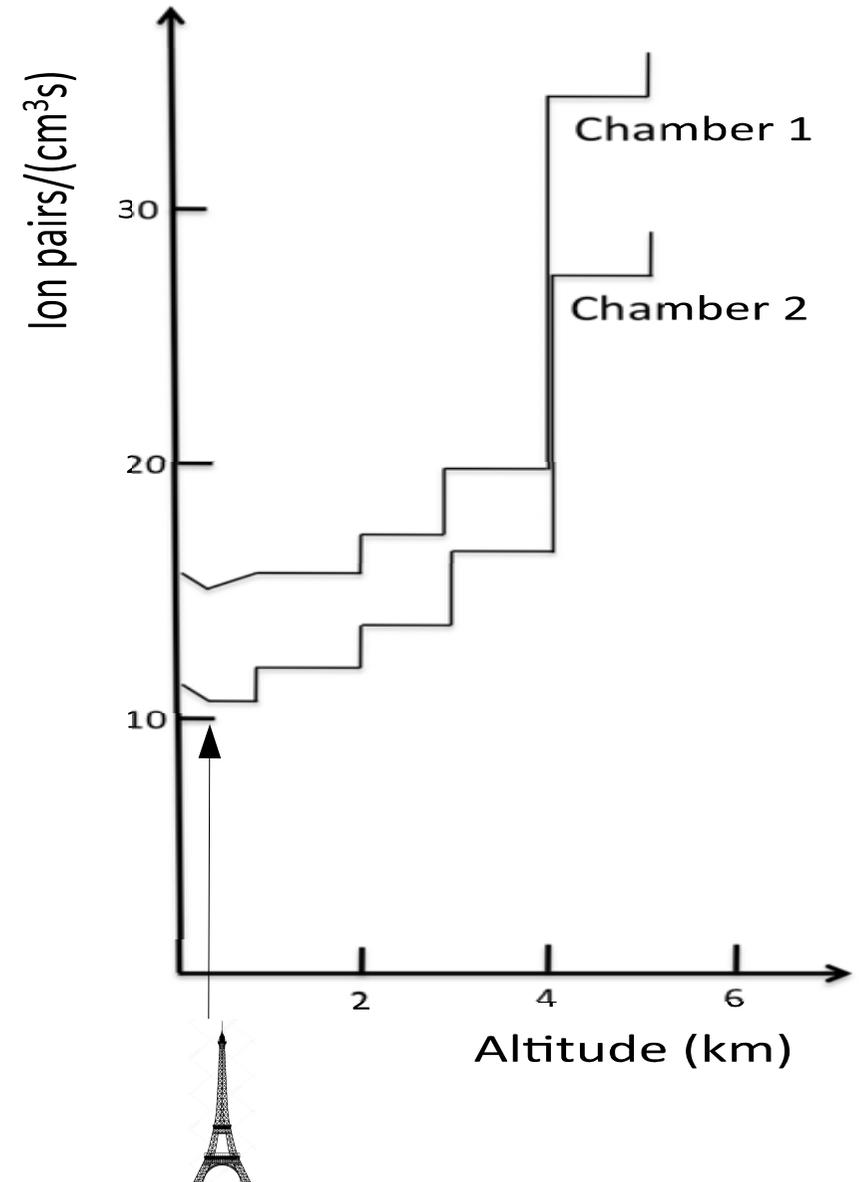
Pacini (1908): a disposizione il cacciatorpediniere "Fulmine", messo a disposizione dalla Regia Marina  
A 3 metri di profondità a Livorno (e poi in ottobre a Bracciano) osserva una **riduzione del 20%** della radioattività

## 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

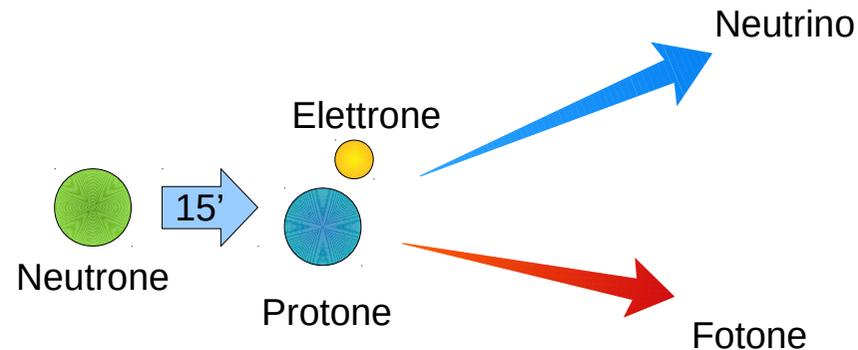
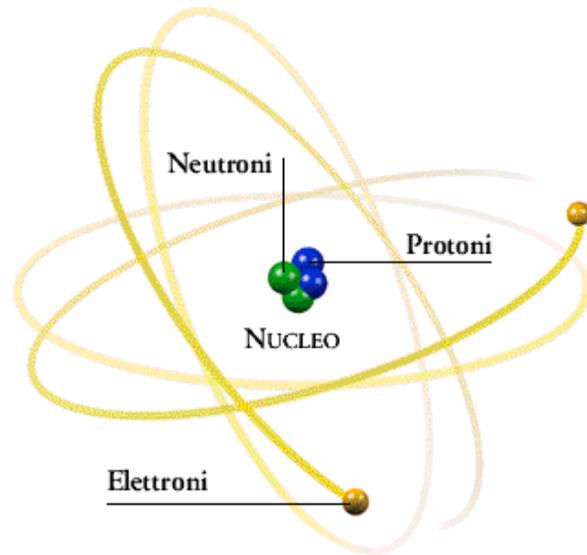
Poi inizia l'era degli acceleratori,  
e uno zoo di particelle...

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.

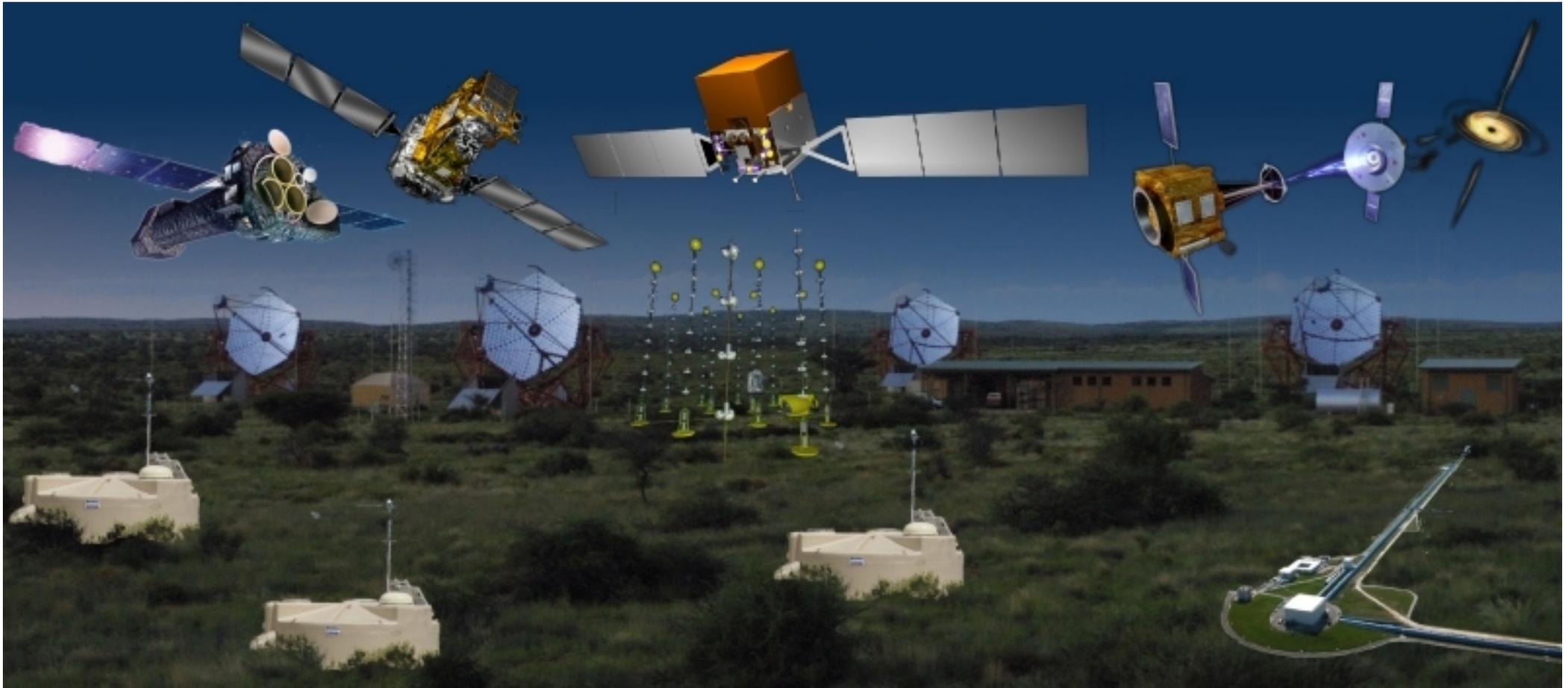
+ muone: "cugino" dell'elettrone, 200x massa

## 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

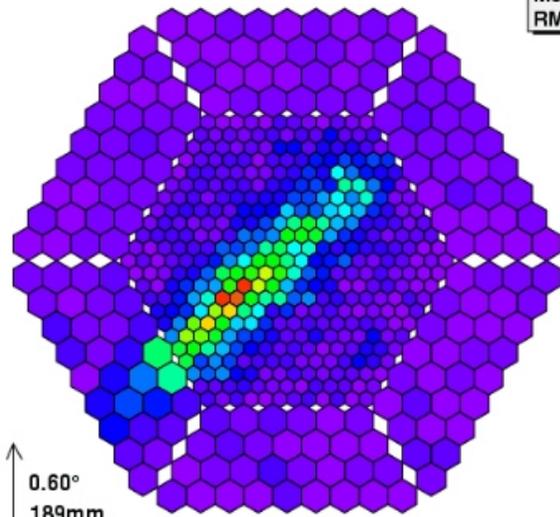
Disegnati per osservare gli sciame **causati da fotoni** di energie tipiche  $\sim 10^{12}$  eV  
Per loro gli sciame da particelle cariche sono un fondo da eliminare  
Forniscono una misura dei flussi in atmosfera

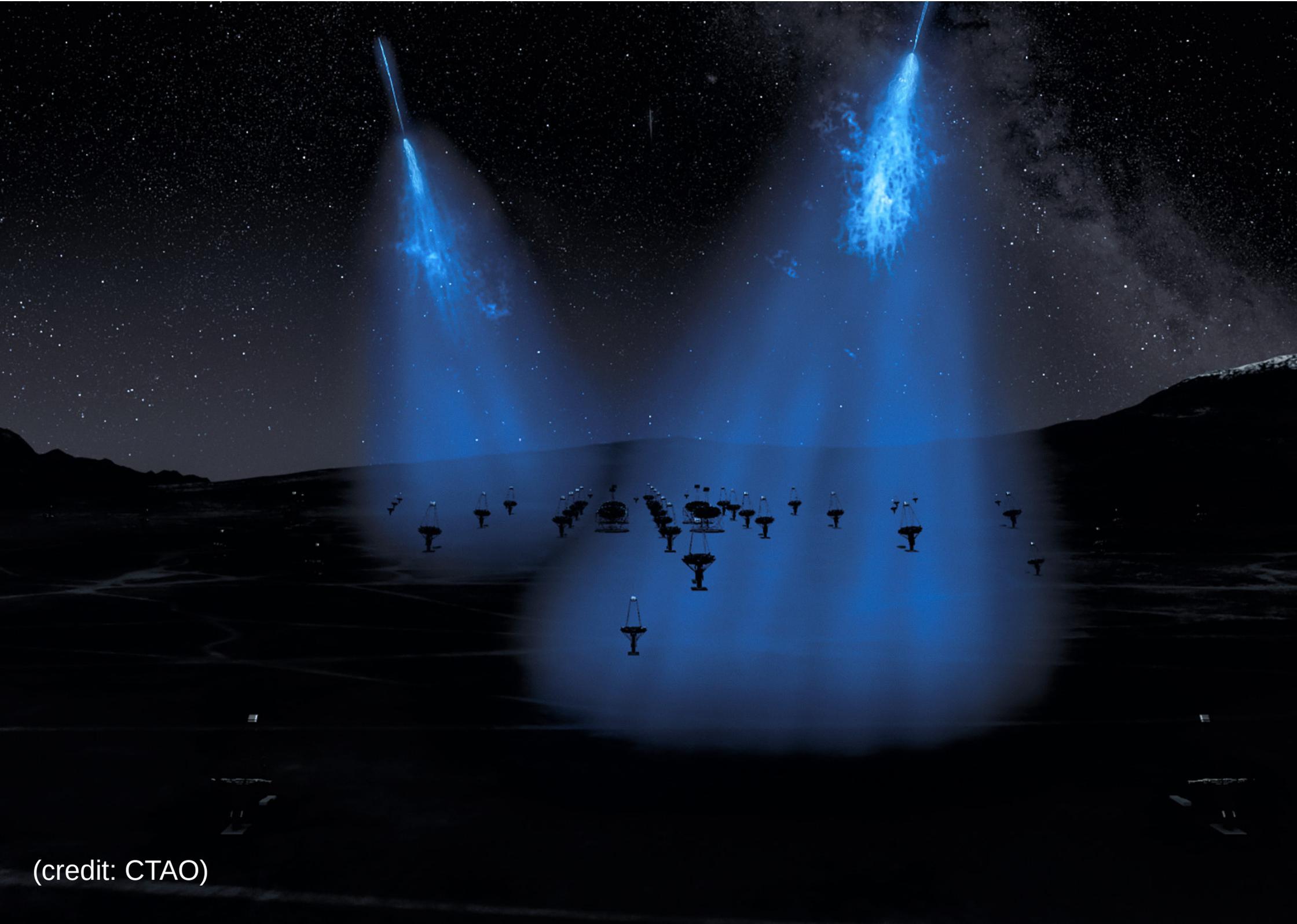
Es: MAGIC/CTA  
isole Canarie  
Altitudine 2200 metri



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

Signal density
Mean 7.064
RMS 10.87





(credit: CTAO)

# Osservatorio Pierre Auger, Argentina

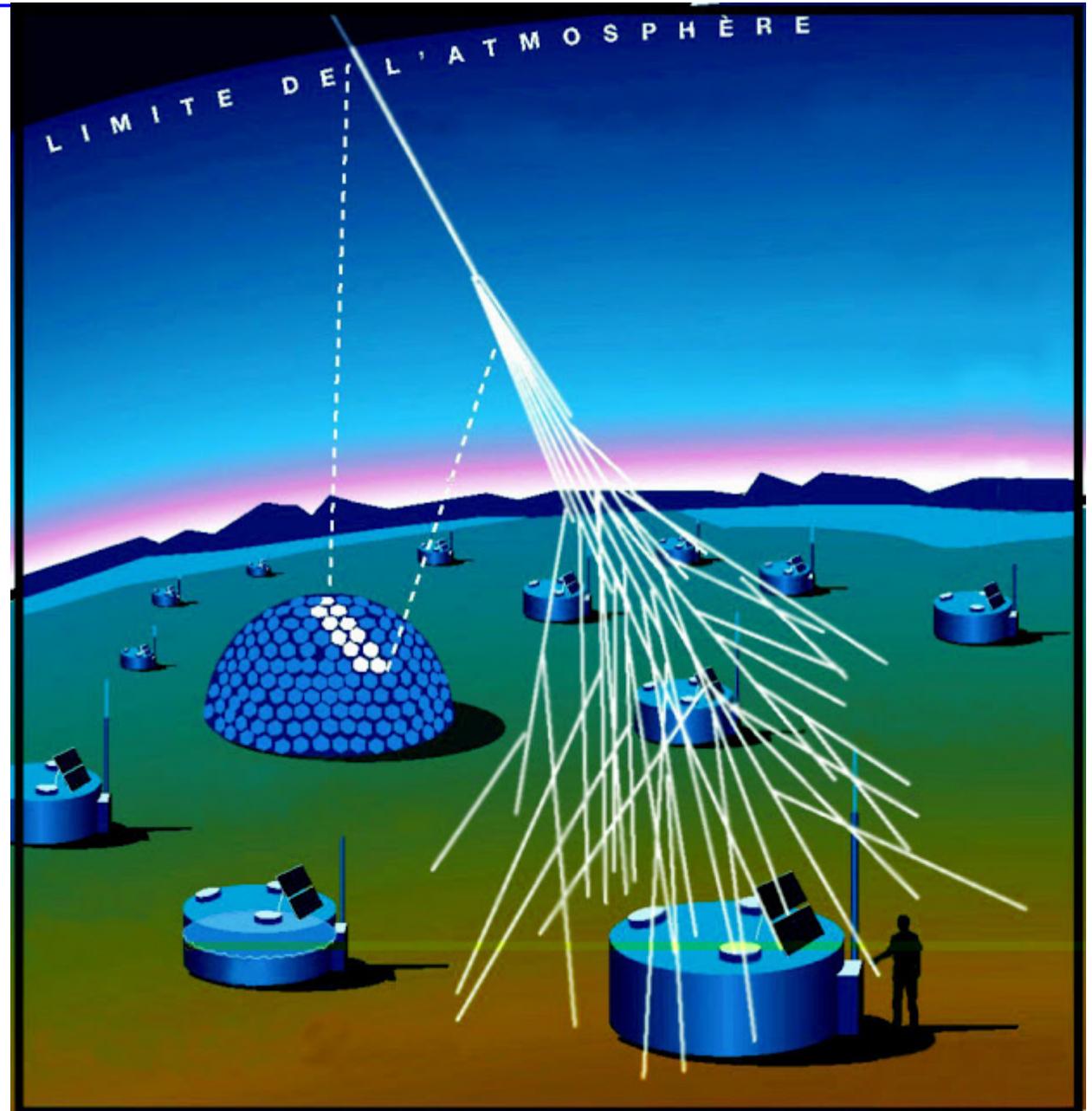
Altitudine ~1400 metri

Osservo contemporaneamente:  
l'**impronta luminosa dello**  
**sciame** e le **particelle**  
**secondarie** che arrivano a terra

Disegnato per le energie più  
elevate ( $10^{18}$  eV e oltre)

I flussi sono bassi: mi aspetto dal  
mio grafico 1 particella per  $\text{km}^2$   
all'anno

Servono grandi superfici:  $10370$   
 $\text{km}^2$



## Pierre Auger 2



Le taniche per osservare le particelle secondarie  
Piene d'acqua, le particelle cariche rilasciano un  
segnale luminoso  
NB: l'acqua è più densa dell'aria: più efficiente

Le camere per il segnale luminoso

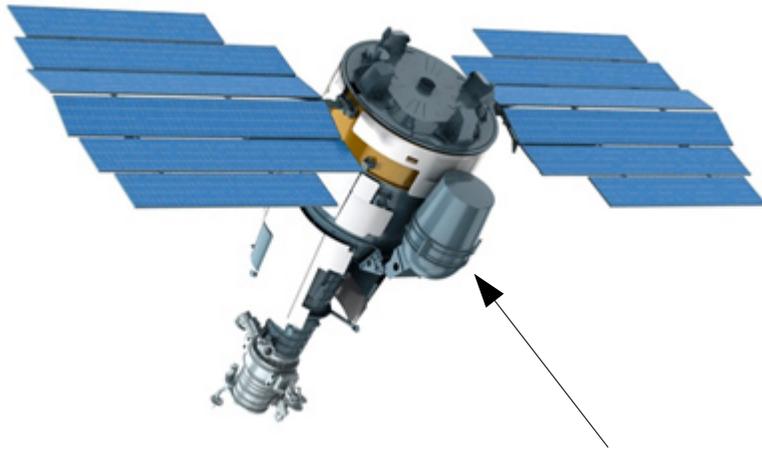


# Misure in orbita

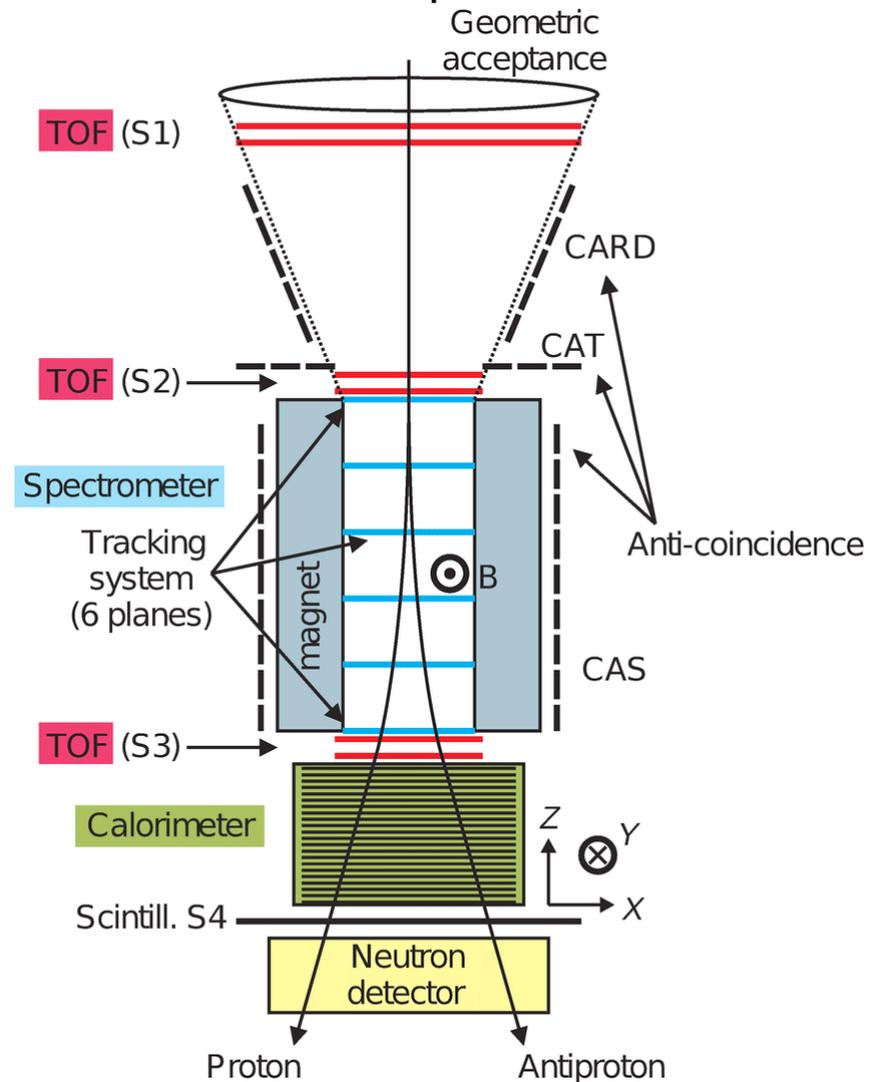
Alzandosi al di sopra dell'atmosfera si possono misurare direttamente le particelle  
Lavoriamo nel regime di **energie di provenienza solare o al più galattica**

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

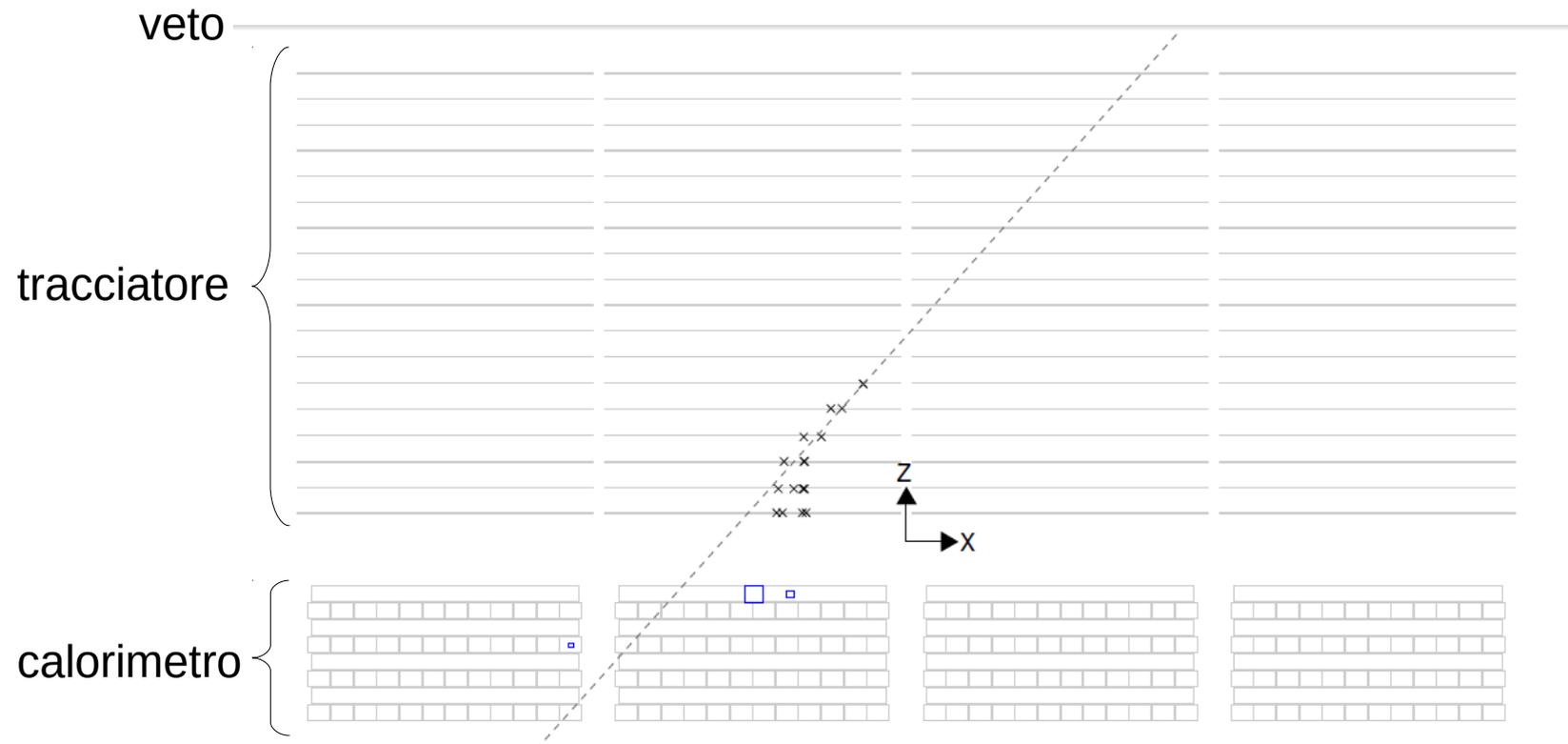
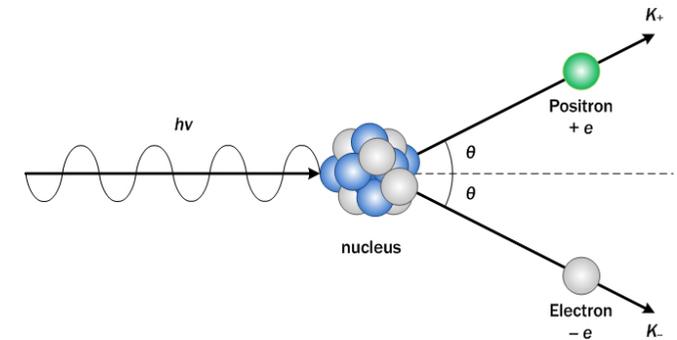


# Fermi LAT

Osservazione di raggi gamma di alta energia dall'orbita terrestre

Il raggio gamma interagisce dando origine a una coppia **elettrone-positrone** (o **antielettrone**) che possono essere tracciati

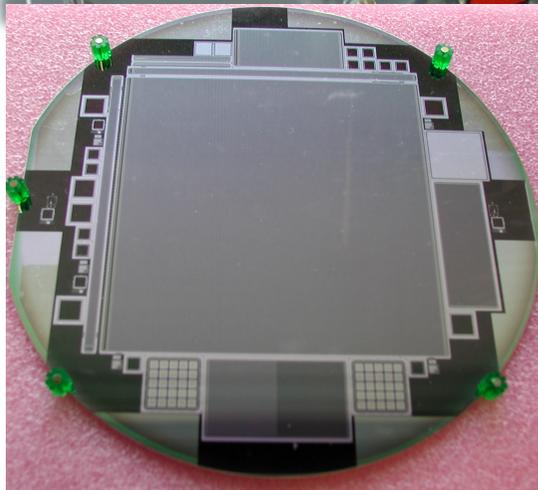
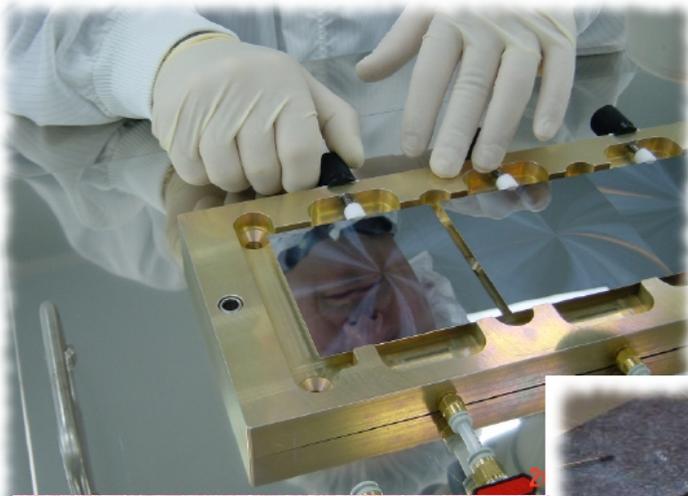
Il fotone primario deve essere **ricostruito** dalle informazioni ricavate sui suoi prodotti



# Tracciatore

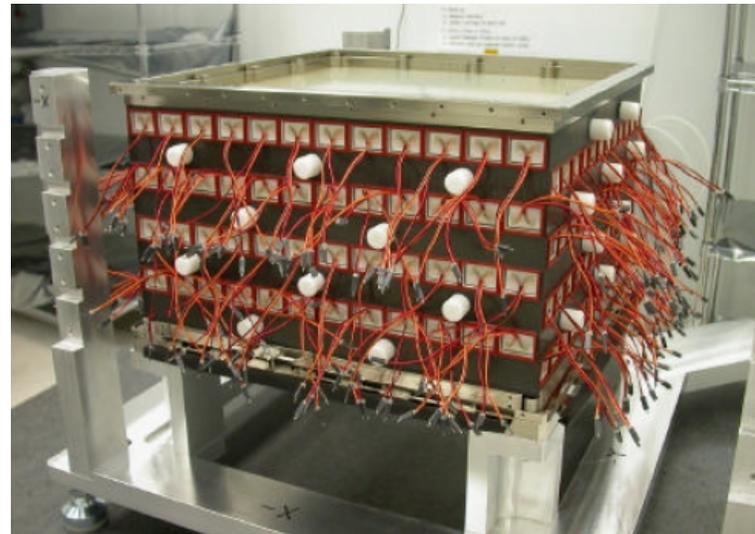
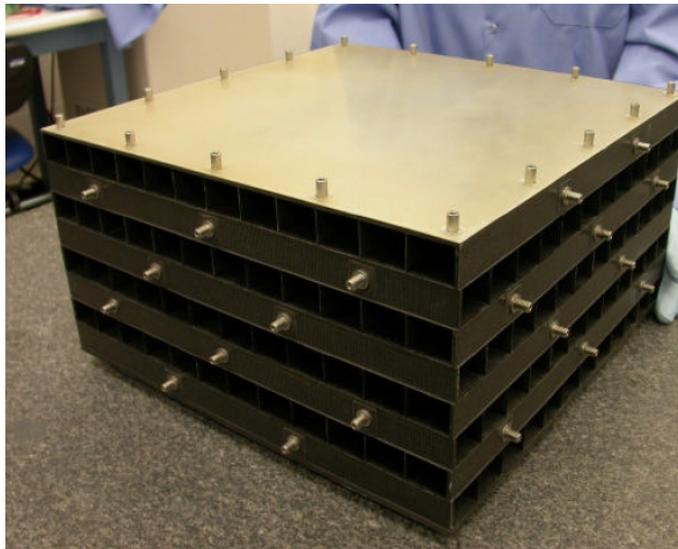
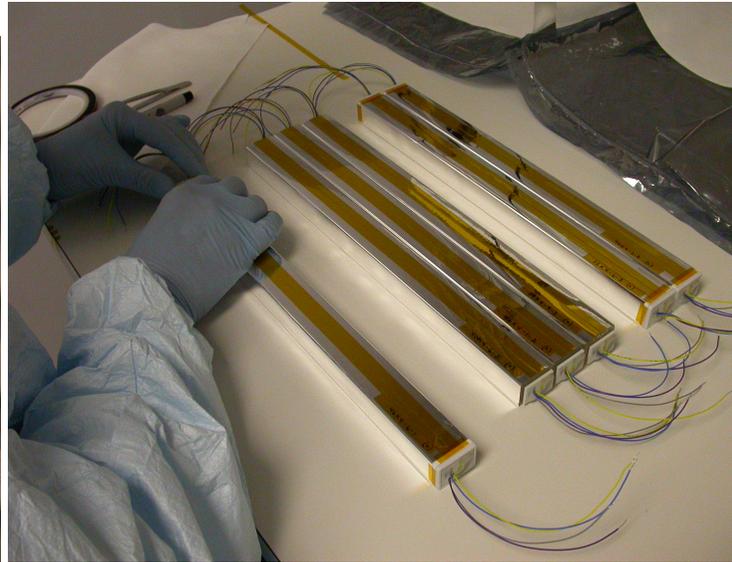
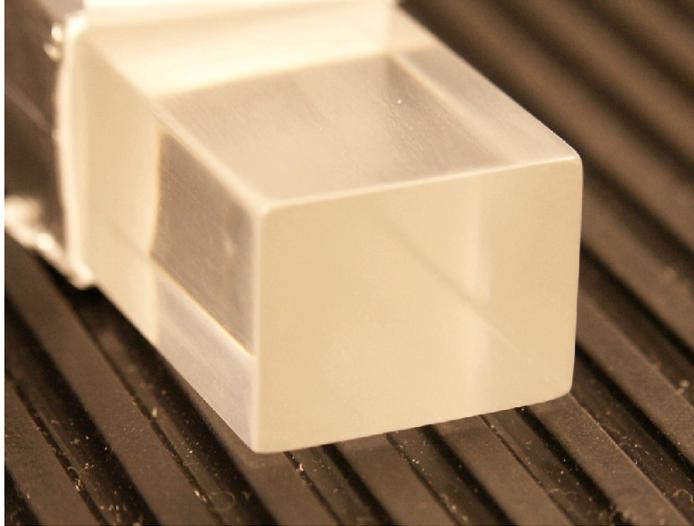
**Tracciatore:** le particelle cariche **ionizzano** il materiale (silicio): il segnale **elettrico** viene raccolto e processato

L'elettrodo è **segmentato**: misuro una coordinata del punto di passaggio



# Calorimetro

Scintillatore: cristalli densi assorbono l'energia (ionizzazione) che convertono in un segnale **luminoso**, che devo misurare (convertire in segnale elettrico)

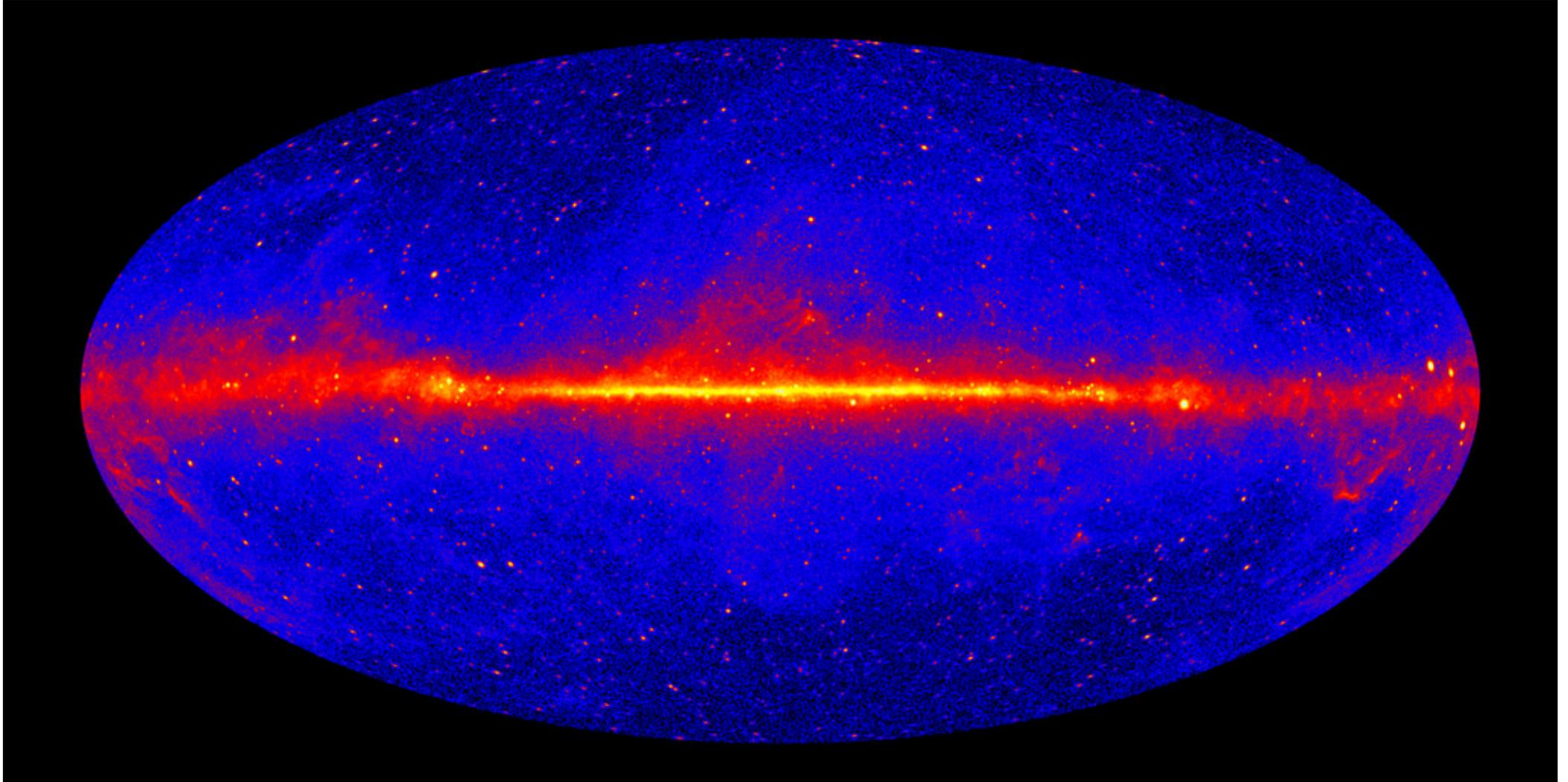


# Assemblaggio e lancio



12 anni di dati

---

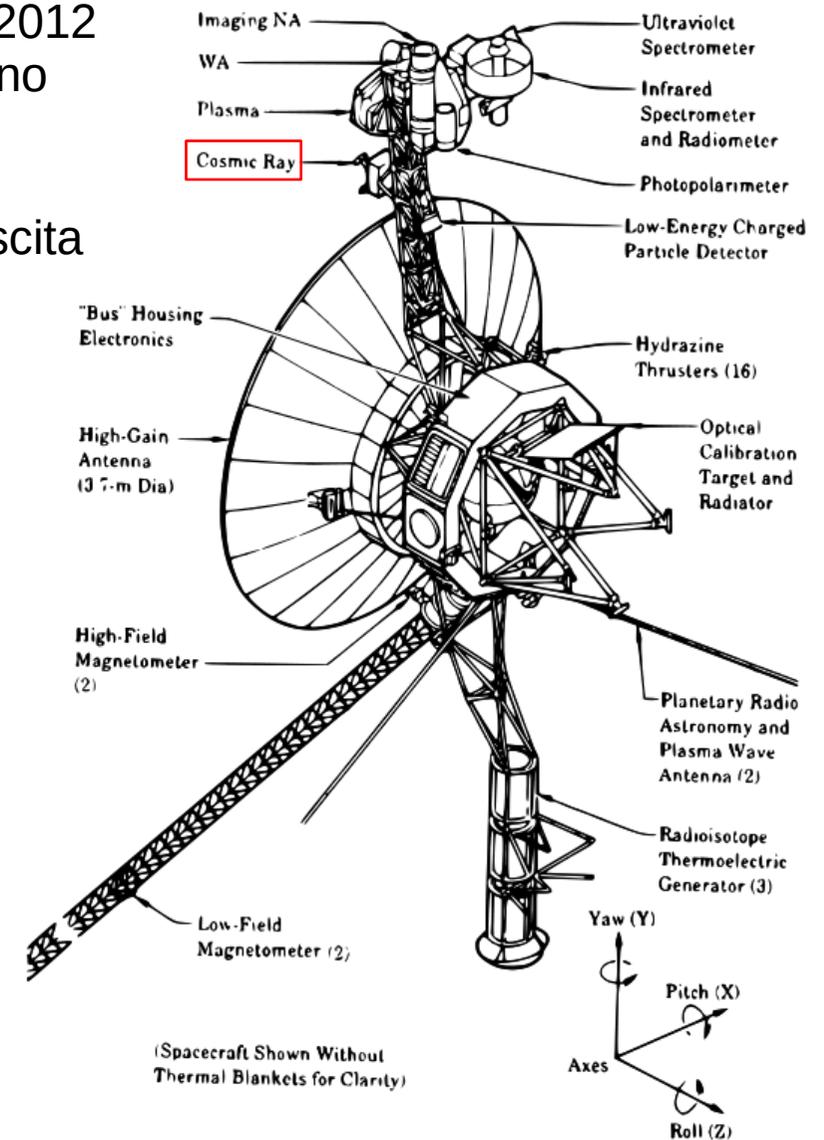
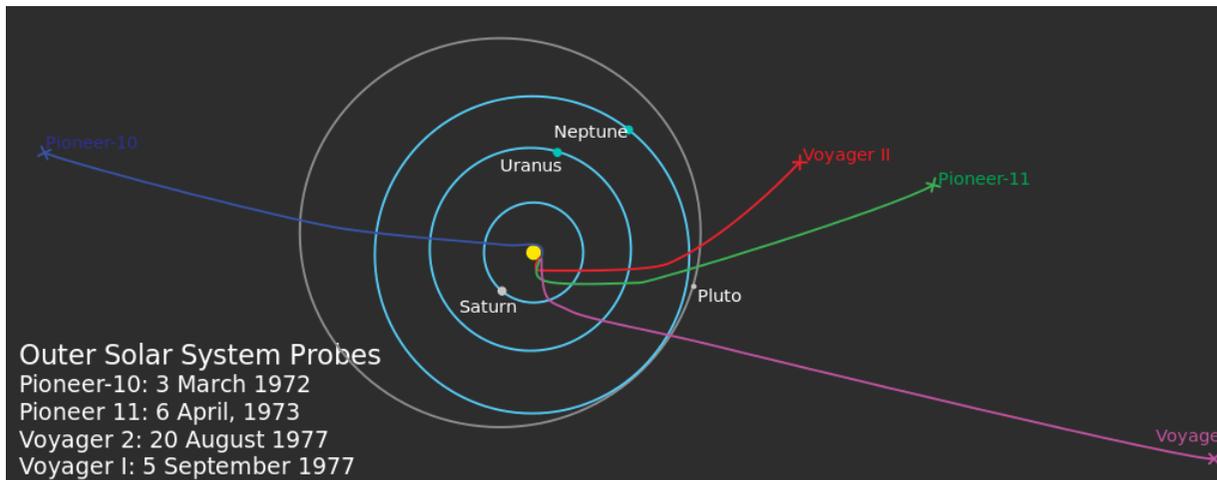


# E misure extra-solari

Missioni Voyager, lancio 1977, per l'osservazione dei pianeti del sistema solare esterno  
Molti strumenti a bordo, anche sensori per raggi cosmici, tipicamente  $10^3$ – $10^6$  eV

Voyager 1 è entrato nello spazio interstellare nell'Agosto 2012  
Ora a 23 miliardi di km: 21h 30' perché i dati ci raggiungano

Voyager 2 sta misurando adesso un simile aumento nei conteggi dei raggi cosmici, probabile segnale della sua uscita della regione solare



# Conclusione: astrofisica “multi-messenger”

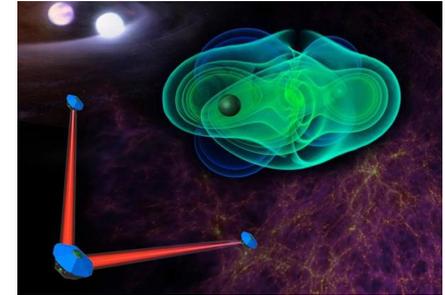
Sfida del 21° secolo: osservare contemporaneamente varie particelle (“messaggeri”) provenienti dallo stesso oggetto

Enfasi su quello che non viene deviato dai campi magnetici (terrestre e galattico)

- Fotoni (da radio a gamma)
- Neutrini
- Onde gravitazionali

Grandi successi per i telescopi della generazione attuale, grandi aspettative per quelli della prossima

LISA - Gravitational waves



Km3Net/IceCube-Gen2 -  $\nu$

