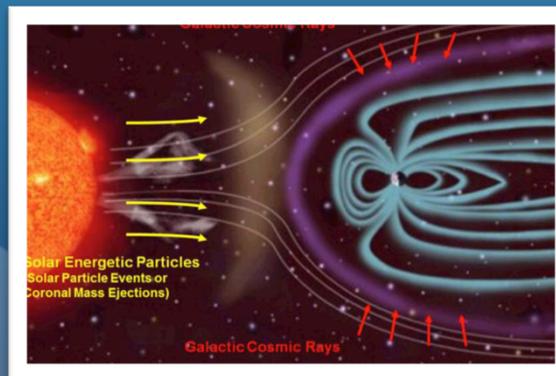
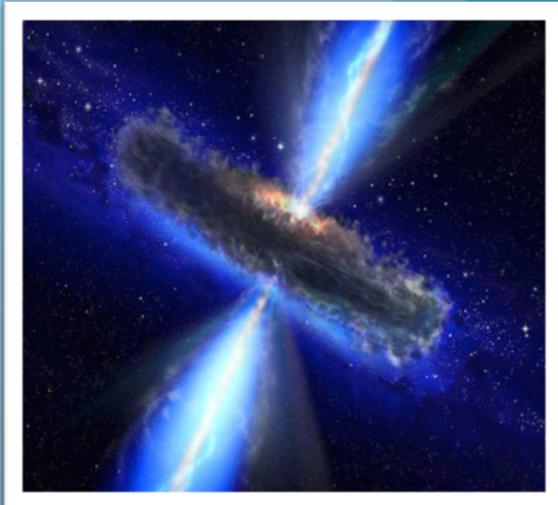


# I raggi cosmici sul tuo Smartphone

B. Bottino, A. Caminata, M. Cariello, L. Di Noto, F. Ferraro  
e S. Zavatarelli\*

\* e-mail : [zavatare@ge.infn.it](mailto:zavatare@ge.infn.it)



Cosa sono i raggi cosmici?



# Alcuni richiami...

La materia ordinaria è costituita da atomi.

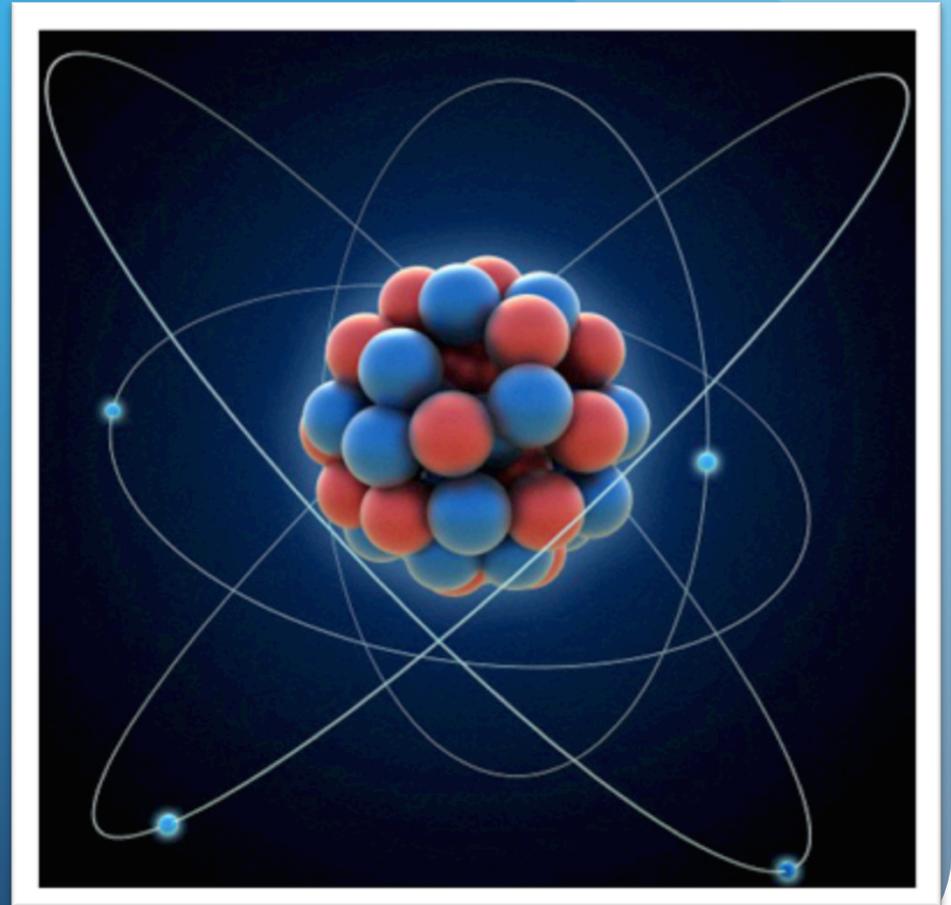
Gli atomi a loro volta sono costituiti da particelle più piccole : **protoni, neutroni e elettroni.**

Nell'Universo ci sono molte altre particelle, oltre a quelle che costituiscono gli atomi...

Es. **fotoni, pioni, muoni, kaoni, neutrini...**

Per un elenco completo guardare:

[http://pdg.lbl.gov/2018/listings/contents\\_listings.html](http://pdg.lbl.gov/2018/listings/contents_listings.html)



Dalle spazio arrivano sulla Terra  
particelle sub-atomiche :  
si chiamano **raggi cosmici primari**

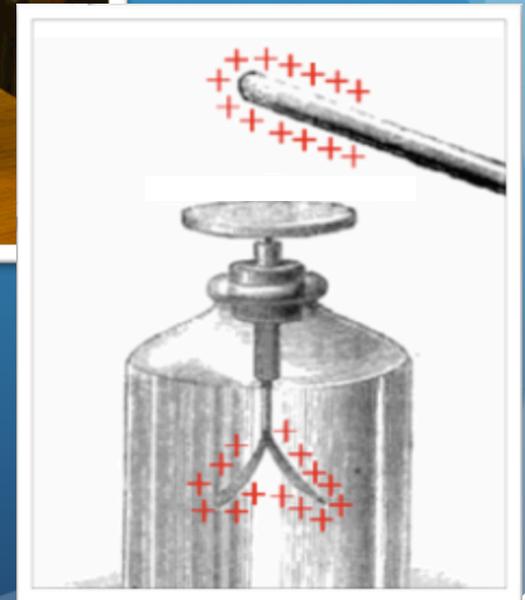


# Come sono stati scoperti? Un po' di storia....

1) Nel 1785 Coulomb osservò che un elettroscopio carico, sebbene isolato, si scaricava in modo spontaneo.

2) Nel 1900 i coniugi Curie, Pierre e Marie, capirono che tale fenomeno di scarica è dovuto alla radioattività naturale. Aumentava infatti quando si avvicinavano sorgenti radioattive all'elettroscopio.

3) Ci si chiese da dove venisse la radiazione. Inizialmente quasi tutti pensavano che venisse da terra.

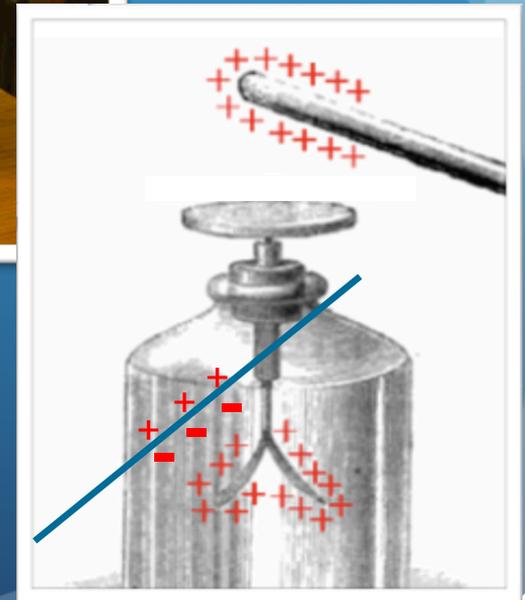


# Come sono stati scoperti? Un po' di storia....

1) Nel 1785 Coulomb osservò che un elettroscopio carico, sebbene isolato, si scaricava in modo spontaneo.

2) Nel 1900 i coniugi Curie, Pierre e Marie, capirono che tale fenomeno di scarica è dovuto alla radioattività naturale. Aumentava infatti quando si avvicinavano sorgenti radioattive all'elettroscopio.

3) Ci si chiese da dove venisse la radiazione. Inizialmente quasi tutti pensavano che venisse da terra.



# Un po' di storia....

Ma qualcuno non era convinto...

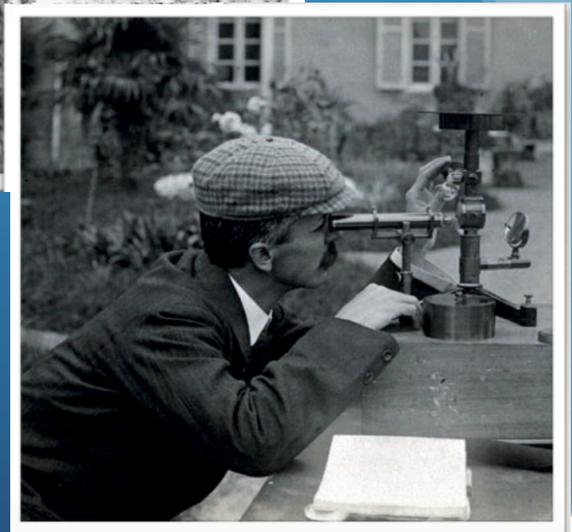
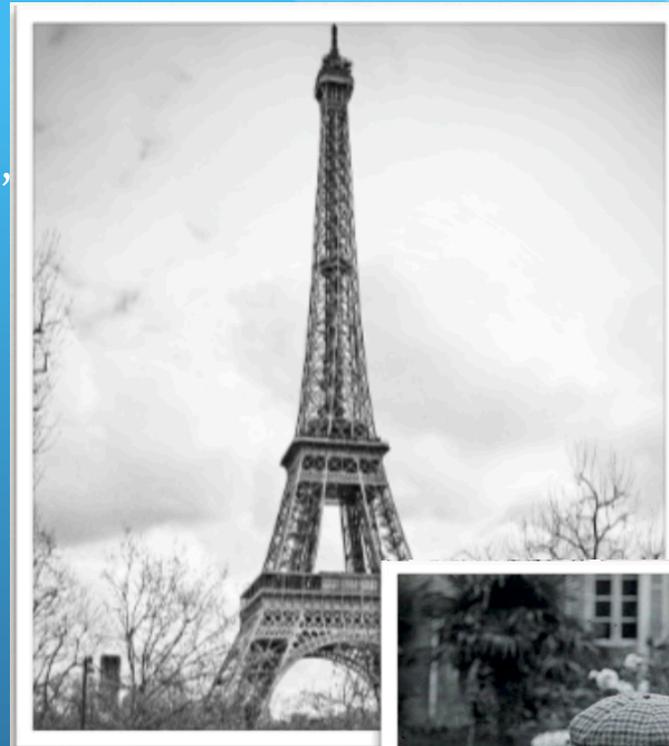
4) Nel 1910 Wulf (fisico e sacerdote tedesco), rese trasportabile l'elettroscopio e fece misure sulla Tour Eiffel, per confrontarle con quelle a terra.

Le sue misure non furono conclusive .. la maggioranza ritenne confermata la teoria che la radioattività venisse da terra.

...C'era ancora qualcuno che non convinto

5) : Domenico Pacini, fisico italiano, fece misure sott'acqua, a Livorno.

La sua idea era: se la radiazione NON proviene dalla terra, andando sott'acqua dovrò osservare una riduzione del flusso...  
1911/1912 trova la conferma sperimentale della propria teoria!



**La radiazione doveva venire da qualche altra parte!**

# Un po' di storia....

Nel 1913 Victor Franz Hess effettuò un volo in mongolfiera raggiungendo i 5.350 metri di altezza.

Portò sul pallone un elettroscopio: misurò l'intensità della radiazione ambientale e notò che a 5.000 metri aveva una intensità doppia di quella a terra.



*“I risultati delle presenti osservazioni potrebbero essere spiegati assumendo che una radiazione di potere altamente penetrante entra nella nostra atmosfera dall'esterno, ed ancora produce, nei livelli più bassi, parte della ionizzazione osservata in laboratorio”  
(Victor F. Hess, Physikalische Zeitschrift, novembre 1912)*

# NOBEL 1936

## Premio Nobel a Hess.

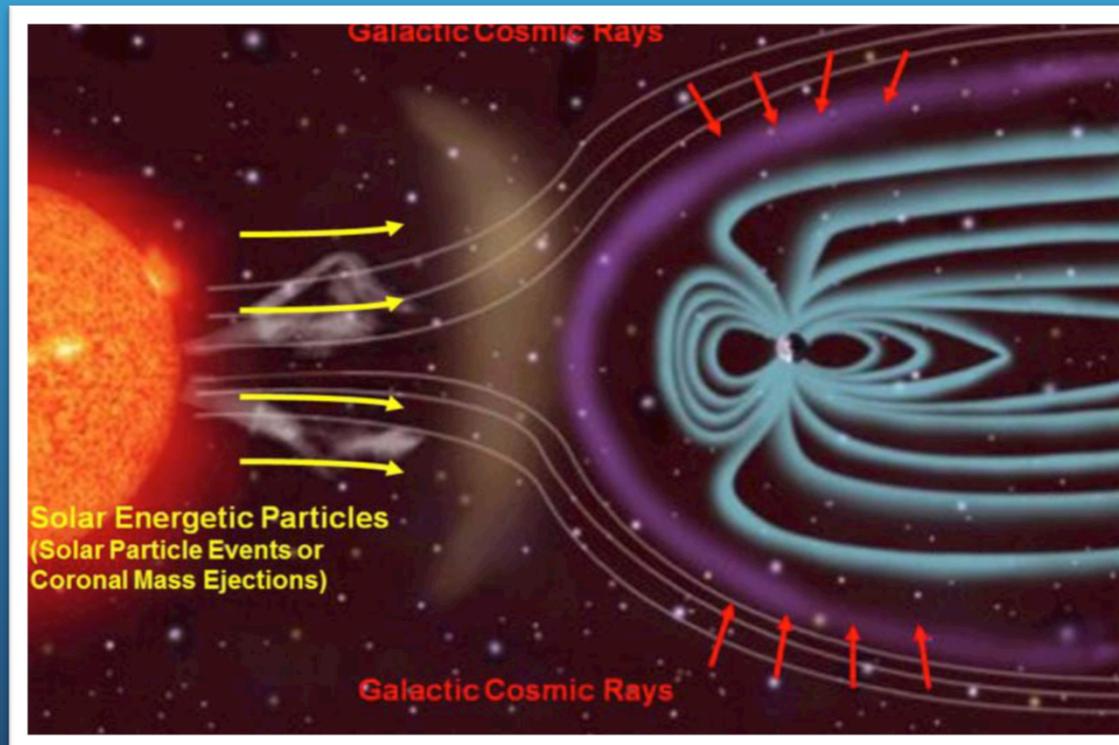
*“È arrivato il momento in cui possiamo dire che quelli che chiamiamo raggi cosmici vengono da regioni dello spazio lontane dalla Terra e che l'uso di questi raggi ha portato a risultati di tale importanza che possono essere considerati una scoperta di prima grandezza. Credo sia corretto dire che Hess per primo ha stabilito che la ionizzazione cresce con l'altezza, e che è stato il primo a poter concludere con sicurezza che parte della ionizzazione è di origine extraterrestre.”*  
*A. Compton (Fisico Americano, Nobel 1927)*



Il povero Domenico Pacini, morto da due anni, non ricevette alcun riconoscimento per il proprio lavoro...

# Un po' di storia...

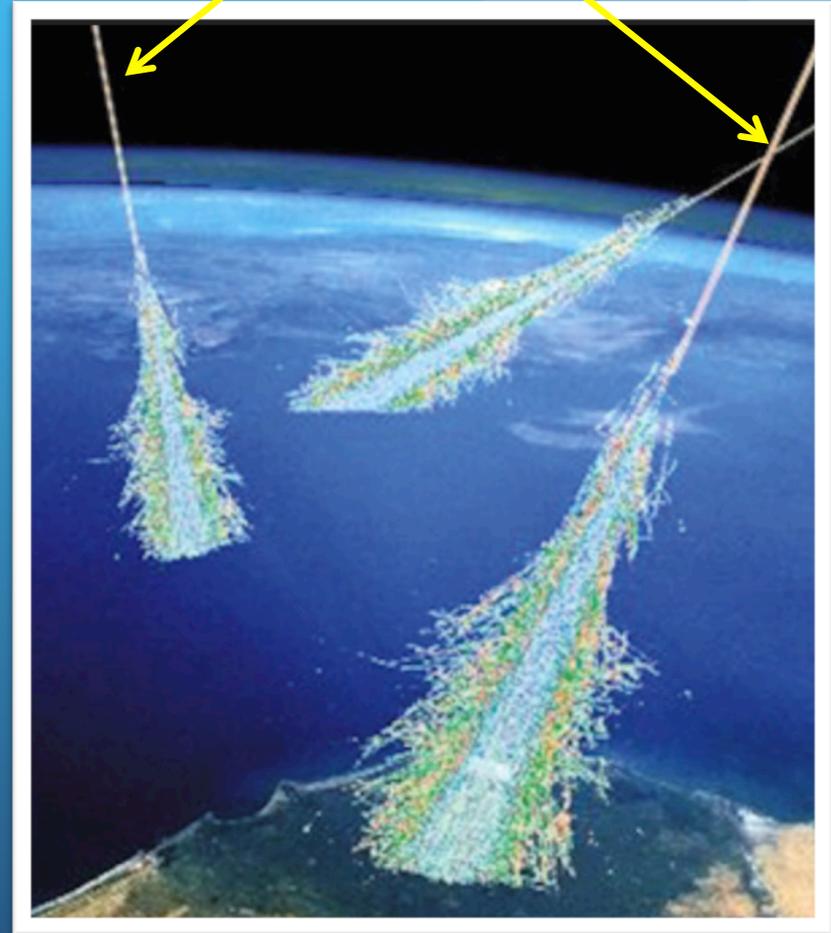
Arthur Compton ipotizzò che fossero composti da particelle cariche e neutre: successive misurazioni dimostrarono la validità di questa seconda ipotesi. La distribuzione delle radiazione, infatti, variava con la latitudine magnetica, come ci si attende da particelle cariche sotto l'influenza del campo geomagnetico terrestre.



# I raggi cosmici primari

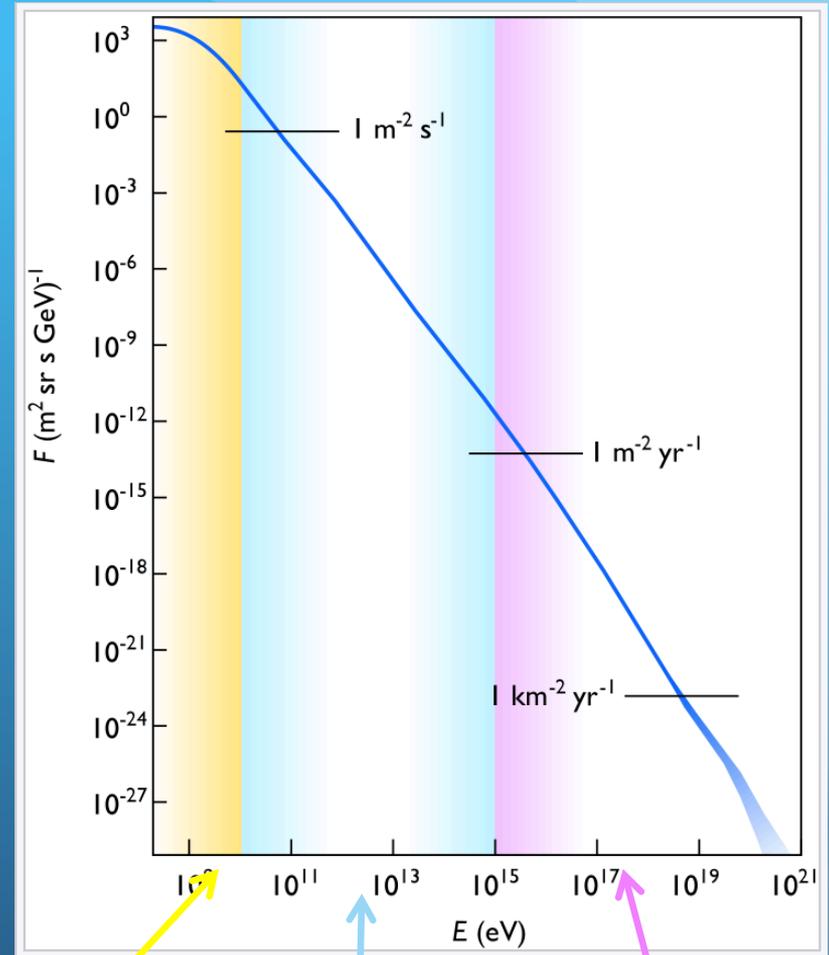
Si possono dividere in:

- **carichi:**
  - protoni (~90%),
  - nuclei di elio (~9%)
  - elettroni e positroni
- **neutri:**
  - Fotoni
  - neutrini



# I raggi cosmici primari

Il flusso diminuisce rapidamente al crescere dell'energia.



Origine Solare

Origine galattica

Origine Extra-Galattica

# I raggi cosmici primari

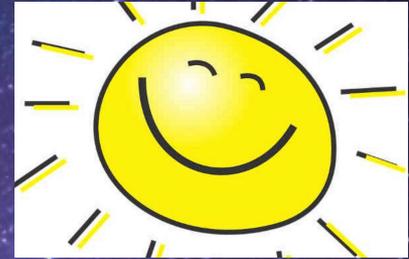
In natura i raggi cosmici possono avere energie fino a  $3 \cdot 10^{20}$  eV, ovvero 40 milioni di volte l'energia dei protoni accelerati a LHC (Ginevra)!!!



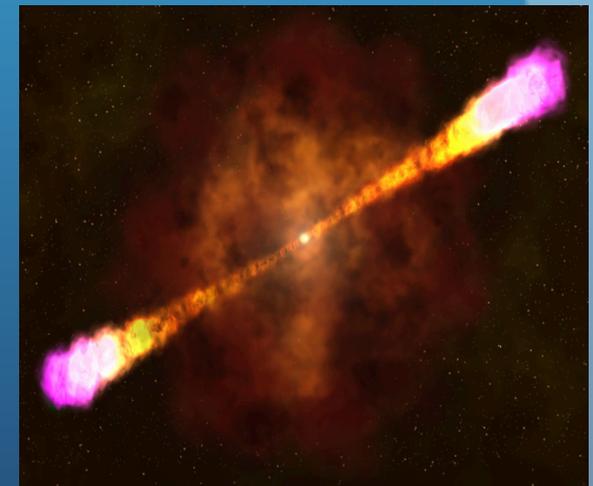
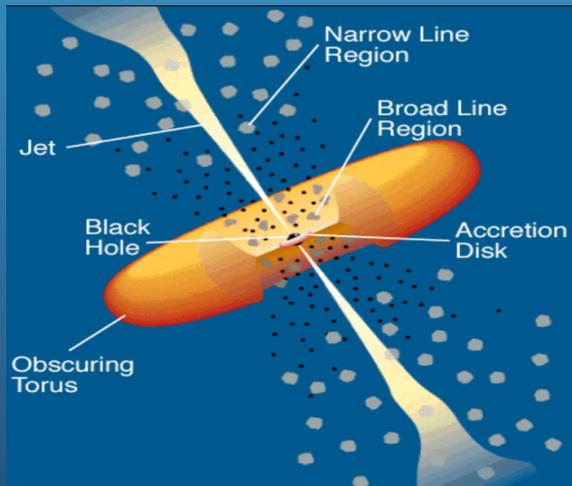
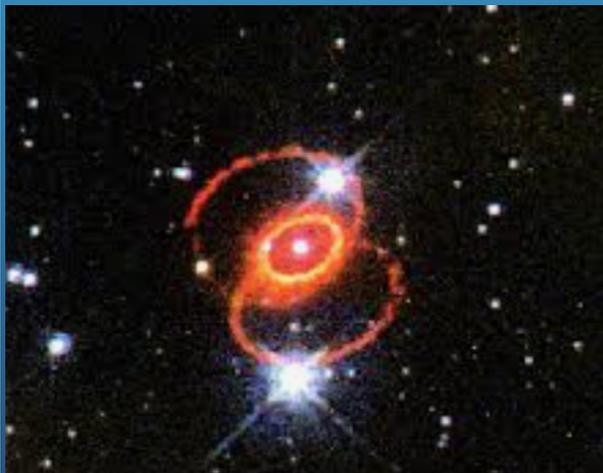
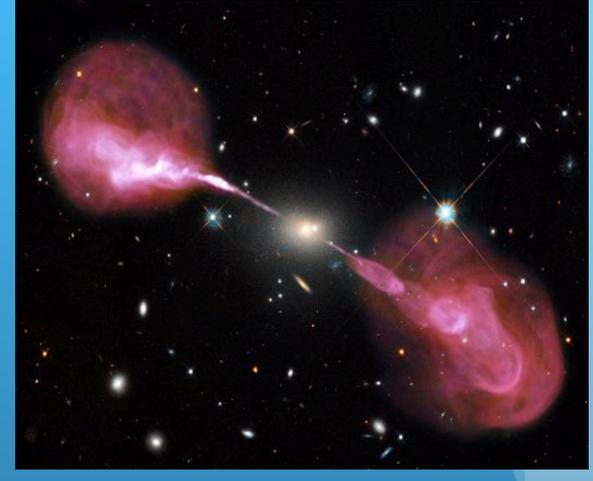
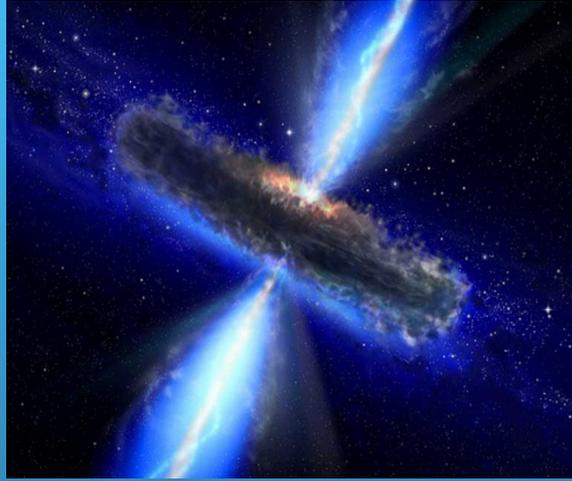
**Serve un super-accelaratore cosmico!!!**

# Sorgenti dei raggi cosmici primari

- Basse energie ( $E < 10^9$  eV) : Sole
- Medie energie ( $E < 10^{15}$  eV): Via Lattea
- Alte energie (fine a  $10^{20}$  eV!!) : SuperNovae, Active Galactic Nuclei (AGN), Gamma Ray Bursts (GRB)



# Sorgenti di raggi cosmici di alta energia



*SuperNovae*

*Active Galactic Nuclei*

*Gamma Ray Bursts*

# I raggi cosmici secondari

- I Raggi Cosmici primari interagiscono tra i 10-20 km di altezza con i nuclei che compongono l'atmosfera terrestre e producono una pioggia di particelle secondarie (detto sciame) che può giungere fino a terra.
- Questo flusso si propaga dall'alto verso il basso a forma di cono. La maggior quantità di particelle si trova intorno ai 10.000 m.
- Il flusso di queste particelle a livello del mare è invece di circa una particella per  $\text{cm}^2$  al secondo.

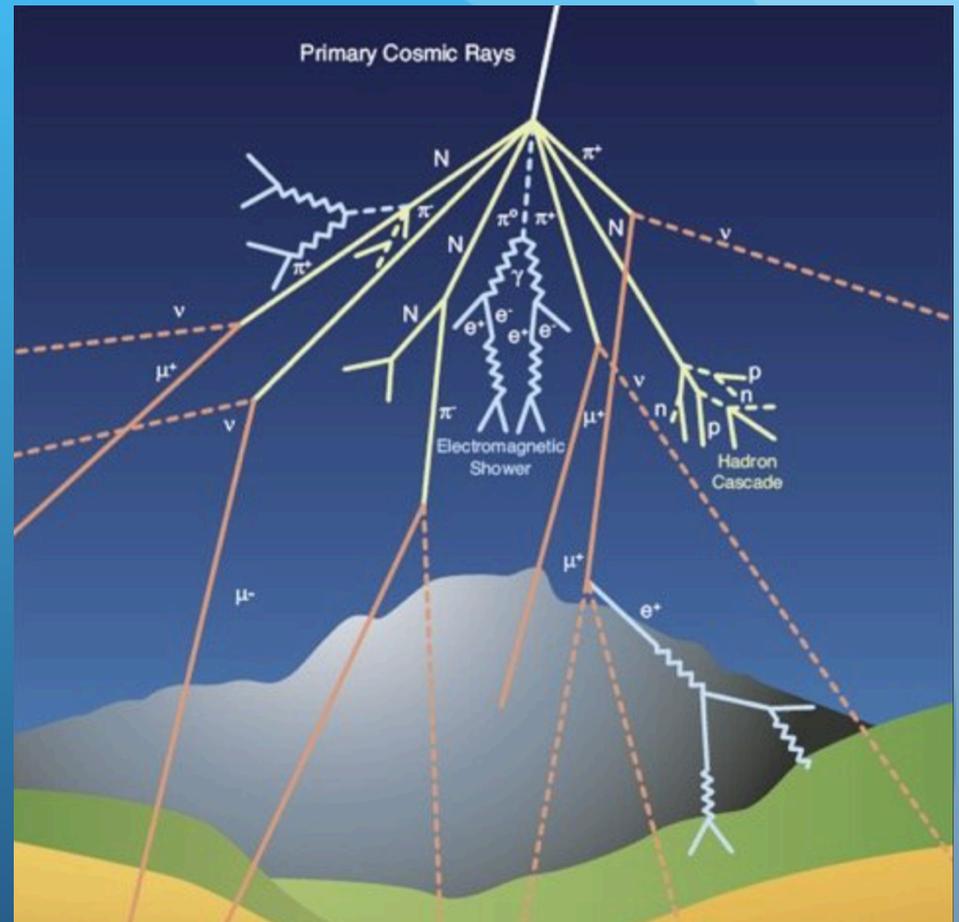


# I raggi cosmici secondari

La radiazione secondaria al livello del mare è costituita da due componenti (molle e dura) che hanno diverso comportamento nell'attraversamento di mezzi molto densi (ferro, piombo, ...).

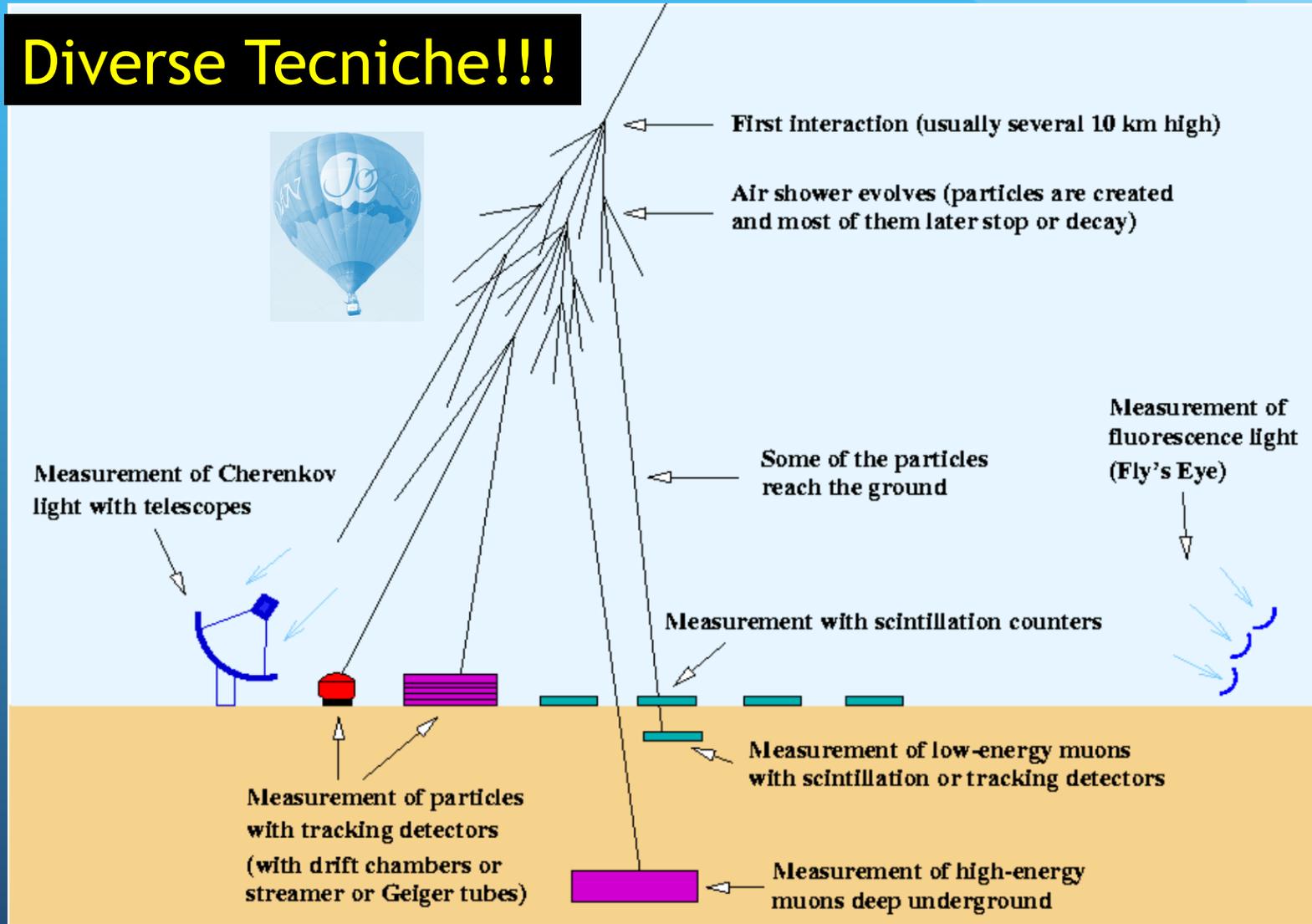
**La componente molle** (circa il 30% della radiazione secondaria), composta da elettroni e fotoni e, in minima parte, da protoni, kaoni e nuclei, è capace di attraversare solo pochi centimetri di assorbitore.

**La componente dura** (circa il 70%), composta da muoni, riesce a penetrare spessori di materiali assorbenti di oltre un metro.



# Come si studiano i raggi cosmici??

## Diverse Tecniche!!!



# Come si studiano i raggi cosmici??

Raggi cosmici primari → satelliti;

Sciami di bassa energia o prime interazioni → osservatori in alta montagna, palloni aerostatici;

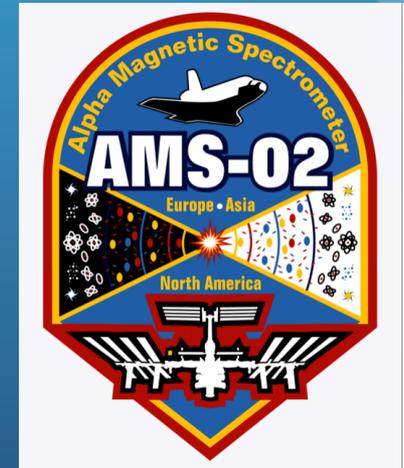
Sciami di alta energia → Rivelatori (ad acqua) in luoghi deserti ;

Raggi gamma → Rivelatori in luoghi bui;

Neutrini → Rivelatori in luoghi “schermati” , es. sotto le montagne..

# Alpha Magnetic Spectrometer (AMS02)

Misura energia e composizione cosmici, positroni, antimateria

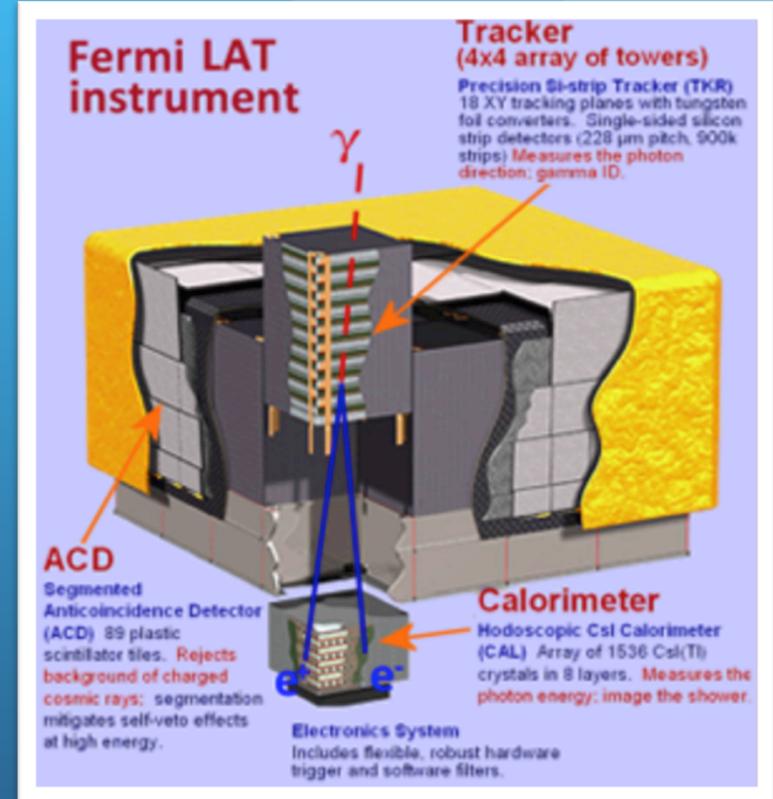


A bordo della ISS

<https://ams.nasa.gov/about.html>

# Fermi - LAT

Raggi Gamma di alta energia

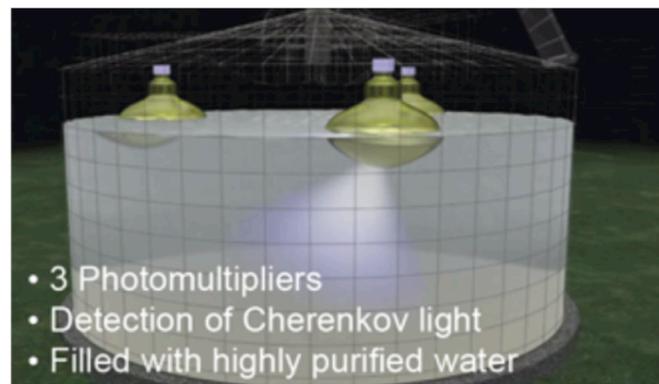
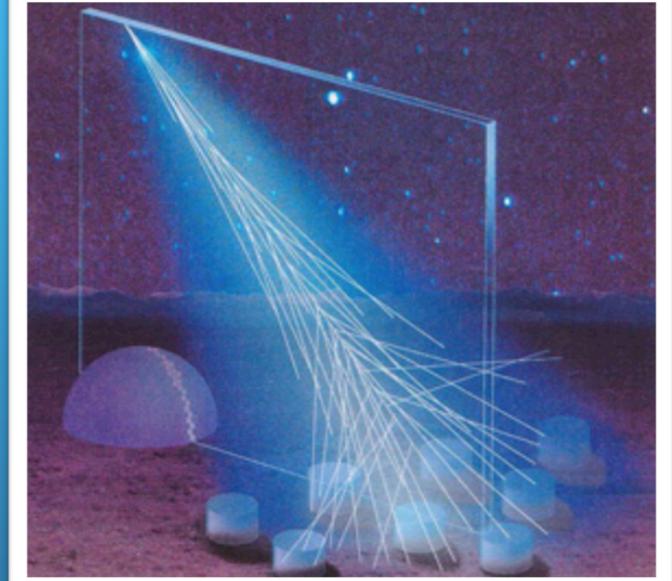


<https://glast.sites.stanford.edu/instrument>

# Auger - Pampa Argentina

Sciame secondari, ricostruzione energia e direzione del primario, individuazione sorgenti astronomiche di eventi di alta energia

Guillermo E. Sierra - 2007

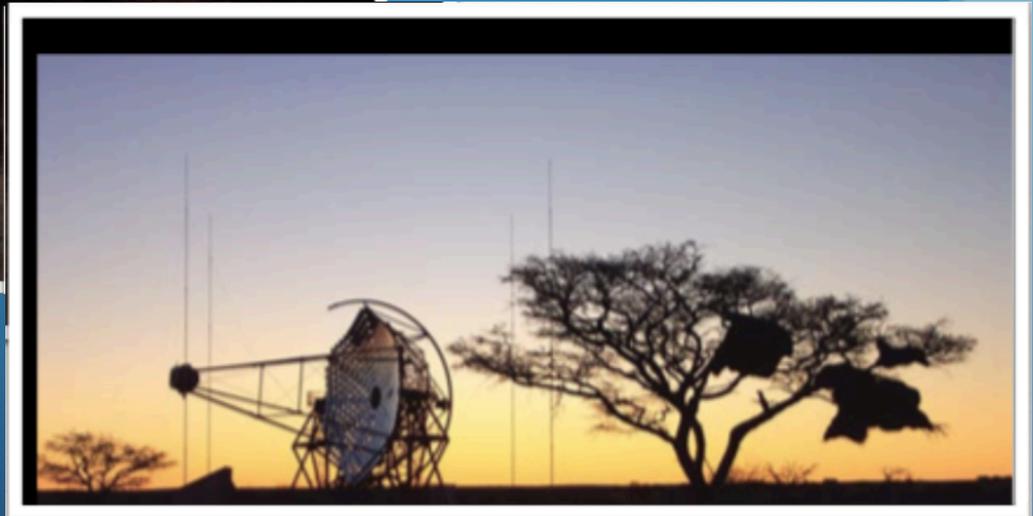


- 3 Photomultipliers
- Detection of Cherenkov light
- Filled with highly purified water

# HESS e MAGIC: Namibia e Canarie



Sciami secondari  
iniziati da gamma di  
alta energia



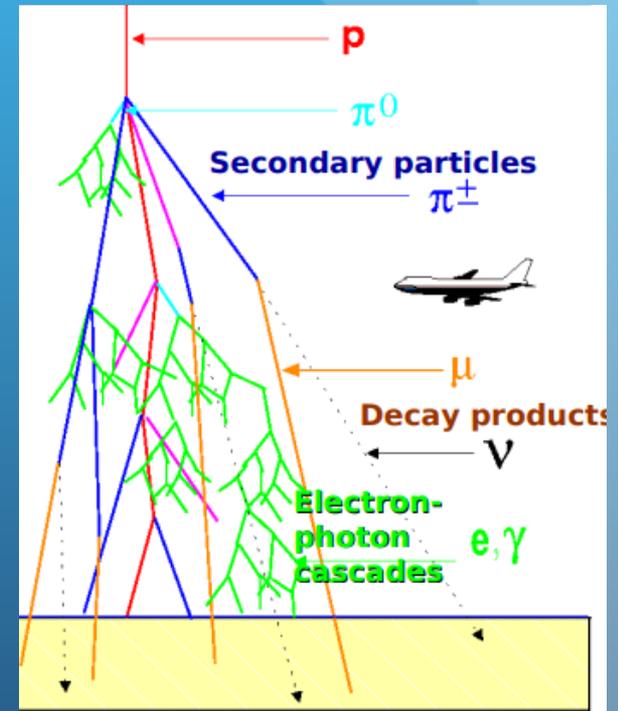
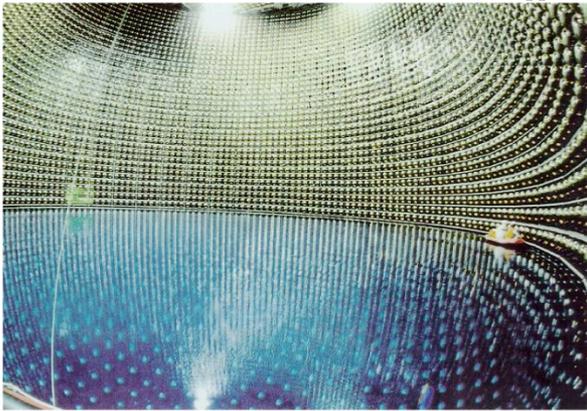
Siamo continuamente bombardati da raggi cosmici!!!

Se si vogliono studiare le particelle piu' elusive come i neutrini o la materia oscura occorre trovare il silenzio cosmico!!!



- Silenzio cosmico: esperimenti sotto le montagne, dentro le miniere o negli abissi marini
- Rivelatori con massa molto grande

KamioKande, Giappone



# I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

**SONO il principale Laboratorio di Fisica delle Astroparticelle al mondo**

La sua costruzione e' stata proposta nel 1979 da A. Zichichi durante la realizzazione dell'autostrada A 24 Roma-Teramo, approvato dal Parlamento nel 1982

La scienza ai LNGS:

Fisica dei neutrini

Ricerca di materia oscura

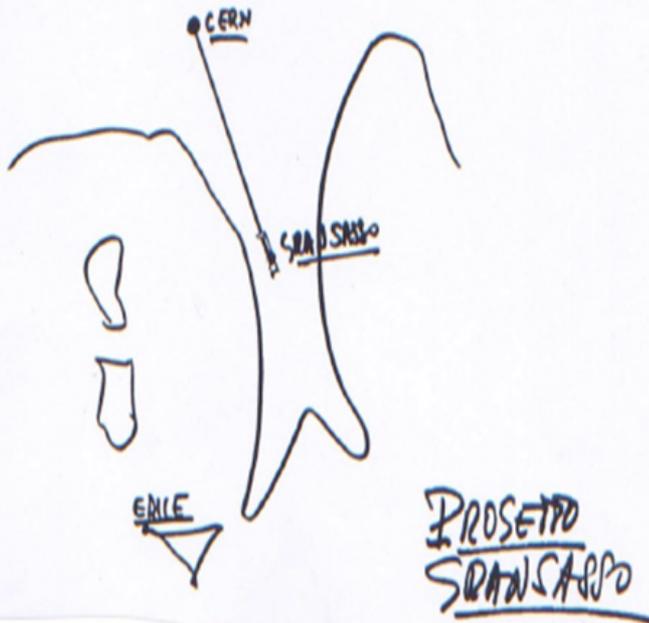
Geofisica

Biologia

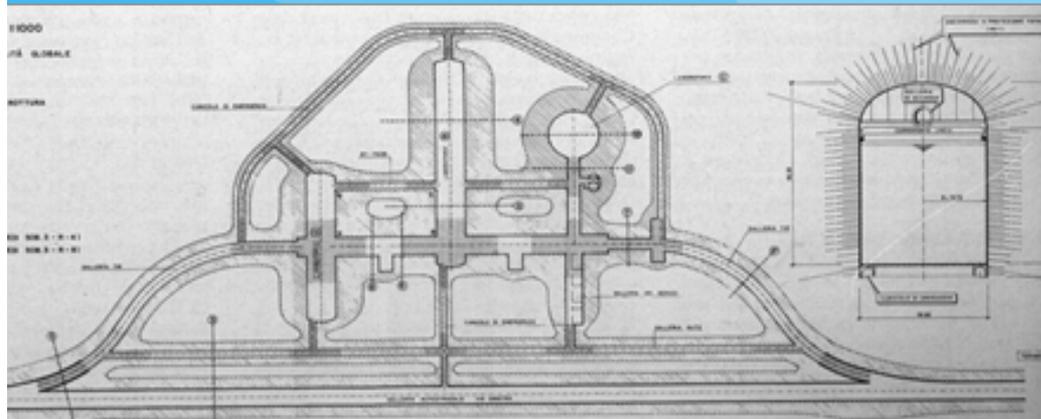
<https://www.lngs.infn.it>



COMMISSIONE LAVORI PUBBLICI DEL SENATO



Note manoscritte di A. Zichichi presentate nella Seduta della Commissione Lavori Pubblici del Senato convocata con urgenza dal Presidente del Senato per discutere la proposta del Progetto Gran Sasso (1979).



Antonino Zichichi

To summarize, the scientific aims of the "Gran Sasso" laboratory are the study of:

- 1) nuclear stability;
- 2) neutrino astrophysics;
- 3) new cosmic phenomenology;
- 4) neutrino oscillations;
- 5) biologically active matter;
- 6) ground stability.

Not only  
 $\tau_p \neq \infty$

# I Laboratori esterni...



# Accesso ai Laboratori sotterranei



# Alcune foto...



# Esempio di altri esperimenti..

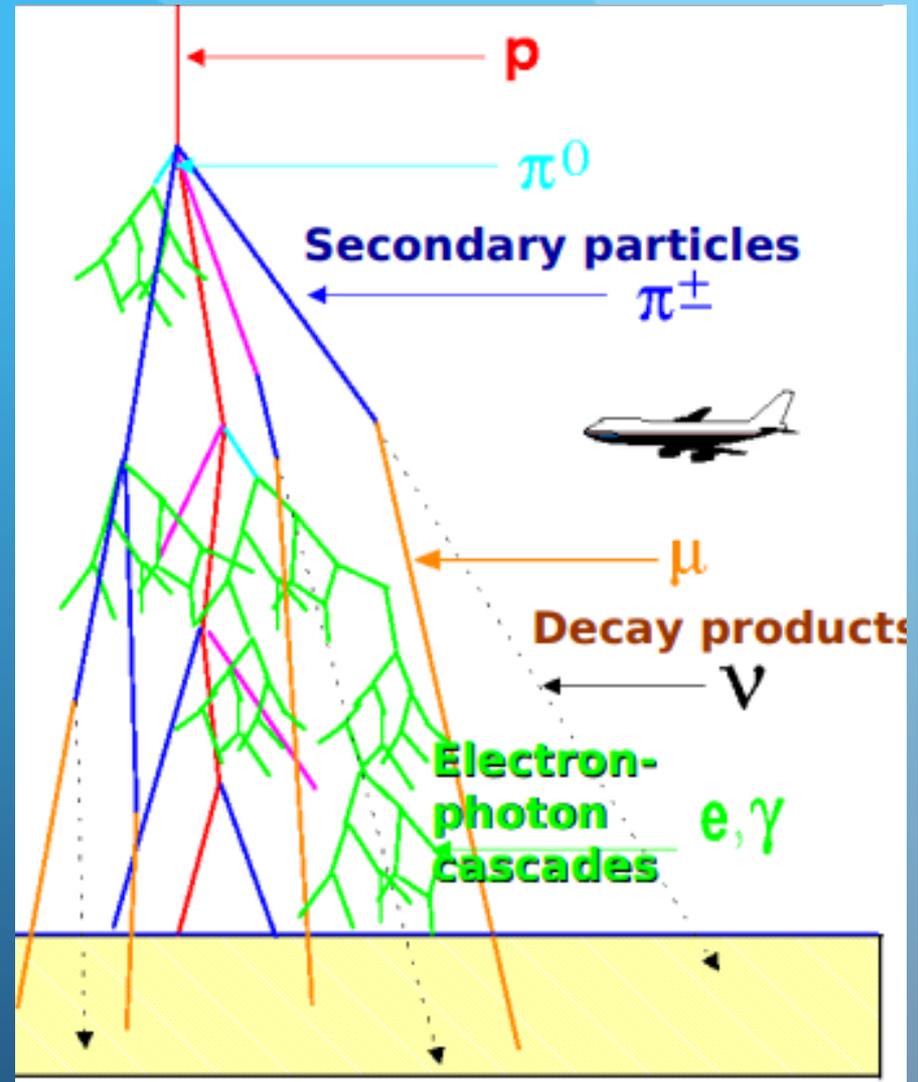
## IceCube - Polo Sud



Ma i raggi cosmici non sono solo fastidiosi.. possono anche essere utili!!!



In particolare proprio quelli piu' penetranti cioe' i muoni !!

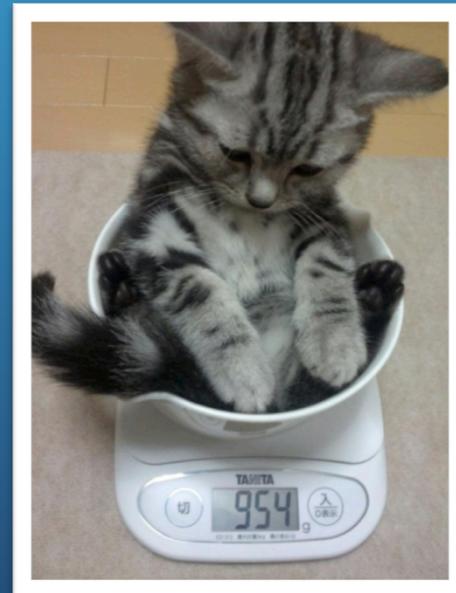


# Il Muone

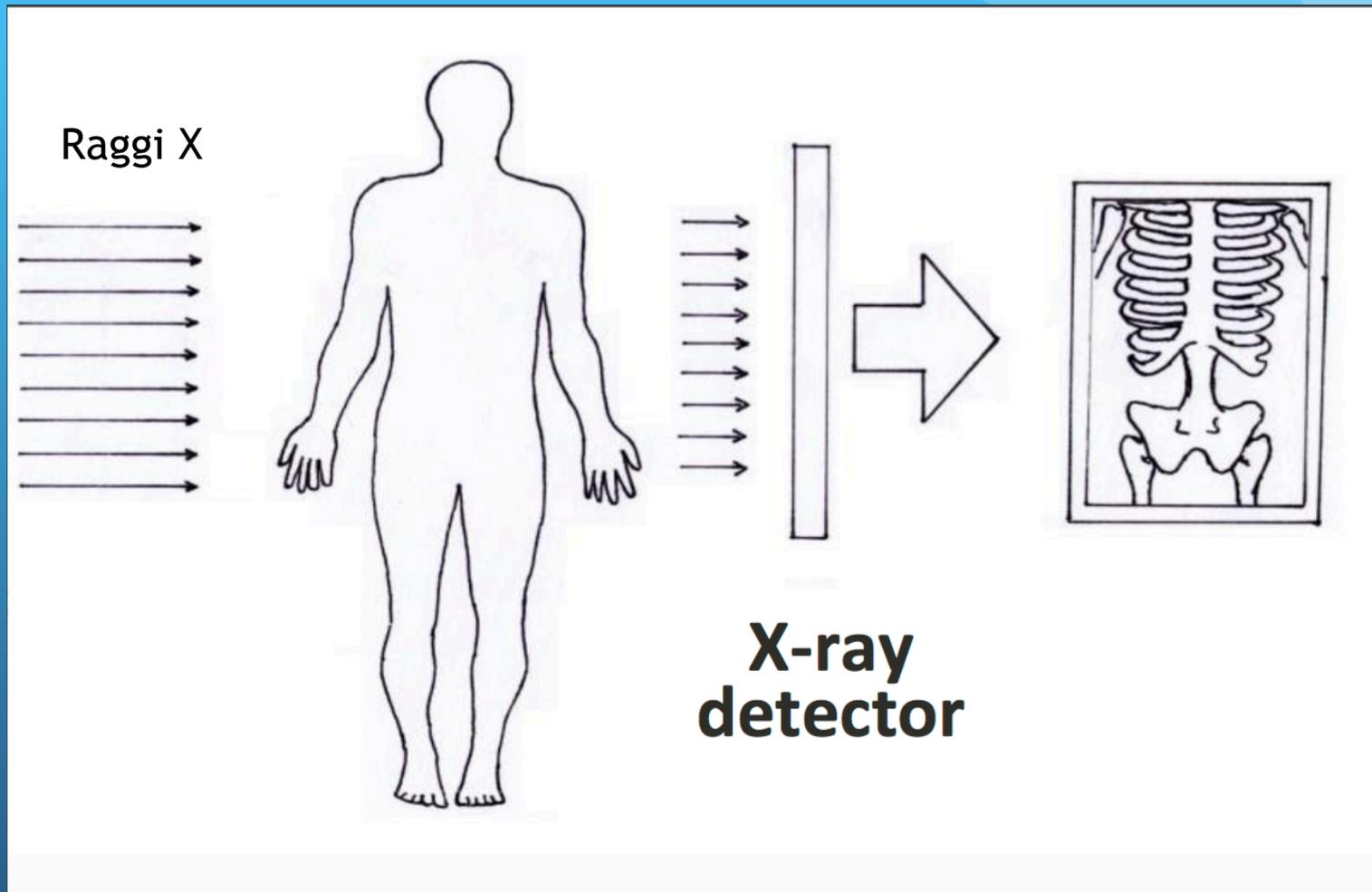
- è molto veloce, viaggia quasi alla velocità della luce ( $\sim 300.000$  km/s).
- è una particella sub-atomica instabile. Prima di trasformarsi in altre particelle vive solo due milionesimi di secondo!

Il muone ha una massa pari a circa 200 volte quella di un elettrone, se l'elettrone pesasse quanto un gatto...il muone peserebbe quanto una mucca.

Con i muoni è possibile fare delle specie di radiografie..



# Il principio della radiografia

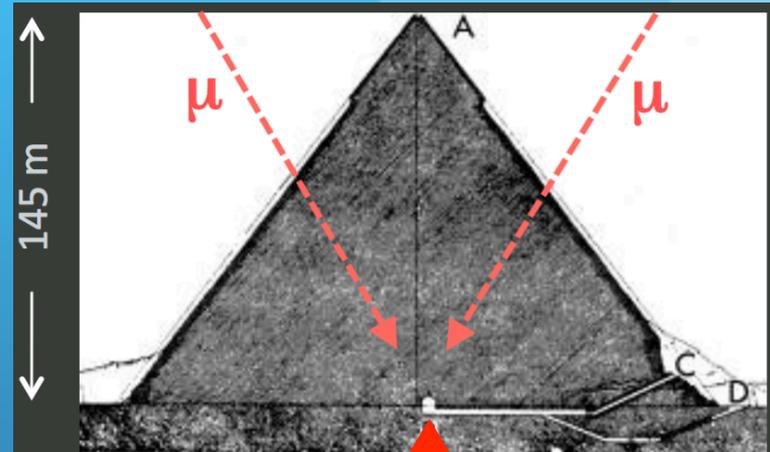


L'assorbimento dipende dalla densità: gli oggetti più densi creano un'ombra

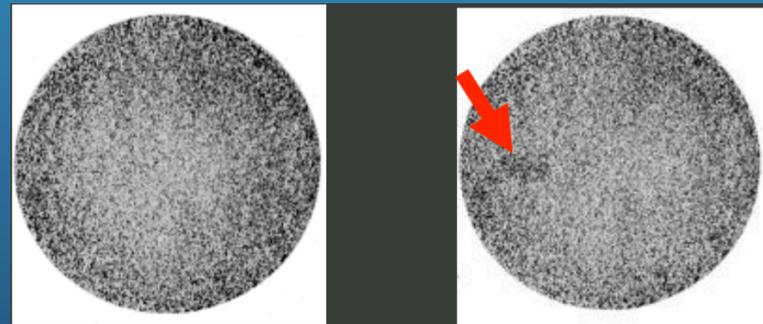
# Tomografia con muoni

Con la Tomografia con è possibile evidenziare stanze nascoste all'interno di tunnel o scoprire masse disomogenee prossime o sovrastanti grotte naturali.

Nel 1970, il premio Nobel Luis Alvarez ebbe l'idea di evidenziare con i muoni stanze non ancora scoperte dagli archeologi nella Piramide di Chefren (Egitto)



Rivelatore



# Tomografia con muoni

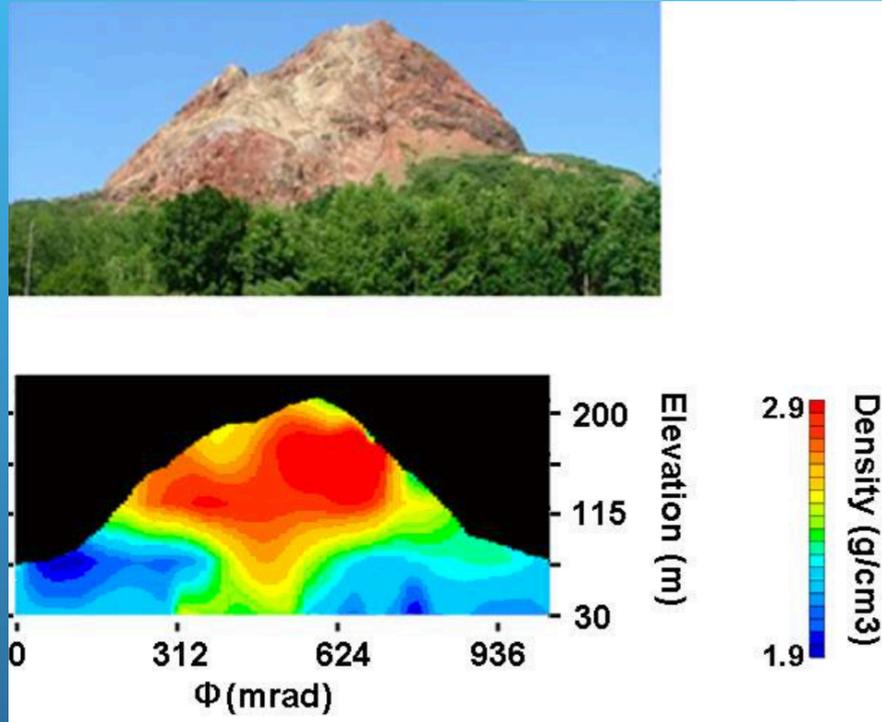
## Studio di vulcani

### Camera Magmatica del vulcano USU a Showa-Shinzan - Giappone

*H.K.M. Tanaka and I. Yokoyama*

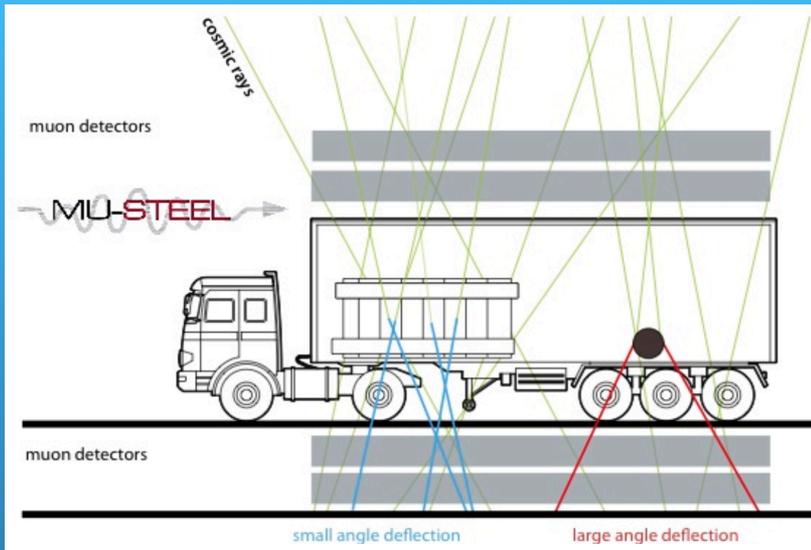
*EPS Lett. 263 (2007)104*

*Proc. Jpn. Acad. B84 (2008) 107*



Il progetto MURAVES (MUon-RAdiography-of-VESuvius) prevede il posizionamento di un telescopio a muoni alle pendici del Vesuvio in grado di studiare la struttura sommitale del vulcano

# Tomografia con muoni

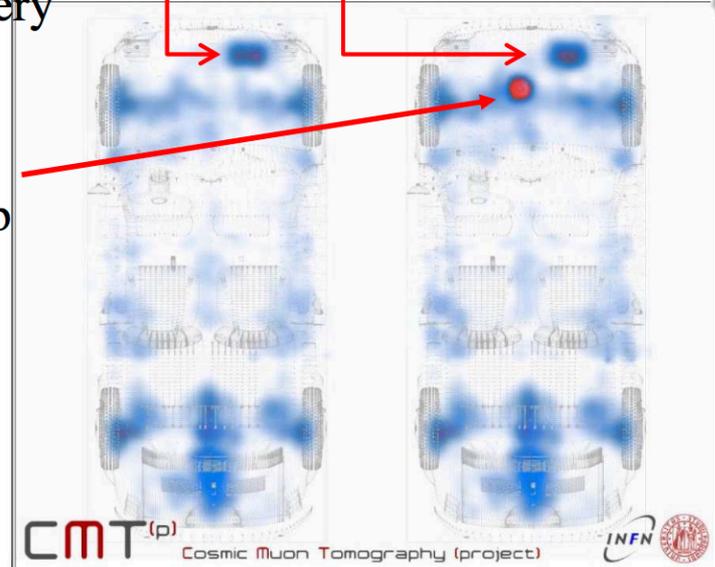


MUON PORTAL PROJECT - Un rivelatore per l'ispezione dei container per la ricerca di materiale radioattivo (uranio, plutonio..). I muoni vengono deflessi a grande angolo in presenza di materiali ad elevato numero atomico.



Battery

11 Pb



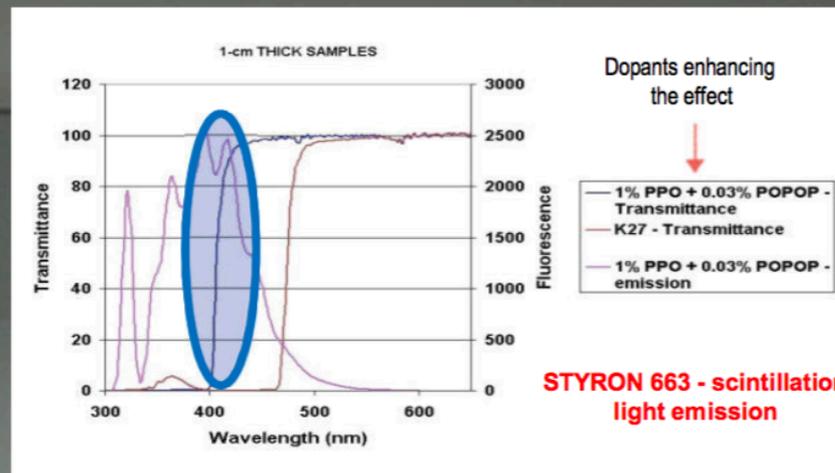
Come facciamo a costruire un  
“telescopio” per muoni?

# Cosa serve per costruire un telescopio per muoni ??

- ✓ del materiale in grado di convertire l'energia rilasciata da una particella in un debole segnale luminoso (scintillatore plastico o altro tipo di rivelatore)

Muone → luce

$\mu$

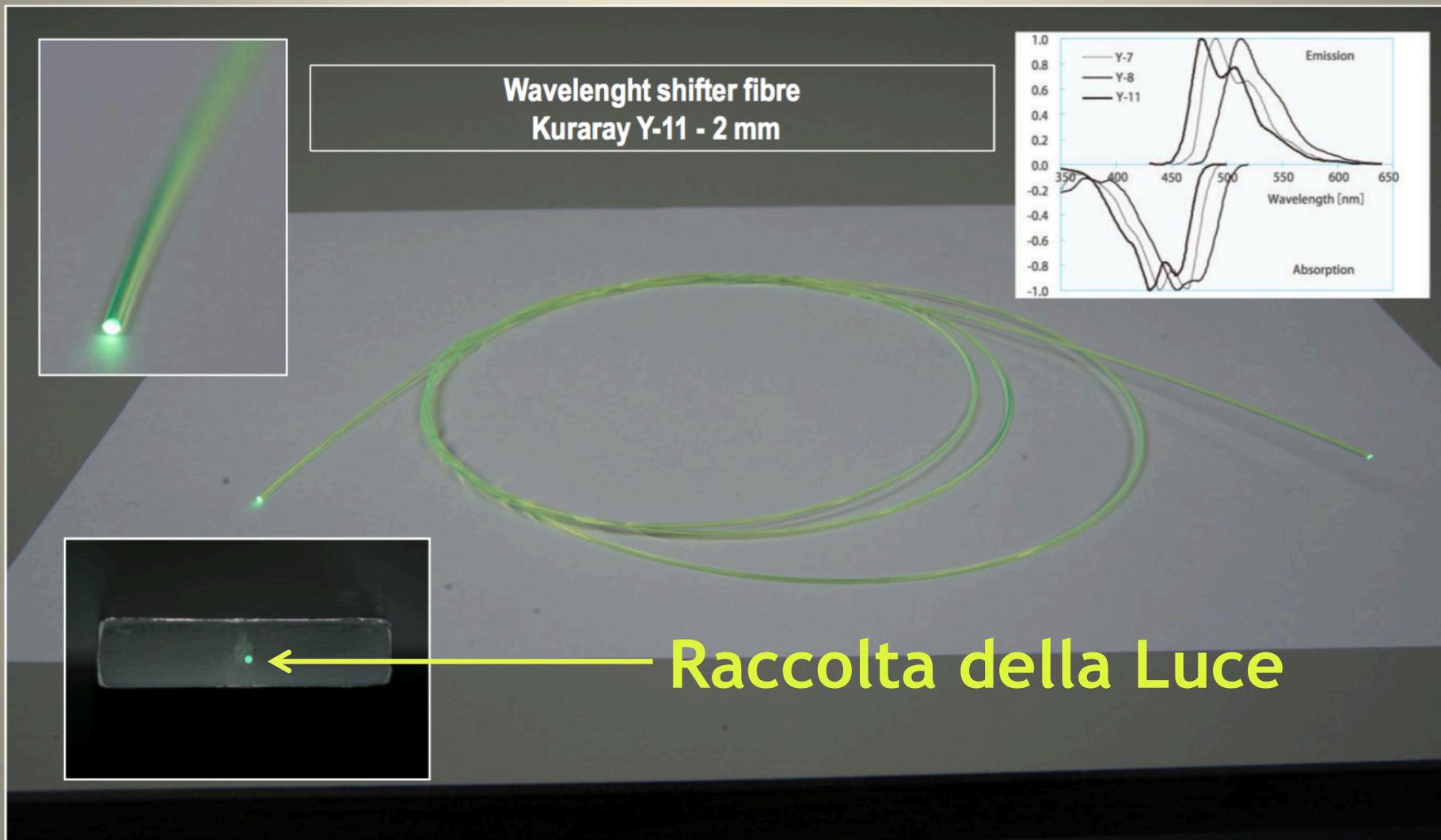


Scintillatore Plastico (styron 663)

Questo materiale converte l'energia rilasciata da una particella carica in luce

# Cosa serve per costruire un telescopio per muoni ??

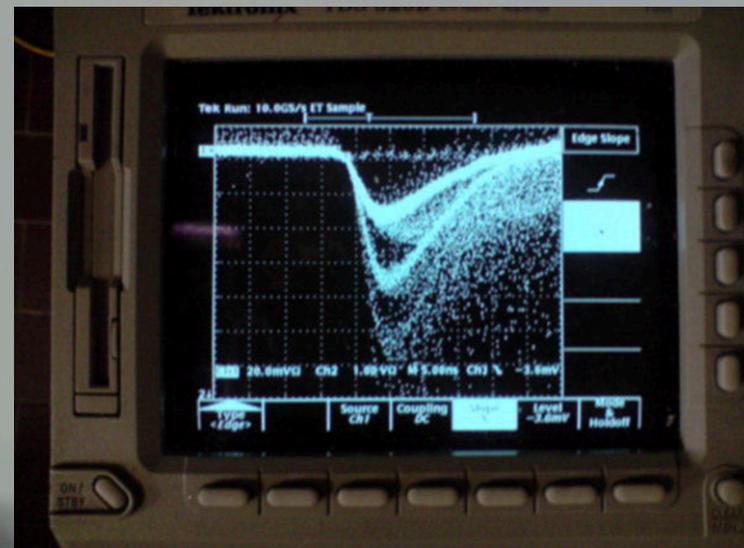
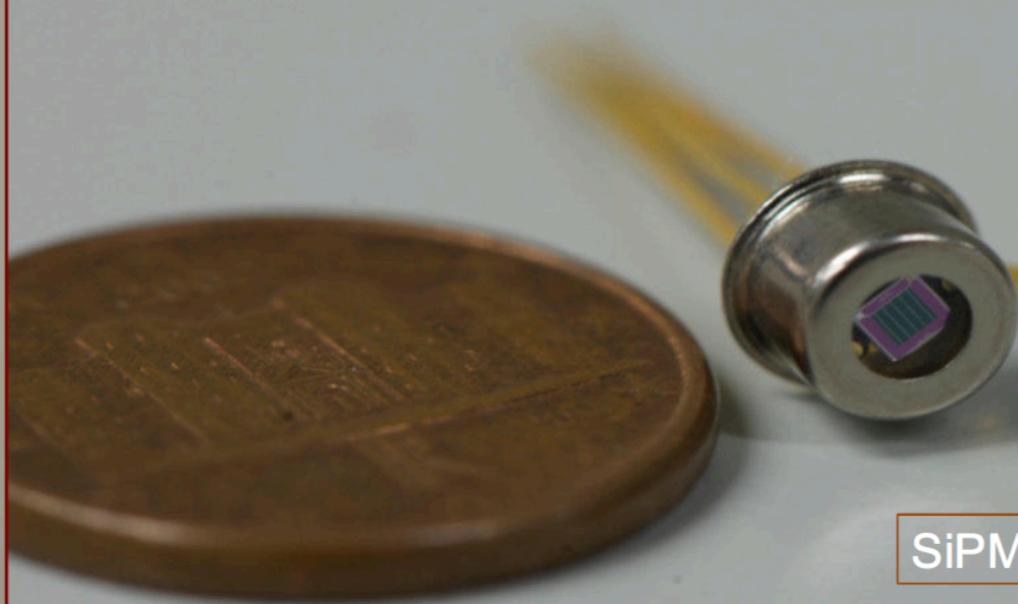
- ✓ delle particolari fibre simili alle fibre ottiche, chiamate WLS (*Wave Length Shifter*), in grado di convertire la luce raccolta in luce di diversa lunghezza d'onda (dal blu al verde)



# Cosa serve per costruire un telescopio per muoni ??

- ✓ dispositivi in grado di convertire la luce raccolta dalle fibre in un segnale elettrico (SiPM - *Silicon PhotoMultiplier*)

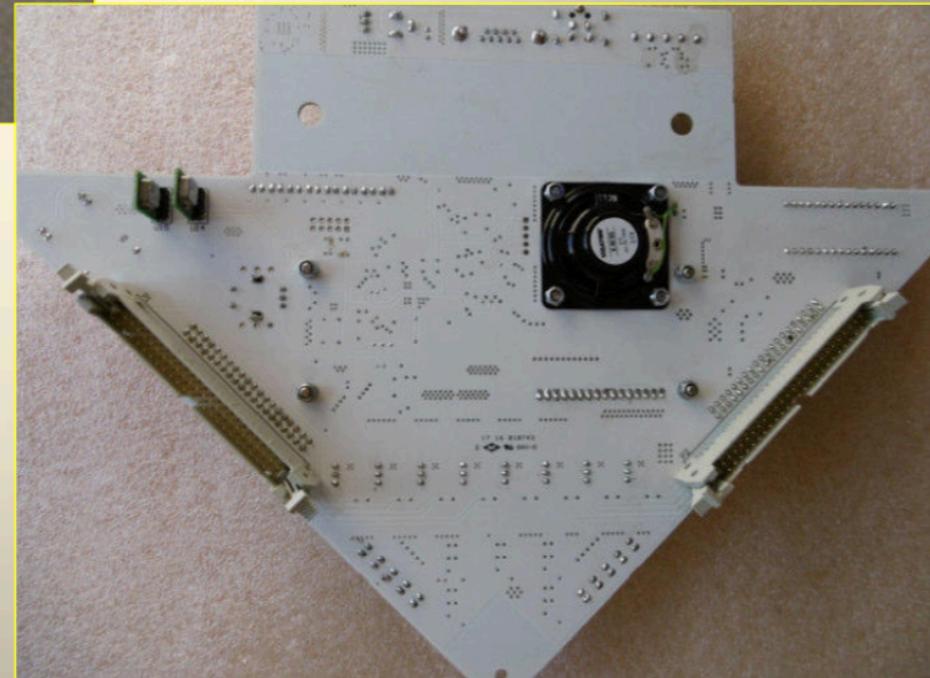
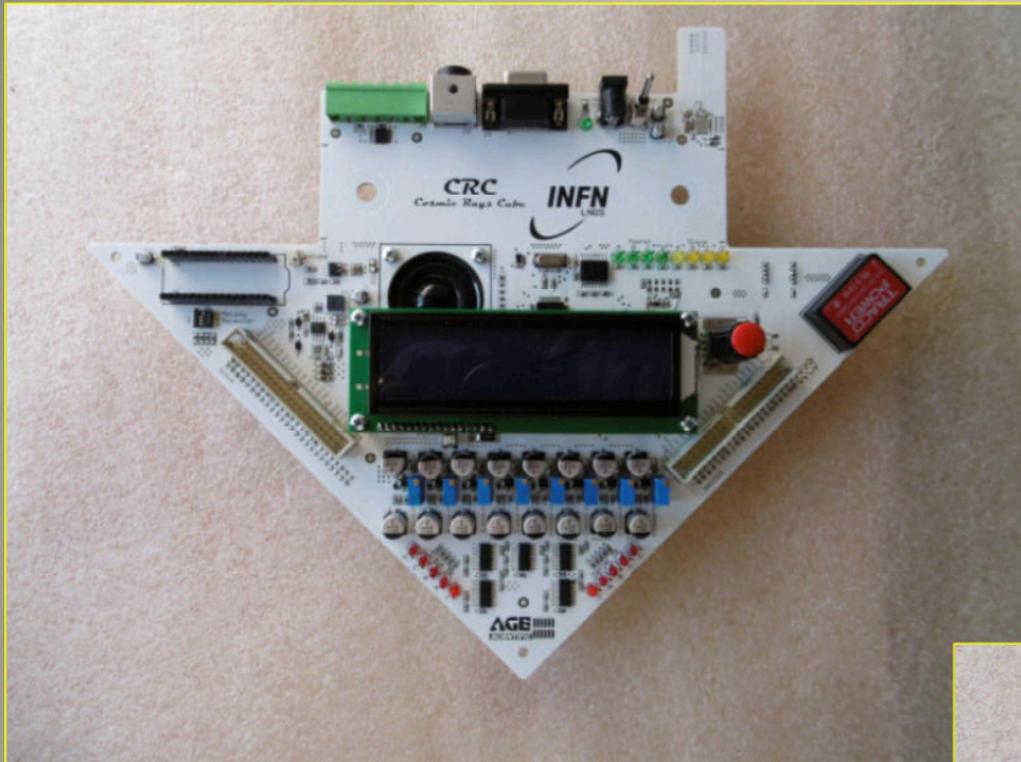
Luce → Segnale Elettrico



SiPM AdvanSiD ®

SiPM characteristics: 1,13 mm<sup>2</sup> area, 40x40 μm<sup>2</sup> cell size, cells number: 673  
gain: 2,7x10<sup>6</sup>, dark count: 200 kHz/mm<sup>2</sup>, PDE: 32,5%, TO 18 metallic package

Breakdown Voltage Temperature Coefficient: 27 mV/° C



**Scheda di Readout**

Alimentazione SiPM: 32 V cc

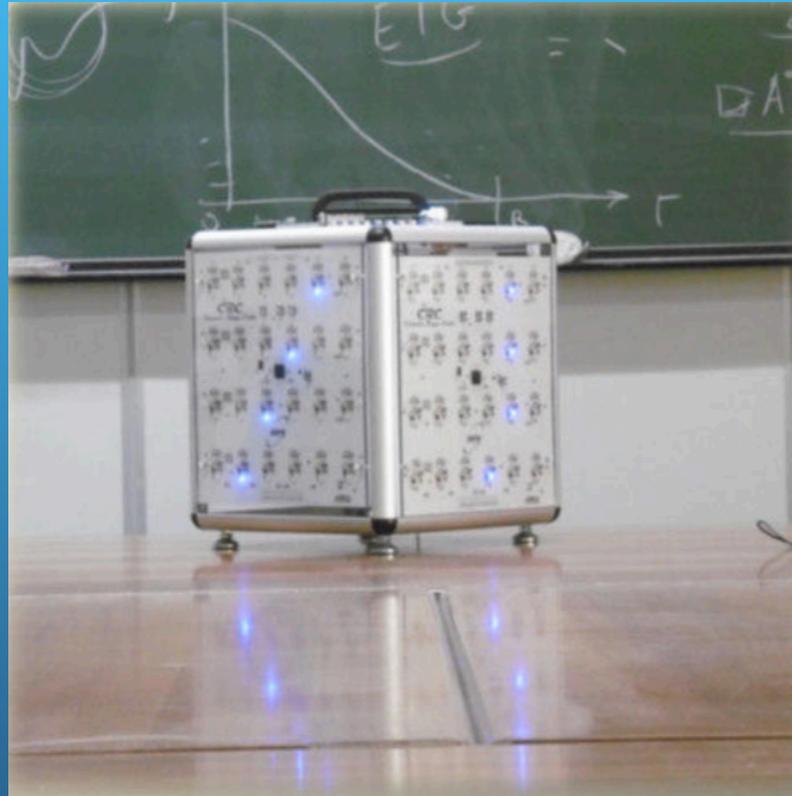
Alimentazioni del telescopio: +12, +5, +3,3, -3,3 V

Tutto con un unico alimentatore commerciale a 12 V!

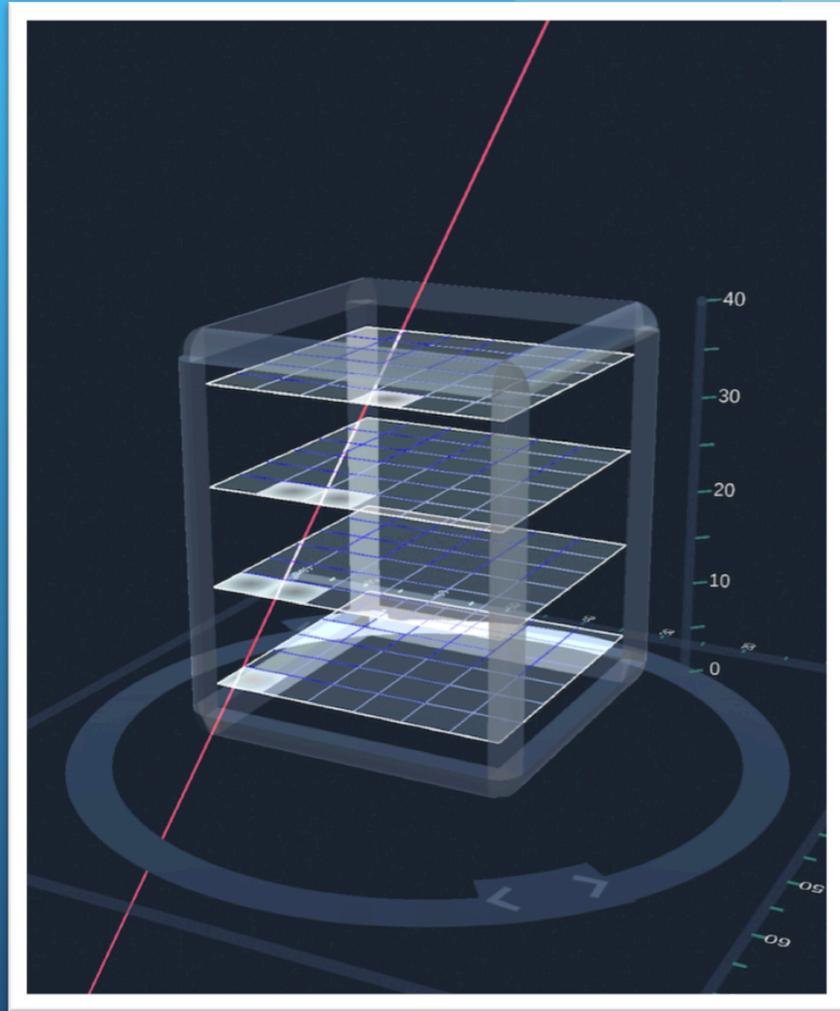


**Computer**

Una rete di “telescopi” di questo tipo esiste in molti laboratori sulla Terra.. Noi vi proponiamo di:



1) Scaricare la App per visualizzare in tempo reale le tracce registrate da uno di questi telescopi



2) Giocare con un piccolo prototipo che abbiamo costruito nel nostro laboratorio!

