Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

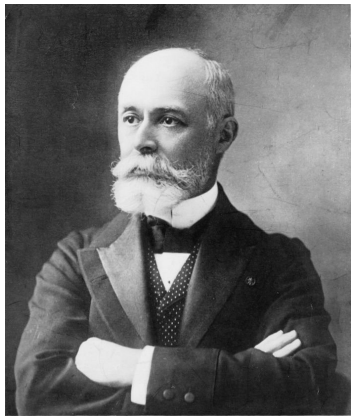
International Cosmic Day
Introduzione ai raggi cosmici

Alberto Ruzzon

13/11/2025

Introduzione storica

Scoperta della radioattività naturale



1900 Becquerel, Marie e Pierre Curie scoprono che alcuni elementi emettono raggi capaci di penetrare la materia ed impressionare lastre fotografiche

Si scoprirà che la radioattività si compone o di particelle (elettroni, alfa, neutroni ed altre ancora da individuare) o da radiazioni elettromagnetiche ad alta energia (raggi gamma)

In seguito si noterà che è sempre presente una certa radioattività, anche in assenza di elementi “radioattivi”

<u>Da dove viene questo fondo?</u>
Il suolo?
Il cielo?

La misura della radioattività

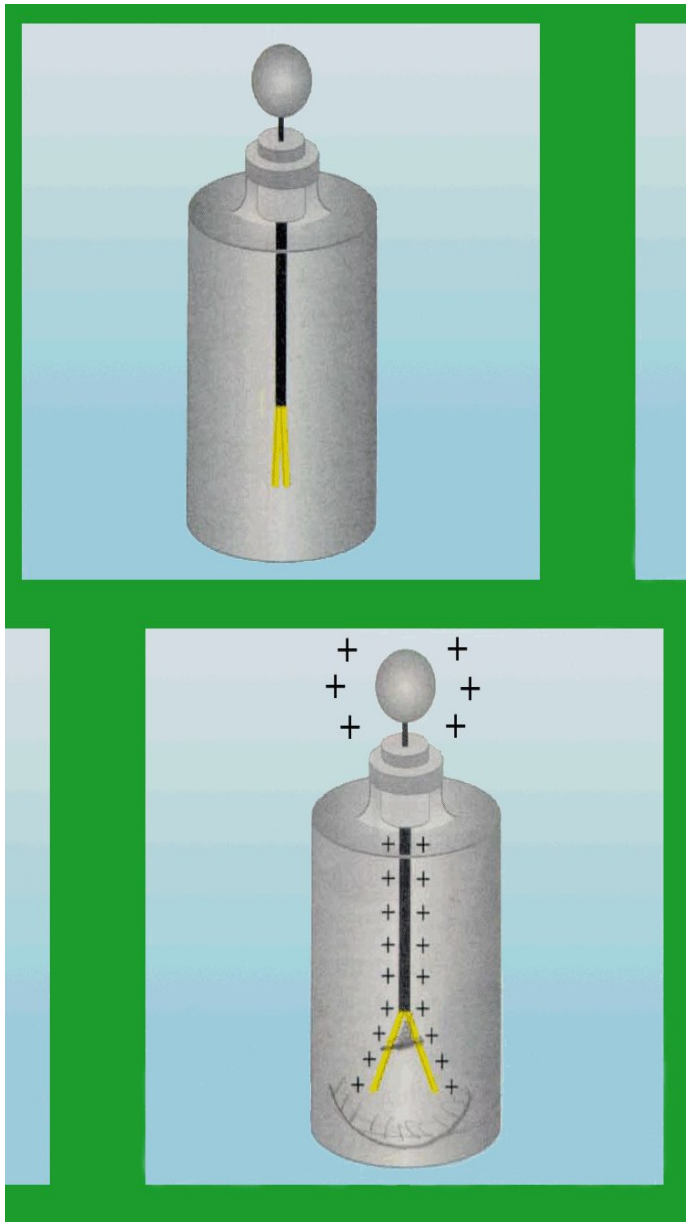
Le misure sulla presenza di radioattività veniva compiuta con l'elettroscopio.

L'angolo tra i due bracci indica quanta carica è presente nell'elettroscopio.

Qualora la carica vari nel tempo significa che altre cariche si sono trasferite sul metallo

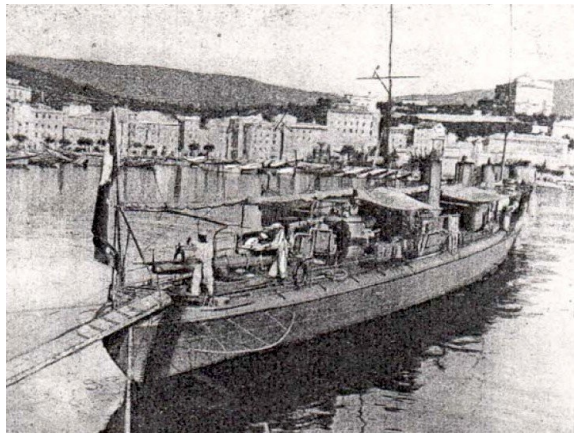
La radioattività ha l'effetto di ionizzare l'aria attraverso cui passa e permette quindi l'arrivo di nuove cariche sull'elettroscopio.

La velocità con cui cambiava l'angolo tra i due bracci indica l'intensità della radiazione



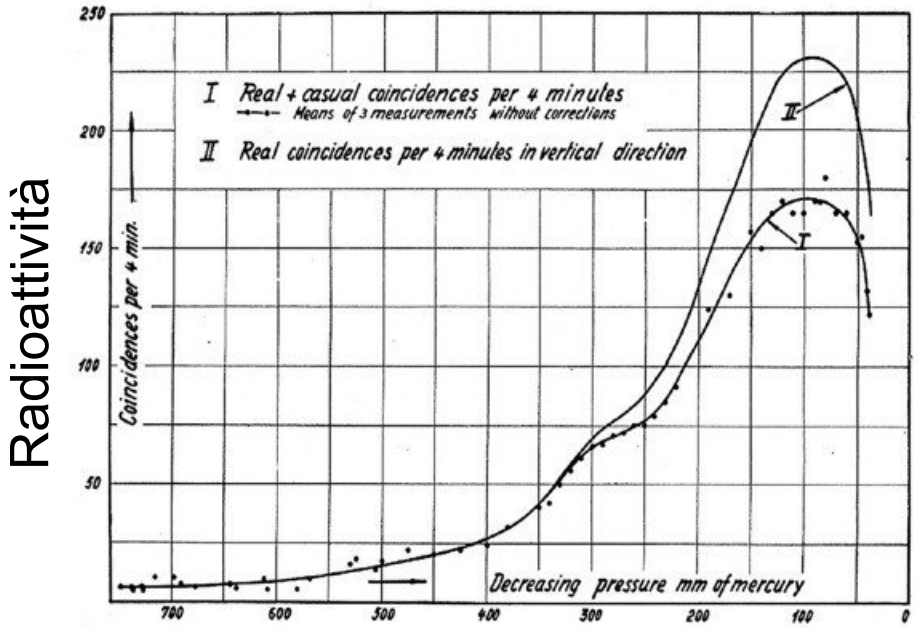
Indagini sull'origine della radioattività

1908 Pacini compie misurazioni a 3 metri di profondità a Livorno (e poi in ottobre a Bracciano) e osserva una **riduzione del 20%** della radioattività.
→ La radioattività proviene dal cielo



1910 Padre Wulf misura la radioattività sulla torre Eiffel:
la radioattività **dimezza salendo a 330 m** dal suolo
→ La radioattività proviene dal suolo

1912 Victor Hess compie 7 voli in pallone, fino a 5300 metri rilevando che la **radioattività cresce rapidamente oltre i 3000 metri**.
→ Parte della radiazione viene dal suolo, e parte dall'alto (fuori dalla Terra)



Radioattività

Pressione (quota)

Per le sue indagini Victor Hess vincerà il premio Nobel nel 1936

Con la scoperta di un'origine extra terrestre della radiazione di fondo si apre il capitolo dei **raggi cosmici** la cui natura è ancora sotto investigazione

I raggi cosmici

Che cosa sono?

Lo spazio che separa la Terra dagli altri corpi celesti non è propriamente vuoto.

Molto rarefatti ci sono: polveri, molecole, atomi, ioni ed elettroni (molti di questi sono originati dal Sole, ovvero il vento solare)

I **raggi cosmici** sono quelle particelle (e anche fotoni) che hanno una energia cinetica superiore alla media

L'origine e l'energia posseduta da questi raggi è molto varia

Dei raggi cosmici che arrivano sulla Terra i principali sono:

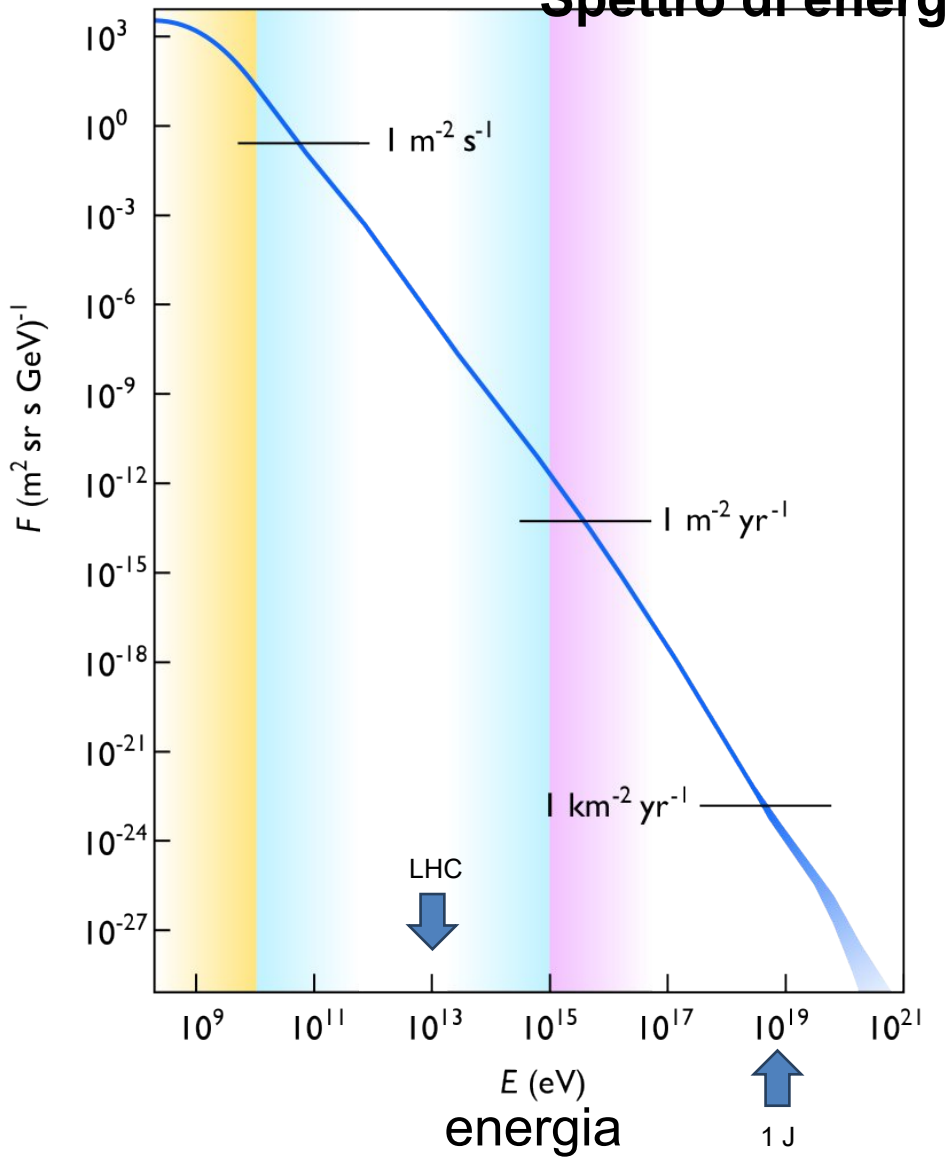
I raggi cosmici originati dal sole (**vento solare**) composti da:

- Protoni (43%)
- Elettroni (43%)
- nuclei di elio (4-5%)

I raggi cosmici **galattici** composti da:

- 93% protoni
- 6.4% nuclei di elio
- 0.1% nuclei leggeri
- 0.4% nuclei medi
- 0,2% nuclei pesanti e superpesanti

Spettro di energia dei raggi cosmici



Origine solare

Origine galattica

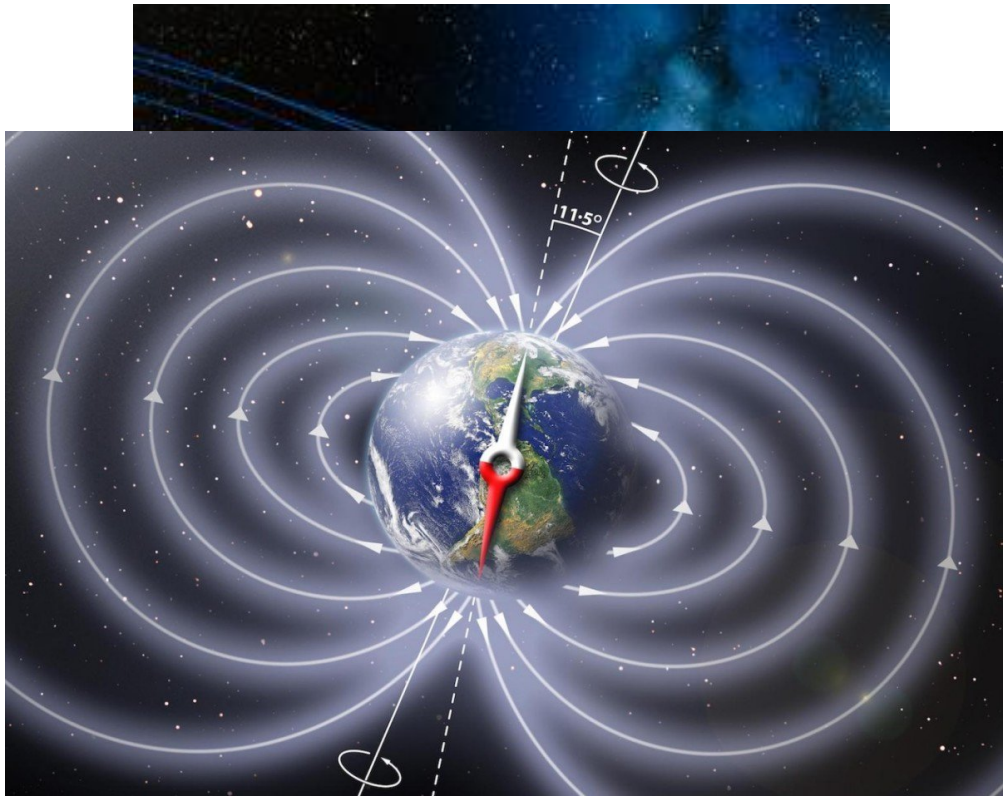
Origine extragalattica

1 eV = 1,6022 10^{-19} J

Energia cinetica di una carica fondamentale accelerata con 1 V

Cosa accade ai raggi cosmici viaggiando verso la Terra?

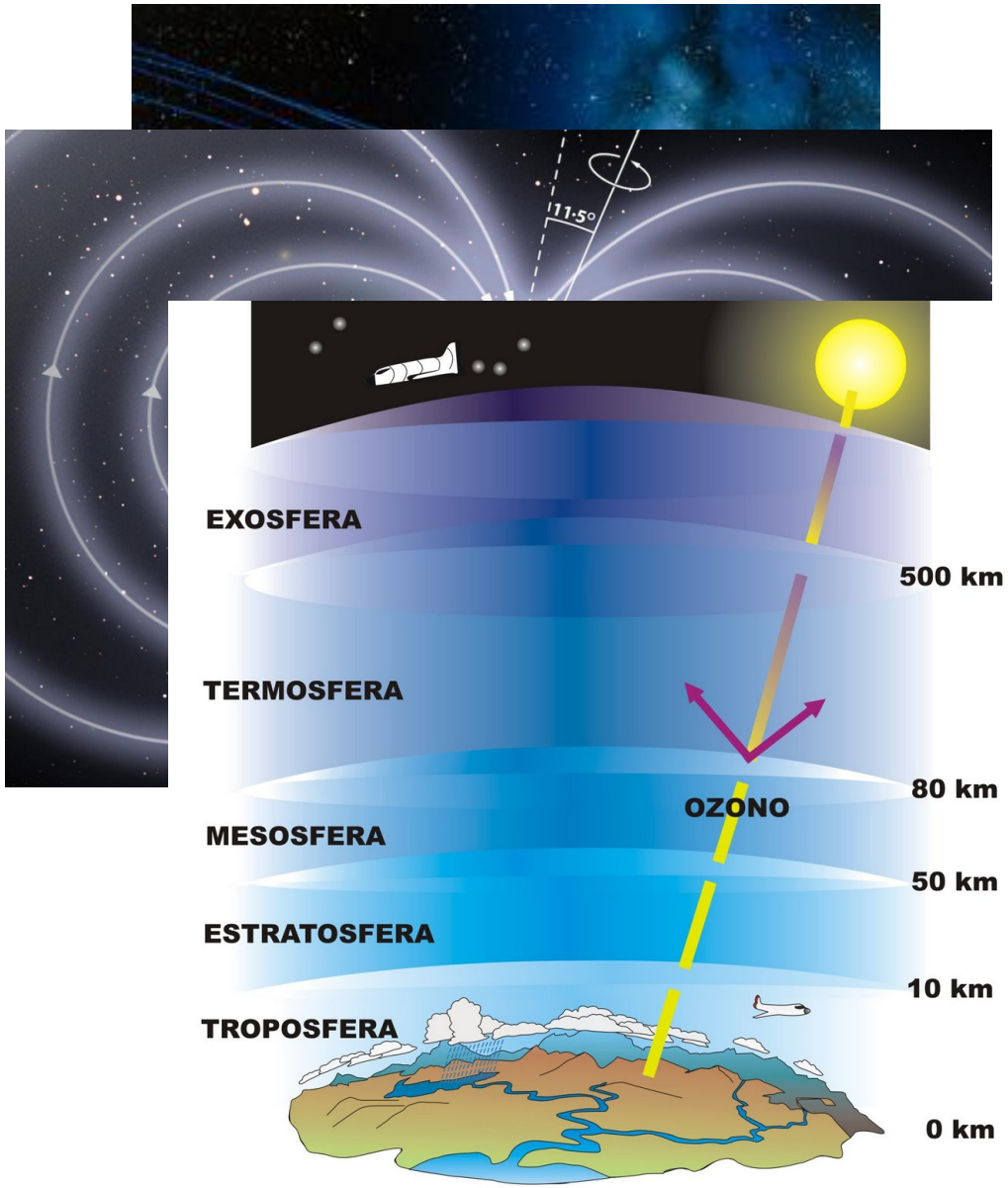
1. Vagano nello spazio interplanetario ed entrano nel sistema solare dove possono interagire con l'atmosfera solare



Cosa accade ai raggi cosmici viaggiando verso la Terra?

1. Vagano nello spazio interplanetario ed entrano nel sistema solare dove possono interagire con l'atmosfera solare

1. Si avvicinano alla Terra ma trovano il campo magnetico che li devia dalla loro traiettoria

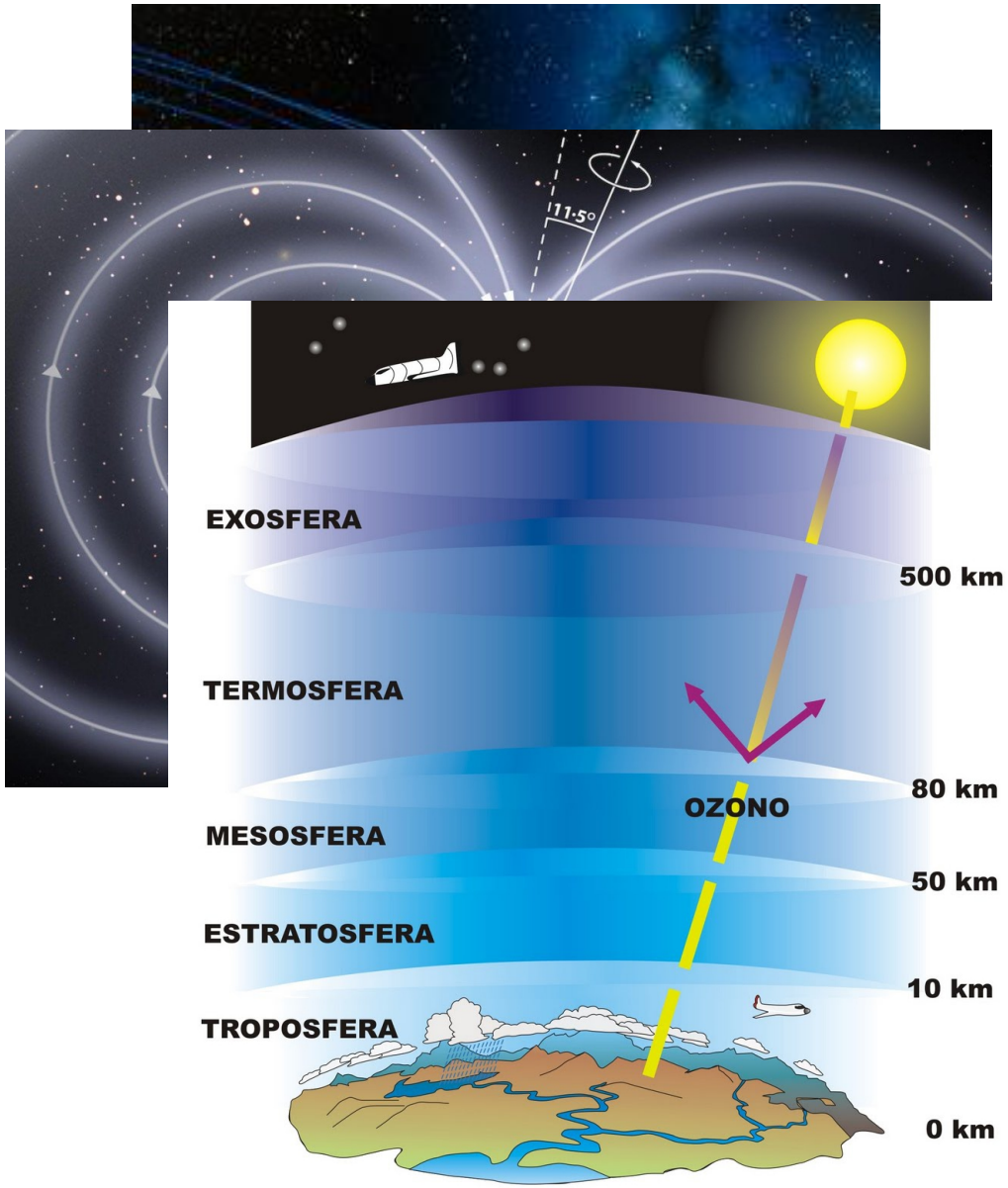


Cosa accade ai raggi cosmici viaggiando verso la Terra?

1. Vagano nello spazio interplanetario ed entrano nel sistema solare dove possono interagire con l'atmosfera solare

1. Si avvicinano alla Terra ma trovano il campo magnetico che li devia dalla loro traiettoria

1. Entrano nell'atmosfera terrestre dove interagiscono con gli atomi del gas (con produzione di nuove particelle)



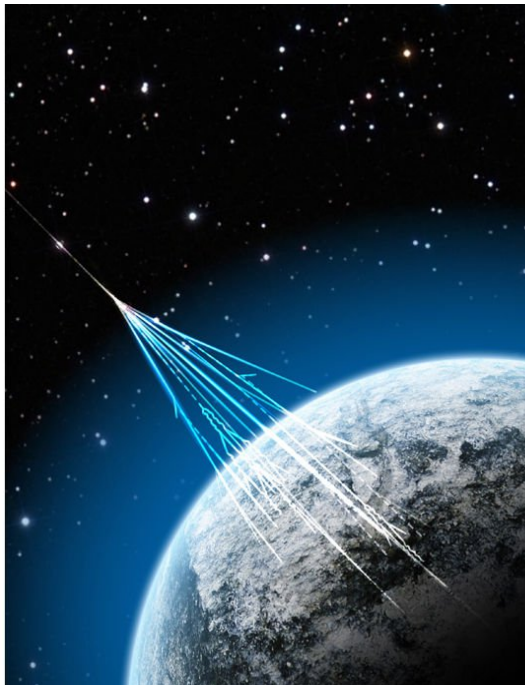
Cosa accade ai raggi cosmici viaggiando verso la Terra?

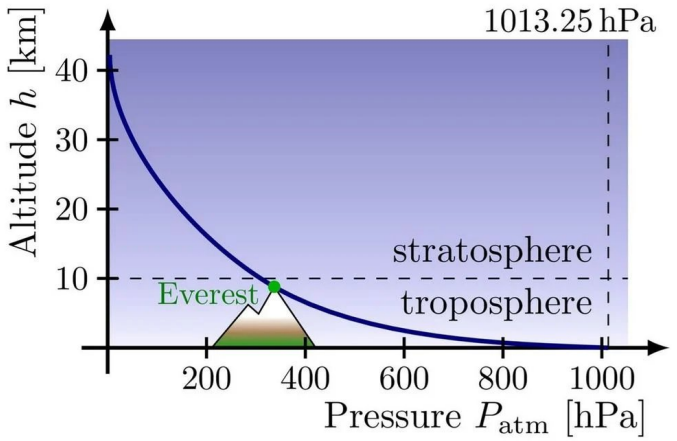
1. Vagano nello spazio interplanetario ed entrano nel sistema solare dove possono interagire con l'atmosfera solare

1. Si avvicinano alla Terra ma trovano il campo magnetico che li devia dalla loro traiettoria

1. Entrano nell'atmosfera terrestre dove interagiscono con gli atomi del gas (con produzione di nuove particelle)

1. Arrivano sulla superficie dove si arrestano nella materia densa della crosta

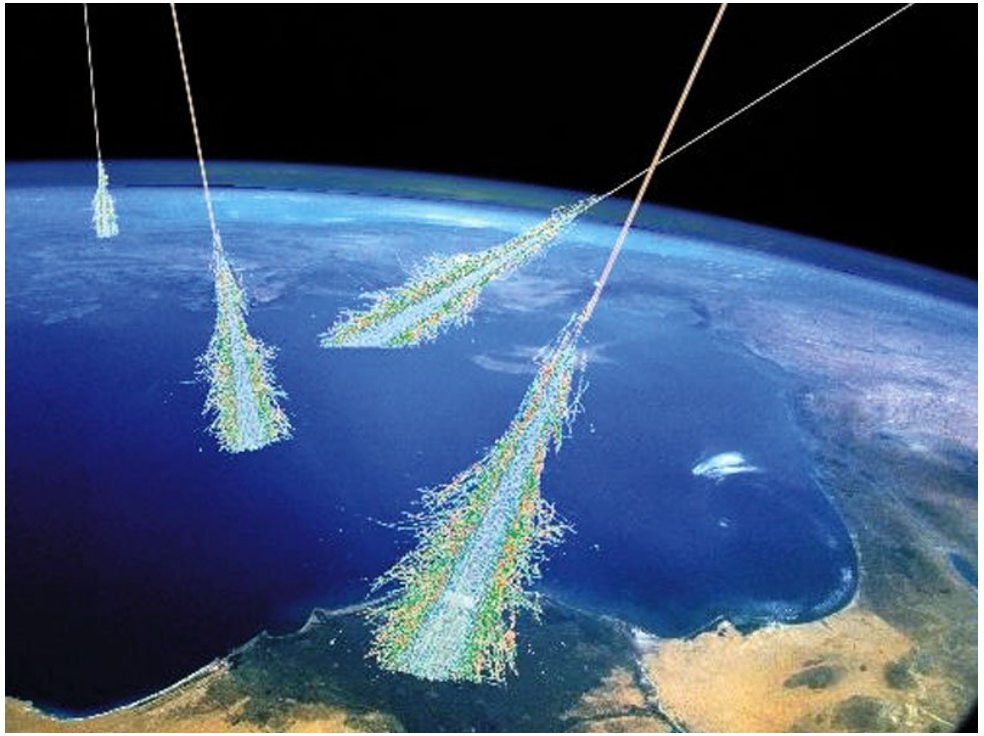




Quando un raggio cosmico interagisce con una particella (dell'atmosfera) nascono altre particelle, dette **raggi cosmici secondari**.

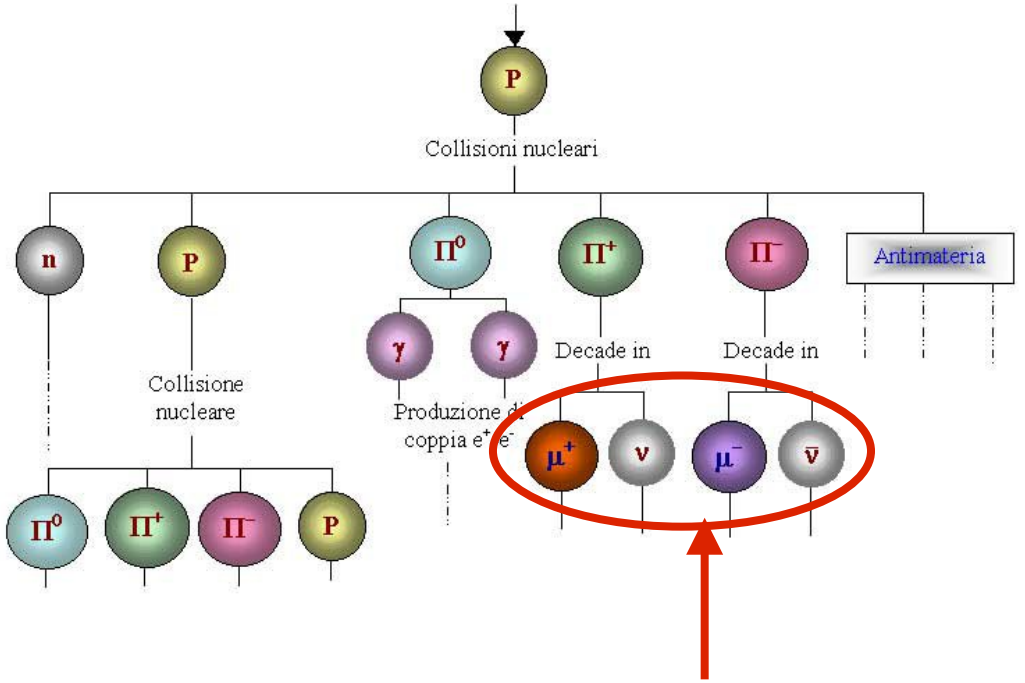
Se l'energia del primario è sufficiente e la densità dell'atmosfera è abbastanza alta si genera uno sciame di particelle.

Questo fenomeno avviene tipicamente alla fine della troposfera (**tropopausa**), a circa 10 km di quota.



Lo sciame è composto da varie particelle: neutroni, protoni, pioni, muoni, elettroni, neutrini …

Molte di queste sono instabili e decadono spontaneamente percorrendo pochi metri



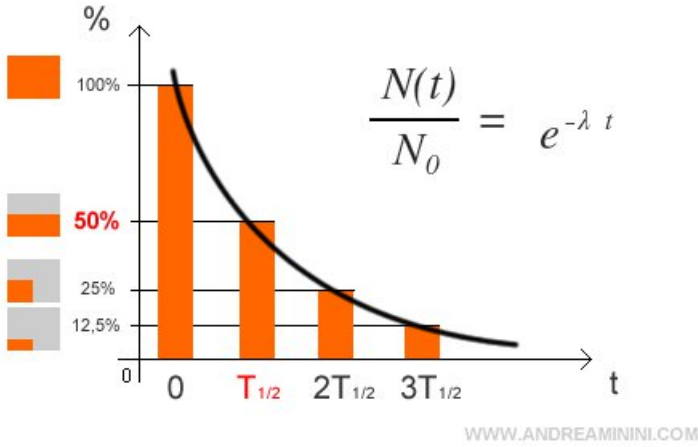
La maggior parte dei raggi cosmici che possiamo vedere sulla superficie terrestre sono i secondari più penetranti (i **muoni**).

Il **muone**: è della stessa famiglia degli elettroni (i leptoni) ma è 200 volte più pesante ed è instabile

La sua **vita media** è di 2.2 μs, sufficienti per percorrere 660 metri (probabilità di arrivare al suolo 1/10’000’000)

Ma la velocità alla quale viaggiano i raggi cosmici è prossima a quella della luce, quindi dal nostro punto di vista **il loro tempo sembrerà dilatarsi** (è l’effetto della relatività ristretta)

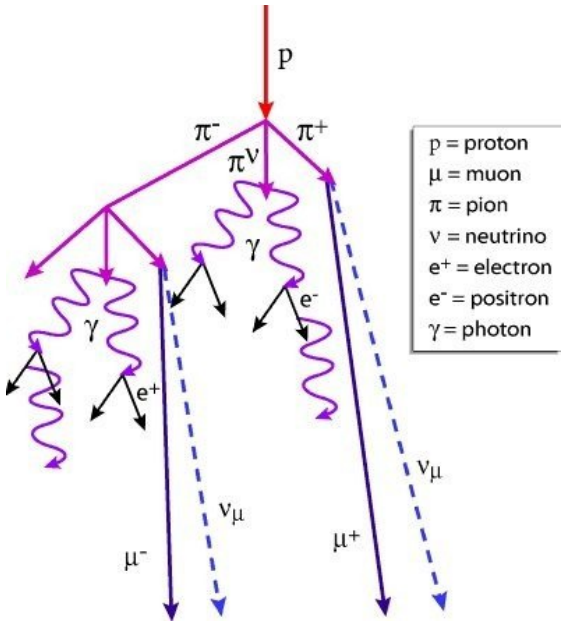
Per effetto della relatività la loro vita media sarà 64 μs riuscendo a raggiungere la superficie in una percentuale di circa 60 %

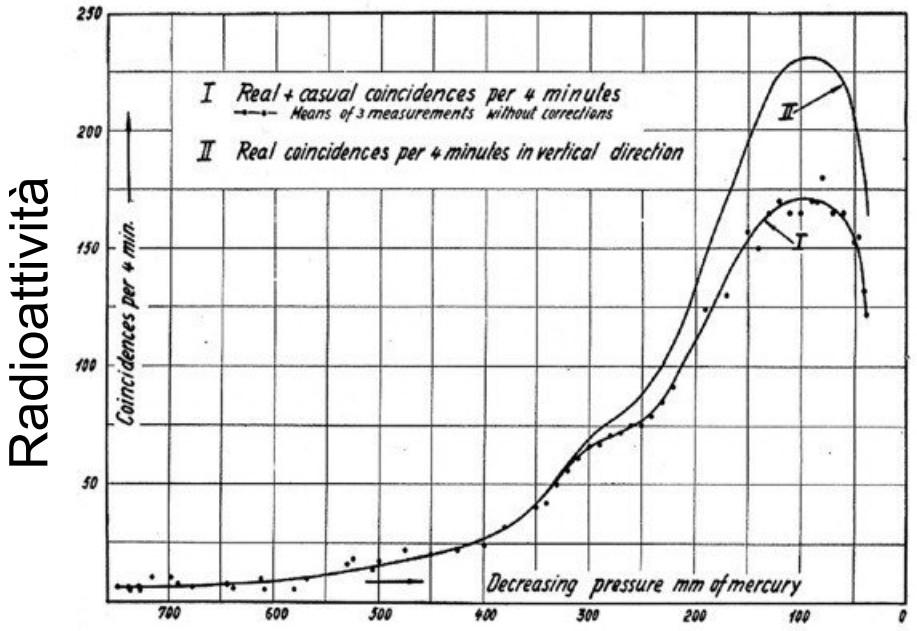


Per vedere dei dettagli sui calcoli della dilatazione temporale provate a guardare qui:
https://web.infn.it/OCRA/i-muoni/

I Muoni sono particelle instabili, quindi il loro flusso si ridurrà all'aumentare della distanza dalla loro origine.

Questo ci dice qualcosa sui dati raccolti da Hess nel 1912





Radioattività

Pressione (quota)

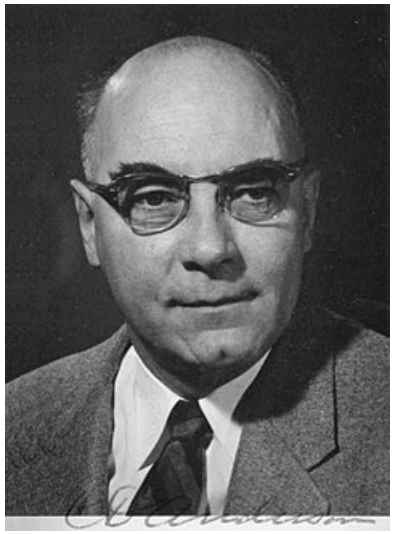
La storia continua

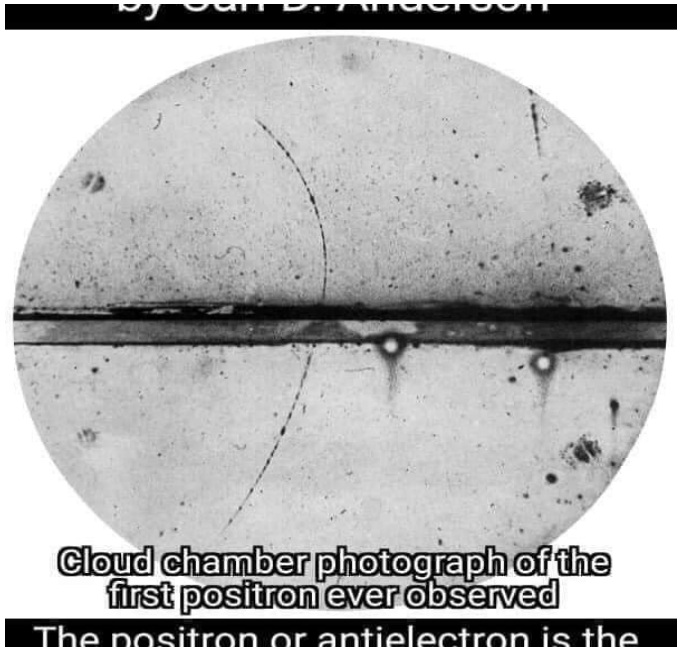
All’interno del dibattito per comprendere l’origine dei raggi cosmici si effettuano ulteriori indagini:

- Che cosa compone i RC?
- Come variano i RC con la latitudine?
- Come variano nell’alternarsi del giorno e della notte?
- Come con le stagioni?

Usando una camera di Wilson, **nel 1932/33, Carl David Anderson scoprì l'esistenza dell'antielettrone.**
Prima antiparticella scoperta
In pratica si individua la traiettoria della particella all'interno di un campo magnetico e la si fa interagire con strati di materiale come il Pb per determinare quanta energia possiede e qual è la sua massa.
A questo punto si comprese che anche la natura dei raggi cosmici era poco nota.
Erano formati di raggi gamma? Di elettroni? Di positroni?

Anche la materia si componeva di nuove particelle.





Nel 1933 **Johnson scoprì che i raggi cosmici provengono principalmente da Ovest**.

Questo fatto, unito alle indagini sulla magnetosfera, permisero di dedurre che i raggi cosmici devono essere principalmente di carica positiva.

Un contributo fondamentale a questa scoperta la diede Bruno Rossi che inventò il primo circuito a coincidenza e così il primo telescopio per muoni.

The Azimuthal Asymmetry of the Cosmic Radiation

The theory of the motion of electrically charged particles in the magnetic field of the earth has been developed by Störmer[1] to account for auroral phenomena, and by Lemaitre and Vallarta[2] to explain the latitudinal variation[3, 4] of the intensity of the cosmic radiation. The theory predicts that rays from infinity of energy V volts will strike the surface of the earth at latitude λ only from those angles θ from the meridian plane for which

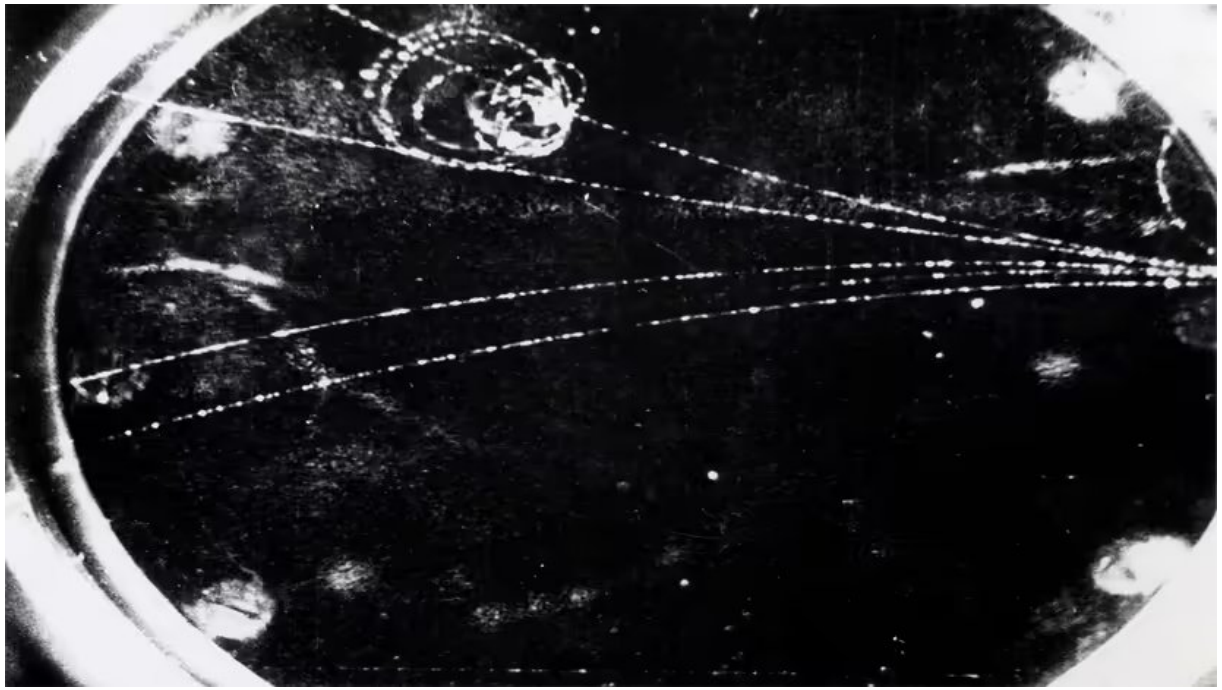
$$\sin\theta > k^2\cos\lambda/R^2 - 2k/R\cos\lambda \qquad (1)$$

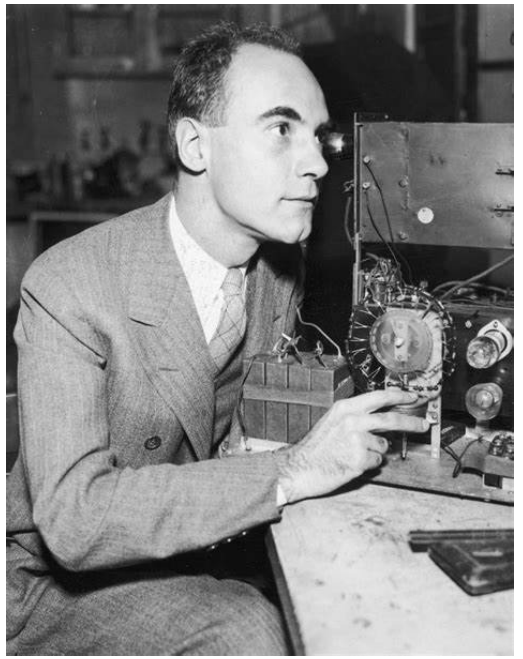
TABLE I.

Angle from vert.		Total time T (min.)	Total counts C	Counting rate C/T	Number of data n	Probable error from residuals	Probable error from number of counts	West-East difference
Set A 35°	East	698	5195	7.44	14	0.063	0.069	0.47 ± 0.097
Run 1	West	922	7299	7.91	14	0.059	0.063	$=6.3\%\pm1.3\%$ of E

Negli anni ‘40 si ebbe la conferma del primato della carica positiva nei raggi cosmici grazie ad esperimenti con palloni aerostatici in grado di indagare i raggi cosmici primari.

Nel 1936 Carl David Anderson e il suo studente Seth Neddermeyer scoprirono l’esistenza del muone





Nel 1937 Compton e Turner scoprono che **il flusso dei raggi cosmici varia con la stagione**. In estate il flusso diminuisce.

OCTOBER 15, 1937 PHYSICAL REVIEW VOLUME 52

Cosmic Rays on the Pacific Ocean

A. H. COMPTON
University of Chicago, Chicago, Illinois

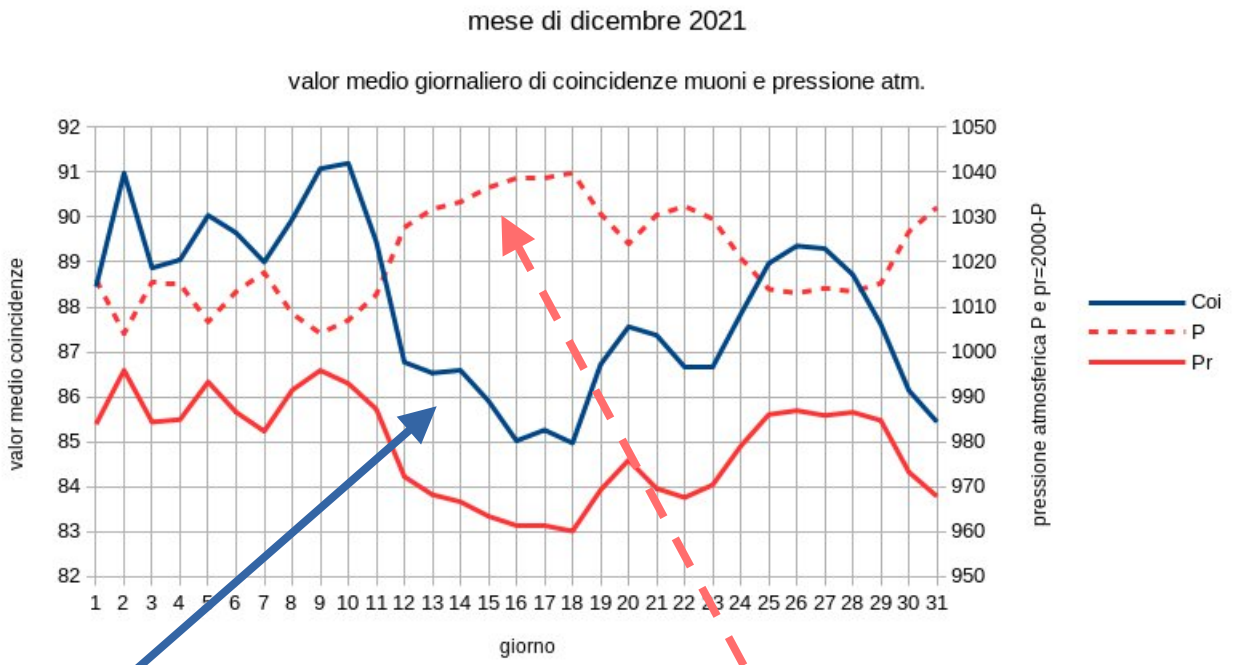
AND

R. N. TURNER
Canadian Australasian Steamship Company

(Received August 30, 1937)

Records of cosmic-ray intensity obtained on the R. M. S. Aorangi during 12 voyages between Vancouver, Canada and Sydney, Australia, from March 17, 1936, to January 18, 1937, using a Carnegie model C cosmic-ray meter, are described and discussed. Typical records exhibiting the latitude effect are shown. A summary of the data taken at sea is given in the form of graphs, in which each datum point represents the average of 6 hours readings with a probable statistical error of ±0.13 percent. Any variations due to a possible temperature coefficient of the instrument are negligible. The observed minimum of cosmic-ray intensity near the equator averages 10.3 percent less than the intensity at Vancouver, in satisfactory agreement, considering the difference in experimental conditions, with earlier measurements. The critical latitudes above which changes in intensity are less rapid, are found to be somewhat lower, 38.4°N and 34.2°S, than previously reported, temperature coefficient and correcting the observations accordingly (this external temperature coefficient is comparable with that reported by Hess and his collaborators). The latitude effect curves as thus corrected should show the effect of the earth's magnetic field alone. They are now nearly flat beyond the critical latitudes and show a magnetic latitude effect of about 7.2 percent. This implies that a latitude effect of about 3.1 percent owes its origin to the atmospheric barrier. Seasonal variations in the corrected latitude effect curve are almost eliminated. Geomagnetic analysis of the energy distribution of the rays indicates a prominent component with a sharp energy threshold of about 7.5×10^9 ev, and a component so weak as to be questionable, whose energy threshold is not greater than 2.5×10^9 ev. It is not found possible to explain the 7.5×10^9 ev threshold in terms of atmospheric absorption as has previously been supposed. Two alternative

Il flusso di muoni dipende dalla pressione atmosferica



Diminuzione del flusso di muoni

Aumento della pressione

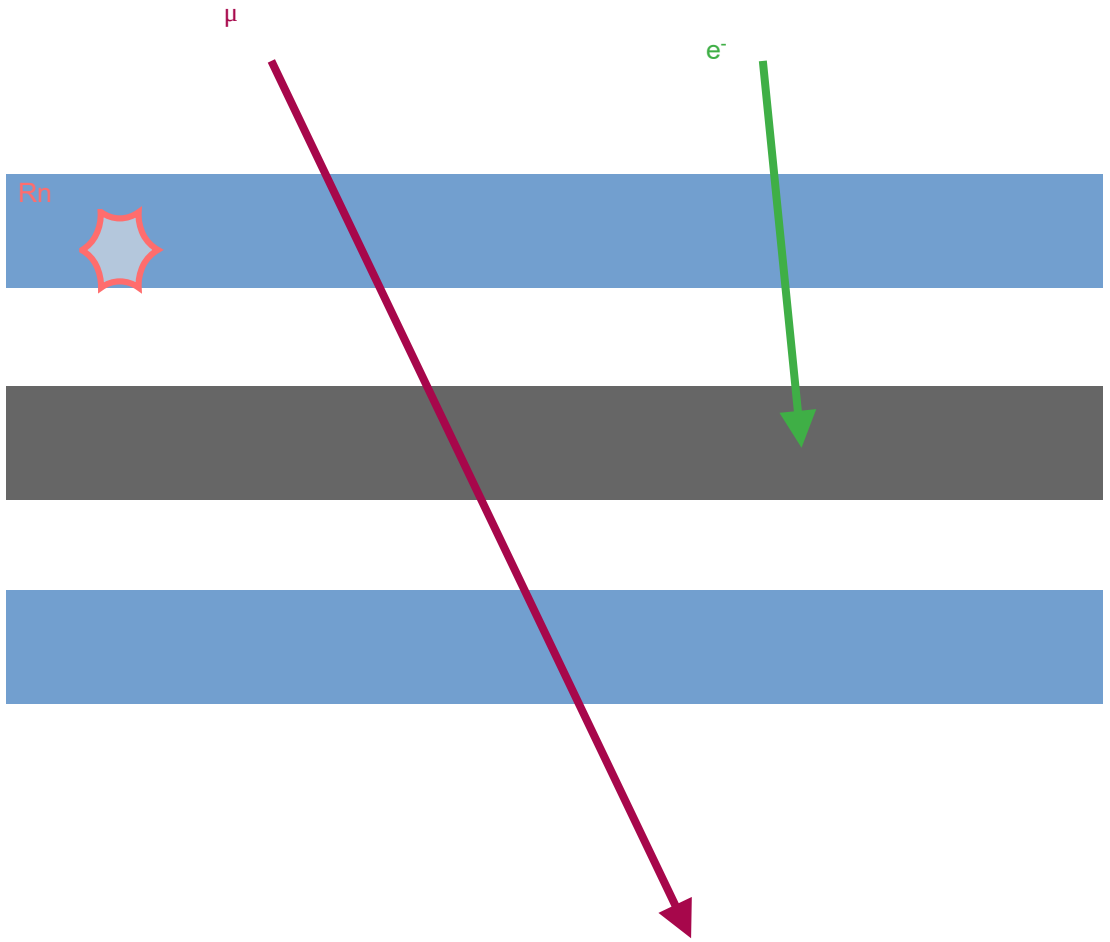
L'aumento della pressione aumenta l'assorbimento dei muoni nell'atmosfera ed allontana dal suolo il loro punto di produzione

La tecnica delle coincidenze per la misura del flusso di Muoni

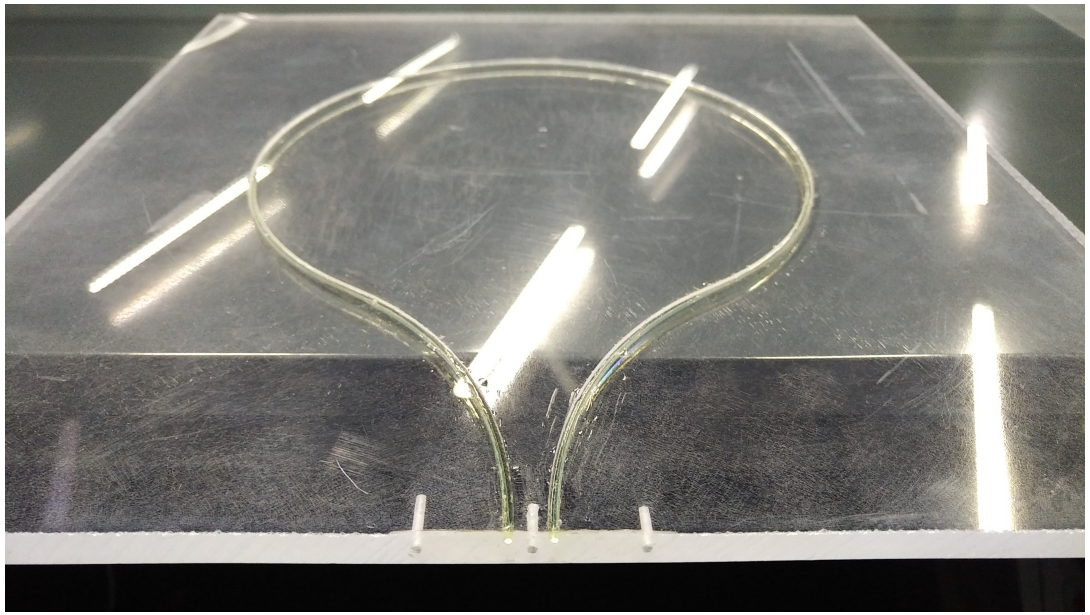
Il modo più efficace di misurare il flusso dei muoni è di sfruttare la loro caratteristica di essere penetranti.

Per fare ciò si possono usare due rivelatori in sequenza e schermati, se un evento avviene in entrambi allora la particella che l'ha generato deve essere passata attraverso entrambi.

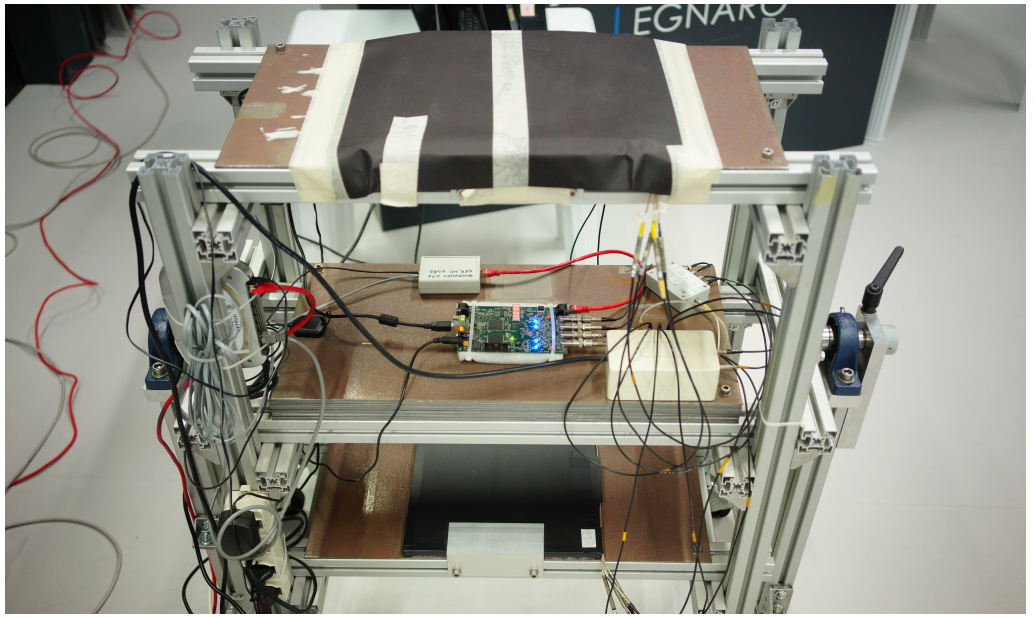
I rivelatori possono essere dei contatori Geiger o, come nel nostro caso, degli scintillatori.



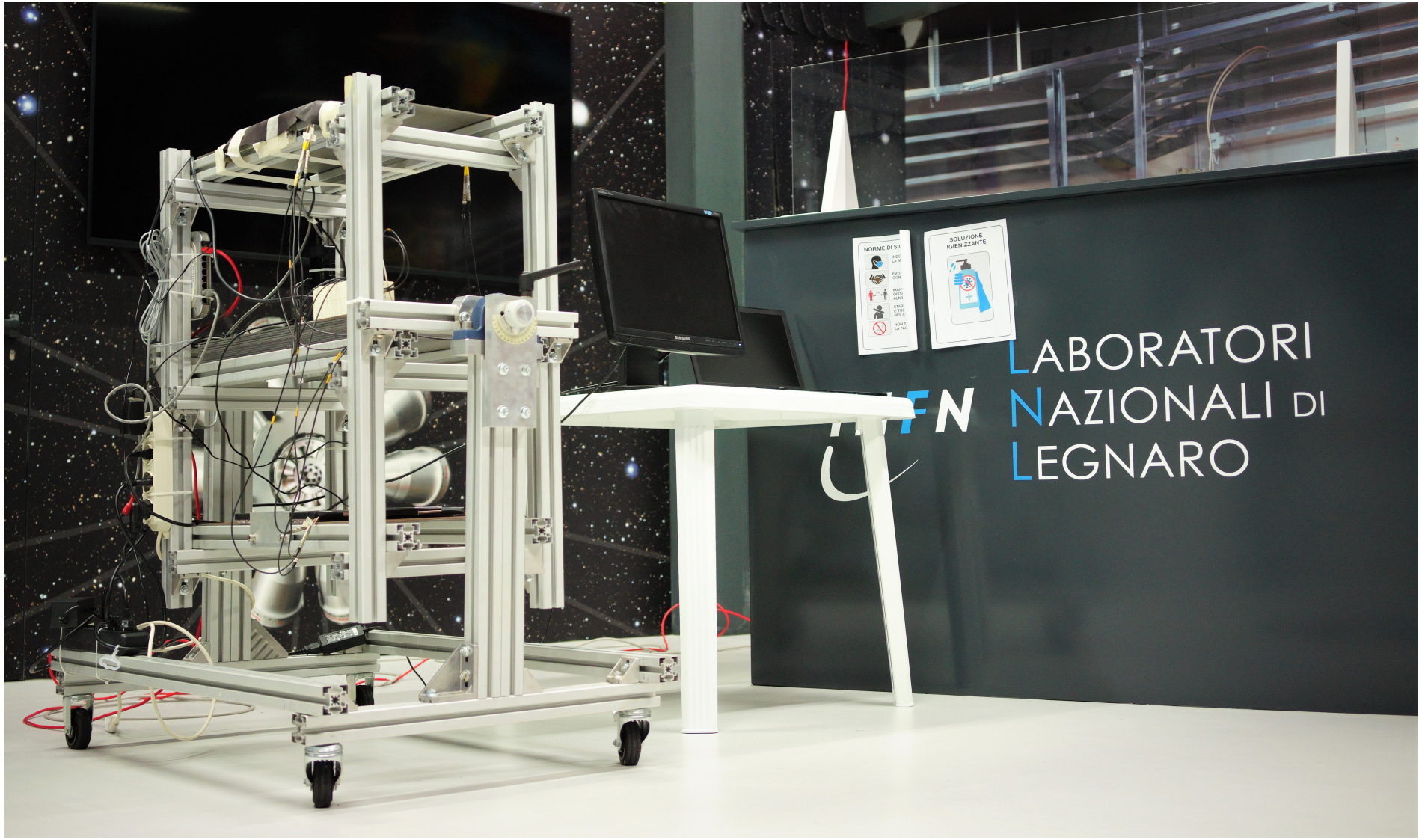
Scintillatore

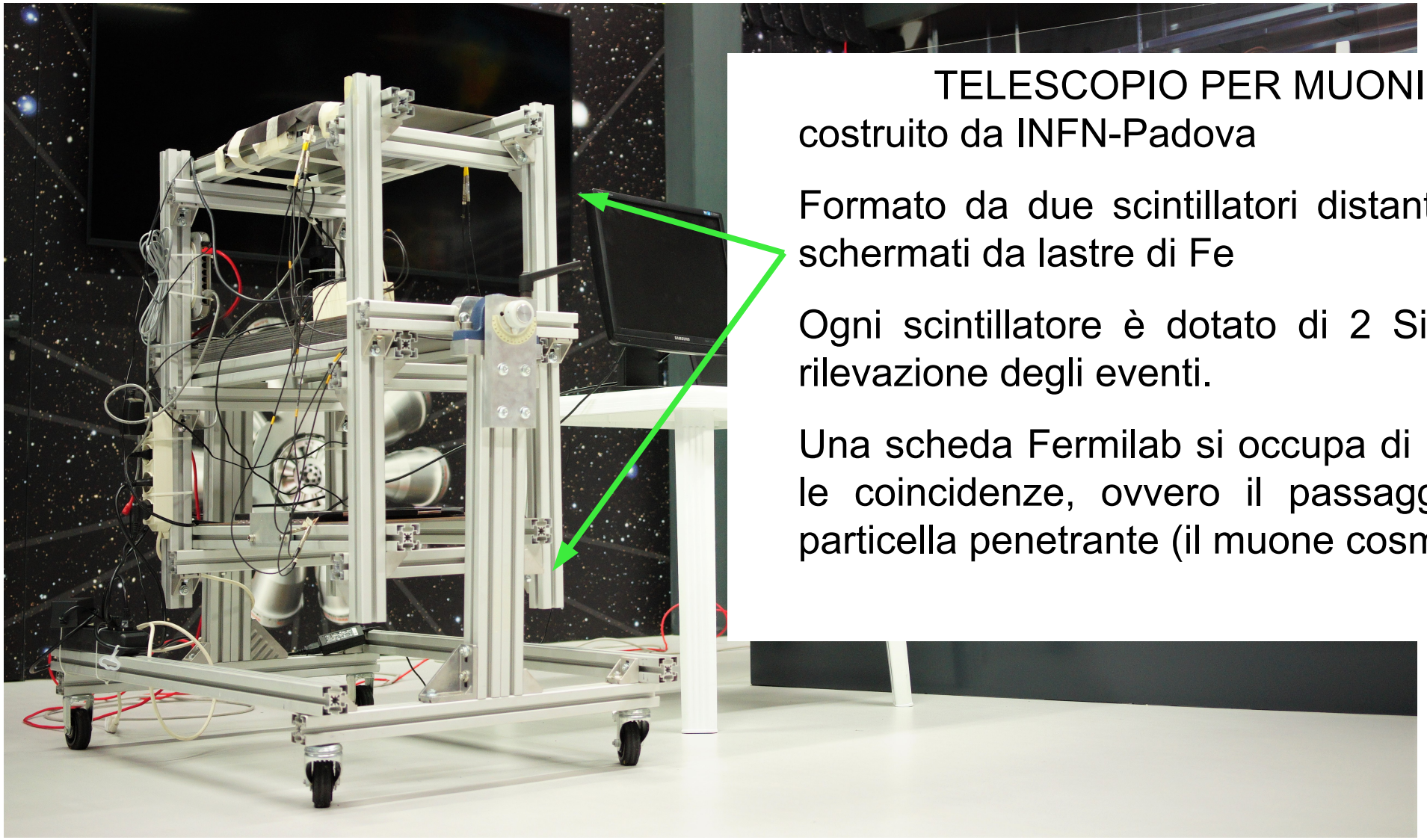


Configurazione
a telescopio



L’apparato di misura ai LNL


NORME DI SI
SOLUZIONE IGIENIZZANTE
LABORATORI
NAZIONALI DI
LEGNARO

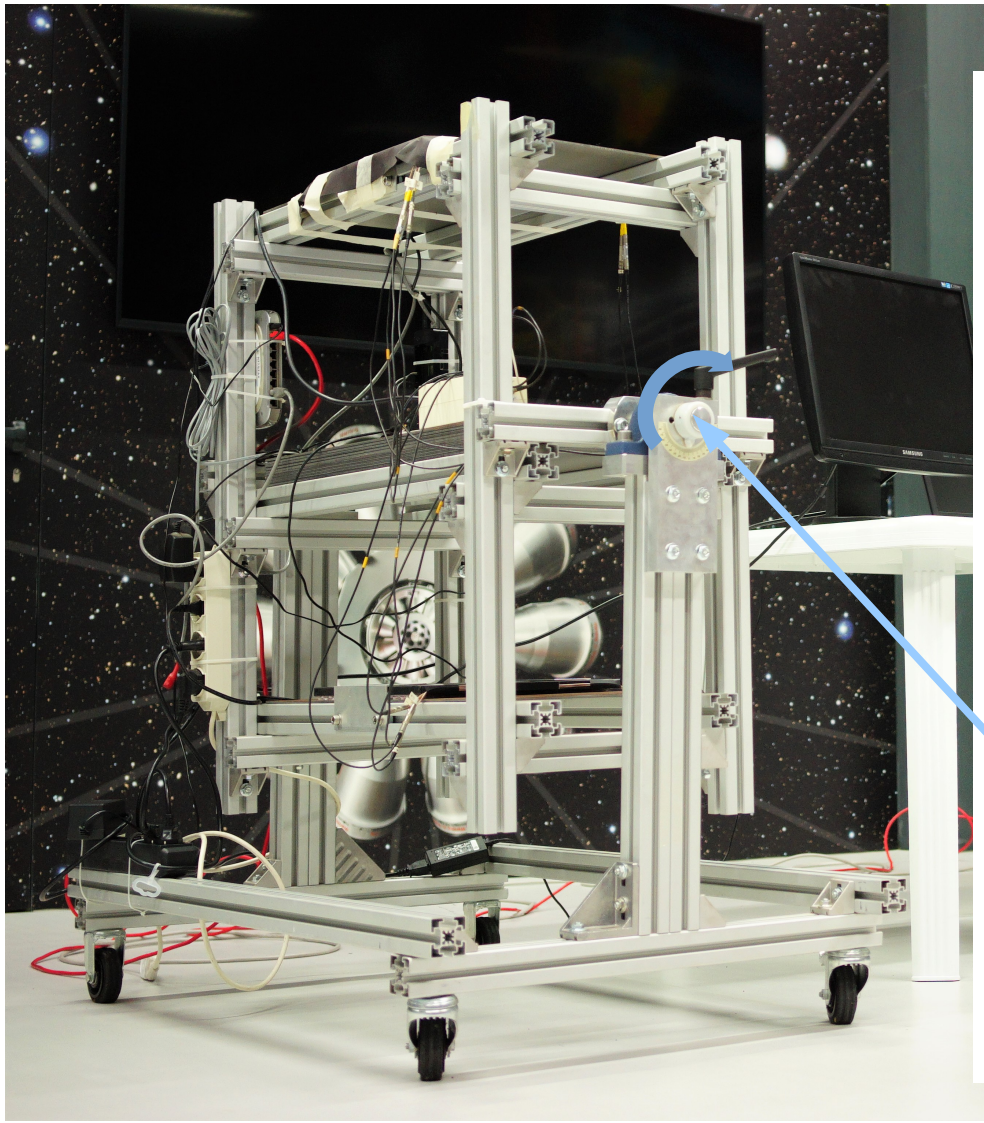


TELESCOPIO PER MUONI
costruito da INFN-Padova

Formato da due scintillatori distanti 72 cm e schermati da lastre di Fe

Ogni scintillatore è dotato di 2 SiPM per la rilevazione degli eventi.

Una scheda Fermilab si occupa di individuare le coincidenze, ovvero il passaggio di una particella penetrante (il muone cosmico)



TELESCOPIO PER MUONI

costruito da INFN-Padova

Formato da due scintillatori distanti 72 cm e schermati da lastre di Fe

Ogni scintillatore è dotato di 2 SiPM per la rilevazione degli eventi.

Una scheda Fermilab si occupa di individuare le coincidenze, ovvero il passaggio di una particella penetrante (il muone cosmico)

Inclinabile zenitalmente

Ha inoltre un sensore per la misura della pressione atmosferica

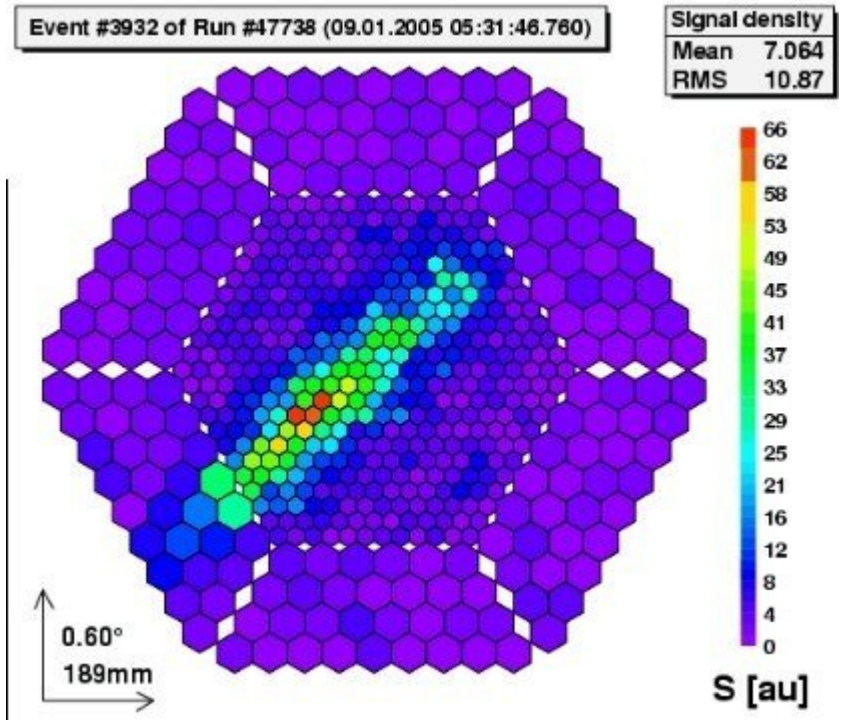
Andremo a vedere cosa accade orientando il telescopio con varie inclinazioni.
Quale dipendenza ci sarà con l'angolo di Zenit?

Importanti esperimenti attuali

Telescopi Cherenkov

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

Es: MAGIC/CTA
isole Canarie Altitudine 2200 metri



https://www.to.infn.it/attivita-scientifica/fisica-astroparticellare/cta-e-magic/

Osservatorio Pierre Auger, Argentina

Altitudine ~1400 metri

Osserva contemporaneamente l'impronta luminosa dello sciame e le particelle che arrivano a terra.

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

I flussi sono bassi ($1/(yr\ km^2)$) quindi servono grandi superfici (3000 km^2)

← Le camere per il segnale luminoso

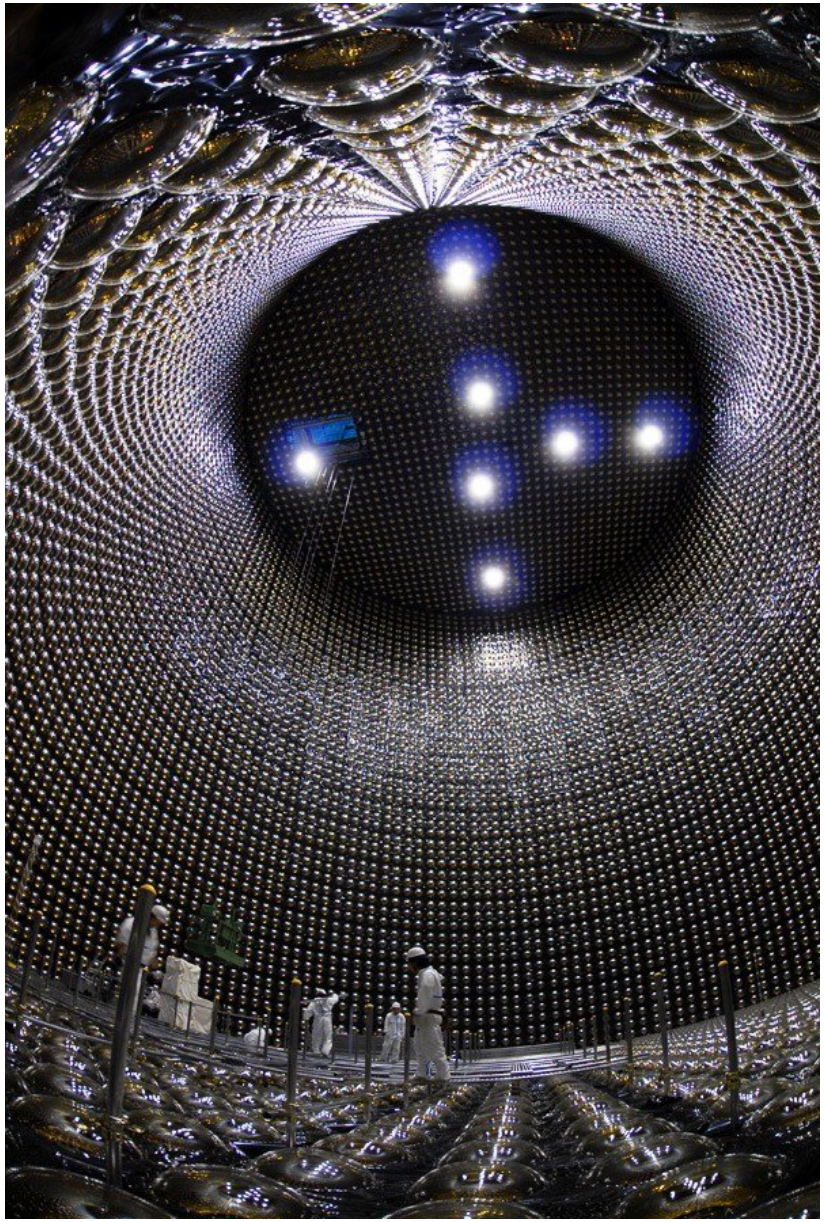
Le taniche per osservare le particelle secondarie → (1600 camere su 3000km^2)

Nel 1998, il rivelatore **Super-K** in Giappone osserva l'oscillazione fra i tipi diversi di **neutrini provenienti dal sole**, un risultato che richiede una massa diversa da zero

Contenitore con 50'000 tonnellate di acqua, 1'129 sensori di luce per osservare i fotoni prodotti quando un neutrino interagisce con elettroni o nuclei dell'acqua.
Posizionato 1'000 metri sottoterra in una miniera.

Nonostante la mole ottiene circa ~40 eventi al giorno (da un flusso di 3 milioni per cm^2 al secondo dal Sole)

NB: posso usare la stessa Terra come scudo e osservare le particelle arrivare dal basso

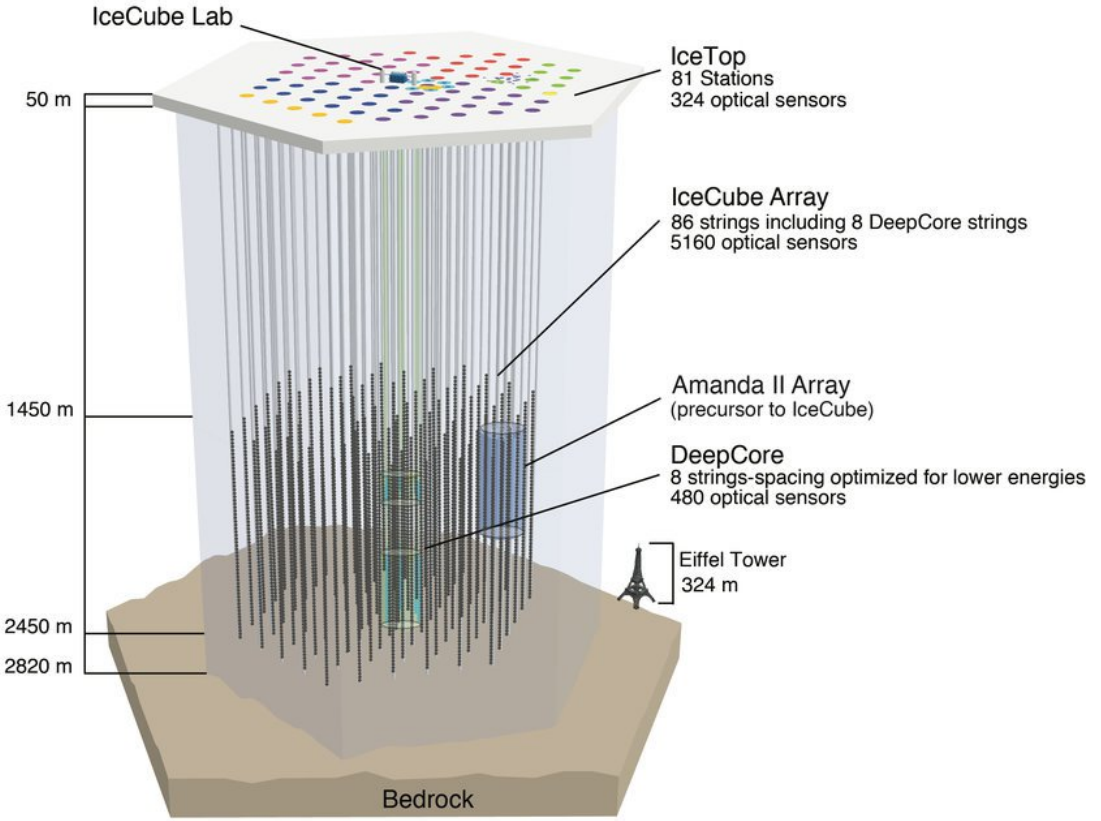


IceCube

Sfruttando l'effetto Cherenkov nel ghiaccio rileva i neutrini ad alta energia.

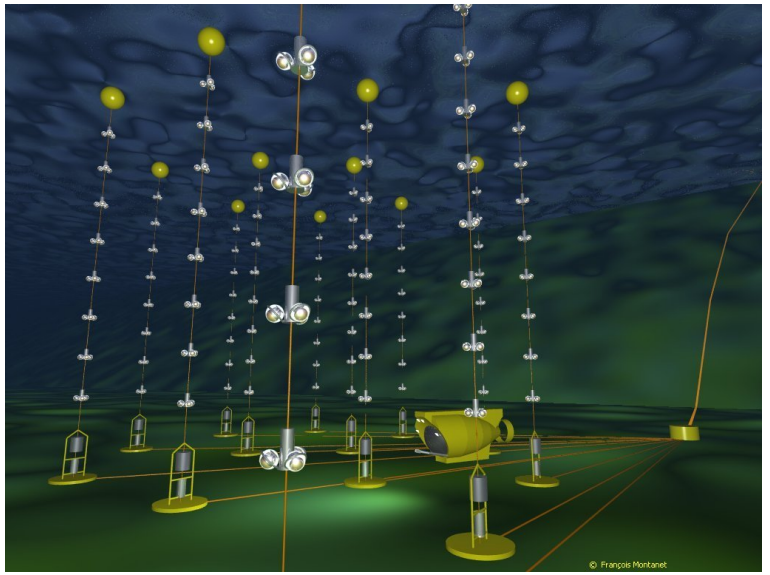
$$\nu \rightarrow e+ / \mu+ / \tau+$$

Se l'energia è sufficientemente alta i prodotti creeranno il bagliore Cherenkov



Antares

Simile a IceCube, sfrutta l'acqua marina. Posizionato al largo delle coste di Tulon

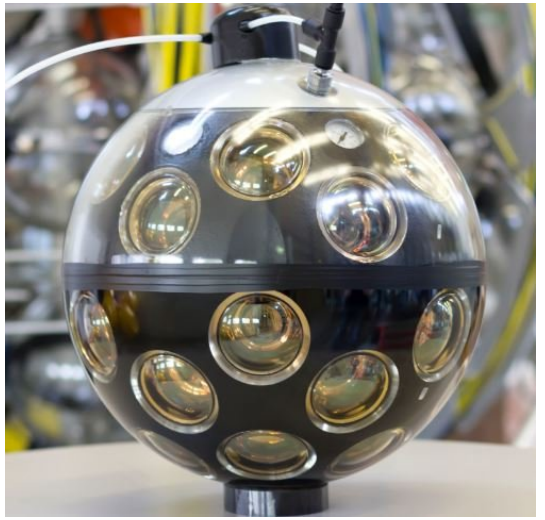


KM3NeT

Simile ad Antares, è posizionato vicino a capo Passero, Sicilia

Nestor

Posizionato a Pylos, in Grecia



INFN-LNL: progetto MUTOMCA

Tomografia fatta coi muoni per ottenere una mappa 3D della densità del combustibile esausto nelle centrali nucleari.

Il progetto è frutto di una collaborazione internazionale tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italia), il Centro Ricerche Jülich (Germania), il gestore dei depositi di contenitori BGZ (Germania) e la Comunità Europea della Energia Atomica (EURATOM).

Un gruppo di ricercatori e ricercatrici dell'Università di Napoli Federico II e dell'INFN, in collaborazione con l'Università di Nagoya, ha utilizzato la **radiografia muonica** per ispezionare la presenza di possibili cavità nel sottosuolo del rione Sanità di Napoli e ha individuato la presenza di una camera funeraria sotterranea definendone la posizione tridimensionale.

Fine