



# RAGGI COSMICI

*“On what che we now place our hopes of solving the many riddles which still exist as to the origin and the composition of cosmic rays?”*

*Victor Francis Hess*

**Bernasconi Costanza | Classe 5<sup>E</sup> | 11 Maggio 2020**

## Sommario

Premessa: cosa sono i Raggi Cosmici .....	3
Storia della scoperta dei Raggi Cosmici .....	3
Composizione e caratteristiche dei Raggi Cosmici.....	6
RAGGI COSMICI PRIMARI .....	6
RAGGI COSMICI SECONDARI .....	7
IL MUONE.....	9
L'origine dei Raggi Cosmici .....	10
SOLE .....	10
SUPERNOVAE.....	11
QUAZAR.....	14
PULSAR .....	14
Missioni nello spazio: alla ricerca dei Raggi Cosmici .....	14
AMS-02 Detector.....	15
PAMELA .....	16
Energia dei Raggi Cosmici .....	18
OSSERVATORIO PIERRE AUGER .....	19
Applicazione dei Raggi Cosmici: tomografia a muoni .....	21
Esperimento: rilevamento di Raggi Cosmici.....	22
Sitografia .....	27

## Premessa: cosa sono i Raggi Cosmici

I Raggi Cosmici sono particelle e nuclei atomici di alta energia che, muovendosi quasi alla velocità della luce, colpiscono la Terra da ogni direzione. Come dice il nome stesso, provengono dal Cosmo, cioè dallo spazio che ci circonda. La loro origine è sia galattica che extragalattica.

## Storia della scoperta dei Raggi Cosmici

La storia della scoperta dei Raggi Cosmici inizia nel **1785**, quando **Carl Augustin Coulomb** scoprì che un elettroscopio, dopo essere stato caricato elettricamente, non manteneva indefinitamente la carica posta sulle sue foglie d'oro. Questo fenomeno poteva essere spiegato solamente ipotizzando che non tutte le particelle di gas che riempivano l'aria circostante fossero elettricamente neutre, ma che alcune di esse fossero ionizzate e avessero carica positiva o negativa: doveva quindi esistere una radiazione ignota altamente penetrante nell'aria, in grado di scaricare la carica.

Stabilita la causa del fenomeno questo venne inizialmente attribuito alla radioattività e in particolare all'effetto di radiazioni provenienti da sostanze radioattive presenti nella crosta terrestre, da poco scoperte grazie ai lavori di Becquerel e dei coniugi Marie e Pierre Curie. Grazie al loro elevato potere penetrante, queste erano le uniche particelle in grado di ionizzare l'aria. Questa ipotesi, tuttavia, venne contraddetta ben presto con i primi esperimenti condotti ad alta quota.

Infatti si giunse alla conclusione che la quantità di radioattività necessaria a spiegare il tasso di scarica degli elettroscopi sembrava superiore a quella naturale; inoltre sembrava che la scarica degli elettroscopi fosse più veloce ad alta quota rispetto agli elettroscopi posti sulla superficie terrestre.

L'italiano **Domenico Pacini** (1878-1934) espose l'origine terrestre delle radiazioni cosmiche studiandole nelle acque marine di Livorno e in quelle del lago di Bracciano nel **1911**: egli decise di porre su di una nave degli elettroscopi carichi e li fece calare in mare; in questo modo andò a misurare il tempo necessario agli elettroscopi per potersi scaricare in funzione della profondità. Pacini riscontrò una diminuzione dell'intensità dei Raggi Cosmici all'aumentare della profondità.

Successivamente dall'aprile all'agosto del 1912 il fisico **Victor Franz Hess** ebbe l'opportunità di effettuare sette ascensioni portando a bordo tre diversi strumenti di misura della radioattività (racchiusi in contenitori con pareti metalliche di spessori differenti per stimare l'effetto della radiazione beta).

Nel volo finale, il **7 agosto del 1912**, Hess raggiunse i 5 200 metri a bordo della mongolfiera "Böhmen" durante un viaggio di sei ore da Aussig, nella Boemia settentrionale, a Pieskow, un villaggio a una sessantina di chilometri a est di Berlino.

I risultati mostrarono chiaramente che la ionizzazione, dopo essere passata per un minimo, aumentava considerevolmente con l'altezza. Hess trovò che:

1. immediatamente sopra al suolo la radiazione totale diminuisce leggermente;

2. a un'altitudine fra i 1 000 e i 2 000 metri avviene una leggera ricrescita della radiazione penetrante;
3. l'aumento raggiunge, a un'altitudine fra i 3 000 e i 4 000 metri, già il 50% della radiazione totale che si osserva al suolo;
4. tra i 4 000 e i 5 200 metri la radiazione è più forte di oltre il 100% che al suolo.

Hess concluse che l'aumento della ionizzazione con l'altezza deve dipendere dal fatto che la radiazione proviene dall'alto, che questa radiazione fosse di origine extraterrestre.

Victor Hess ricevette il premio Nobel per la sua scoperta nel 1936.

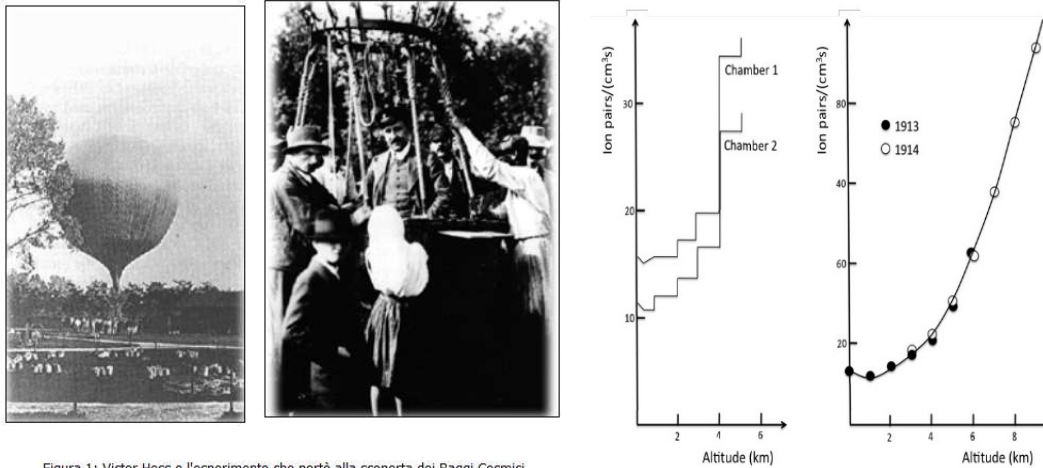


Figura 1: Victor Hess e l'esperimento che portò alla scoperta dei Raggi Cosmici.

In seguito nel **1920** il fisico **Robert Millikan**, famoso per aver dimostrato la quantizzazione della carica elettrica, attribuì a queste misteriose radiazioni il nome di “Raggi Cosmici”, poiché grazie agli esperimenti di Hess e Pacini si era compreso che queste misteriose radiazioni provenissero dal cosmo. Millikan fu anche il primo ad avanzare un'ipotesi sulla natura dei Raggi Cosmici. Egli ipotizzò che la radiazione cosmica fosse costituita da fotoni molto energetici, vale a dire raggi gamma, che venivano assorbiti dall'atmosfera interagendo mediante effetto Compton. In particolare, Millikan ipotizzò che tale fotone fosse originato da processi di fusione nucleare nel gas interstellare. Questa teoria però fu smentita nel 1925 da Arthur Compton che dimostrò che all'interno di un campo magnetico i Raggi Cosmici venivano deflessi; poiché solo una particella carica posta in un campo magnetico è in grado di subire la forza di Lorentz che va a deflettere le particelle cariche, questo stava a significare che i Raggi Cosmici dovevano essere dotati di una carica e di conseguenza non potevano essere fotoni, privi di carica.

Tutto ciò venne ulteriormente confermato nel **1929**, quando **Werner Kolhörster** e **Hans Bethe** utilizzarono il contatore Geiger di recente invenzione per dimostrare che la radiazione cosmica era carica elettricamente e, quindi, era di tipo corpuscolare.

Un notevole impulso allo studio dei Raggi Cosmici fu dato negli **anni trenta** dall'inglese **Patrick Blackett** e dall'italiano **Giuseppe Occhialini**; essi dimostrarono mediante camera a nebbia che le particelle cosmiche sono in grado di generare sciami di particelle secondarie, e cioè che in alcuni casi esse si diramano in più segmenti, ognuno dei quali è associato alla formazione di una nuova particella. Questi esperimenti fecero ipotizzare

che le interazioni dovessero avvenire anche negli strati più esterni dell'atmosfera e che, in realtà, dovessero esistere due tipi di radiazione cosmica: una di tipo primario e una di tipo secondario.

Nello stesso periodo, l'americano **Carl Anderson** ripeté le misure di Blackett e Occhialini, ma ponendo una camera a nebbia in un campo magnetico molto intenso e osservando le tracce lasciate dagli sciami ed osservò che non sempre le tracce risultavano curvate nella stessa direzione, arrivando alla conclusione che le particelle dovevano essere cariche sia positivamente che negativamente. Ricavando dalla traccia la misura del raggio di curvatura di tali particelle e, dalla sua consistenza, il loro potere ionizzante, Anderson fu in grado di risalire alla loro massa, la quale risultò essere uguale a quella dell'elettrone. Esistevano quindi delle particelle aventi la stessa massa dell'elettrone ma carica opposta ad essi, le quali presero il nome di positroni. Si giunse quindi alla conferma sperimentale dell'esistenza di antiparticelle, fino ad allora solo postulata da Dirac.

Fu proprio durante lo studio dei Raggi Cosmici prima dell'arrivo degli acceleratori di particelle negli anni '50, che vennero scoperti non solo l'antimateria, ma anche il muone (da parte di Anderson e Neddermeyer), i mesoni  $\pi$  (predetti da Yukawa nel 1936) e vennero osservati per la prima volta anche i decadimenti di particelle dotate di stranezza (K,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$  e  $\Xi$ ).

Nel **1931** il fisico **Bruno Rossi** si accorse che, se la carica delle particelle era positiva, esse dovevano provenire in maniera preferenziale da ovest.

In seguito nel **1940**, **Enrico Fermi** fornì un'ipotesi sull'origine dei Raggi Cosmici che si rivelò profetica: egli ipotizzò che i Raggi Cosmici provenissero dall'esplosione di supernovae e propose un possibile meccanismo di accelerazione dei Raggi Cosmici dai resti di una supernova, rimasto il modello principale per la spiegazione dell'emissione, oggi conosciuto con il nome di *Meccanismo di Fermi*.

L'astrofisico sovietico **Nikolaj Aleksandrovič Kozyrev**, isolato dalla Cortina di Ferro della San Pietroburgo degli anni '60 e perciò ignaro di molte scoperte scientifiche "occidentali" sulla meccanica quantistica e sulla fisica delle particelle, si dedicò **dal 1959** fino alla morte all'investigazione, teorica e sperimentale, di raggi di natura cosmica provenienti dalle stelle

Nel **1960** il fisico **Giuseppe Cocconi**, fu il primo ad ipotizzare che i Raggi Cosmici altamente energetici fossero di provenienza extragalattica, ipotesi poi confermata. Cocconi ipotizzò per primo che alcuni Raggi Cosmici hanno un'origine extra-galattica e che all'emissione di Raggi Cosmici carichi si accompagnasse l'emissione di raggi gamma, ipotesi che venne ben presto confermata. Attualmente infatti i raggi gamma vengono utilizzati come tracciatori dell'accelerazione cosmica di particelle.

## Composizione e caratteristiche dei Raggi Cosmici

### RAGGI COSMICI PRIMARI

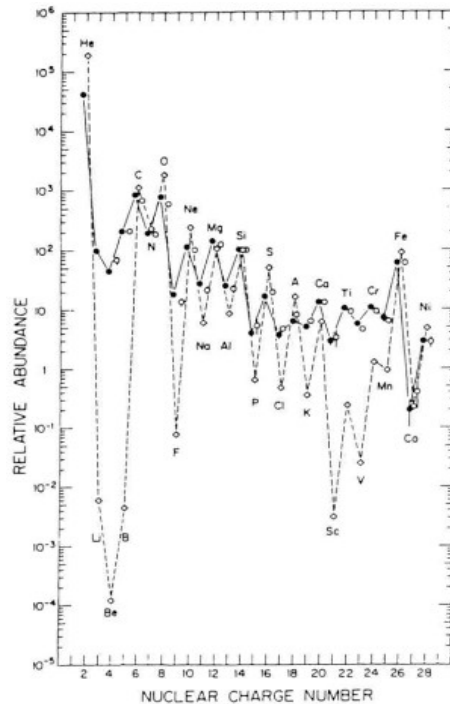
Al di là dell'atmosfera si trovano i Raggi Cosmici primari, raggi distribuiti uniformemente nello spazio e che incidono sugli strati più esterni dell'atmosfera, costituiti principalmente da protoni (86- 89%), nuclei di He (9%) e per il resto da nuclei più pesanti, elettroni, neutrini, fotoni e in minima parte da antimateria (positroni ed antiprotoni).

Non si è in grado di osservare i Raggi Cosmici primari poiché siamo schermati dall'atmosfera; Giunte nell'atmosfera terrestre, tali particelle interagiscono con i nuclei delle molecole dell'atmosfera, in particolare contro i nuclei di azoto, formando così, in un processo a cascata, nuove particelle proiettate in avanti, che prendono il nome di *Raggi Cosmici secondari*.

I Raggi Cosmici primari sono isotropi ovvero provengono uniformemente da tutte le parti dell'universo. A differenza della luce delle stelle, non isotropa e per le quali è possibile rilevare le coordinate, i Raggi Cosmici, costituiti per la maggior parte da protoni, particelle cariche elettricamente, attraversando la via lattea vengono continuamente deviati a causa del continuo scontrarsi con campi magnetici ed elettrici; per questo motivo non siamo in grado di rilevare informazioni sulla sorgente dei raggi.



La composizione e lo spettro in energia sono stati dettagliatamente studiati per la radiazione cosmica primaria. Il flusso relativo all'idrogeno è poco più del 90%, un po' meno del 10% per l'elio,  $7 \times 10^{-4}$  per gli elementi leggeri come litio, berillio e boro, e  $5 \times 10^{-3}$  per altri elementi dal carbonio al neon.



Attraverso esperimenti condotti su satelliti si sono potute indagare le caratteristiche dei Raggi Cosmici primari, in particolare la loro composizione. Dal confronto tra le abbondanze relative dei nuclei pesanti nei RC rispetto alle abbondanze relative nel sistema solare, si possono dedurre importanti indicazioni.

Nella figura si vede che in entrambi i casi si ha il tipico effetto pari-dispari dovuto al fatto che i nuclei con Z pari hanno un legame più forte e quindi sono più abbondanti. Invece gli elementi Li, Be, B, e Sc, Ti, V, Cr, Mn, sono vari ordini di grandezza più abbondanti nei RC che nel sistema solare. Questi elementi sono infatti praticamente 12 assenti nei prodotti dei processi di nucleosintesi stellare, mentre nei RC sono creati dalla spallazione dei più abbondanti nuclei di C e O (Li, Be, B), e di Fe (Sc, Ti, V, Cr, Mn) presenti nel mezzo interstellare (ISM). Questa spiegazione ha anche il pregio di fornire una indicazione sulla propagazione dei RC e sul loro confinamento nella nostra galassia.

### RAGGI COSMICI SECONDARI

Una volta entrato nell'atmosfera terrestre, un raggio cosmico primario percorre al massimo una distanza  $\lambda$  dell'ordine di una decina di km, prima di interagire con un nucleone dell'atmosfera. L'interazione dà inizio ad uno sciame di particelle secondarie, formato da  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ , etc. (componente dura) che poi decadono in  $\mu$  e  $\nu$ , e da pioni neutri che, decadendo, danno inizio ad uno sciame puramente elettromagnetico (componente molla).

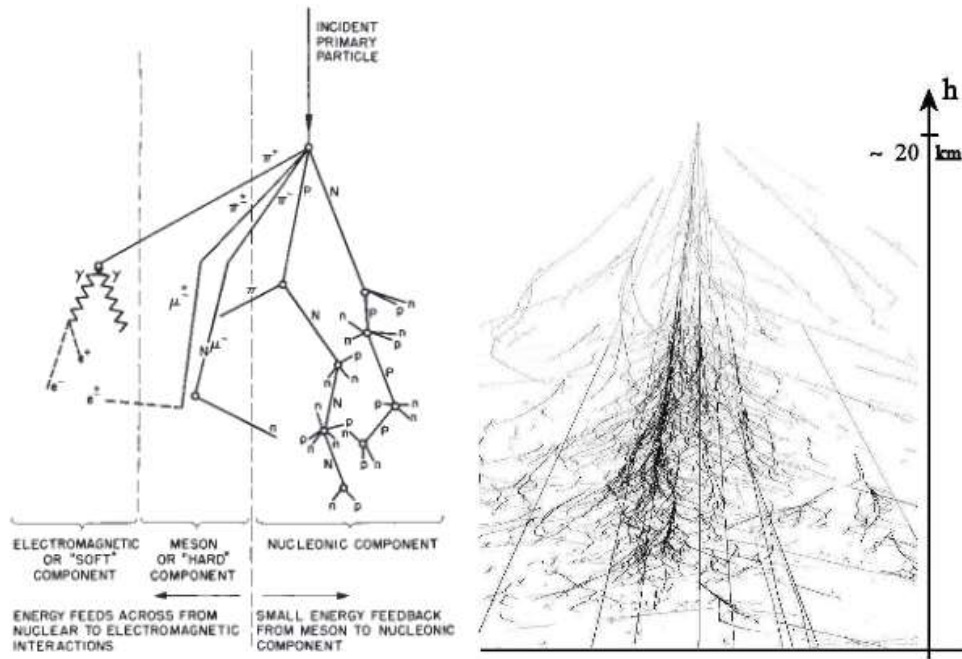


Figura 7 - Sviluppo di uno sciame atmosferico prodotto da raggi cosmici [4] (a sinistra), e simulazione di uno sciame indotto da un protone di energia 1 TeV (a destra).

Il 30% dei Raggi Cosmici secondari è definito dalla componente molla, costituita da elettroni, fotoni, neutroni, pioni, kaoni e neutrini. Questa componente non giunge fino al livello del mare poiché viene fermata prima dall'atmosfera. Essa è caratterizzata da una bassa energia e risultano essere poco penetranti.

Il 70% rappresenta invece la componente dura, in grado di raggiungere il livello del mare e costituita da muoni. Essa è caratterizzata da un'alta energia di circa 1 Gev e da un flusso

$$\text{di } 10.000 \times \frac{\text{particelle}}{\text{m}^2 \text{ s}} \approx 1 \frac{\text{particelle}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

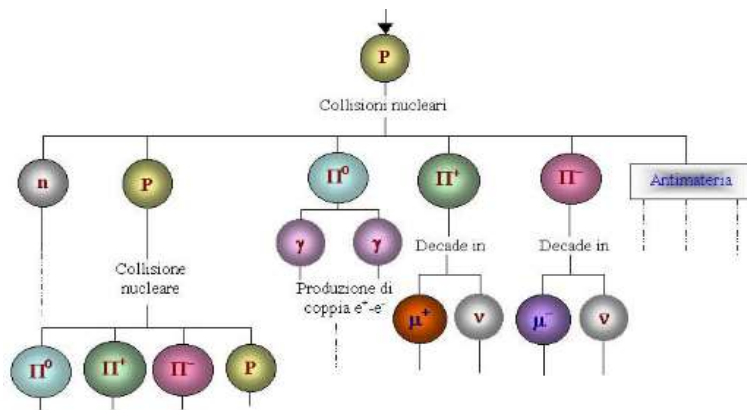


Figura 8 - Particelle secondarie, e loro decadimenti, prodotte dai raggi cosmici primari in una collisione nucleare [5].

I neutrini prodotti in questi sciame sono detti neutrini atmosferici. La alta densità dell'atmosfera (rispetto agli spazi interstellari dove probabilmente hanno origine i neutrini di origine astrofisica) fa sì che una parte dei mesoni prodotti interagisca prima di

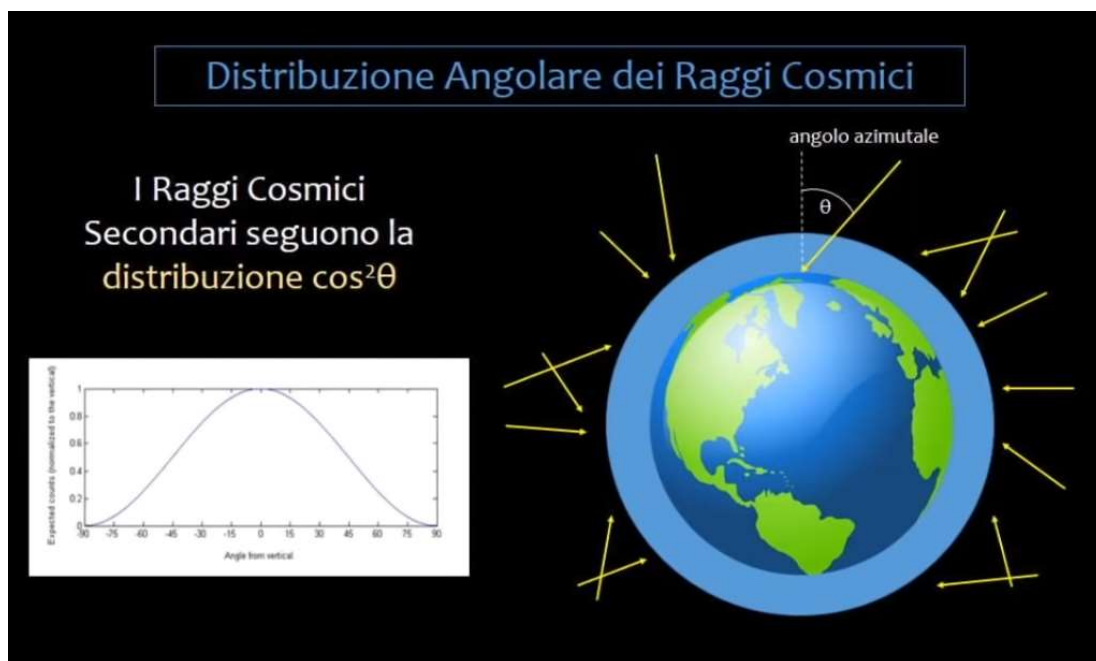


decadere, facendo sì che la pendenza dello spettro dei neutrini atmosferici sia maggiore

di quella che ci aspettiamo nel caso di neutrini astrofisici  $\left(\frac{dN}{dE} \propto E_\nu^{-2}\right)$ ;

questo è un bene, perché ad energie sufficientemente elevate ci si aspetta che il flusso di neutrini astrofisici diventi superiore a quello dei neutrini atmosferici.

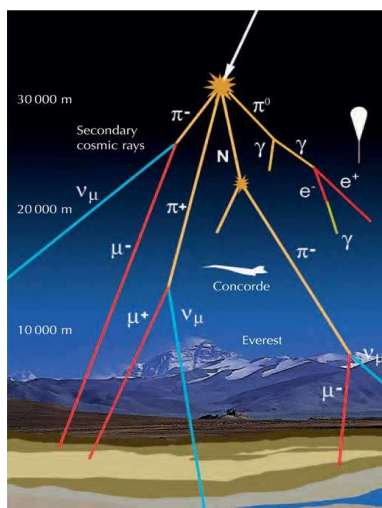
Inoltre questo fenomeno dà origine ad una forma caratteristica del flusso dei neutrini atmosferici rispetto all'angolo zenitale. Infatti i Raggi Cosmici secondari, a differenza di quelli primari, non sono isotropi, ma seguono una distribuzione che segue il  $\cos^2\theta$ , ovvero l'angolo azimutale (distanza angolare tra il punto cardinale del Nord ed il piede dell'astro). La maggior parte dei Raggi Cosmici secondari rilevati proviene dalla direzione perpendicolare rispetto alla superficie terrestre, mentre i mesoni generati da Raggi Cosmici provenienti da angoli più radenti l'orizzonte percorrono un tragitto più lungo in zone di bassa densità rispetto a quelli più verticali, avendo quindi una maggiore probabilità di decadere. Il flusso di neutrini avrà quindi un massimo in corrispondenza di angoli zenitali dell'ordine di  $80 \div 90^\circ$ . E' questo il motivo per cui la maggior parte dei Raggi Cosmici proviene perpendicolarmente rispetto alla superficie terrestre; infatti questi ultimi devono attraversare uno strato di atmosfera più ridotto rispetto ai Raggi Cosmici obliqui, che devono attraversare uno strato di atmosfera di raggio moltiplicato per il coseno dell'angolo azimutale, spessore decisamente maggiore di quello dei Raggi Cosmici verticali.



## IL MUONE

Nel 1937, Carl Anderson, insieme al suo studente Seth H. Neddameyer, studiando le interazioni dei Raggi Cosmici, scoprì una nuova particella, il muone, che ha la stessa carica elettrica dell'elettrone ma è 210 volte più pesante e, diversamente dall'elettrone, è instabile e possiede una vita molto breve, terminata la quale si va a trasformare in un

elettrone (vita media= 1 microsecondo). Il muone è l'unica particella che è in grado di raggiungere il livello del mare; questa particella però deve attraversare 10 km di atmosfera ed è quindi necessario che viaggi alla velocità della luce, ma non sarebbe ancora in grado di attraversare interamente quei 10 km di atmosfera, poiché secondo la fisica classica sarebbe solamente in grado di percorrere 0,3 km. Poiché il muone viaggia ad una velocità prossima a quella della luce, per questa particella vale il principio della dilatazione dei tempi della relatività ristretta, per il quale noi siamo in grado di rilevare i muoni per ben più tempo della durata della loro vita media, riuscendo quindi ad attraversare lo strato di atmosfera per poi giungere al livello del mare per essere rilevati.

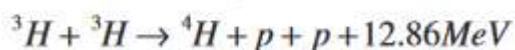
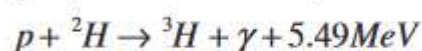
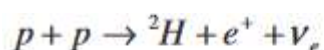


## L'origine dei Raggi Cosmici

La vera origine dei Raggi Cosmici rimane ancora incerta, soprattutto a causa del fatto che questi sono deviati dai campi magnetici e ciò impedisce di ricollegare la direzione di arrivo del primario alla sorgente acceleratrice. Nella nostra galassia le sorgenti più probabili sono: le esplosioni di supernovae; eventi violenti sulle superfici di stelle (come le tempeste solari che danno origine a grandi emissioni di plasma); i dischi di accrescimento intorno ad oggetti compatti (buchi neri o di stelle di neutroni) in sistemi binari; le microquasar. Possibili sorgenti extragalattiche sono i nuclei galattici attivi (AGN) e le sorgenti di Lampi di Raggi Gamma (Gamma Ray Bursts GRB)

### SOLE

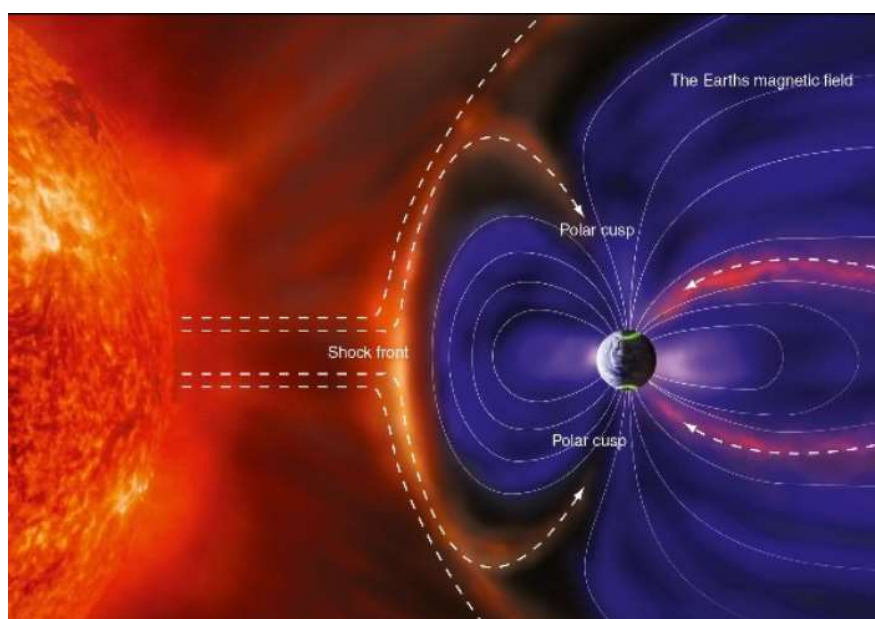
Il sole produce neutrini a bassa energia dalle reazioni di fusione, in particolare nella catena protone-protone:



dove i neutrini hanno energia massima pari a 0.42 MeV.

Dal sole provengono tuttavia anche neutrini ad alta energia dovuti all'interazione di Raggi Cosmici di alta energia sull'atmosfera solare: l'atmosfera solare è più densa di quella terrestre, quindi lo spettro di questi neutrini è più ripido.

Il Sole infatti sulla sua superficie produce il vento solare, il quale gli fa perdere parte della propria massa, rilasciando Raggi Cosmici. Poiché le particelle dei Raggi Cosmici sono prevalentemente cariche, la magnetosfera della Terra va a deviare la loro direzione a causa della forza di Lorenz. I raggi che però giungono nei punti di chiusura del campo magnetico terrestre, i poli, si infilano nelle linee del campo magnetico terrestre e vengono accelerate ad una velocità prossima a quella della luce, entrando nell'atmosfera.



Ai poli questi Raggi Cosmici creano inoltre fenomeni di fluorescenza, ovvero viene emessa luce visibile per Effetto Cherenkov, luminescenza che crea il fenomeno delle aurore boreali ed australi.



## SUPERNOVAE

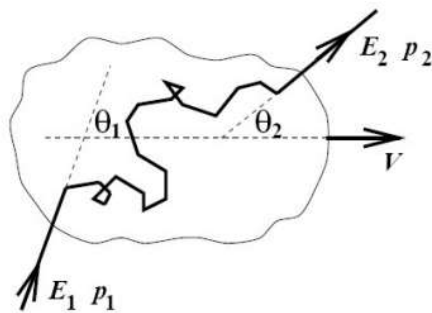
Le supernovae sono esplosioni stellari molto luminose ed energetiche. Esse possiedono una massa almeno doppia rispetto a quella del Sole. Queste alla fine della loro vita, dopo aver bruciato completamente idrogeno ed elio, esplodono, espellendo la loro massa e trasformandosi in stelle di neutroni, piccole e molto dense. I Raggi Cosmici nascono

quindi dall'esplosione di supernovae secondo un meccanismo. Nell'esplosione di una supernova gli strati di materia vanno a formare un'onda d'urto; le particelle cariche vengono intrappolate tra gli strati di campo magnetico e rimbalzano accelerando sempre di più; raggiunta una velocità prossima a quella della luce, le particelle riescono a sfuggire al campo magnetico e vengono espulse dalla stella, giungendo poi sulla Terra sotto forma di Raggi Cosmici.



### MECCANISMO DI FERMI

Nel 1949 Fermi pubblicò un articolo nel quale ipotizzava l'accelerazione dei RC attraverso la diffusione delle particelle in nubi di plasma in moto nella galassia. Questo processo è ora noto come meccanismo di Fermi del secondo ordine, visto che l'incremento medio relativo di energia di ogni nucleone è proporzionale al  $\beta^2$  della nube di plasma.



Accelerazione di una particella in una nube di plasma in moto con velocità  $V$ :  $E_1$  ( $E_2$ ),  $p_1$  ( $p_2$ ) e  $\theta_1$  ( $\theta_2$ ) energia, momento e angolo di incidenza iniziali (finali).

Indicando con  $E_1$  l'energia iniziale della particella e con  $E_2$  l'energia della particella in uscita dalla nube, si ha infatti:

$$\frac{\langle E_2 \rangle}{E_1} = \gamma^2 (1 - \beta \langle \cos \theta_1 \rangle) = \frac{1}{1 - \beta^2} \left( 1 + \frac{\beta^2}{3} \right) \cong (1 + \beta^2) \left( 1 + \frac{\beta^2}{3} \right) \cong 1 + \frac{4}{3} \beta^2$$

dove  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ,  $\beta = \frac{V}{c}$  dove  $V$  è la velocità della nube.

Poiché le nubi di plasma hanno velocità piuttosto basse ( $\beta \approx 10^{-4}$ ) questo meccanismo non è in grado di spiegare le alte energie in gioco nei RC, in particolare darebbe luogo ad uno spettro in energia con un indice spettrale troppo elevato

Applicando l'idea dell'accelerazione di Fermi alle onde d'urto si ottiene un guadagno medio di energia proporzionale a  $\beta$ , (meccanismo di Fermi del primo ordine). Un'onda d'urto (shock wave) è una perturbazione che si propaga ad una velocità maggiore di quella del suono nel mezzo considerato. Durante l'esplosione di una supernova ad esempio, una grande quantità di materia (dell'ordine delle 10 masse solari) viene espulsa ad una velocità di circa  $10^4$  km/s, molto maggiore della velocità del suono nel mezzo interstellare, creando quindi un'onda d'urto che si propaga radialmente nello spazio. La velocità del fronte d'onda ( $V_S$ ) dipende dalla velocità della materia espulsa ( $V_P \approx 10^4$  km/s) e dal rapporto tra i calori specifici, (trattandosi di gas ionizzato, quindi monoatomico  $\gamma = c_P / c_V = 5/3$ ); risulta:

$$\frac{V_S}{V_P} \approx \frac{4}{3}$$

Le particelle che vengono diffuse dalle irregolarità dei campi magnetici delle nubi di plasma, attraversando il fronte d'onda di shock guadagnano energia, in entrambi i sensi di attraversamento dello shock, poiché la velocità relativa del plasma prima e dopo lo shock è sempre  $V_P$

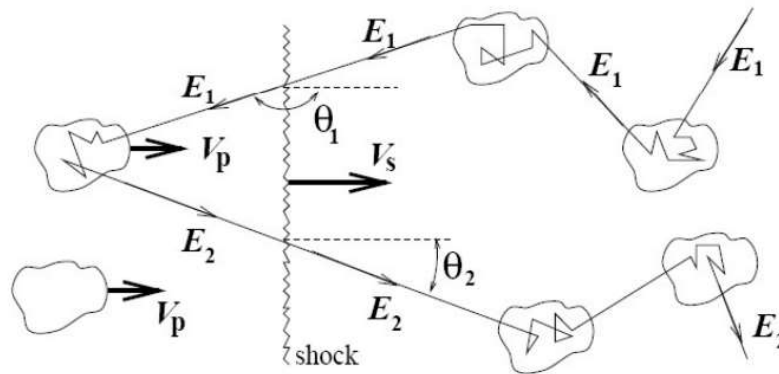


Figura 6 - Schema di interazione di una particella con un'onda di shock.  $E_1$  ( $E_2$ ) energia iniziale (finale) della particella,  $V_S$  velocità dello shock,  $V_P$  velocità della materia espulsa [11].

Questo è il motivo per cui nell'onda d'urto si ha un'accelerazione più efficiente. Il guadagno medio di energia per ogni passaggio avanti e indietro è

$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \approx \frac{4}{3} \beta, \text{ con } \beta = V_P/c.$$

Mediando sull'angolo di incidenza delle particelle si può calcolare il tasso di attraversamento dello shock e l'indice spettrale dello spettro in energia della popolazione di particelle accelerate. Lo spettro calcolato ha l'andamento descrivibile tramite una legge di potenza

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-2}$$

Durante la propagazione nella galassia le particelle più energetiche hanno maggiore probabilità di sfuggire al campo magnetico galattico. Questo effetto è stato modellizzato matematicamente (Leaky Box Model) e se ne è potuta calcolare la variazione di indice spettrale pari a  $0.6 \div 0.7$ , che rende l'indice spettrale in accordo con quello osservato, pari a  $\sim 2.7$  per  $E < 10^{16}$  eV.

## QUAZAR

Si pensa siano dei nuclei galattici in cui vive un buco nero. Nel quazar la materia, cadendo nel buco nero accelera e viene espulsa come energia che noi rivediamo sotto forma di Raggi Cosmici



## PULSAR

Sono stelle di neutroni con campo magnetico molto intenso, che ruotano su sè stesse con una frequenza di rotazione molto alta, grazie ai quali emettono radiazioni che si presentano a noi come Raggi Cosmici.



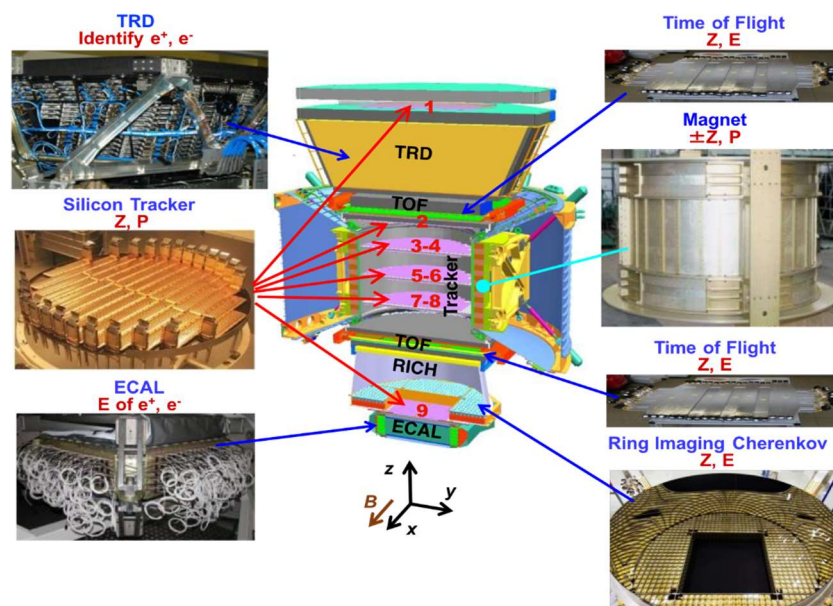
## Missioni nello spazio: alla ricerca dei Raggi Cosmici

Dagli anni '90 ricomincia l'interesse per i Raggi Cosmici come sonde per la Cosmologia osservativa e la Fisica delle Astroparticelle. A partire dagli anni 90 si cominciò a voler studiare nel dettaglio la composizione e l'energia dei Raggi Cosmici primari. Per poterlo fare si dovette ricorrere alla costruzione di satelliti.

## AMS-02 DETECTOR

The objectives of AMS on the ISS include the search for antimatter, investigating the origin of dark matter, and the precision study of cosmic rays, as well as the exploration of new phenomena in the Universe. AMS, as the first precision particle physics detector in space, is exploring the field of space physics with an unprecedented accuracy of  $\sim 1\%$  and up to the TeV energy region. AMS will continue to explore a new frontier in particle physics over the lifetime of the International Space Station. The most exciting objective of AMS is to explore the unknown with a precision instrument.

The AMS detector consists of a permanent magnet surrounded by an array of particle detectors to measure the momentum and charge of the passing particles and nuclei. The Transition Radiation Detector (TRD) is located at the top of the AMS. Its purpose is to identify electrons and positrons by Transition Radiation while rejecting protons at a level of  $10^3$  and to distinguish nuclei by their rate of energy loss ( $dE/dx$ ). Within the magnet bore and above and below the magnet are a total of 9 precision silicon tracker planes, L1 to L9, with 200,000 channels aligned to 5 microns. The purpose of the tracker, together with the magnet, is to measure the sign of the charge and momentum of the particles with unprecedented accuracy (a coordinate resolution of 5 microns for  $Z=6$  and 10 microns for  $Z=1$  particles over a lever arm of 3 m). The AMS coordinate system is concentric with the center of the Magnet. The x-axis is parallel to the main component of the magnetic field and the z-axis points vertically. The (y-z) plane is the bending plane.



Above and below the magnet bore are the Upper and Lower Time of Flight (TOF) counters. The purposes of this detector are to provide a charged particle trigger to AMS, to determine the direction and velocity of incoming particles and to measure their charge via  $dE/dx$ . Anti-Coincidence Counters (ACC or Veto), with a measured efficiency of 0.99999, surround the tracker in the magnet bore. They reject cosmic rays entering AMS from the side. Below the Lower Time of Flight counters are the Ring Image Cherenkov counter (RICH) and Electromagnetic Calorimeter (ECAL). The RICH, with its 10,880 photo-sensors, measures the charge and velocity of passing particles. Both are calculated from the geometrical shapes, circles or rings, generated by the Cherenkov effect. It consists of two radiators. The central radiator is formed by 16 sodium fluoride,

NaF, tiles with a refractive index  $n = 1.33$ . These are surrounded by 92 tiles of silica aerogel with a refractive index  $n = 1.05$ . This allows the detection of particles with velocities  $\beta > 0.75$  with the NaF radiator and  $\beta > 0.953$  with the aerogel radiator. The RICH measures particle velocities with an accuracy of better than 0.1%. The ECAL is a 3-dimensional imaging instrument made of 1,200 lbs of lead sandwiched with 50,000 scintillating fibers, providing a shower measurement with 17 radiation lengths ( $X_0$ ) and 1296 measuring cells. It measures the energy and direction of trillion electron volt (TeV) positrons and electrons with high precision. The ECAL energy resolution is  $\sim 2\%$  and the angular resolution is  $0.5^\circ$  for  $E > 100$  GeV. Together, the ECAL and the tracker separate protons from electrons and positrons at the level of  $10^4$ .

In total there are 300,000 electronics channels read-out and processed by 650 microprocessors to provide data reduction of  $\sim 1000$  without loss of physics information. The average transmission rate from AMS on the Space Station to the ground is 10 Mbit/s.

The separation of the TRD and the ECAL by a magnetic field ensures that secondary particles generated in the TRD are swept away by the magnet and do not enter into the ECAL. In this way the rejection powers of the two detectors are independent.

Before launch to the ISS, AMS was tested extensively at the CERN test beam with electrons, positrons, protons, and pions (to simulate high energy protons). In total, more than 2000 combinations of particles, energies, incident angles and locations were tested. The measured (electron/positron)-to-proton rejection at 400 GeV/c was larger than  $10^6$ . The test beam results are used with AMS in space to monitor the detector performance and also in the data analysis to verify the quality of the data from space.

AMS on ISS, see Figure 2, has functioned reliably and the properties of the detector have not changed compared to its original calibration at the CERN accelerator before launch. This ensures the quality and accuracy of the data being analyzed.

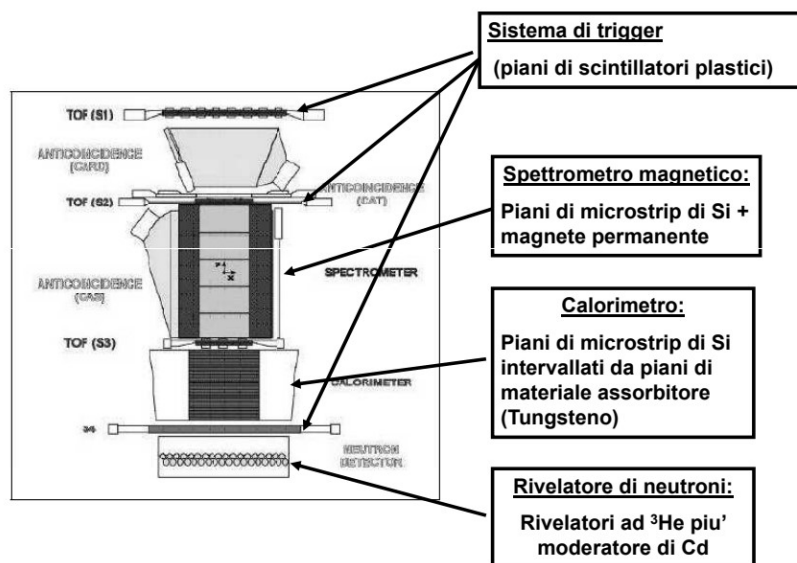


(SITOGRAFIA UFFICIALE: <https://amso2.space/what-is-ams/ams-in-nutshell>)

## PAMELA

On the 15th of June 2006, the PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) satellite-borne experiment was launched onboard the Russian Resurs-DK1 satellite by a Soyuz rocket from the Baikonur Space Centre. The satellite was placed in a quasi-polar  $70^\circ$  inclination orbit at an altitude varying between 350 km and 600 km. In September 2010 the altitude was moved to 580 km.



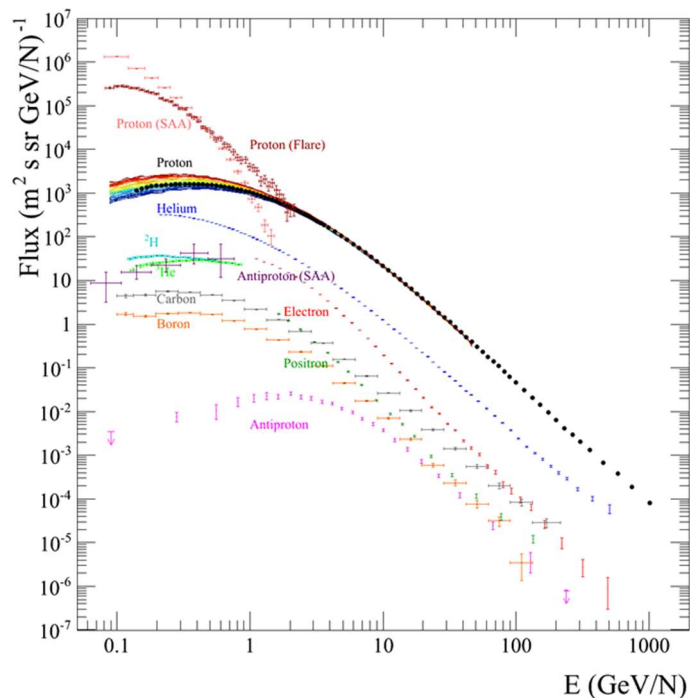


PAMELA is a powerful particle identifier using a permanent magnet spectrometer with a variety of specialized detectors for cosmic ray direct measurements in space with unprecedented precision. New very important data on antiparticle component of the cosmic radiation, electron energy spectrum and nuclear and isotopic composition of cosmic rays have been obtained in a large energy range, as well on cosmic ray solar modulation, solar flares and radiation belts around the Earth.

Very unexpected and exciting is the excess found in the positron energy spectrum and positron fraction, measured from 400 MeV up to 200 GeV, interpreted in more than one thousand scientific papers either in terms of dark matter annihilation or pulsar contributions or, instead, as evidence that the propagation models should be revised.

Significant constraints on dark matter models have been provided from the measurement of the antiproton spectrum in the energy range from 60 MeV to 350 GeV, consistent with secondary production. New light in the understanding of cosmic ray propagation mechanisms has been given from the energy spectra of protons and helium nuclei measured up to 1.2 TV, challenging the current paradigm of cosmic ray acceleration by a single supernova remnant.

The discover of a belt of trapped antiprotons around the Earth aroused great interest even outside the scientific community. For the first time the effects of the solar activity on the cosmic ray propagation have been measured for ten years, covering large part of the 23rd descending and 24th ascending periods of the solar cycles.



(SITOGRAFIA UFFICIALE: <https://pamela.roma2.infn.it/>)

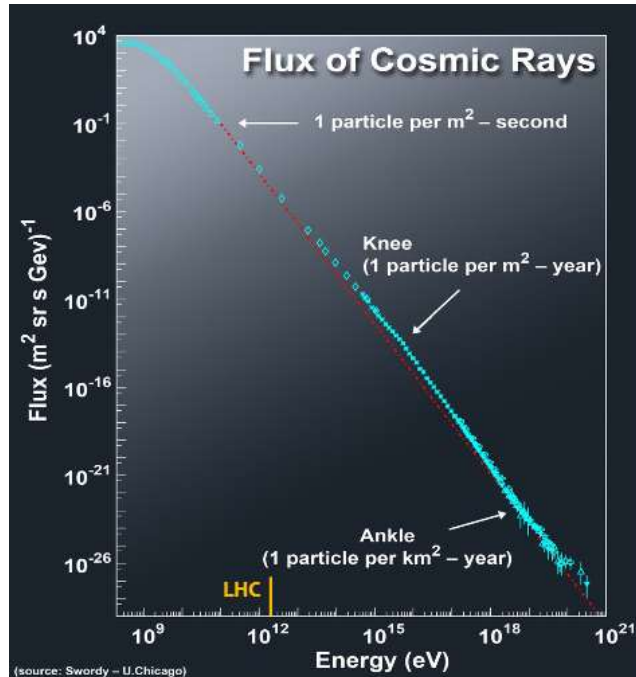
## Energia dei Raggi Cosmici

La distribuzione in energia dei Raggi Cosmici si estende da energie inferiori a  $10^9$  eV a energie superiori a  $10^{20}$  eV;

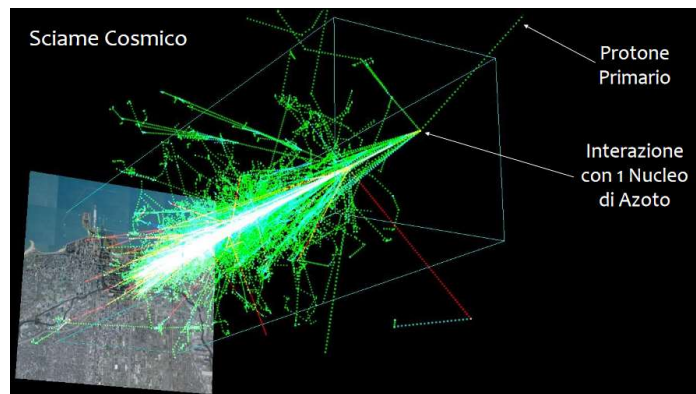
Possiamo classificare i Raggi Cosmici in base alla loro energia:

- High Energy Cosmic Rays (HECR):  $E \sim 10^9$  eV (GeV);
- Very High Energy Cosmic Rays (VHECR):  $E \sim 10^{12}$  eV (TeV);
- Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR):  $E \sim 10^{15}$  eV (PeV);
- Extreme High Energy Cosmic Rays (EHECR):  $E > 10^{18}$  eV (>EeV);

Per  $E < 10^{14}$  eV il flusso di Raggi Cosmici primari è sufficientemente grande da poter venire misurato direttamente con palloni o satelliti al di fuori (o quasi) dell'atmosfera; mentre per  $E > 10^{14}$  eV il flusso si riduce così tanto da rendere impossibile la misura diretta in quanto i rivelatori che si possono montare sui satelliti sono troppo piccoli per raccogliere una statistica adeguata.



Bisogna a questo punto ricorrere ad una misura indiretta, cioè dei prodotti secondari dell'interazione dei Raggi Cosmici con l'atmosfera: il protone primario crea uno sciame cosmico, ovvero possiede talmente tanta energia da produrre nuove particelle, producendo un fenomeno a cascata che genera uno sciame che giunge al livello del mare su una superficie di centinaia di metri quadrati.



Queste misure vengono effettuate a terra con rivelatori di grandi dimensioni.

## OSSERVATORIO PIERRE AUGER

Auger è un osservatorio terrestre dedicato allo studio della radiazione cosmica ad energie superiori a  $10^{18}$  eV.

Comprendere l'origine, i meccanismi di accelerazione e la natura delle particelle prodotte in sorgenti astrofisiche alle altissime energie è una delle sfide più interessanti ed aperte dell'astrofisica moderna. Tali particelle arrivano a Terra sotto forma di particelle cariche, fotoni e neutrini, con uno spettro di energia che si estende fino a  $10^{20}$  eV. La loro interazione con nucleoni a riposo corrisponde ad un'energia nel centro di massa di più di 400 TeV, molto superiore a quanto raggiungibile in acceleratori come LHC. Lo studio delle proprietà delle interazioni adroniche di queste particelle collega l'astrofisica

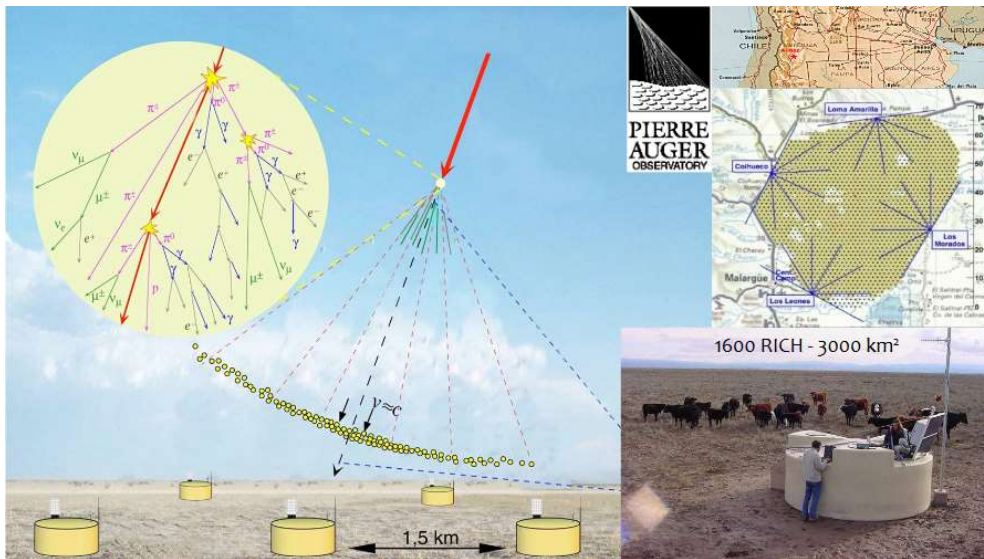
delle alte energie con la fisica delle particelle elementari, in una disciplina nota come Fisica Astroparticellare.

Il flusso estremamente limitato di astroparticelle, a queste energie estreme, è tale da consentirne la rivelazione solo grazie a tecniche indirette, basate sullo studio degli Sciami Estesi Atmosferici: le particelle primarie, interagendo con i nuclei dell'atmosfera terrestre, producono uno sciame di secondari osservabile da Terra.

Completato nel 2008, l'Osservatorio Pierre Auger è il più grande esperimento esistente dedicato allo studio dei Raggi Cosmici di altissima energia. Si trova in Argentina, nella Pampa Amarilla, e sfrutta due tecniche di rivelazione degli Sciami Estesi Atmosferici:

- una griglia di 1660 rivelatori Cherenkov ad acqua, su un'area totale di circa 3000 km<sup>2</sup>, grazie ai quali si misura la densità e la distribuzione dei tempi di arrivo delle particelle a terra;
- 24 telescopi di fluorescenza disposti lungo la circonferenza esterna, ognuno con campo di vista di 1800 in azimuth per 300 in zenith, che effettuano una misura quasi calorimetrica dell'energia delle particelle primarie.

La sua configurazione ibrida consente di misurare l'energia degli sciami in maniera indipendente dalle simulazioni e di migliorare le performance della ricostruzione.



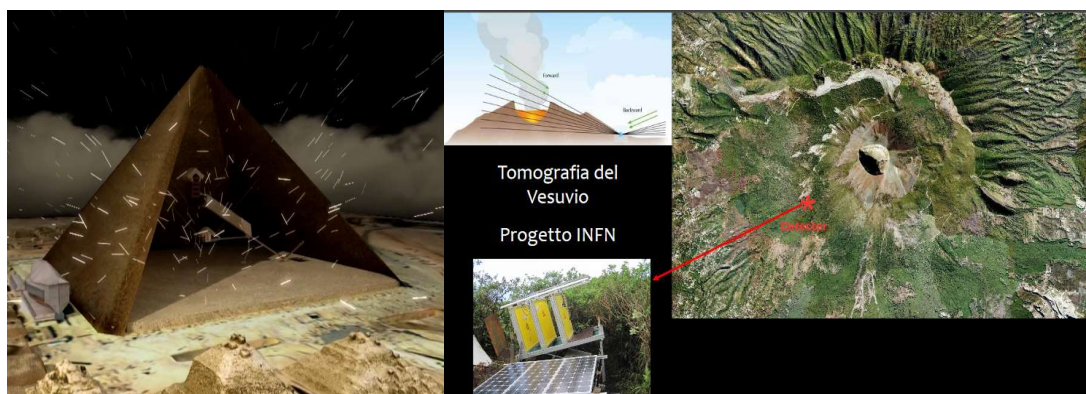
In questa figura è possibile osservare come vengono rilevati raggi cosmici presso l'osservatorio Pierre Auger: un raggio cosmico dopo essersi scontrato con i nuclei degli elementi presenti in atmosfera produce uno sciame di Raggi Cosmici, nel quale ciascuno dei sottoprodotti ha energia sufficiente per creare altri sottoprodotti. Lo sciame possiede una superficie d'onda sferica e per questo motivo i rivelatori rilevano le particelle in modo non uniforme su tutta la superficie nello stesso istante; di conseguenza nell'osservatorio si va a mettere in correlazione i tempi di arrivo con la posizione dei rivelatori, ricostruendo la forma sferica della superficie dei Raggi Cosmici: da ciò si ricava il punto d'impatto e la direzione del raggio cosmico.

## Applicazione dei Raggi Cosmici: tomografia a muoni

La tomografia a muoni è simile a una radiografia a raggi X, coi muoni dei Raggi Cosmici si possono però "radiografare" perfino montagne e vulcani.

L'esperimento che ha fatto storia e anche scuola sulla tecnica della MU-RAY, è sicuramente quello di Luis Alvarez del 1970 avvenuto nella piramide di Chefren, con lo scopo di scovare eventuali camere nascoste, il rivelatore era posizionato nel centro della camera di Benzoni ed era stato messo in pratica usando il metodo comparativo. Se ci fosse stata una camera vuota, il confronto tra una simulazione teorica e la misura reale avrebbe dovuto evidenziare un eccesso di muoni (dove c'è un vuoto i muoni non sono assorbiti e se ne misurano di più) invece il risultato mostrava una distribuzione uniforme, l'esperimento aveva così dimostrato che non ci dovevano essere camere nascoste.

La tomografia con muoni cosmici è stata usata ad esempio per esaminare anche la camera magmatica del Vesuvio e il nocciolo del reattore A di Fukushima



La tomografia a muoni può essere usata anche per usi più comuni, ad esempio per effettuare radiografie a container per poterne verificare il trasporto di materiali non pericolosi. Misurando l'angolo con cui vengono deflessi i Raggi Cosmici, possiamo capire se viene trasportato materiale pericoloso come uranio e plutonio. Il camion viene fatto passare per due strati di rivelatori posti, sopra e sotto al carico, che rivelano i muoni mostrando dove queste particelle vengono assorbite e dove invece vengono deviati o respinti, rivelando la presenza di elementi come l'uranio, molto pericolosi, in grado di bloccare i Raggi Cosmici.



# Esperimento: rilevamento di Raggi Cosmici

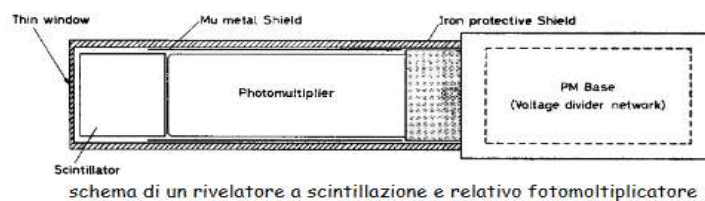
## SCOPO

Rivelare sperimentalmente i Raggi Cosmici con l'utilizzo di un rivelatore a scintillazione

## STRUMENTAZIONE

### ▪ 2 Rivelatori a scintillazione

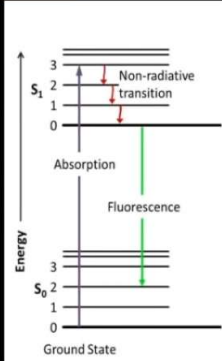
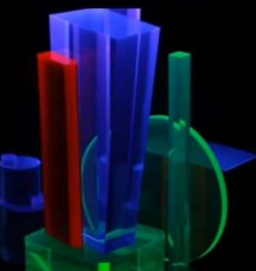
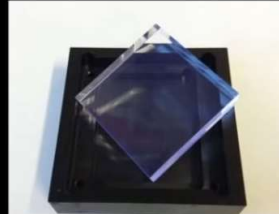
Sono senza dubbio tra i più diffusi rivelatori di particelle usati oggi in fisica nucleare. Sono basati sulla proprietà di alcuni materiali di emettere luce quando eccitati o ionizzati dalla radiazione incidente. Gli scintillatori sono sempre accoppiati ad un sistema di amplificazione di questa luce, un fotomoltiplicatore, in grado di convertire questo debole segnale ottico in un segnale elettrico che poi può essere processato ed analizzato e che contiene l'informazione sulla radiazione misurata. Gli elementi fondamentali di un rivelatore a scintillazione sono riassunti in figura:



Esso generalmente consiste di un materiale scintillante accoppiato otticamente ad un fotomoltiplicatore. Quando la radiazione interagisce nello scintillatore causa emissione di luce da parte di quest'ultimo. La luce è trasmessa, attraverso il rivelatore stesso che è quindi trasparente alla luce emessa, al fotomoltiplicatore (dall'inglese: PM o PMT) dove è convertita in una debole corrente di fotoelettroni che è poi ulteriormente amplificata da un sistema di moltiplicazione di elettroni. Il fotomoltiplicatore qui utilizzato è un Silicon Photomultiplier avente un lato di 5 mm; in esso il fotone va ad incidere su una matrice di più di 1000 fotodiodi, elemento in grado di creare un impulso elettrico nel momento in cui viene colpito da luce visibile, che fornisce un segnale amplificato dell'impulso del fotone. Il segnale in corrente così prodotto viene successivamente analizzato dall'elettronica di acquisizione. Diversi materiali hanno proprietà scintillanti tra i quali i più utilizzati sono lo ioduro di sodio e lo ioduro di cesio, entrambi drogati Tallio. Lo scintillatore usato durante il corso dell'esperienza è costituito da un coperchio e da una lastra da 5 cm di spessore.

## Rivelatori a Scintillazione

Gli Scintillatori emettono luce visibile per fluorescenza quando sono attraversati da particelle ionizzanti  
 $NaI(Tl)$  -  $CsI(Tl)$  -  $BaF_2$  -  $BGO$   
 $PbWO_4$  -  $LYSO$  -  $YAP$  -  $Polistirene$


## Fotomoltiplicatori

Trasformano la luce emessa dagli scintillatori in un segnale elettrico misurabile

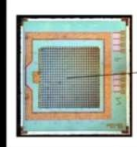
**SiPM – Silicon PhotoMultiplier**

Basati sull' Effetto Fotoelettrico (Einstein Nobel 1921)

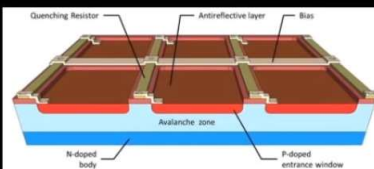
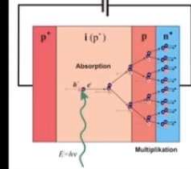
Il fotone incidente sulla matrice di fotodiodi emette un elettrone che crea una moltiplicazione a valanga nel Silicio



Sensore 5x5 mm<sup>2</sup>



Matrice di 1000 fotodiodi 30x30 μm<sup>2</sup>

- Cavetti

Utilizzati nell'esperimento per collegare i due rivelatori a scintillazione prima di tutto all'alimentatore e successivamente all'amplificatore e al discriminatore.

- Alimentatore

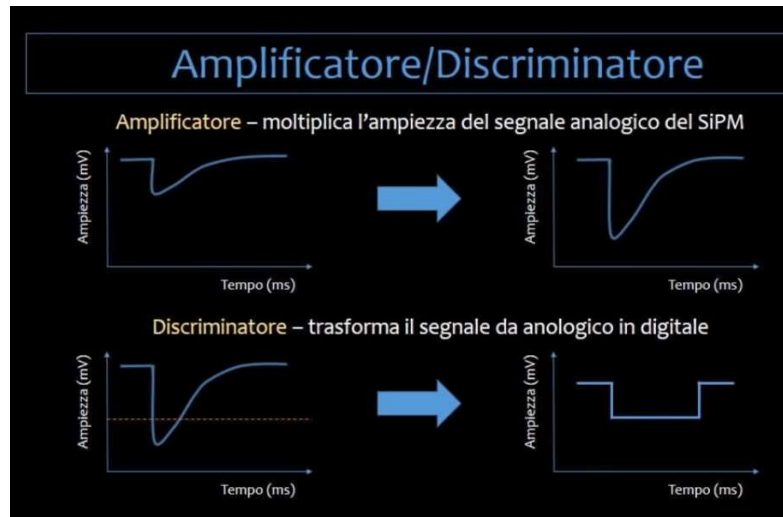
Strumento che fornisce l'energia per poter far funzionare i rivelatori.

- Amplificatore

Strumento in grado di amplificare l'ampiezza troppo piccola del segnale analogico proveniente dal SiPM compreso tra 1 nanosecondo e 1 microsecondo,

- Discriminatore

Strumento che va a trasformare il segnale analogico in digitale: il segnale entra nel discriminatore che possiede una soglia in ampiezza scelta da chi sta effettuando il rilevamento, in modo tale da ridurre il numero di segnali significativi a quelli che sono in grado di raggiungere quella soglia, solitamente corrispondente in media a circa 0,8V in ampiezza.

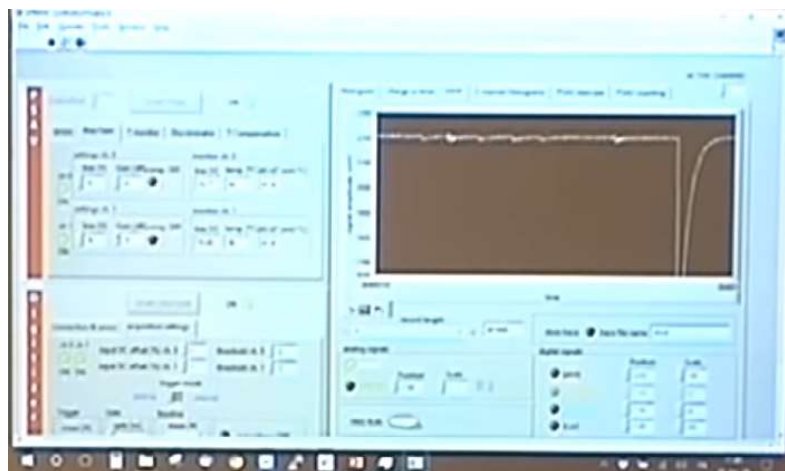


- **Digitizer**

Oscilloscopio in grado di digitalizzare il segnale per poterlo poi inviare ad una chiavetta USB che permette di visionare gli impulsi e di controllare i comandi del digitizer da un pannello di controllo software.

- **Pannello di controllo software**

Questo pannello di controllo è costituito da due canali principali, il canale zero ed il canale uno, nei quali si va ad inserire la tensione dell'oscilloscopio in volt, mentre nel canale del guadagno si registra il segnale in decibel.

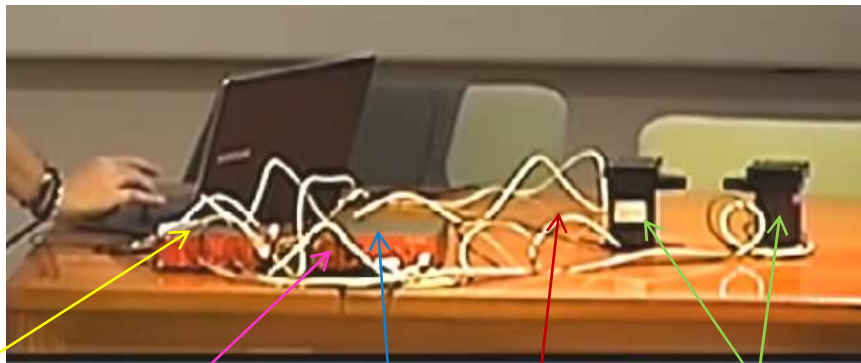


### ESECUZIONE DELL'ESPERIENZA

1. Collegare i due scintillatori all'alimentatore tramite due cavetti; allo stesso modo collegare i due scintillatori all'amplificatore analogico e al discriminatore.
2. Collegare il discriminatore al digitizer e collegare a suo volta quest'ultimo al pannello di controllo software tramite chiavetta USB



- Poiché i rivelatori sono sensibili al rumore c'è il rischio che essi registrino un segnale che non corrisponde al passaggio di una particella, dovuto invece non solo al suono ma anche ad interferenze elettromagnetiche, alle luci o all'attività solare. Per questo motivo si vanno ad utilizzare due rivelatori, per poter sfruttare la coincidenza, proprietà presente sul pannello di controllo software del digitizer che permette di registrare e di confrontare quando un determinato segnale viene registrato da entrambi i due scintillatori, eliminando così i segnali casuali dovuti ad interferenze esterne. Accendere quindi la funzione Coincidenza sul pannello di controllo del digitizer.
- Resettare i due rivelatori e verificare che, ponendo i due rivelatori l'uno di fronte all'altro non si riveleranno pochissimi segnali di passaggio di Raggi Cosmici nel tempo di 1 minuto rispetto a quelli previsti dal valore teorico.
- Porre ora i rivelatori a scintillazione l'uno sopra l'altro e misurare quanti segnali vengono registrati per il passaggio di un raggio cosmico in un minuto di tempo; nel caso in cui si registrasse un numero molto inferiore al numero medio previsto come valore teorico, corrispondente a 25 Raggi Cosmici al minuto su una superficie di 25 cm<sup>2</sup>, è necessario andare ad aumentare il guadagno e a diminuire la soglia del discriminatore dal pannello di controllo del digitizer ed effettuare nuovamente la misurazione nel tempo di 1 minuto.



**Digitizer    Discriminatore    Amplificatore    Cavetti    Rivelatori a scintillazione**

### DATI ED OSSERVAZIONI

- Ponendo i due rivelatori a scintillazione l'uno di fronte all'altro, nel tempo di rilevazione di 1 minuto, non si riscontrerà alcun passaggio di Raggi Cosmici o solo un numero molto esiguo; questo accade poiché, a causa della disposizione frontale dei due rivelatori, il raggio cosmico deve compiere un tragitto più complesso per poter attraversare entrambe i rivelatori; proprio per questo motivo essendo il rilevamento dei Raggi Cosmici un evento raro da rilevare, diminuisce di molto la probabilità che questi vengano rilevati da entrambi gli oscilloscopi posti nella funzione di Corrispondenza.

2. Ponendo ora i due rivelatori a scintillazione sono stati ottenuti due dati differenti:

#	Numero di Raggi Cosmici su 25 cm <sup>2</sup> al minuto
1	6
2	26

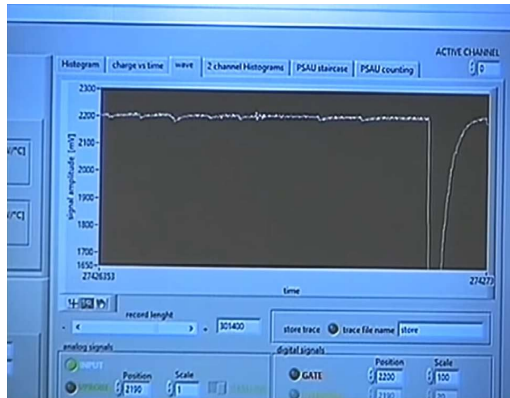
### PRIMA MISURAZIONE

Osservando il primo dato rilevato ci aspetteremmo di osservare un numero di Raggi Cosmici ben superiore a 6, ovvero circa 25 Raggi Cosmici al minuto su una superficie di 25 cm<sup>2</sup>, poiché, secondo il valore teorico, in 1 minuto c'è la probabilità che incida 1 raggio cosmico superficie di 1 cm<sup>2</sup>. Questo risultato porta quindi alla necessità di dover modificare delle impostazioni presenti nel pannello di controllo dell'oscilloscopio, ovvero ci presenta la necessità di diminuire la soglia di ampiezza rilevata dal discriminatore e ad aumentare invece il guadagno.



### SECONDA MISURAZIONE

Dalla seconda misurazione effettuata sono stati registrati ben 26 passaggi di Raggi Cosmici, addirittura superiori ai 25 Raggi Cosmici previsti dal valore teorico, nonostante questo sia solo un valore medio approssimativo; infatti ci si aspetterebbe di rilevare poco meno di 25 Raggi Cosmici, poiché questo valore medio è stato misurato considerando una superficie piana, mentre i due rivelatori essendo posti l'uno sopra l'altro presentano un angolo solido che impedisce ai raggi radenti tra i due rivelatori di attraversarli.



## CONCLUSIONE

Grazie all'esperimento effettuato possiamo affermare di aver verificato con successo il rilevamento dei Raggi Cosmici attraverso l'utilizzo dei rivelatori a scintillazione.

## Sitografia

<https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici>

[http://www.roma1.infn.it/exp/nemo/AHEN/Thesis/DarioBenvenuti/01\\_Raggi\\_Cosmici.pdf](http://www.roma1.infn.it/exp/nemo/AHEN/Thesis/DarioBenvenuti/01_Raggi_Cosmici.pdf)

<http://cosmo.fisica.unimi.it/assets/IntroAstro/IntroAstro1011/Caccianiga6.pdf>

<https://www.to.infn.it/attivita-scientifica/fisica-astroparticellare/auger/>

<http://edu.lnf.infn.it/wp-content/uploads/2015/10/raggicospmici.pdf>