

La fisica delle particelle nello Spazio
Andrea Vacchi

Alle sei di mattina del 7 agosto 1912 da un campo presso la città austriaca di Aussig si levò in volo un pallone che trasportava tre uomini, uno di questi era il giovane fisico Victor Hess, e tre sensibilissimi apparecchi per la misurazione della ionizzazione. Hess tentava di scoprire qualcosa sull'origine di una misteriosa radiazione che i fisici avevano individuato da un po' di tempo. Il pallone salì fino a 5000 metri, Hess scoprì che la radiazione era molto più forte a quell'altezza che a livello del mare. Eseguita l'analisi dei dati, egli annunciava: <I risultati delle mie osservazioni si spiegano perfettamente supponendo che una radiazione di grandissimo potere penetrante entri dall'alto nella nostra atmosfera.....> Questo fu il primo riconoscimento di quella che in seguito il fisico americano Robert Millikan chiamò radiazione cosmica.

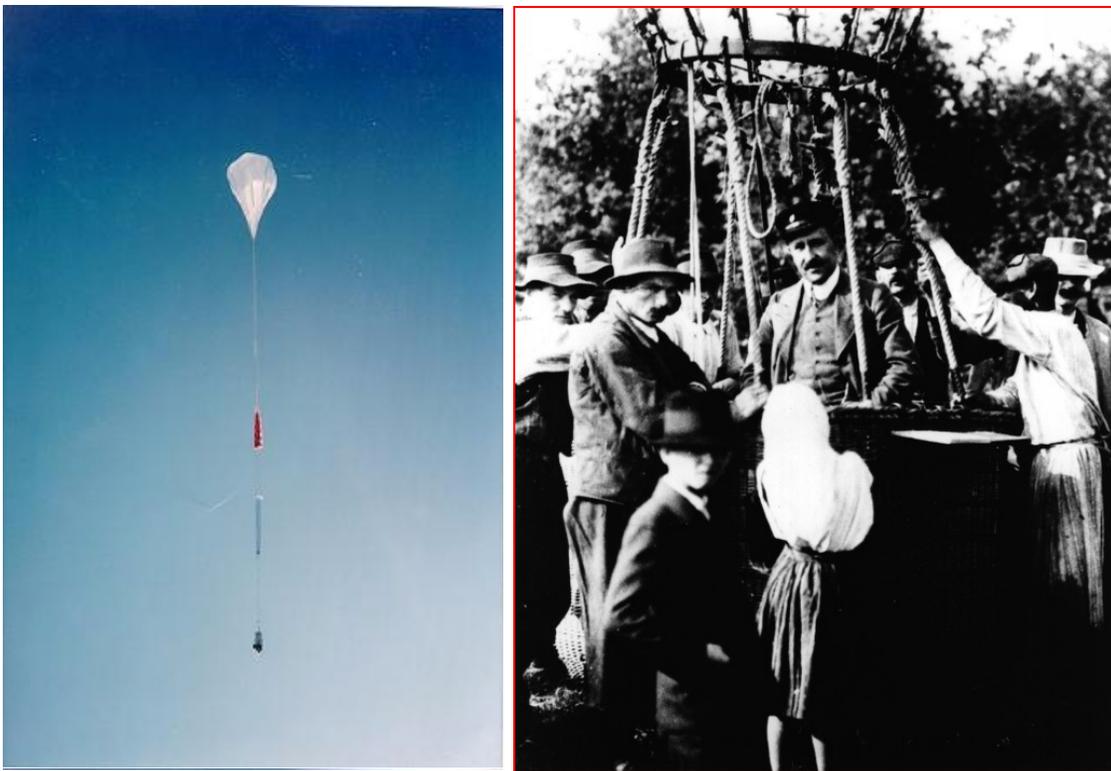


Fig 1 Il lancio di un moderno pallone stratosferico per la ricerca sui raggi cosmici e Victor Hess dopo il volo di pallone nel 1912

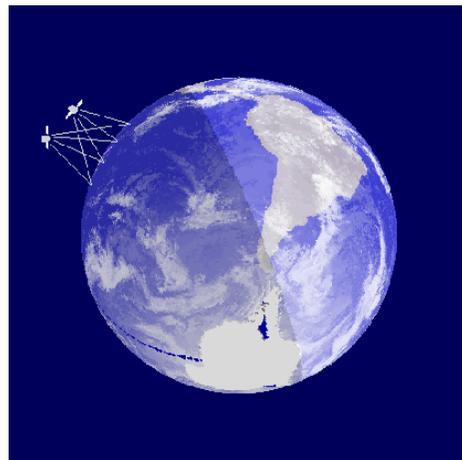
Impressiona vedere la fotografia di Hess nel grande cesto di vimini fissato con grosse gomene alla struttura di cavi del pallone, ci

si chiede immediatamente quale fuoco spingesse lo scienziato di quel tempo a quell'avventura. Pochi argomenti scientifici appassionano quanto lo studio della radiazione cosmica. Qui l'attrattiva dei problemi di fisica e geofisica si combina con quelli di cosmologia. Lo studio dell'origine delle particelle che, animate da energie di miliardi o di milioni di miliardi di elettronvolt, investono l'atmosfera del nostro pianeta, porta lo studioso dei raggi cosmici a collegare le sue osservazioni sulle caratteristiche, le energie, le fluttuazioni temporali di intensità delle particelle osservate, con i fenomeni astrofisici che si manifestano agli astronomi attraverso la luce emessa dai corpi celesti.

Le particelle primarie avvicinandosi alla Terra subiscono dapprima l'azione del suo campo magnetico che le deflette, più o meno secondo la loro energia, ed infine, giunti negli strati alti dell'atmosfera, urtando contro le molecole dell'aria, danno inizio ad una serie di fenomeni in cui la particella primaria produce un vero sciame di particelle secondarie. La natura dei raggi cosmici muta mano a mano che essi si sprofondano nell'atmosfera o che giunti al livello del mare penetrano entro la crosta terrestre.

Gli esperimenti sui raggi cosmici si svolgono con osservazioni a diverse latitudini ed a diverse altezze o profondità. Secondo la natura del problema da studiare gli strumenti di rivelazione vengono portati nelle vicinanze dei poli o dell'equatore terrestre. Altre volte si lavora a grande profondità nell'acqua, in miniere o a grandi altezze facendo uso di palloni stratosferici o di satelliti laddove l'atmosfera residua terrestre è talmente rarefatta da rappresentare un effetto trascurabile ed è possibile osservare le particelle prima della loro interazione con l'atmosfera. L'intero pianeta costituisce il laboratorio dello studioso di raggi cosmici, un'esplorazione sempre appassionante a volte avventurosa.

Fig.2 Un progetto ambizioso al quale i ricercatori lavorano da alcuni anni prevede di osservare la luce prodotta da uno sciame atmosferico usando una coppia di satelliti in orbita.



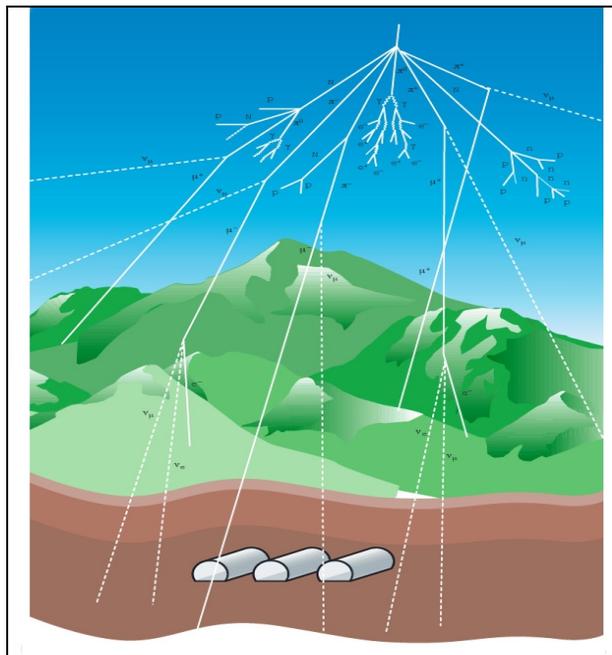
Prima dell'avvento degli acceleratori molte nuove particelle, la loro generazione ed i loro decadimenti sono stati scoperti studiando la

radiazione cosmica. Fu un periodo d'intensa attività che durò dal 1930 fino all'entrata in funzione dell'acceleratore chiamato Cosmotron ai Laboratori Nazionali di Brookhaven USA nel 1953. Da allora la fisica delle particelle è diventata una scienza di laboratorio, con l'esclusione delle particelle d'altissima energia che sono rimaste territorio esclusivo dei ricercatori dei raggi cosmici.

Una scoperta esemplare legata allo studio dei raggi cosmici è l'elettrone positivo; nel 1932 Anderson in America e subito dopo Blacket ed Occhialini a Cambridge annunziarono che gli sciame prodotti dai raggi cosmici contengono elettroni positivi. Il rivelatore di Anderson immerso in un forte campo magnetico permise di fotografare una traccia dai raggi cosmici che aveva una curvatura in senso opposto a quella dell'elettrone, tutte le altre caratteristiche corrispondevano alla traccia di un elettrone, una fotografia che, da sola, bastava a dare una certezza. Nessuna teoria l'aveva guidato anche se alcuni anni prima (1927-28) Dirak, proponendo la sua teoria, prevedeva "degli stati ad energia negativa che sarebbero apparsi come particelle cariche positivamente". In seguito queste particelle furono chiamate positroni.

La terra è soggetta ad una pioggia incessante di particelle provenienti dallo spazio. Essi possono giungere con energie di gran lunga superiori a quelle che si possono produrre oggi sulla terra frantumando gli atomi della materia incontrata e facendone esplodere i nuclei.

Fig 3 Dalla particella primaria di alta energia si produce uno sciame di particelle le cui caratteristiche vengono studiate a varie altezze ed in laboratori sotterranei come quello dei Laboratori Nazionali del GranSasso Dell'INFN.



Fuori dall'atmosfera terrestre le radiazioni cosmiche consistono essenzialmente di protoni (nuclei d'idrogeno) di energie variabili in

un campo molto ampio. I raggi cosmici contengono inoltre nuclei di elio e di elementi più pesanti. È interessante notare che l'abbondanza relativa dei vari nuclei nei raggi cosmici corrisponde all'abbondanza relativa degli elementi nell'universo.

Questi raggi cosmici sono l'unico contatto materiale con l'immenso universo, da dove vengono i raggi cosmici? in che modo queste particelle raggiungono la loro grandiosa energia? Questo è il cuore che motiva le ricerche sui raggi cosmici oggi in corso. Il sole e le altre stelle emettono protoni e nuclei di elementi più pesanti ad energie paragonabili con quelle raggiunte dagli acceleratori recentemente costruiti dall'uomo. Alcune stelle possono essere sorgenti insolitamente intense di raggi cosmici. Le particelle diffondono nello spazio interstellare e, per l'azione di campi magnetici distribuiti irregolarmente, restano intrappolate nella galassia in media vari milioni di anni: durante il loro moto casuale subiscono un'accelerazione ulteriore attraverso un meccanismo simile a quello che fa accelerare un surf sull'onda.

I modelli teorici descrivono la nostra galassia come una scatola, un volume chiuso, in cui i raggi cosmici restano intrappolati. Varie ricerche sono in atto per verificare la validità di questa ipotesi.

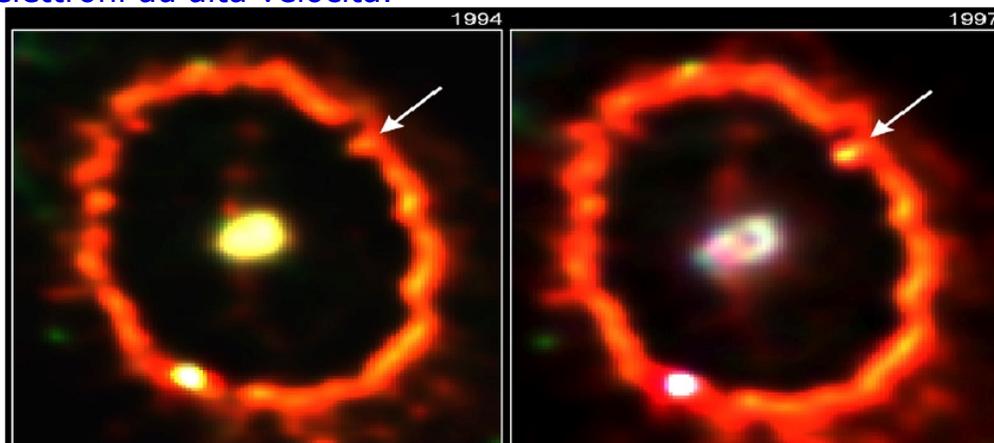
Le ricerche sui raggi cosmici, hanno già largamente contribuito alla nostra conoscenza delle particelle e delle forze nucleari, ci saranno di grande aiuto anche nel guadagnare progressivamente una maggiore conoscenza dell'universo. Grazie alla fruttuosa interazione tra lavoro scientifico teorico e sperimentale, oggi disponiamo di "Modelli Standard" sia per la fisica delle particelle che per la cosmologia. Il Modello Standard per la fisica delle particelle descrive i quarks che formano sempre stati legati dando luogo a neutroni e protoni, i leptoni come per esempio gli elettroni negativi dan luogo a materia neutra quando sono legati ai nuclei formati a loro volta da protoni e neutroni. Troviamo anche leptoni neutri, i neutrini, questi non formano stati legati ma rivestono una grande importanza in cosmologia e nell'astrofisica delle particelle (astroparticelle). Gli altri ingredienti importanti del Modello Standard della fisica delle particelle sono le particelle che portano le forze fondamentali: il fotone il gluone ed i bosoni W e Z. Il Modello Standard della cosmologia è il modello del Big Bang, questo afferma che l'Universo non è infinitamente vecchio ma si è formato 10-20 Miliardi di anni fa. È iniziato in uno stato che, dopo una piccola frazione di secondo, era enormemente compresso ed ad altissima temperatura. In quelle condizioni di temperatura nessuno stato legato era possibile, neutroni protoni e persino i fotoni ed i neutroni si sarebbero dissociati formando uno stato particolare di materia chiamato Quark-Gluon

plasma. Successivamente l'Universo si è espanso e raffreddato, rendendo possibile la formazione di una sequenza di oggetti sempre più complessi, protoni, neutroni, nuclei, atomi, molecole, nubi stelle pianeti. Le prove sperimentali a supporto del modello del Big Bang sono molto importanti:

- la presente espansione dell'Universo,
- l'esistenza di una radiazione cosmica "relicta " delle prime fasi caldissime,
- La relativa abbondanza di elementi leggeri nell'Universo.

Per quanto manchino ancora molti tasselli al mosaico che la fisica sta costruendo, questi due modelli possono descrivere la maggioranza dei fenomeni che osserviamo in natura, restano da chiarire molti aspetti fondamentali delle leggi della natura. Un problema chiave sta nella ricerca di una descrizione valida della gravità quantizzata, questo spingerà il nostro limite di conoscenza ancora più vicino al Big Bang stesso.

Tornando ai raggi cosmici, possiamo dire che essi appartengono a due categorie, una parte, la minore, viene dal sole, c'è una minima differenza di flusso di raggi cosmici tra il giorno e la notte. L'intensità di raggi cosmici di bassa energia cresce in corrispondenza delle grandi eruzioni solari (solar flares), ma la maggior viene da molto più lontano. Si pensa che i raggi cosmici galattici abbiano origine nella nostra galassia, la Via Lattea, essa contiene circa cento miliardi di stelle oltre al nostro sole e sistema solare. L'intera galassia ha un diametro di circa 100000 anni luce, noi ci troviamo in prossimità del suo piano equatoriale a metà distanza dal suo centro. Stelle e nubi di polvere sono concentrate nella regione equatoriale della galassia. Ma nella galassia le sorgenti di raggi cosmici non sono ancora chiaramente identificate. Molti vengono probabilmente da stelle con caratteristiche particolari, chiamate supernove SN, che sono esplose lanciando i loro frammenti nello spazio interstellare. Come e dove la successiva accelerazione delle particelle avviene non è chiaro. Le osservazioni dei residui di queste esplosioni mostrano chiaramente la presenza di elettroni ad alta velocità.



Bright Knot in Supernova 1987A Ring

PRC98-08b • February 10, 1998 • ST ScI OPO

P. Garnavich (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) and NASA

HST • WFPC2

Fig.4 L'anello di materia è la compressione di plasma causato dall'onda d'urto. La supernova sta creando una bolla nello spazio interstellare che è costituito da plasma espulso dalla supernova. La bolla si espande più velocemente della velocità del suono nell'ambiente di materia interstellare, si crea un'onda d'urto alla frontiera tra la materia espulsa e quella interstellare, qui si pensa avvenga l'accelerazione dei raggi cosmici. Sicuramente gli elettroni vengono accelerati, lo si vede dall'anello di luce di radiazione di sincrotrone che essi producono e che rende visibile il fenomeno.

La SN più conosciuta è la nebulosa Crab, nella costellazione del Toro. L'esplosione di quella stella, ben documentata nel 1054 d.c. da astronomi cinesi e giapponesi, fu un evento spettacolare. Era più luminosa di qualsiasi altro oggetto nel cielo notturno, confrontabile a Venere, scrissero i Cinesi, così luminosa che la si vide di giorno per 23 giorni consecutivi.

Oggi la Crab è stata studiata in tutte le parti dello spettro elettromagnetico dalle onde radio ai raggi gamma.

La comprensione di eventi come quello della nebulosa Crab, richiede familiarità con la fisica nucleare dei processi di fusione che avvengono nelle stelle. Questa conoscenza è legata agli studi di laboratorio dei nuclei e dei loro modi di interazione.

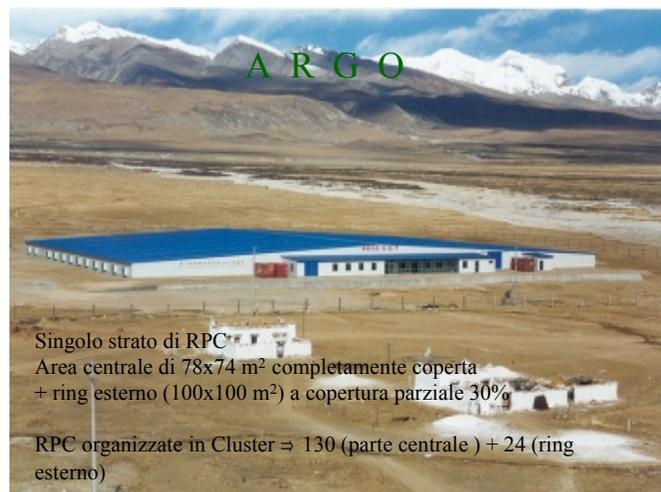
Dunque la maggior parte dei raggi cosmici ha origine nella nostra galassia, ma abbiamo evidenza di alcuni eventi ad altissima energia probabilmente provenienti dalle miriadi di galassie lontane che i telescopi ci hanno rivelato. Si è trovato che l'energia delle particelle cosmiche (misurata in elettronvolt eV), supera di parecchio il miliardo di eV, (10^9) ma la più alta energia misurata oggi negli sciami atmosferici sfiora i 10^{20} eV. Si deve notare che l'energia di una molecola d'aria a temperatura ambiente è d'alcuni centesimi di elettronvolt.

Il processo di produzione di queste energie estreme non è stato identificato fino ad ora, anche se i fisici teorici hanno fatto diverse ipotesi. Quando un raggio cosmico di alta energia entra nell'atmosfera terrestre collide con un atomo dell'aria. Particelle pesanti normalmente si spezzano in più frammenti perdendo una frazione significativa della loro energia iniziando un processo a cascata che si ripete dando luogo a ciò che chiamiamo sciame atmosferico di particelle, miliardi di particelle possono essere rivelati simultaneamente al suolo su superfici estese. Questi immensi sciami atmosferici forniscono l'unica chiave per lo studio dei raggi cosmici di altissima energia.

Fig 5 L'esperimento AUGER osserva i raggi cosmici di altissima energia distribuendo i suoi rivelatori su un vastissimo territorio in Argentina.



La storia della fisica e dello studio dei raggi cosmici sono strettamente intrecciati, dovremmo iniziare qui una descrizione dei sistemi e dei metodi di rivelazione e dei vari esperimenti oggi in corso. Basti per tutti la foto dell'esperimento ARGO una base dell'INFN nel Tibet.



Singolo strato di RPC
Area centrale di $78 \times 74 \text{ m}^2$ completamente coperta
+ ring esterno ($100 \times 100 \text{ m}^2$) a copertura parziale 30%

RPC organizzate in Cluster \Rightarrow 130 (parte centrale) + 24 (ring esterno)

Evitiamo di dilungarci troppo ma vale la pena di notare un'ultima cosa importante, le ricerche sui raggi cosmici che ci hanno appassionato in questi ultimi decenni sono state condotte da gruppi di ricercatori di tutte le nazionalità spesso uniti non solo da una passione per le loro ricerche, che va ben oltre una normale dedizione al loro lavoro, ma sono anche uniti da un'amicizia personale che li porta ad affrontare e condividere i rigori di un lavoro pionieristico simile infondo a quello dei grandi esploratori dei secoli passati.