

INTERNATIONAL COSMIC DAY

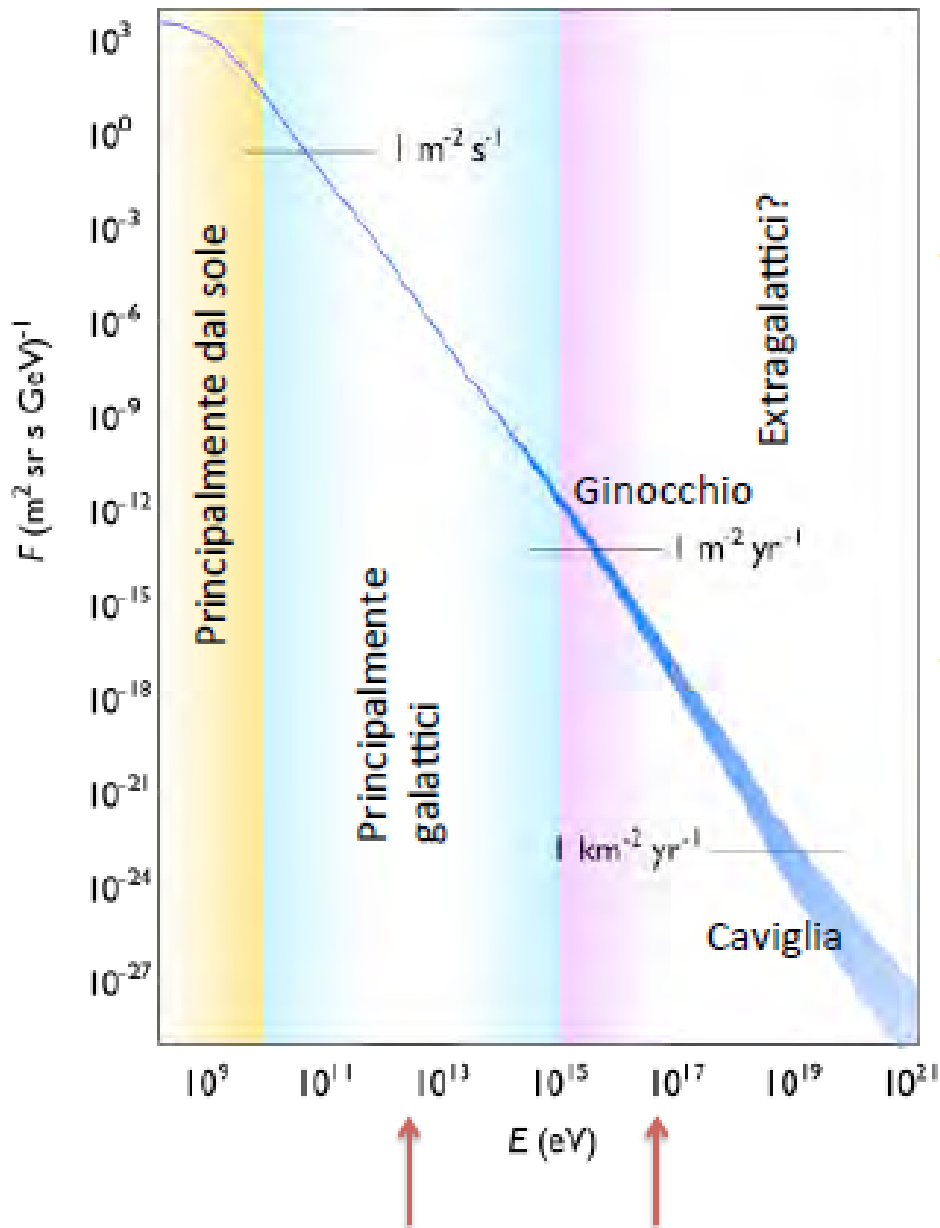
Carla Aramo - INFN Napoli
29 November 2018

I raggi cosmici

Image credit: DESY, Science Communication Lab



Che cosa sono i raggi cosmici?



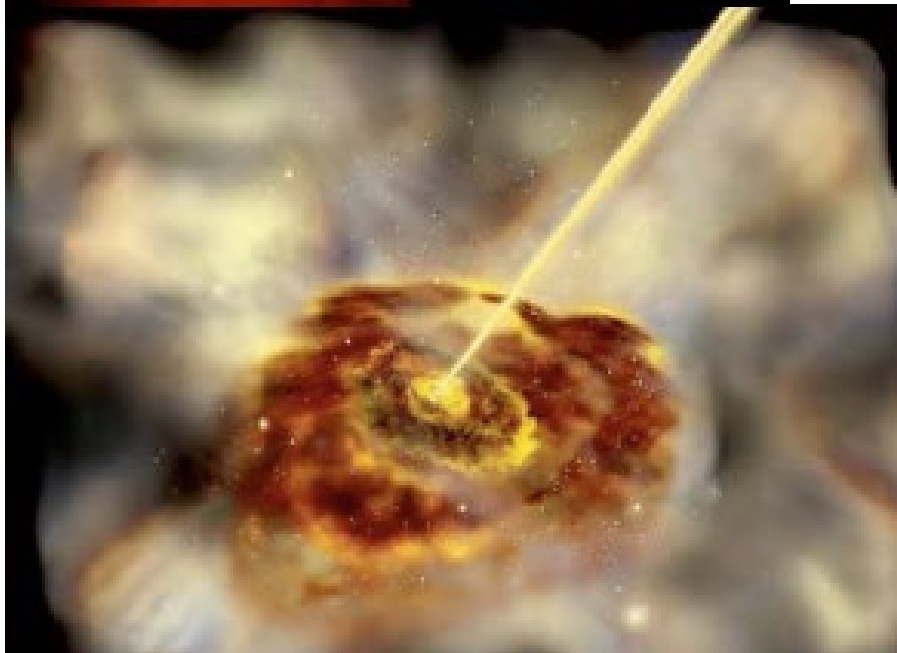
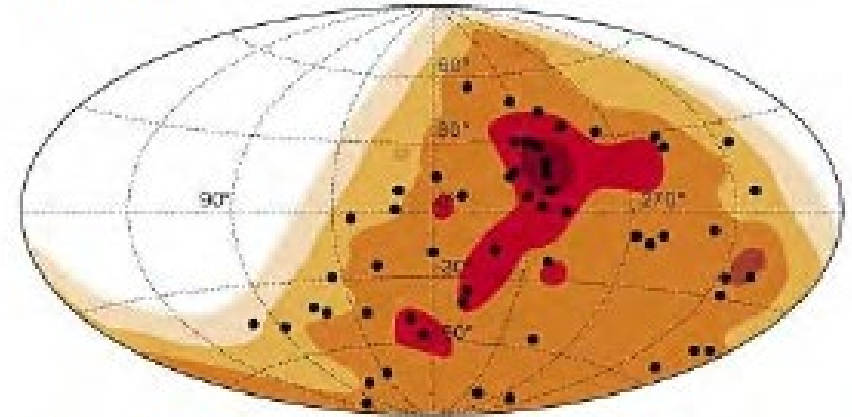
- Sono particelle subatomiche che arrivano sulla Terra
 - Perlopiù (~90%) protoni
 - Nuclei di elio (~9%);
 - Gli elettroni sono ~1%;
 - ~0.1% sono raggi gamma
- Il flusso diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia
 - Una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con la stessa energia di una pallina da tennis
 - Le più alte energie in astrofisica
 - Oltre 100 milioni di volte più grandi delle energie che riusciamo a produrre sulla Terra (LHC)

Energie

- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$: energia che serve a creare un protone (relazione di Einstein $E=mc^2$)
- $7000 \text{ GeV} = 7 \text{ TeV}$: energia di un protone accelerato in un fascio di LHC (energia cinetica di una zanzara)
- $6 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ joule}$: energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro
- 10^{21} eV : energia cinetica di una palla da tennis ben lanciata (sono le più grandi energie mai misurate in una particella singola, oltre cento milioni di volte più alte delle energie dei fasci di LHC)



- I raggi cosmici non sembrano arrivare da una particolare direzione (a parte piccoli effetti)



- Abbiamo capito che le loro energie sono prodotte da collassi gravitazionali:
 - Meno di 1 millijoule: probabilmente galattici (resti di supernova)
 - Sopra 1 mJ: probabilmente extragalattici (buchi neri supermassicci al centro delle galassie)

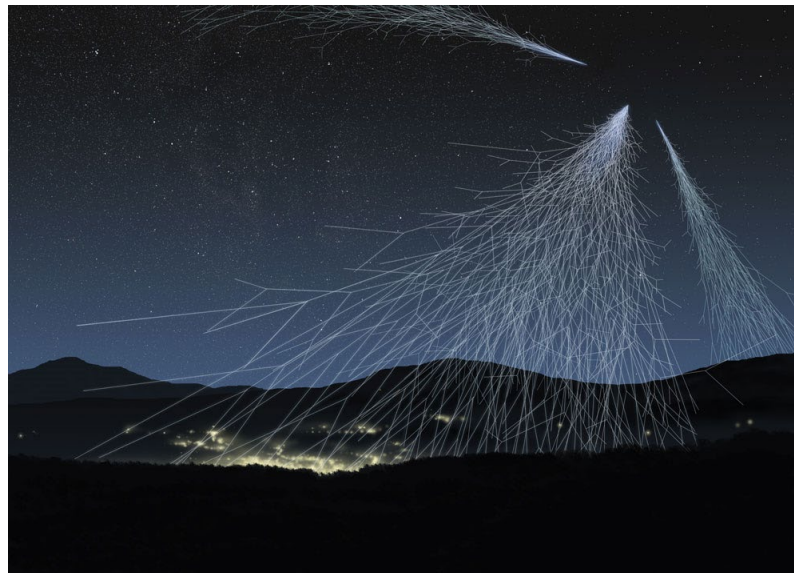
Una pioggia continua di particelle provenienti dallo spazio investe così l'atmosfera terrestre frantumandone i nuclei e inducendo una reazione a catena con la produzione di milioni e miliardi di particelle secondarie, principalmente elettroni, muoni e raggi gamma.

I raggi cosmici: uno sciame continuo di particelle ionizzanti

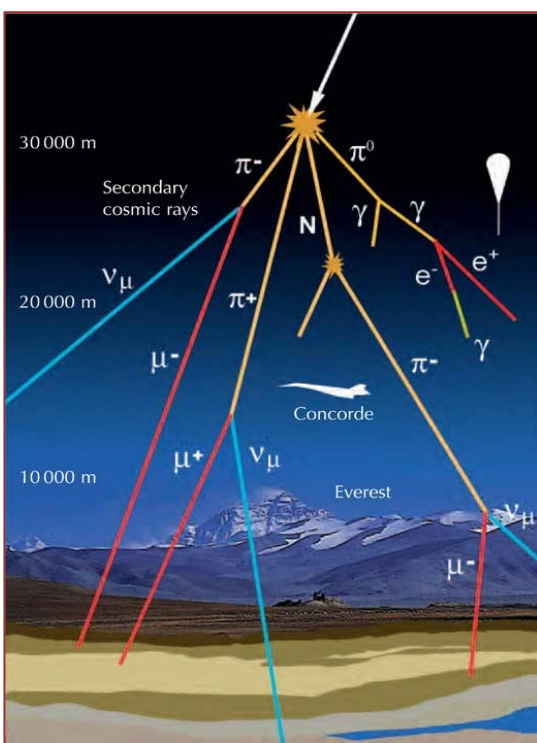


Il risultato è che il nostro corpo viene attraversato ogni momento da una radiazione naturale fatta di invisibili particelle elementari. Ogni secondo per ogni centimetro quadro del nostro corpo in media passa una particella cosmica.

Alle altezze di volo di un aereo (10-11 km), siamo colpiti dalla radiazione cosmica in misura 10-20 volte maggiore rispetto al suolo.



Oggi numerosi esperimenti studiano questa radiazione direttamente nello spazio (*satelliti*), nell'atmosfera (*palloncini*), sulla superficie terrestre (*array*), nel sottosuolo (*underground*) e nelle profondità marine (*undersea*)

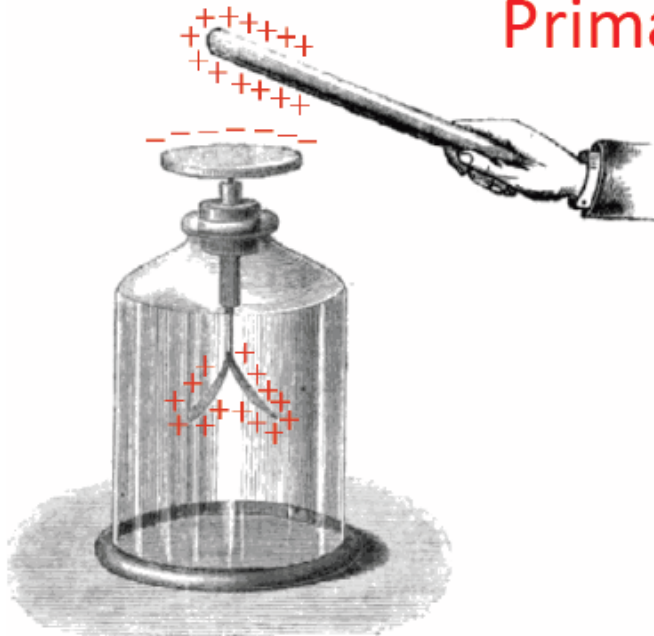




Come abbiamo
imparato tutto
questo?
Un'indagine lunga un
secolo...

*(Film prodotto da
F. Capra/W. Disney
nel 1957)*

Prima osservazione: un elettroscopio si scarica spontaneamente



- 1785: Coulomb scoprì che un elettroscopio carico, anche se perfettamente isolato, si scarica
- 1900: Le scoperte di Marie (33 anni) e Pierre Curie consentono di concludere che questa scarica spontanea è dovuta alla radioattività naturale
 - L'elettroscopio viene utilizzato come radiometro



(4 premi Nobel in questa foto)

La fisica a fine ottocento

Ma fu a fine ottocento che avvennero le scoperte fondamentali che aprirono la via alla fisica moderna.

- 1879 **William Crookes** scopre i raggi catodici
- 1895 **Wilhelm Conrad Röntgen** scopre i raggi X
- 1896 **Henri Becquerel** scopre la radioattività naturale
- 1897 **John Joseph Thomson** scopre l'elettrone
- 1899 **Ernest Rutherford** scopre i raggi α e poi i β e i γ .

La conclusione di questi studi fu che le molecole dell'atmosfera terrestre venivano ionizzate dalla radiazione naturale che proveniva dal suolo terrestre.



L'opinione dominante non venne accettata da Domenico Pacini, giovane fisico che lavorava all'Università di Roma

L'idea di Pacini: confrontare la radioattività alla superficie del mare con quella misurata sott'acqua (è l'inizio della fisica sottomarina)

Dal 1908, Pacini ha a disposizione il cacciatorpediniere "Fulmine", messo a disposizione dalla Regia Marina su richiesta del Direttore dell'IMG

- Se parte della radioattività non viene dalla Terra, dev'essere assorbita dall'acqua: sarà quindi minore nelle profondità marine
 - a 3 metri di profondità a Livorno (e poi in ottobre a Bracciano) Pacini riscontra, in accordo con la sua ipotesi, una riduzione del 20% della radioattività
 - Nel febbraio 1912 scrive sul Nuovo Cimento che esiste *"una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno."*



7 agosto 1912

Questa è la data che viene comunemente indicata come data di nascita della Fisica dei Raggi Cosmici. Quel giorno infatti Victor Franz Hess effettuò un volo in pallone raggiungendo i 5.350 metri di altezza. Egli portava con sé un elettroscopio a fibre di quarzo e un microscopio con scala graduata.

Con questo semplice strumento misurava l'intensità della radiazione ambientale e notò che essa diminuiva lentamente con l'altezza fino a stabilizzarsi verso i 700 metri.



Ma a partire dai 1500 metri di quota il segnale riprendeva a crescere fino ad arrivare, a 5.000 metri, a una intensità doppia di quella a terra.

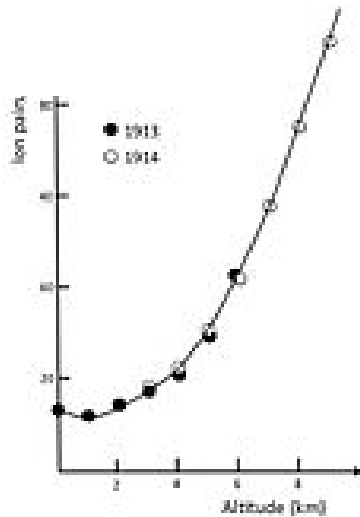
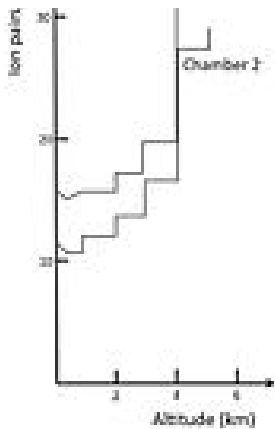
Inoltre, in successivi voli, trovò che il segnale aveva valori molto simili sia durante il giorno che durante la notte.



Conclusioni di Hess

“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)



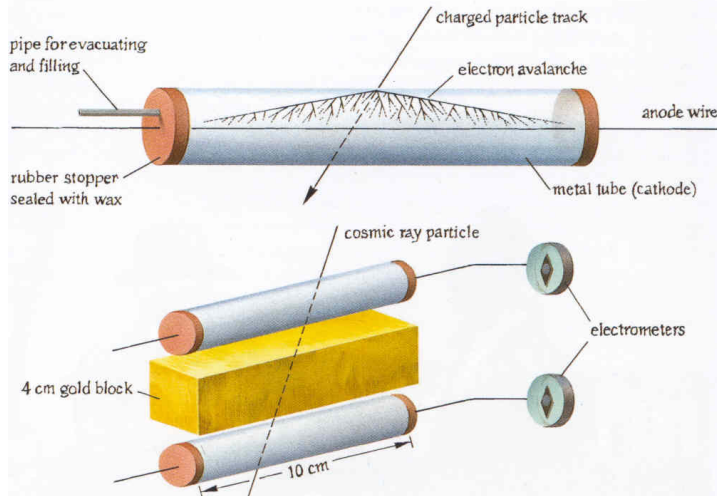
Inoltre Hess notò che il segnale non diminuiva sensibilmente neanche durante un eclisse solare, per cui concluse che la radiazione misteriosa non poteva essere generata dal Sole, ma doveva giungere dallo spazio.

Di qui il nome di:

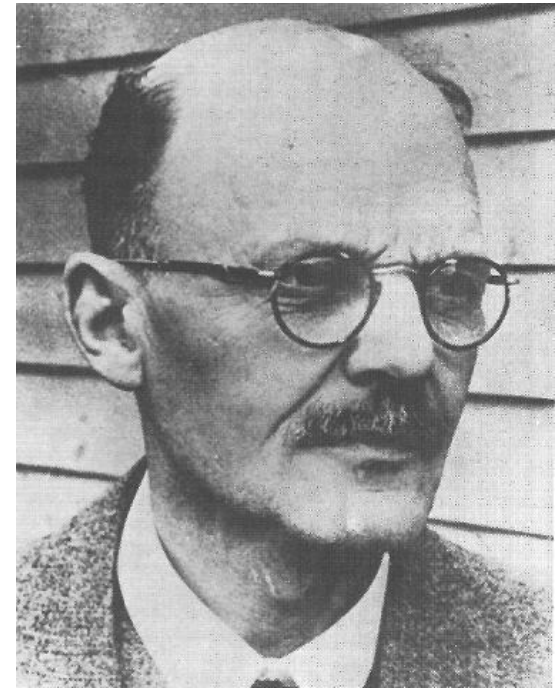
Raggi cosmici

1913

Geiger e Muller mettono a punto un rivelatore a gas, ex. miscela di argon e alcool, che permetteva misure molto più accurate anche su singole particelle ionizzanti. Inoltre consentiva di mettere in coincidenza due o più contatori.



I vantaggi di questo rivelatore erano l'alta sensibilità alle radiazioni, dovuta all'elevato campo elettrico: anche una particella debolmente ionizzante avrebbe prodotto una scarica nel contatore e quindi un segnale misurabile.



Hans Geiger

Questa tecnica permise a **Bothe e Kolorster** di costruire il primo telescopio per raggi cosmici e dimostrare che erano costituiti in gran parte da radiazione penetrante, in grado di attraversare grossi spessori di assorbitore.

I raggi cosmici NON erano quindi costituiti da raggi gamma, ma da particelle cariche altamente penetranti.

Bruno Rossi



Negli anni 30 **Bruno Rossi** inventò dei circuiti di coincidenza elettronici che permettevano di misurare coincidenze tra dispositivi posti a distanza tra loro, non più solo uno sopra l'altro.

Le coincidenze osservate non potevano essere quindi dovute a singole particelle, ma a più particelle che arrivavano a terra allo stesso istante.

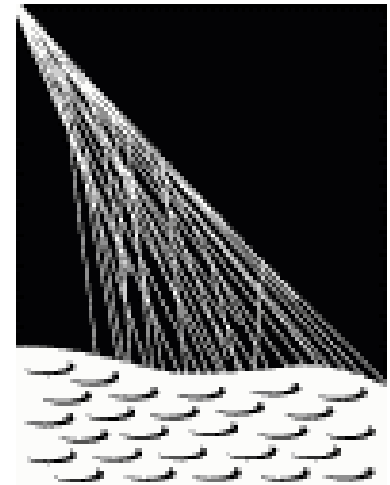
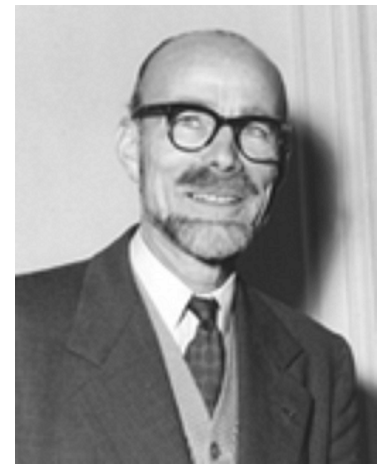
Con questa strumentazione Rossi scoprì l'esistenza degli sciami che investivano grandi superfici con un numero elevatissimo di particelle ionizzanti.

Pierre Auger

Nel 1938 **Pierre Auger** e **Roland Maze** dimostrano che contatori Geiger-Muller posti a diversi metri l'uno dall'altro registrano contemporaneamente l'arrivo di particelle da raggi cosmici, indicando così che esse sono particelle secondarie provenienti da una sorgente comune.

**E' la conferma definitiva dell'esistenza degli sciami atmosferici estesi
(Extensive Air Shower, EAS)**

La collisione di particelle primarie di alta energia con le molecole dell'aria produce una cascata di particelle secondarie che arriva fino alla quota di osservazione.



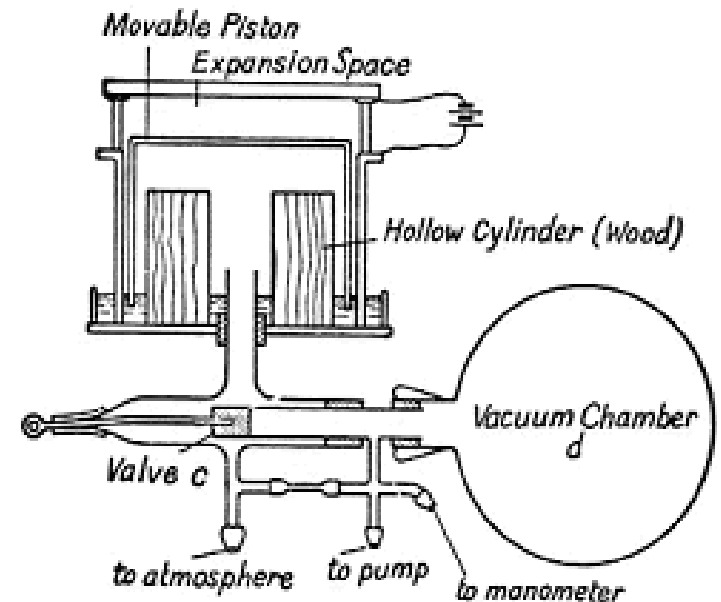
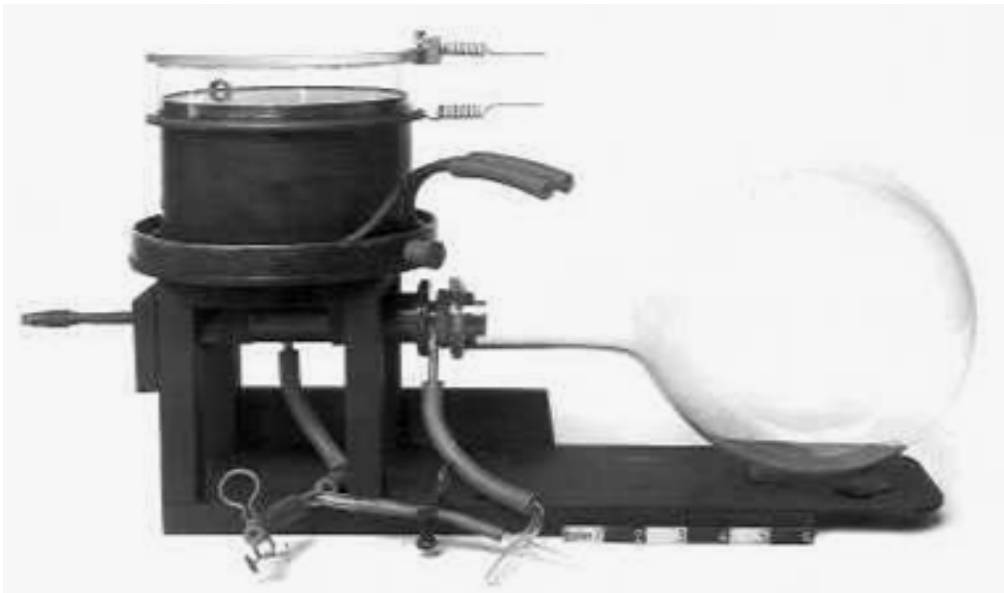
Registrando coincidenze tra contatori distanziati fino a 200 metri, Auger concluse che gli sciami osservati arrivavano fino a una energia di 10^{15} eV, energia strabiliante per quei tempi in cui il limite di energia osservato era solo di pochi MeV.

Camera a nebbia di Wilson (1912)

Primo strumento che permette di “vedere” le particelle e le loro interazioni. Consente inoltre di fotografare le tracce e quindi di fare misure quantitative sul loro potere penetrante.

Immersa in un campo magnetico permette di calcolare massa e carica della particella.

Ernest Rutherford la definì come *“the most original and wonderful instrument in scientific history.”*



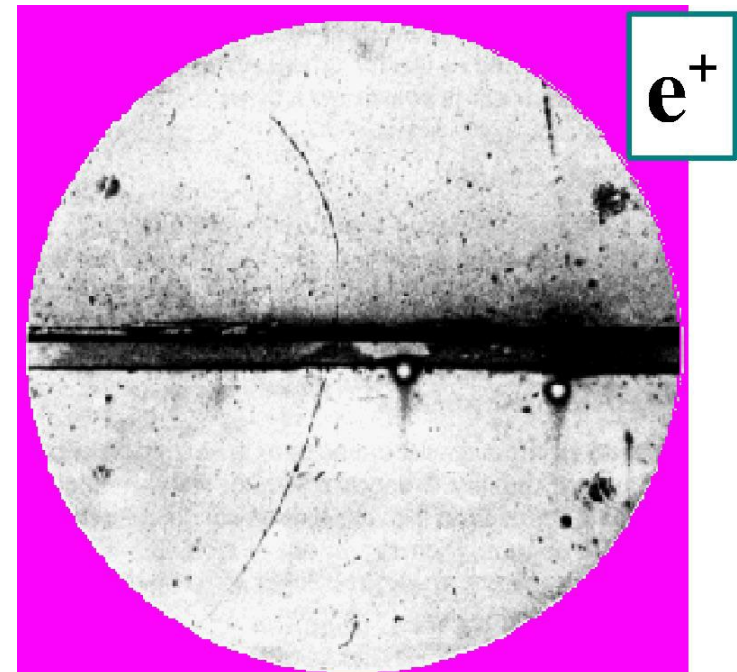
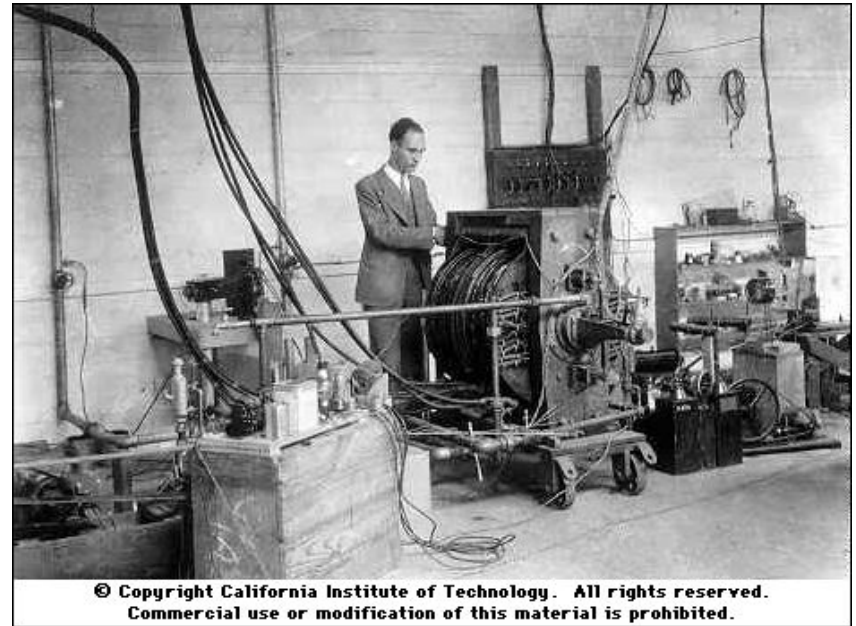
Carl Anderson

L'invenzione della **camera a nebbia** permise di “vedere” le particelle generate dai raggi cosmici e permise la scoperta di nuove particelle in essi contenute tra il 1920 e il 1930.

La camera immersa in un campo magnetico permetteva di risalire alla massa e al segno della carica delle particelle tramite la curvatura della traccia nel campo magnetico.

Nel 1932 Carl Anderson osservò la traccia di una particella della stessa massa dell'elettrone, ma di carica opposta.

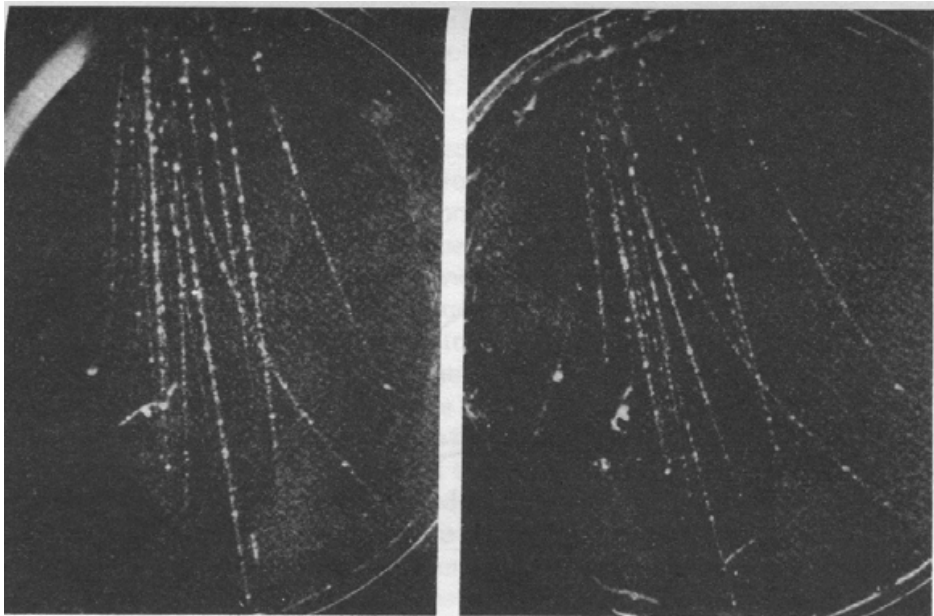
Aveva scoperto il positrone!



Patrick Blacket e Giuseppe Occhialini

Nel 1933 Blacket e Occhialini sfruttarono il sistema di coincidenza inventato da Bruno Rossi per generare un “trigger” tra due contatori Geiger-Muller posti sopra e sotto la camera a nebbia

In questo modo la camera non scattava alla cieca, e si potevano fotografare le tracce ogni due minuti, praticamente a colpo sicuro.

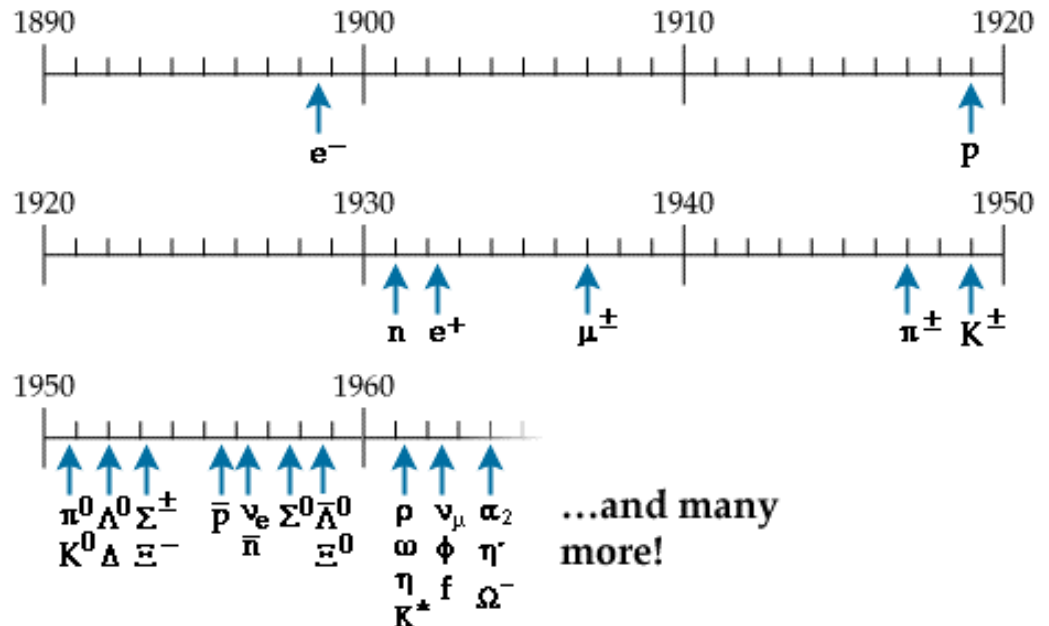
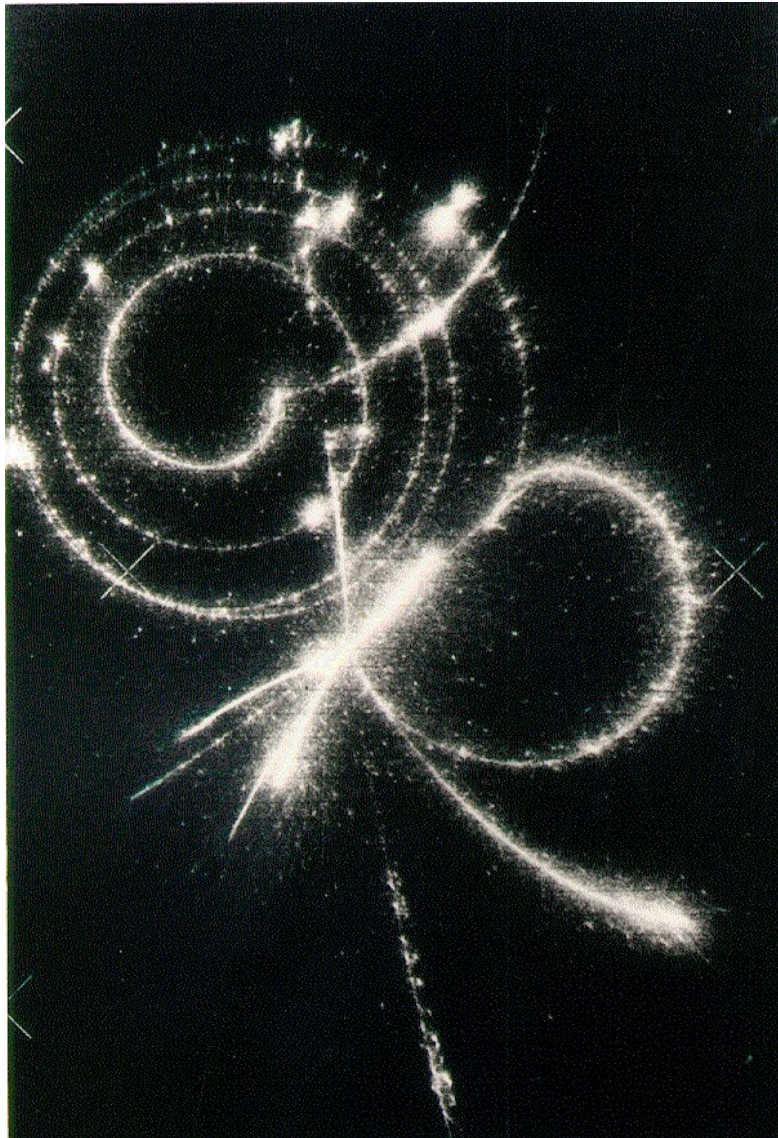


Fu così che si poterono per la prima volta fotografare gli **sciami** generati dalle interazioni delle particelle che interagivano con le pareti della camera.

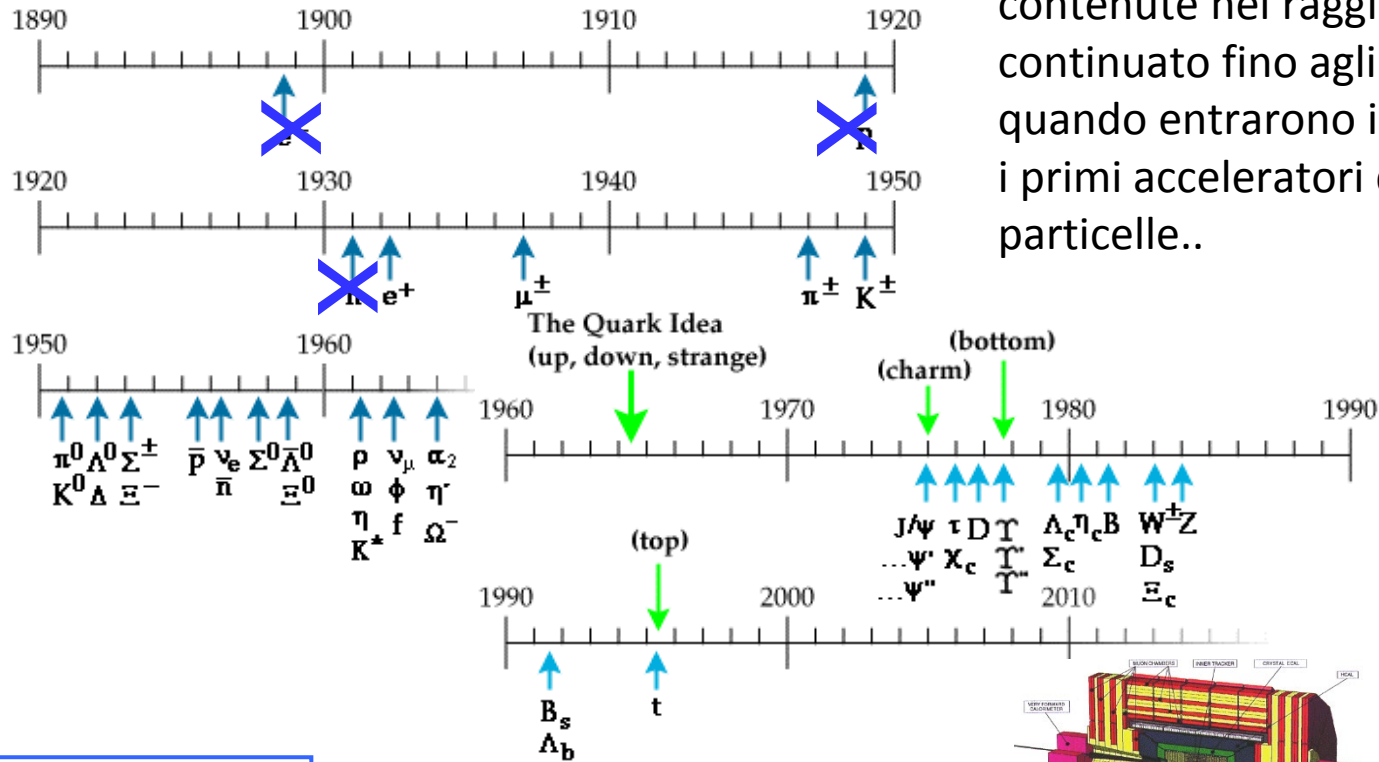
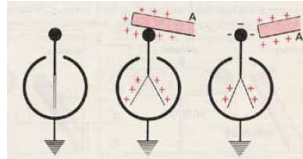
Il mesone μ

Nel 1937 **Carl D. Anderson** e **Seth H. Neddermeyer** e, in modo indipendente, **J.C. Street** e **E.C. Stevenson**, rivelano l'esistenza di una nuova particella a vita breve e di massa intermedia tra elettrone e protone. La nuova particella veniva deviata dal campo magnetico esterno con raggio di curvatura maggiore di quello degli elettroni ma minore di quello dei protoni. Di qui il nome di "mesone".

Alla particella viene dato il nome di mesone μ .

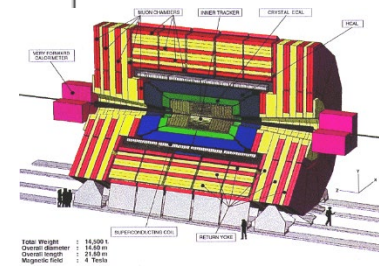


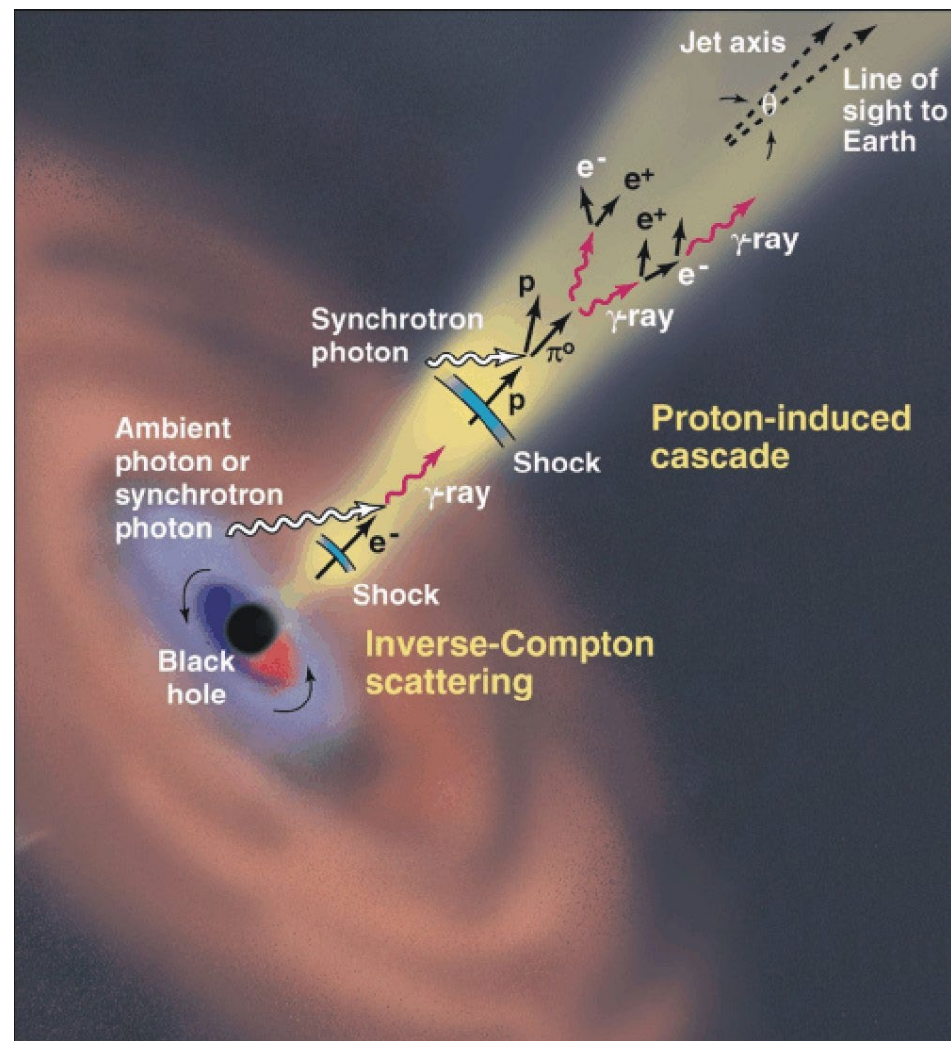
Lo "zoo" di particelle



Lo studio delle particelle contenute nei raggi cosmici è continuato fino agli anni 50 quando entrarono in funzione i primi acceleratori di particelle..

... e lo zoo continua a crescere ...





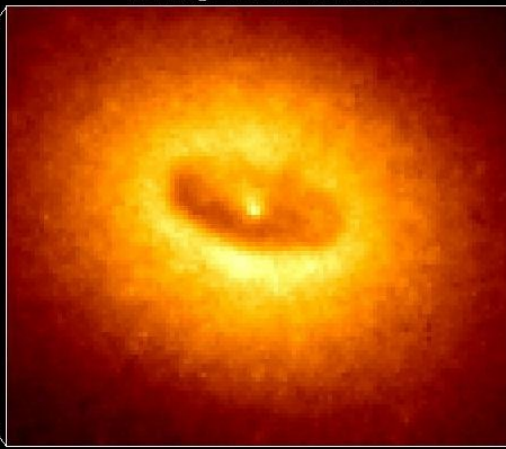
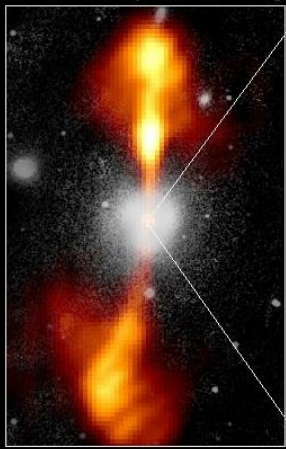
I raggi cosmici: messaggeri invisibili di un Universo in evoluzione.

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image

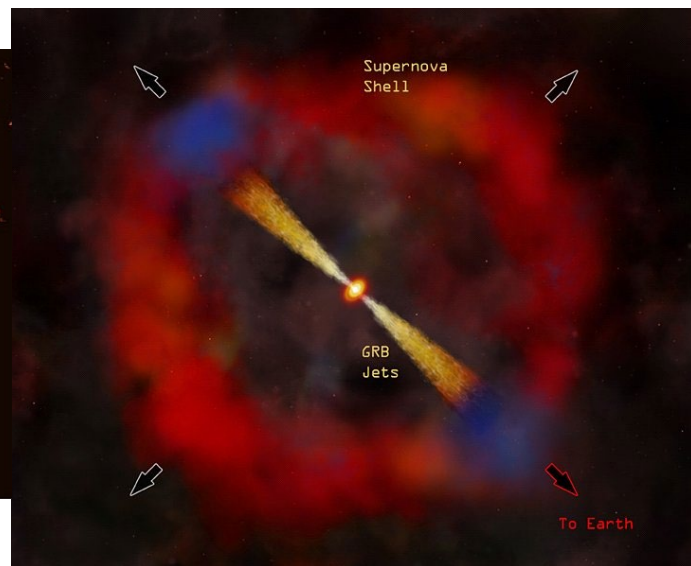
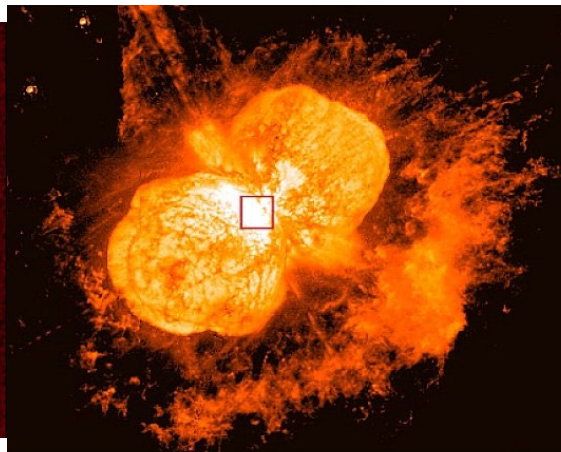
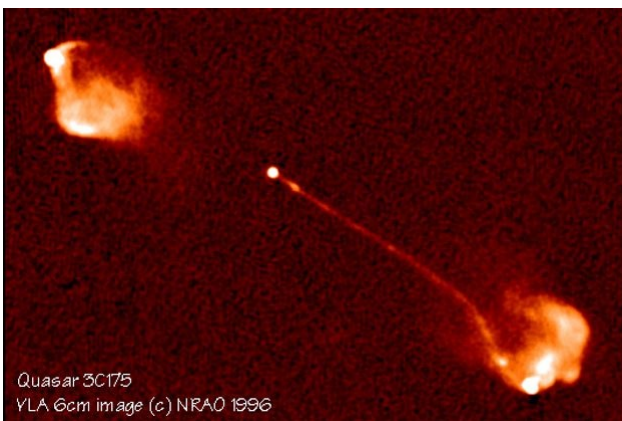
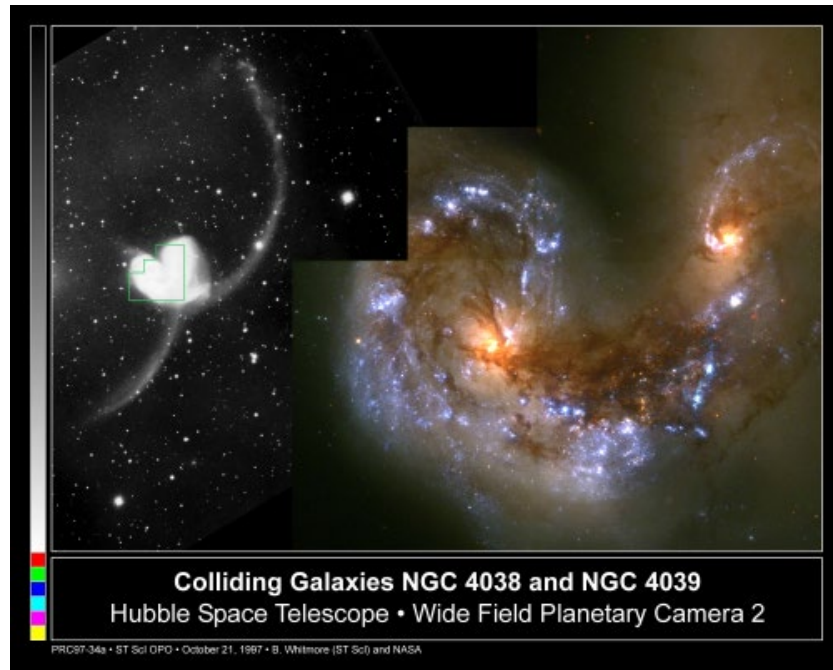
HST Image of a Gas and Dust Disk

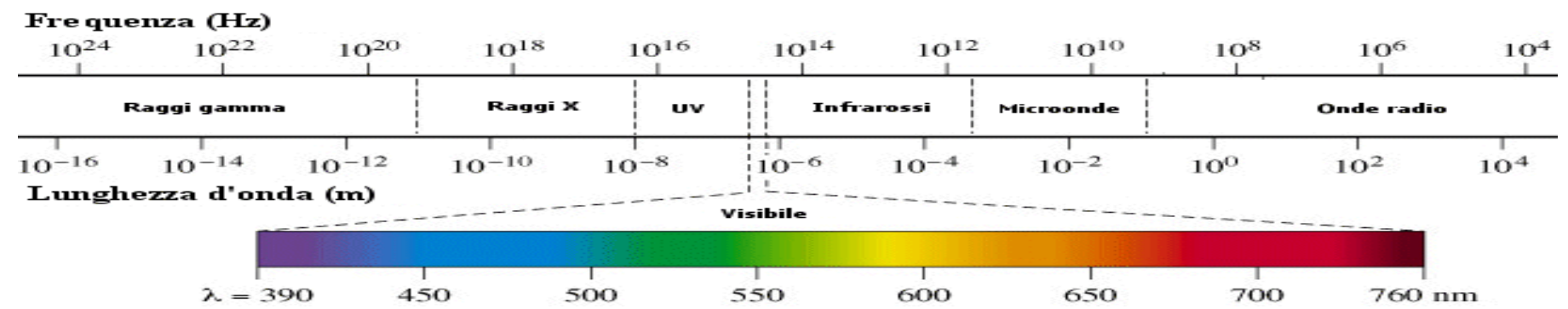


380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

I grandi cataclismi cosmici

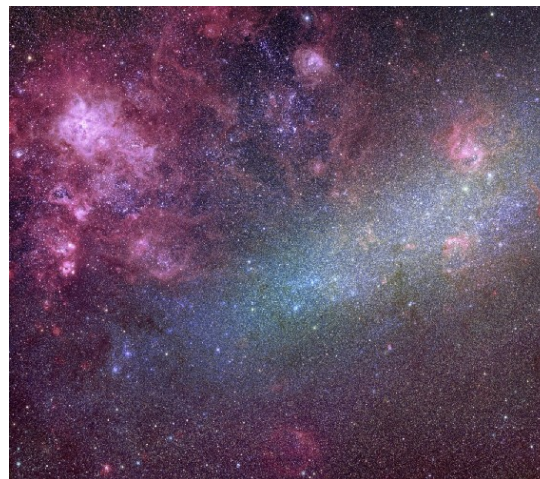




Il nostro occhio è sensibile solo a una piccolissima fetta dello spettro delle radiazioni che ci arrivano dall'Universo.

L'immagine di quest'ultimo cambia sensibilmente secondo la lunghezza d'onda a cui si guarda.

La Grande Nube di Magellano vista nell'ultravioletto, nel visibile e nell'infrarosso



Galactic Center region (visible light)



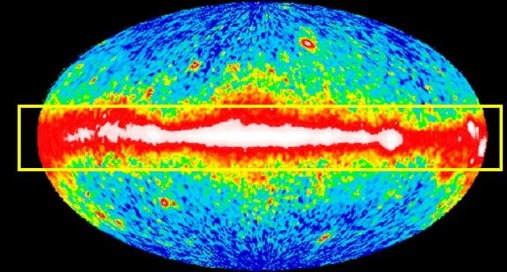
Galactic Center region (VISTA, infrared)



Unidentified γ -Ray Sources (UIDs)

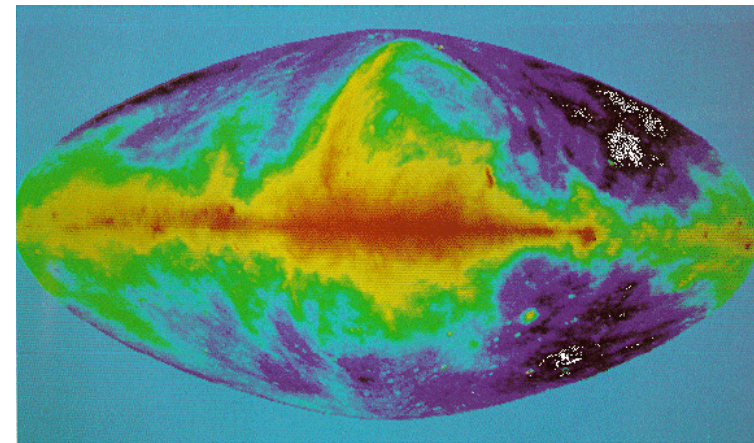
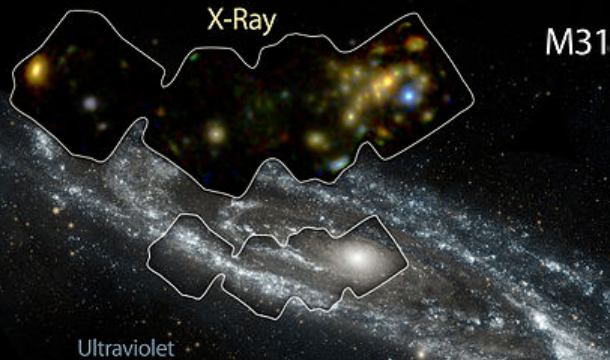
Out of 270 sources in the EGRET catalog (sources of > 100 MeV γ -rays), 170 are unidentified!

Also, about two dozen TeV γ -ray sources (detected by HESS, MAGIC) are unidentified.



Almost all within Galactic latitude $|l| < 30^\circ$

=> Almost certainly of Galactic origin

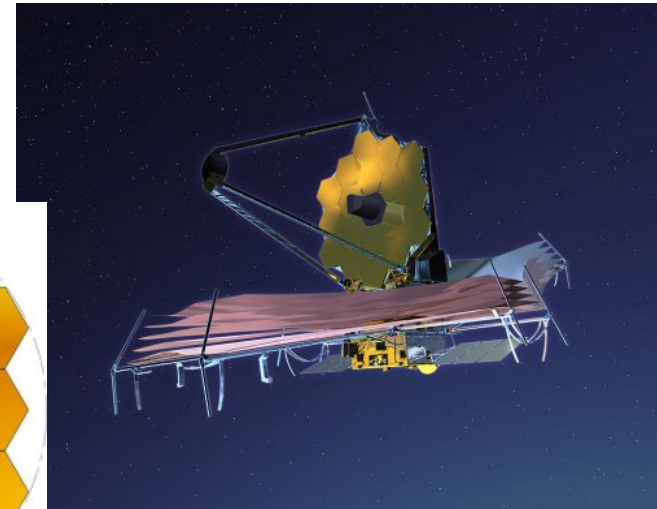
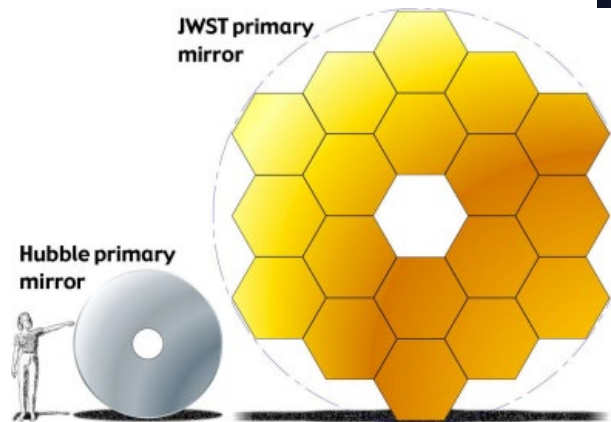
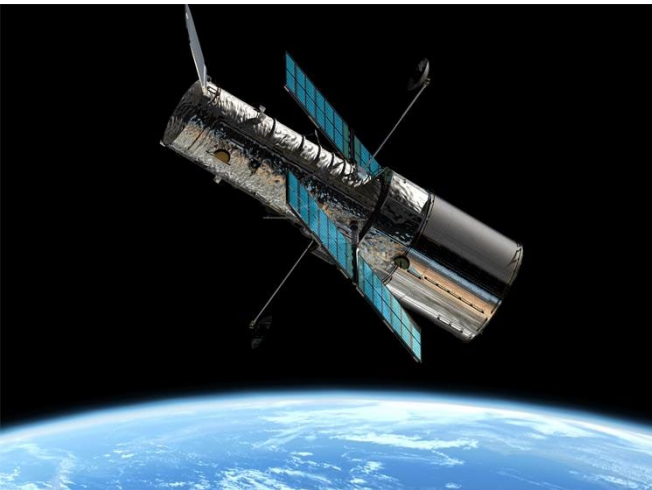


Radio View of the Milky Way

Occhi diversi mostrano cieli diversi

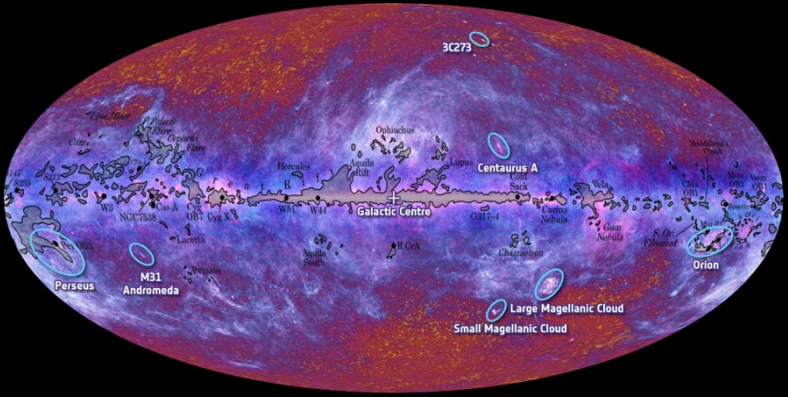
L'osservazione dell'Universo

Oggi abbiamo strumenti potentissimi che ci consentono di penetrare i segreti dell'Universo più profondo. Dal nostro infinitesimo pianetino arriviamo a esplorare quasi tutto lo spazio infinito!

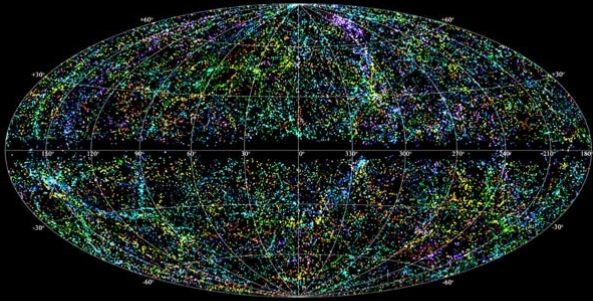


Universo a microonde

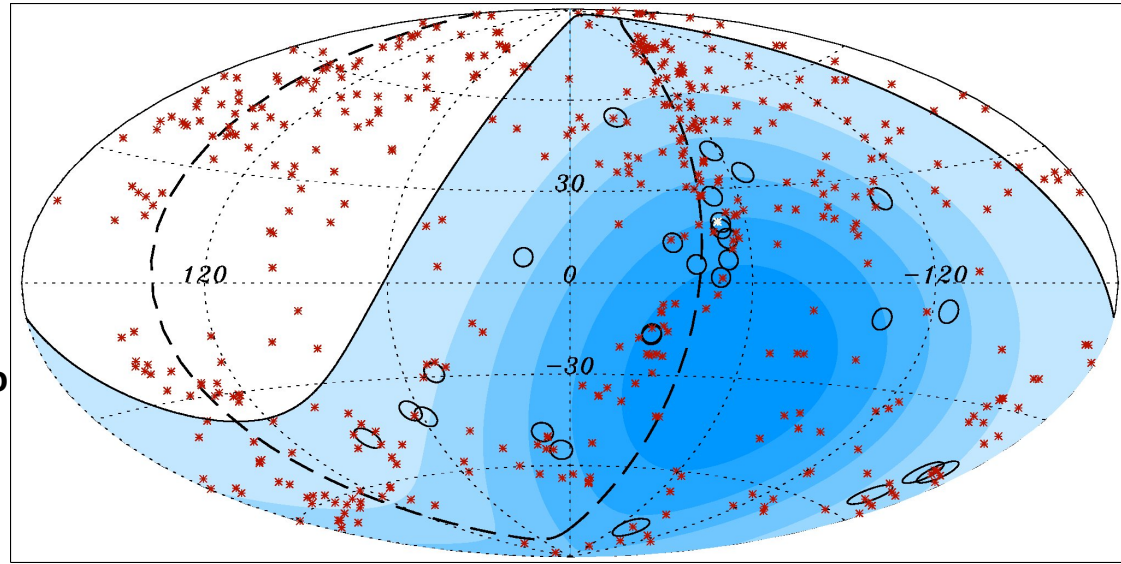
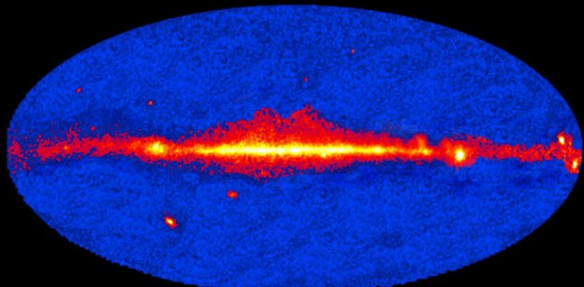
L'Universo in astroparticelle



Universo
visibile



Universo
in raggi
gamma

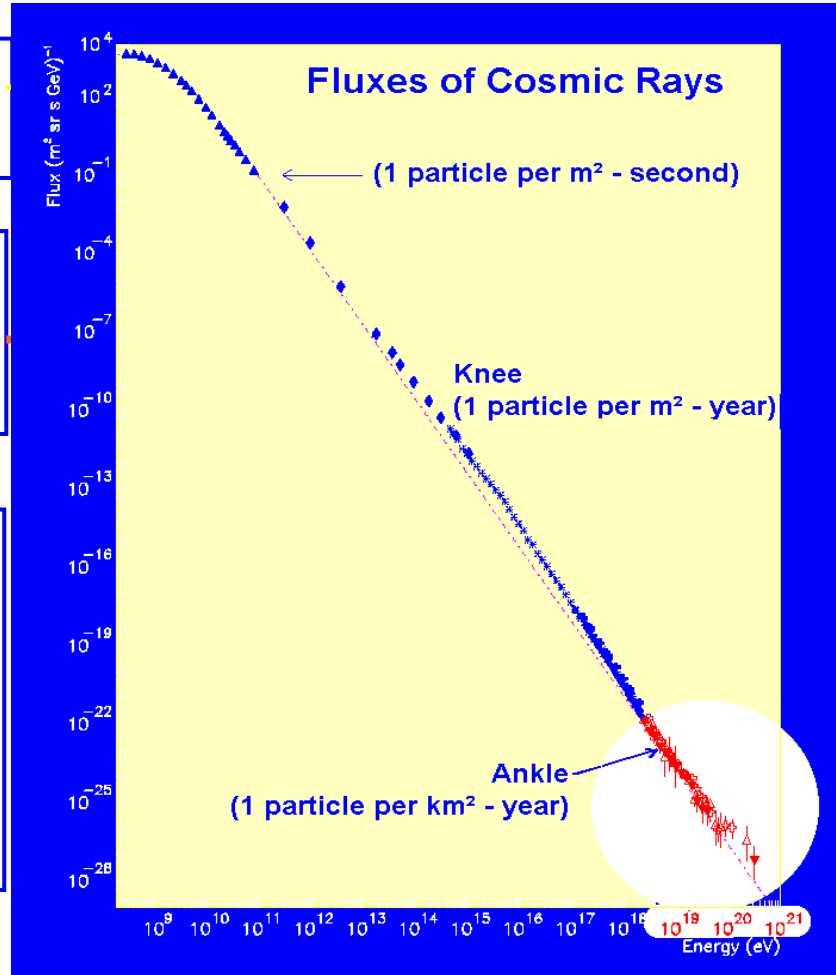


Origine dei raggi cosmici

$10^9 \div 10^{10}$ eV:
origine solare

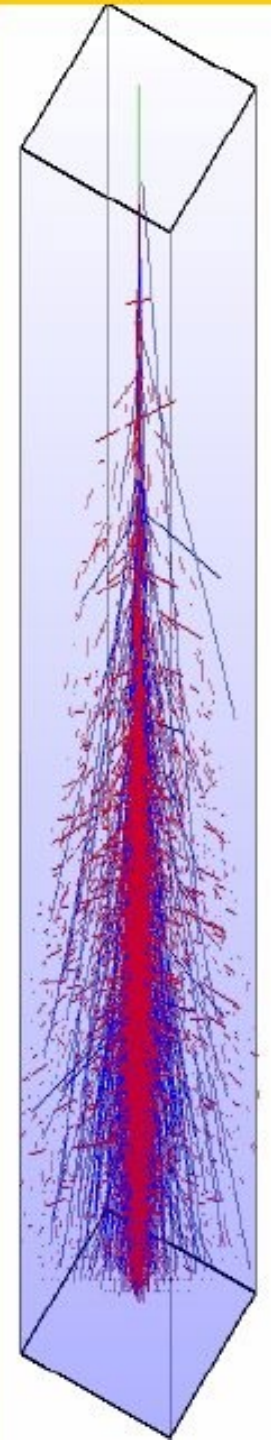
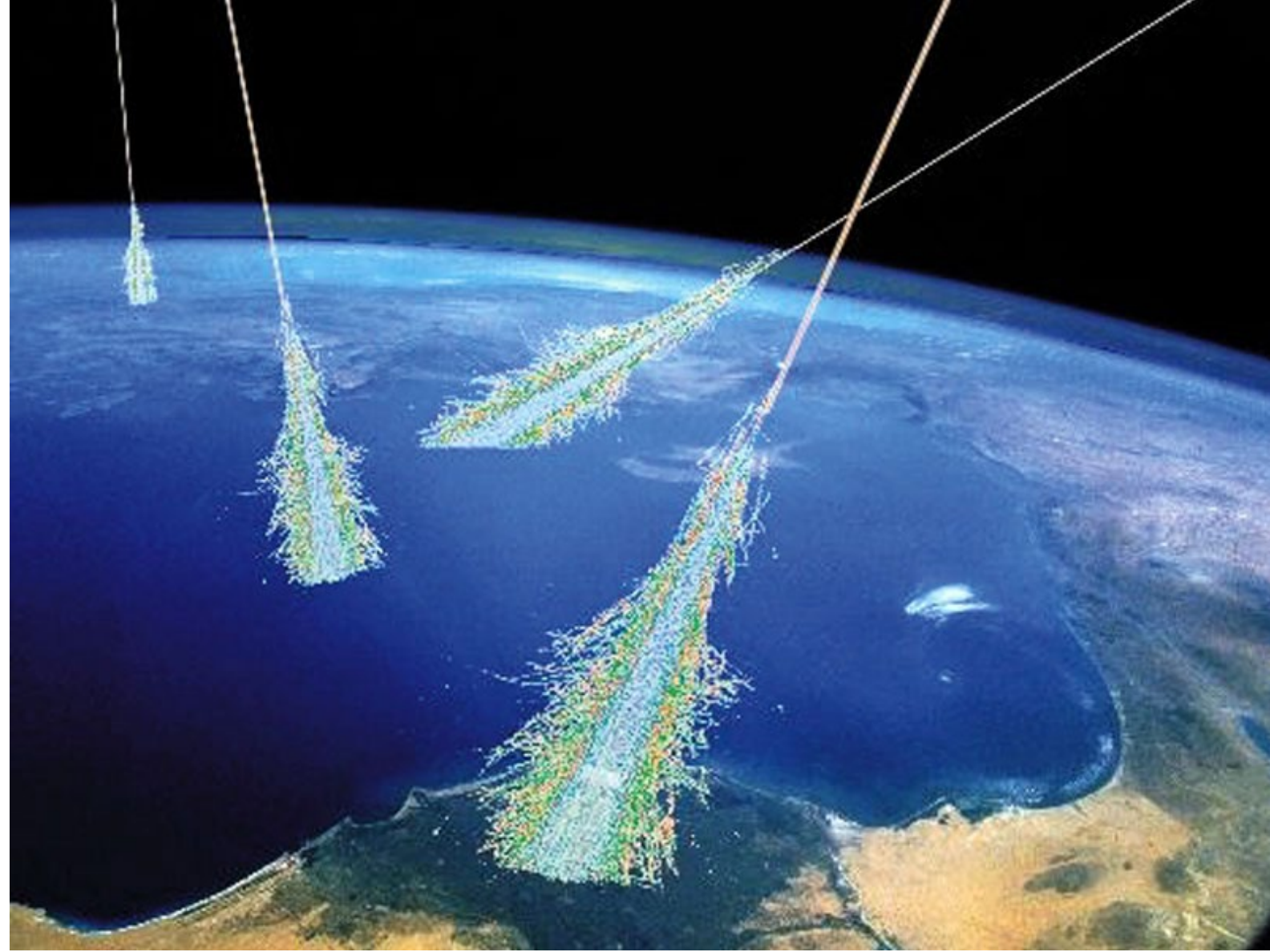
$10^{10} \div 10^{15}$ eV:
origine galattica
(esplosioni di SuperNovae)

$10^{15} \div 5 \times 10^{19}$ eV:
origine extragalattica
*(esplosioni di Super Novae,
pulsar con intensi campi
magnetici,
buchi neri,
nuclei galattici attivi)*



oltre 5×10^{19} eV:
origine ignota

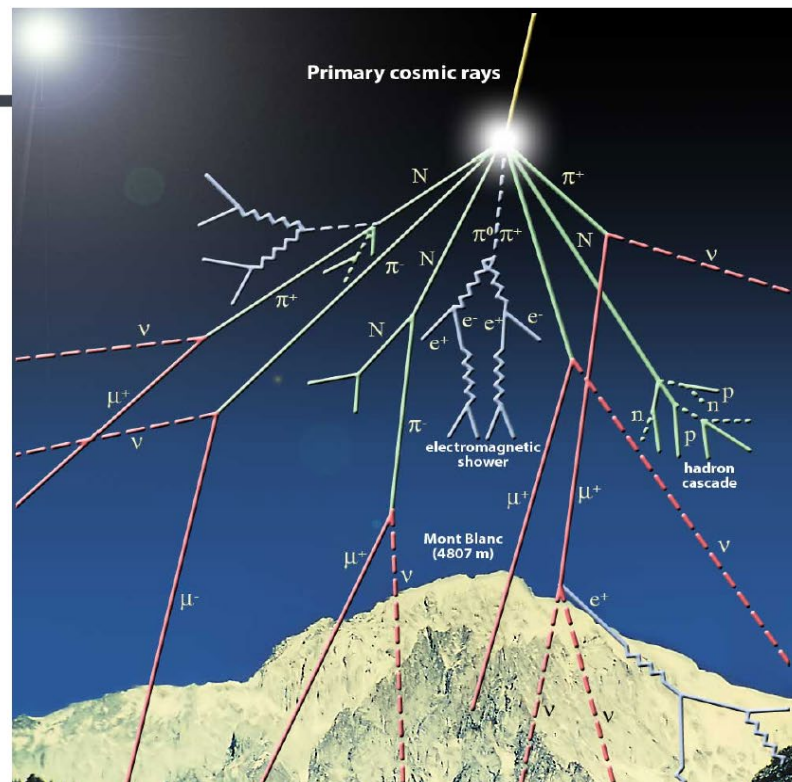
- *Collisioni tra galassie o ammassi di galassie, radio galassie ?*
- *Decadimento di particelle create subito dopo il Big Bang ?*



Gli sciami atmosferici

Cascate di particelle

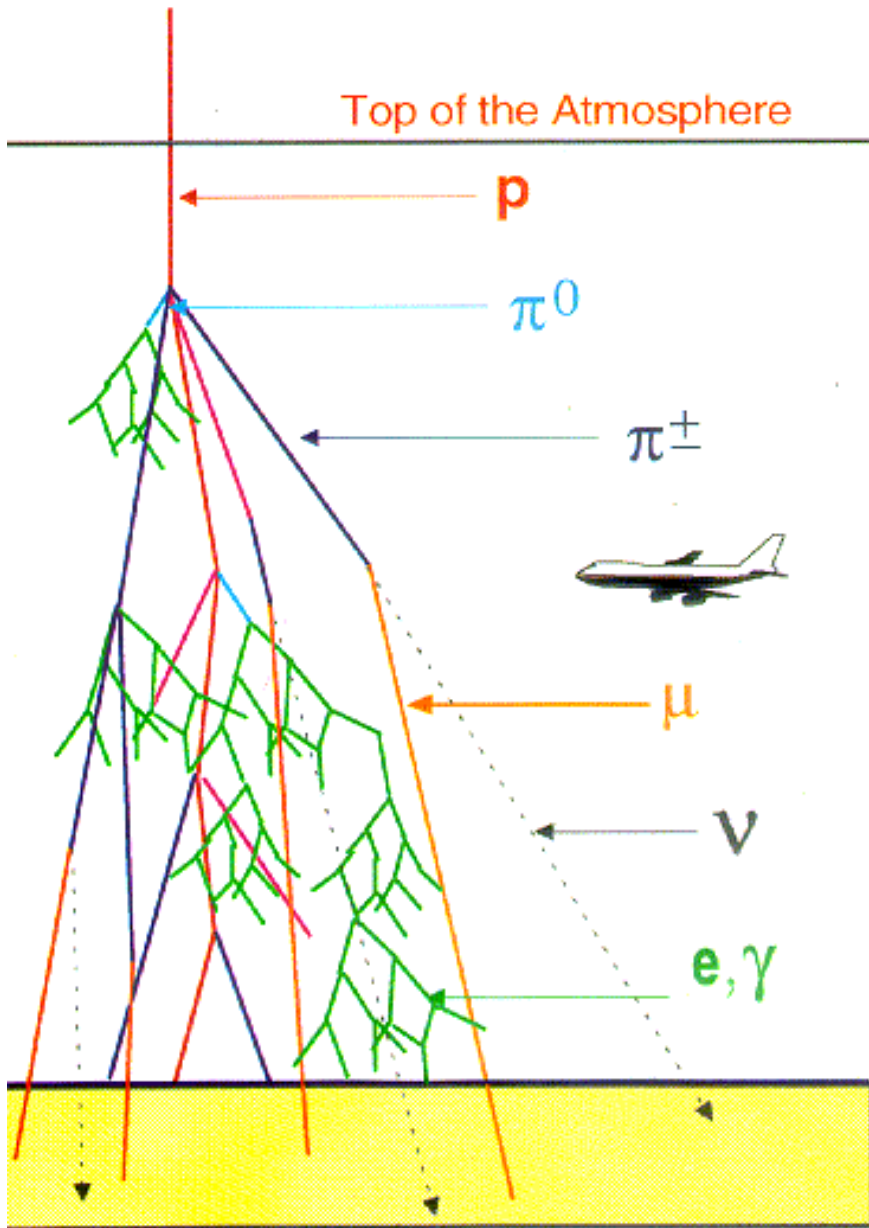
- In ogni momento, sopra la nostra testa si creano **cascate di particelle**
- Il processo che avviene più spesso è:
 - Protone \rightarrow pione \rightarrow **muone**
- Più tardi misureremo muoni:
 - Pesa circa come 200 elettroni
 - Vive molto a lungo: circa $2.2 \mu\text{s}$ (2.2 milionesimi di secondo)



In uno sciame atmosferico generato da un protone ($\sim 90\%$) o da un nucleo ($\sim 10\%$) nell'interazione con l'atmosfera terrestre si susseguono continue interazioni adroniche ed elettromagnetiche che generano tutte le possibili particelle originabili con quella energia:

Pioni carichi e neutri;
Mesoni di ogni genere;
Raggi gamma energetici;
Leptoni;
Neutrini

Caratteristiche alla quota di osservazione



A una quota di osservazione terrestre quello che si può rivelare è lo sciame prodotto dall'interazione del primario nei primi strati dell'atmosfera terrestre. L'informazione sulla sua natura è quindi degradata e si deve stimare da misure indirette.

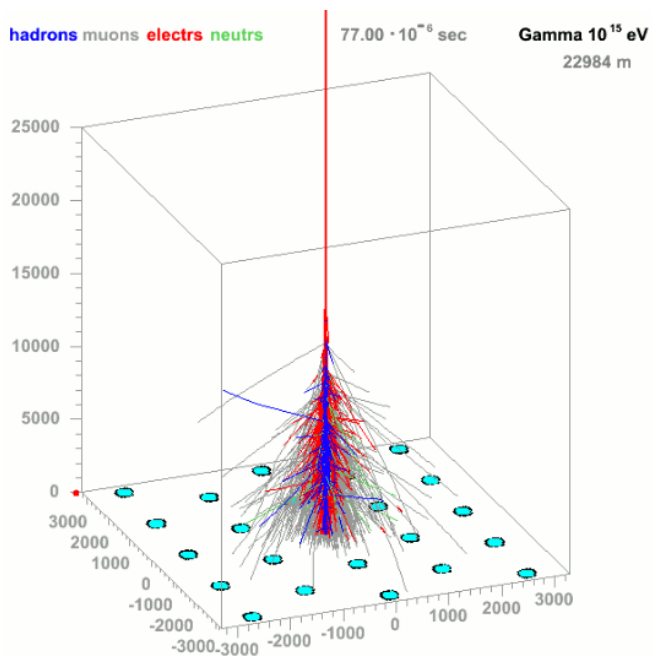
Durante la propagazione nell'atmosfera, le particelle dello sciame si sono allontanate sempre di più dall'asse e arrivano al suolo sparpagliate in aree la cui estensione dipende ovviamente dall'energia del primario.

Sviluppo di sciami di $E=10^{15}$ eV

ottenuti con il programma di simulazione Monte Carlo CORSIKA

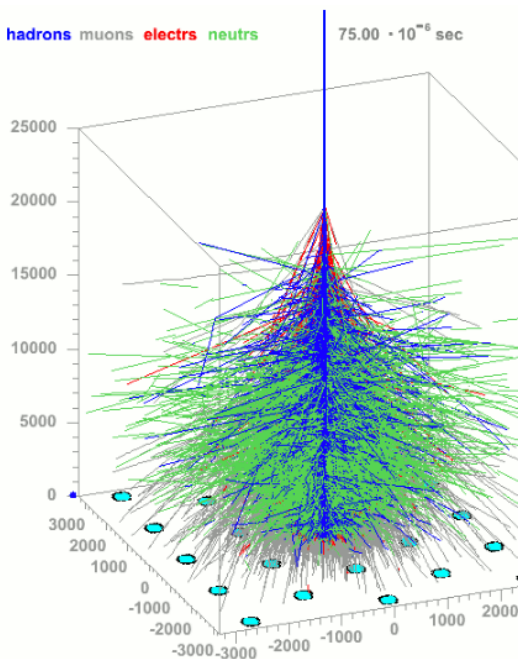
Fotone

$E=10^{15}$ eV



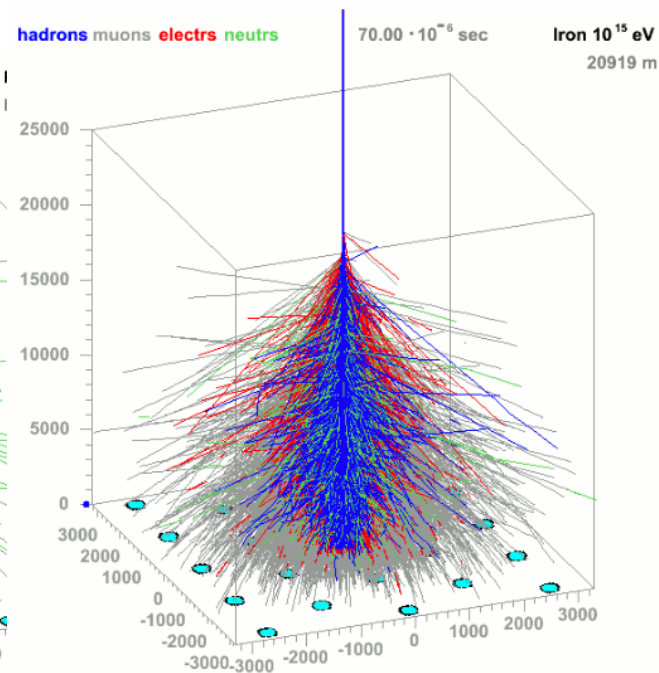
Protone

$E=10^{15}$ eV



Nucleo Fe

$E=10^{15}$ eV



Ogni secondo più di cento particelle di alta energia attraversano ciascuno di noi. Sono i raggi cosmici, hanno energie spesso molto maggiori di quelle che noi umani riusciamo a produrre, e provengono da sorgenti extraterrestri. Sono stati scoperti cent'anni fa grazie a un lavoro geniale e oscuro.

- La scoperta dei raggi cosmici ha coinvolto scienziati di tutto il mondo e si è svolta in un periodo caratterizzato da mancanza di comunicazione e dal nazionalismo causato principalmente dal clima pre- e post- grande guerra
- I raggi cosmici sono all'origine di grandi risultati in fisica fondamentale e in astrofisica, e a cent'anni dalla loro scoperta sono ancora la scienza di frontiera, piena di enigmi e di possibilità



Cieco chi guarda il cielo senza comprenderlo: è un viaggiatore che attraversa il mondo senza vederlo; è un sordo in mezzo a un concerto.

Camille Flammarion, astronomo