

Astrofisica Nucleare e Subnucleare

Cosmic Rays Astrophysics – I

slides from M.Spurio and M.C.Maccarone

I "raggi cosmici" sono un fenomeno naturale che ha origine al di fuori dell'atmosfera terrestre ma, fino agli albori del Novecento, non se ne prevedeva l'esistenza, ...

... gli esperimenti che ne hanno permesso la scoperta avevano piuttosto l'intento di studiare il fenomeno di ionizzazione dell'aria che, a quel tempo, si riteneva dovuto solo alla propagazione della radiazione naturale terrestre.

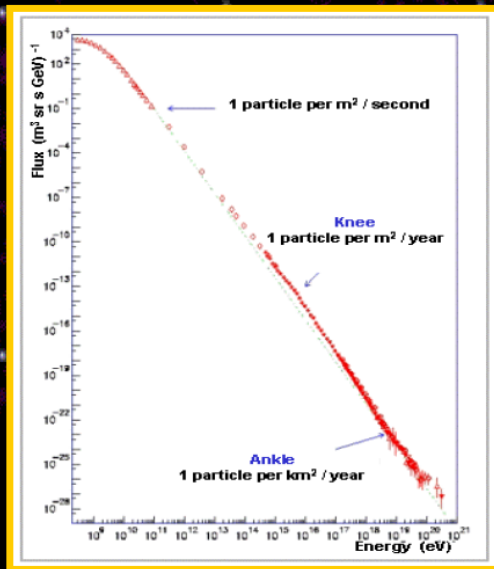
La ricerca nel campo dei Raggi Cosmici si è sviluppata come uno dei più spettacolari e vitali contributi alla scienza del XX secolo dando origine a nuove discipline scientifiche (fisica delle particelle elementari), nuove tecnologie (rivelatori, acceleratori), nuovi concetti in astrofisica (meccanismi di produzione e di accelerazione).

Nel corso di un secolo, la conoscenza del fenomeno "raggi cosmici" si è notevolmente arricchita ma ancora molte domande non hanno avuto risposta, particolarmente quelle relative ai cosiddetti EECR, i raggi cosmici di energia superiore a 5×10^{19} eV.

Oggi lo studio dei raggi cosmici di più alta energia è parte integrante delle "astroparticelle", campo multidisciplinare in cui convergono temi, conoscenze e problematiche di astronomia, astrofisica, fisica particellare e nucleare, fisica dell'atmosfera.

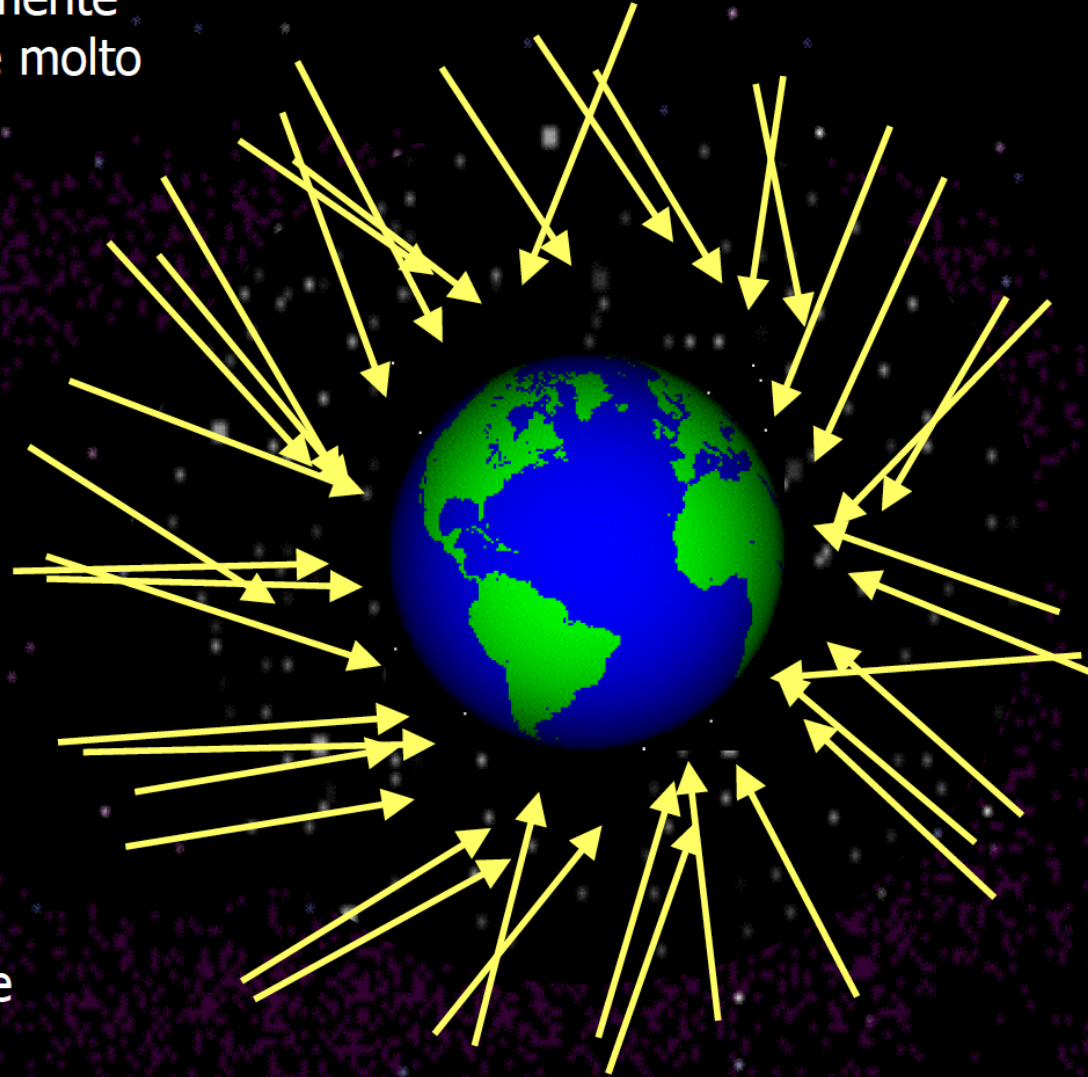
... ma cosa è un raggio cosmico (CR, Cosmic Ray) ?

I **raggi cosmici** sono principalmente particelle subatomiche cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra.



Lo **spettro energetico** (la curva che dà la variazione dell'intensità dei raggi cosmici in funzione della loro energia) inizia da circa 10⁹ eV e sembra non avere un limite superiore.

L'**atmosfera terrestre** assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.



La conducibilità elettrica e la ionizzazione dell'atmosfera

Alla fine del 18^{mo} secolo, Charles de Coulomb dimostrò per la prima volta che l'aria dell'atmosfera presenta una debole conducibilità elettrica. L'origine del fenomeno rimase a lungo oscura.

(oggi diremmo che gli atomi dell'atmosfera terrestre vengono continuamente "ionizzati" e che le cariche formate sono responsabili della conducibilità elettrica dell'aria dell'atmosfera stessa).

Dopo le fondamentali scoperte di fine Ottocento ...



1879 – i raggi catodici (William Crookes)

1895 – i raggi X (Wilhelm Conrad Röntgen)

1896 – la radioattività naturale (Henri Becquerel)

1897 – l'elettrone (John Joseph Thomson)

1899-(1900) – i raggi α , β , (γ) (Ernest Rutherford)

... venne ipotizzato che l'aria fosse ionizzata da misteriosi "raggi" originati dalla radiazione naturale emessa dal nostro pianeta.

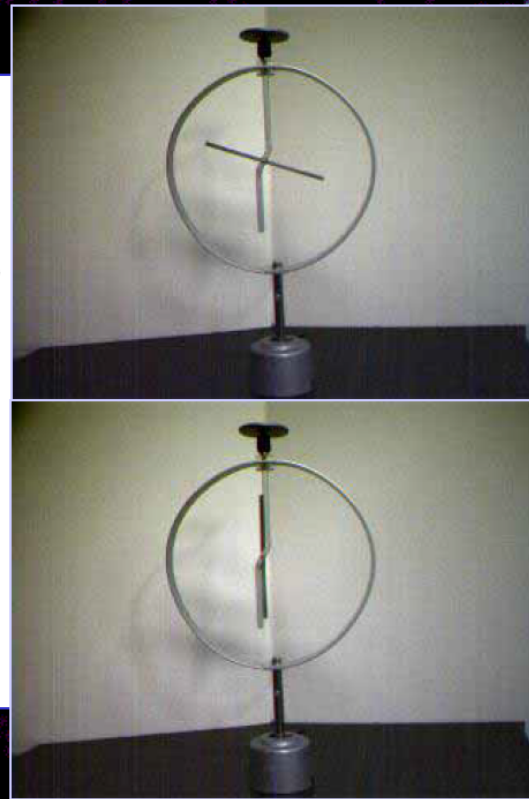
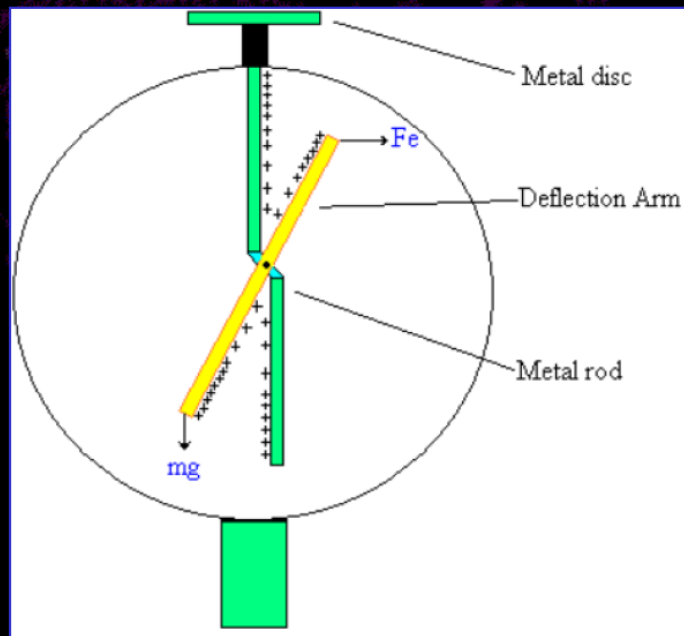
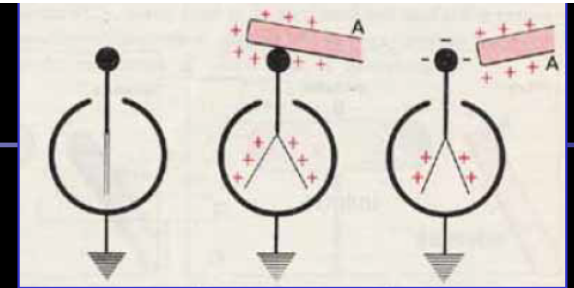


Gli esperimenti per lo studio dei misteriosi "raggi" utilizzavano principalmente gli elettroscopi



L'elettroscopio

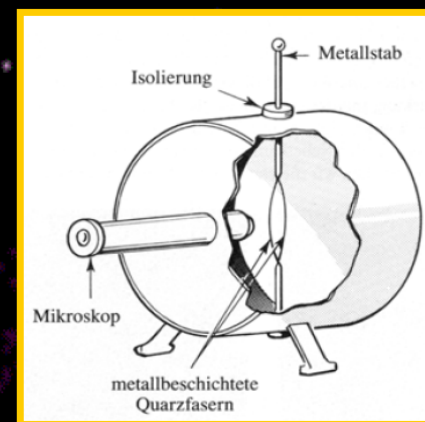
- I "bracci" dell'elettroscopio si respingono tanto più quanto maggiore è la carica presente;
- sottoposta a radiazione energetica, l'aria si ionizza parzialmente
- e l'elettroscopio si scarica tanto più velocemente quanto più intensa è la radiazione.



L'esperimento di Wulf

Nel 1907 Padre Theodore Wulf perfeziona l'**elettrometro**, un apparato strumentale stabile, resistente agli urti e alle vibrazioni, (composto da un elettroscopio a fibre di quarzo e da un microscopio con scala graduata), per misurare la radiazione naturale terrestre.

Era già noto che il segnale dovuto alla radioattività decresce in modo esponenziale quando ci si allontana dalla sorgente di radiazione.



L'elettrometro di Wulf

Nel 1910 Padre Wulf prova la strumentazione a Parigi sulla Tour Eiffel, a 300 metri di distanza al suolo: a dispetto di quanto atteso, trova che il segnale diminuisce molto meno del previsto !



Perché ?

- ☀ forse l'assorbimento in aria della radiazione naturale terrestre è più piccolo di quanto assunto ?
- ☀ oppure esiste un'ulteriore sorgente di radiazione nell'alta atmosfera ?

Domenico Pacini



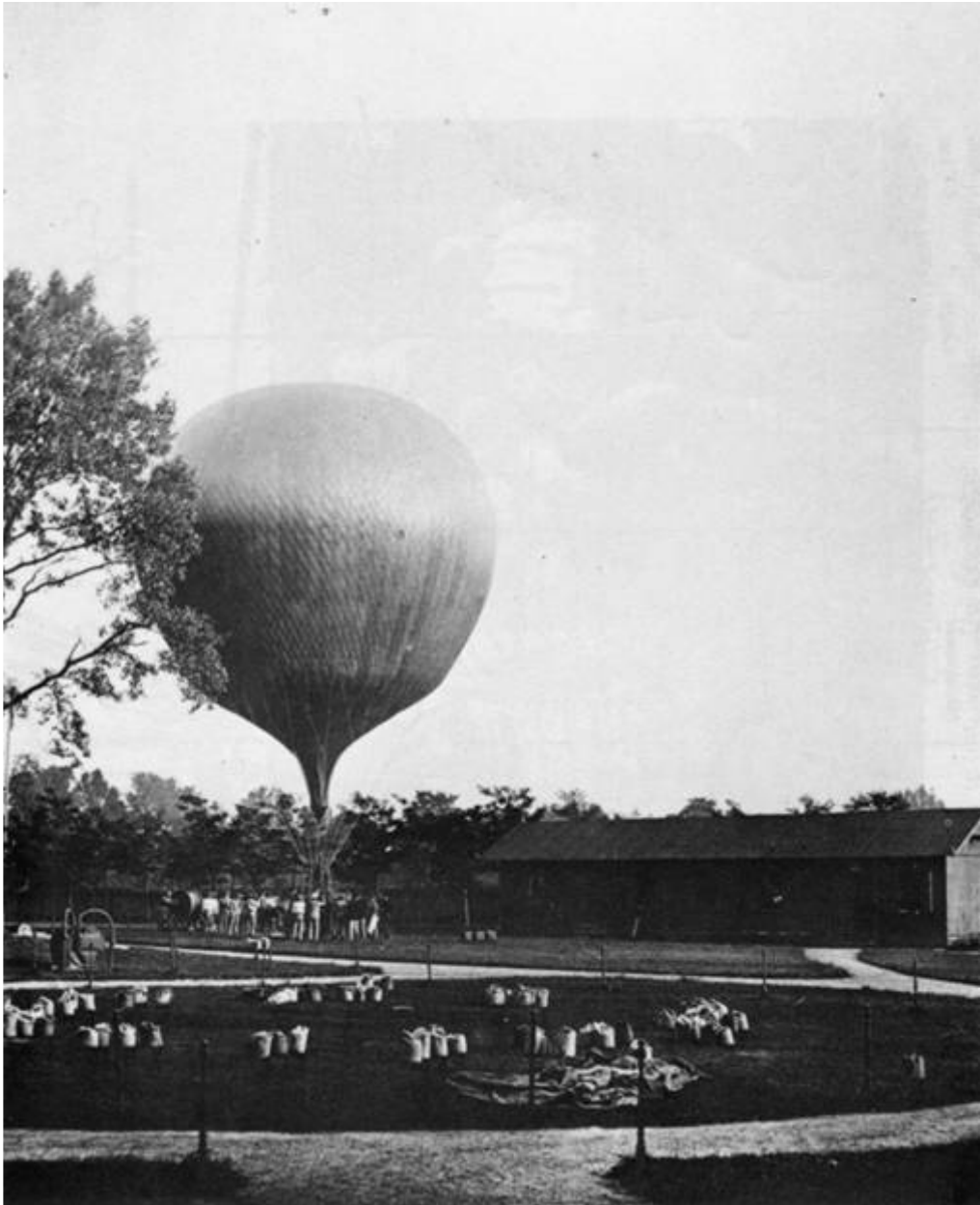
LA RADIAZIONE PENETRANTE ALLA SUPERFICIE ED IN SENO ALLE ACQUE.

NOTA DI D. PACINI.

Le osservazioni eseguite sul mare nel 1910 *) mi conducevano a concludere che una parte non trascurabile della radiazione penetrante che si riscontra nell'aria, avesse origine indipendente dall'azione diretta delle sostanze attive contenute negli strati superiori della crosta terrestre.



L' esperimento di Hess



- Nel 1912, Hess caricò su un pallone aerostatico un dispositivo per misurare le particelle cariche.
- Nel volo, si dimostrò come la radiazione aumentava con l'altitudine.
- Questo significava che la radiazione sconosciuta non aveva origine terrestre (come la radioattività naturale) ma proveniva dallo spazio esterno, da cui il nome di **Raggi Cosmici**

L'esperimento in pallone di Victor Hess

Utilizzando una versione migliorata della strumentazione di Wulf (compensazione per le variazioni di temperatura e pressione, sistema ottico modificato per letture più accurate), **Victor Franz Hess** iniziò nel 1911 una serie di esperimenti salendo in quota con palloni aerostatici.



Il volo del **7 agosto 1912** (6 ore da Aussig a Pieskow) raggiunse la quota di 5350 metri.

Man mano che il pallone si innalzava dal suolo, il livello di ionizzazione, come osservato da Wulf, diminuiva molto più lentamente di quanto atteso, fino a stabilizzarsi verso i 700 metri.

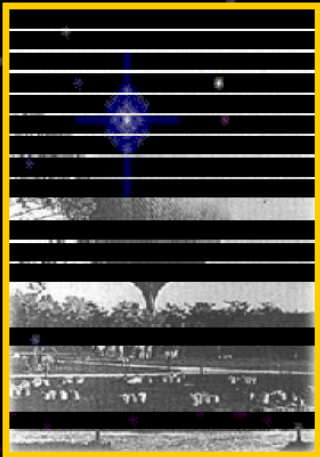
A partire dai 1500 metri di quota, il segnale iniziò a crescere finché a 5000 metri raggiunse un livello addirittura doppio del segnale di fondo che la strumentazione misurava al suolo.

Hess ne concluse che:

“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.”



V. Hess a bordo della gondola



Pallone del 1912

Durante la campagna di voli del 1912, Victor Hess trovò inoltre che:
il segnale di ionizzazione (e quindi l'intensità della radiazione)

- aveva valori molto simili sia durante il giorno che durante la notte,
- non diminuiva sensibilmente nel caso di eclissi solare (volo del 12 aprile).

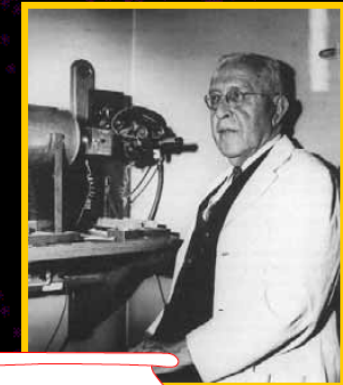
Da ciò egli concluse che :

- il Sole non poteva essere la sorgente primaria della "misteriosa radiazione",
- la radiazione dovesse giungere dallo spazio esterno più lontano del Sole.



E' la scoperta della
"Höhenstrahlung",
la "radiazione proveniente dall'alto"

Victor Hess venne in seguito riconosciuto quale
"padre ufficiale della fisica dei raggi cosmici"



Nobel Prize

1936

Victor Hess

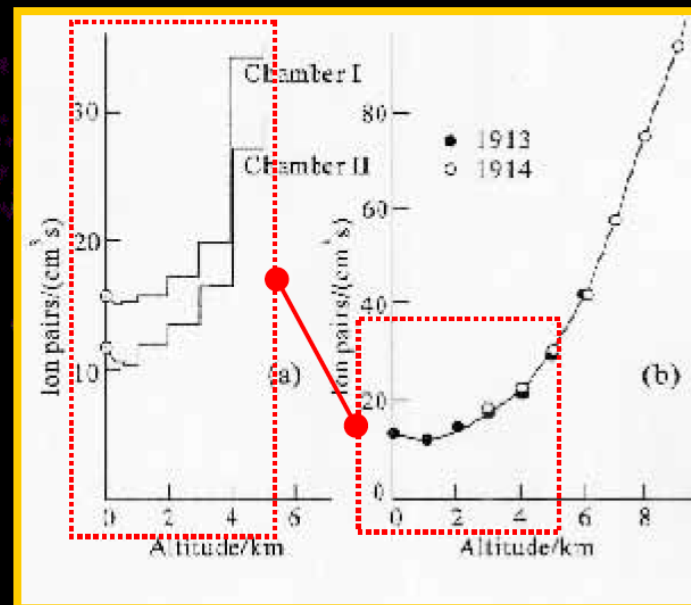
Nota: i "raggi cosmici" (o "radiazione cosmica") furono così denominati nel 1925 da Robert Millikan che credeva fossero raggi gamma di alta energia. Oggi sappiamo che la maggior parte della radiazione cosmica è formata da particelle (sub)nucleari, compresi elettroni e neutrini, piuttosto che da radiazione elettromagnetica, ma il termine "raggi cosmici", nella sua più moderna definizione introdotta da Dmitry Skobelzyn nel 1928, è rimasto nell'uso comune.



Dopo la scoperta della Höhenstrahlung furono portati a termine vari esperimenti (in palloni aerostatici, con palloni sonda, in aereo, nei laghi, in montagna, nei ghiacciai) da diversi ricercatori (in Europa e negli Stati Uniti) per capire l'origine e la natura della radiazione e per valutarne il coefficiente di assorbimento.

Durante una campagna di voli in pallone negli anni **1913-1914**, **Werner Kolhörster** conferma i risultati di Hess; inoltre, raggiungendo la quota di 9300 metri, egli conferma l'aumento della ionizzazione anche a quella altezza, e trova che il coefficiente di assorbimento è molto più basso di quello relativo ai raggi gamma.

Ma gli studi, rallentati dagli eventi della Prima Guerra Mondiale, non riescono ancora a dare risposta alle domande sull'origine e natura della "radiazione molto più penetrante dei più energetici raggi gamma":



Variatione della ionizzazione con l'altezza (a) Hess (1912); (b) Kolhörster (1913,1914).

?

Origine:

- negli strati più alti dell'atmosfera ?
- nel Sole ?
- altrove nel cosmo ?

?

Natura:

- radiazione elettromagnetica di altissima energia (ultra-gamma) ?
- elettroni super-veloci ?

- Millikan, nel 1925, diede il nome di **raggi cosmici** a questa radiazione: egli riteneva che fossero composti principalmente da raggi gamma.
- Compton ipotizzò, al contrario, che i RC fossero particelle cariche: successive misurazioni dimostrarono la validità di questa ipotesi. La distribuzione dei RC, infatti, variava con la latitudine magnetica, come ci si attende per le particelle cariche sotto l'influenza del campo geomagnetico terrestre.
- Nel 1930 il fisico italiano Bruno Rossi notò che, se la carica delle particelle era positiva, esse dovevano provenire in maniera preferenziale da est. Thomson verificò sperimentalmente l'intuizione dell'italiano.
- A partire dagli anni '30 sino alla nascita dei primi acceleratori di particelle, la storia della fisica delle particelle coincide con quella dei Raggi Cosmici
- Si pose la questione sull'origine e la provenienza dei raggi primari. Nascita dell'astrofisica dei RC (scuola russa, anni '60) "The Origin of Cosmic Rays", Ginzburg and Syrovatskii. (1964)

I "raggi di Millikan" e i "raggi cosmici"



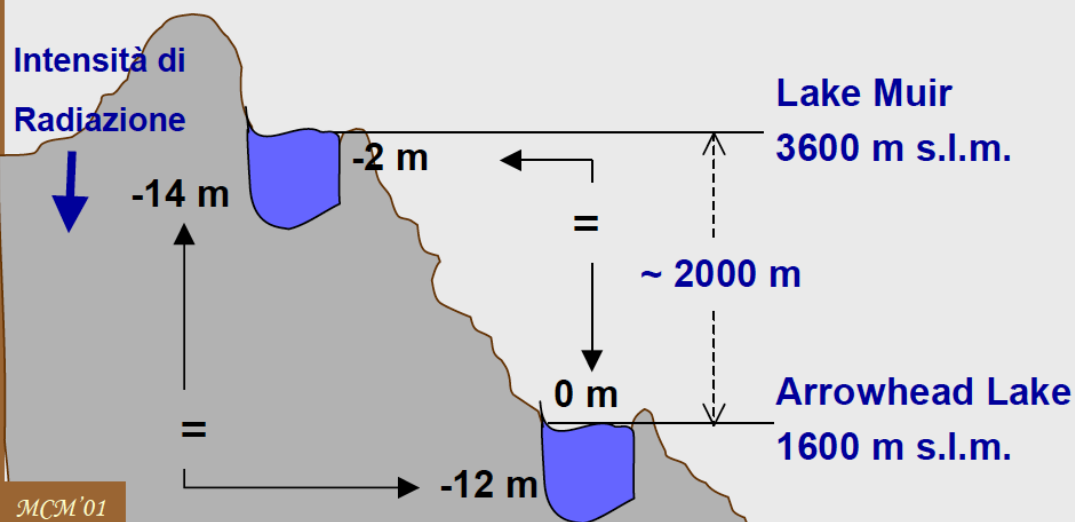
In California Robert Millikan e George Cameron misurano la ionizzazione nelle acque di due laghi di montagna alimentati dallo scioglimento delle nevi "per definire una volta per tutte la questione dell'esistenza o meno di una piccola radiazione molto penetrante di origine cosmica".



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

Camera a ionizzazione usata da Millikan

$$\text{Assorbimento [3600m} \div \text{1600m]}_{\text{Atmosfera}} \equiv \text{Assorbimento [2m]}_{\text{Acqua}}$$



Dai risultati ottenuti, Millikan e Cameron conclusero che:

- la radiazione penetrante esiste,
- è di origine cosmica.

Millikan, erroneamente convinto che la radiazione fosse solo di natura elettromagnetica (raggi gamma di alta energia), conìò per essa il termine

" Raggi Cosmici"

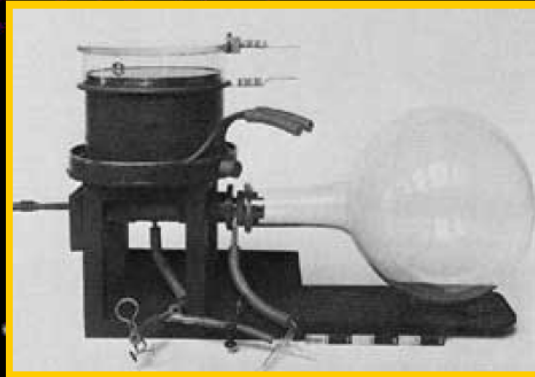
“La storia degli strumenti di fisica coincide con la storia della fisica stessa”

(Rita Brunetti, 1890-1942)

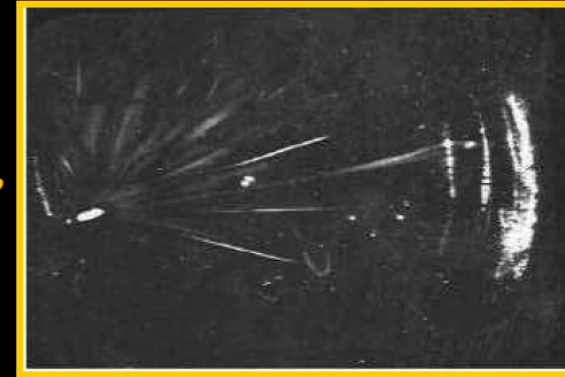
La “camera di Wilson” o “camera a nebbia”

La “camera a nebbia”, inventata da **Charles T.R. Wilson** nel **1911**, fu il primo strumento a permettere l’analisi visiva delle particelle ionizzanti. Il passaggio di una tale particella nella camera, riempita di vapore soprassaturo, provoca una condensazione di ioni lungo la sua scia. In questo modo è possibile osservarne a occhio nudo la traccia ed anche fotografarla.

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



Camera di Wilson, 1912



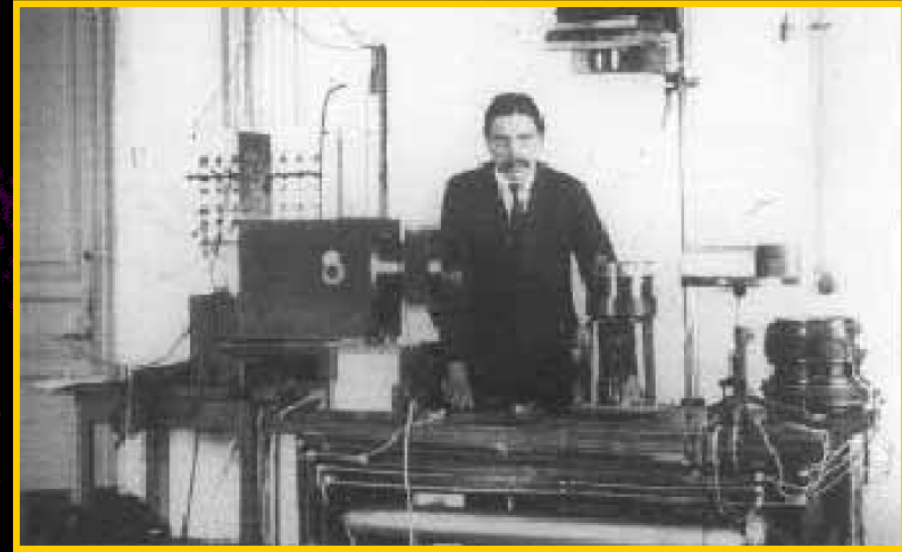
La “camera a nebbia”, utilizzata in laboratorio nelle sue versioni sempre più aggiornate,

- rese possibile la maggior parte delle scoperte delle nuove particelle nei decenni '20 e '30, e
- contribuì alla determinazione della natura particellare dei raggi cosmici.



Usando una **camera a nebbia** accoppiata ad un forte campo magnetico per lo studio dei raggi beta,

Dmitry Skobeltzyn fotografa le tracce (a volte presenti in numero di tre o quattro) lasciate da **particelle relativistiche cariche (elettroni veloci)** provenienti dall'atmosfera.

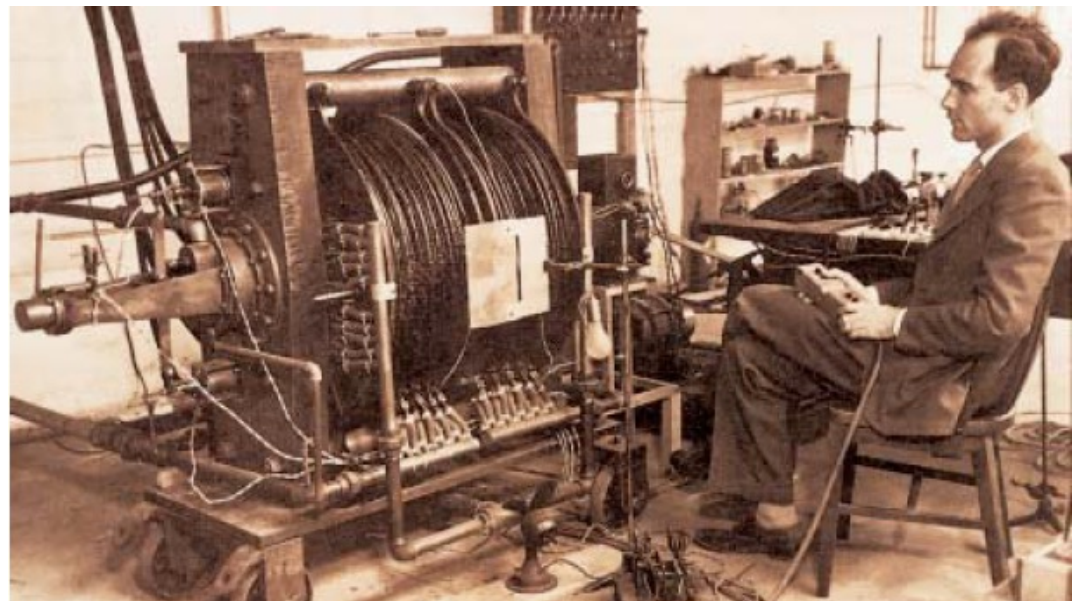
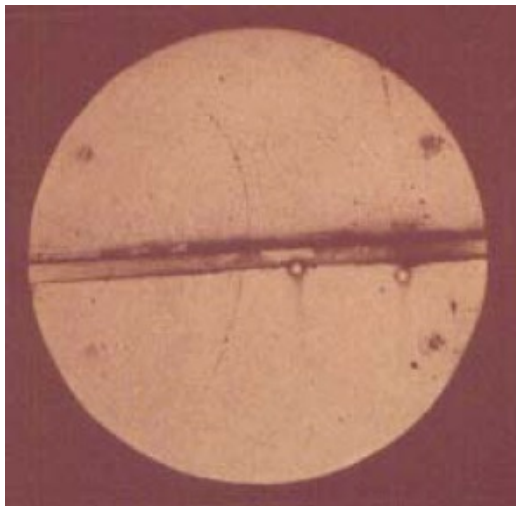


Skobeltzyn nel laboratorio dell'Istituto di Fisica Tecnica di Leningrado

Data la loro elevata energia, gli **elettroni veloci** rilevati non potevano essere stati prodotti da decadimento da elementi radioattivi: essi furono piuttosto considerati come **prodotti secondari dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera**.

Particelle scoperte nei RC

- **Il positrone (1932).**
- Carl Anderson osservò delle particelle cariche positivamente, che lasciavano nella camera a nebbia la stessa traccia degli elettroni. I suoi risultati furono convalidati nel 1933 da P. Blackett e G. Occhialini che riconobbero in esse l'antielettrone o positrone proposto teoricamente da Dirac, osservando la conversione di fotoni di alta energia in coppie e^+e^-

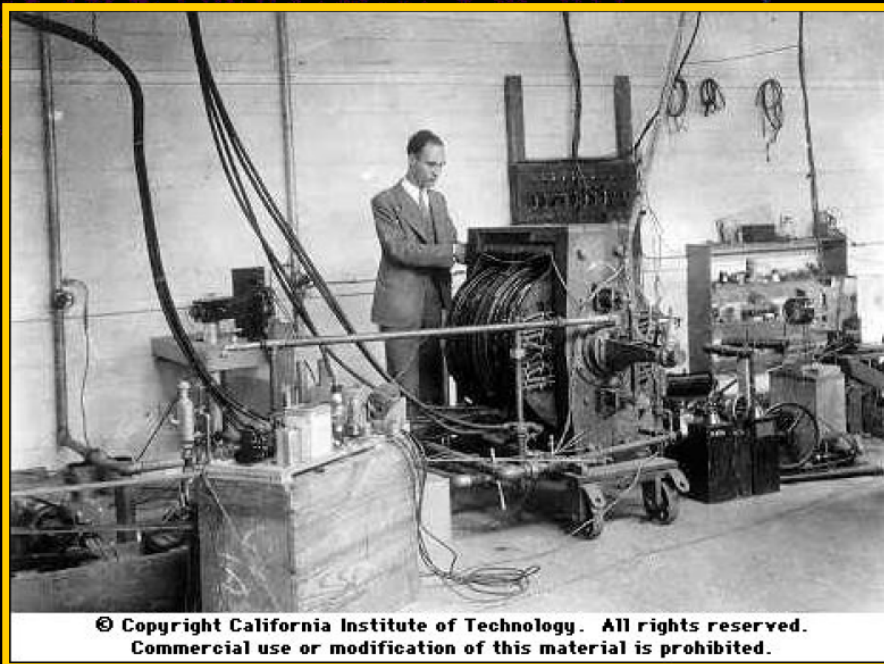




Durante studi sui raggi cosmici, usando una **camera a nebbia** (accoppiata ad un forte campo magnetico) e ponendo una lastra di piombo al suo interno,

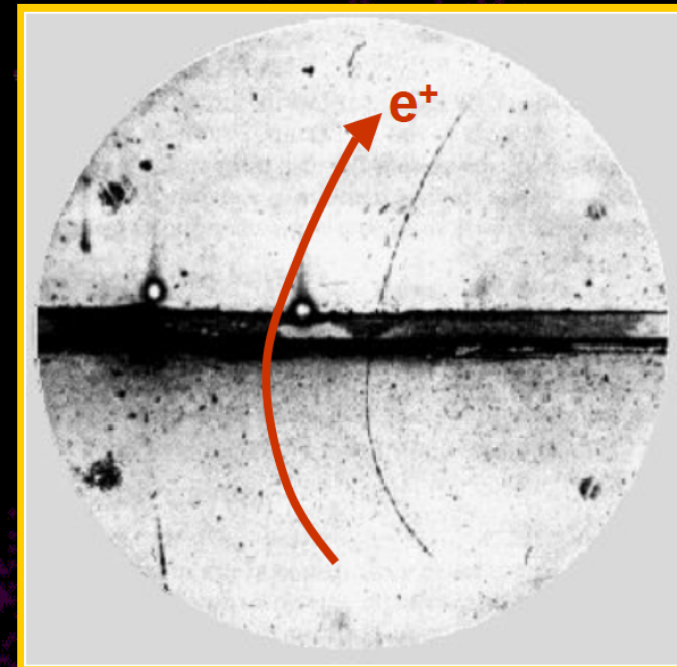
Carl Anderson osserva tracce di particelle con curvatura opposta a quella lasciata dagli elettroni (la direzione della traccia è determinata dall'energia persa dalla particella nell'attraversare la lastra di piombo).

E' la scoperta del **positrone**, particella che ha la massa dell'elettrone, ma carica opposta.



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Anderson e la camera a nebbia (1932).



Fotografia di traccia da positrone nella camera a nebbia di Anderson (1932).



Patrick Blackett e Giuseppe (Beppo) Occhialini sviluppano una nuova tecnica sperimentale collocando due **contatori Geiger-Muller** (inventati nel 1908) collegati da un **circuito in coincidenza** (ideato da Bruno Rossi nel 1930) ←
rispettivamente sopra e sotto una **camera a nebbia**.

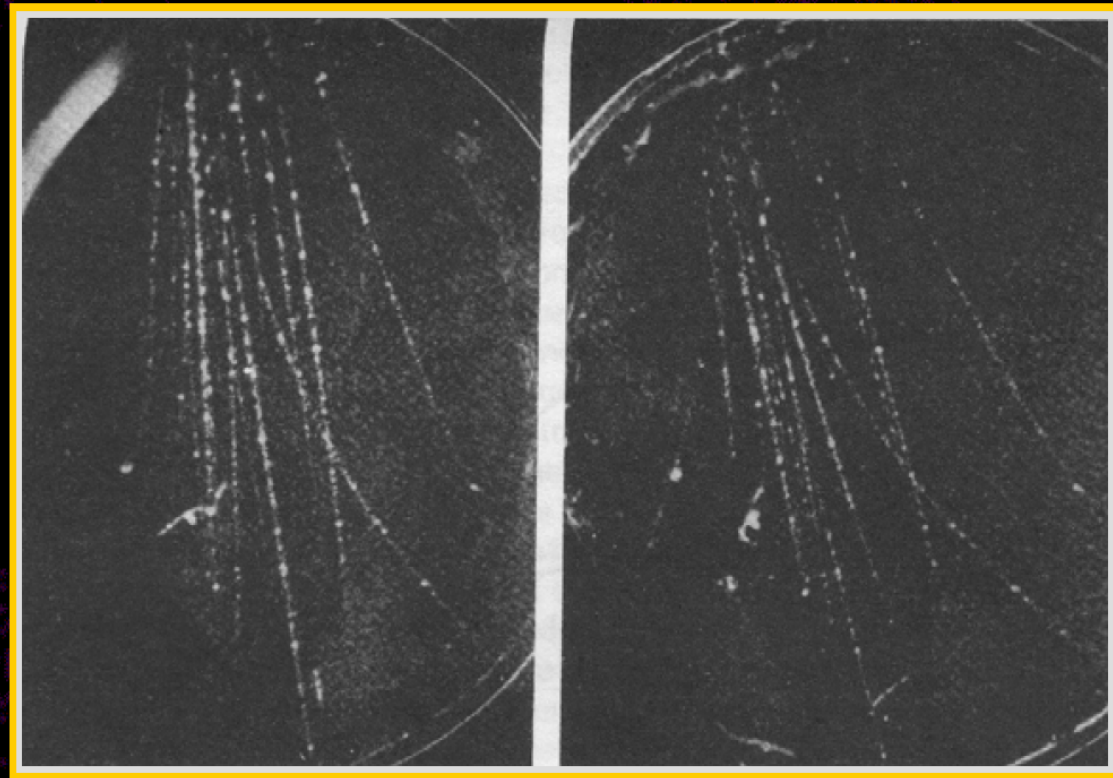
Nota: Il circuito in coincidenza ideato da Bruno Rossi fu il primo circuito elettronico "AND", elemento logico di base dei computer.

Il sistema della "camera a nebbia controllata dai contatori" permette così di prendere una foto ogni due minuti, trovando tracce di particelle altamente energetiche nell'80% di esse.

Blackett e Occhialini fotografano gruppi di particelle associate, dalle forme più disparate e dal diverso contenuto, e danno al fenomeno il nome di "showers" (sciami).



Patrick Blackett e Beppo Occhialini



Fotografia stereoscopica di uno sciame (P. Blackett & G. Occhialini, 1933)

- Il muone (1937).
- Ancora Anderson, notò delle particelle che deviavano in maniera diversa dagli elettroni e da altre particelle note quando queste passavano attraverso un campo magnetico. In particolare, queste nuove particelle venivano deflesse ad un angolo minore rispetto agli elettroni, ma più acuto di quello dei protoni. Si assunse che la loro carica fosse identica a quella dell'elettrone e, per rispondere alla differenza di deflessione, si ritenne che avesse una massa intermedia (un valore compreso tra la massa del protone e dell'elettrone).

Si pensava che fosse la particella ipotizzata da Yukawa per spiegare le interazioni tra nucleoni per formare i nuclei

Si scoprì che questa particella aveva delle caratteristiche peculiari da renderla il cugino pesante dell'elettrone (esperimento Pancini-Piccioni-Conversi).

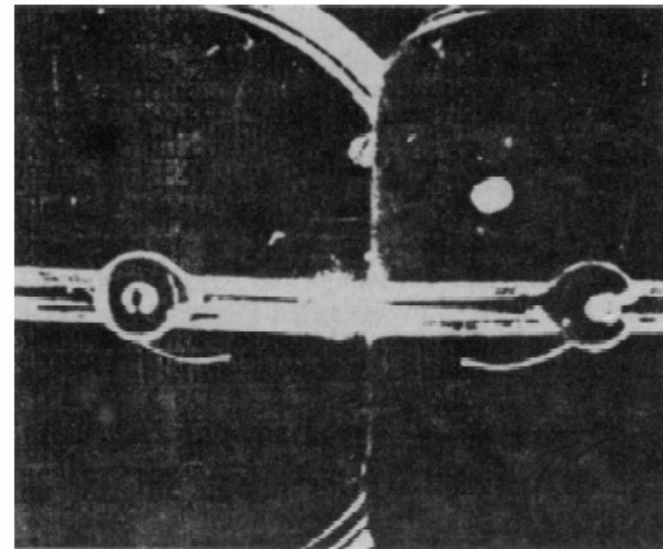


Fig. 1. - Evidenza in camera di Wilson di un muone positivo che traversa un contatore di Geiger entro la camera [1]. La sensibilità della camera non poteva arrivare a rivelare l'elettrone di decadimento.



Carl D. Anderson e Seth H. Neddermeyer continuano gli esperimenti sui raggi cosmici in montagna, con la **camera a nebbia** (con campo magnetico e lastra di piombo) montata sopra un vecchio autocarro. I dati raccolti durante le misure a Pike's Peak, Colorado, rivelano l'esistenza di una nuova particella a vita breve e di massa intermedia tra elettrone e protone.

E' la scoperta del **mesotrone**, chiamato poi **mesone μ** o **muone**.



Anderson e Neddermeyer con il loro autocarro.



In modo indipendente, e quasi contemporaneamente, anche **J.C. Street** e **E.C. Stevenson** rilevano l'esistenza del **muone** in raggi cosmici, utilizzando una **camera a nebbia controllata da contatori**.

- **Il pione (1947).**
- Particella predetta nel 1936 da Hideki Yukawa, il pione si osservò sperimentalmente solo nel 1947 da parte di C.F. Pawel, G. Occhialini e C. Lattes, utilizzando speciali emulsioni fotografiche per registrare la produzione di pioni da parte dei raggi cosmici e il loro successivo decadimento in muoni, che a loro volta decadono in elettroni (o positroni) e in neutrini (invisibili).

