

# 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.

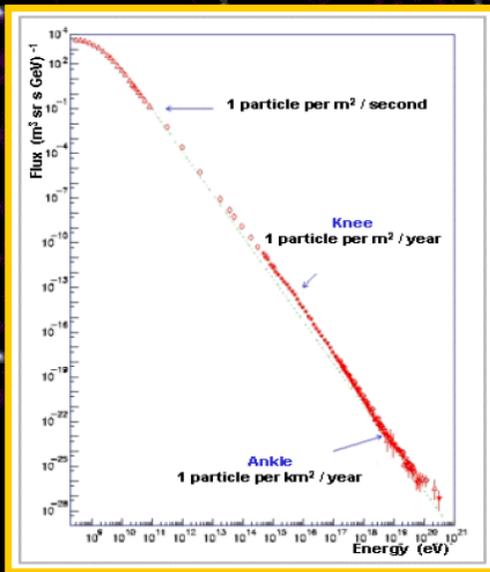
La ricerca nel campo dei Raggi Cosmici si è sviluppata come uno dei più spettacolari e vitali contributi alla scienza del XX secolo dando origine a nuove discipline scientifiche (fisica delle particelle elementari), nuove tecnologie (rivelatori, acceleratori), nuovi concetti in astrofisica (meccanismi 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  $5 \times 10^{19}$  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.

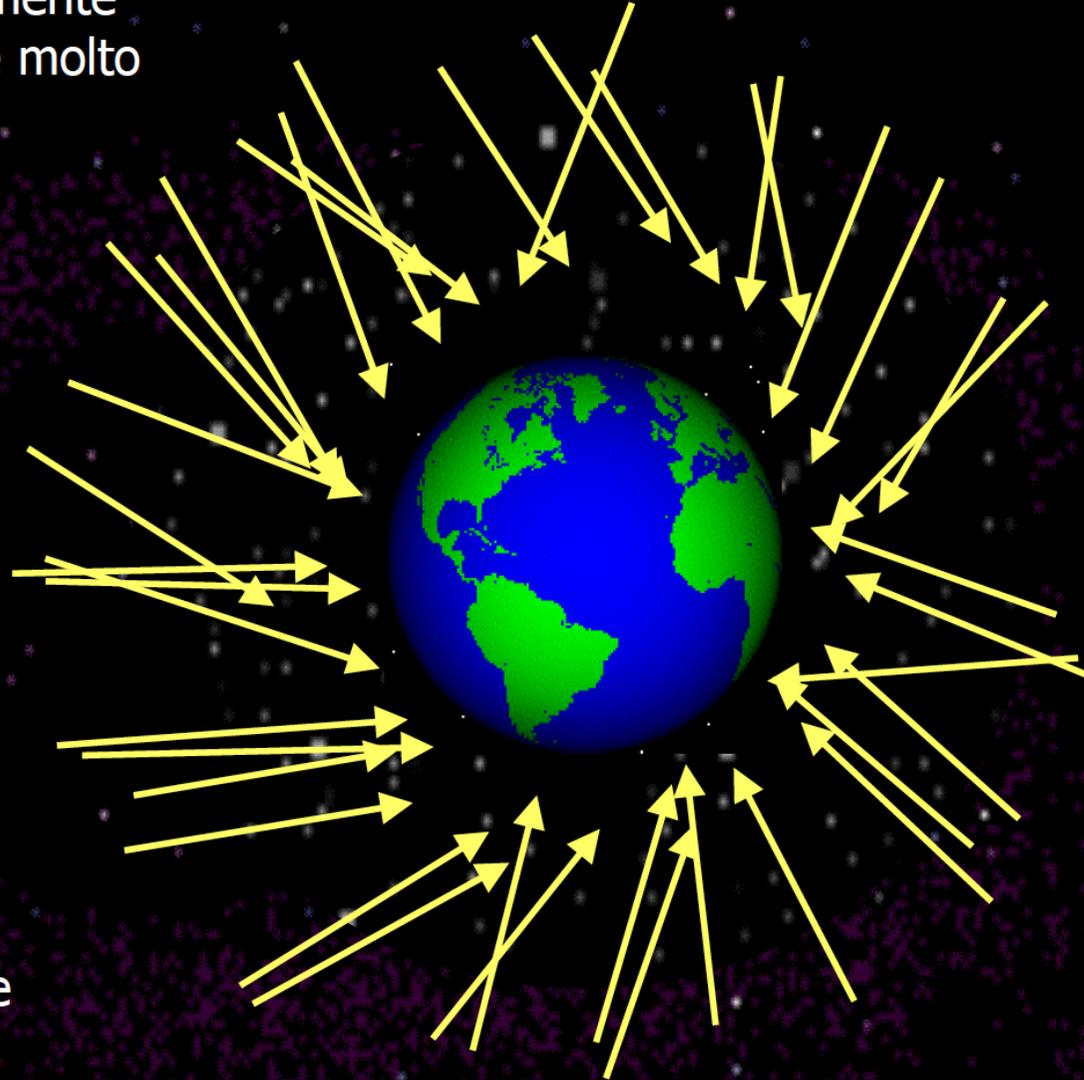
## ... ma cosa è un raggio cosmico (CR, Cosmic Ray) ?

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 10<sup>9</sup> 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<sup>mo</sup> 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  $\alpha$ ,  $\beta$ , ( $\gamma$ ) (Ernest Rutherford )

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

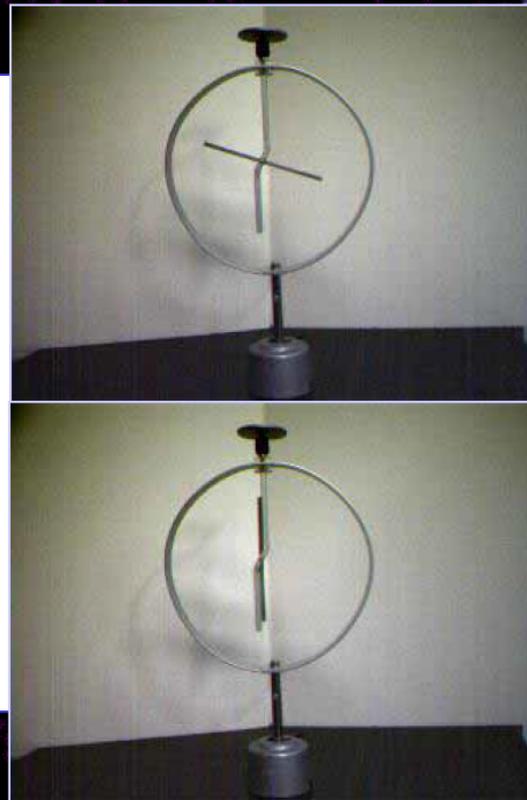
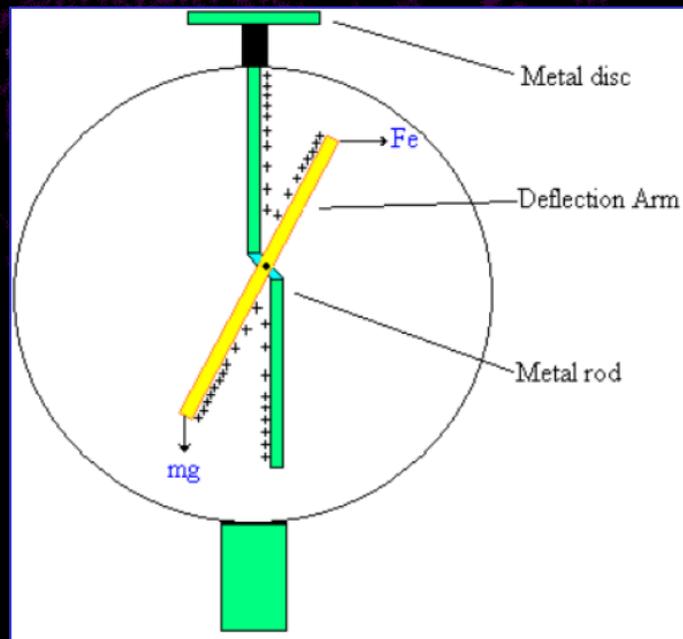
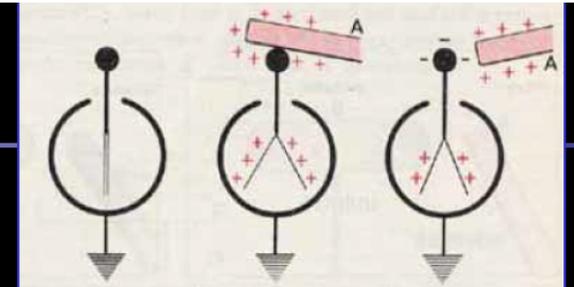


Gli esperimenti per lo studio dei misteriosi "raggi" utilizzavano principalmente gli elettroscopi



# L'elettroscopio

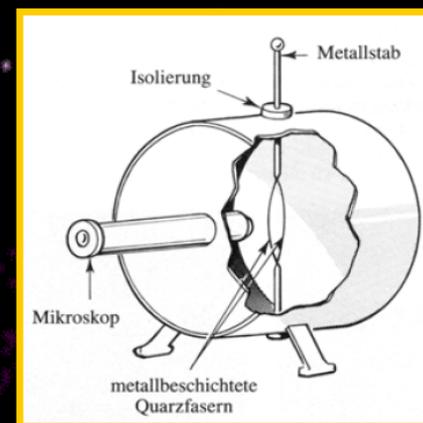
- I "bracci" dell'elettroscopio si respingono tanto più quanto maggiore è la carica presente;
- sottoposta a radiazione energetica, l'aria si ionizza parzialmente
- e l'elettroscopio si scarica tanto più velocemente quanto più intensa è la radiazione.



## 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*



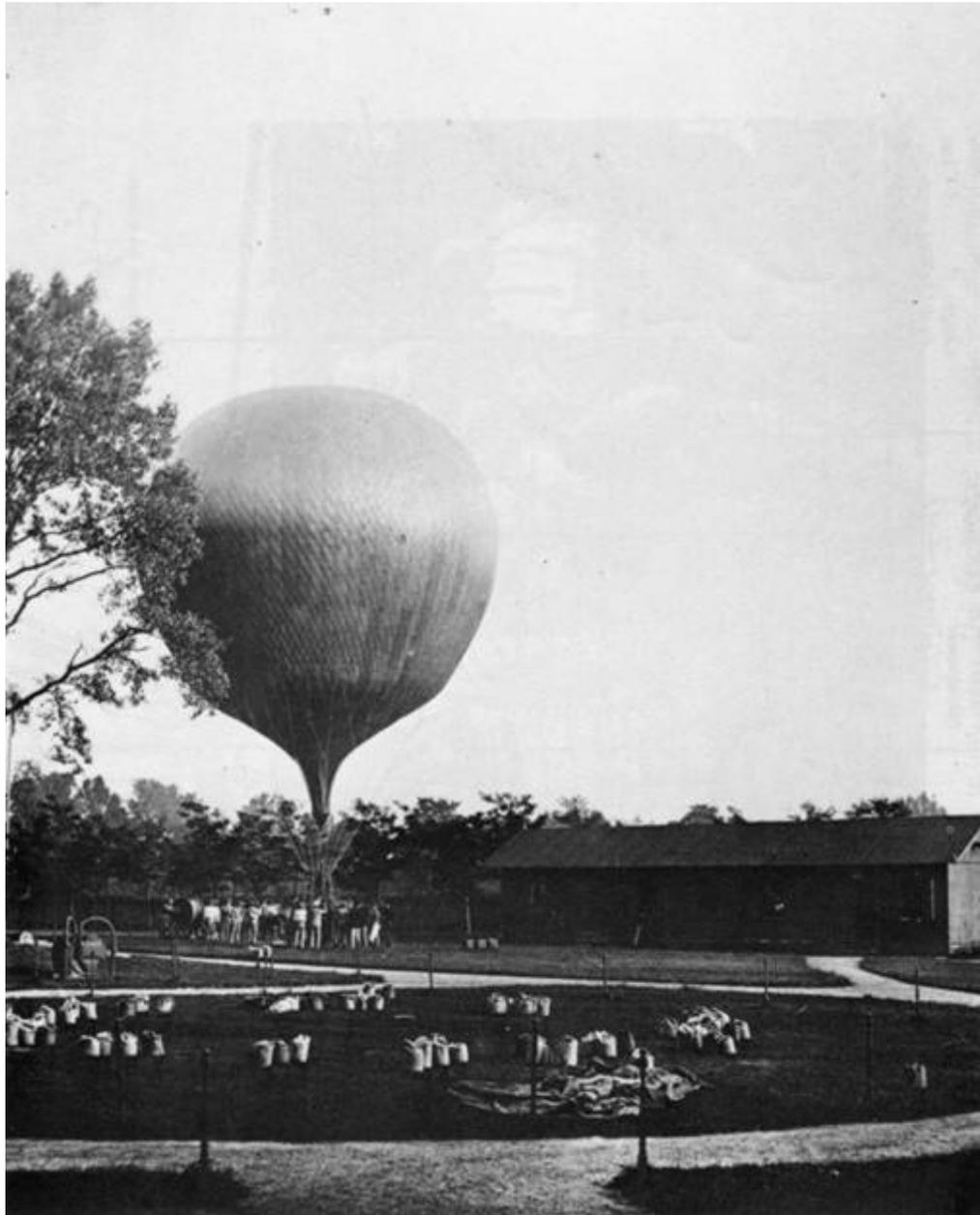
## LA RADIAZIONE PENETRANTE ALLA SUPERFICIE ED IN SENO ALLE ACQUE.

NOTA DI D. PACINI.

Le osservazioni eseguite sul mare nel 1910 <sup>1)</sup> 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.

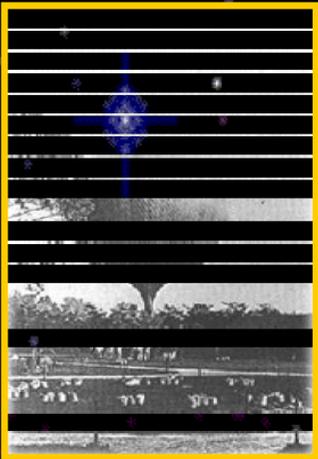
A partire dai 1500 metri di quota, il segnale iniziò a crescere finché a 5000 metri raggiunse un livello addirittura doppio del segnale di fondo che la strumentazione misurava al suolo.

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).

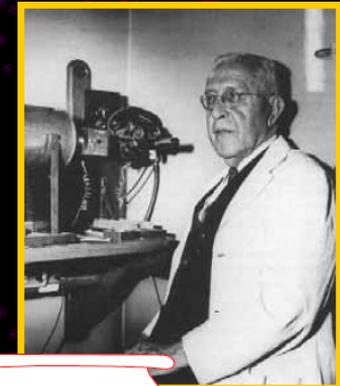
Da ciò egli concluse che :

- 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*

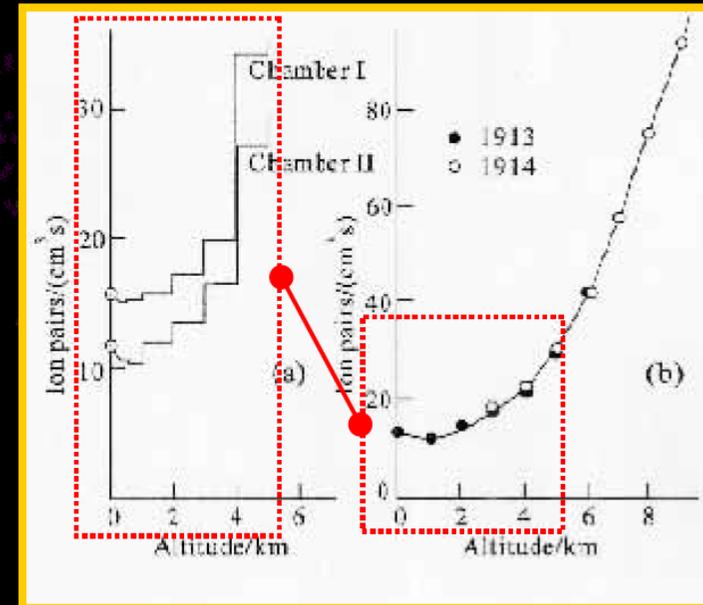
Nota: i "raggi cosmici" (o "radiazione cosmica") furono così denominati nel 1925 da Robert Millikan che credeva fossero raggi gamma di alta energia. Oggi sappiamo che la maggior parte della radiazione cosmica è formata da particelle (sub)nucleari, compresi elettroni e neutrini, piuttosto che da radiazione 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"

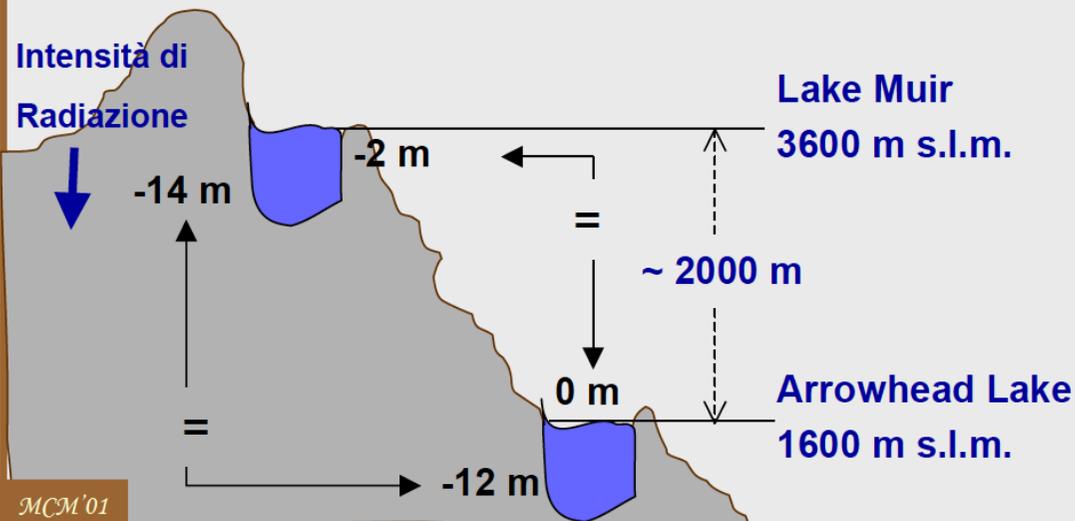


In California Robert Millikan e George Cameron misurano la ionizzazione nelle acque di due laghi di montagna alimentati dallo scioglimento delle nevi "per definire una volta per tutte la questione dell'esistenza o meno di una piccola radiazione molto penetrante di origine cosmica".



Camera a ionizzazione usata da Millikan

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



MCM'01

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"**

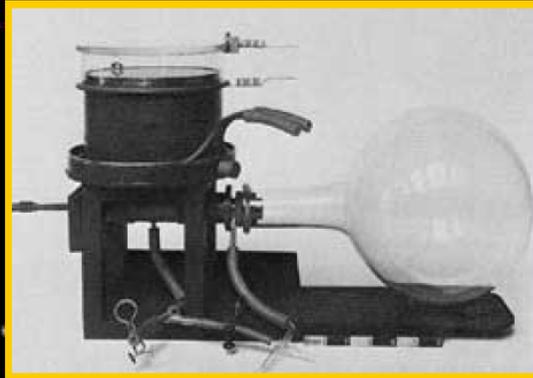
*“La storia degli strumenti di fisica coincide con la storia della fisica stessa”*

*(Rita Brunetti, 1890-1942)*

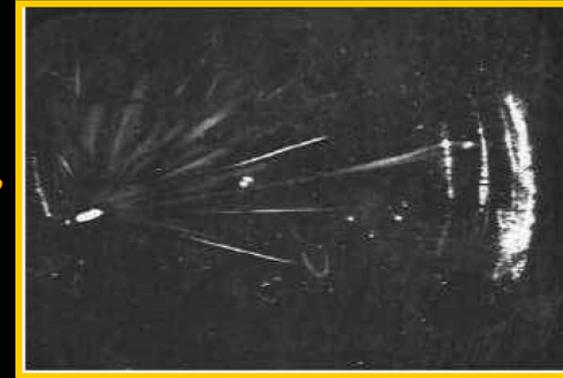
## **La “camera di Wilson” o “camera a nebbia”**

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*



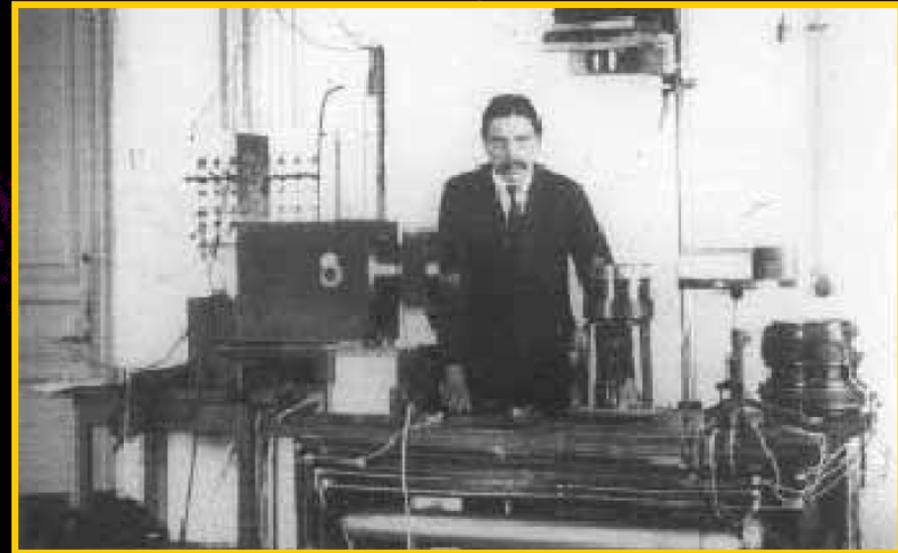
La “camera a nebbia”, utilizzata in laboratorio nelle sue versioni sempre più aggiornate,

- 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.

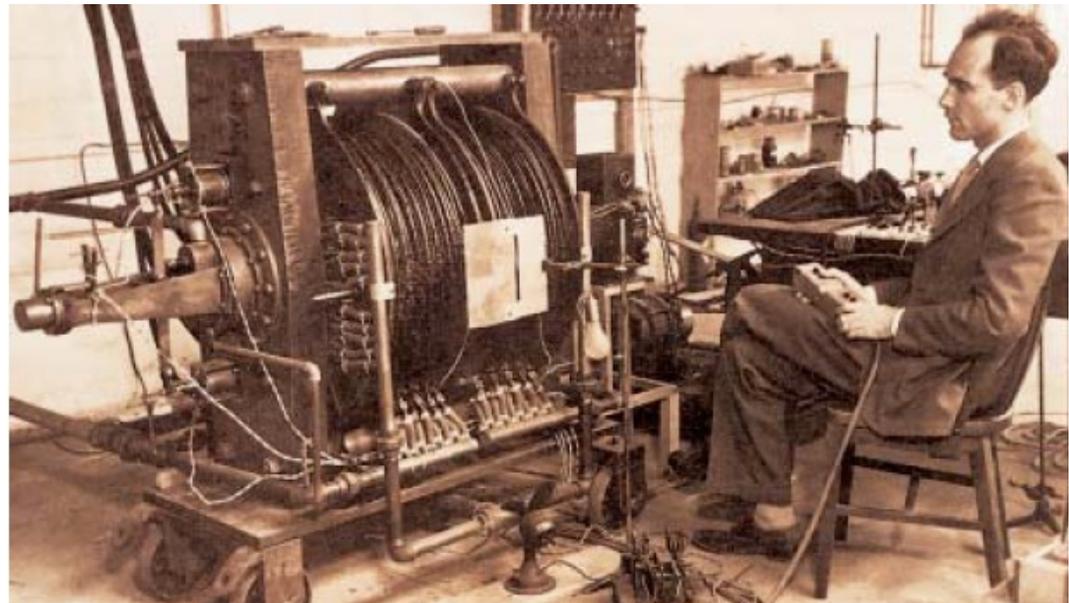
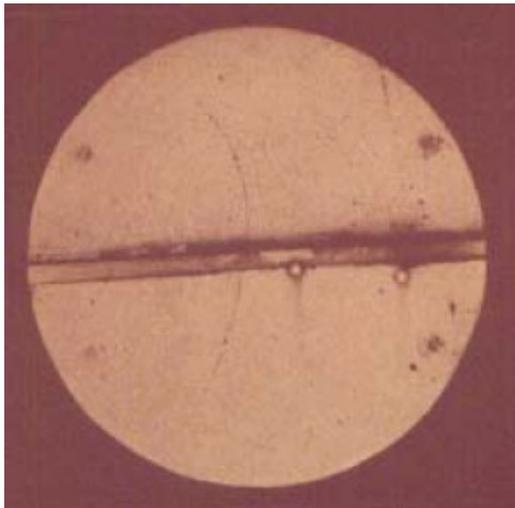


*Skobeltzyn nel laboratorio dell'Istituto di Fisica Tecnica di Leningrado*

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  $e^+e^-$

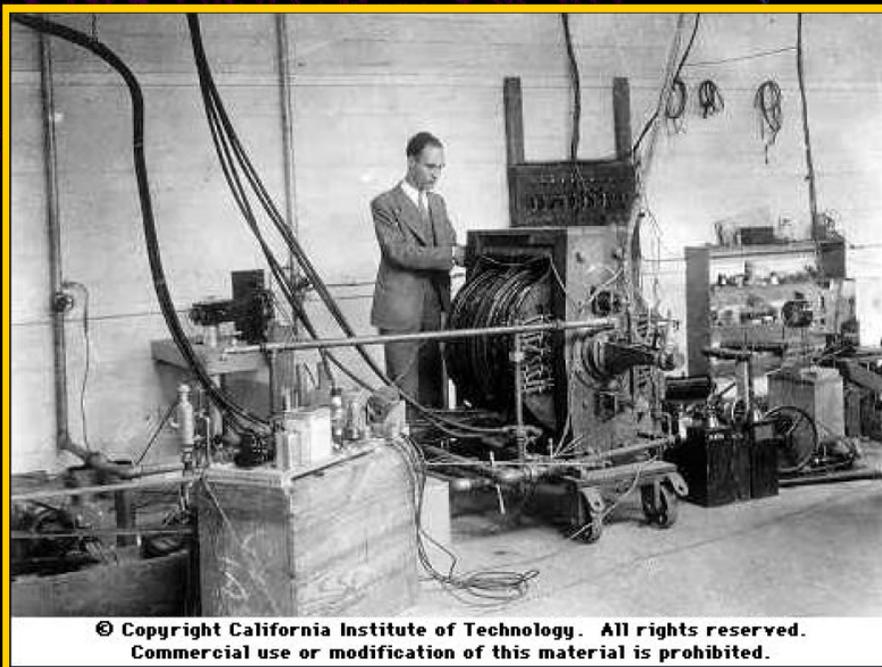




Durante studi sui raggi cosmici, usando una **camera a nebbia** (accoppiata ad un forte campo magnetico) e ponendo una lastra di piombo al suo interno,

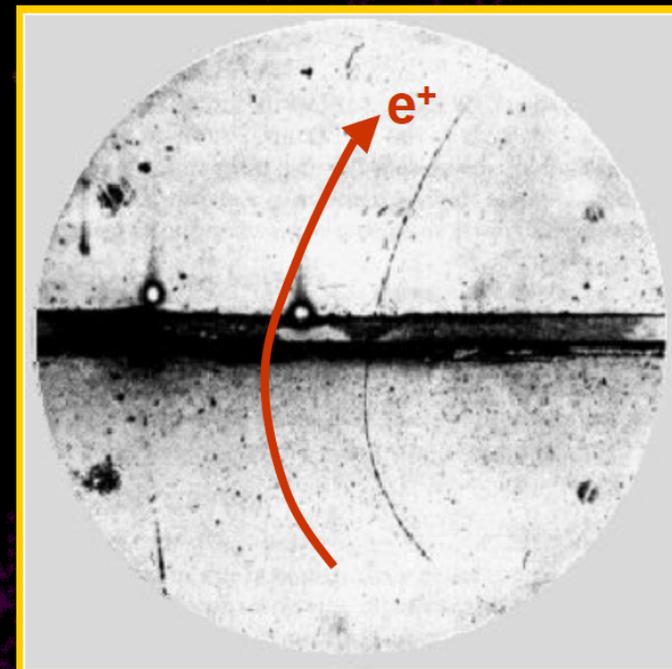
**Carl Anderson** osserva tracce di particelle con curvatura opposta a quella lasciata dagli elettroni (la direzione della traccia è determinata dall'energia persa dalla particella nell'attraversare la lastra di piombo).

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**.

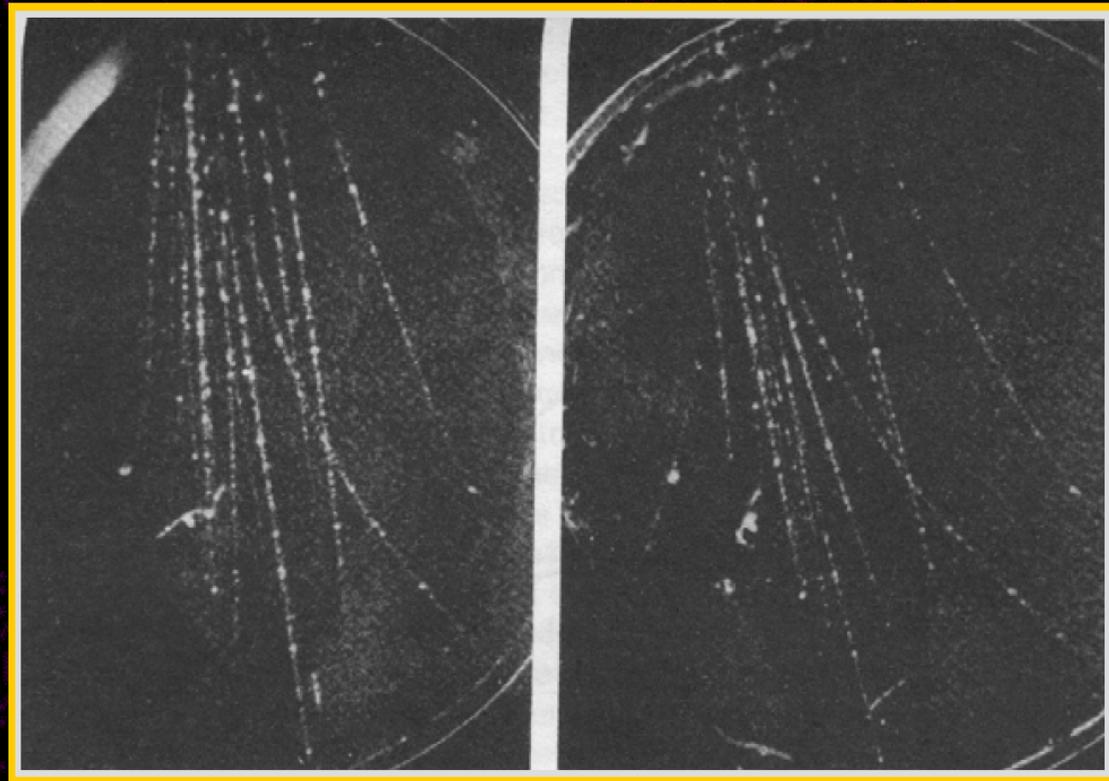
Nota: Il circuito in coincidenza ideato da Bruno Rossi fu il primo circuito elettronico "AND", elemento logico di base dei computer.

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).

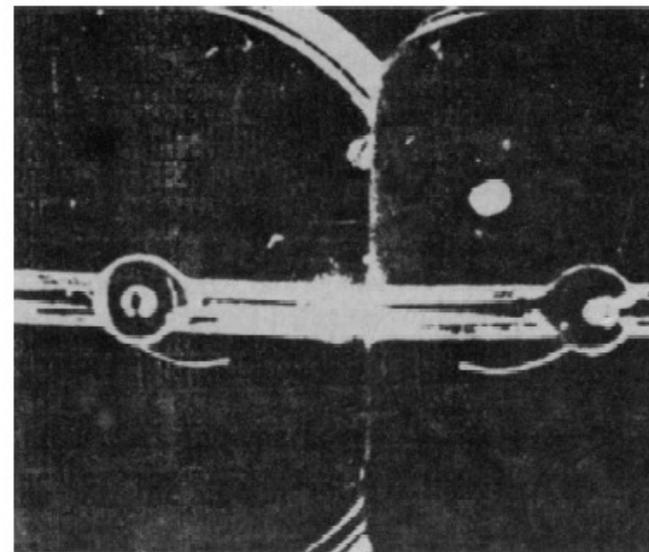
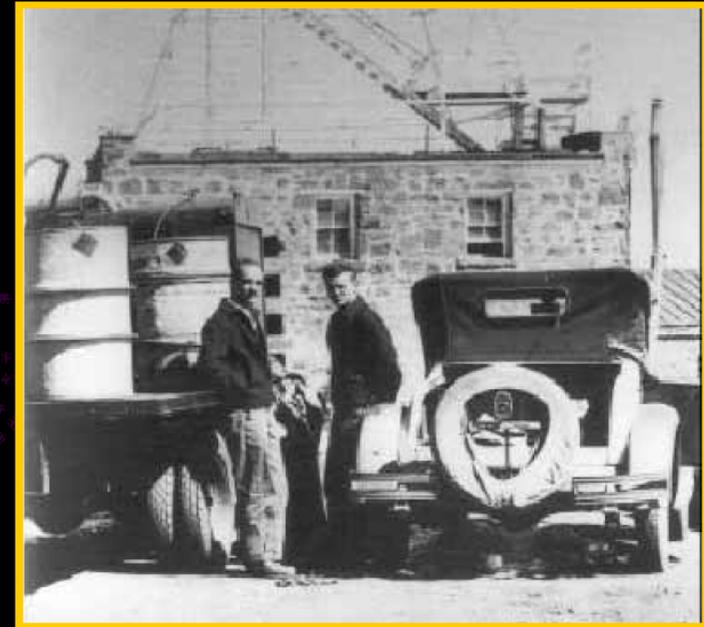


Fig. 1. - Evidenza in camera di Wilson di un muone positivo che traversa un contatore di Geiger entro la camera [1]. La sensibilità della camera non poteva arrivare a rivelare l'elettrone di decadimento.



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  $\mu$  o muone**.

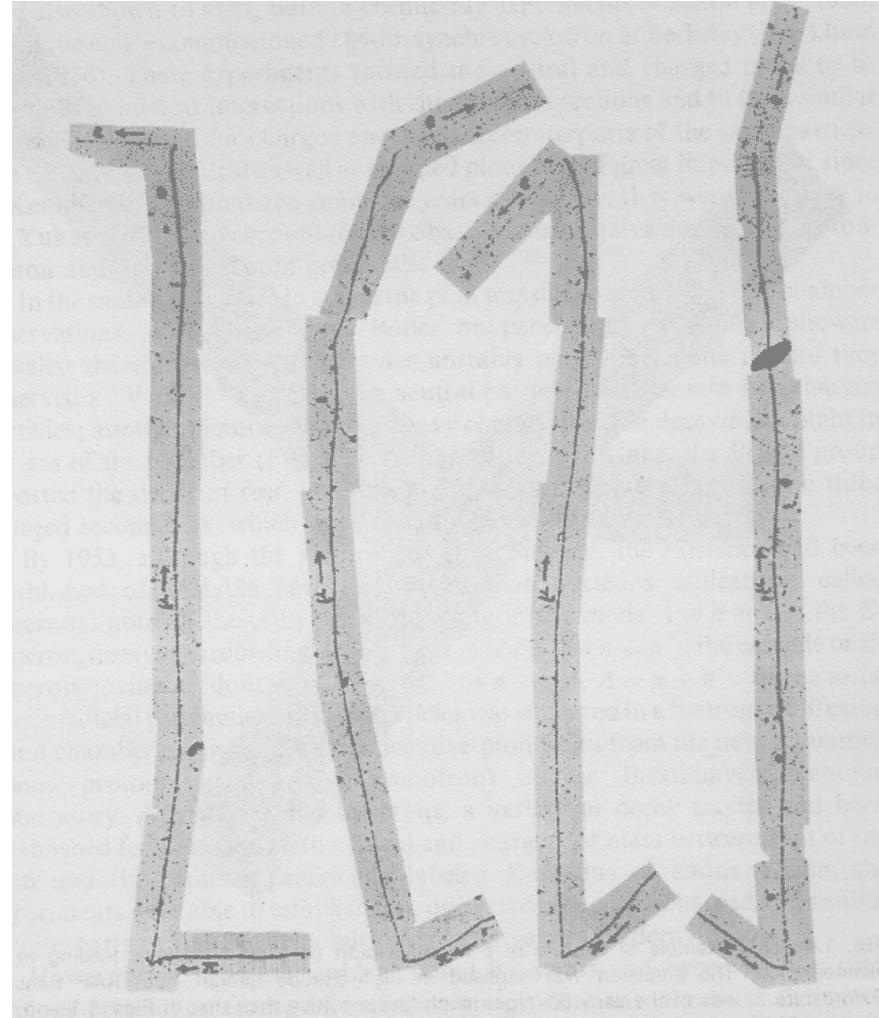


*Anderson e Neddermeyer con il loro autocarro.*



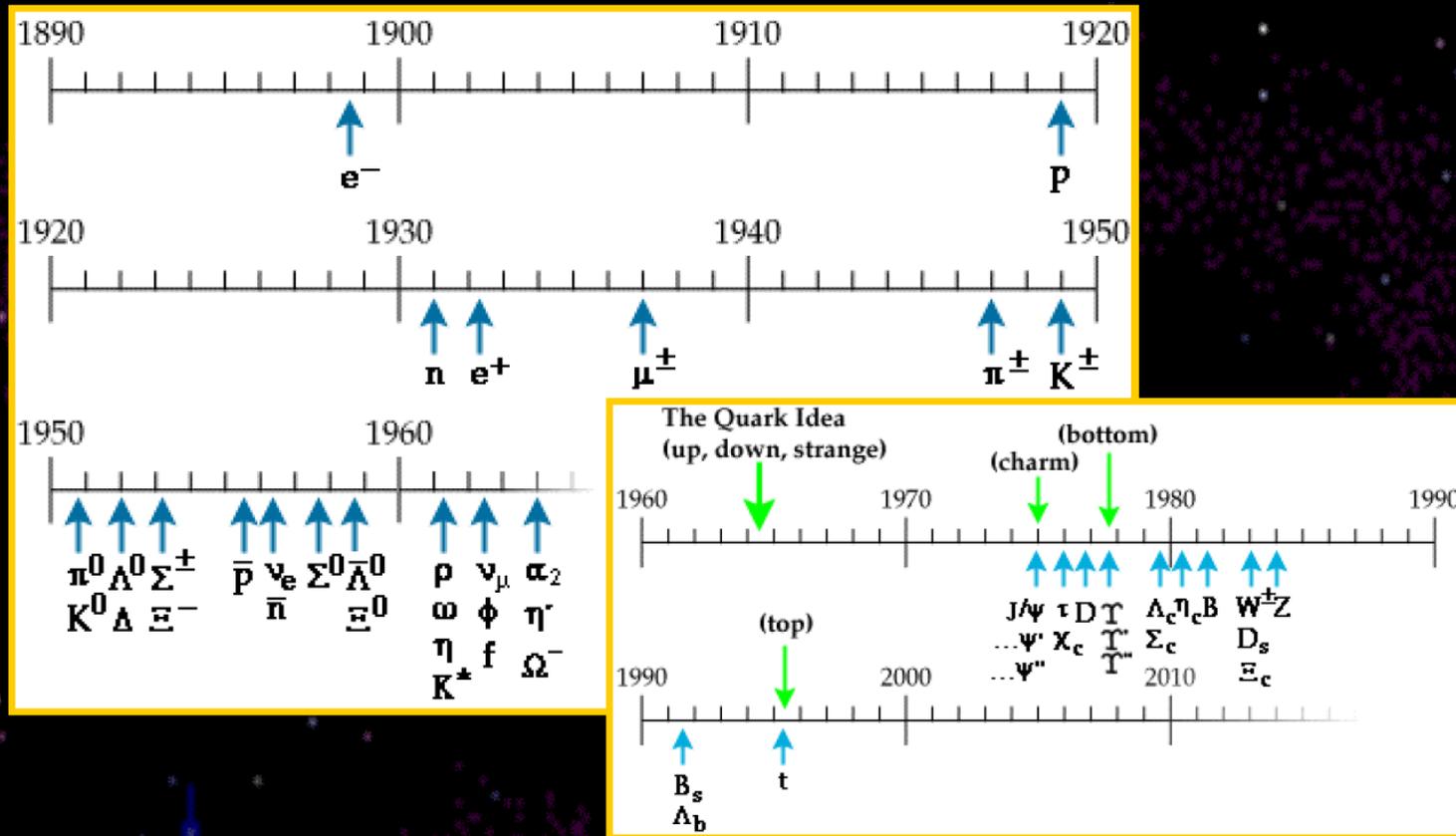
In modo indipendente, e quasi contemporaneamente, anche **J.C. Street** e **E.C. Stevenson** rilevano l'esistenza del **muone** in raggi cosmici, utilizzando una **camera a nebbia controllata da contatori**.

- **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).



## Alla fine degli Anni Trenta ...

... prende vita la scienza della fisica delle particelle elementari ...

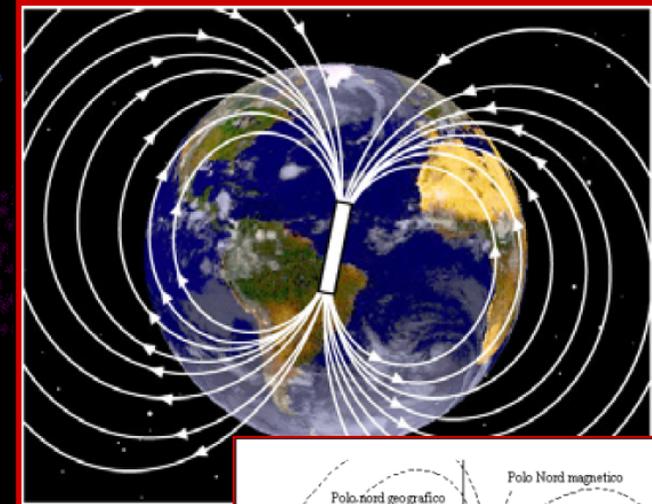


... e i fisici particellari continueranno ad usare i raggi cosmici per le loro ricerche almeno fino all'avvento, negli anni '50, degli acceleratori di particelle.

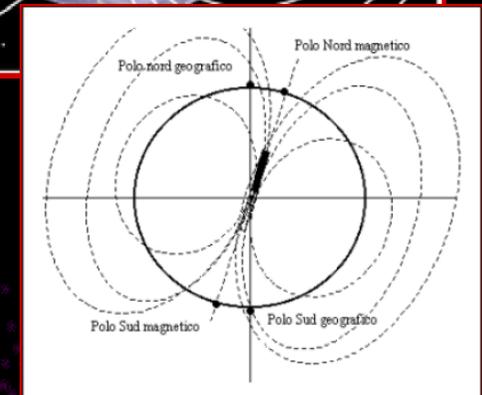
## Natura dei raggi cosmici: l'influenza del campo magnetico terrestre



**Jacob Clay** - l'intensità dei raggi cosmici dipende dalla latitudine geografica: essa è più debole all'equatore che ai poli. E' la prima osservazione dell'effetto di latitudine geomagnetica, e la prima evidenza che la radiazione cosmica è costituita, almeno in parte, da particelle cariche che subiscono l'influenza del campo magnetico terrestre.



**Walter Bothe e Werner Kolhörster** - la radiazione cosmica primaria è composta da particelle cariche, presumibilmente elettroni di altissima energia.



**Bruno Rossi** - se i raggi cosmici sono di natura particellare, la loro distribuzione angolare dovrebbe presentare una asimmetria rispetto al piano del meridiano geomagnetico ("effetto est-ovest"), con una prevalenza dei corpuscoli provenienti da Est (se di carica negativa) o da Ovest (se di carica positiva).

## “Dai mari del sud all’artico alla ricerca dei raggi cosmici”



Arthur H. Compton organizza un'estesa campagna di misure di ionizzazione a diverse latitudini e altitudini, una vera e propria esplorazione geografica. I risultati di Compton e collaboratori evidenziano la **natura corpuscolare** dei raggi cosmici tramite l' **effetto di latitudine** dovuto al campo magnetico terrestre e la **variazione dell'intensità** dei raggi cosmici **con l'altezza**.



*Le postazioni (81 località diverse) per lo studio geografico dei raggi cosmici (Compton, 1933)*

## Natura dei raggi cosmici ...



Vicino Città del Messico, due gruppi di ricercatori (uno guidato da **Thomas H. Johnson**, l'altro guidato da **Luis Alvarez** e **Arthur Compton**) misurano indipendentemente l'effetto est-ovest previsto da Bruno Rossi e mostrano che:

**la radiazione cosmica primaria è composta principalmente da particelle positivamente cariche**

Altri esperimenti condotti in pallone da vari gruppi di ricercatori, utilizzando contatori Geiger in formazione di telescopi separati da piombo, determinano che la maggior parte delle particelle primarie della radiazione cosmica è costituita da **protoni**.

Oggi sappiamo che i raggi cosmici sono in predominanza protoni, con abbondanza dal 50% a oltre il 90% in funzione della loro energia. Sono inoltre presenti nuclei, elettroni, positroni, fotoni, neutrini, particelle esotiche, .

# Lo spettro energetico dei RC primari

- 1) Si chiamano **RC primari** quelli che giungono sulla sommità della atmosfera, senza interagirvi
- 2) Lo spettro energetico dei RC mostra un grado di organizzazione estremamente elevato
- 3) Le energie più elevate misurate sono  $E \cong 10^{20}$  eV = Energia cinetica palla da tennis @100 km/h
- 4) Le energie più elevate in gioco nei RC sono irraggiungibili agli acceleratori

# All Particle spectrum

$$\Phi_{\text{TOT}} \sim 10000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-2}\text{sr}^{-1}$$

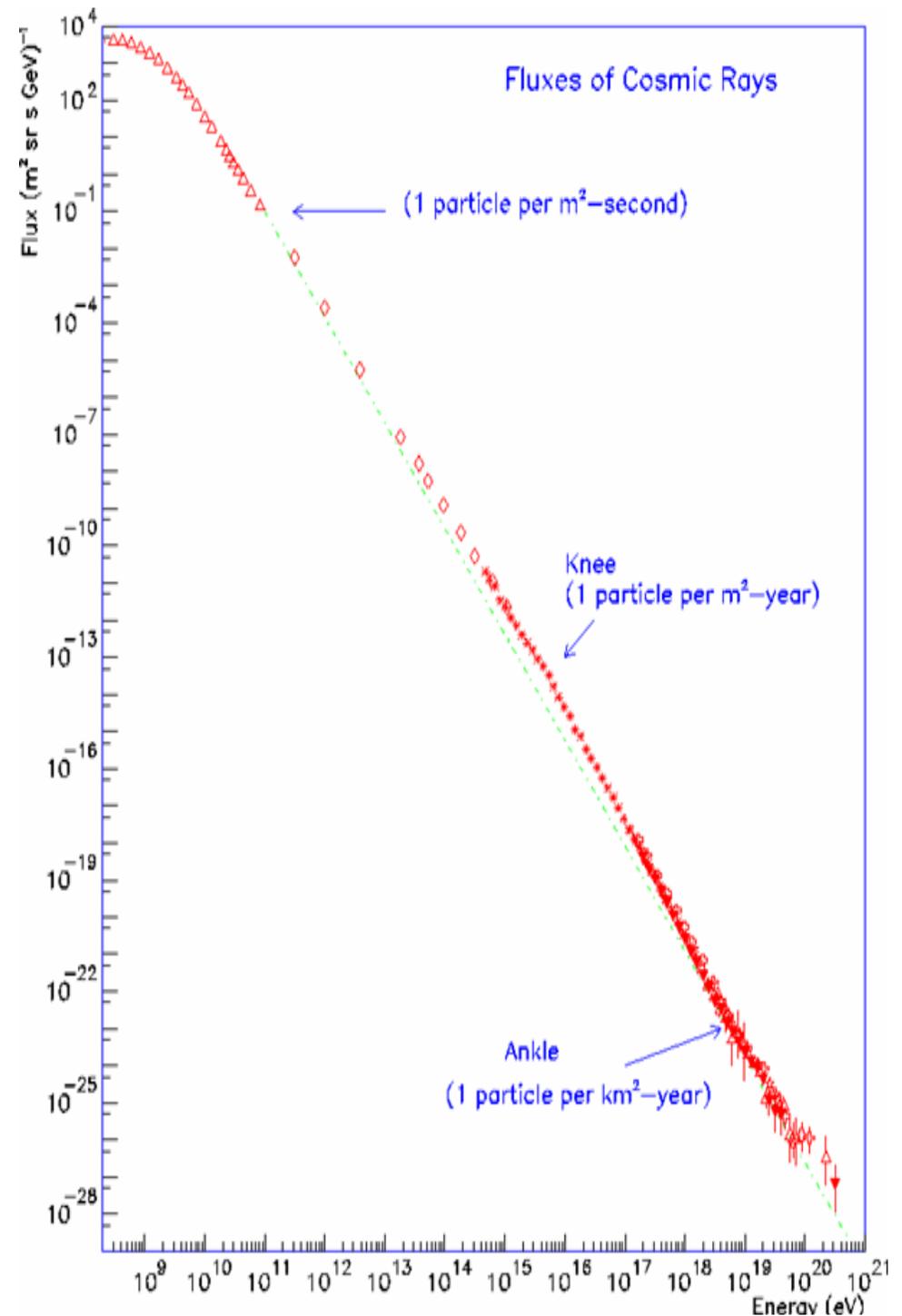
Misure dirette: 90% p, 9% He, 1% nuclei pesanti

Si estende per 13 ordini di grandezza in energia

Per 32 ordini di grandezza in flusso

Legge di potenza su tutto lo spettro, con almeno due cambi di pendenza

Per 32 ordini di grandezza in flusso



- Lo spettro energetico può essere descritto dalla legge  
(**flusso o spettro differenziale dei RC:**)

Legge che descrive i dati sperimentali.

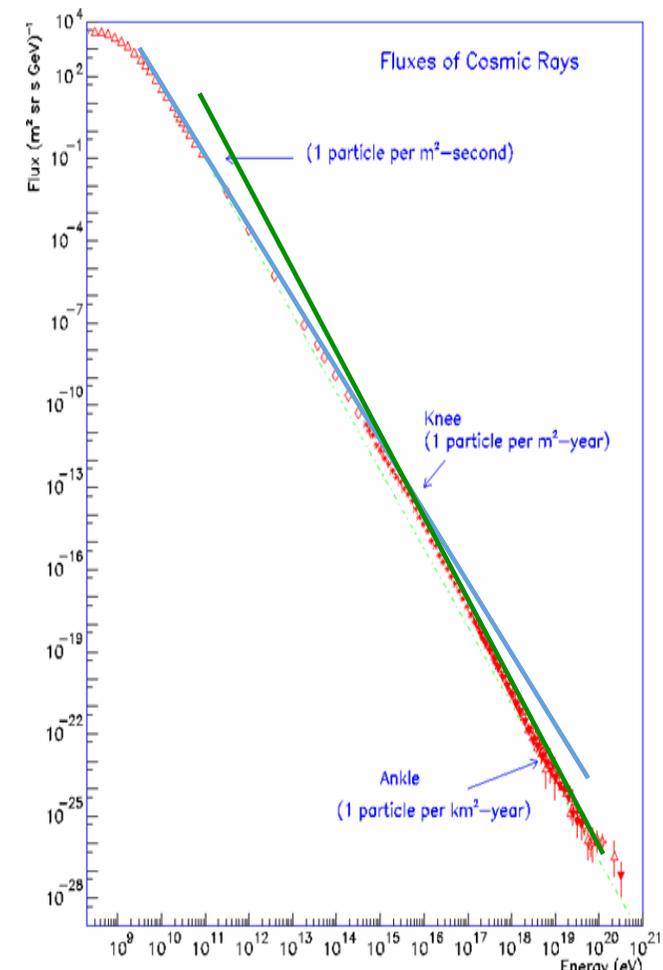
I parametri  $K$  e  $\Gamma$  vengono determinati dall'adattamento della curva coi dati

Regolarità di un fenomeno fisico

Legge di natura!

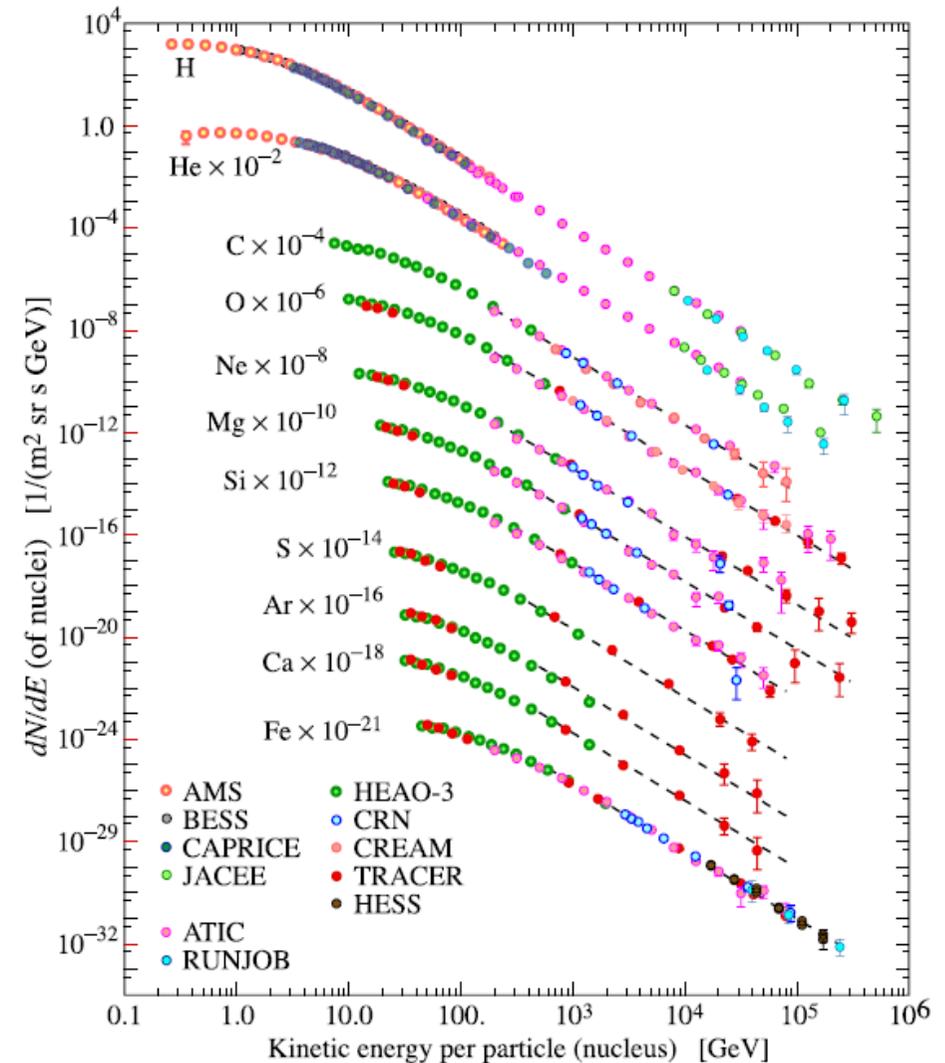
Occorre scoprire quali sono i fenomeni naturali che producono tale legge di natura.

Implica conoscenze di fisica, astrofisica ed anche cosmologia!

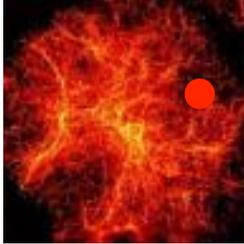


# Diverse Specie nucleari

Se misurato, si può parlare dello spettro di diverse specie atomiche nei RC  
Le variazioni del ciclo solare hanno effetti per energie  $< 1$  GeV  
RC con  $E > 2$  GeV non affetti dal ciclo solare  
Flusso di RC di bassa energia ( $>1$  GeV):  $\sim 1000$  p/(m<sup>2</sup>s sr).

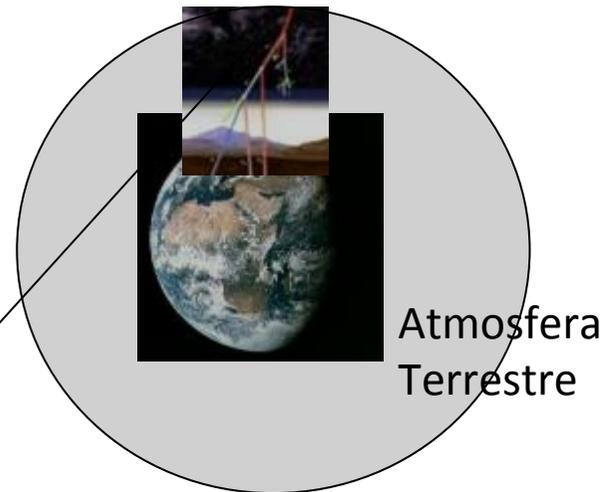


# RC Primari e Secondari



Sorgente Astrofisica  
(Resto di Supernova)

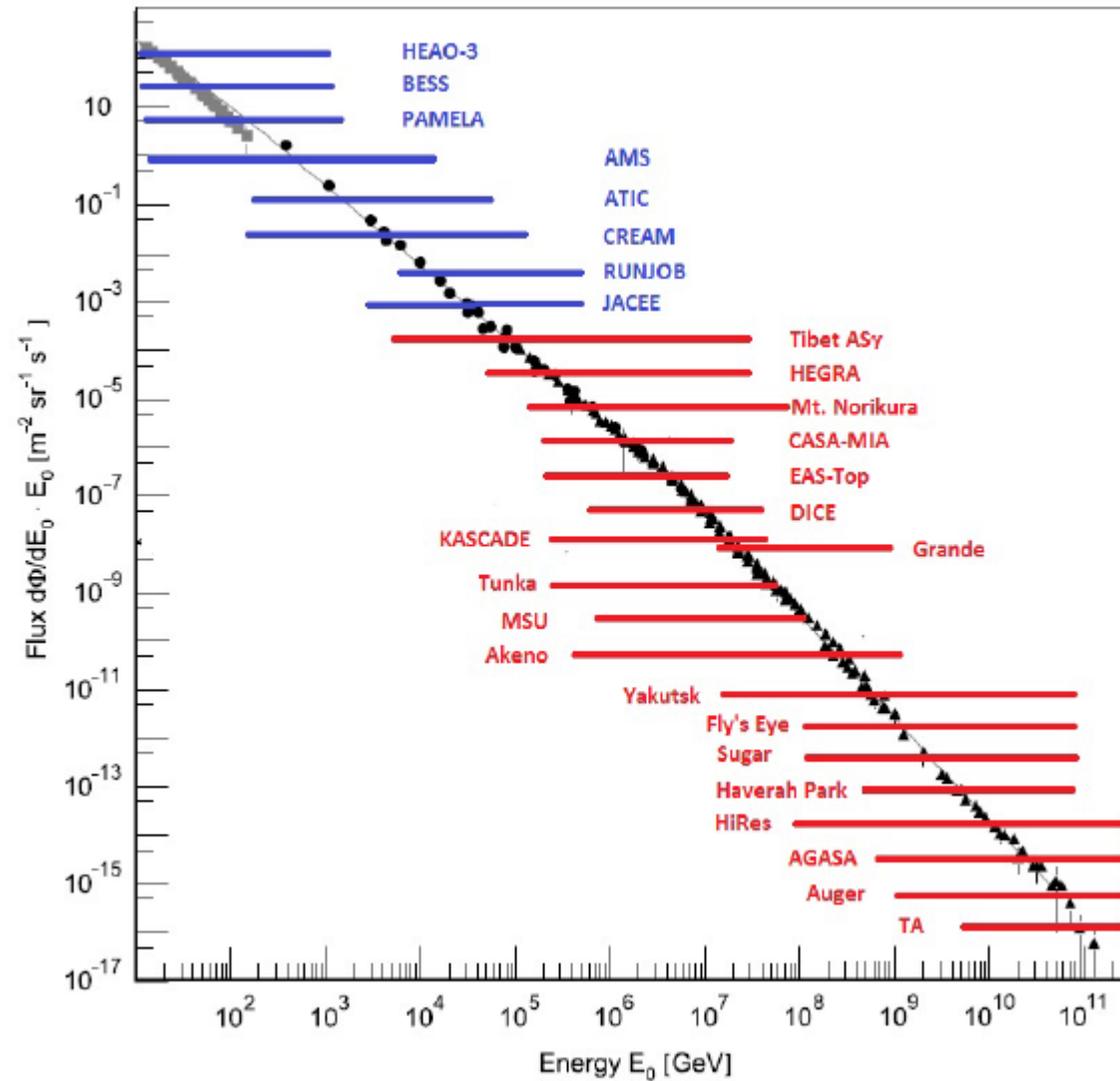
**Raggio Cosmico Primario**  
(protone, nucleo)



Sciame di particelle  
secondarie =  
***RC secondari***

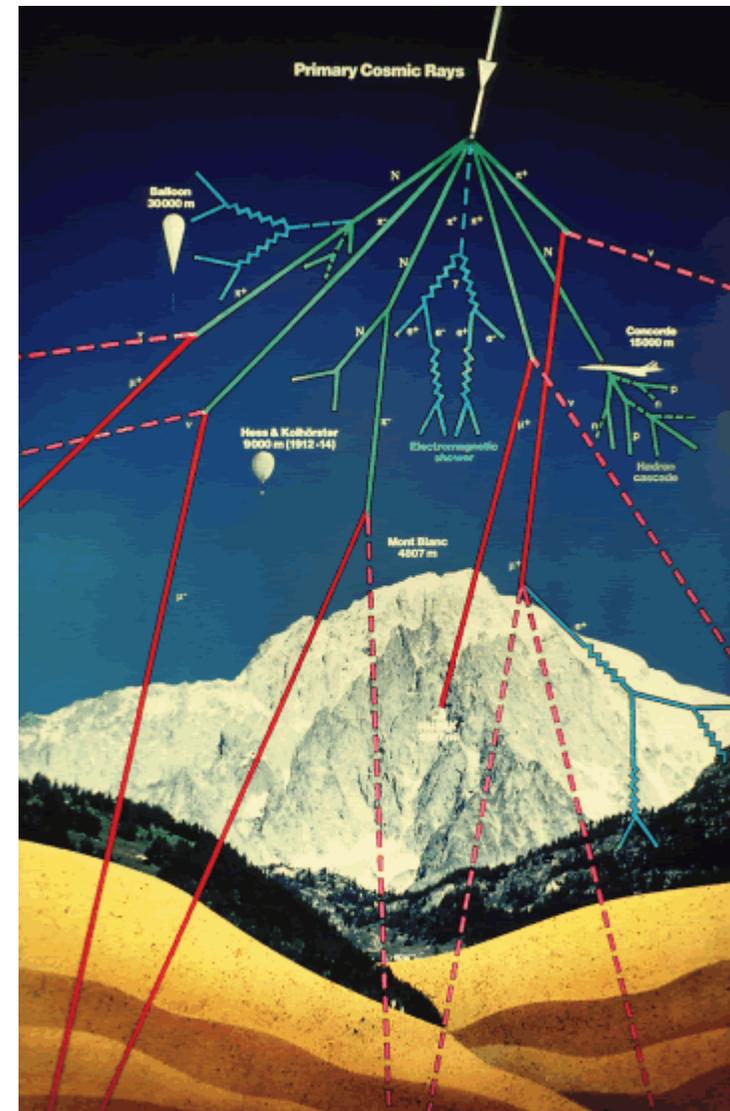
# Metodi di misura dei raggi cosmici

$\Phi(>E)$   
 Misure dirette  
 $E < 10^{14}$  eV  
 Misure indirette,  
 $E > 10^{14}$  eV



# I RC secondari

- Interazione dei RC coi nuclei dell'atmosfera → sciami di particelle secondarie → **RC secondari** .
- L'atmosfera funge da *convertitore*
- La radiazione primaria può essere direttamente studiata solo fuori dall'atmosfera terrestre (sonde)
- La radiazione al suolo può essere studiata con rivelatore di sciami
- Esperimenti *underground* per la componente penetrante (muoni e neutrini)

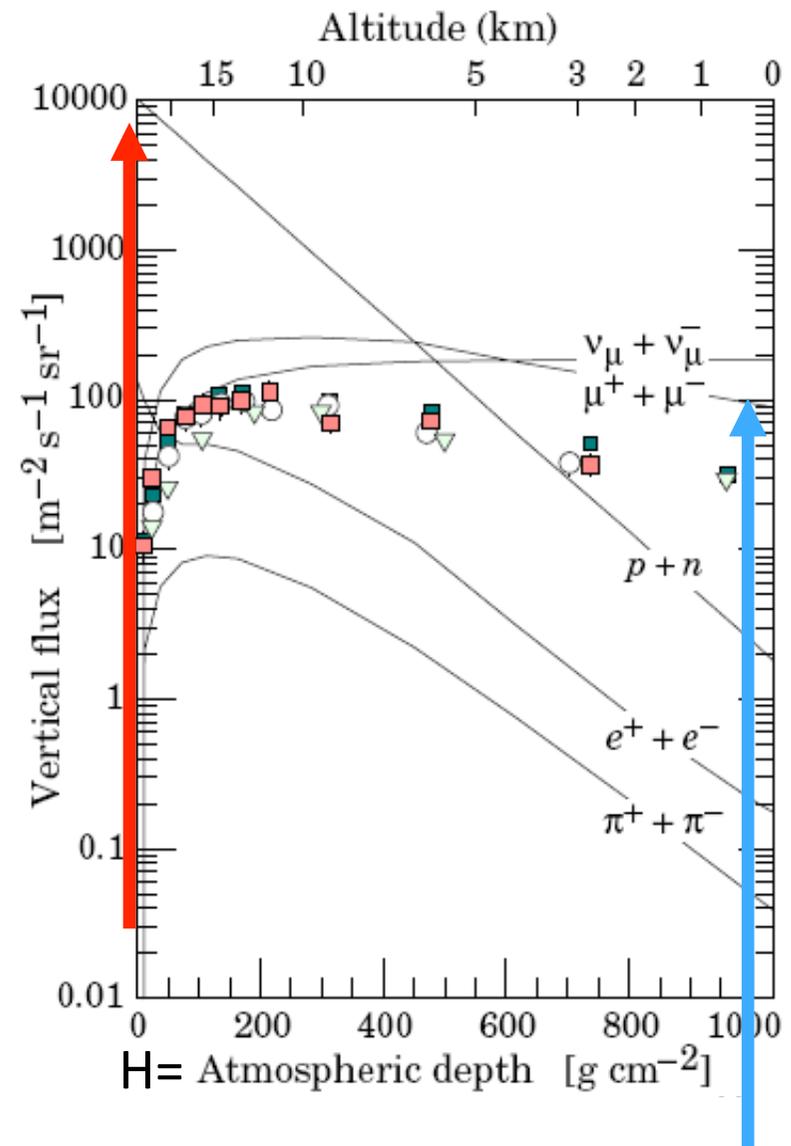


# RC secondari

Lo spessore di atmosfera equivale a 10 m di acqua

1. Flusso sulla sommità ( $H=0 \text{ gcm}^{-2}$ ):  
 $10000 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$   
p (90%), He (9%), A (1%)

2. Flusso a livello del mare ( $H=1000 \text{ gcm}^{-2}$ ):  
 $200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$   
Muoni, neutrini,  $e^+e^-$ ,  $\gamma$



### 3. Underground: muoni e neutrini

Il flusso decresce in modo esponenziale con la profondità.

Per  $h > 13$  km.w.e.

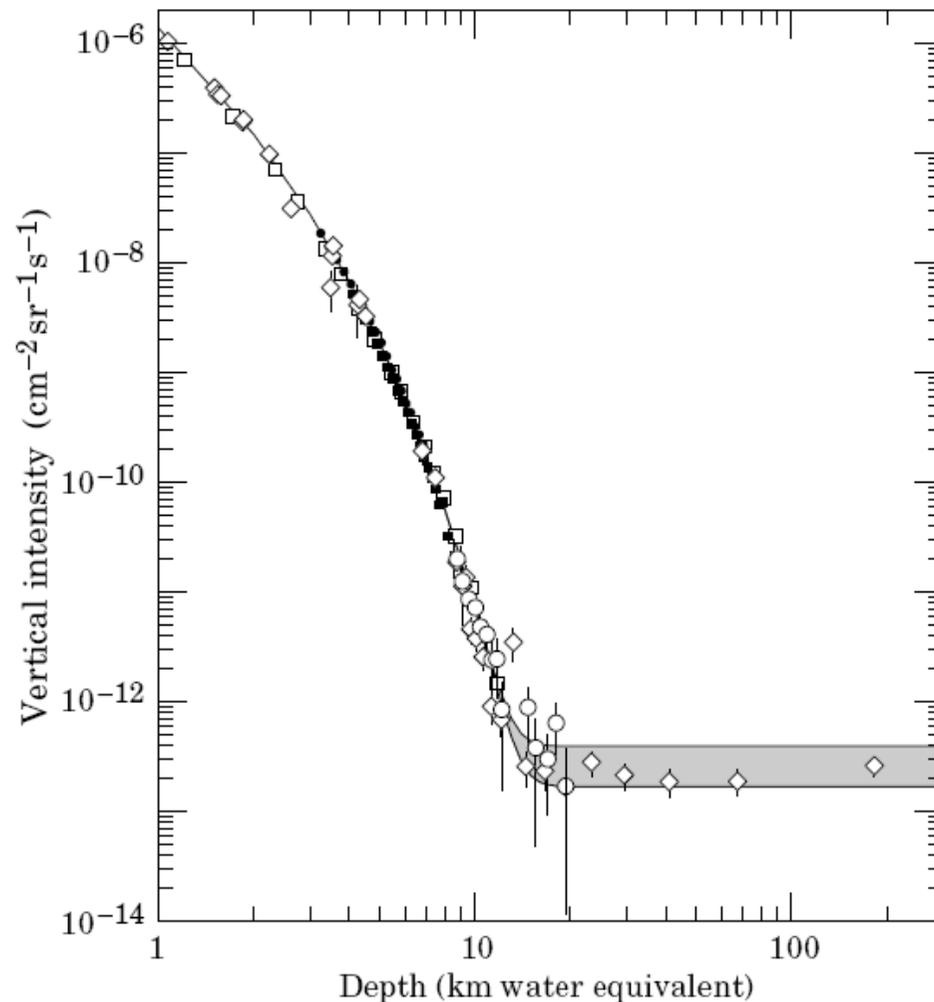
sopravvivono solo le particelle indotte da neutrini.

Nascita di esperimenti

underground a basso fondo

Ai LNGS il flusso è ridotto di un fattore  $10^6$  rispetto a quello al livello del mare.

### 24. Cosmic rays



**Figure 24.5:** Vertical muon intensity vs depth (1 km.w.e. =  $10^5$  g  $\text{cm}^{-2}$  of standard rock). The experimental data are from:  $\diamond$ : the compilations of Crouch [45],  $\square$ : Baksan [46],  $\circ$ : LVD [47],  $\bullet$ : MACRO [48],  $\blacksquare$ : Frejus [49]. The shaded area at large depths represents neutrino-induced muons of energy above 2 GeV. The upper line is for horizontal neutrino-induced muons, the lower one for vertically upward muons.

## Cosa possiamo imparare dai RC?

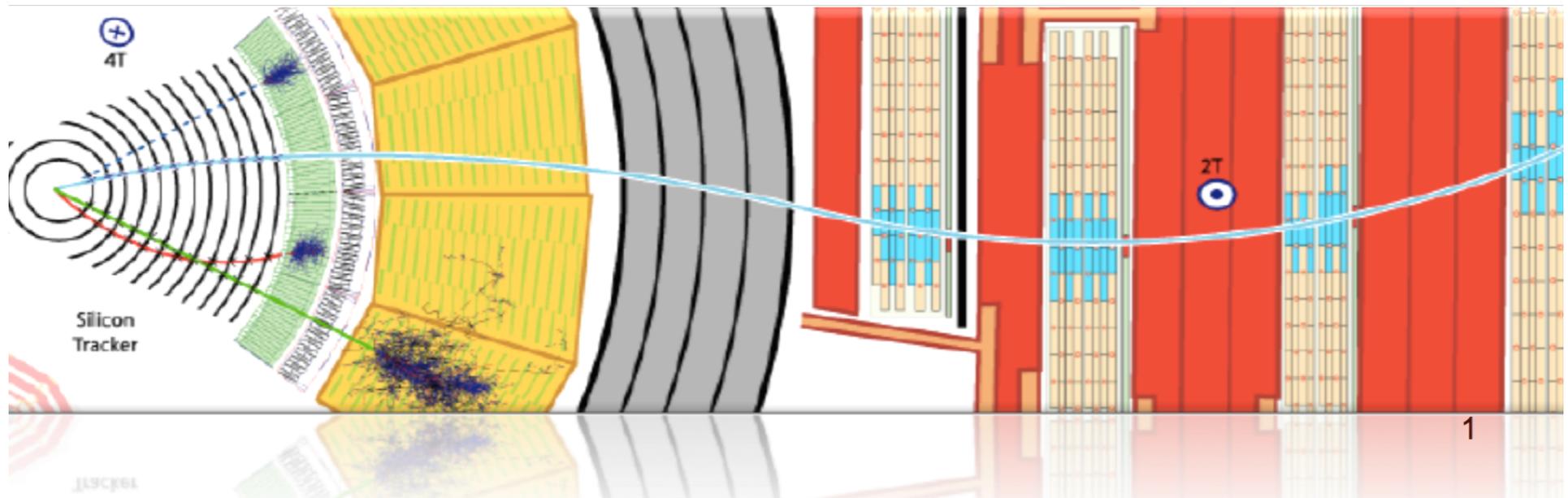
<b>Misure/Effetti sperimentali</b>	<b>Informazioni Fisiche</b>
<p>Composizione:      <math>p \cong 85\%</math>                          <math>He \cong 12\%</math>                          <math>C,N,O \cong 10^{-2}</math>                          <math>Fe \cong 10^{-4}</math>                          <math>e^- \cong 2\%</math>                          <math>e^+ \cong 10^{-4}</math>                          <math>\bar{p} \cong 10^{-4}</math></p> <p>Spettri energetici Composizione isotopica Ricerche di antinuclei Ricerche di nuove particelle</p> <p>Modulazione solare Taglio geomagnetico Fasce di radiazione Atmosfera (<math>23 X_0, 11 \lambda_1</math>)</p>	<p>Sorgenti Meccanismi di accelerazione Meccanismi di propagazione Mezzo interstellare Tempo di confinamento Nucleosintesi Campi magnetici Fisica del sole Geofisica Simmetria materia/antimateria??? Nuove particelle??? Materia oscura??? Nuove interazioni??? Cosmologia???</p>

# Astrofisica Nucleare e Subnucleare

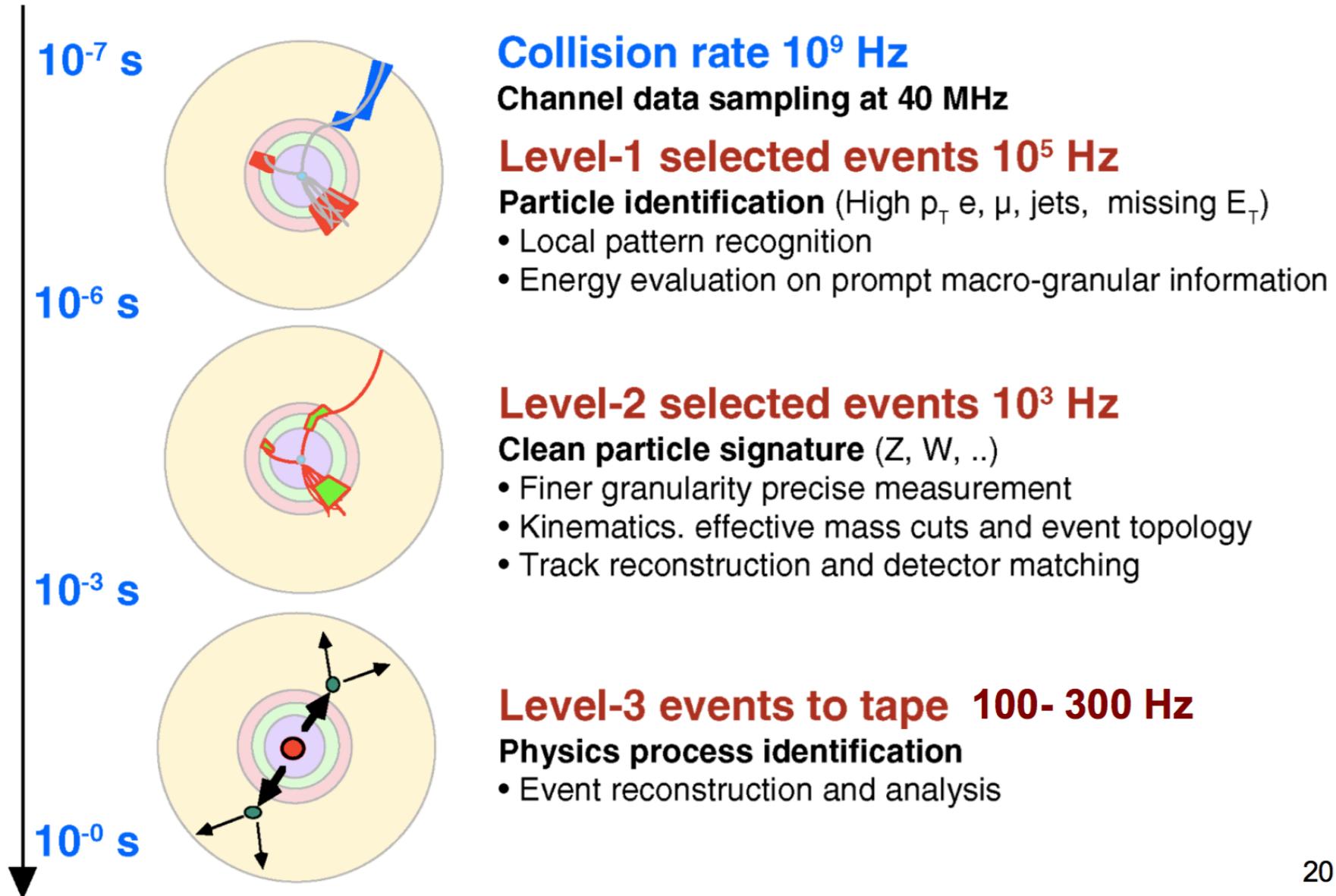
## Trigger and DAQ

# Detector Systems

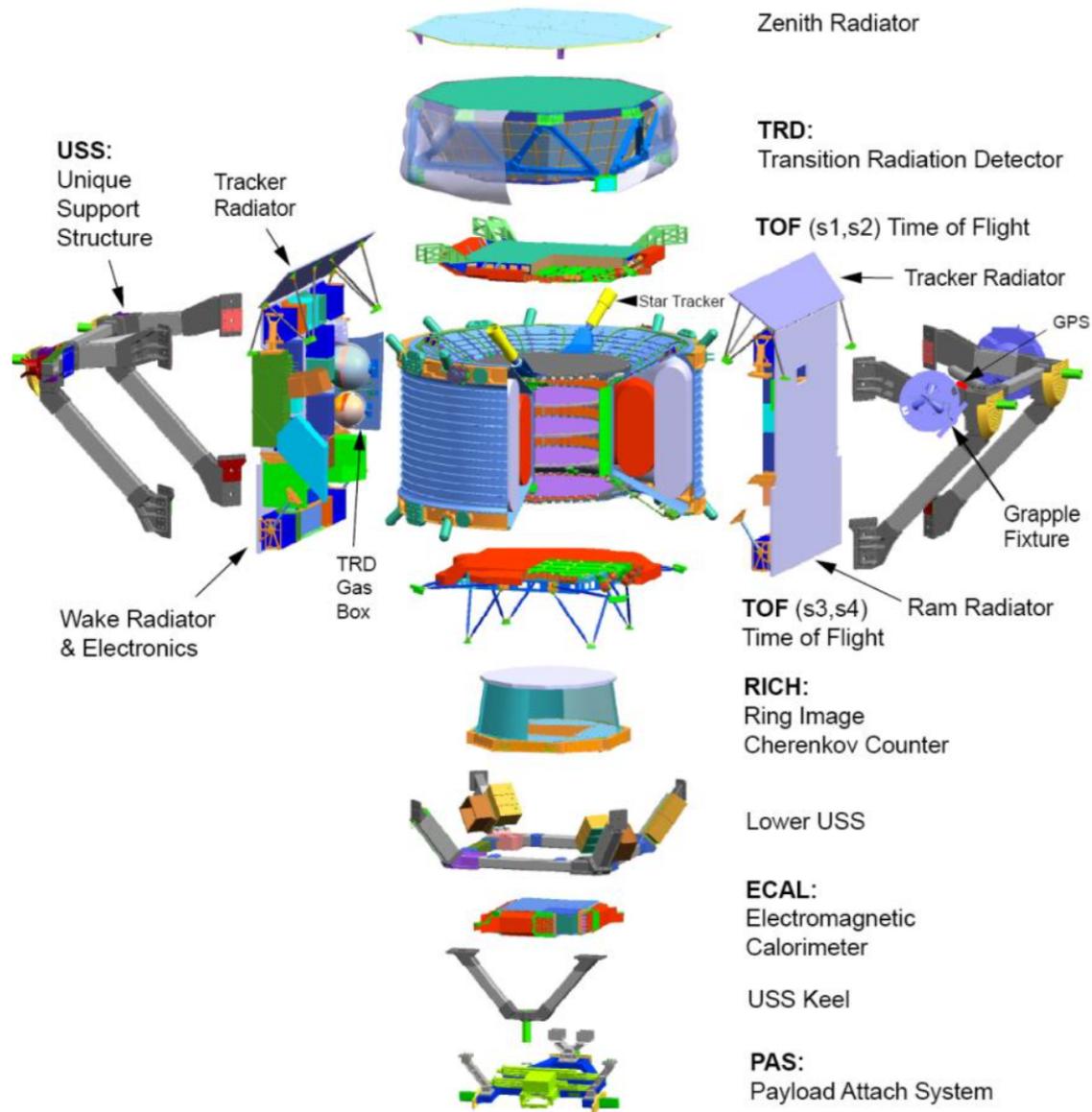
4<sup>th</sup> July 2012



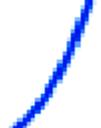
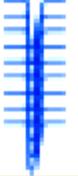
# LHC Trigger Levels



# AMS

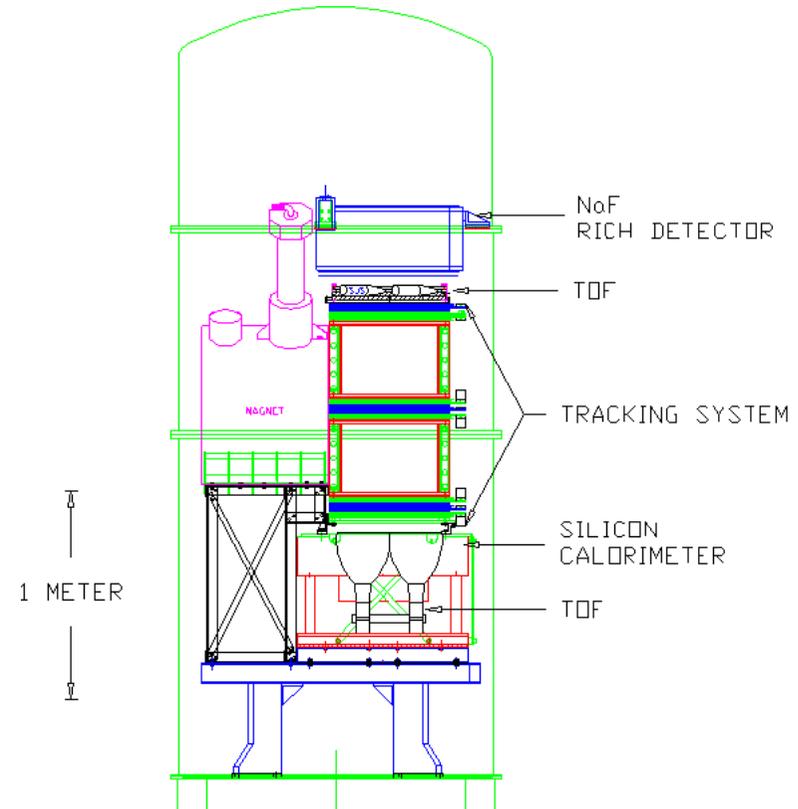
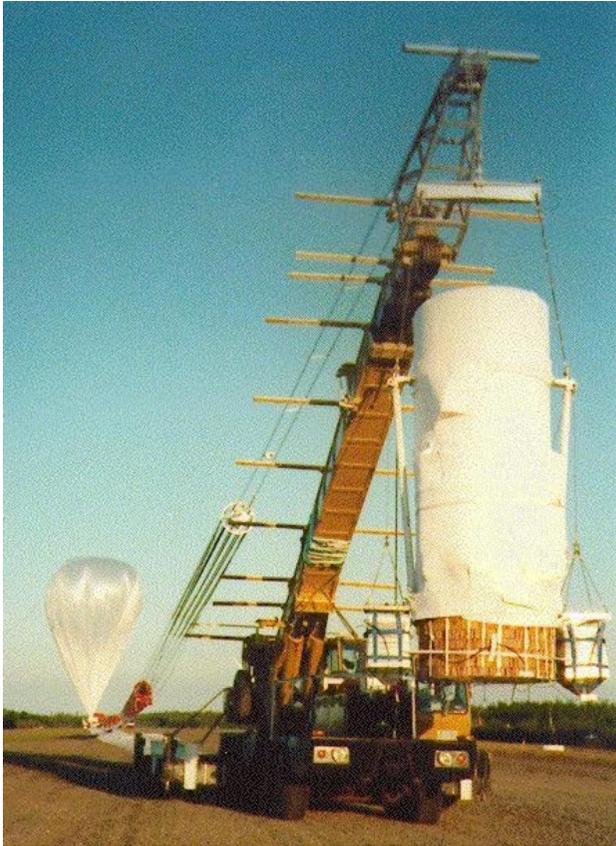


# CR detectors

300 GeV	$e^-$	$e^+$	P	$\bar{\text{He}}$	$\gamma$	$\gamma$
TRD						
TOF						
Tracker						
RICH						
Calorimeter						

# Esperimenti per misure dirette di RC

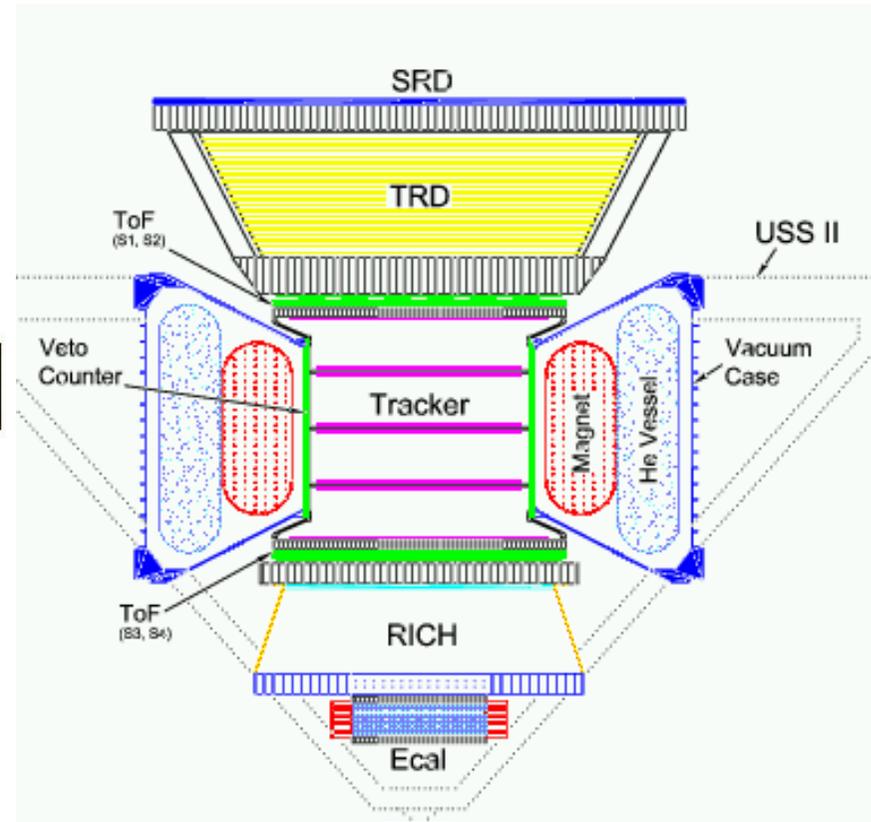
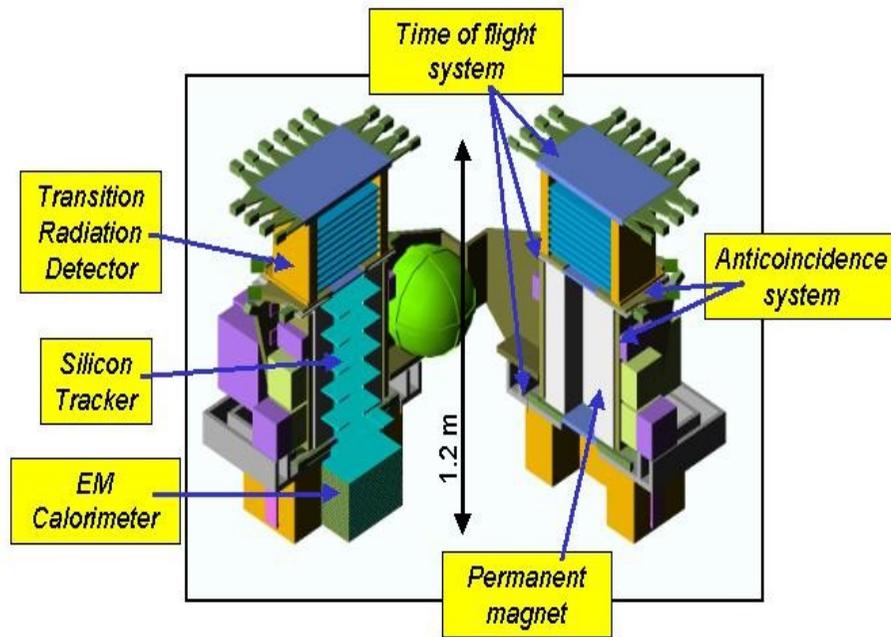
# CR detectors



Space like environment for balloon experiments. Balloons are a valuable tool for scientific CR and atmospheric research



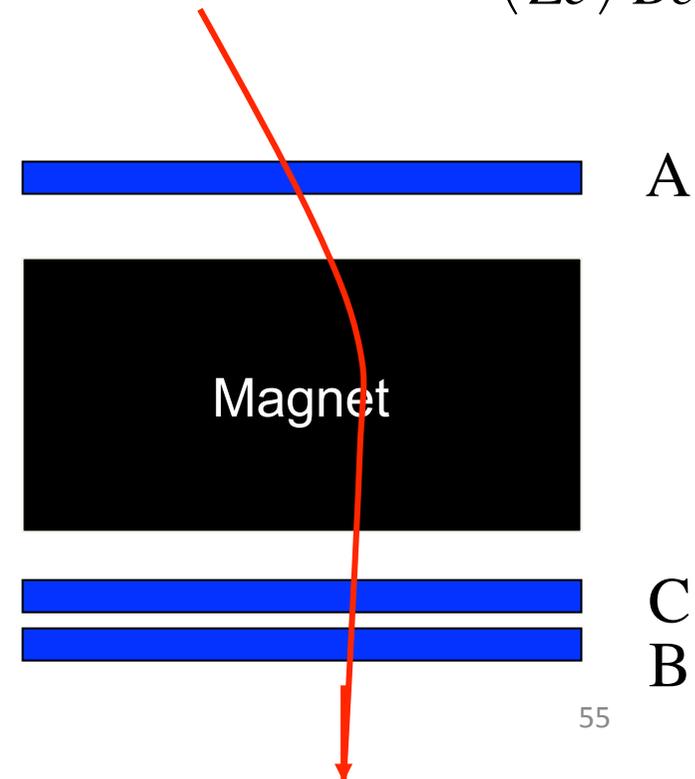
# CR detectors



# Identificazione di particelle

- Identificazione di particelle = massa, carica, energia/impulso
- Spettrometro: strumento per la misura della rigidità  $R = \frac{pc}{Ze}$  in campo magnetico.  $B$  è noto,  $Z$  e  $p$  possono essere misurati
- La risoluzione nella misura dell'impulso è dipende dalla precisione nella misura della traccia e dallo scattering multiplo della traccia all'interno del magnete.
- Un sistema di tempo di volo (ToF) (ad esempio A,C sono 2 contatori a scintillazione o contatori proporzionali) fornisce la misura di  $dE/dx$  (ossia  $Z^2$ ), tempo, posizione e **trigger**. La misura del ToF tra due posizioni note fornisce la velocità della particella. Da  $r_L$  si ottiene la massa della particella.
- Talvolta, un rivelatore distruttivo (calorimetro) può essere usato per avere una misura indipendente dell'energia totale della particella.

$$r_L = \left( \frac{pc}{Ze} \right) \frac{1}{Bc}$$



# Esperimenti nello spazio

- **Sviluppi recenti:** esperimenti nello spazio (PAMELA, AMS, altri) finalizzati alla misura diretta di RC e della **ricerca di antimateria**.
- Spettrometri: misurano la carica dei RC → RC, antinuclei.
- Occorre però un campo magnetico → magneti nello spazio, superconduttori, criogenia → pesanti, costosi!
- Identificazione di particelle: occorre una ottima discriminazione di particelle per separare elettroni da antiprotoni. Occorrono diversi strumenti a seconda dell'energia della particella:
  - **Low energy:** TOF, Cherenkov
  - **High energy:** RICH, TRD, calorimetri elettromagnetici
- Tipicamente: 1 antiprotone su  $10^{5\div 6}$ .

# PAMELA

- The 680 km polar orbit will allow studying the low energy cosmic rays, close to the poles. The main scientific objectives of the experiment are the precise measurement of the positron and antiproton fluxes at energies from 100 MeV to above 100 GeV, as well as the search for antihelium with a sensitivity of  $10^{-7}$  in the antiHe/He ratio.
  - A Transition Radiation Detector (TRD) to identify electrons and positrons;
  - A spectrometer based on a permanent magnet equipped with a silicon microstrip tracker to measure particle tracks and momenta;
  - An imaging calorimeter
  - A Time of Flight (TOF) and first level trigger system based on plastic scintillators;
  - An anticoincidence system, also based on plastic scintillators.

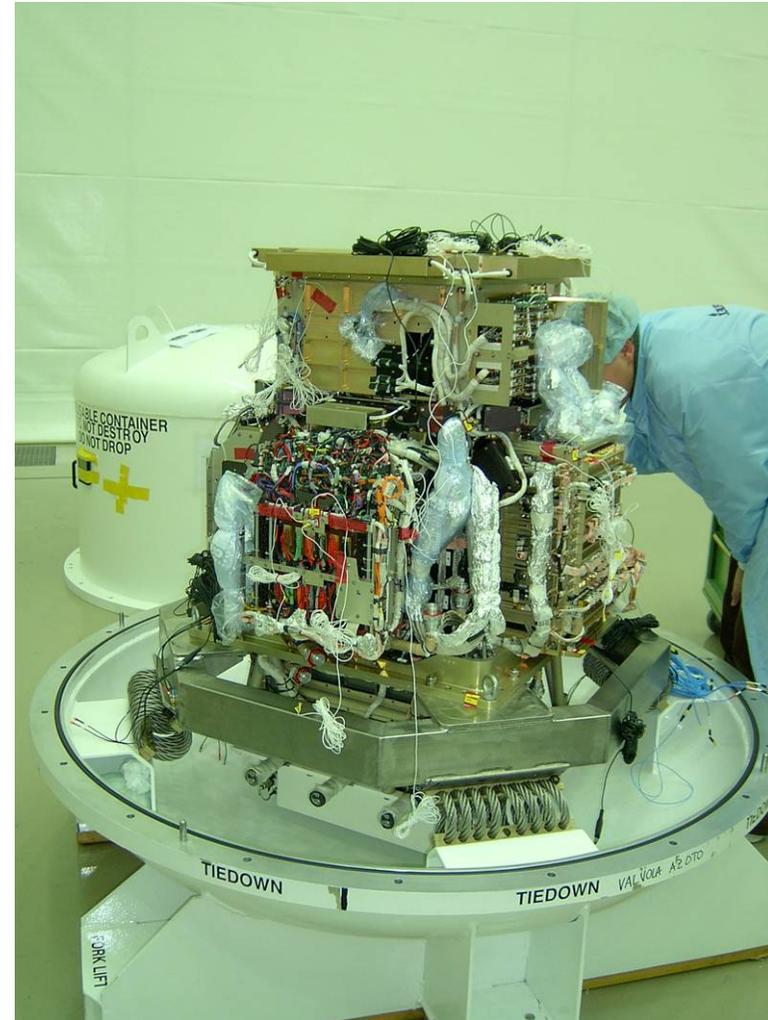
# PAMELA

- Lanciato 15/6/2006 da Baikonur Cosmodrome-Kazakhstan

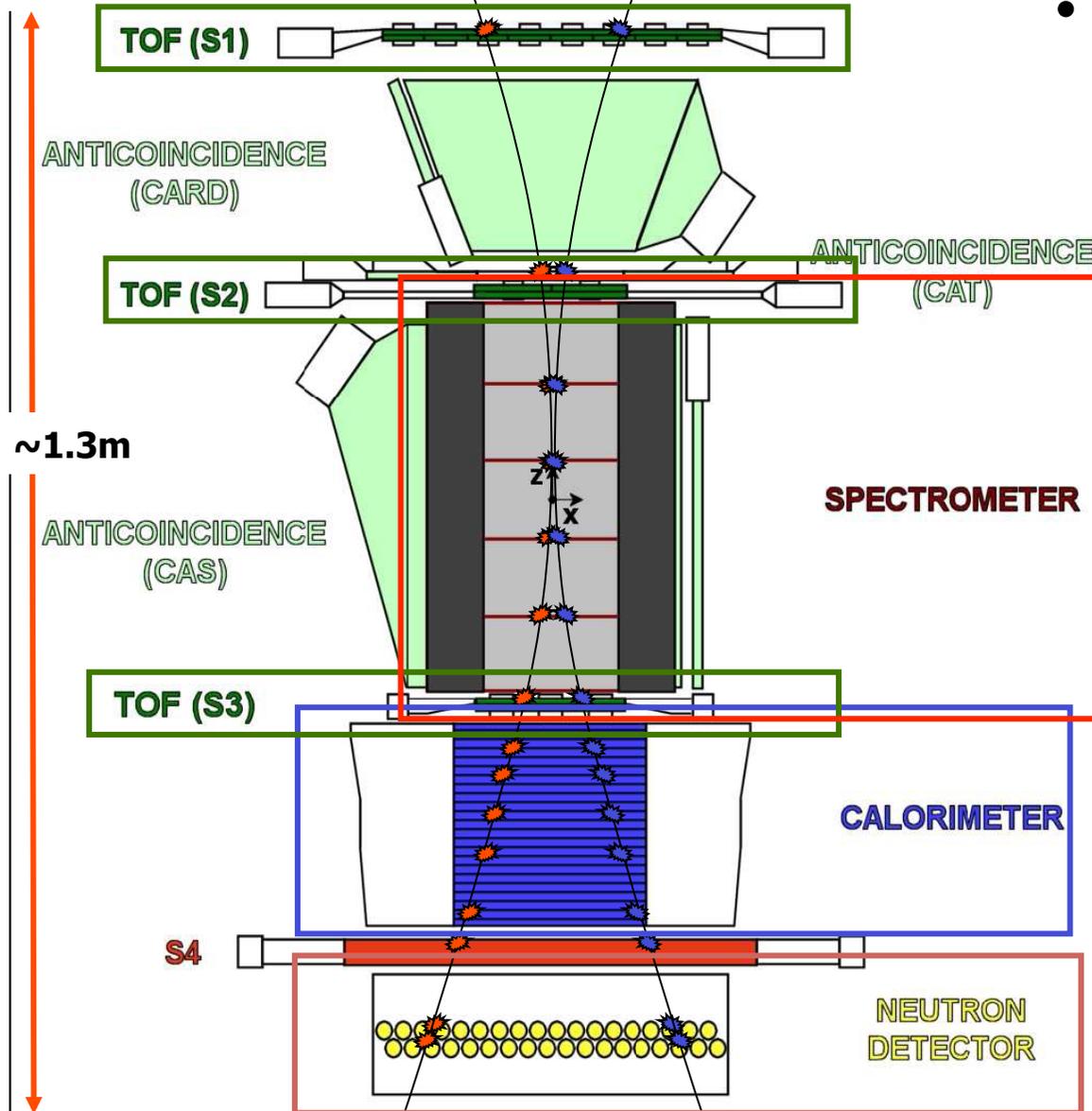


# PAMELA

- Obiettivi dell'esperimento:
  - Misurare lo spettro di antiprotoni, positroni e (anti)nuclei in un ampio intervallo di energie;
  - Ricerca di antimateria “primordiale”
  - Studio del flusso dei RC primari
- PAMELA è capace di misurare rigidità magnetiche (=impulso/carica) sino a **700 GV/c**.

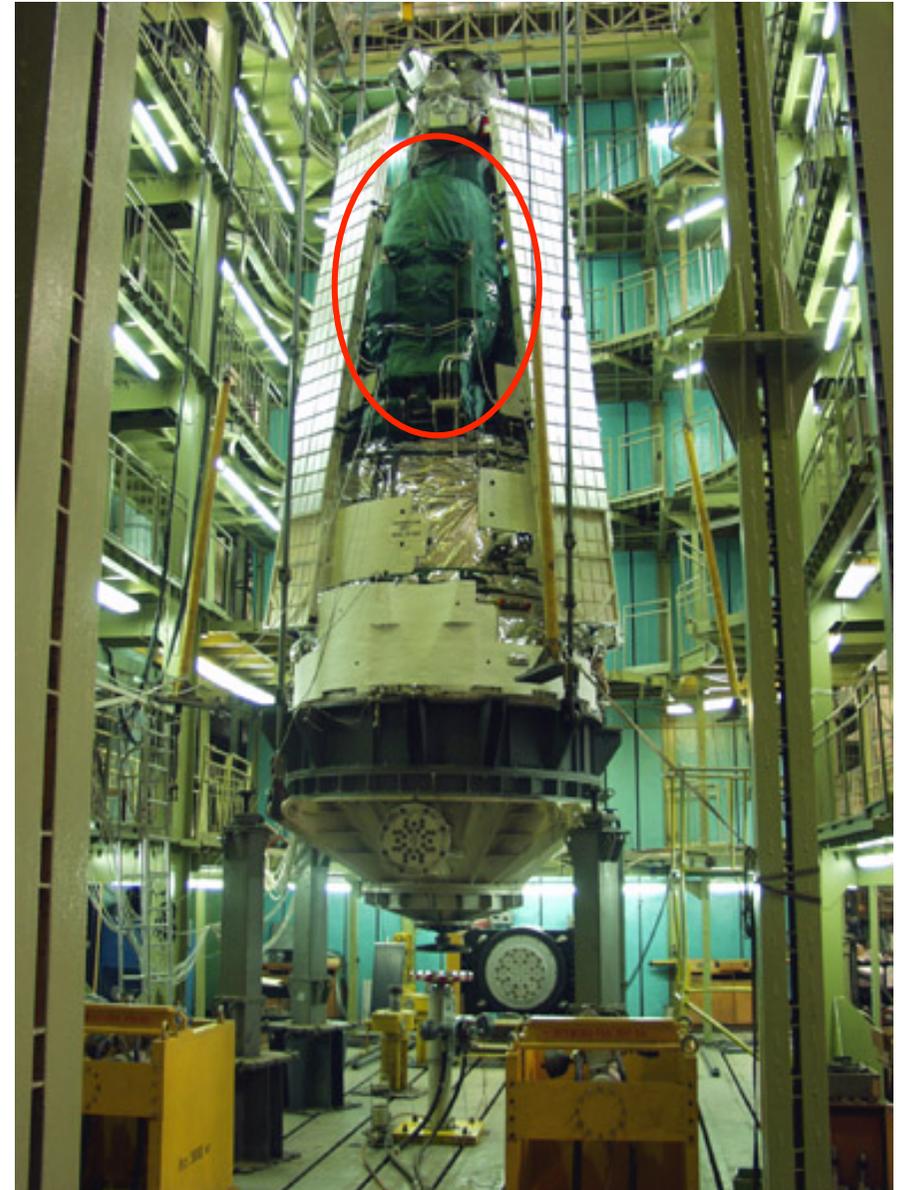
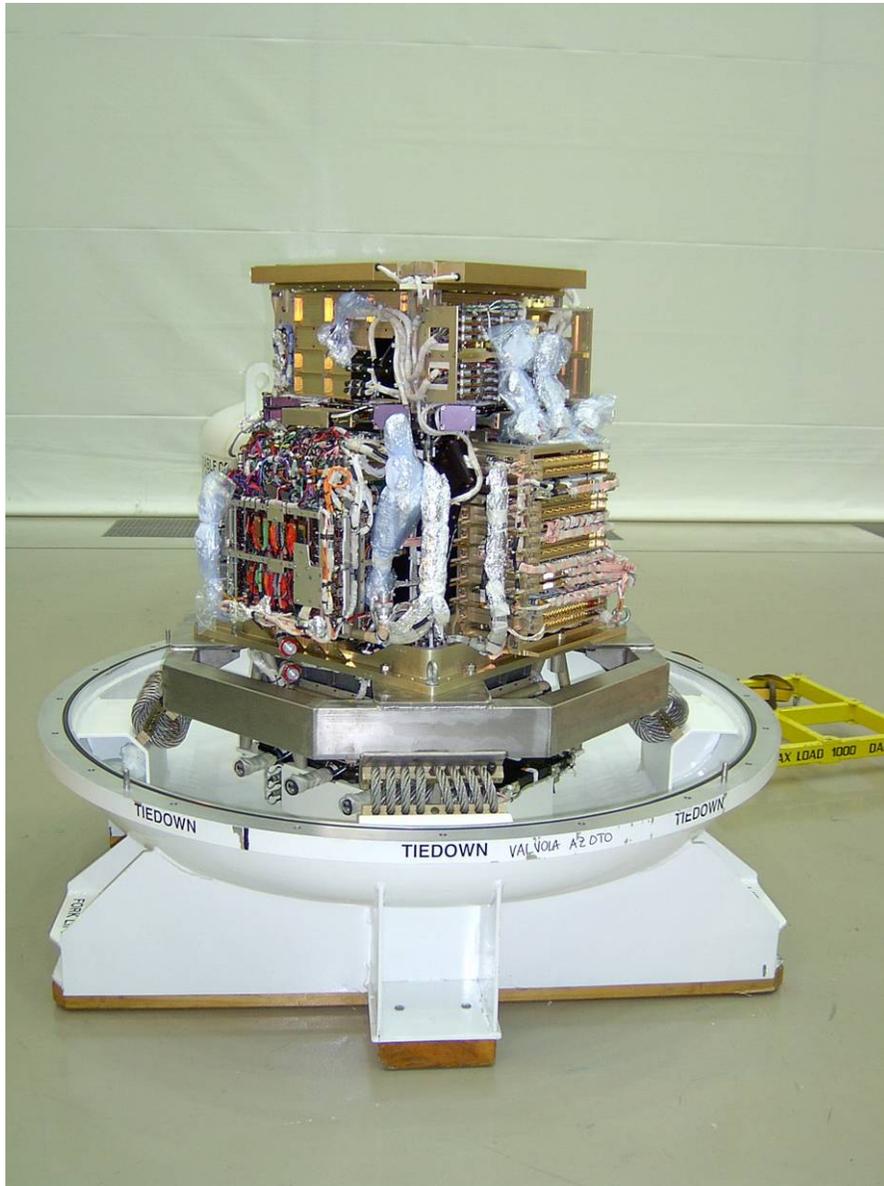


# PAMELA



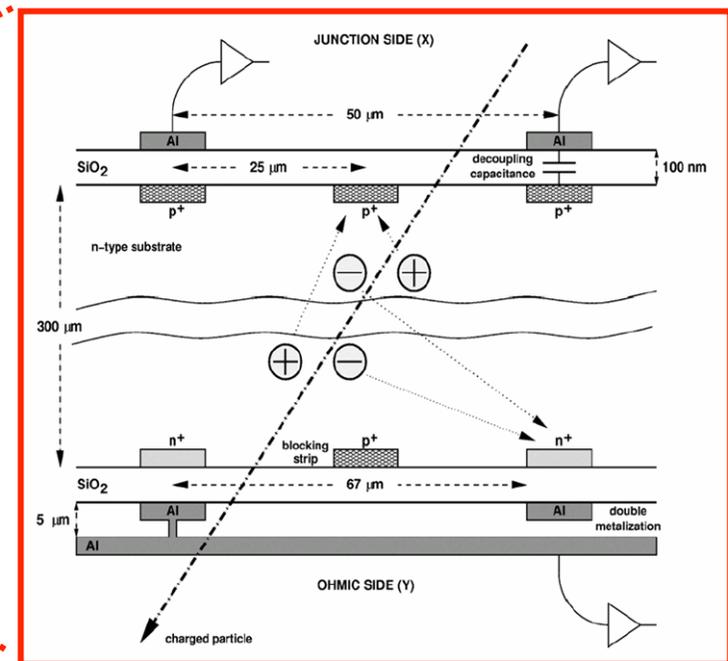
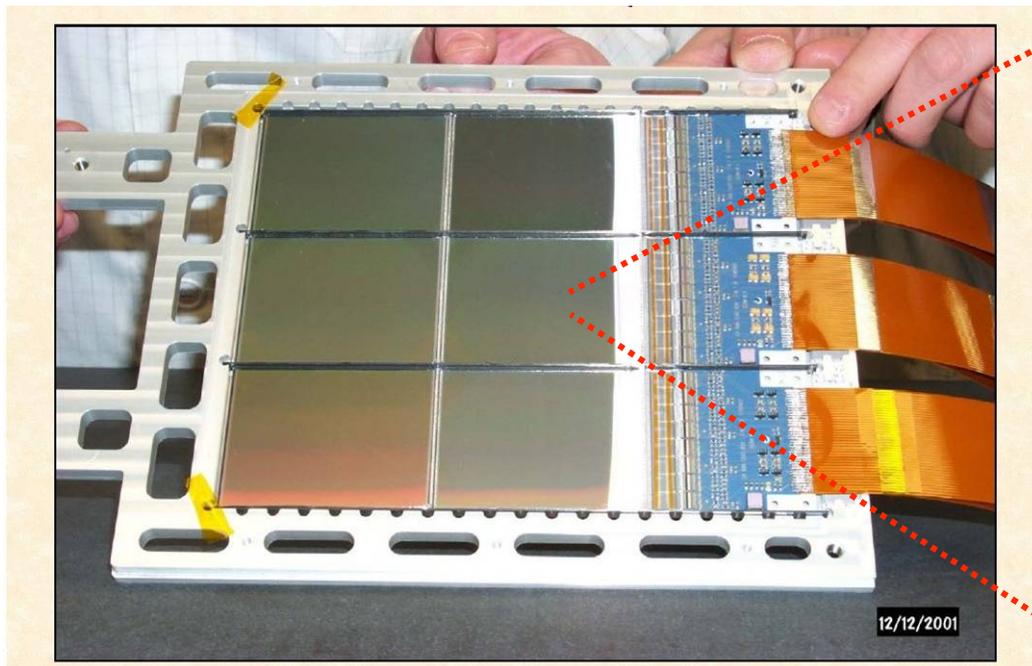
- Identificazione di particelle usando:
  - TOF
  - Calorimetro
  - Rivelatore di neutroni (basato sulla cattura da parte di  $^3\text{He}$  n) → aiuta a discriminare cascate elettromagnetiche da quelle adroniche
  - Misura della rigidità tramite spettrometro, costituito da un magnete permanente ed un sistema tracciante al silicio

# Integrazione e posizionamento nel satellite



# Tracciamento: Piani di silicio

- **Double-sided silicon microstrips** (300  $\mu\text{m}$  thick):
  - 25  $\mu\text{m}$  implantation pitch (junction side) / 67  $\mu\text{m}$  (ohmic side)
  - Strips mutually orthogonal on opposite sides
  - Readout pitch 50  $\mu\text{m}$

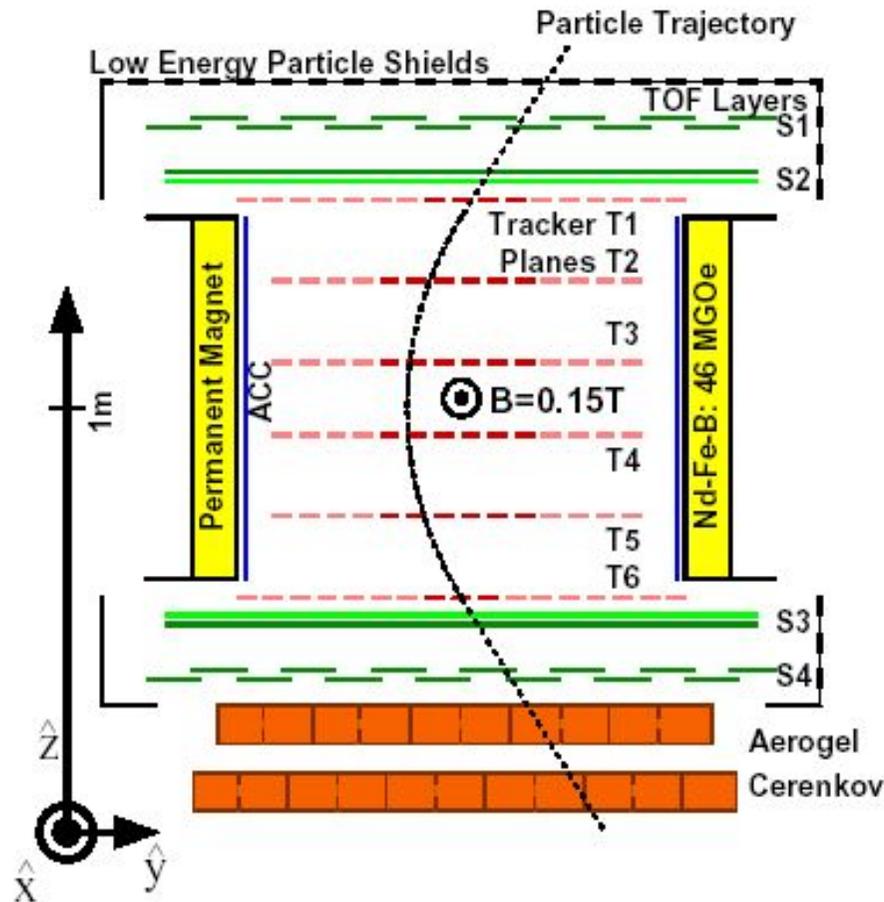


# Calorimetro Elettromagnetico

- 44 single-sided silicon sensor planes (380  $\mu\text{m}$  thick) interleaved with 22 plates of tungsten absorber for a total depth of 16.3 X0 ( 0.6 nuclear interaction lengths).
- A self-trigger system was implemented in the calorimeter read-out electronics to measure high-energy electrons



# AMS01



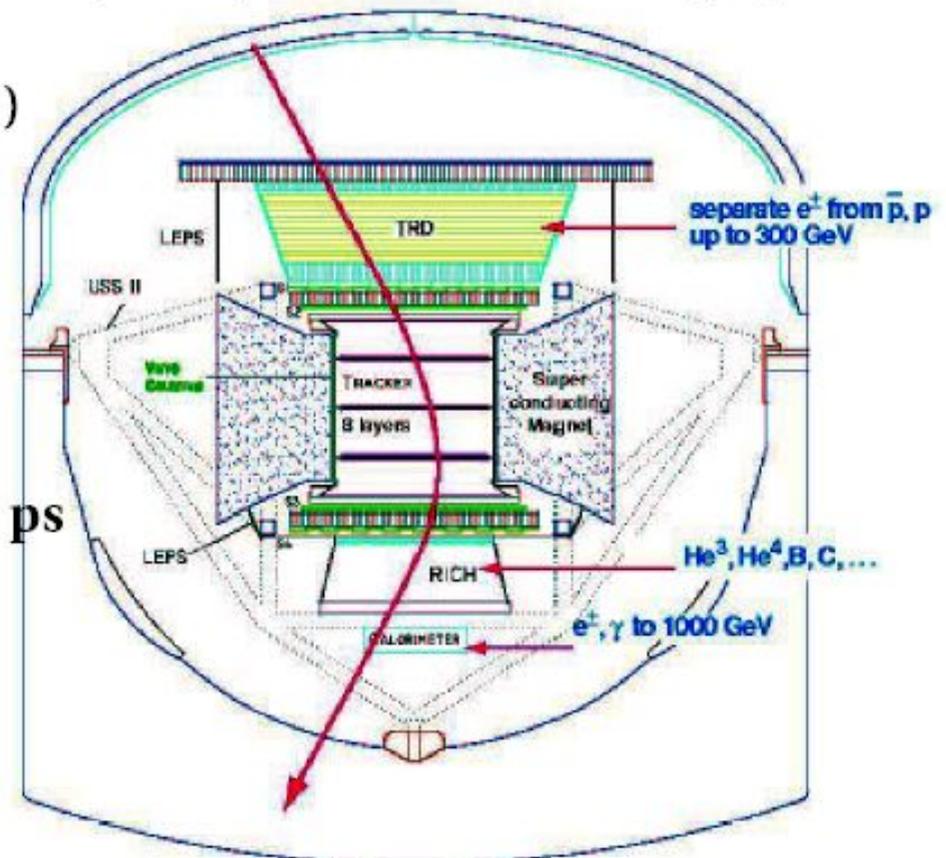
- ◆ **Magnet** : 1024 blocks of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
- ◆ **TOF**: four planes of scintillators
  - velocity and Z measurement
- ◆ **Tracker**: six planes of DS Silicon Microstrip Detectors
  - Charge sign and Rigidity measurements
  - Z measurement up to Oxygen
- ◆ **Aerogel Threshold Cerenkov**
  - velocity measurement
- ◆ **Anticounters**
  - reject multi particle events

## AMS is a Large Acceptance Magnetic Spectrometer for:

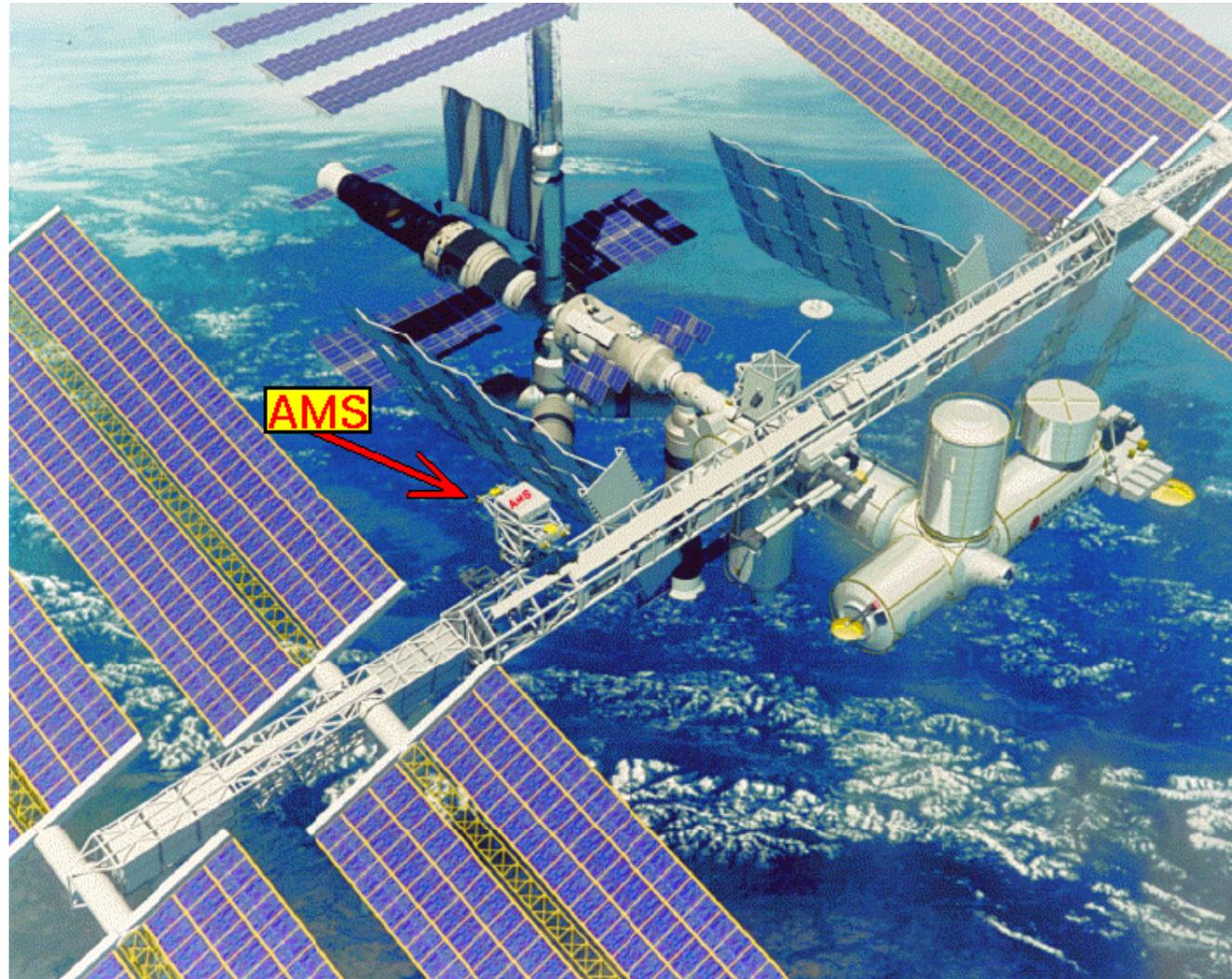
- Antimatter Search ( $\overline{\text{He}}, \overline{\text{C}}$ )
- Accurate measurements of Cosmic-ray composition and energy spectra
- Dark Matter Signatures ( $e^+, \bar{p}, \overline{\text{D}}, \gamma$ )

→ *High-energy  $\gamma$ -ray sky exploration*

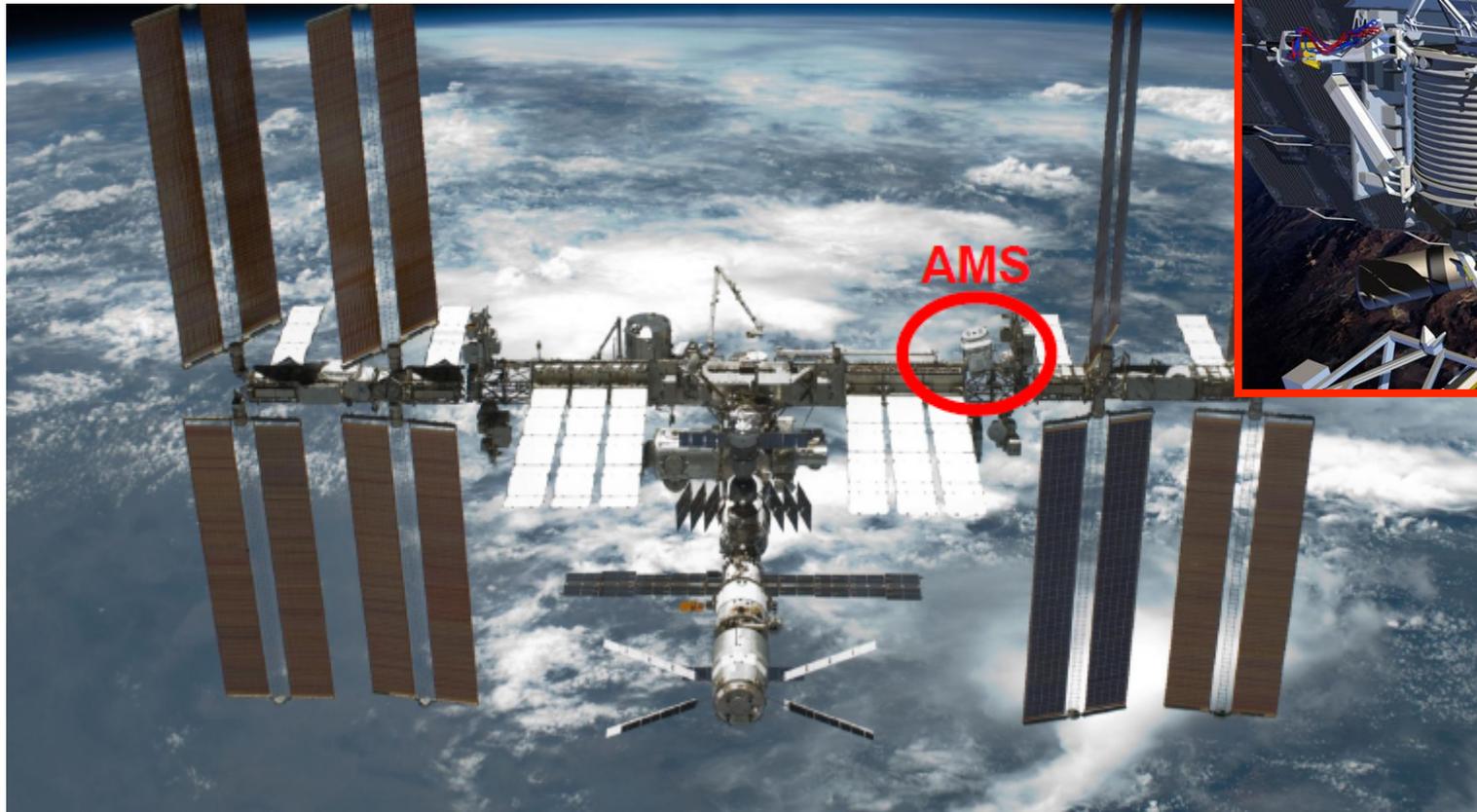
- Superconducting Magnet: **0.8 T**
- 4 layers of Scint. Counters (ToF): **120 ps**
- 8 layers Si-Tracker: **MDR 2 – 3 TeV**
- Gaseous TRD:  **$h/e$   $10^2 - 10^3$**
- Pb-Sci. ECAL:  **$h/e$   $O(10^3)$**
- Aerogel (1.05) RICH:  **$\frac{d\beta}{\beta} = 0.07 - 1\%$**



# AMS



# Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) Experiment

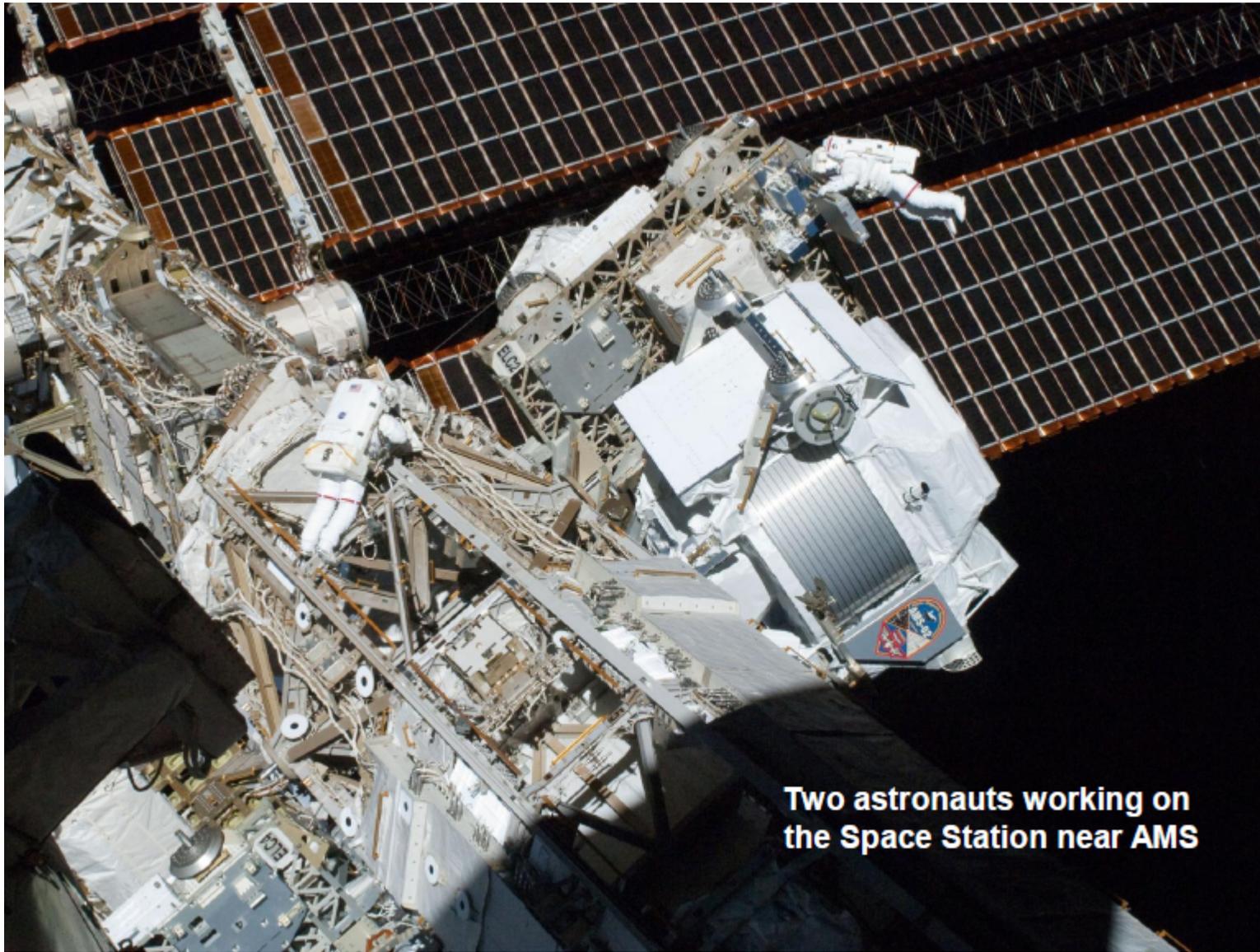


- **ISS : 108 m x 80m, 420 t**
- **orbit height 400km**

- *Inclination = 51.57°*
- *15.62 revolutions/day*

## AMS Transfer to the Shuttle, 26 March 2011



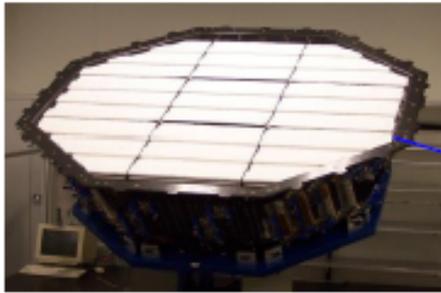


**Two astronauts working on the Space Station near AMS**

# AMS features



TRD



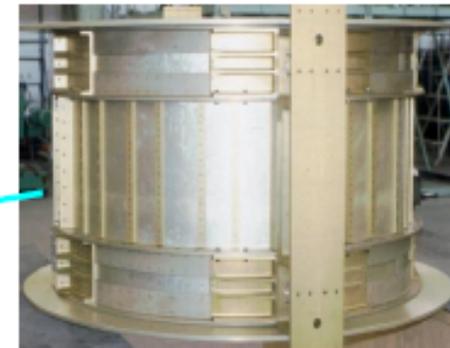
TOF



Silicon Tracker



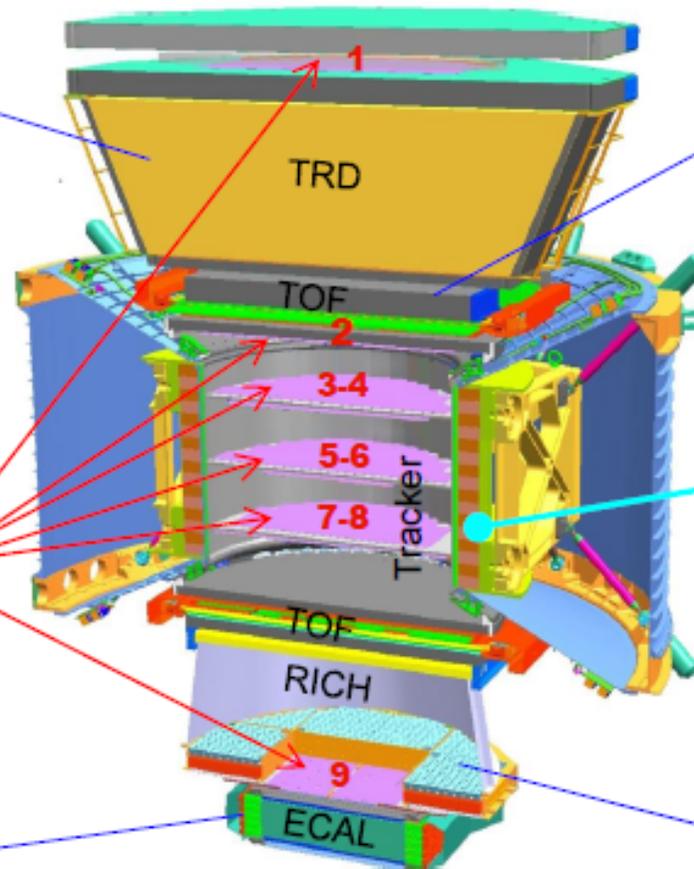
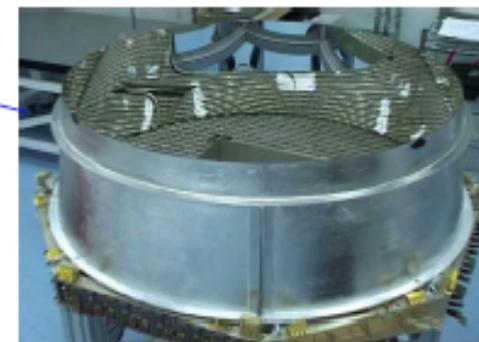
Magnet



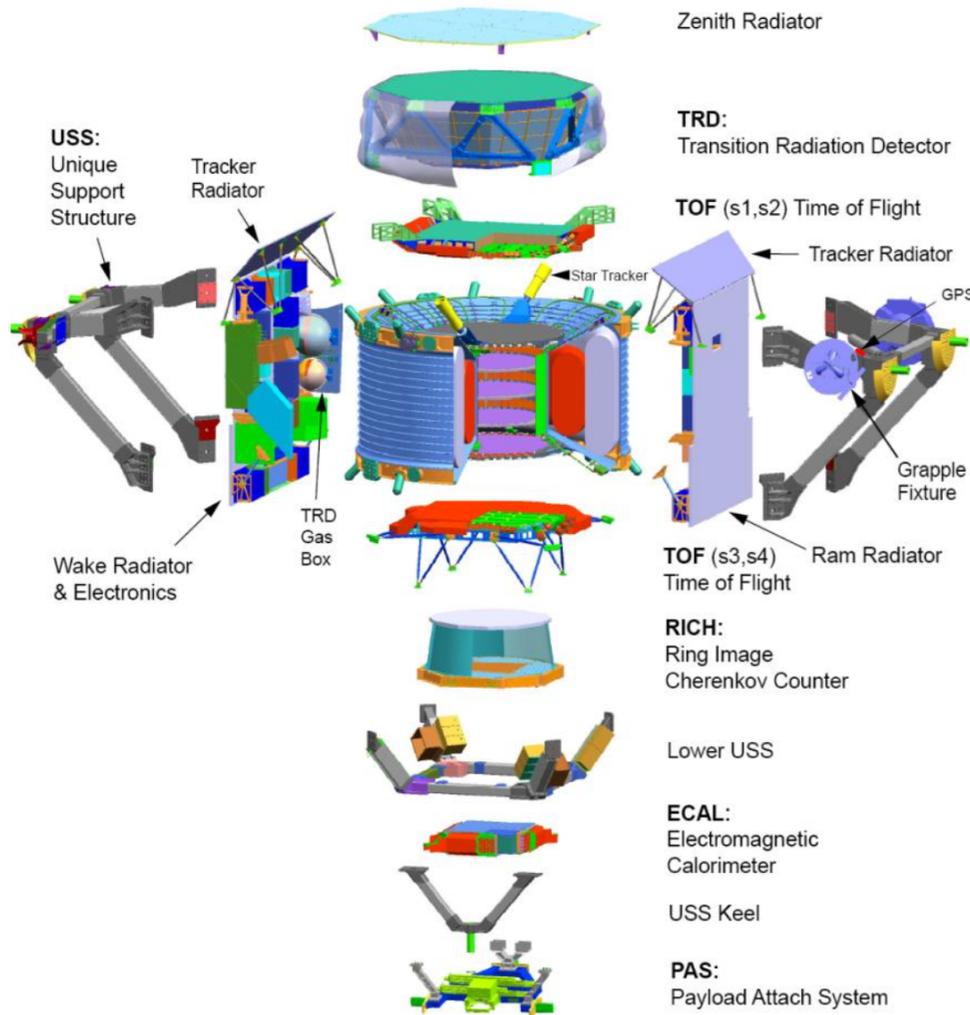
ECAL



RICH



# AMS



## A TeV Detector in Space: AMS-02 on the Space Station.

- The value of  $|Q|$  is measured independently in Tracker, RICH and TOF.
- The signed charge,  $\pm Q$ , and the momentum of the particle,  $P$ , are measured by the 8 layers of doubled-sided silicon tracker in the magnet.
- The velocity,  $\beta = v/c$ , is measured by the TOF, TRD and RICH.
- The energy of electromagnetic particles is measured by the calorimeter<sup>69</sup>.