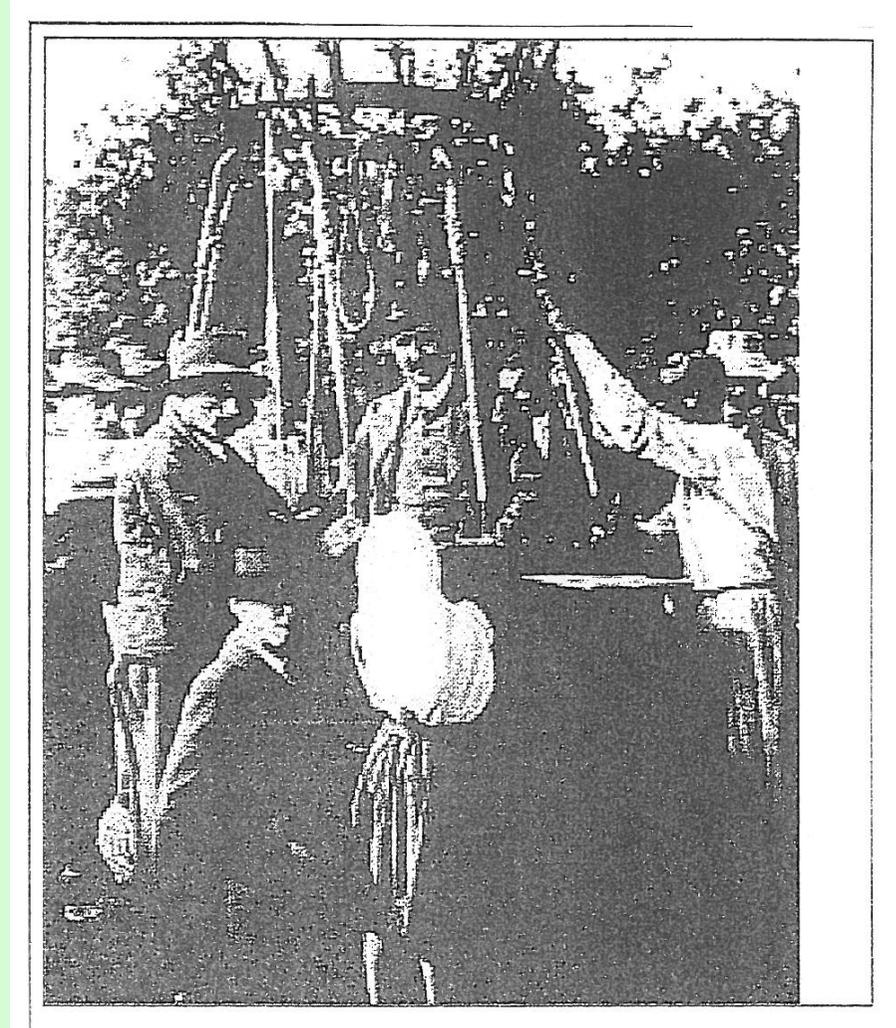


CENTO ANNI DI RAGGI COSMICI

I PRIMI CINQUANTA
a cura di

ADALBERTO PIAZZOLI

Dipartimento di Fisica
Università di Pavia



1 – PREMESSA

- Coulomb (1785), ELS, contatori schermati (≈ 1900):
“Radiazione penetrante?”
- Inizia la “Fisica dei Raggi Cosmici” che coincide con la
“Fisica delle Particelle” fino agli anni ‘50

2 – OGGI SAPPIAMO

- A livello del mare i raggi cosmici (RC) sono $\approx 250 \text{ m}^2/\text{s}$:
70 % μ^\pm , 30 % $e^\pm \gamma$
- I muoni (μ) non sono “mesoni”, ma “leptoni”
- Spettro dei μ in Fig. 1

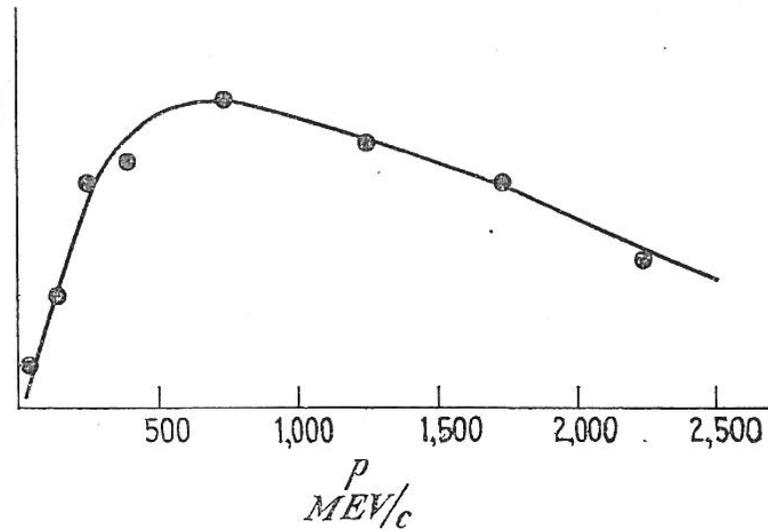


Fig. 1. Meson spectrum (collected by J. G. Wilson).

FIG. 1 SPETTRO DEI
 μ COSMIC

- I μ^+ sono 25 ÷ 30 % dei μ^- (“eccesso positivo”)
- Distr. ang. : $\cos^2 \vartheta$ (angolo di zenit)
- Dose media annua di un italiano: 0.4 mSv
- Il vento solare non è considerato RC

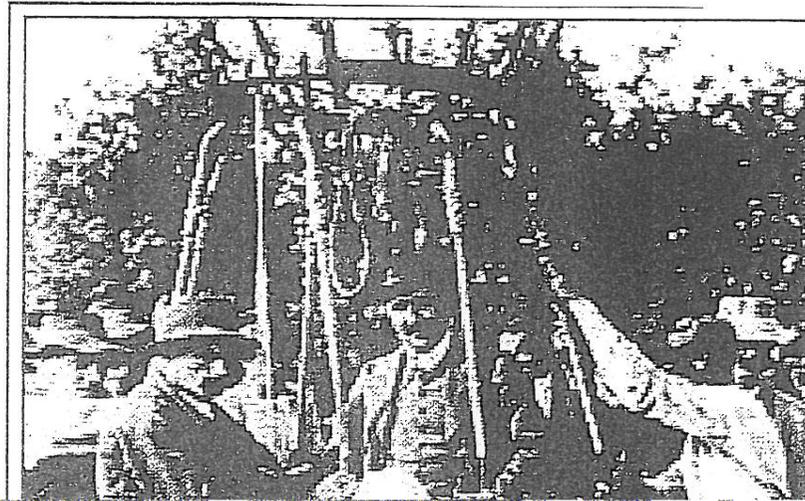
3 – LA SCOPERTA

Volo in mongolfiera fino a 5000 m con 3 ELS a bordo di Victor Hess il 7 Agosto 1912.

Misura il tempo di scarica degli ELS in funzione dell'altitudine e conclude:

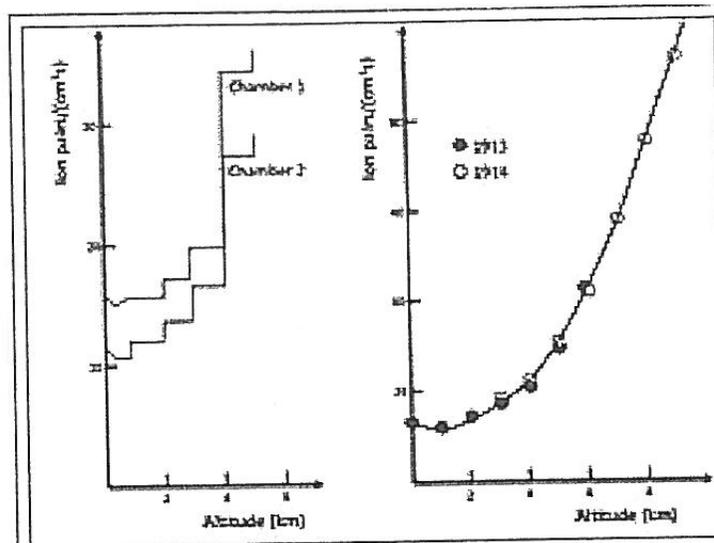
“I risultati delle mie osservazioni si spiegano meglio assumendo che una radiazione di alto potere penetrante entri dall'alto della nostra atmosfera” (Nobel 1936)

Fig. 2 , Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5



Hess di ritorno dal suo volo in
mongolfiera nell'agosto 1912

Fig. 2



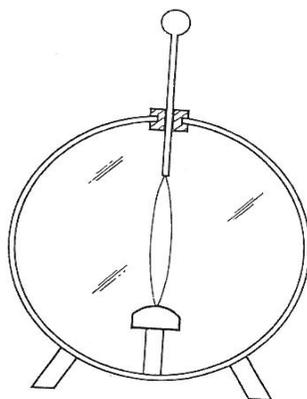
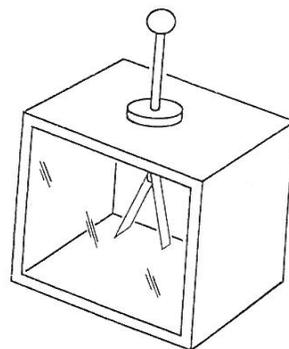
Aumento della ionizzazione con l'altitudine nelle misure di Hess (sin) e Kolhorster (dx)

Fig. 3



VICTOR HESS
(1883 - 1964)

Fig. 4



LE SOFISTICATE APPARECCHIATURE
DI HESS

Fig. 5

4 – COSA SI SAPEVA NEL 1912

- Raggi X (W. Röntgen – 1895)
- Radioattività (Becquerel – 1896)
- Elettrone (J.J. Thompson – 1897)
- Nucleo (Rutherford – 1911)
- Misure di un quasi dimenticato Domenico Pacini (1908 -1912) (Fig. 6)



DOMENICO PACINI (1878-1934)

Fig. 6

5 – MILLIKAN

- Misure sistematiche (dal '23 al '26) con palloni sonda, in montagna, sott'acqua
- “Strampalata” ipotesi che i RC fossero γ dalla fusione di Idrogeno primordiale
- Inventa il nome “Raggi Cosmici”
- Comunque, fino al '29 si pensava che gli RC fossero γ (> 100 MeV): potevano ben avere un elevato libero cammino medio perché il Compton scende con l'energia e non si sapeva ancora delle coppie $e^+ e^-$

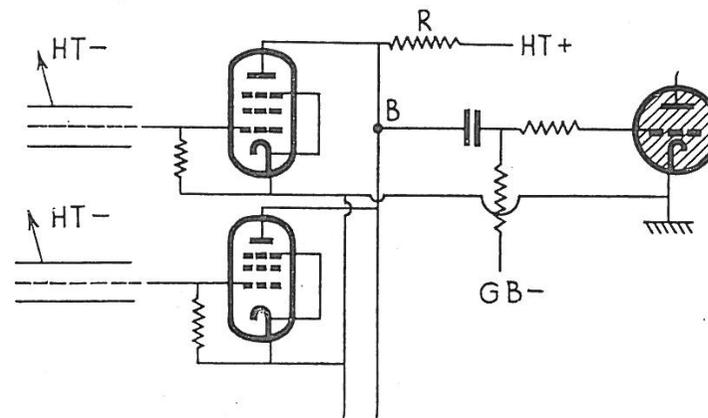


R. MILLIKAN (1868-1953)

Fig. 7

6 – BOTHE E KOHLHOSTER (BK – 1929)

- Impiegano per la prima volta Geiger (G) e circuiti in coincidenza (CC) e per la prima volta rivelano singoli RC



The Rossi circuit.

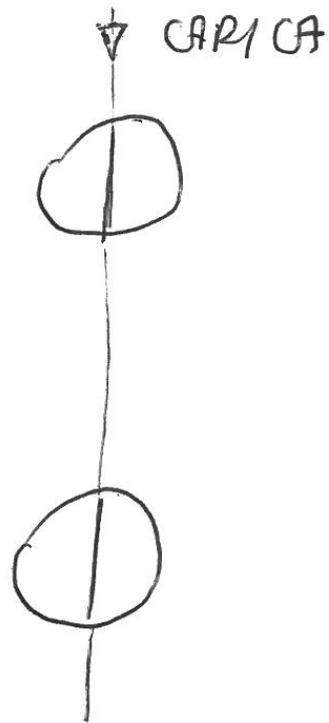
COINCIDENZA

Fig. 8

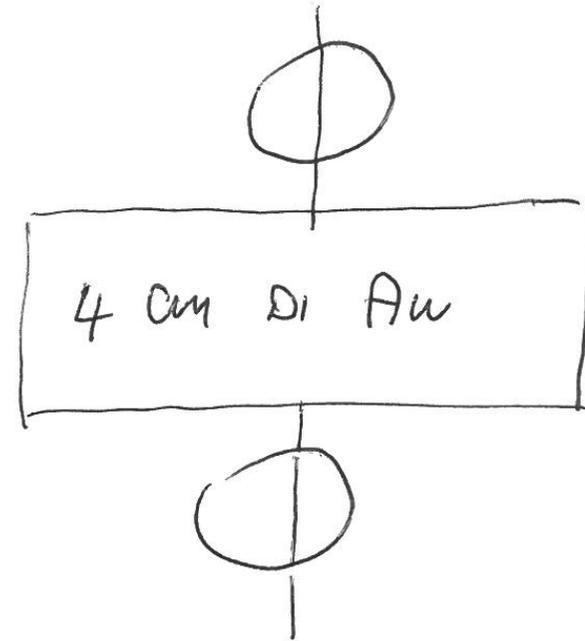
CON 2 γ IN COINCIDENZA



2 COLONN? No!



SÌ



ANCORA 76% DI CONT.

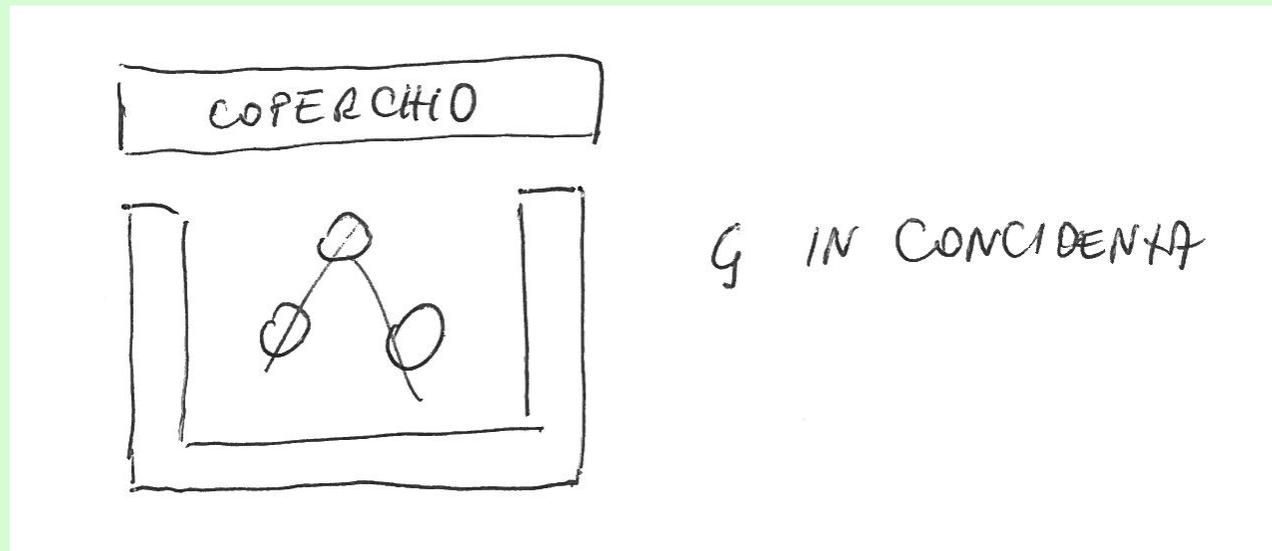
Conclusione: RC \neq γ , carichi ma ... "penetranti"

7 – BRUNO ROSSI



BRUNO ROSSI (1905-1993)

- Riffa sistematicamente le misure di BK anche con 1m di Pb
- Scopre gli “sciami”

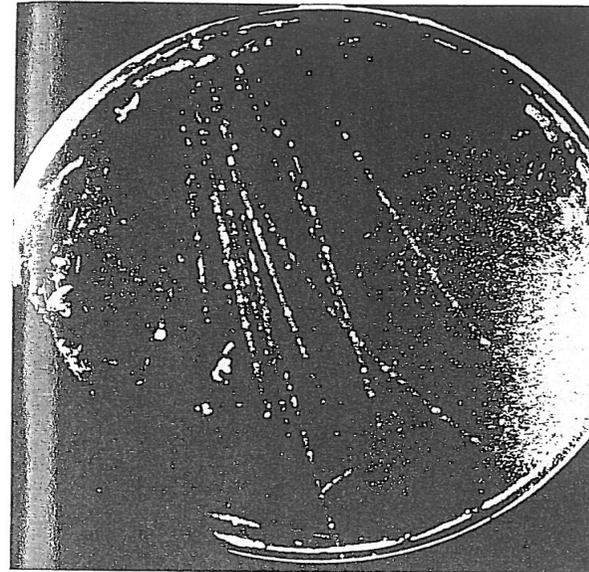


- Almeno a basse quote c'è una componente “molle” e una “dura” (penetrante): forse la dura è la primaria che arriva nell'alta atmosfera (ma così non è!).

8 – LA CAMERA DI WILSON (CW)

Inventata nel 1899 e impiegata in altri contesti

Nel '32 Blackett e Occhialini la perfezionano e la usano "triggerata" (Fig. 10)



LA CAMERA DI WILSON "TRIGGERATA"
DI BLACKETT E OCCHIALINI

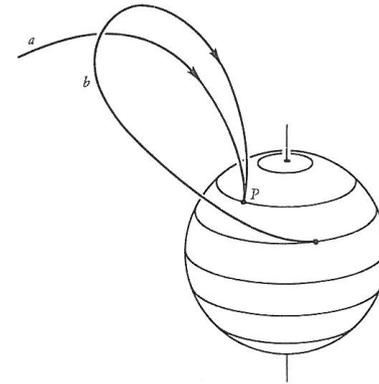
9 – IL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE (CMT)

- Il CMT è sì un analizzatore magnetico naturale, ma molto... scomodo, perchè una carica in un campo dipolare...
- Si usava $E/Z = 300 BR$ con
 - B in Gauss
 - R in cm
 - E in eV
 - BR \equiv “Rigidità”
- C’era comunque da attendersi un “effetto latitudine”
- Nel ‘34 si scopre anche un “effetto longitudine”

10 – EFFETTO EST-OVEST

- Il complicato algoritmo detto dei “coni proibiti di Störner” prevede un eccesso da Ovest per primari positivi e viceversa (Fig. 11)

Traiettorie (schematiche) di due ipotetiche particelle di rigidità magnetica diversa in arrivo nello stesso punto P dalla stessa direzione. La traiettoria a , percorsa a ritroso, va all'infinito; essa è una traiettoria *permessa*. La traiettoria b , percorsa a ritroso, ritorna sulla terra; essa è una traiettoria *proibita*.



STÖRMER

Coni di Störner per particelle positive e negative di uguale rigidità magnetica. Il piano rappresentato in a e b è il piano orizzontale per il punto di osservazione O . Per le particelle positive (a), tutte le direzioni ad est del cono (come AO) sono proibite; le direzioni ad ovest del cono (come BO) possono essere permesse. Per le particelle negative (b), AO è una direzione proibita; BO può essere una direzione permessa. L'angolo α è la semiapertura dei coni.

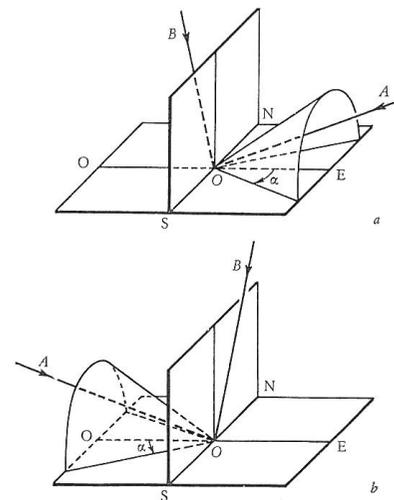
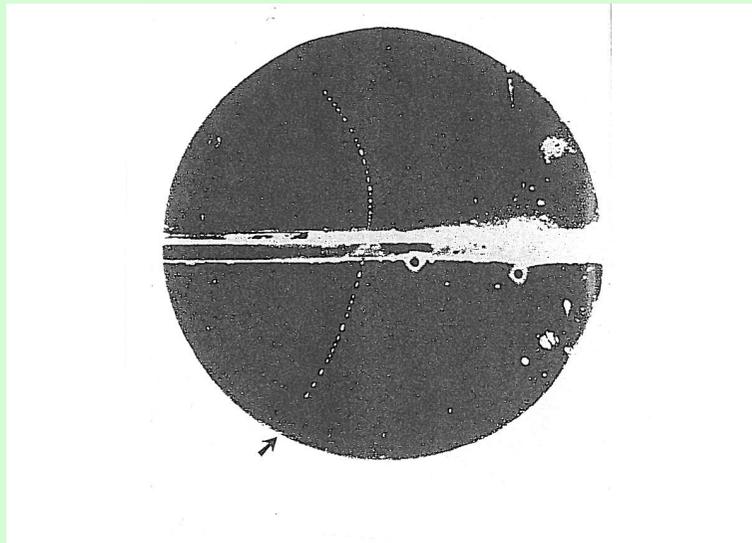


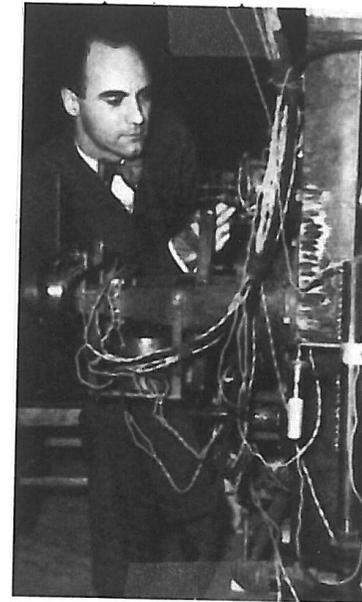
Fig. 11

- Una vasta serie di misure (Compton, Alvarez, Rossi et al.) conferma un eccesso da Ovest (25 % a 45° di Lat.)
- Allora i primari sono protoni? Non così sicuro, perché nel '32 Anderson aveva scoperto il "positrone" (Fig.12 e Fig. 13)



IL POSITRONE DI ANDERSON

Fig. 12

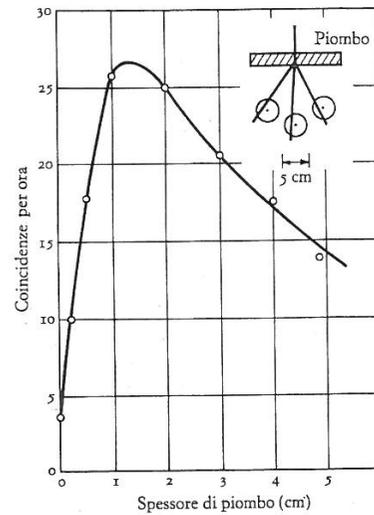


CARL ANDERSON (1905-1991)

Fig. 13

11 – LA CURVA DI ROSSI (DEGLI SCIAMI)

Curva degli sciame. Il numero orario di coincidenze è dato in funzione dello spessore di piombo sopra i contatori. La disposizione sperimentale è schematizzata nell'angolo in alto a destra. I cerchi sono i punti sperimentali. (Questa figura è basata su quella apparsa in un articolo dell'autore nella «Zeitschrift für Physik», vol. LXXXII, 1933, p. 151).

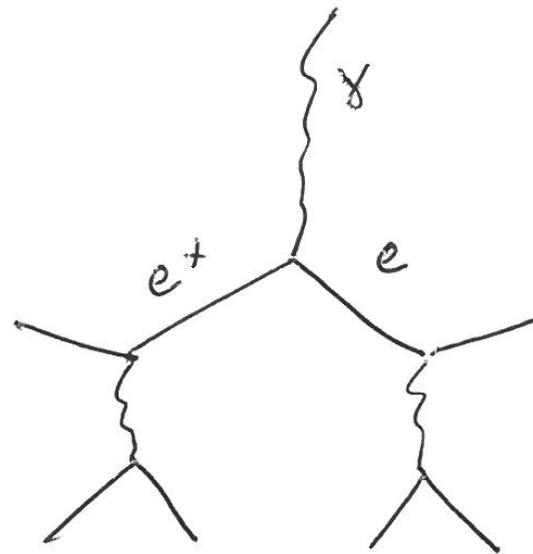


CURVA DI ROSSI (SCIAMI)

Fig. 14

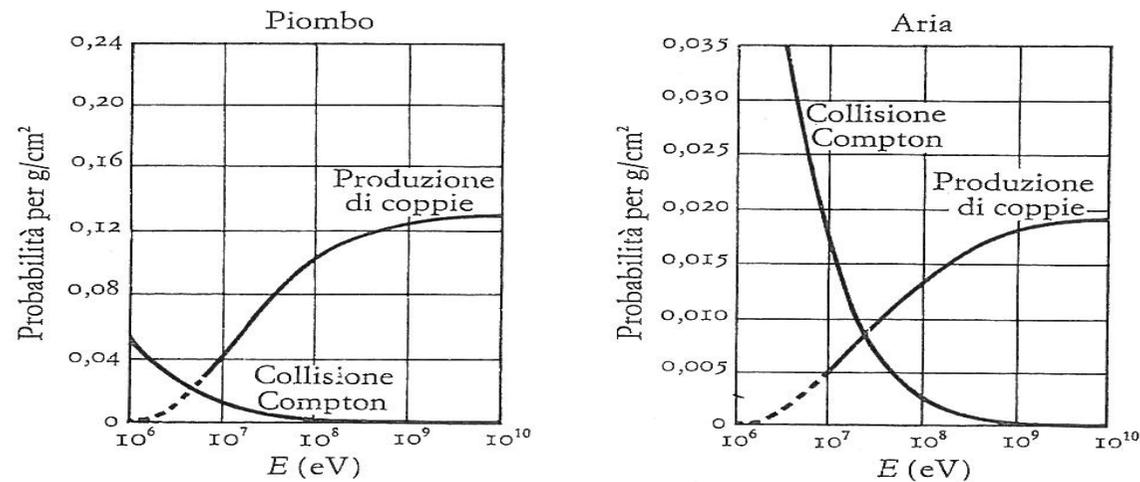
- A sciamare non possono evidentemente essere le particelle penetranti. E allora?

CASCATA ELM



COMPTON TRASCURRIBILI

- A parità di g/cm^2 la frequenza degli sciami va come Z
- Tutto in accordo con Bethe-Heitler



BETHE - HEITLER

Fig. 15

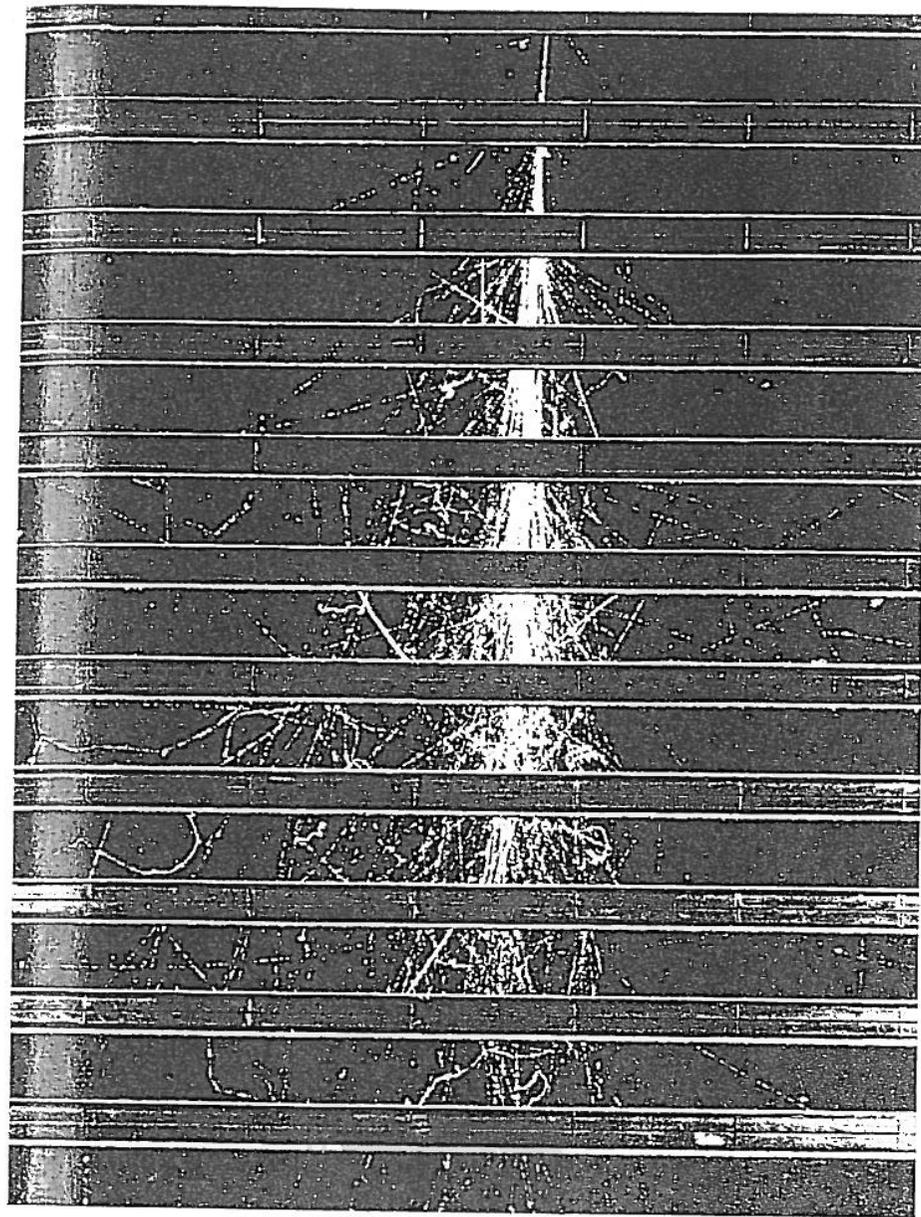


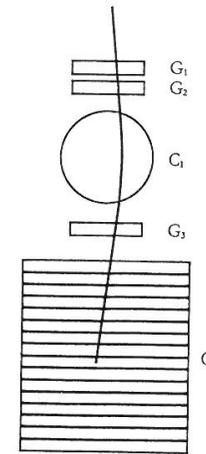
Fig. 16

Uno sciame... maestoso...

12 – I MUONI

- Inizialmente chiamati “mesotroni” e poi mesoni e poi... leptoni
- Anderson (ancora!) e Neddermeyer li rivelano nel '37 con massa intorno a 100 MeV
- Poco dopo Brode, con CW in campo magnetico e misura di range, conferma.

Schema dell'apparecchiatura usata da Brode e collaboratori per misurare la massa del mesone μ . Entrambe le camere C_1 e C_2 sono controllate dalle particelle che scaricano i tre contatori G_1 , G_2 , G_3 . La camera C_1 è posta in un campo magnetico; la curvatura della traccia vista in questa camera dà la rigidità magnetica. La camera C_2 contiene 15 lastre di piombo, ciascuna spessa 0,63 centimetri. Quando una particella si ferma in questa camera, il suo *range* può essere determinato con un'incertezza uguale allo spessore di una singola lastra.



MISURA DELLA MASSA DEL μ
(BRODE)

Fig. 17

- Ma il μ sarà mica lo “Yukone” (π)?
- Yukawa (1935):

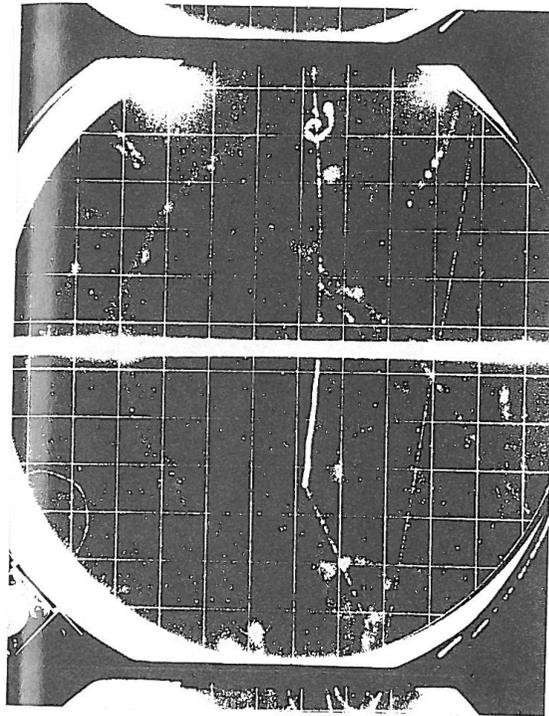
$$V(r) \propto \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{\lambda_\pi}} \quad \text{con} \quad \lambda_\pi = \frac{h}{m_\pi c}$$

- Sembrava che 80 m di aria assorbissero più muoni che 10 cm di acqua (stessi g/cm²).
- Perché? Perché i muoni decadono in volo ($\tau \equiv 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$)
- Evidenziata anche la dilatazione relativistica della vita media con $\gamma=9$ (Rossi e Hall - 1940)



H. YUKAWA (1907-1981)

Fig. 18



v. Decadimento di un mesone μ . Il mesone entra nella camera a condensazione dall'alto e attraversa una lastra d'alluminio dello spessore di 0,63 centimetri, dove perde la maggior parte della sua energia. Il mesone che esce dalla lastra, una particella lenta e perciò fortemente ionizzante, si arresta nel gas. Dalla fine della traccia del mesone nasce la traccia di una elettrone. Quest'ultimo, viaggiando quasi alla velocità della luce, produce una traccia che è, avvicina a quella d'una particella al minimo di ionizzazione. Le tracce del mesone e dell'elettrone sono leggermente incurvate dal campo magnetico e la direzione della deflessione mostra che entrambe le particelle hanno carica positiva. (D. S. Thompson in *Ann. Physics Reviews*, vol. LXIV, 1949, p. 490)

15

$$\mu \rightarrow e + \nu ?$$

(MA NON È COSÌ)

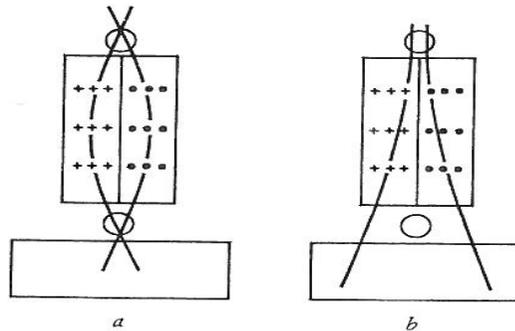
Fig. 19

13 – CONVERSI – PANCINI- PICCIONI (1947)

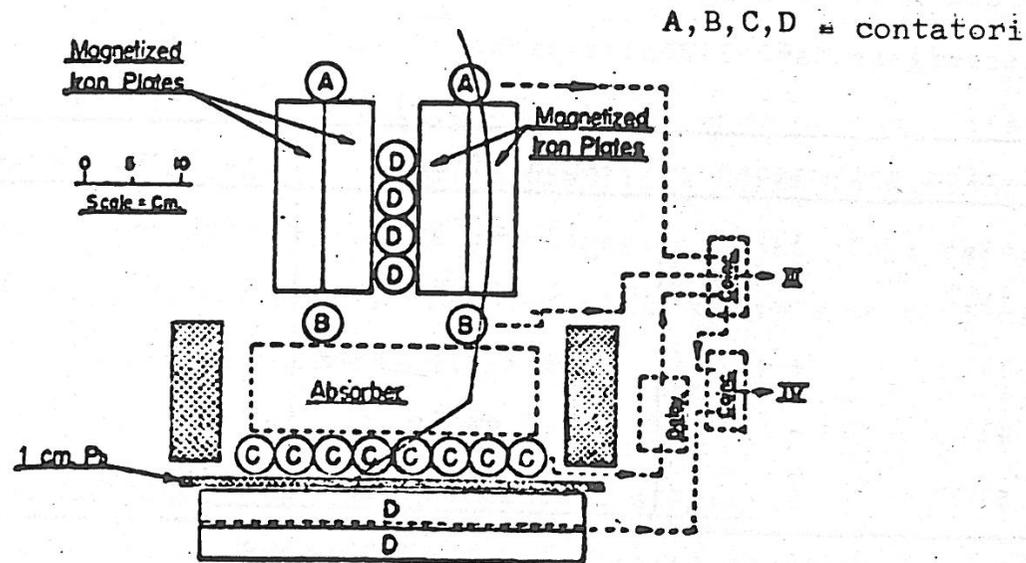
“Lente magnetica” (Rasetti – Rossi) (Esperimento Rasetti su B e H)

Figura 51.

Lente magnetica costituita di due sbarre di ferro magnetizzate in direzioni opposte. (a) Il campo magnetico punta nella direzione opposta all'osservatore (cioè verso il foglio) nella sbarra di sinistra e verso l'osservatore (cioè fuori del foglio) nella sbarra di destra. Le particelle *positive* che passano attraverso il primo contatore GM posto sopra la sbarra vengono deviate dal campo magnetico verso il secondo contatore posto sotto la sbarra. (b) La magnetizzazione delle sbarre è invertita. Le particelle positive che passano attraverso il primo contatore GM vengono deviate lontano dal secondo. La lente (a) devierà le particelle *negative* lontano dal secondo contatore; la lente (b) le devierà verso di esso.



CONVERSI – PANCINI – PICCIONI



μ-VI - Apparato di Parolini-Piccioni-Corvensi. Disposizione di contatori, assorbitore e piastra di Fe magnetizzato. Tutti i contatori "D" sono connessi in parallelo.

Fig. 20 b

- Risultato: μ^- poco assorbiti da bassi Z (nel Mg12: 50 % assorbiti, 50 % decadono)
- Metafora "morte naturale più incidente"
- Allora? $\mu \neq \pi$!

14 – LATTES – OCCHIALINI (ancora!) – POWELL (1947-1948)

- Revival “emulsioni nucleari” (“lastre”)
- Catena $\pi \mu e$ ($\tau \pi \approx 10^{-8}$ s)

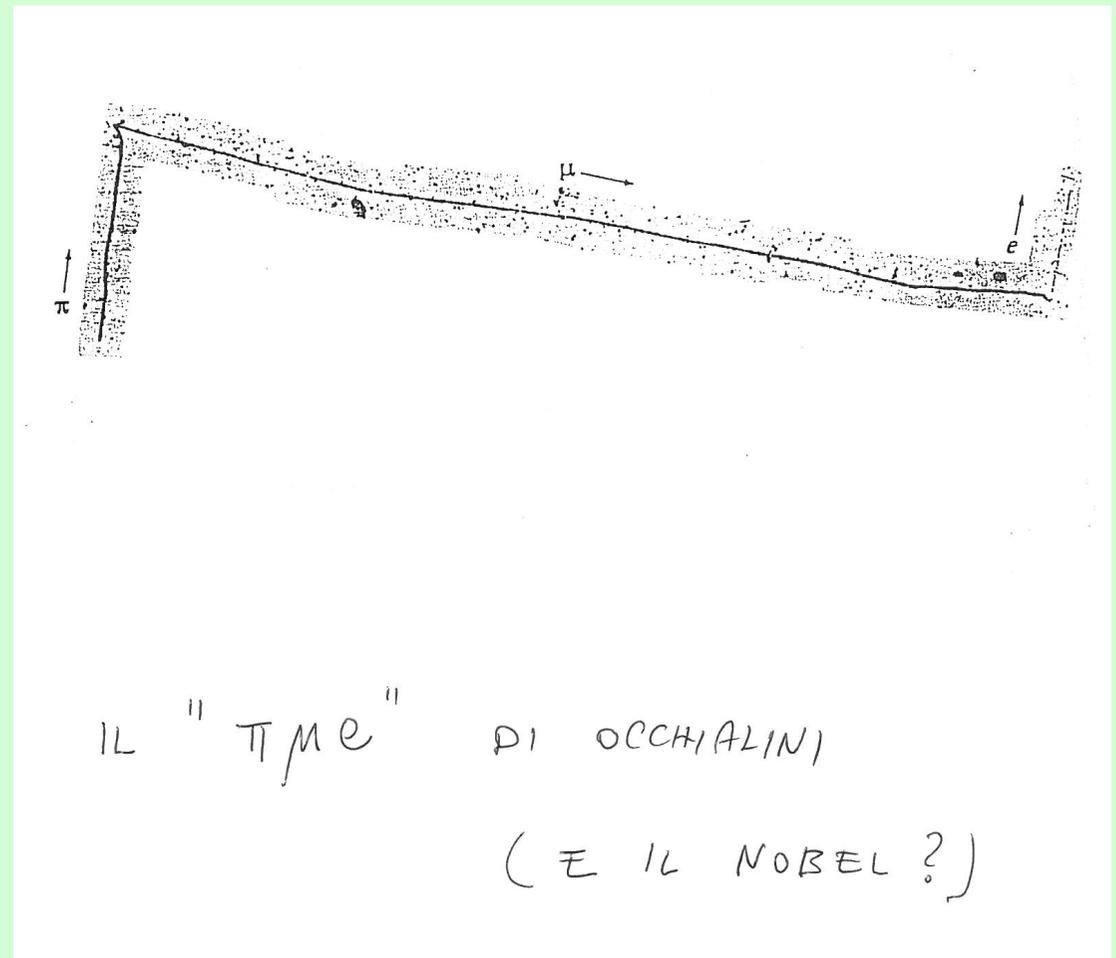


Fig. 21

CERN COURIER

VOLUME 55 NUMBER 7 SEPTEMBER 2015

In the steps of the antiproton



PENTAQUARKS

LHCb observes
two exotic new
particles
p5

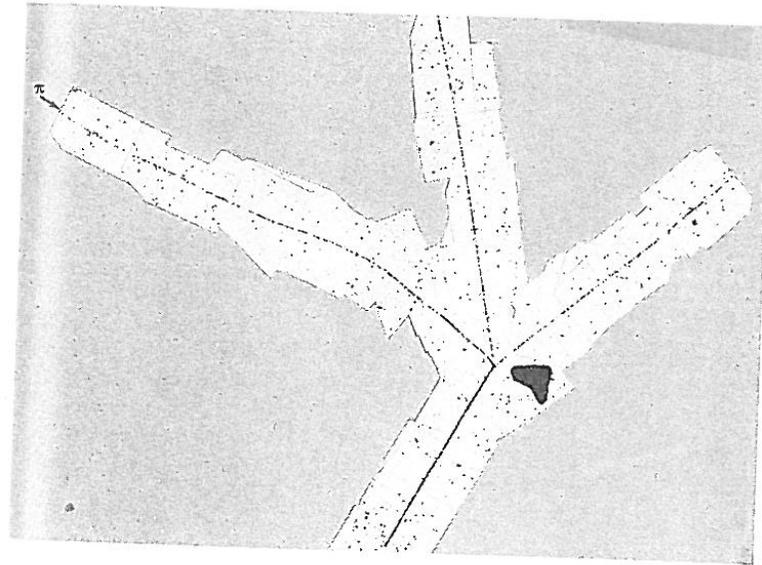
INTERVIEW

Massimo Tarengi:
telescope builder
extraordinaire
p31



CONFERENCE TIME

New results from
the LHC experiments **p8**



viii. Cattura nucleare di un mesone π negativo. Il mesone si ferma in un'emulsione nucleare ed è prontamente catturato da un nucleo. La massa del mesone è immediatamente convertita in energia, il che causa l'esplosione del nucleo stesso. La stella che si vede nella figura è composta dalle tracce lasciate nell'emulsione dai frammenti carichi del nucleo. (Da un articolo di C. F. Powell in *Colston Papers*, Butterworth Publishers, London 1949, p. 83).

CATTURA DI π^-

Fig. 22

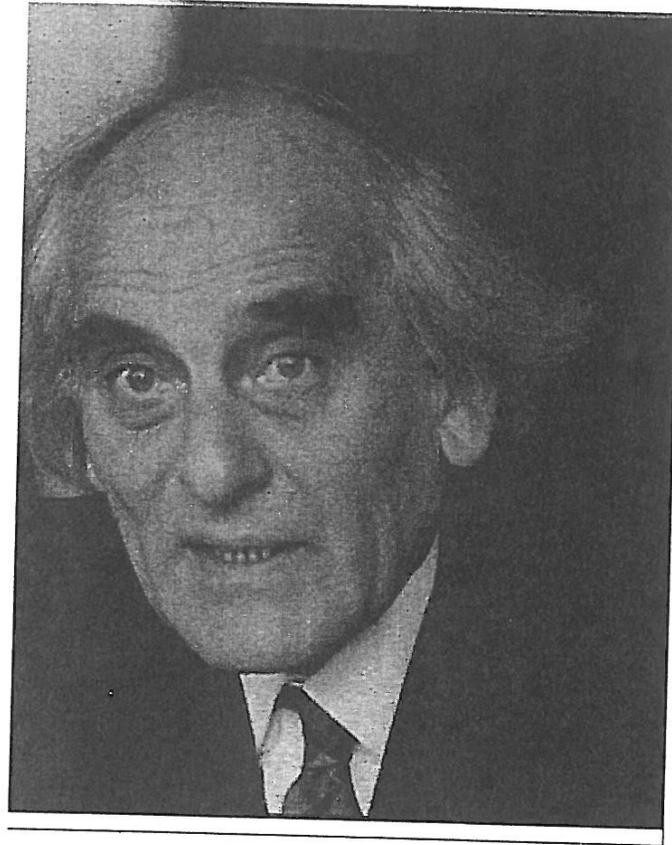
- Il range dei μ da π in quiete è fisso, quello degli e da μ no. Perché?

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

$$\quad \quad \quad \downarrow$$

$$\quad \quad \quad \longrightarrow e + n\nu \quad \text{con} \quad n \geq 2$$

- Dato che $\tau(\pi) \approx 10^{-8} \text{ s}$, i π non possono essere i RC primari
- Sarà anche scoperto $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ con $\tau \approx 10^{-16} \text{ s}$

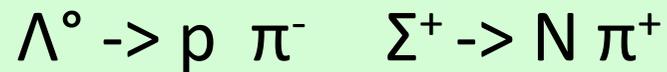


GIUSEPPE OCCHIALINI ("BEPPÒ")
(1907-1993)

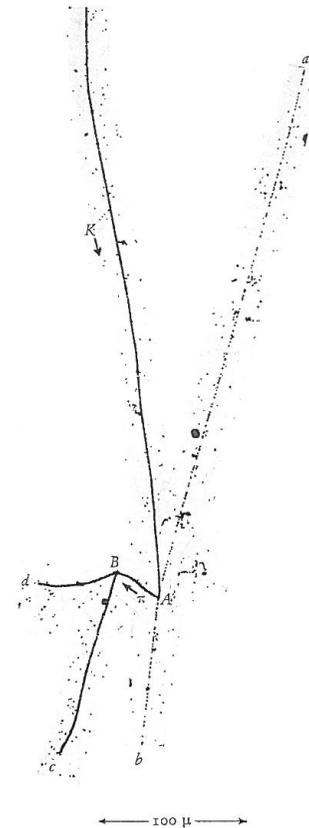
Fig. 23

15 – LE “V-PARTICLES”

- Scoperte da Rochester e Butler nel 1947:



- Scoperti i mesoni K (Fig. 24)
- Introduzione della “stranezza”
- “ θ - τ puzzle” (Lee e Yang - 1956)
- Violazione della parità (Madame Wu - 1957)



x1. Decadimento di un mesone pesante in tre mesoni π , osservato dal gruppo di Powell all'università di Bristol nel 1949. Il mesone pesante K si ferma in A . Qui decade in due mesoni π veloci (tracce a e b) e in un mesone π negativo lento, che si ferma in B . Il mesone π negativo è catturato da un nucleo, il quale esplose emettendo due frammenti di alto potere ionizzante (c e d) e, presumibilmente, uno o più neutroni che non lasciano traccia visibile. (Da R. Brown, U. Camerini, P. H. Fowler, H. Muirhead, C. F. Powell e D. M. Ritson, in «Nature», vol. CLXIII, 1949, p. 82).



Fig. 24

16 – EXTENSIVE AIR SHOWER (“EAS”)

- Nel 1959-1960 Linsley e Scarsi ne rivelano uno con $\sim 30 \cdot 10^9$ particelle da un primario di $6 \cdot 10^{19}$ eV

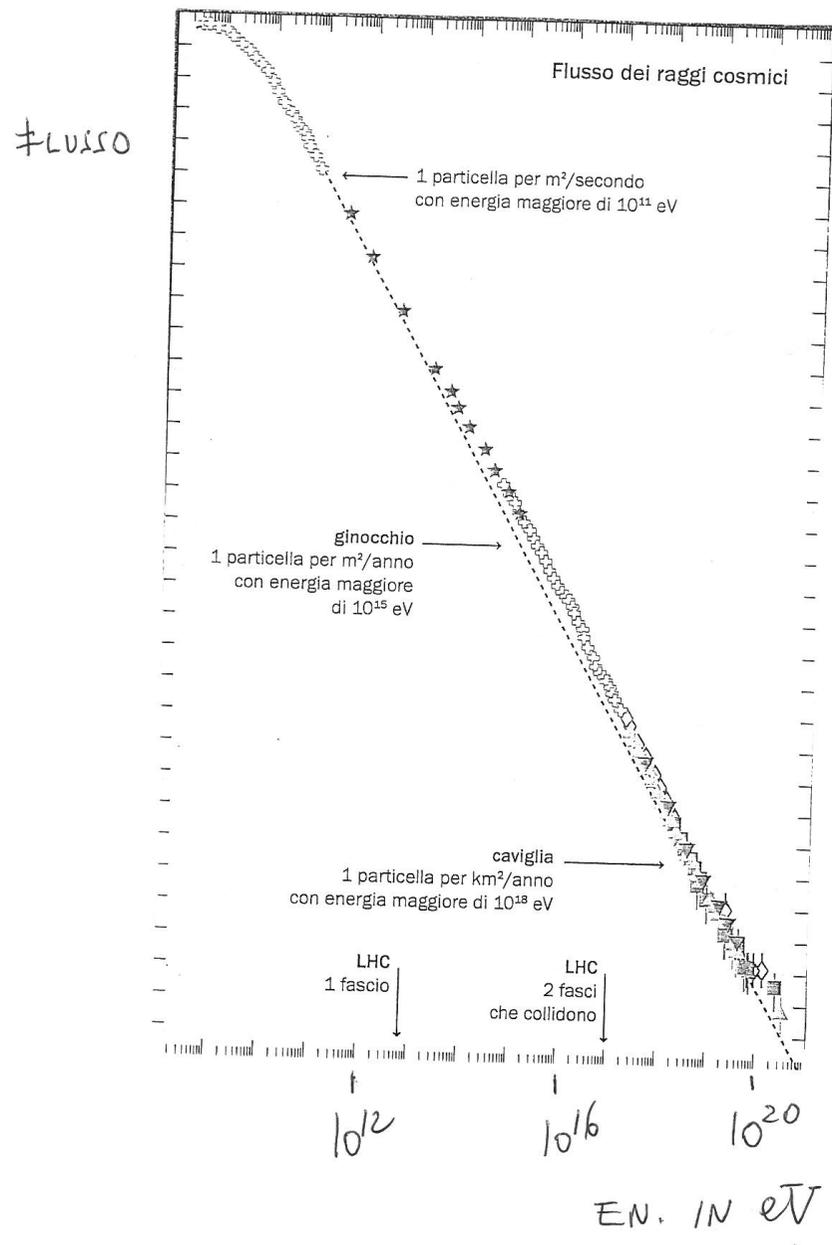
17 – PER RIASSUMERE

- Composizione primari

Esempio conteggio:

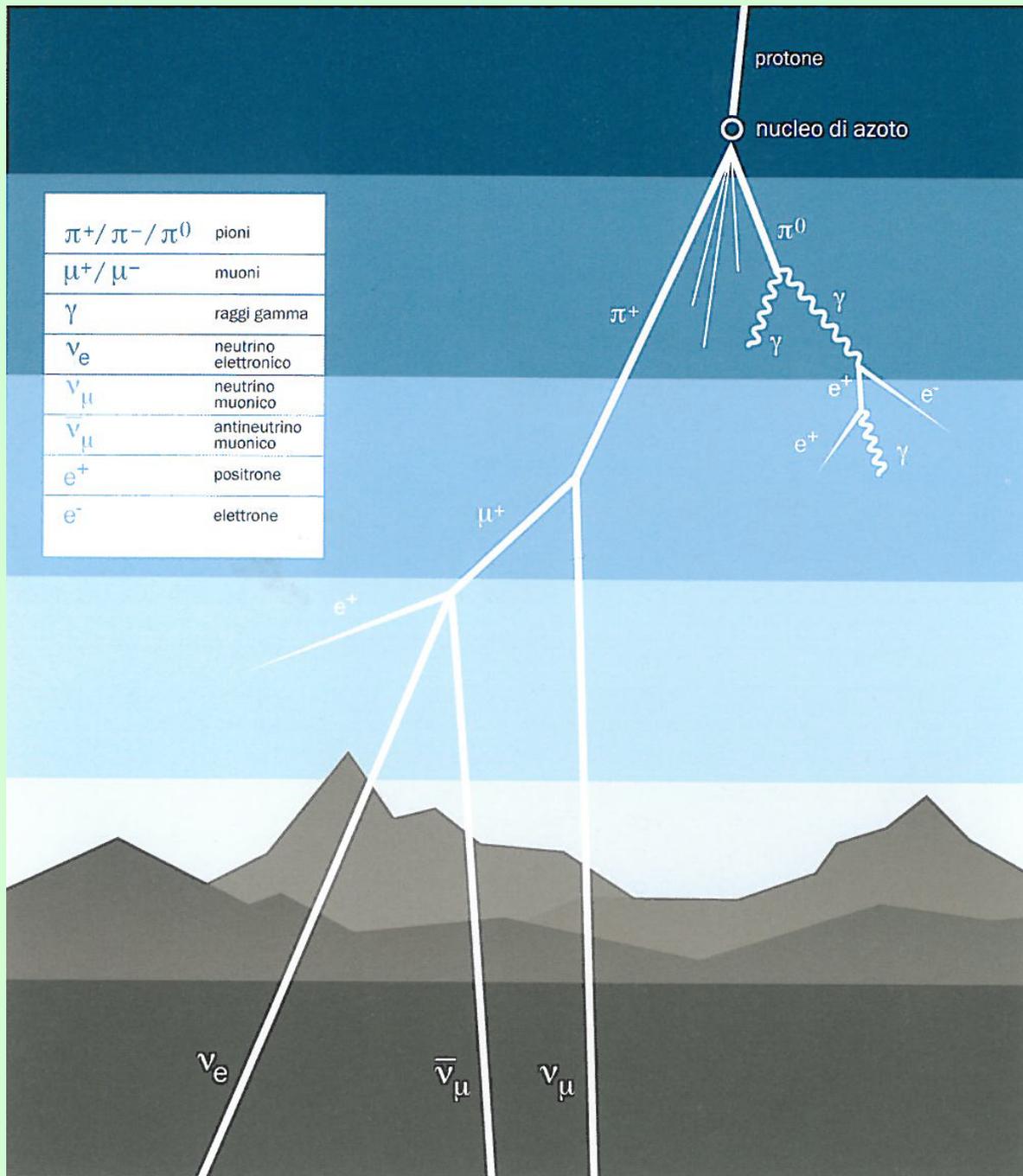
Protoni	540
He	26
C-O	2
·	·
·	·
·	·

- Spettro primari (Fig. 26)
- Cascata cosmica (Fig. 27)



SPETTRO ENERGETICO DEI PRIMARI

Fig. 25



Cascata cosmica

b.
Rappresentazione schematica di uno sciame di raggi cosmici prodotto quando una particella primaria (in questo caso un protone) interagisce con i nuclei dell'atmosfera terrestre. Nella realtà, gli sciame possono essere composti anche da milioni di particelle, con una complessa storia di interazioni a catena, produzioni, assorbimenti o decadimenti spontanei.

Fig. 26