

# Lezione Fermi 4

*Luciano Maiani, AA 14-15*

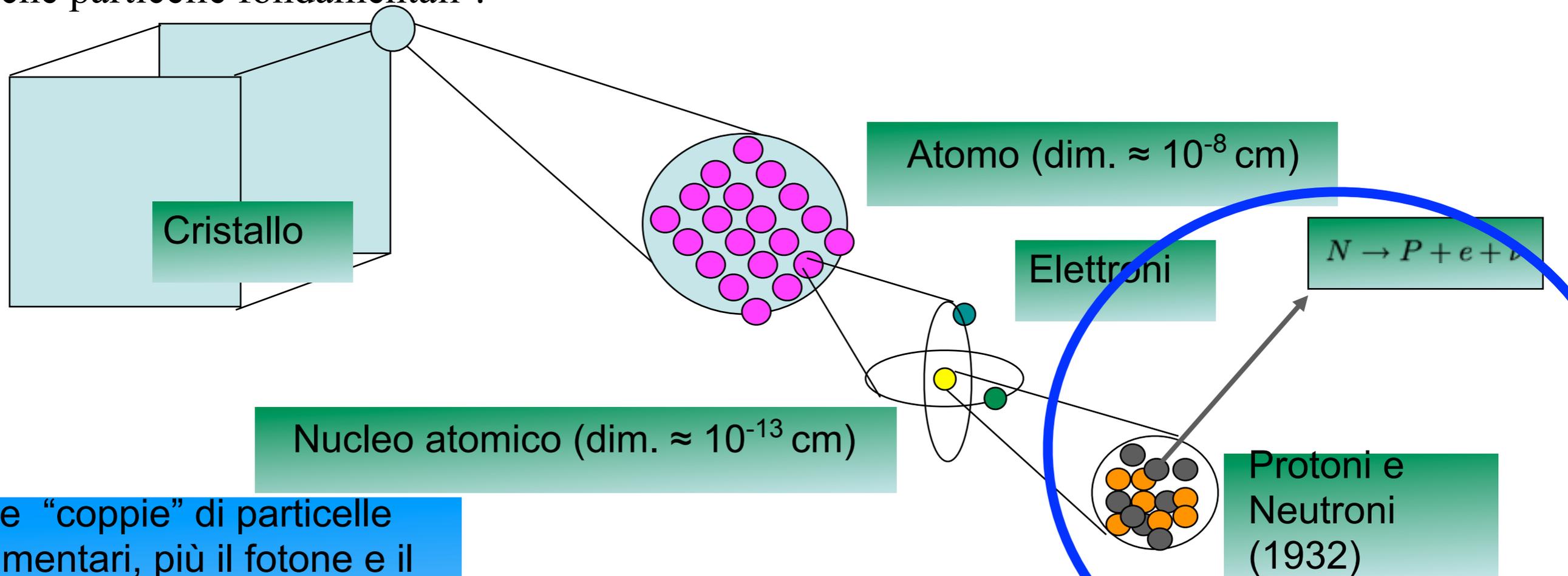
## Gli albori della Fisica Nucleare e Subnucleare

### Sommario

1. Oltre Mendeleev: Aston scopre gli Isotopi
2. Disintegrazioni beta e statistica dei nuclei, Pauli ipotizza una nuova particella neutra nel nucleo
3. Chadwick scopre il neutrone, Majorana coglie il concetto
4. Fermi scopre le Interazioni Deboli e battezza 'neutrino' la particella di Pauli.
5. La carta di isotopi e radioisotopi: perche' il neutrone e' stabile all'interno di alcuni nuclei e in altri no?
6. Yukawa ipotizza un nuovo bosone per le forze nucleari: il mesone  $\pi$  (in breve "il pione")
7. Incertezze e dubbi sul mesotrone
8. Lattes, Occhialini, Muirhead e Powell scoprono il pione
9. ..ma nelle reazioni dei raggi cosmici c'e' molto di piu': particelle elementari crescono

# L'immagine della materia negli anni '30

- E' quella che ci insegnano a scuola
- per molti versi, sufficiente ancora oggi per un primo orientamento
- tre tipi di forze fondamentali: elettromagnetica, forte (nucleare), debole (decadimento beta)
- poche particelle fondamentali ?



Due "coppie" di particelle elementari, più il fotone e il mesone di Yukawa possono spiegare tutto il mondo osservato?

$$\begin{pmatrix} P \\ N \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix} \quad \gamma \quad \pi ?$$

H. Yukawa. Le Forze Nucleari sono trasmesse da una particella di massa  $\approx 200$  volte la massa dell'elettrone : il mesone  $\pi$

# 1. Spettrografia di Massa, gli Isotopi

- **1909.** F. W. Aston, nel Laboratorio Cavendish sotto la direzione di J. J. Thomson, ottiene una prima evidenza per l'esistenza di due tipi di atomi di Neon, stessa chimica ma masse leggermente diverse: *isotopi*
- dopo la guerra 14-18, Aston mette a punto un strumento basato su campi elettromagnetici che danno traiettorie diverse a ioni che hanno  $e/M$  differenti (lo *spettrografo di massa*) e prova che il fenomeno degli isotopi e' comune a tutti i tipi di atomi, ne individua 212!
- Aston formula la Legge dei Numeri Interi: *la masse degli isotopi sono descritte con ottima approssimazione da numeri interi* (il numero di massa,  $A$ ) e misura le piccole deviazioni dalla regola.
- Premio Nobel per la Chimica nel 1922.
- La spettrografia di massa si usa tutt'oggi per individuare la composizione isotopica di una data sostanza

# Isotopi e elettroni nucleari

- Ma qual'è la spiegazione degli isotopi?
- Nel nucleo ci sono componenti elettricamente neutre, oltre ai protoni (in numero  $=Z$ ), di massa molto simile
- Rutherford ed i suoi collaboratori speculano sull'idea che questa componente neutra sia uno stato legato di protone ed elettrone (faute de mieux! è il rasoio di Occam),
- lo stato legato avrebbe massa molto prossima a quella del protone, poiché  $m_e$  è trascurabile, spiegando la legge dei numeri interi con piccole deviazioni dovute all'energia di legame, secondo la regola di Einstein:  
 $E=mc^2$
- Inoltre, Becquerel aveva dimostrato che alcuni nuclei emettono elettroni energetici (i raggi beta)
- si pensa dunque a nuclei composti da  $A$  protoni e da elettroni nucleari in numero di  $A-Z$



Ralph Kronig

Lo spin dell'elettrone e lo spin del nucleo dell'atomo di azoto ( $A = 14; Z = 7$ )

14 protoni e 7 elettroni, ovvero 21 particelle di spin  $\frac{1}{2} \rightarrow$

Il nucleo di azoto dovrebbe avere spin semintero, mentre i dati sperimentali mostrano che ha spin intero ( $s = 1$ )



Franco Rasetti

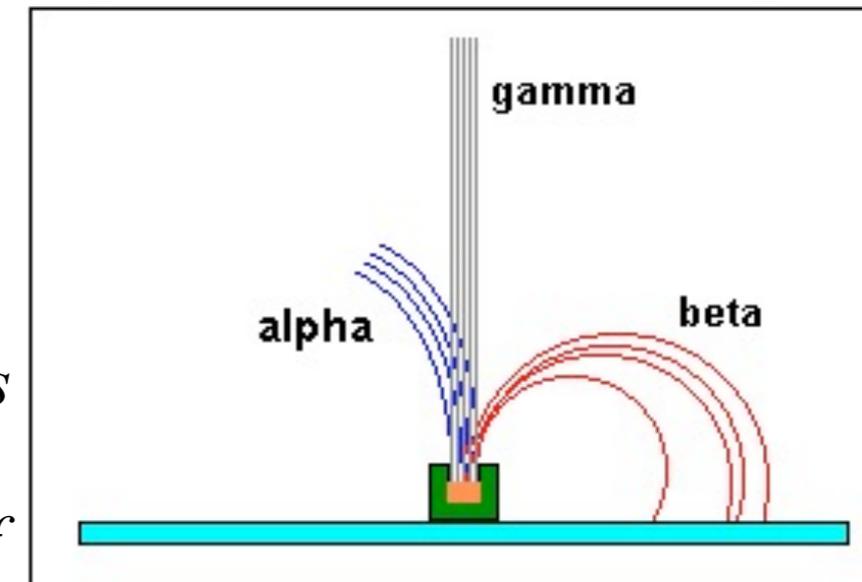
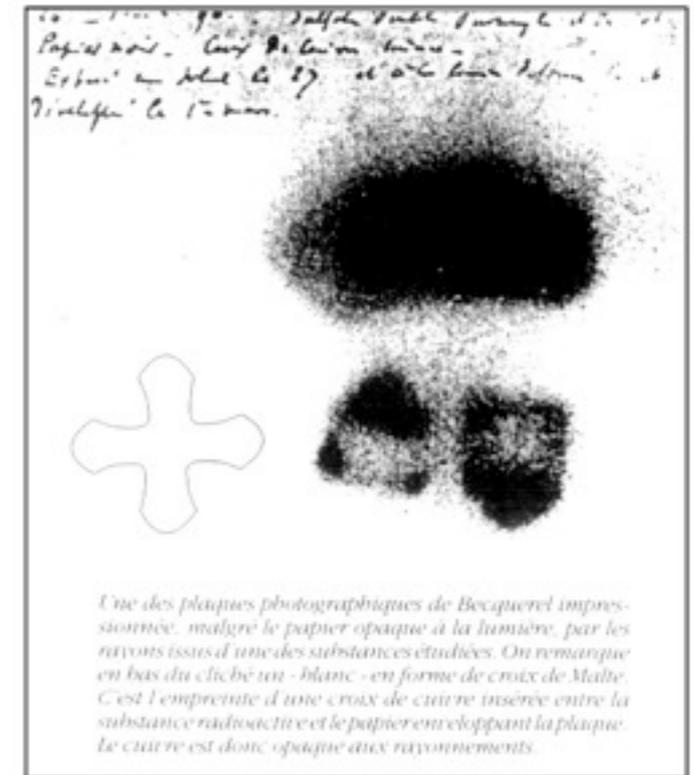
Il nucleo di azoto, contenente un numero dispari (21) di fermioni dovrebbe obbedire alla statistica di Fermi-Dirac, ma lo studio degli spettri Raman della molecola di azoto mostrano che  $N^{14}$  obbedisce alla statistica di Bose-Einstein

## 2. ..da dove vengono i “raggi $\beta$ ” ?

- **1896. Bequerel scopre la radioattività beta:** sali di uranio impressionano una lastra fotografica “da soli”
- gli elettroni vengono dal nucleo, l’ipotesi piu’ semplice e’ la reazione:  $\text{Nucleo}(Z) \rightarrow \text{Nucleo}(Z+1) + e^-$
- impossibile: l’elettrone dovrebbe avere un’unica energia mentre ha una distribuzione continua (Ellis e Chadwick, 1920-27)
- **1930. Wolfgang Pauli** trova una soluzione straordinaria e la comunica con una lettera aperta ad un congresso sull radioattività’

*Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,*

*As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin 1/2 and obey the exclusion principle and that further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light.*



**Alpha, beta and gamma radiation can be distinguished by using magnetic field. Alpha and beta particles have contrary charges - they undergo deflection in opposite directions gamma rays don't transfer any charge - they don't undergo deflection.**

*.... The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.....*

*I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time. But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, .... is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes." Therefore one should seriously discuss every way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. - Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7.*

*With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant*

*signed W. Pauli*

- *Pauli pensa che **sia gli elettroni sia i neutroni**, che adesso, seguendo Fermi, chiamiamo **neutrini vivano nei nuclei***
- *il numero di particelle di spin 1/2 adesso e':  $N_{\text{tot}} = A(\text{protoni}) + 2(A-Z)$  (coppie elettrone-neutrino) =  $A + \text{numero pari} = \mathbf{\textit{numero pari o dispari a seconda che } A \textit{ sia pari o dispari}}$*
- *l'Azoto, con  $A=14$ , ha dunque spin intero e deve obbedire alla statistica di Bose-Einstein !!!*

# 3. La scoperta del neutrone mette fine all'equivoco

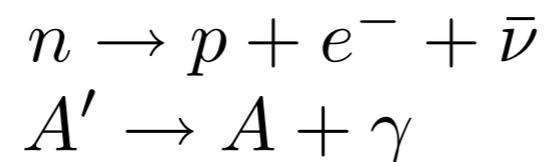
- **1932.** James Chadwick scopre il neutrone: particella neutra di massa molto prossima a quella del protone.
- Majorana e Heisenberg capiscono che il nucleo è costituito da  $Z$  protoni e  $A-Z$  neutroni, tutte particelle di spin  $1/2$ , spin e statistica sono salvi
- Amaldi afferma che quando, sul finire del 1931, i Joliot-Curie proposero che i protoni prodotti dalla radiazione penetrante del berillio indicassero che quest'ultima era costituita di fotoni di elevata energia, Majorana commentò: «Non hanno capito niente; probabilmente si tratta di protoni di rinculo prodotti da una particella neutra pesante»; anche Emilio Segrè riferisce che Majorana «immediately understood that there was what he called “a neutral proton”» (cfr. A. De Gregorio, tesi di dottorato, Sapienza 2005)
- Pauli descrive la sua idea alla Conferenza Solvay del 1932, Fermi ci pensa su...
- facendo seguito alla scoperta del neutrone, avanza una sua teoria...

# 4. La teoria di Fermi: un nuovo paradigma

- **Pauli:** Nucleo(Z)  $\rightarrow$  Nucleo(Z+1) +  $e^-$  + neutrino
- l'elettrone e il neutrino “risiedono” nel nucleo iniziale?
- impossibile: un elettrone localizzato entro il raggio del nucleo avrebbe (per il principio di indeterminazione) un'energia circa 100 volte maggiore di quella dei raggi beta (che è dell'ordine del MeV):

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{R} \approx 140 \text{ MeV}$$

- **Fermi:** l'elettrone e il neutrino sono “creati” nell'atto del decadimento
- **PROPRIO** come avviene con il fotone quando un atomo si diseccita:



- La Teoria di Fermi del decadimento beta impiega il concetto di ***campo quantistico dell'elettrone***, la prima volta al di fuori dell'elettrodinamica
- ***la teoria dei campi quantizzati diventa il paradigma della fisica subnucleare.***

# descrizione di Beppo Occhialini degli elettroni del decadimento beta (tradizione orale)

- Immaginate degli esami universitari che si svolgono in un'aula chiusa.
- Chi attende fuori vede ogni tanto uscire uno studente e pensa che lo studente che vede uscire si trovava “prima” nell'aula della commissione di esami
- Beh, nel decadimento beta risulta invece che lo studente (l'elettrone) “prima” non c'era, ma è creato proprio nel momento in cui esce....

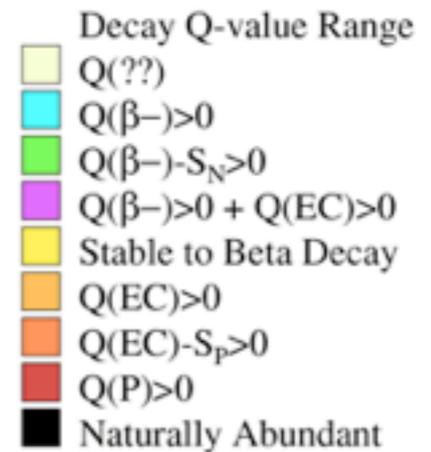
# 5. La carta dei nuclei dopo la scoperta del neutrone

*Table of Isotopes (1999)*

Z=0-28 Part 1 of 2

# dei protoni, Z=  
numero atomico

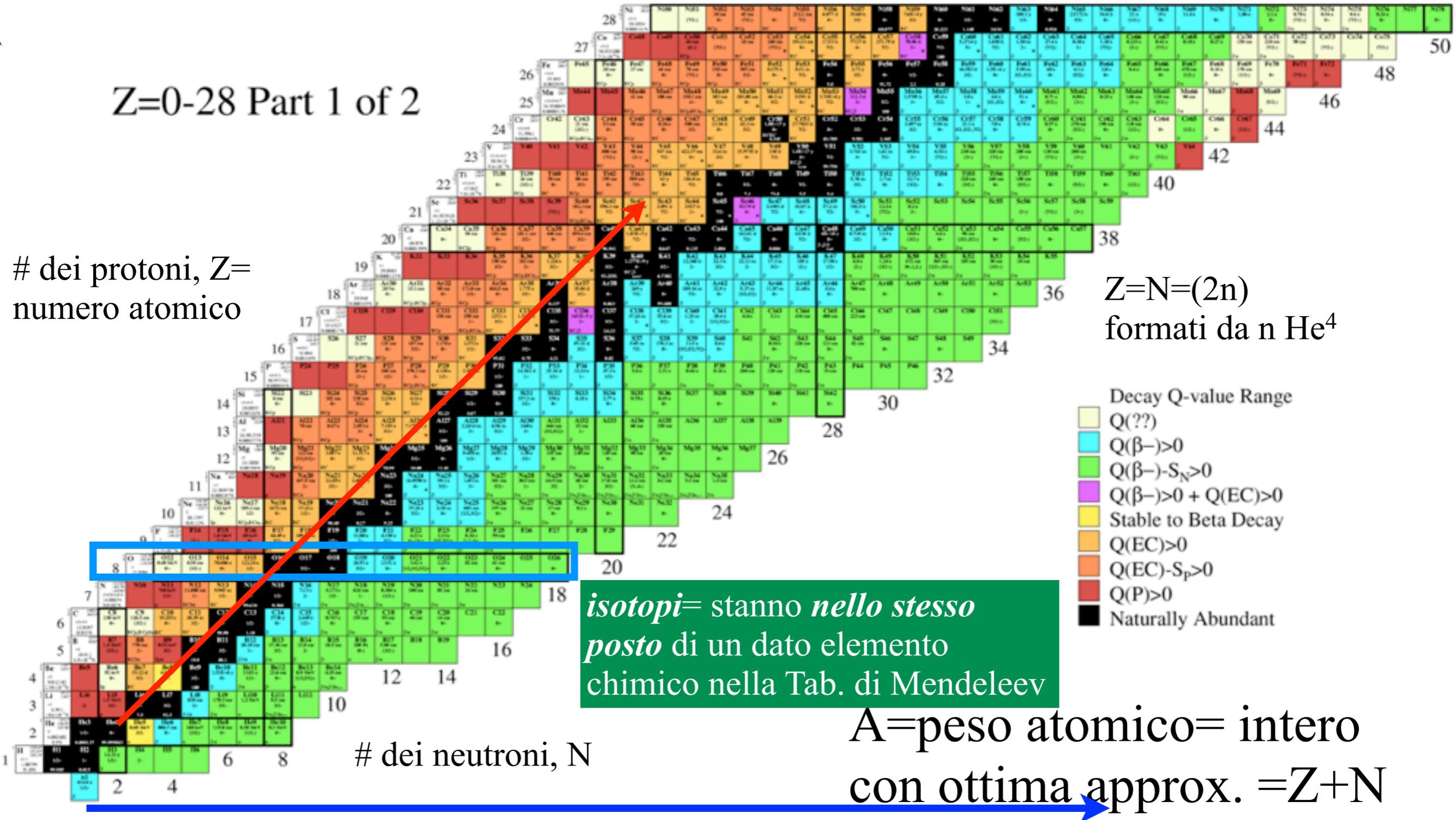
Z=N=(2n)  
formati da n He<sup>4</sup>



*isotopi* = stanno *nello stesso posto* di un dato elemento chimico nella Tab. di Mendeleev

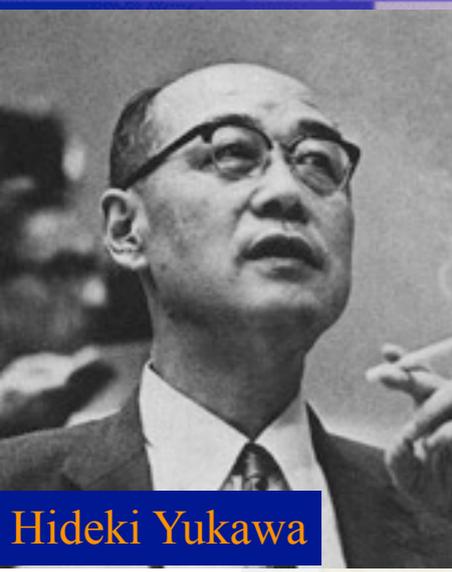
A=peso atomico= intero  
con ottima approx. =Z+N

# dei neutroni, N





# 6. Il bosone mancante degli anni '30 e '40



Hideki Yukawa

$N$   
 $(N) \cdot e$

是等の性質の如く、proton is elementary  
 此の性質から、 $N, P$  の interaction を説明するに  
 必要なのは、 $N, P$  の interaction を説明するに  
 必要なのは、 $N, P$  の interaction を説明するに

DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

昭和九年十一月十日 describe 300-2000  
 DATE Nov. 17.  
 NO. 1

教務講演原稿 (105-10)

1. Yukawa : On the Interaction of Elementary Particles

1. 近頃 Fermi は Pauli の neutrino の hypothesis を従って  $\beta$ -ray の disintegration を説明しようと試みた。その結果は割合に実験とよく一致した。併しこの理論は neutron と proton の interaction を説明し兼ねた。

そこでこの neutron と proton の interaction を説明するために、

	$N, P$	$P, P$	$N, N$	$P, N$
$N, P$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
$P, P$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8x23 = 184  
12x31 = 372

DEPARTMENT OF PHYSICS  
OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

DATE Nov. 1, 1934  
NO. 1

On the Interaction of  
Elementary Particles. I.  
By Hideki Yukawa

§ 1. Introduction

At the present stage of the quantum theory little is known about the nature of interaction between elementary particles. For example, the <sup>interaction</sup> force acting between a neutron and a proton ~~we are not sure whether is~~ an ordinary attraction force or an <sup>Platzwechsel</sup> exchange interaction first proposed by Heisenberg. Recently Fermi<sup>(1)</sup> has treated the problem of  $\beta$ -ray disintegration on the hypothesis of the existence of "neutrino". According to this theory a neutron and a proton can interact by emitting and absorbing a neutrino and an electron. Unfortunately the energy of interaction calculated on this such assumption<sup>(2)</sup> is much too small to account for the binding of neutron and protons in the nucleus. To remove this defect we <sup>may</sup> ~~can~~ modify the theory of Heisenberg or Fermi in the following way.

The transition of a heavy particle from a neutron state to a proton state is not always accompanied

<sup>(1)</sup> E. Fermi, Zeits. f. Phys. 88, 161, (1934).

<sup>(2)</sup> J. J. Thomson, Nature, 133, 981 (1934); D. Ivanenko, ibid. 981 (1934).

Allo stadio presente della teoria quantistica, si sa poco sulla natura delle interazioni tra particelle elementari. Ad esempio sull'interazione tra protone e neutrone, se sia un'attrazione ordinaria o un'interazione di scambio, come proposto per primo da W. Heisenberg.

Recentemente, Fermi ha trattato il problema delle disintegrazioni beta sotto l'ipotesi del "neutrino". Secondo questa teoria, un neutrone ed un protone possono interagire emettendo o assorbendo un neutrino ed un elettrone.

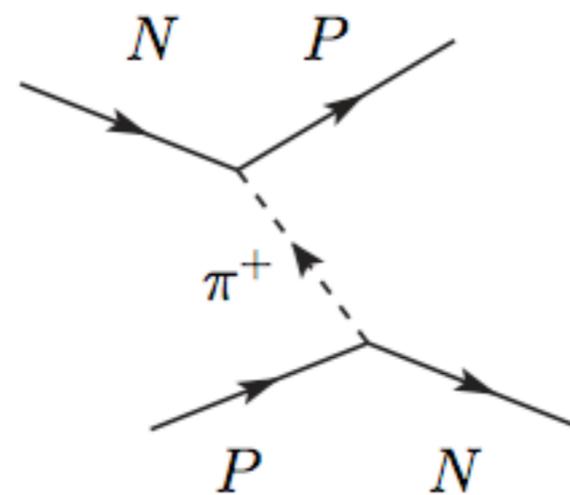
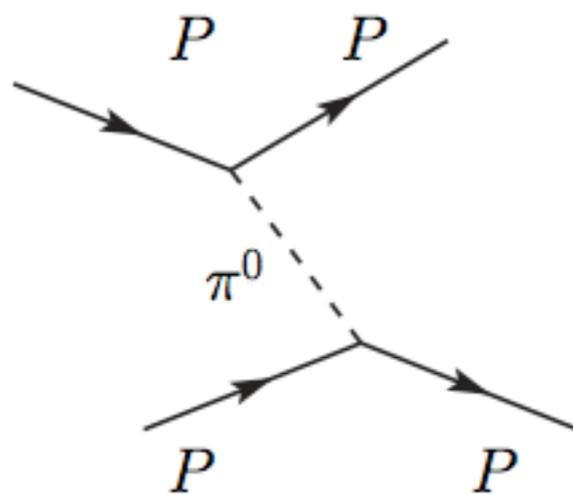
Sfortunatamente l'energia di interazione così calcolata è di gran lunga troppo piccola per dare conto del legame tra protone e neutrone. Per superare questo difetto possiamo modificare la teoria di Heisenberg o quella di Fermi nel modo seguente.

Yukawa lancia l'idea che le forze nucleari siano dovute allo scambio di una nuova particella, il pione, e ne predice la massa.

Identificato dapprima con il mesotrone, il pione è stato scoperto nel 1947 da C. Lattes, H. Muirhead, G. Occhialini and C. Powell, nelle reazioni prodotte dai raggi cosmici negli alti strati dell'atmosfera, Nature 159, 694 (1947).

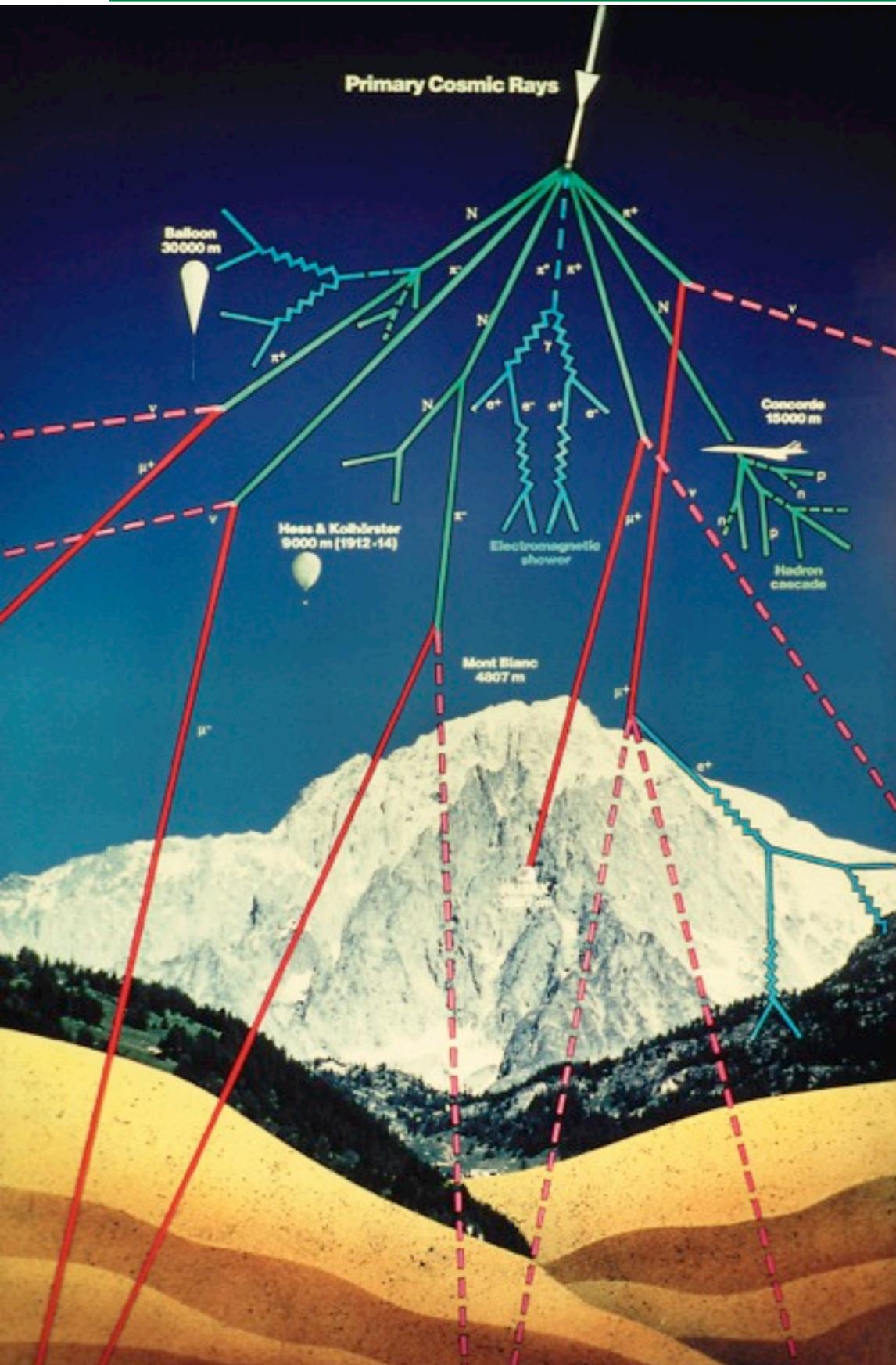
# Raggio delle forze e massa del quanto scambiato

- Principio di Indeterminazione tempo-energia:  $\Delta t \Delta E < \hbar$
- un protone/neutrone puo' emettere un pione per un tempo:  $\Delta t \sim \frac{\hbar}{m_\pi c^2}$
- ovvero entro una distanza:  $R = c\Delta t \sim \frac{\hbar}{m_\pi c}$
- R e' il "raggio di azione" della forza: un nucleone piu' lontano di R non fa a tempo a saldare il debito di energia contratto dal primo nucleone: forze a raggio limitato=scambiatore con massa  $m=200 \text{ MeV}/(R \times 10^{13} \text{ cm})$
- dal fatto sperimentale che  $R \approx 1.3 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = 1 \text{ Fermi}$ ,  $m \approx 150 \text{ MeV}$



Forza di scambio (Majorana)

# 7. 1937: Il mesotrone



- Nel 1937, C. Anderson e S. Neddermeyer scoprono una nuova particella prodotta nelle collisioni dei raggi cosmici con gli atomi dell'atmosfera.

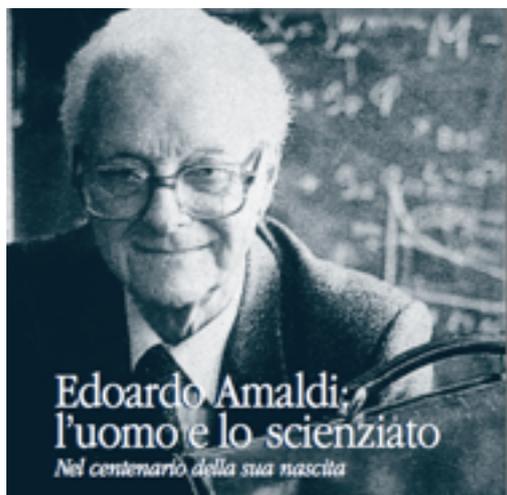
- Ha una massa intermedia tra l'elettrone e il protone, per questo viene chiamata "mesotrone".

La massa è prossima alla massa predetta da Yukawa per il mesone  $\pi$ , tanto da far pensare: "mesotrone" = mesone  $\pi$ : l'ultimo bosone!

Ne erano tutti convinti...

# Dai Raggi Cosmici al CERN

- 1946 (Roma): M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni, scoprono che il mesotrone (oggi “particella  $\mu$ ”) non e’ associato alle forze nucleari;
- 1947 B. Pontecorvo mostra che il mesotrone è una “copia pesante” dell’elettrone: ??????
- 1940-1950: un nuovo zoo di particelle emerge dallo studio dei raggi cosmici;
- le “nuove particelle” non sono presenti nella suddivisione della materia: atomo, nucleo, nucleoni,
- ma devono avere un ruolo nell’architettura delle forze fondamentali
- ...e possono essere studiate compiutamente solo nelle collisioni di alta energia alle macchine acceleratrici.



Fondato nel 1954, il CERN è oggi il Laboratorio base per la Fisica delle Particelle Elementari in Europa.

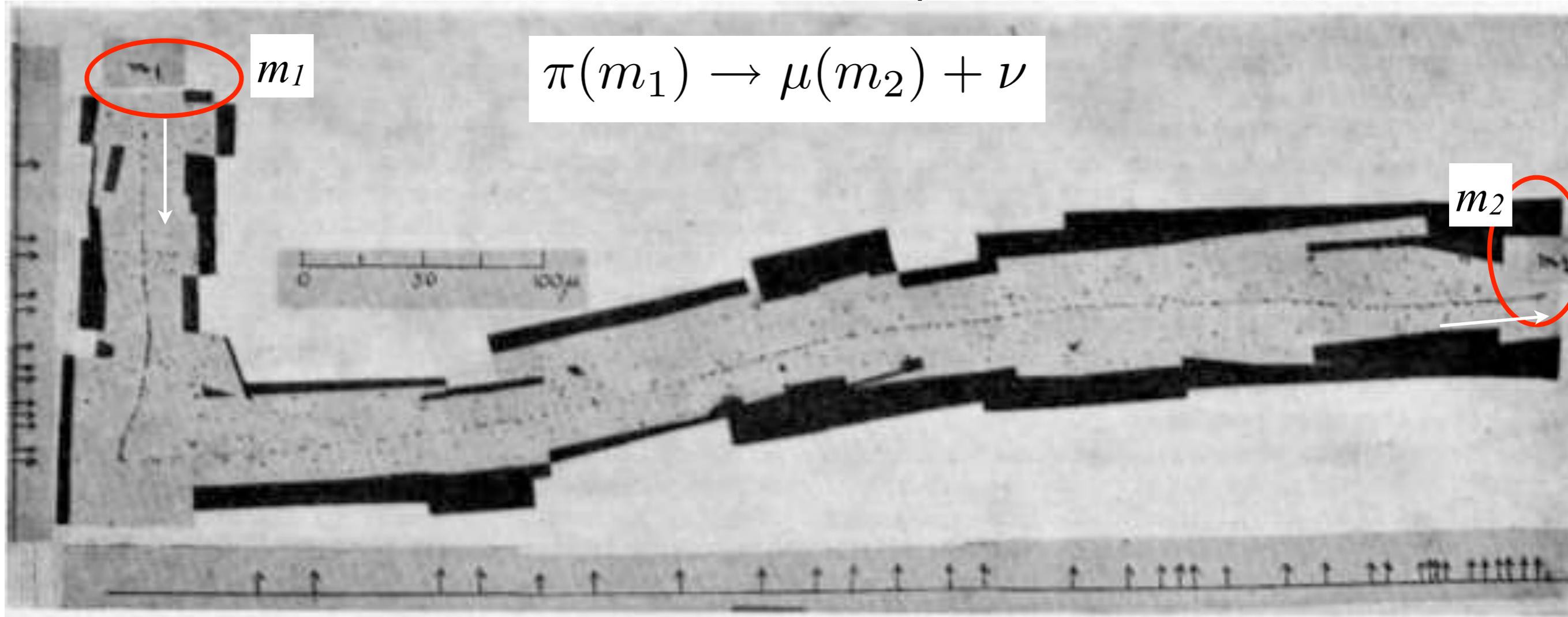
# 8. Finalmente il pione !

## PROCESSES INVOLVING CHARGED MESONS

C. M. G. LATTES, H. MUIRHEAD, G. P. S. OCCHIALINI and C. F. POWELL

H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol

...a particle  $m_1$ , has come to the end of its range in the emulsion. The frequent points of scattering and the rapid change of grain-density towards the end of the range show that the track was produced by a meson...the track of a second particle,  $m_2$ , starts from the point where the first one ends, and ... has all the characteristics of that of a particle of small mass.



$$\pi(m_1) \rightarrow \mu(m_2) + \nu$$

# 9. First classification of strange particles

Classification by L. Leprince-Ringuet (1953)

## GROUPS OF PARTICLES

1. *L-mesons* (symbol  $L$ ):  $\pi$ -meson,  $\mu$ -meson, any other possible lighter meson.
2. *K-mesons* (symbol  $K$ ): particles with mass intermediate between those of the  $\pi$ -meson and the nucleon.
3. *H-particles: hyperons* (symbol  $H$ ): particles with mass intermediate between those of the nucleon and the deuteron. This definition to be revised if “fundamental” particles heavier than the deuteron are found.

## PHENOMENOLOGICAL DESCRIPTION

4. *V-event*: phenomenon which can be interpreted as the decay in flight of a K-meson or a hyperon. Subclasses  $V^0$  and  $V^\pm$ .
5. *S-event*: phenomenon which can be interpreted as the decay or the nucleon capture of a K-meson or a hyperon at rest.

Stella nucleare

New particles, mass (MeV) and decays then observed (cloud chambers and emulsions) :

$$K^0(498) \rightarrow \pi^+ \pi^- (V^0)$$

$$K^\pm(494) \rightarrow \pi^\pm \pi^0 (V^\pm), \\ \pi^\pm \pi^+ \pi^-.$$

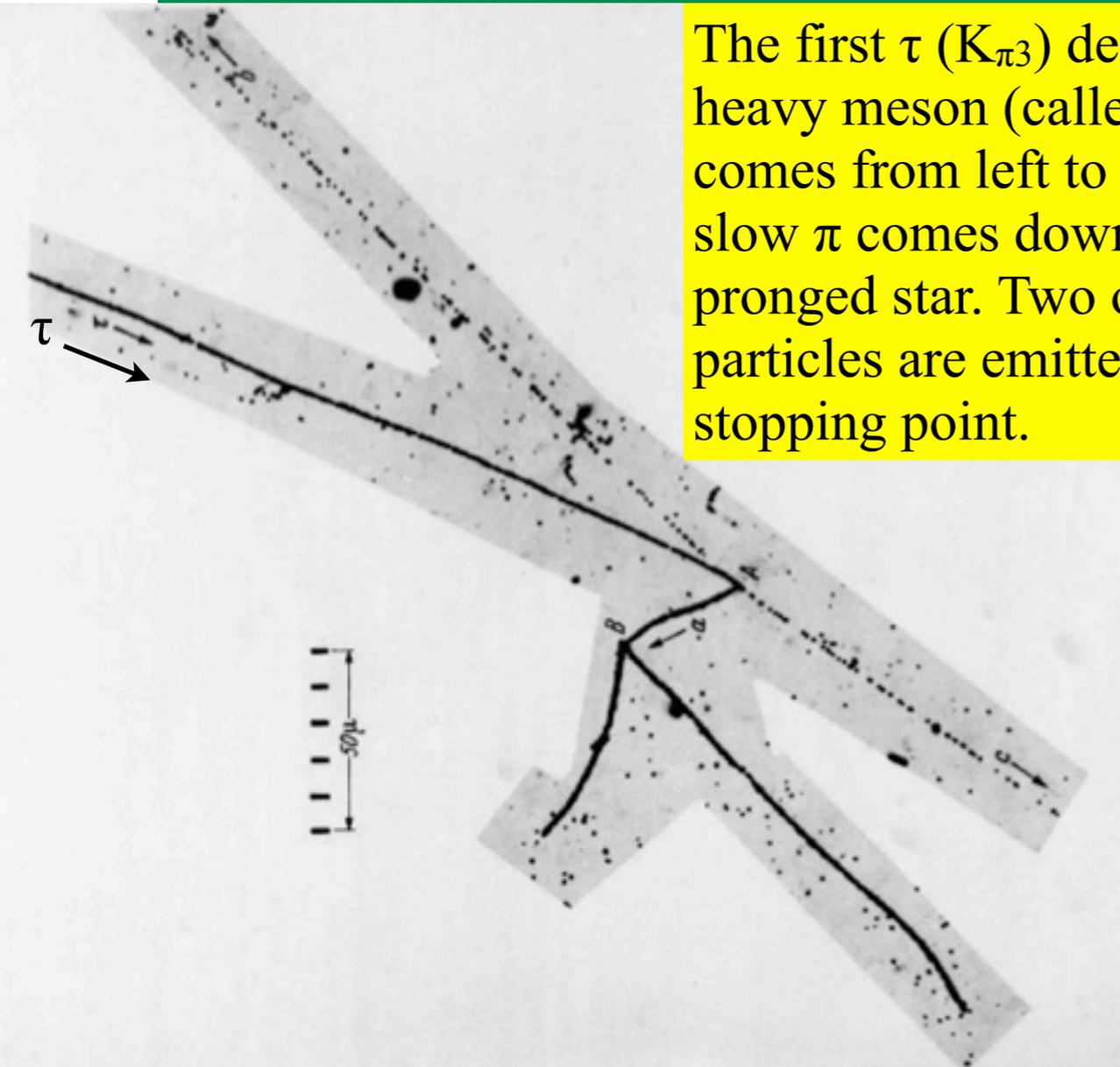
$$\Lambda^0 \rightarrow p \pi^- (V^0);$$

$$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0, n \pi^+ (V^+);$$

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 \pi^- (V^-).$$

# il primo evento di decadimento $K \rightarrow 3\pi$ (Bristol, 1948)

The first  $\tau$  ( $K_{\pi 3}$ ) decay: the primary heavy meson (called  $\tau$  in the picture) comes from left to right and stops. A slow  $\pi$  comes down and makes a two-pronged star. Two other lightly ionizing particles are emitted from the first stopping point.



**Figure 3** Beppo Occhialini talking in favor of the G-stack exposure at the Pisa Conference. Pisa, 1955. Accanto a Beppo, Bruno Touschek.

# Confusione, ma prime idee per una classificazione

Materia subnucl.	Materia subnucl.	Leptoni	Forze
Barioni	Mesoni	—	—
P, N, ...	$\pi^{\pm,0}, \dots$	e, $\nu$	$\gamma$ ,
$\Lambda, \Sigma, \dots$	$K^{\pm}, K^0, \bar{K}^0, \dots$	$\mu$ ??	???

- Le particelle sensibili alle interazioni nucleari (o Forti) si classificano in Barioni (spin semi-intero, pesanti, decadono in stati finali che contengono P o N) e Mesoni (orig. “in mezzo” tra elettrone e protone, spin intero) che decadono conservando solo la carica elettrica
- Barioni e Mesoni formano la famiglia degli ADRONI (“forti”), che sono anche sensibili alle Forze deboli (decad. beta) ed elettromagnetiche (carica elettrica)
- Elettrone, neutrino e muone= LEPTONI (“leggeri”), rispondono solo alle Forze deboli (decad. beta) ed elettromagnetiche (se dotati di carica elettrica)
- il fotone e’ il prototipo di mediatore delle forze, il pione lo fa ma solo come uno dei tanti. Gia’ Yukawa pensa ci siano mediatori delle Forze Deboli...ci vorranno 50 anni per osservarli.
- E’ l’alba della Fisica delle particelle.