

Luciano Maiani:

Lezione Fermi 4

Enrico Fermi propone una Teoria delle forze deboli,
Yukawa una nuova particella per le forze nucleari.

Sommario

1. La spiegazione della tavola di Mendeleev: spin e principio di Pauli
2. Elettroni nei nuclei?
3. Pauli trova la chiave e inventa il neutrone/neutrino
4. La teoria di Fermi: un nuovo paradigma
5. Yukawa e le forze nucleari
6. Il bosone mancante degli anni 30 e 40

1. Sistema Periodico, Spin e Principio di Pauli

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

periodo: 2
periodo: 8
periodo: 18
periodo: 32

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Periodic Table Key

X Synthetic Elements	X Liquids or melt at close to room temp.	X Solids	X Gases	Akali Metals	Akali Earth Metals	Transition Metals	Other Metals	Metalloids	Other Non Metals	Halogens	Noble Gases	Lanthanides & Actinides
----------------------------	--	-------------	------------	--------------	-----------------------	----------------------	-----------------	------------	---------------------	----------	----------------	----------------------------

The Periodic Table

- **1869.** Dimitri Mendeleev scopre le periodicità nelle proprietà chimiche degli elementi
- elementi ordinati secondo il *peso atomico*, A , le colonne riportano elementi con la stessa *valenza chimica*: periodi di 2, 8, 18, 32
- c'erano lacune che si sono colmate nel tempo: previsione di nuovi elementi come il germanio e il gallio
- ci sono "errori": il peso atomico non è la buona variabile, es. $A(K)=39.1$, $A(Ar)=39.9$
- **1913.** Henry Mosely scopre il numero atomico, Z che caratterizza la carica elettrica del nucleo = $+Ze$: $Z(Ar)=18$, $Z(K)=19$!

- il periodo 2 si spiega con lo spin dell'elettrone e il Principio di Pauli
 - l'elettrone esiste in due stati, che corrispondono ad un momento di rotazione: $\text{spin} = +1/2$, su; $\text{spin} = -1/2$, giu';
 - due elettroni con lo stesso spin non possono mai stare nello stesso stato orbitale (Pauli)
- quindi, l'orbita piu' bassa puo' accomodare solo 2 elettroni (H, $Z=1$, He, $Z=2$), il terzo elettrone (Li, $Z=3$) deve stare su un'orbita piu' esterna e si cede piu' facilmente (Li ha valenza 1, come H, e sta quindi sulla stessa colonna)
- il periodo 8 corrisponde agli elettroni che possono riempire gli orbitali successivi, che hanno momento angolare orbitale 0 (2 stati) e 1(6 stati)

- e cosi' via...

1 H	
3 Li	4 Be

5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
--------	--------	--------	--------	--------	----------

- si capisce l'entusiasmo di Rutherford: All science is either physics or stamp collecting (citato in *Rutherford at Manchester*, J. B. Birks, 1962)...ne riparleremo.

2. Elettroni nei nuclei?

- $A \approx$ multiplo intero del peso atomico dell'idrogeno e $\approx 2Z$
- ma se il protone e' il mattone fondamentale dei nuclei (protos=primo) come suggerito da Rutherford nel 1917, come fanno A protoni ad avere carica eZ ?
- Talvolta le strade sbagliate si prendono per voler fare economia: per usare solo le due particelle note, p ed e , Heisenberg propose l'esistenza di elettroni fortemente legati nei nuclei, in numero $=A-Z$, in modo tale che:
 - carica del nucleo $= +e A - e(A-Z) = +eZ$
 - numero di particelle nel nucleo: $N = A + (A-Z) = 2A - Z$
 - esempio: Azoto, $A=14$, $Z=7 \Rightarrow N=21$
- due seri problemi sono emersi nel tempo:
 - il protone ha spin $1/2$ come l'elettrone e componendo N spin $1/2$ si ottengono momenti angolari interi o seminteri, a seconda che N sia pari o dispari
 - componendo N particelle che obbediscono al principio di Pauli si ottengono particelle che obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac (come gli elettroni) per N dispari, o di Bose-Einstein (come i fotoni) per N pari
- l'Azoto ($N=21$) dovrebbe avere: spin semintero, statistica di Fermi
- ***i dati sperimentali*** raccolti alla fine degli anni 20 ***smentiscono entrambe le previsioni***



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

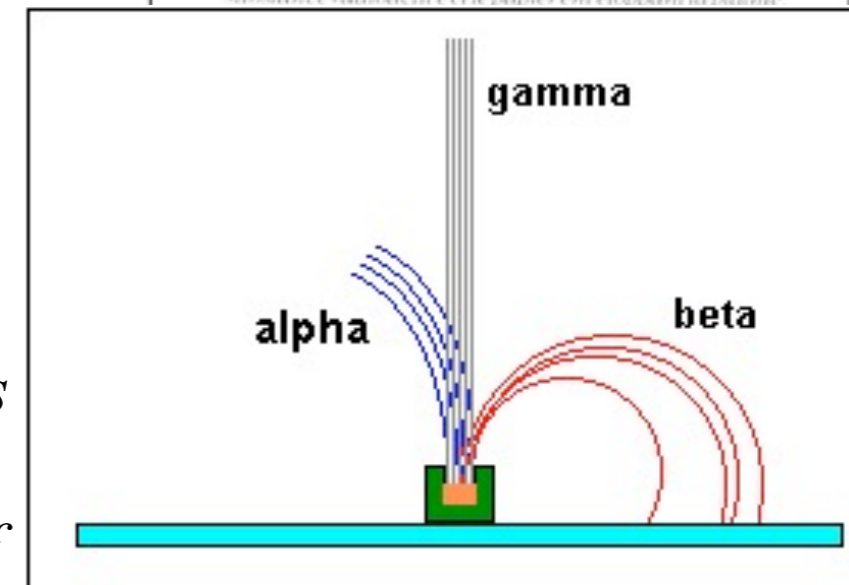
Il nucleo di azoto, contenente un numero dispari (21) di fermioni dovrebbe obbedire alla statistica di Fermi-Dirac, ma lo studio degli spettri Raman della molecola di azoto mostrano che obbedisce alla statistica di Bose-Einstein

..da dove vengono i “raggi β ” ?

- **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
- **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': $N = A + 2(A - Z) = A + \text{numero pari}$*
- *l'Azoto, con A pari, ha spin intero e obbedisce alla statistica di Bose-Einstein !!!*

La scoperta del neutrone mette fine all'equivoco

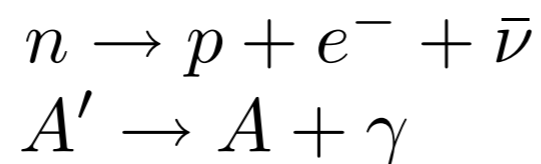
- **1932.** James Chadwick scopre il neutrone: particella neutra di massa molto prossima a quella del protone.
- Majorana e Heisenberg capiscono che il nucleo è costituito da Z protoni e $A-Z$ neutroni, tutte particelle di spin $1/2$, spin e statistica sono salvi
- Amaldi afferma che quando, sul finire 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, ragionevolmente, 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. The missing boson of the 30's and 40's



Hideki Yukawa

N
 $(N) - e$

是等の性質の如く、proton is elementary
 故にその相互作用を説明する為にはその内を以て、
 とし、 N, P の interaction を説明する為には
 昭和九年十一月十日 describe 300. 200
 DEPARTMENT OF PHYSICS
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

数物講演原稿 (105.10) DATE Nov. 17.
 NO. 1

1. Yukawa : On the Interaction of Elementary Particles

1. 近頃 Fermi は Pauli の neutrino の hypothesis を従って β -ray の disintegration を説明し得たと試み、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 を説明し得ない。

この為には neutron と proton の間に π とし、

	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 ^{interaction} force acting between a neutron and a proton ~~is~~ ^{is} an ordinary attraction force or an ^{exchange} ~~interaction~~ ^{"Platzwechsel"} first proposed by Heisenberg. Recently Fermi⁽¹⁾ has treated the problem of β -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⁽²⁾ is much too small to account for the binding of neutron and protons in the nucleus. To remove this defect we ^{may} ~~can~~ ^{have to} 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

⁽¹⁾ E. Fermi, Zets. f. Phys. 88, 161 (1934).

⁽²⁾ 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...e' 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.

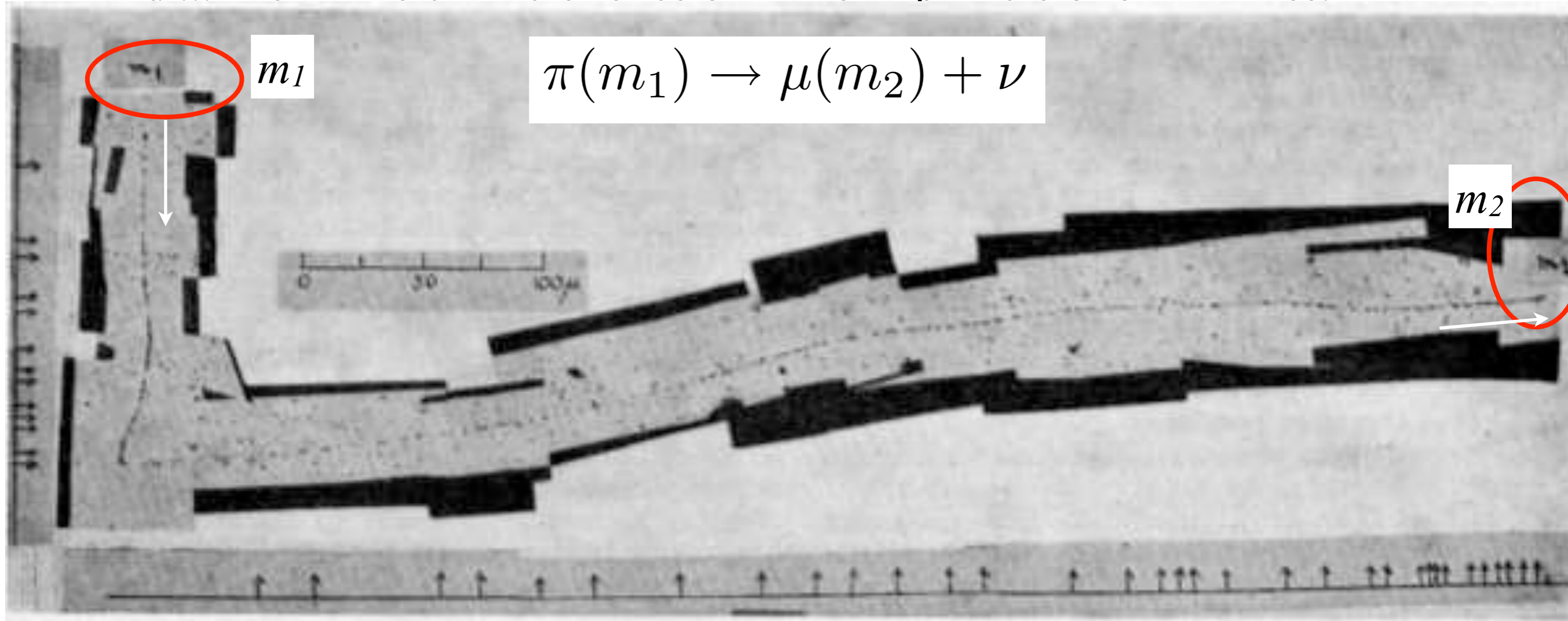
Identificato dapprima con il mesotrone, il pione e' stato scoperto nel 1947 da C.Lattes, H.Muirhead, G.Occhialini and C.Powell, nelle reazioni prodotte dai raggi cosmici negli alti strati dell'atmosfera, Nature 159, 694 (1947).

Finalmente il pione !

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

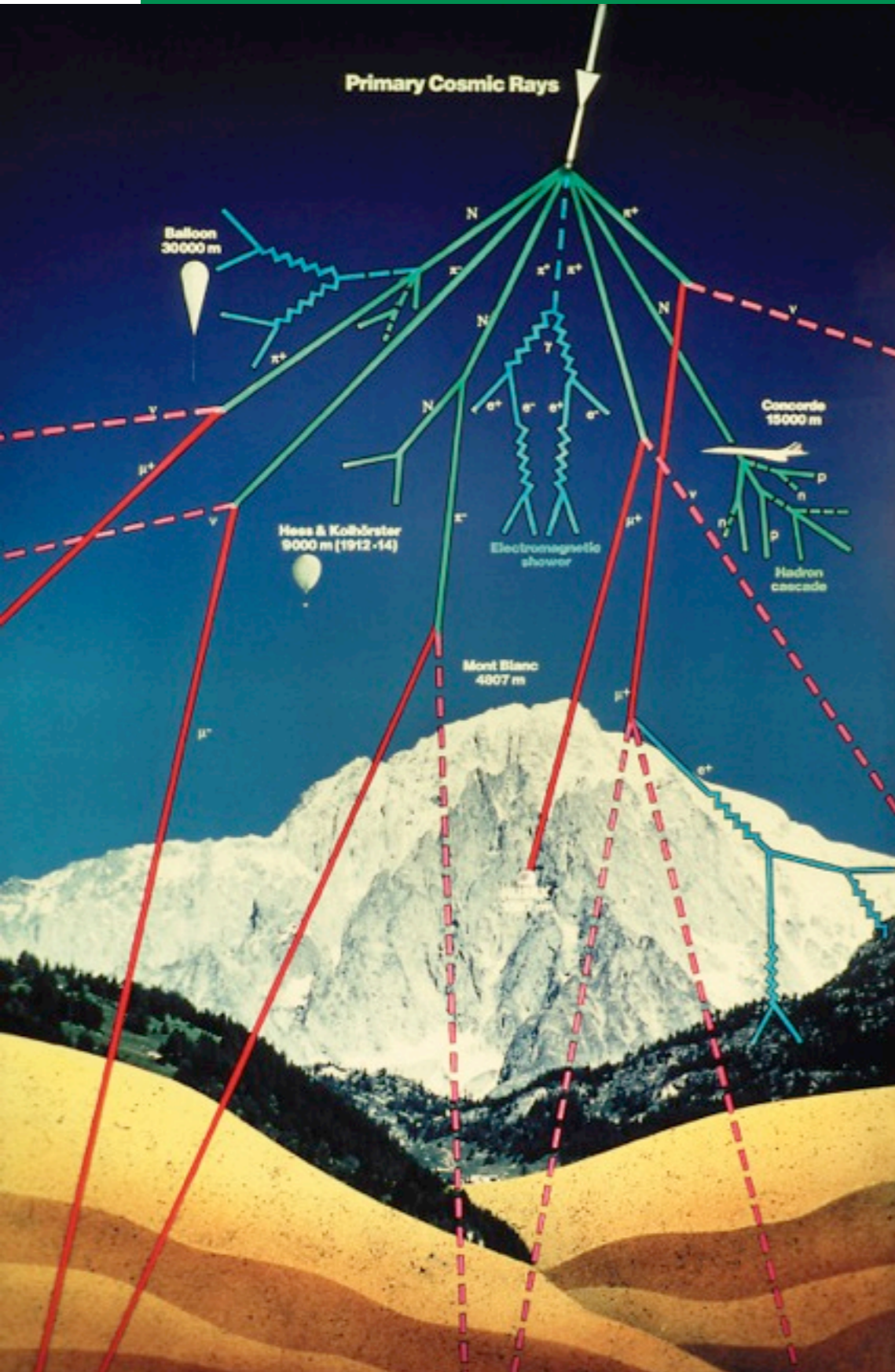
H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol

...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.



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

adesso capiamo meglio la catena di eventi



- il raggio cosmico primario (protone o nucleo) urta un nucleo dell'atmosfera e lo frammenta in protoni, neutroni e mesoni π (l. verdi e blu tratteggiate)
- i pioni carichi hanno vita media breve e
 - decadono nell'alta atmosfera dando luogo ad un muone (l. rosse continue)+neutrino (l. rosse tratteggiate),
 - oppure si fermano in un nucleo frammentandolo (l. verdi continue)
- i pioni neutri (l. blu tratteggiate) hanno vita ancora piu' breve e decadono in due raggi gamma (l. blu ondulate), che danno luogo a "sciami" di particelle elettromagnetiche:
 - coppie elettroni-positroni (l. blu continue),
 - gamma di energia inferiore
- i muoni sono penetranti e arrivano al livello del mare o anche sotto notevoli spessori di roccia (laboratori sotterranei).

Underground neutrino detection

- Kamiokande (lab. sotterraneo in Giappone) vede i neutrini dallo zenith e dal nadir (prodotti nell'atmosfera agli antipodi)
- e' una caverna piena d'acqua sorvegliata da pareti di fotomoltiplicatori
- i neutrini sui nuclei d'acqua producono particelle cariche che fanno "luce Cerenkov" vista dai fotomoltiplicatori
- confrontando i flussi di ν da zenith e da nadir si possono rilevare anomalie nella propagazione di ν su distanze di migliaia di km
- cosi' sono state rivelate le "oscillazioni" di ν ipotizzate da Bruno Pontecorvo e altri.

