

8 aprile 2024

Dall'atomo al neutrino

Francesco Vissani
vissani@Ings.infn.it
*Laboratori Nazionali
Gran Sasso - INFN*



Riflessioni sulla natura della realtà materiale

**dall'ipotesi atomica originaria alle sue evoluzioni moderne, fino al
moderno ingresso in chimica ed in fisica**

idee-guida dell'antica Grecia

Dopo le prime riflessioni sulla materia di base - l'archè - viene ipotizzato che

- *I corpi celesti sono di **materia comune**, p.e. il sole è fatto di metalli incandescenti*
- *Esistono **vari tipi** di materia elementare - “i quattro elementi”*
- *Esistono solo frammenti dell'archè - gli **atomi** - che si muovono nel **vuoto***

(idee rispettivamente di Anassagora; Empedocle; Leucippo & Democrito)

Talete

Pitagora

Parmenide

Zenone

Anassagora

Empedocle

Leucippo

Democrito

Protagora

Gorgia

Socrate

Platone

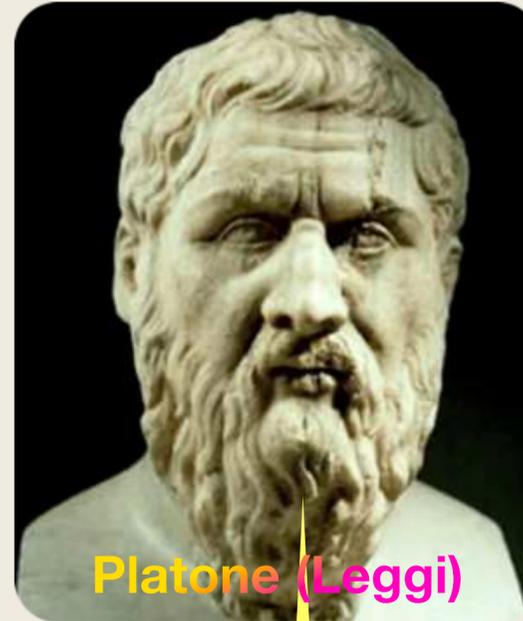
Aristotele

600 a.C

500 a.C

400 a.C

300 a.C



Platone (Leggi)

“Se anche noi esibissimo le prove dell’esistenza degli dèi, citando come esempio di realtà divine il Sole, la Luna, gli astri e la Terra, quei sapientoni risponderebbero che queste cose non son altro che terra e pietra”

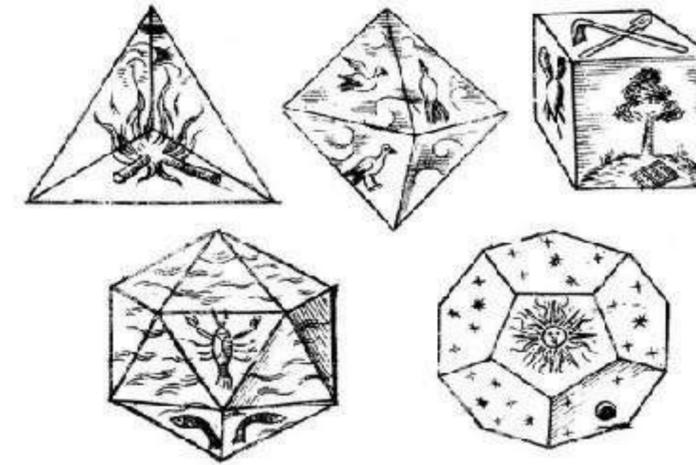
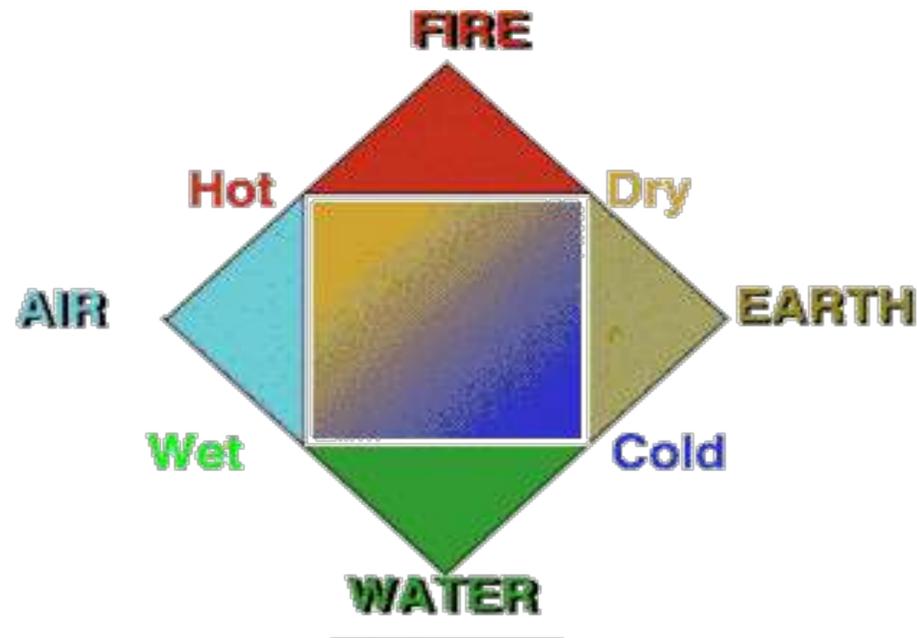
rinasce la scienza, la chimica ottiene i primi risultati

grazie a Boyle, Dalton, Lavoisier, Mendeleev, ci si convince che

- ★ *Esistono diversi tipi di “arie” - i gas: la teoria dei 4 elementi è incompleta*
- ★ *La materia si conserva, le sue trasformazioni obbediscono **leggi** costanti*
- ★ *L'**atomismo** attira nuovamente l'attenzione dei pensatori*
- ★ *Si inizia a credere che ogni elemento abbia atomi caratteristici, uguali tra di loro*

anche se ci si continuerà a chiedere fino al 900: gli atomi sono reali o solo utili trucchi contabili?

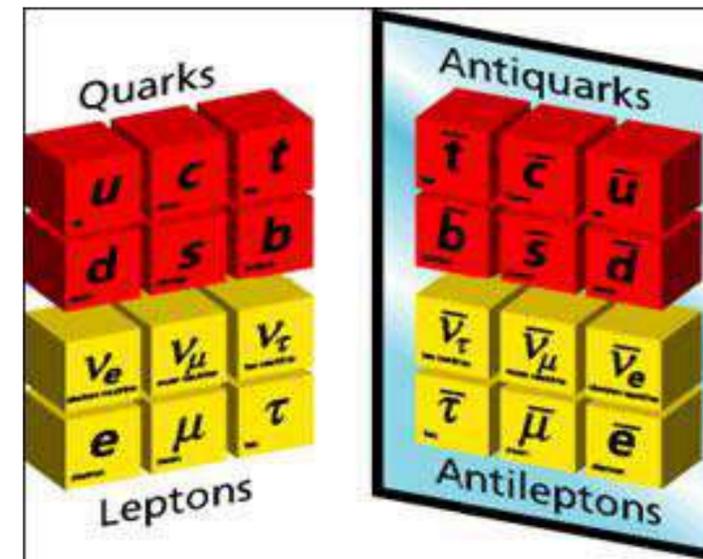
Empedocle, Leucippo, Democrito, Pitagora, Eraclito, Platone, Aristotele ...



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

	Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
	Y = 61	Nb = 94	Ta = 182.
	Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
	Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
	Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
	Ni = 59	Pd = 106,4	Os = 199.
	Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2
	B = 11	Al = 27,1	? = 68
	C = 12	Si = 28	? = 70
	N = 14	P = 31	As = 75
	O = 16	S = 32	Se = 79,1
	F = 19	Cl = 35,4	Br = 80
	Li = 7	Na = 23	K = 39
		Rb = 85,4	Cs = 133
		Ca = 40	Sr = 87,4
		Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 82
		?Er = 68	La = 94
		?Yt = 60	Di = 95
		?In = 75,4	Th = 118?

Д. Менделѣевъ



Fermilab

... Dalton, Lavoisier, Mendeleev, Thomson, Pauli, Fermi, Zweig, Gell-Mann

ulteriori progressi della chimica e primi passi della fisica

da metà ottocento a inizio novecento

- Si riconosce la **natura elettrica** delle reazioni chimiche e della materia
- Prime misure quantitative delle **dimensioni** degli atomi
- Ci si inizia a chiedere se essi siano **davvero immutabili**
- Gli elementi chimici emettono degli “**spettri**” caratteristici

sulle stelle (1835)

“ne determiniamo forme, distanze, dimensioni, movimenti;

ma non riusciremo mai a studiarne
la composizione chimica”



Auguste Comte

colore degli elementi chimici sulla fiamma



LITIO
(fucsia)



STRONZIO
(rosso)



POTASSIO
(rosa)



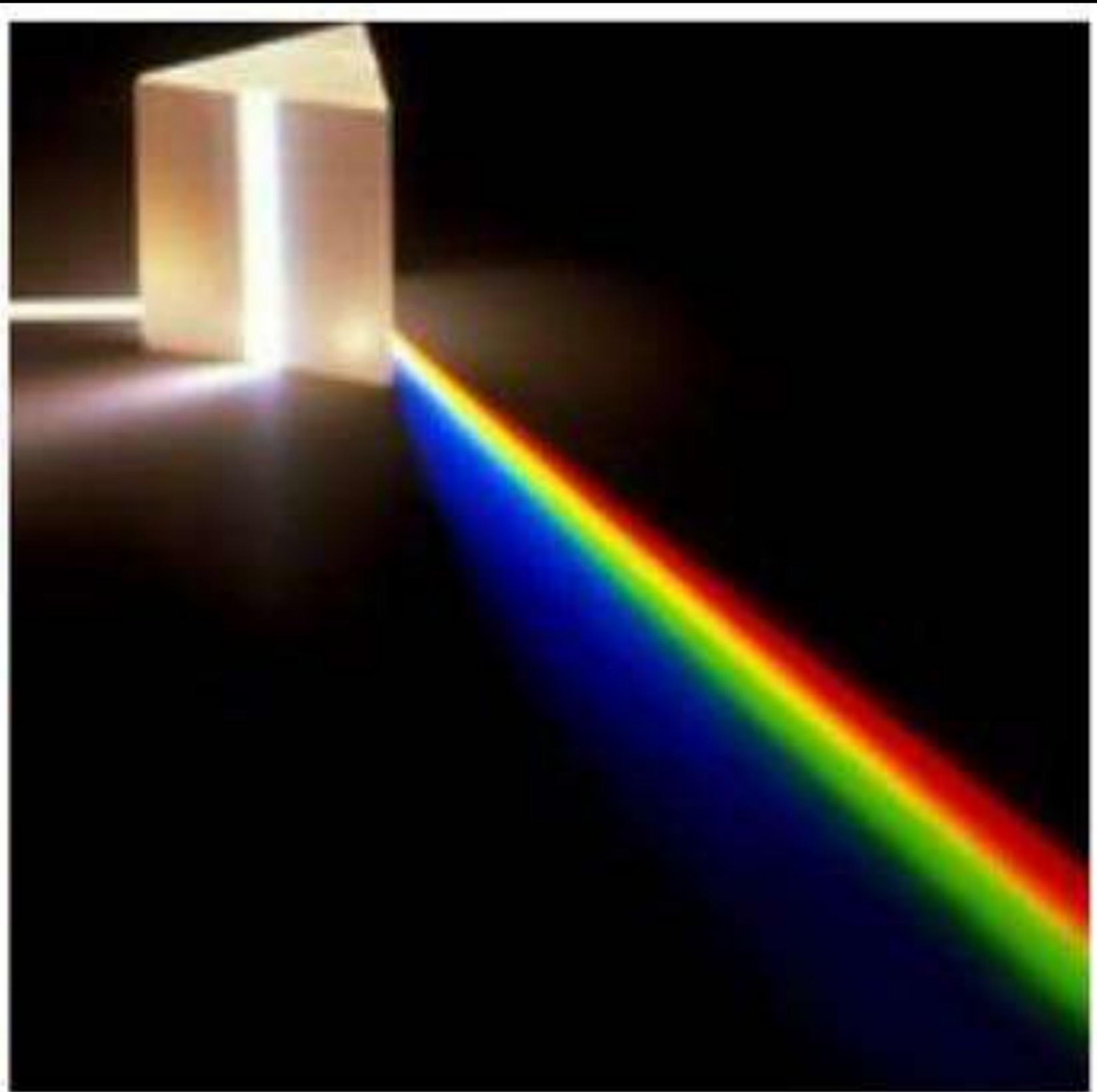
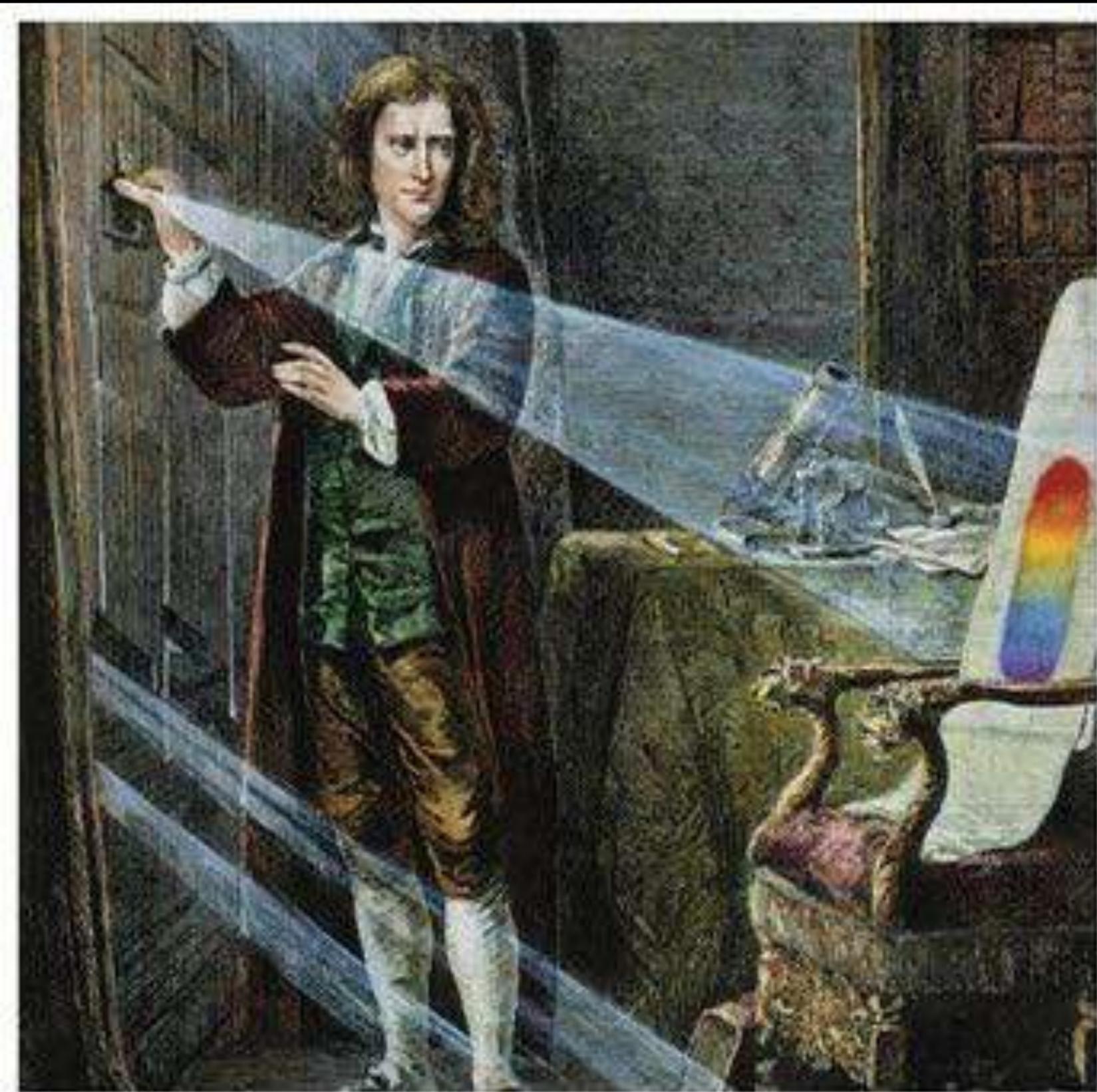
SODIO
(giallo)



CALCIO
(arancione)



RAME
(verde)



e la luce può essere scomposta (Newton, 1672)

**CIASCUN ELEMENTO
EMETTE SOLO I SUOI
COLORI CARATTERISTICI**

1	H																	2	He																				
3	Li	4	Be																	10	Ne																		
11	Na	12	Mg																	18	Ar																		
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				
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				
55	Cs	56	Ba																	63	Bi	64	Po	65	At	66	Rn												
87	Fr	88	Ra																	113	Uut	114	Fl	115	Uup	116	Lv	117	Uus	118	Uuo								
				71	Hf	72	Ta	73	W	74	Re	75	Os	76	Ir	77	Pt	78	Au	79	Hg	80	Tl	81	Pb	82	Bi	83	Po	84	At	85	Rn						
				101	Rf	102	Db	103	Sg	104	Bh	105	Hs	106	Mt	107	Ds	108	Rg	109	Cn	110	Uuq	111	Uub	112	Uuo	113	Uut	114	Fl	115	Uup	116	Lv	117	Uus	118	Uuo

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

quanti di materia e di luce

i “corpuscoli” (=gli elettroni), i quanti di Einstein (=i fotoni), i problemi dei modelli dell'atomo e l'atomo di Bohr

atomismo e fisica moderna

JOSEPH J. THOMSON

Carriers of negative electricity

Nobel Lecture, December 11, 1906

Introductory

In this lecture I wish to give an account of some investigations which have led to the discovery that the carriers of negative electricity are bodies, which I have called corpuscles, having a mass very much smaller than that of the atom, and are of the same character from whatever source the negative electricity may be derived.

The first place in which corpuscles were detected was a highly exhausted tube through which an electric discharge was passing. When an electric discharge is sent through a highly exhausted tube, the sides of the tube glow with a vivid green phosphorescence. That this is due to something proceeding in straight lines from the cathode - the electrode where the negative electricity enters the tube - can be shown in the following way (the experiment is one made many years ago by Sir William Crookes): A Maltese cross made of thin mica is placed between the cathode and the walls of the tube. When the discharge is past, the green phosphorescence no longer

- Newton è a favore dell'atomismo
- Ma l'ostilità all'atomismo resta diffusa, p.e. sin da Leibniz in Germania
- L'opinione a lungo prevalente è che l'atomo sia un - utile - trucco matematico
- La svolta principale probabilmente è la scoperta dell'elettrone

atomismo e fisica moderna

JOSEPH J. THOMSON

Carriers of negative electricity

Nobel Lecture, December 11, 1906

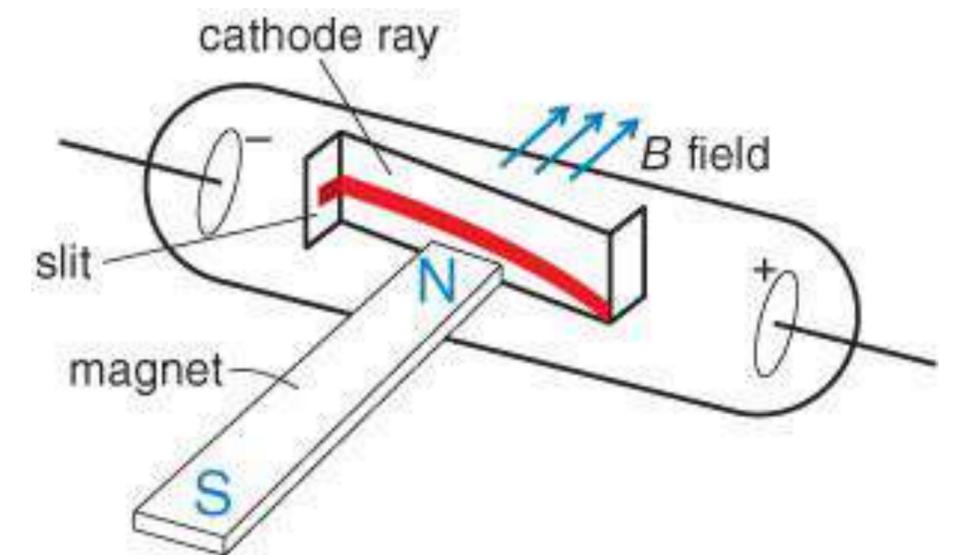
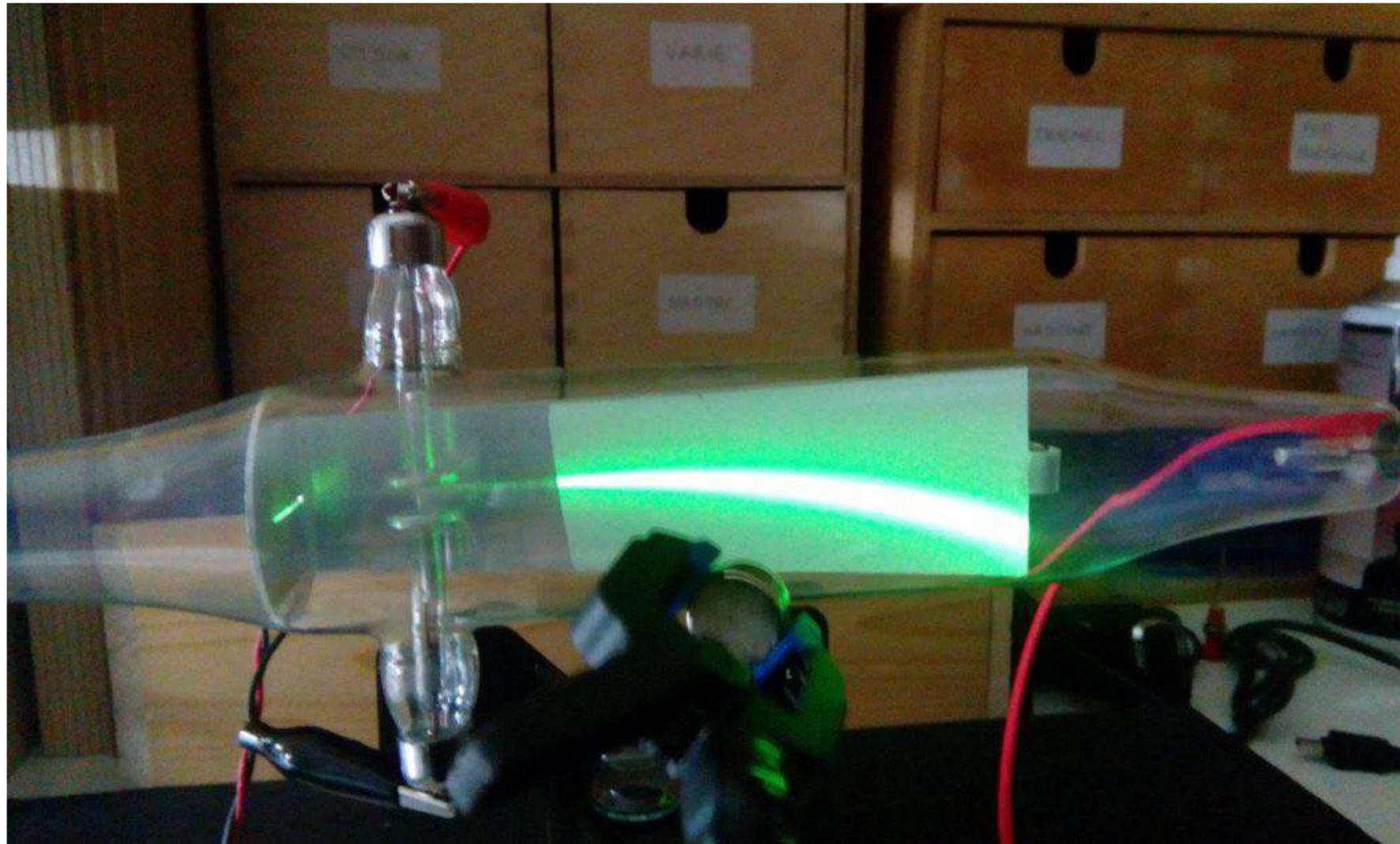
Introductory

In this lecture I wish to give an account of some investigations which have led to the conclusion that the carriers of negative electricity are bodies, which I have called corpuscles, having a mass very much smaller than that of the atom of any known element, and are of the same character from whatever source the negative electricity may be derived.

The first place in which corpuscles were detected was a highly exhausted tube through which an electric discharge was passing. When an electric discharge is made in a highly exhausted tube, the sides of the tube glow with a vivid green phosphorescence. That this is due to something proceeding from the electrode where the negative electricity enters the tube - can be shown in the following way (the experiment is one made many years ago by Sir William Crookes): A Maltese cross made of thin mica is placed between the cathode and the walls of the tube. When the discharge is past, the green phosphorescence no longer

- Newton è a favore dell'atomismo
- Ma l'ostilità all'atomismo resta diffusa, p.e. sin da Leibniz in Germania
- L'opinione a lungo prevalente è che l'atomo sia un - utile - trucco matematico
- La svolta principale probabilmente è la scoperta dell'elettrone

i “corpuscoli” curvano in un campo magnetico



Les Hypothèses moléculaires

Jean Perrin

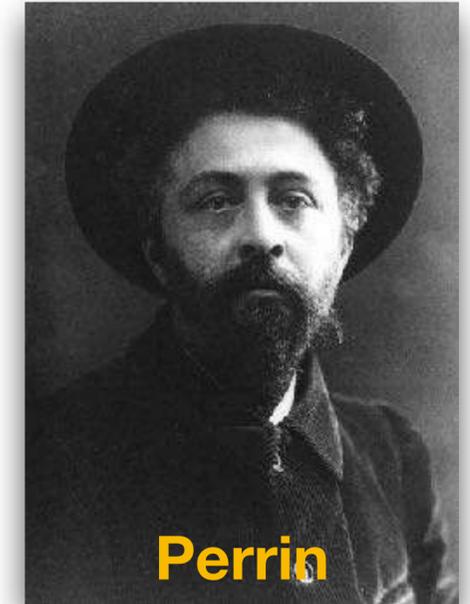
Les hypothèses moléculaires

La Revue Scientifique
13 Avril 1901

PHYSIQUE. — *Les hypothèses moléculaires.*

Jean Perrin, La Revue Scientifique

- 4e série — Tome XV:N°15 — 13 Avril 1901
- Conférence faite aux étudiants et aux amis de l'université de Paris, le 16 février 1901. par M. Jean Perrin, chargé du cours de Chimie à la Sorbonne.

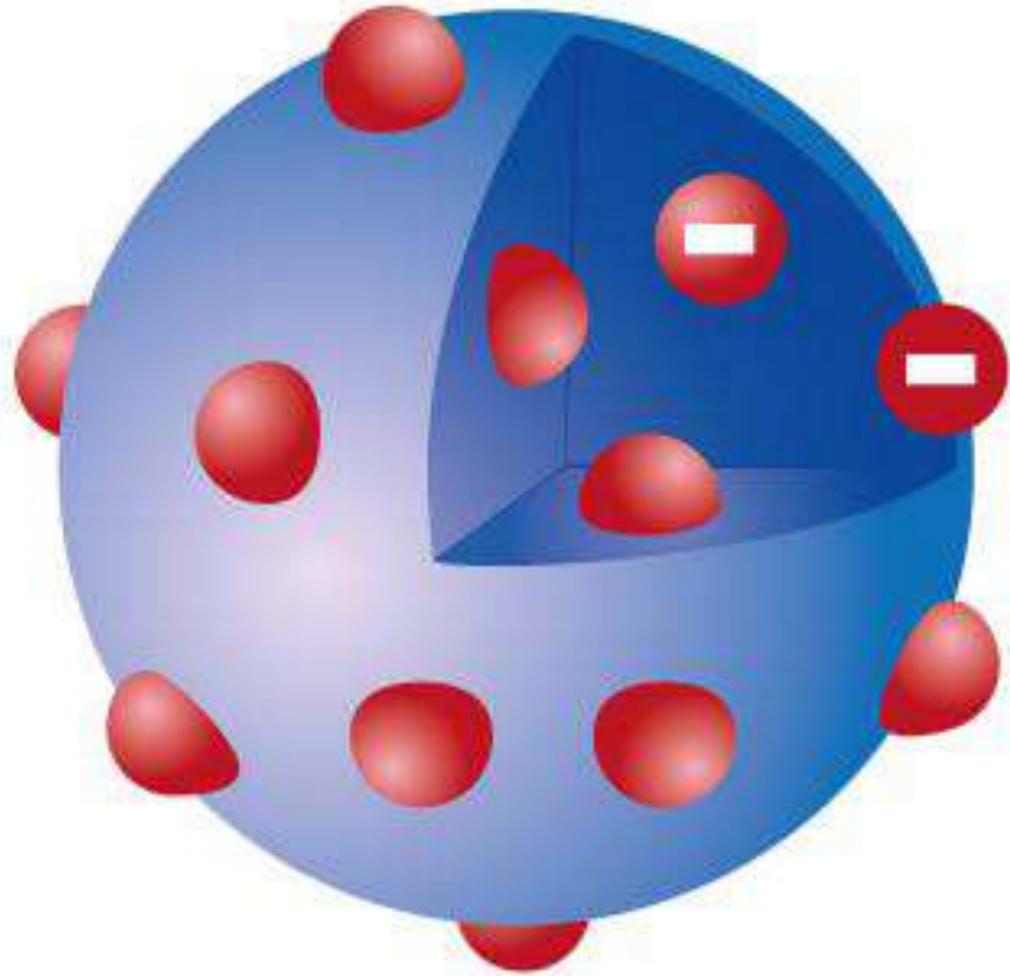


Nella sezione intitolata "Division de l'atome en corpuscles" leggiamo affermazioni come:

*Ogni atomo sarà costituito, da un lato, da varie masse fortemente cariche di elettricità positiva, una sorta di soli positivi (**soleils**) la cui carica sarà molto più grande di quella di un corpuscolo, e dall'altro, da una moltitudine di corpuscoli, una sorta di piccoli pianeti negativi (**planètes**), l'insieme delle cui masse gravita sotto l'azione di forze elettriche, e la carica negativa totale è esattamente uguale alla carica positiva totale, cosicché l'atomo è elettricamente neutro.*

E ancora, altrettanto impressionante ed eloquente,

- *I corpuscoli negativi sono tutti uguali tra loro, qualunque sia la natura chimica dell'atomo [...]*
- *la massa [...] è solo la millesima parte dell'atomo di idrogeno.*



Il modello a panettone (plum-pudding)

Tutti sanno che JJ Thomson (che sapeva che la massa degli elettroni è piccola) propone nel 1904 un modello dell'atomo completamente diverso da quello di Perrin

MANUALI HOEPLI

ELETTRICITÀ E MATERIA

DEL

D.^R J. J. THOMSON

*Professore di Fisica sperimentale nell'Università di Cambridge
Membro della Società Reale di Londra, ecc.*

TRADUZIONE CON AGGIUNTE

DEL

D.^R G. FAÈ

*Libero Docente in Fisica sperimentale
Professore nel R. Liceo Parini di Milano*

CON 18 INCISIONI



Se abbiamo un atomo contenente n corpuscoli, ciascuno con una carica e espressa in unità elettrostatiche, la quantità totale di elettricità negativa nell'atomo è ne ,

Se M è la massa d'un atomo,

se m è la massa d'un corpuscolo,

$$nm = M$$

Perché Thomson lo propose?



Una congettura è la seguente:

JJ Thomson conosceva la formula di Larmor (1897) che prevede la potenza irradiata da un elettrone con accelerazione a , ovvero

$$P = \frac{2 e^2 a^2}{3 c^3}$$

Perché Thomson lo propose?



Una congettura è la seguente:

JJ Thomson conosceva la formula di Larmor (1897) che prevede la potenza irradiata da un elettrone con accelerazione a , ovvero

$$P = \frac{2 e^2 a^2}{3 c^3}$$

In quanto tempo si irradia l'energia $E = e^2/(2r)$ (stimata dal moto circolare)

$$t = \frac{E}{P} \sim 0,3 \mu\text{s} \times \left(\frac{r}{10^{-7} \text{ cm}} \right)^3$$

Perché Thomson lo propose?



Una congettura è la seguente:

JJ Thomson conosceva la formula di Larmor (1897) che prevede la potenza irradiata da un elettrone con accelerazione a , ovvero

$$P = \frac{2 e^2 a^2}{3 c^3}$$

In quanto tempo si irradia l'energia $E = e^2/(2r)$ (stimata dal moto circolare)

$$t = \frac{E}{P} \sim 0,3 \mu\text{s} \times \left(\frac{r}{10^{-7} \text{ cm}} \right)^3$$

È troppo breve per essere accettabile. Probabilmente JJ Thomson pensava che gli elettroni dovessero star fermi, per evitare danni irreparabili...

l'esperimento del cucchiaino d'olio

$V=2$ cm cubi di olio occupano un'area $A=2000$ metri quadrati in un lago

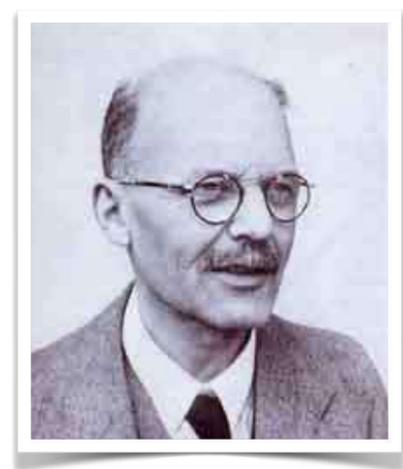
Se questo è uno strato mono-atomico di altezza a , vale

$$a = \frac{V}{A} = 10^{-7} \text{ cm}$$

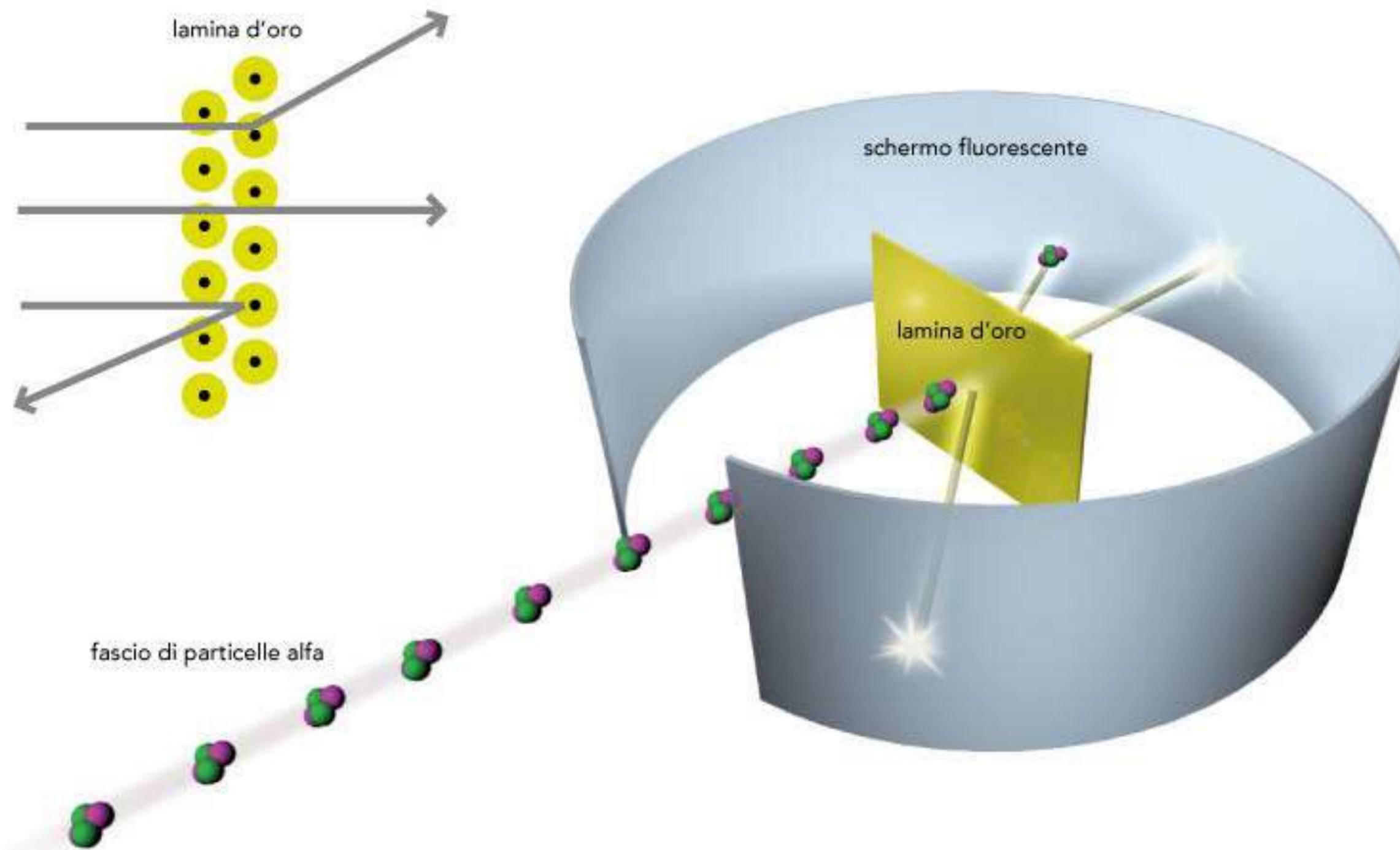
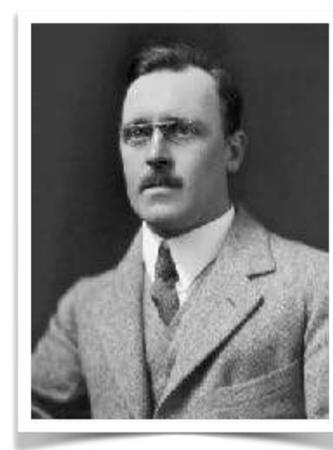
che più o meno è la dimensione della molecola di "trioleina"

(l'osservazione è di Franklin 1774, la teorizzazione del 1890)





l'esperimento di Geiger & Marsden



il modello di Rutherford



l'interpretazione teorica di Rutherford del 1913 è notissima

- l'atomo ha un nucleo piccolissimo con carica positiva

il modello di Rutherford



l'interpretazione teorica di Rutherford del 1913 è notissima

- l'atomo ha un nucleo piccolissimo con carica positiva
- la massa è contenuta quasi tutta nel nucleo

il modello di Rutherford



l'interpretazione teorica di Rutherford del 1913 è notissima

- l'atomo ha un nucleo piccolissimo con carica positiva
- la massa è contenuta quasi tutta nel nucleo
- gli elettroni si dispongono intorno al nucleo e neutralizzano l'atomo

il modello di Rutherford



l'interpretazione teorica di Rutherford del 1913 è notissima

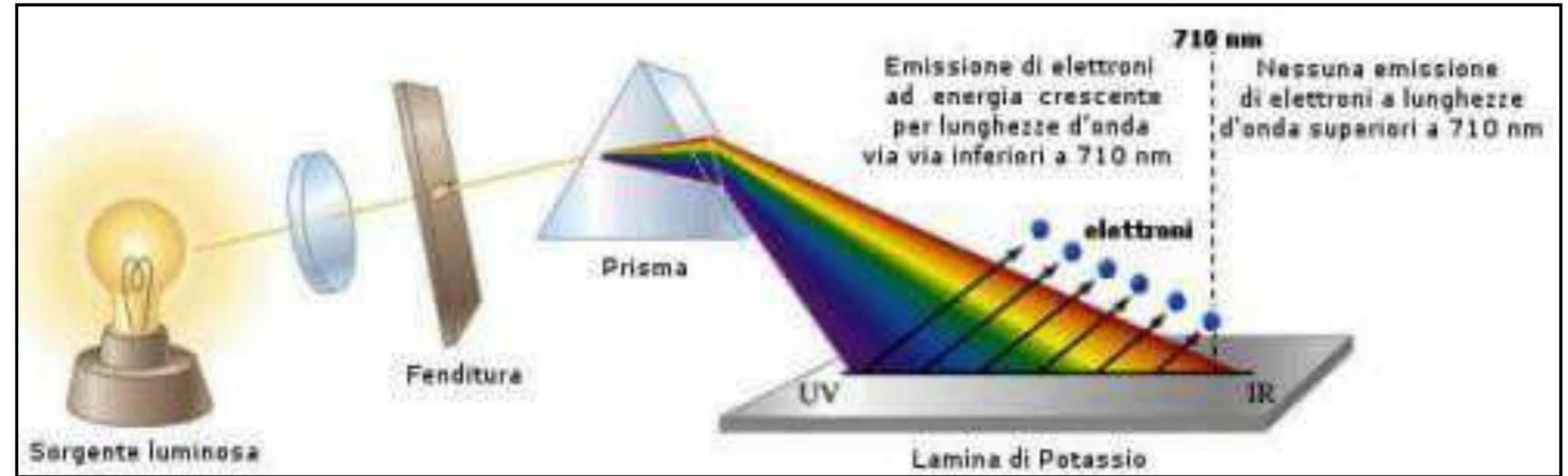
- l'atomo ha un nucleo piccolissimo con carica positiva
- la massa è contenuta quasi tutta nel nucleo
- gli elettroni si dispongono intorno al nucleo e neutralizzano l'atomo

Un ritorno a Perrin!!! Ma i problemi del modello restano irrisolti.

effetto fotoelettrico e natura della luce (1905)

gli elettroni del metallo sono estratti solo se la frequenza supera un certa soglia

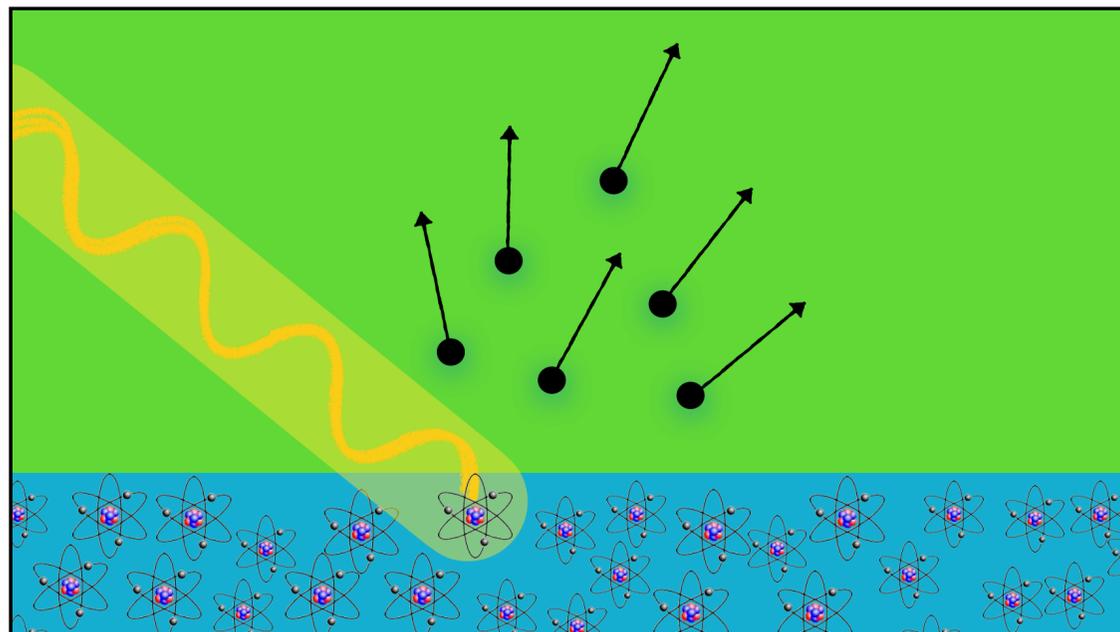
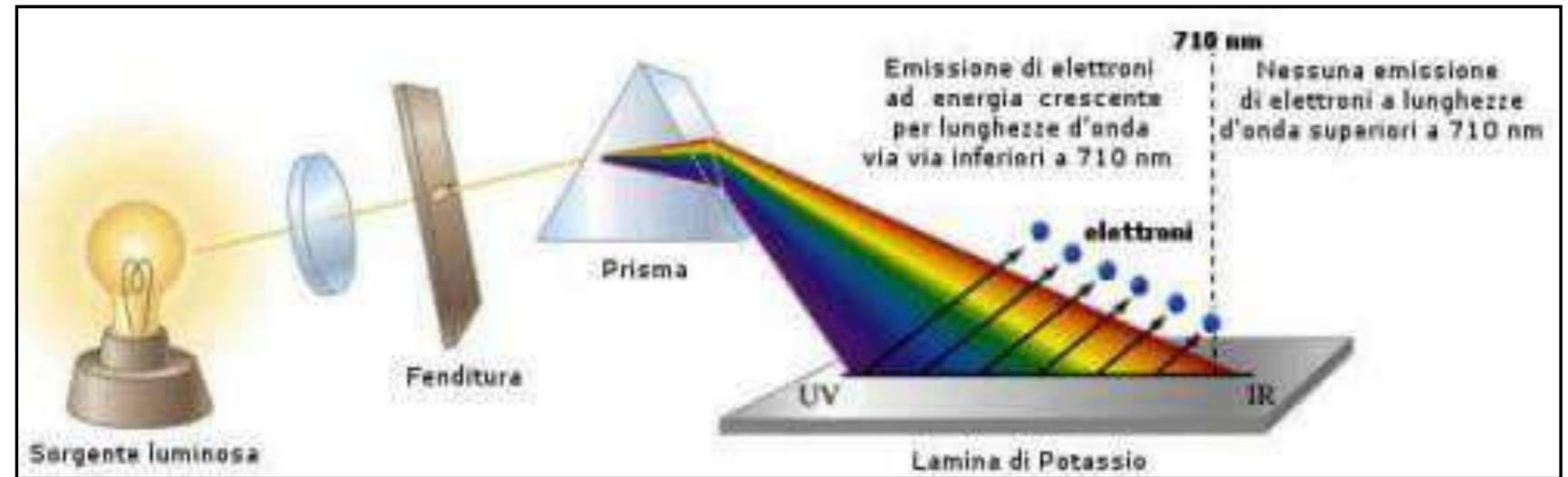
sopra quella soglia, la loro energia è proporzionale alla frequenza in surplus



effetto fotoelettrico e natura della luce (1905)

gli elettroni del metallo sono estratti solo se la frequenza supera un certa soglia

sopra quella soglia, la loro energia è proporzionale alla frequenza in surplus



Interpretazione di Einstein: la luce viaggia in pacchetti (che lui chiama "quanti") oggi detti "fotoni", ognuno con energia

$$E = h \times f$$

Il coefficiente di proporzionalità è proprio la costante introdotta da Planck (1900)

l'atomo di Bohr

- Niels Bohr nel 1913 propone il primo modello (pre-) moderno dell'atomo



foto di fidanzamento con
Margrethe Nørlund (1910)

l'atomo di Bohr

- Niels Bohr nel 1913 propone il primo modello (pre-) moderno dell'atomo
- Postula che gli elettroni dell'atomo si posizionino solo in alcuni stati di energia E_i ben distinti



foto di fidanzamento con
Margrethe Nørlund (1910)

l'atomo di Bohr

- Niels Bohr nel 1913 propone il primo modello (pre-) moderno dell'atomo
- Postula che gli elettroni dell'atomo si posizionino solo in alcuni stati di energia E_i ben distinti
- L'emissione o l'assorbimento della luce (del fotone) avviene in un salto tra due di questi livelli, pertanto

$$E_{\text{fotone}} = E_i - E_j$$



foto di fidanzamento con
Margrethe Nørlund (1910)

l'atomo di Bohr

- Niels Bohr nel 1913 propone il primo modello (pre-) moderno dell'atomo
- Postula che gli elettroni dell'atomo si posizionino solo in alcuni stati di energia E_i ben distinti
- L'emissione o l'assorbimento della luce (del fotone) avviene in un salto tra due di questi livelli, pertanto

$$E_{\text{fotone}} = E_i - E_j$$

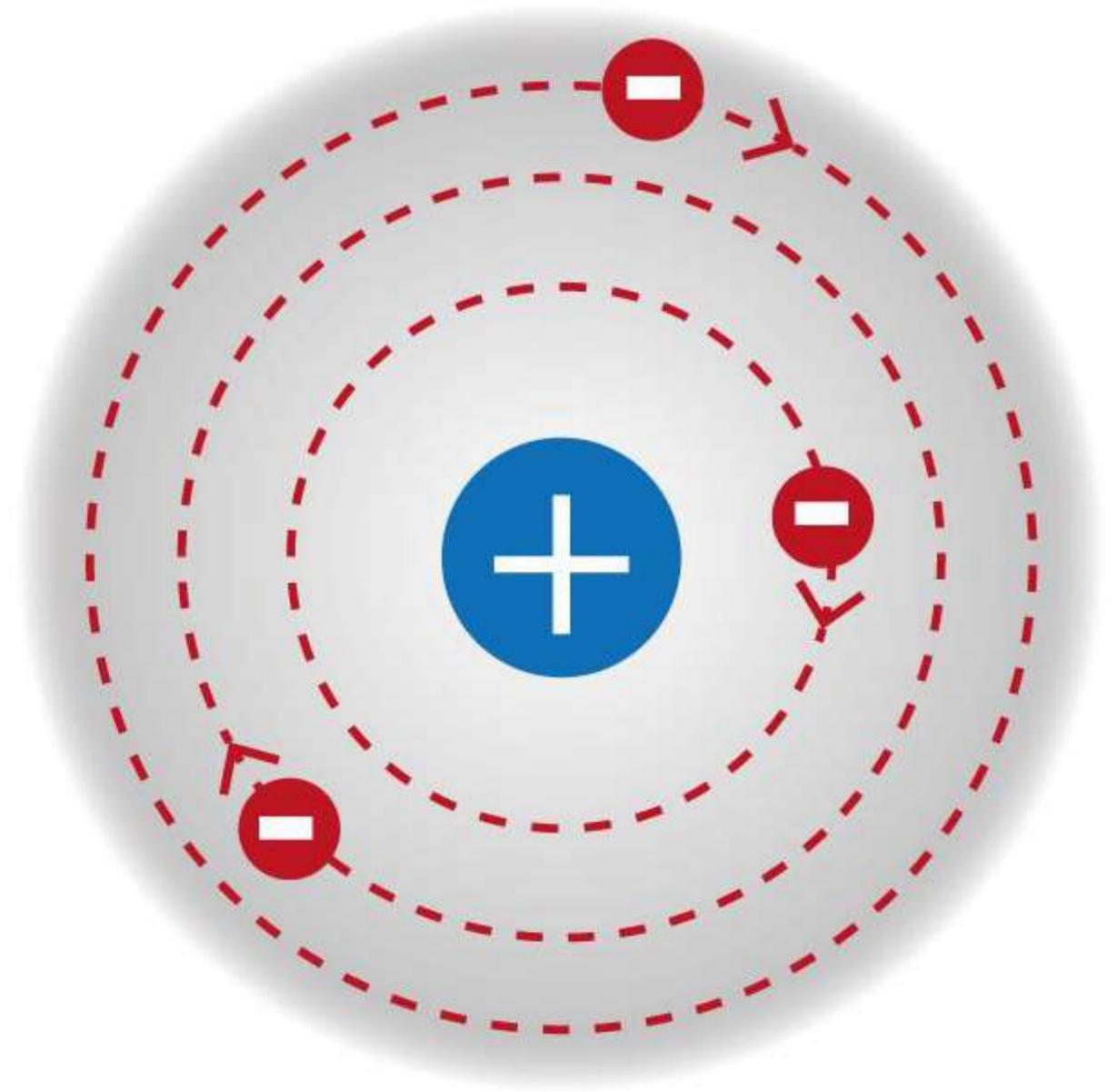
- Seguendo le orme di Planck e Einstein, Bohr associa una frequenza ad ogni **elettrone**, $E_i \propto h \times f_i$



foto di fidanzamento con
Margrethe Nørlund (1910)

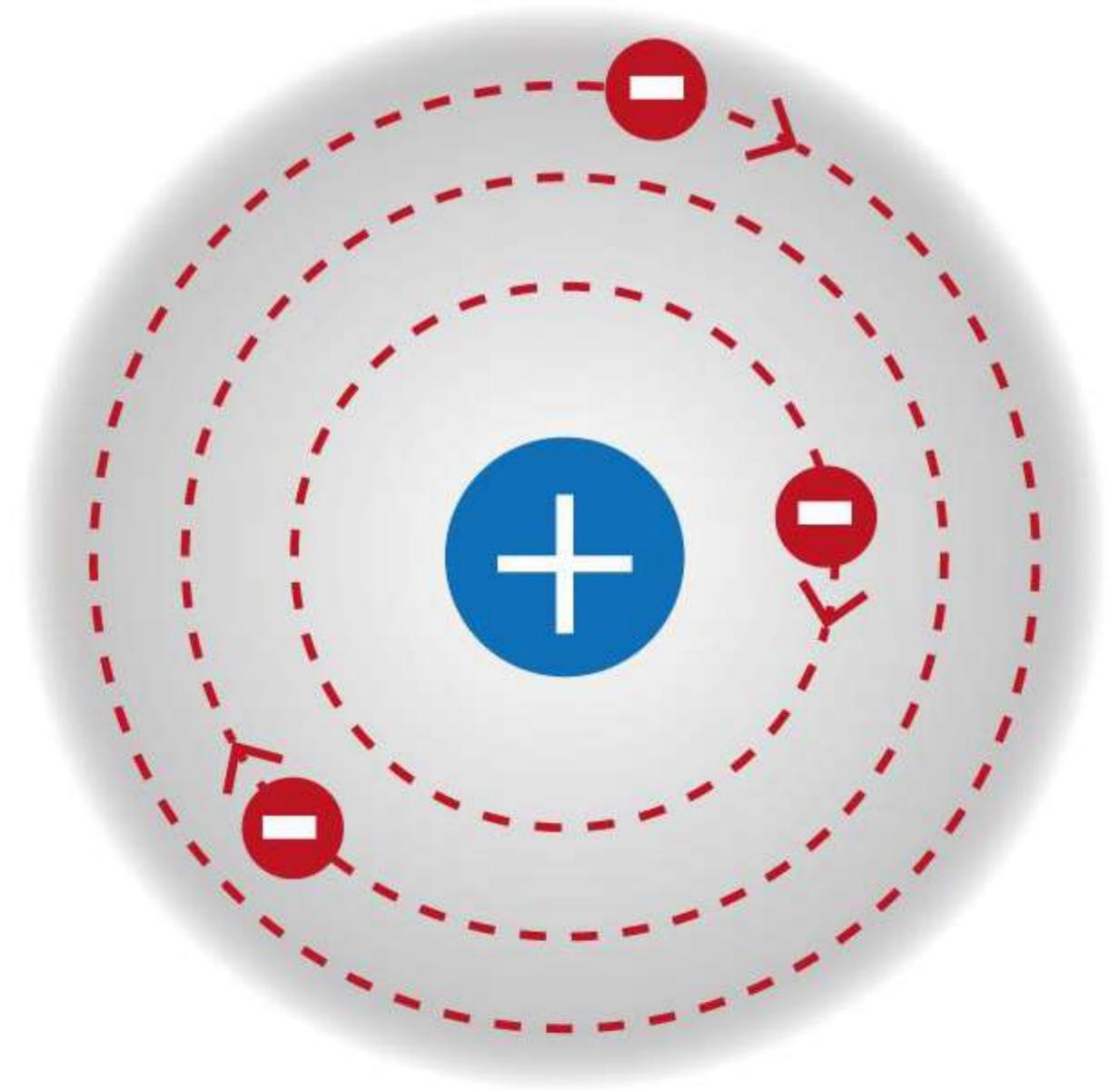
l'atomo di Bohr [2/2]

- Il modello porta a pensare che le radiazioni emesse ed assorbite dagli atomi consentono di osservare una caratteristica degli elettroni atomici



l'atomo di Bohr [2/2]

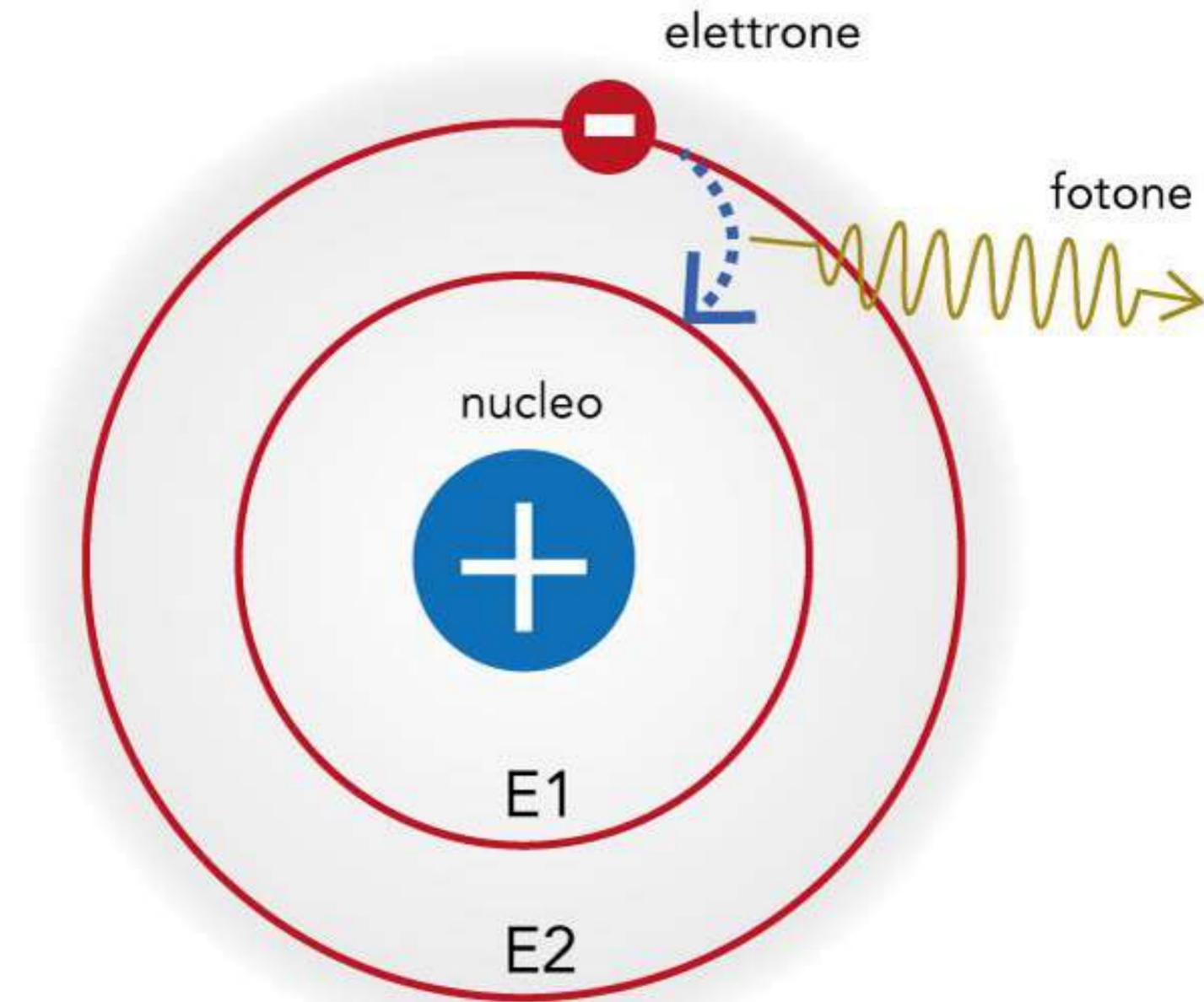
- Il modello porta a pensare che le radiazioni emesse ed assorbite dagli atomi consentono di osservare una caratteristica degli elettroni atomici
- Bohr procede in questo ragionamento e produce una teoria che permette di riprodurre le energie dell'atomo dell'idrogeno e di stimarne dimensioni e proprietà



l'atomo di Bohr [2/2]

- Il modello porta a pensare che le radiazioni emesse ed assorbite dagli atomi consentono di osservare una caratteristica degli elettroni atomici
- Bohr procede in questo ragionamento e produce una teoria che permette di riprodurre le energie dell'atomo dell'idrogeno e di stimarne dimensioni e proprietà

Per il nostro discorso, è utile osservare questo: i fotoni **scompaiono** in un processo di assorbimento ed **appaiono** in un processo di emissione



antimateria

il percorso intellettuale di Dirac

Dirac spiega l'esistenza dello spin dell'elettrone

The Quantum Theory of the Electron.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.



(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

The new quantum mechanics, when applied to the problem of the structure of the atom with point-charge electrons, does not give results in agreement with experiment. The discrepancies consist of “duplexity” phenomena, the observed number of stationary states for an electron in an atom being twice the number given by the theory. To meet the difficulty, Goudsmit and Uhlenbeck have introduced the idea of an electron with a spin angular momentum of half a quantum and a magnetic moment of one Bohr magneton. This model for the electron has been fitted into the new mechanics by Pauli,* and Darwin,†

Dirac spiega l'esistenza dello spin dell'elettrone

The Quantum Theory of the Electron.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

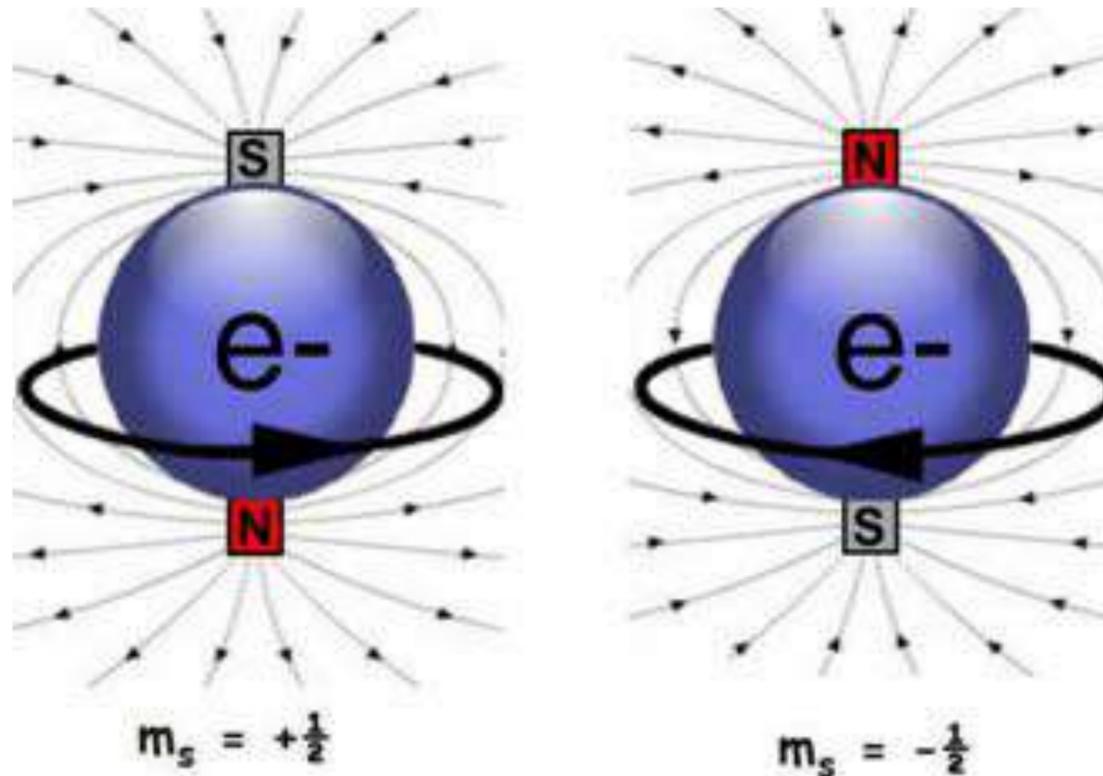


(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

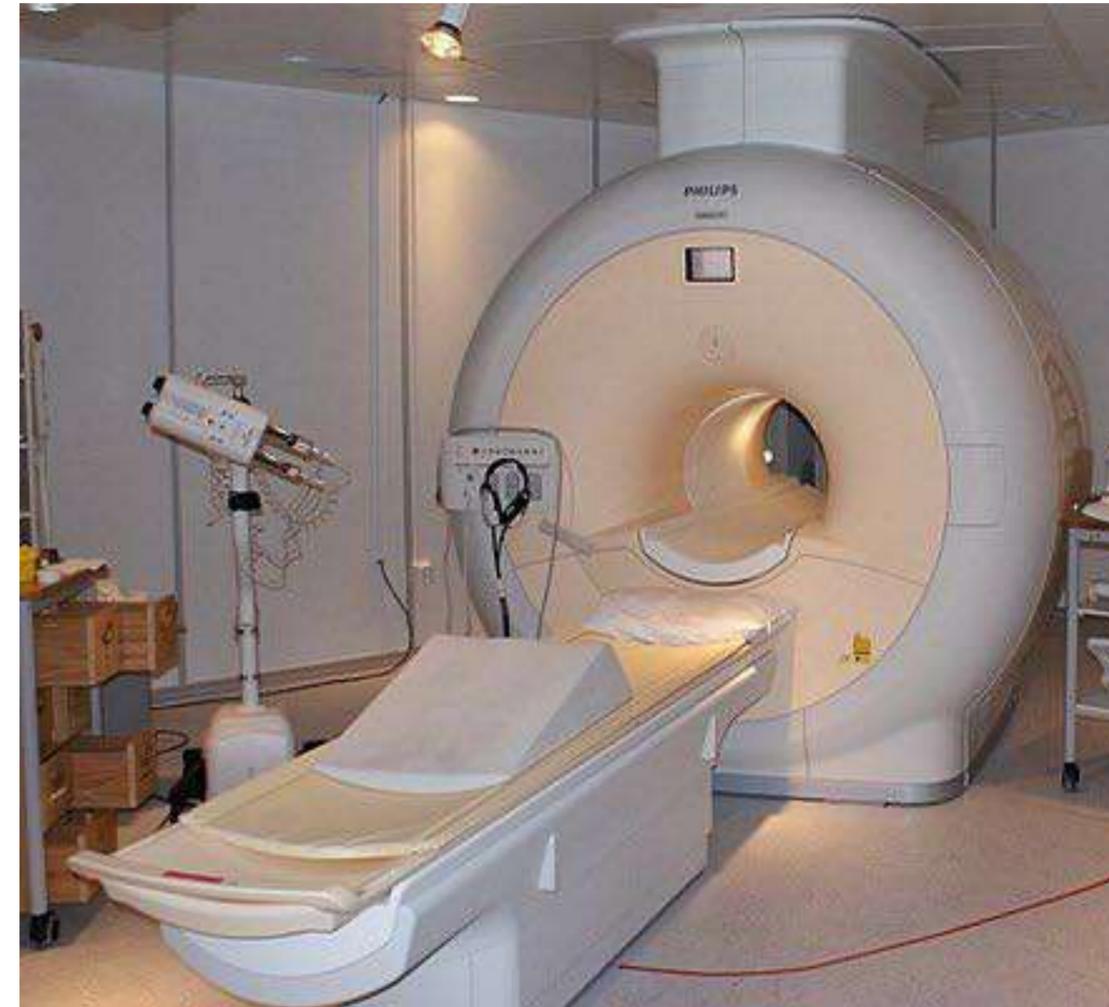
The new quantum mechanics, when applied to the problem of the structure of the atom with point-charge electrons, does not give results in agreement with experiment. The discrepancies consist of “duplexity” phenomena, the observed number of stationary states for an electron in an atom being twice the number given by the theory. To meet the difficulty, Goudsmit and Uhlenbeck have introduced the idea of an electron with a spin angular momentum of half a quantum and a magnetic moment of one Bohr magneton. This model for the electron has been fitted into the new mechanics by Pauli,* and Darwin,†

di “spin” si parla anche oggi

spin e momento magnetico
per un elettrone



apparecchiatura diagnostica a
risonanza magnetica



ma l'equazione ha in serbo sorprese

L'equazione d'onda di Dirac prevede l'esistenza di una particella identica all'elettrone, tranne per un fatto: è dotata di carica elettrica opposta.

Parliamo dell'anti-elettrone (o positrone), il prototipo della particella di antimateria.

In altre parole, l'equazione ci dice "*cercate qualcosa che non avete mai visto!*"

L'anti-elettrone venne scoperto nel 1932, ed il resto (come si dice) è storia: vedi la figura qua a fianco, tratta dal sito del premio Nobel.

The Nobel Prize in Physics 1933



Photo from the Nobel Foundation archive.

Erwin Schrödinger

Prize share: 1/2



Photo from the Nobel Foundation archive.

Paul Adrien Maurice Dirac

Prize share: 1/2

<https://www.linkedin.com/pulse/da-pitagora-allantimateria-francesco-vissani-phd/>



Fu una scoperta travagliata. Dirac pensò tre anni prima di esprimersi così:

“Questo sarebbe un nuovo tipo di particella, sconosciuto alla fisica sperimentale, con la stessa massa e carica opposta dell'elettrone. Possiamo chiamare una tale particella un antielettrone”

come capiamo le antiparticelle?

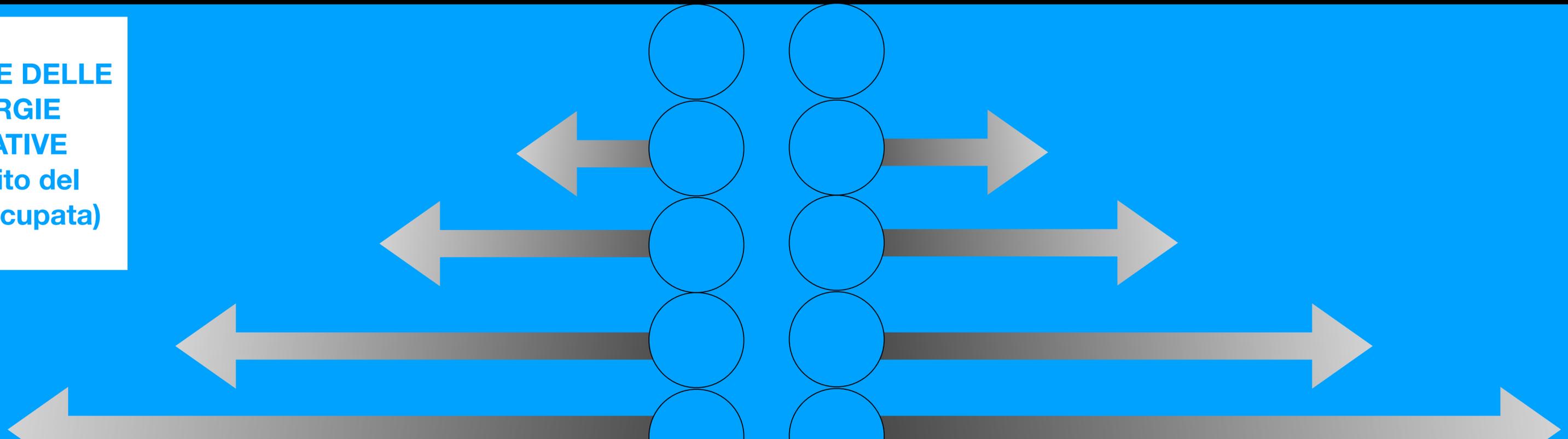
- ◎ **L'interpretazione di Dirac** si basa su una serie di ipotesi interessanti anche se oggi non le consideriamo necessarie. Può essere utile a scopi didattici e la riassumiamo nelle prossime slides.
- ◎ Di solito nei **percorsi universitari** le antiparticelle vengono presentate in uno dei corsi più difficili, proprio alla fine. Anche se è formalmente impeccabile, è difficile da seguire qui. È interessante che ad iniziare questo modo sia stato Ettore Majorana, ma per qualche motivo non viene mai ricordato.
- ◎ C'è un modo suggerito da Stueckelberg e da Feynman, che lo descrisse in una lezione in onore di Dirac intitolata "La ragione delle antiparticelle" (1986). Ne parlo qui <https://www.linkedin.com/pulse/da-pitagora-allantimateria-francesco-vissani-phd/>
- ◎ C'è un modo relativamente semplice, che richiede di capire bene equazione d'onda, numeri complessi, teoria di Maxwell. Lo uso molto per lavoro, ma non sono certo faccia per noi! Chi fosse interessato può vedere qui: <https://inspirehep.net/literature/1849976>

II “MARE DI DIRAC”

REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)

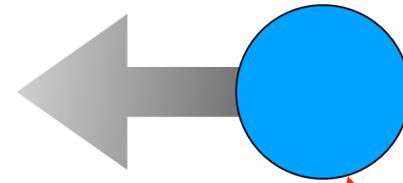
REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)



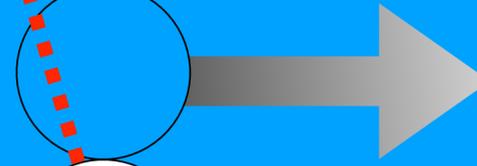
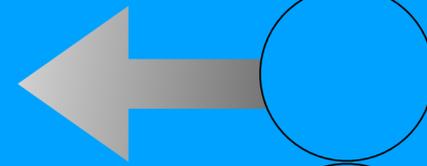
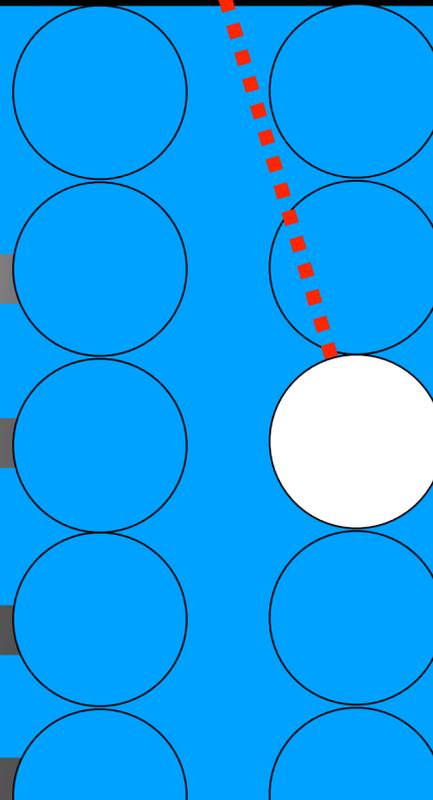
II "MARE DI DIRAC"

REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)



REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)



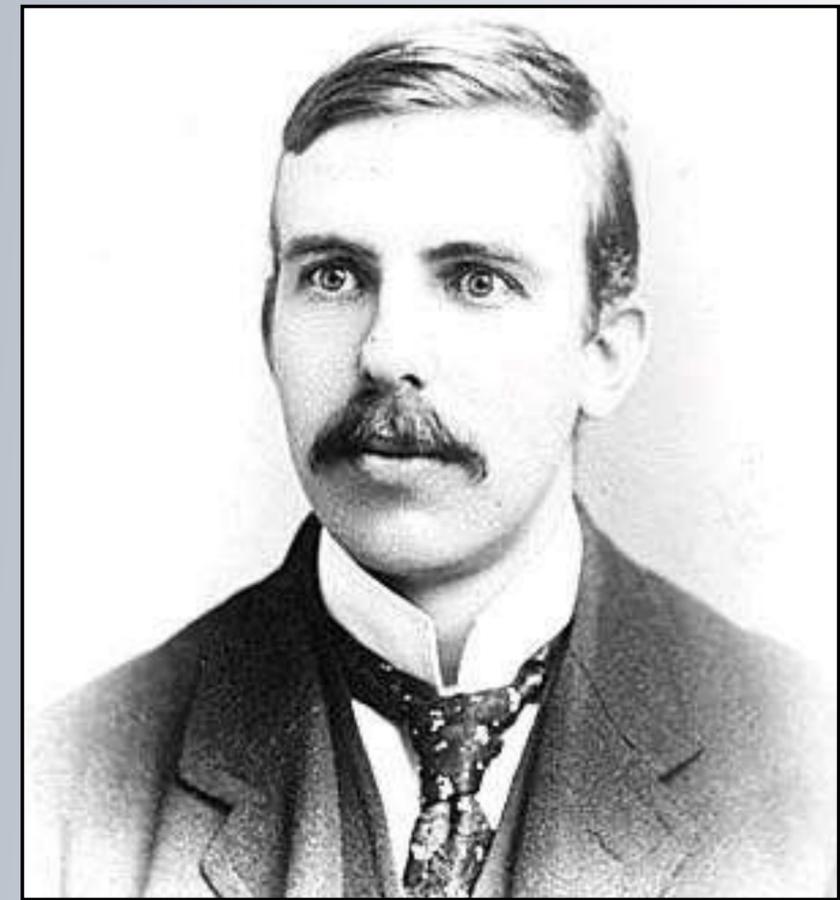
il nucleo e una particella inattesa

fenomeni radioattivi; modelli del nucleo; i neutrini di Pauli



F. Soddy

TORIO

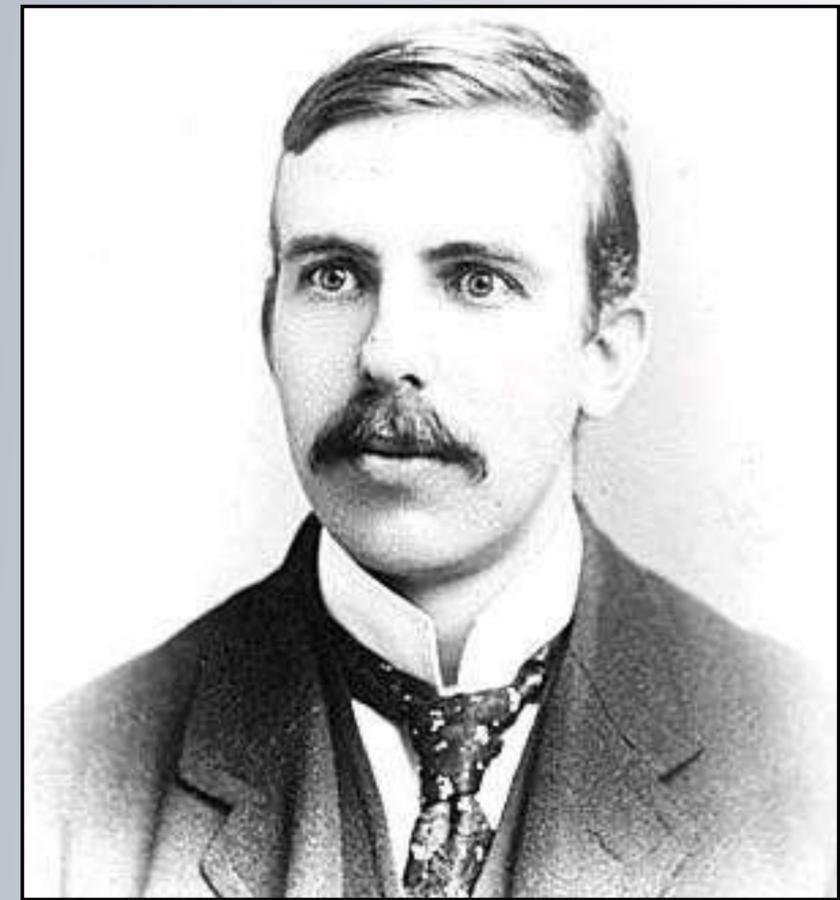


E. Rutherford



F. Soddy

**TORIO →
RADIO**

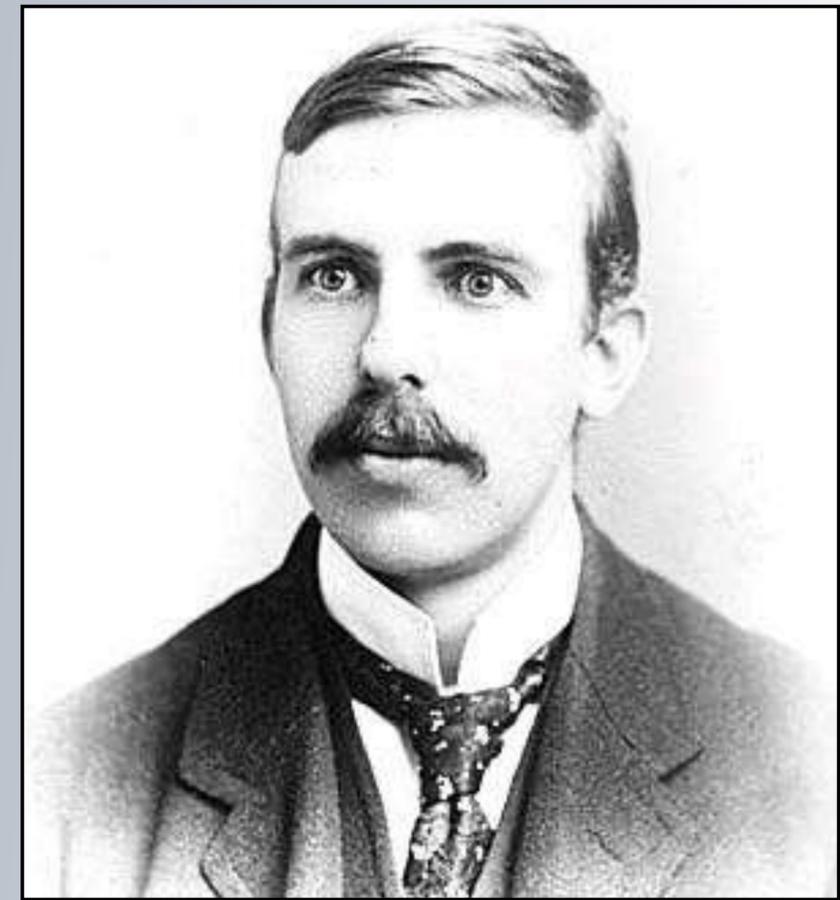


E. Rutherford



F. Soddy

TORIO →
RADIO →
...
RADON



E. Rutherford



F. Soddy

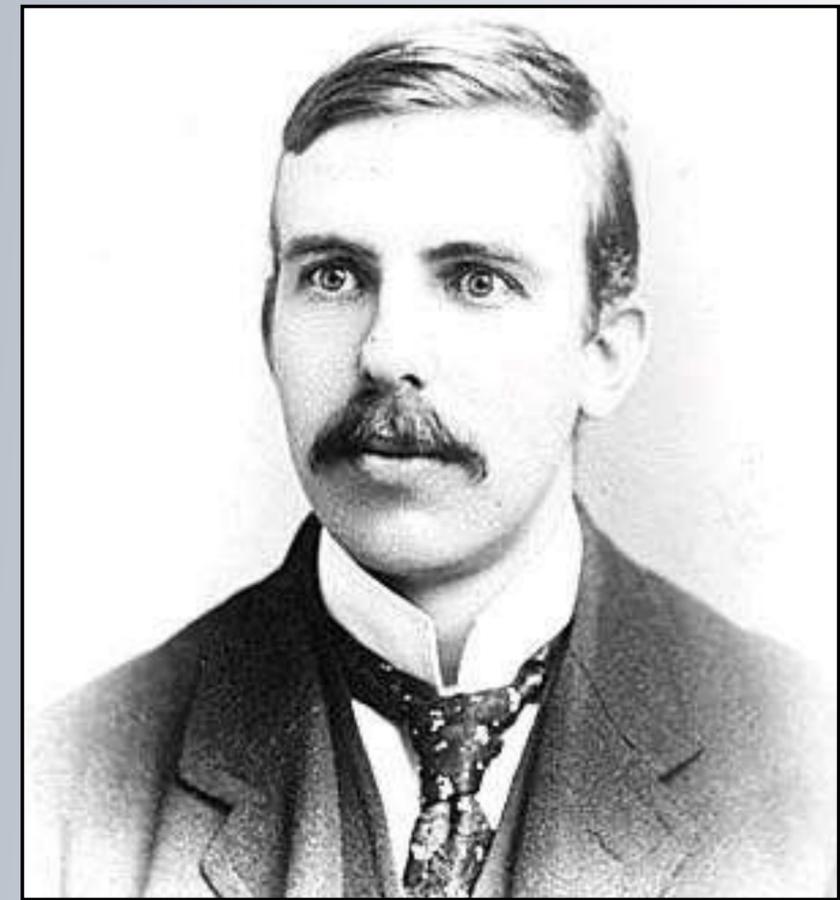
TORIO →

RADIO →

...

RADON →

...



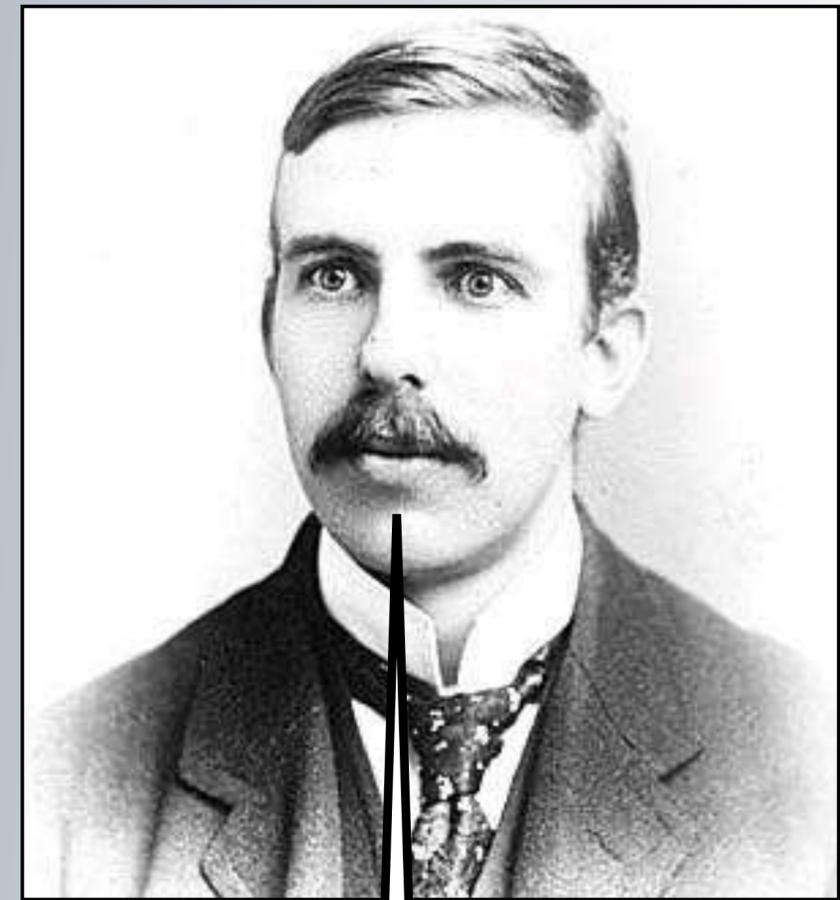
E. Rutherford

“Rutherford, ma questa è una trasmutazione!”



F. Soddy

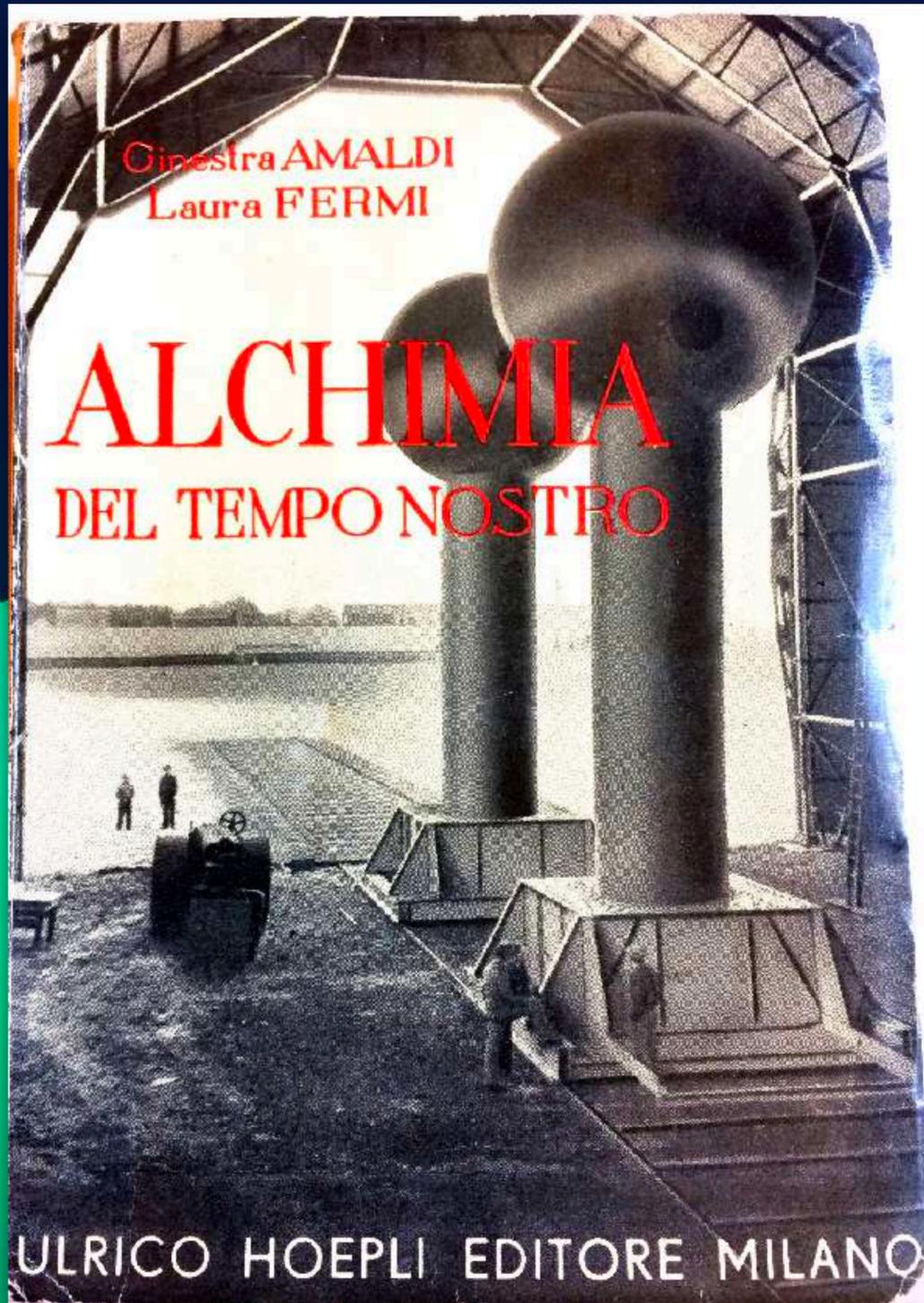
TORIO →
RADIO →
...
RADON →
...



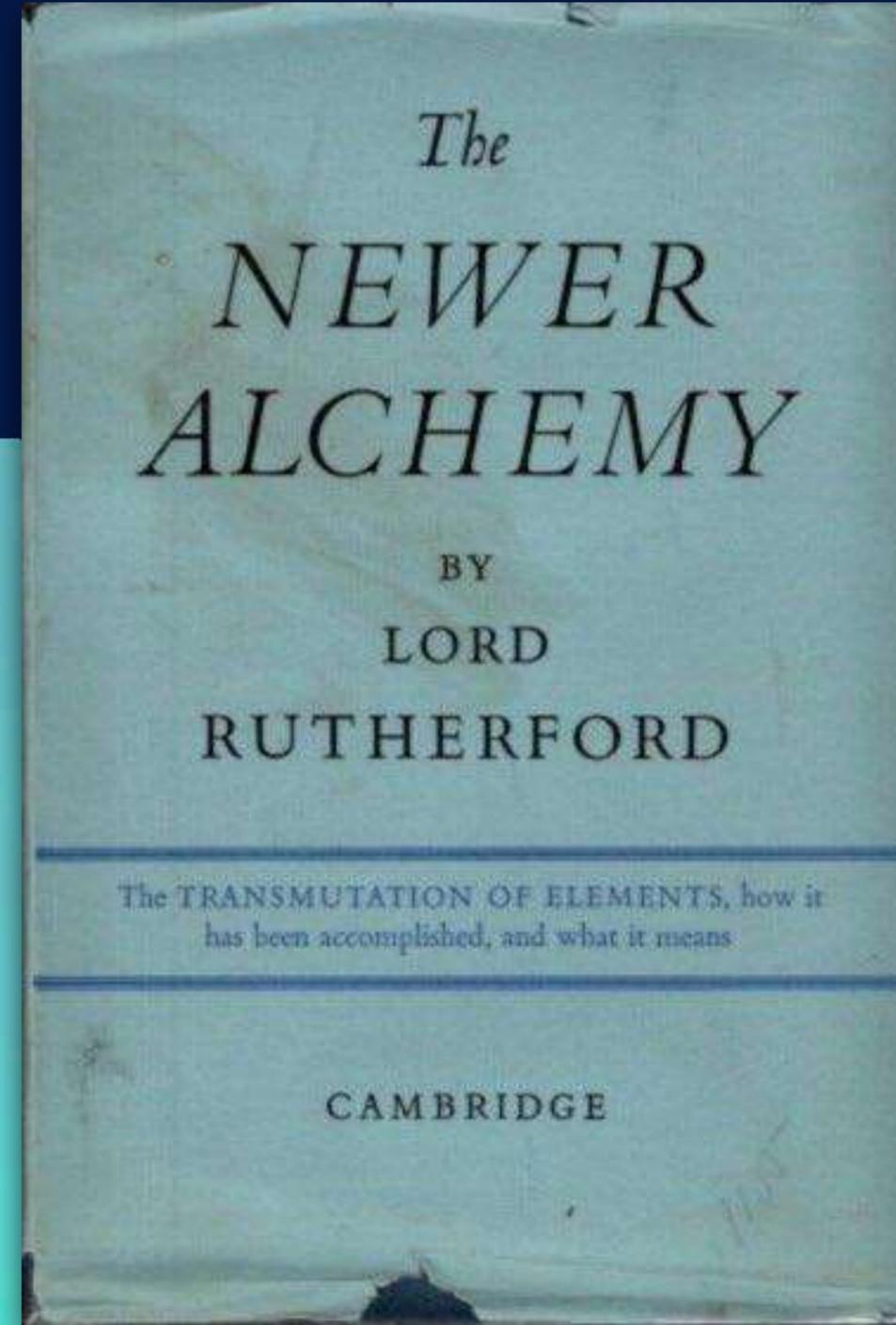
E. Rutherford

“Rutherford, ma questa è una trasmutazione!”

“Non chiamarla così, Soddy, per la miseria. Ci chiameranno *alchimisti* e ci faranno fuori!”

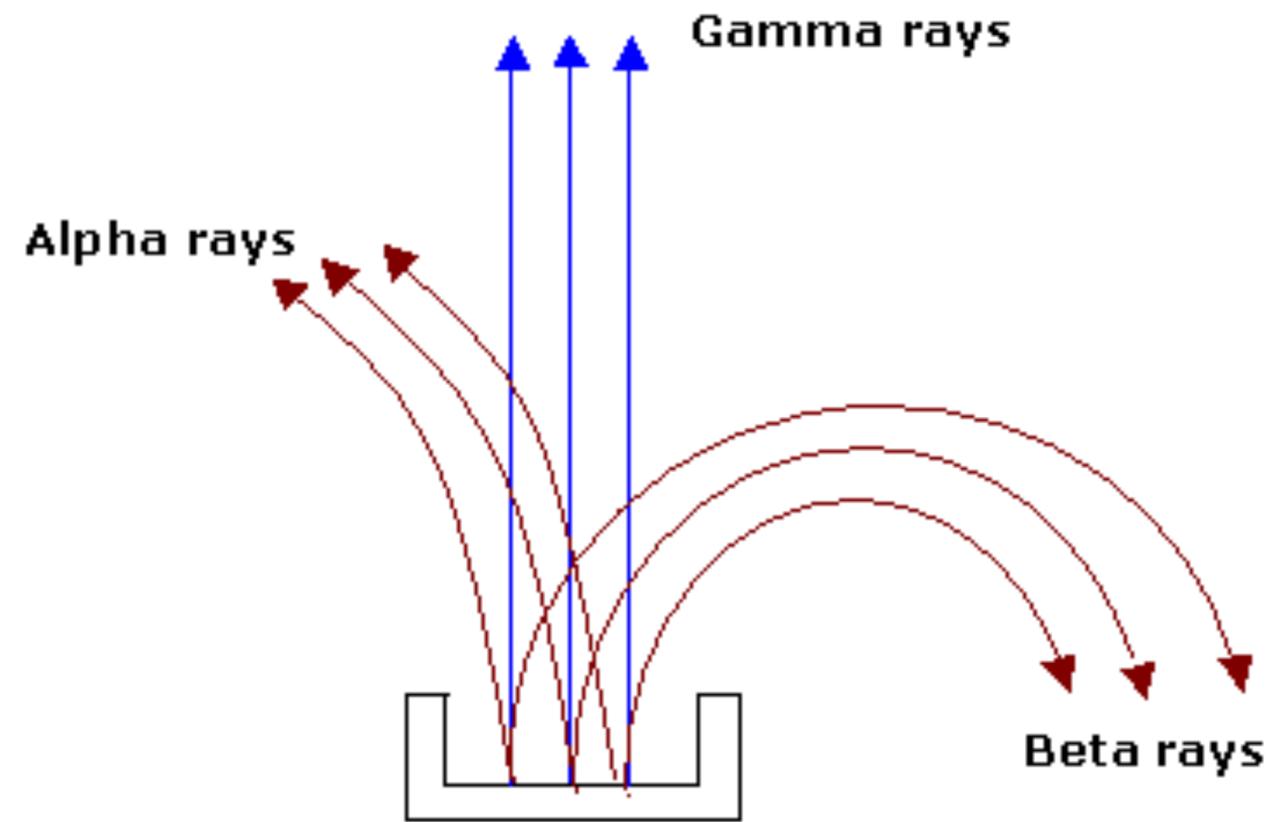
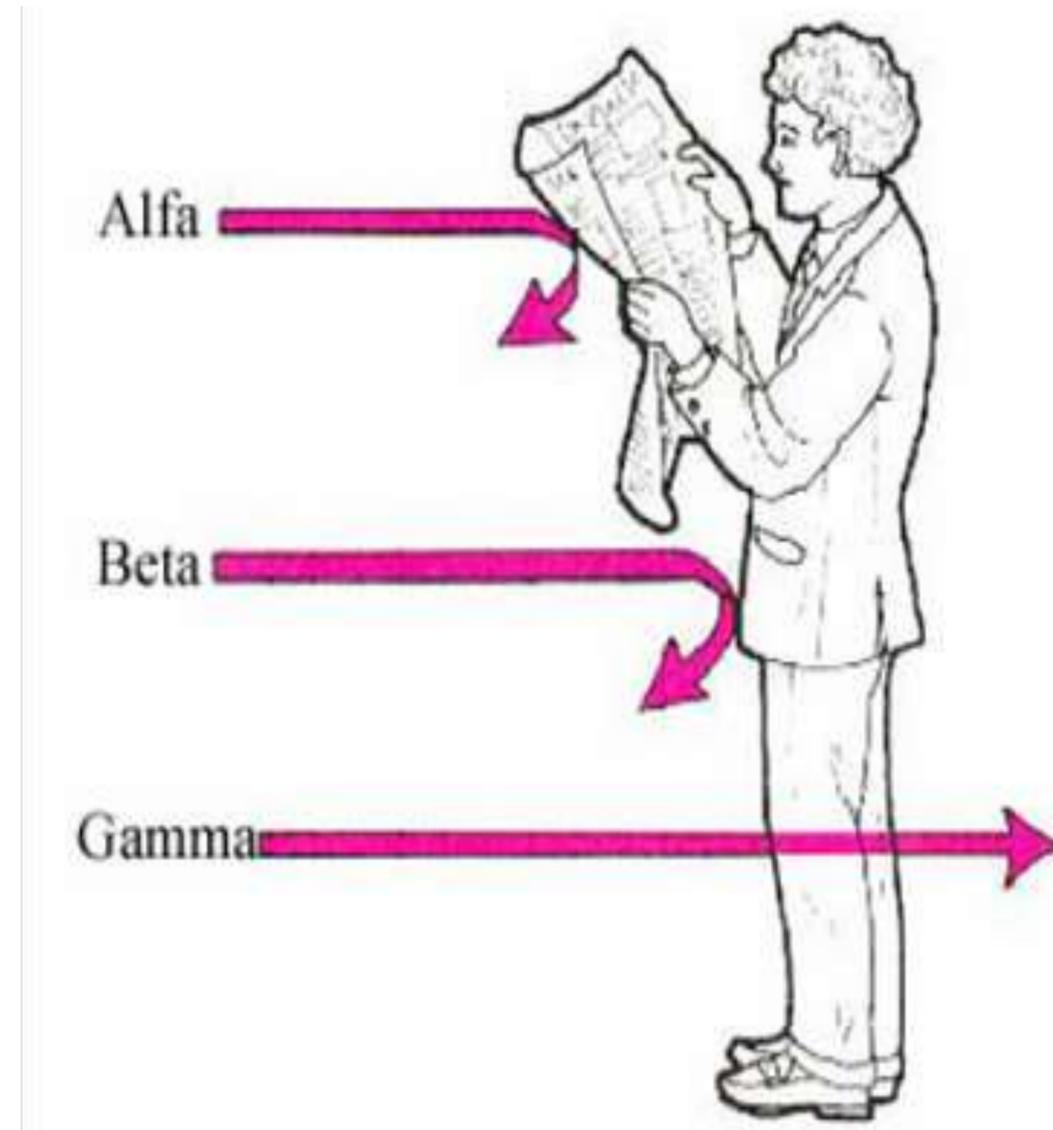


1936

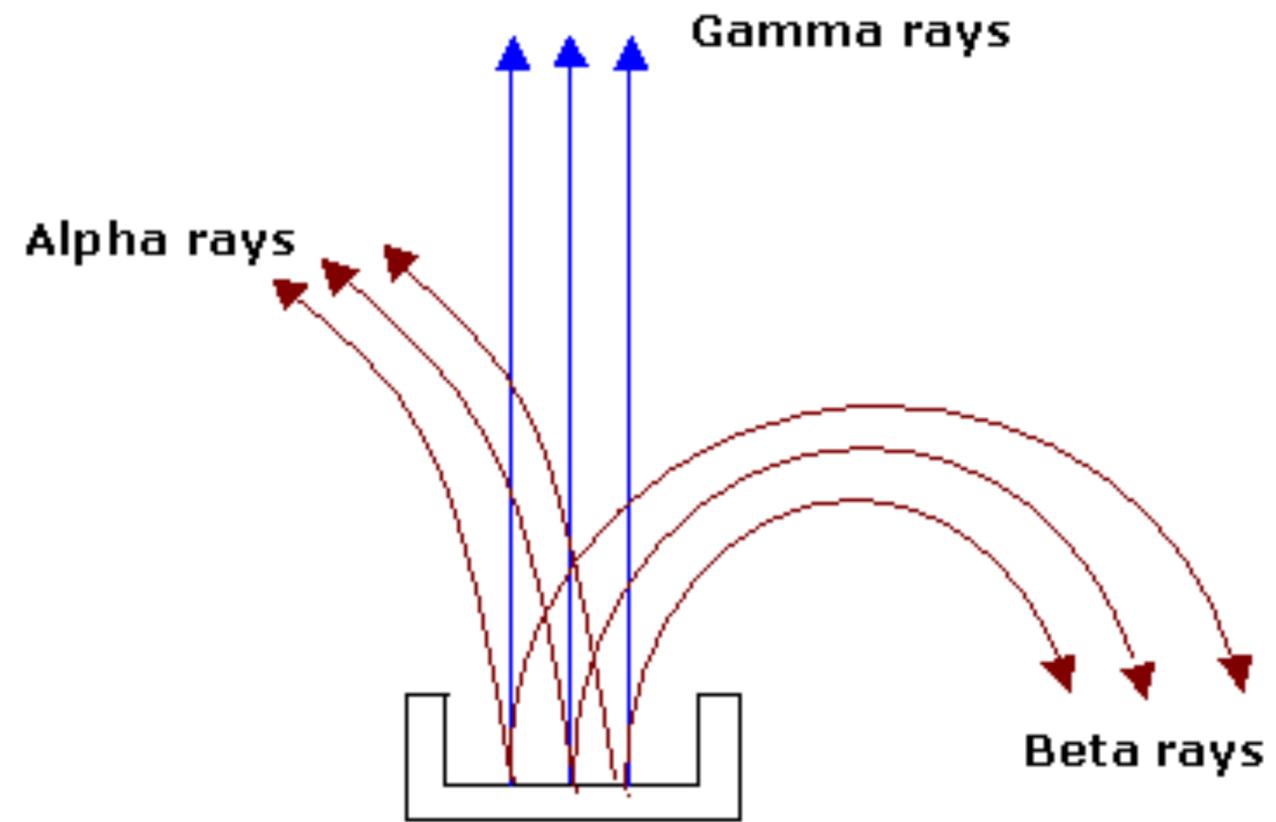
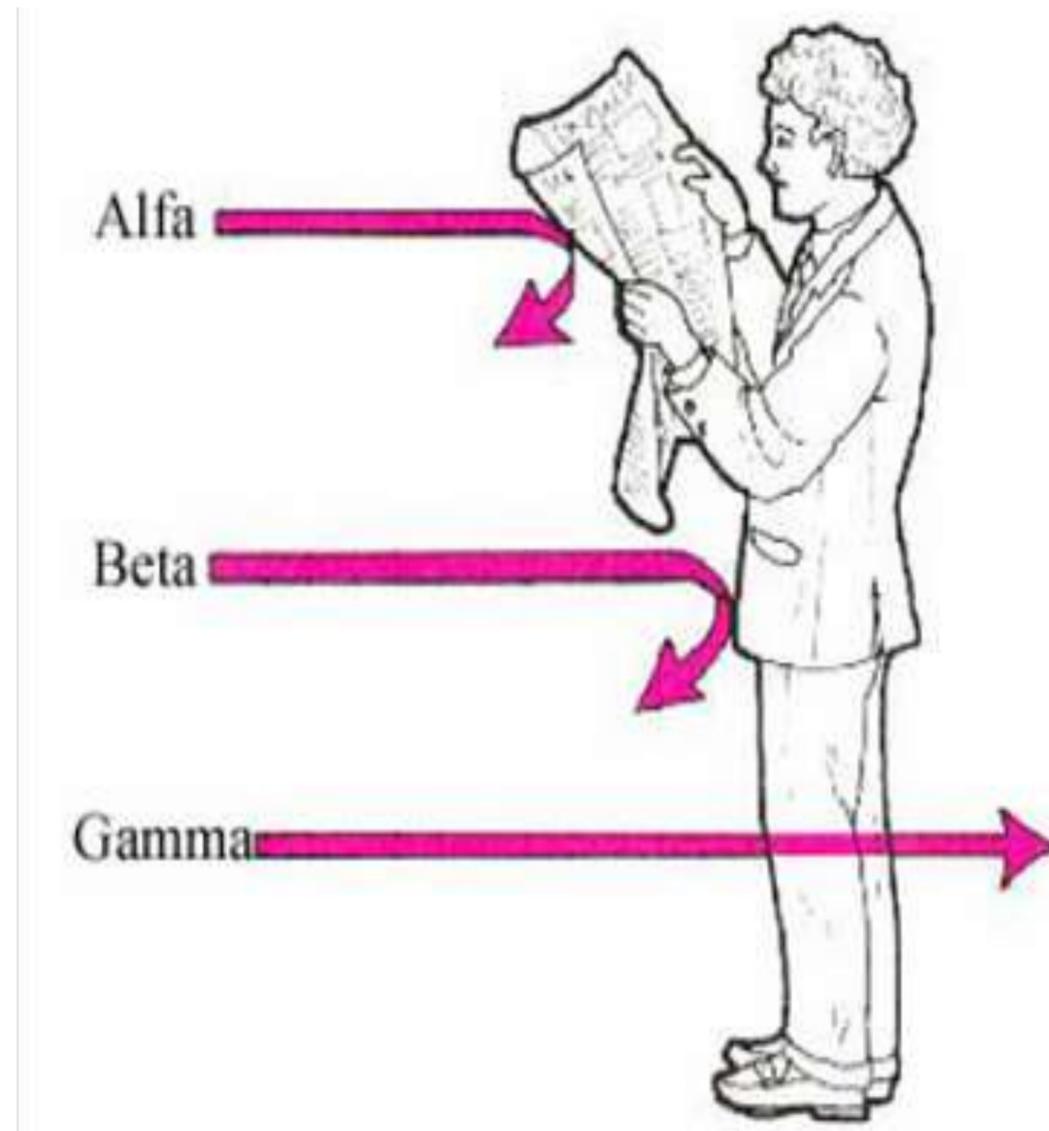


1937

certi materiali emettono raggi di energia così alta che crediamo vengano direttamente dai nuclei degli atomi



certi materiali emettono raggi di energia così alta che crediamo vengano direttamente dai nuclei degli atomi



I raggi son caratterizzati dal potere di penetrazione, dalla massa e dalla carica elettrica

natura delle emissioni di alta energia

(descrizione dello stato dell'arte nel primo decennio del 900)

- I raggi α sono **nuclei di elio**: carica=+2, numero di massa=4
- I raggi β son **elettroni** di altissima energia: carica=-1, massa circa 1/2000 un protone
- I raggi γ sono fotoni di altissima energia: carica=0, massa a riposo=0

natura delle emissioni di alta energia

(descrizione dello stato dell'arte nel primo decennio del 900)

- I raggi α sono **nuclei di elio**: carica=+2, numero di massa=4
- I raggi β son **elettroni** di altissima energia: carica=-1, massa circa 1/2000 un protone
- I raggi γ sono fotoni di altissima energia: carica=0, massa a riposo=0

Dunque, i primi due sono frammenti di materia, il terzo invece no

primi modelli del nucleo



dopo la scoperta della radioattività, dopo le evidenze sopra richiamate che il nucleo sia piccolissimo,

van den Broek (1911) suggerisce che il nucleo sia fatto di particelle α e β

Harkins (1915) lo migliora e ipotizza che i componenti fondamentali siano protoni (=nuclei di H) e particelle β



primi modelli del nucleo



dopo la scoperta della radioattività, dopo le evidenze sopra richiamate che il nucleo sia piccolissimo,

van den Broek (1911) suggerisce che il nucleo sia fatto di particelle α e β

Harkins (1915) lo migliora e ipotizza che i componenti fondamentali siano protoni (=nuclei di H) e particelle β



il modello con 2 componenti durerà 20 anni



F. Soddy



222 p + 136 e

Radon

A=222, Q=+86



218 p + 134 e

Polonio

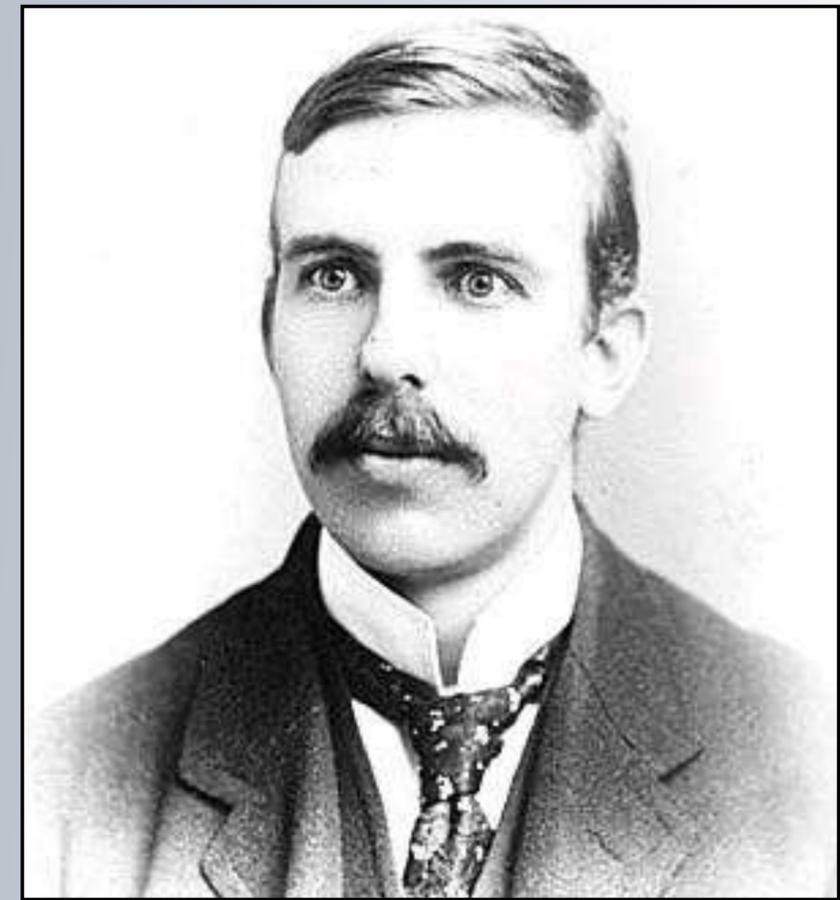
A=218, Q=+84



4 p + 2 e

Elio

A=4, Q=+2



E. Rutherford



F. Soddy



222 p + 136 e

Radon

A=222, Q=+86



218 p + 134 e

Polonio

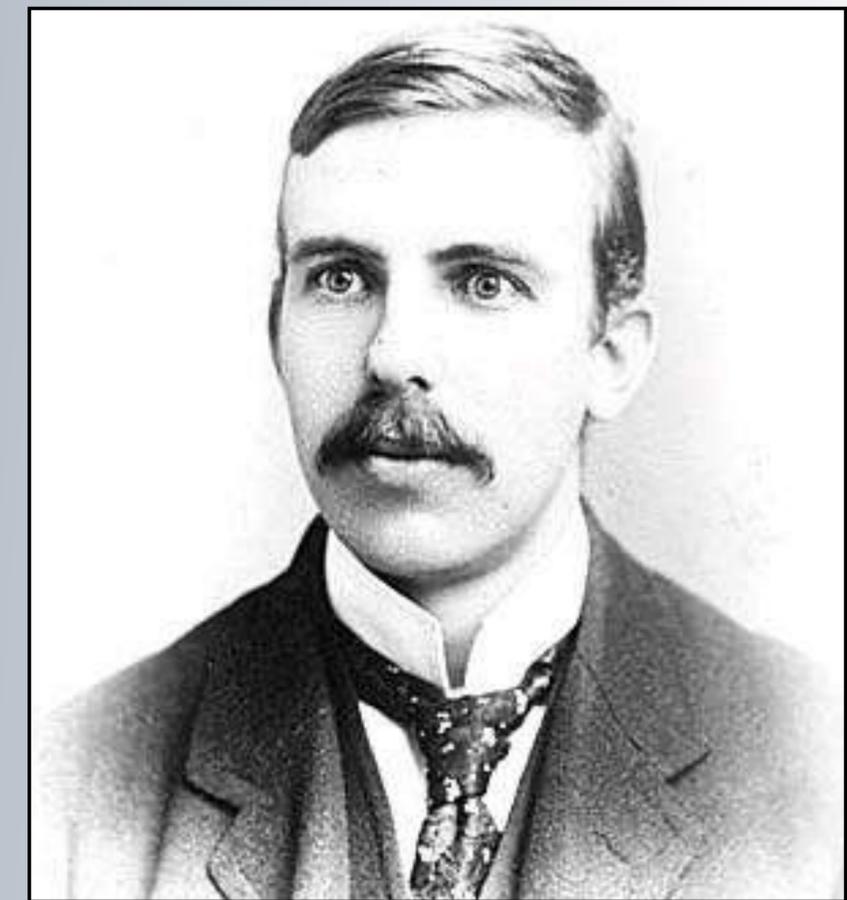
A=218, Q=+84



4 p + 2 e

Elio

A=4, Q=+2



E. Rutherford

con questo modello si può dire che la disintegrazione α
non è una **trasmutazione**, ma una semplice **frammentazione**

predizioni del modello per il decadimento beta



trizio

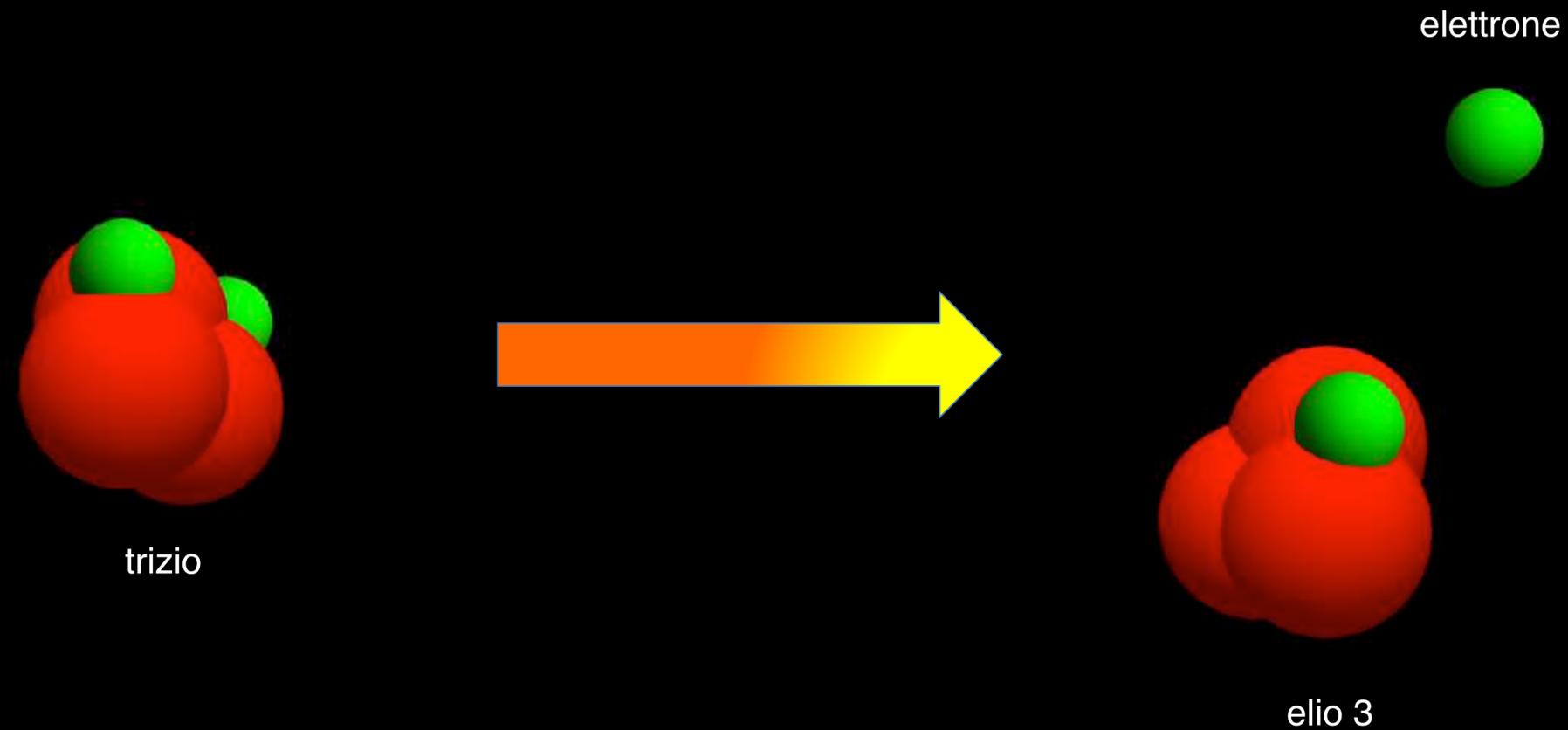


elio 3

elettrone

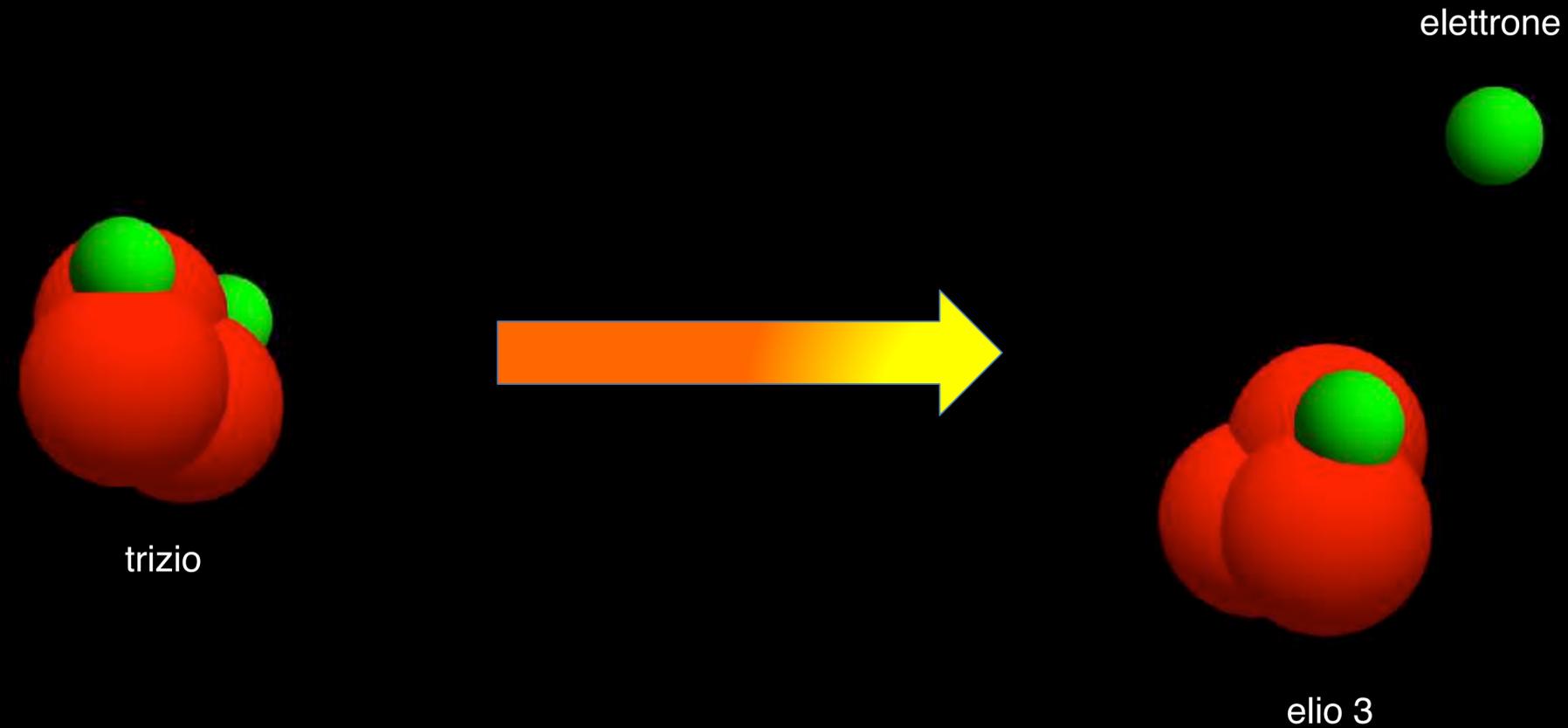


predizioni del modello per il decadimento beta



**il trizio dovrebbe emettere un elettrone di energia fissa:
ma le misure mostrano che questo è falso!!!**

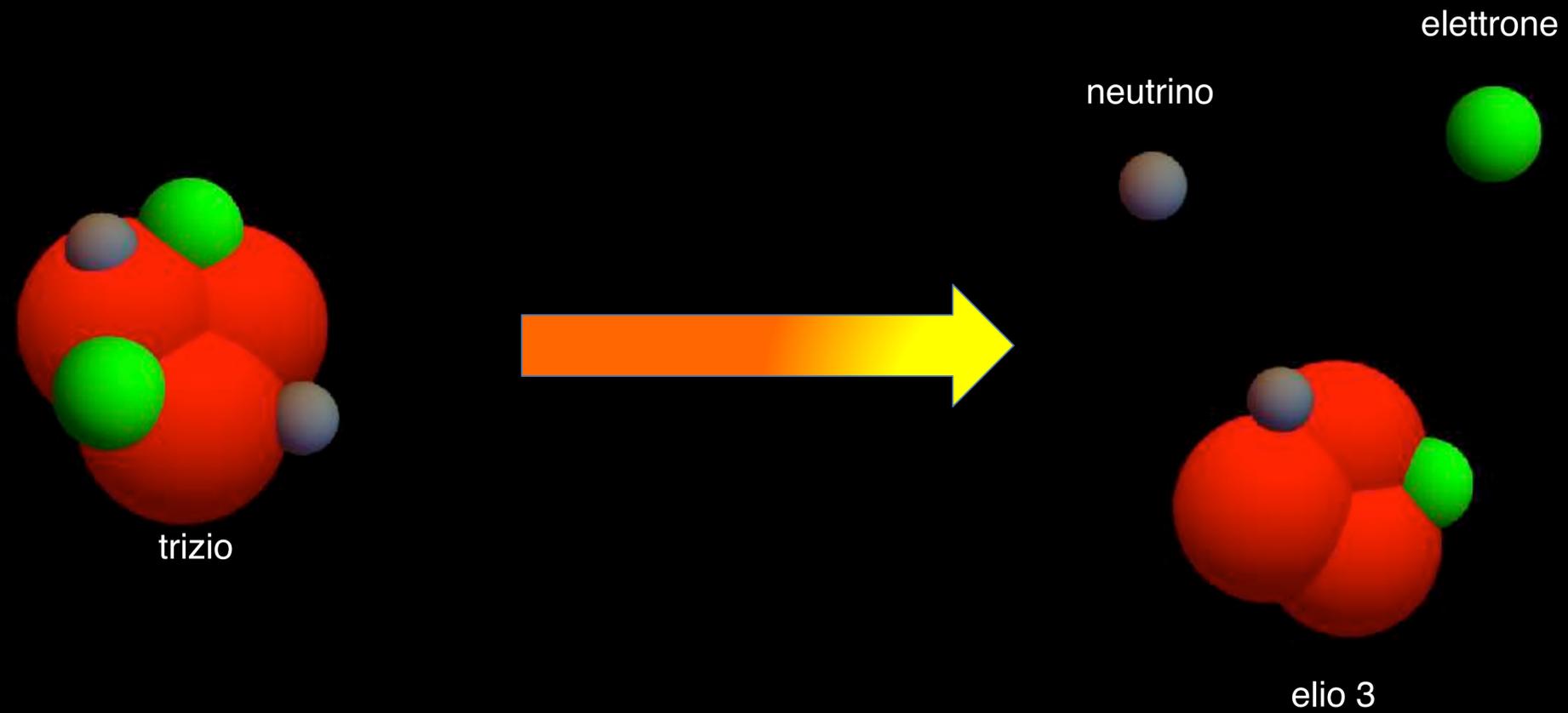
predizioni del modello per il decadimento beta



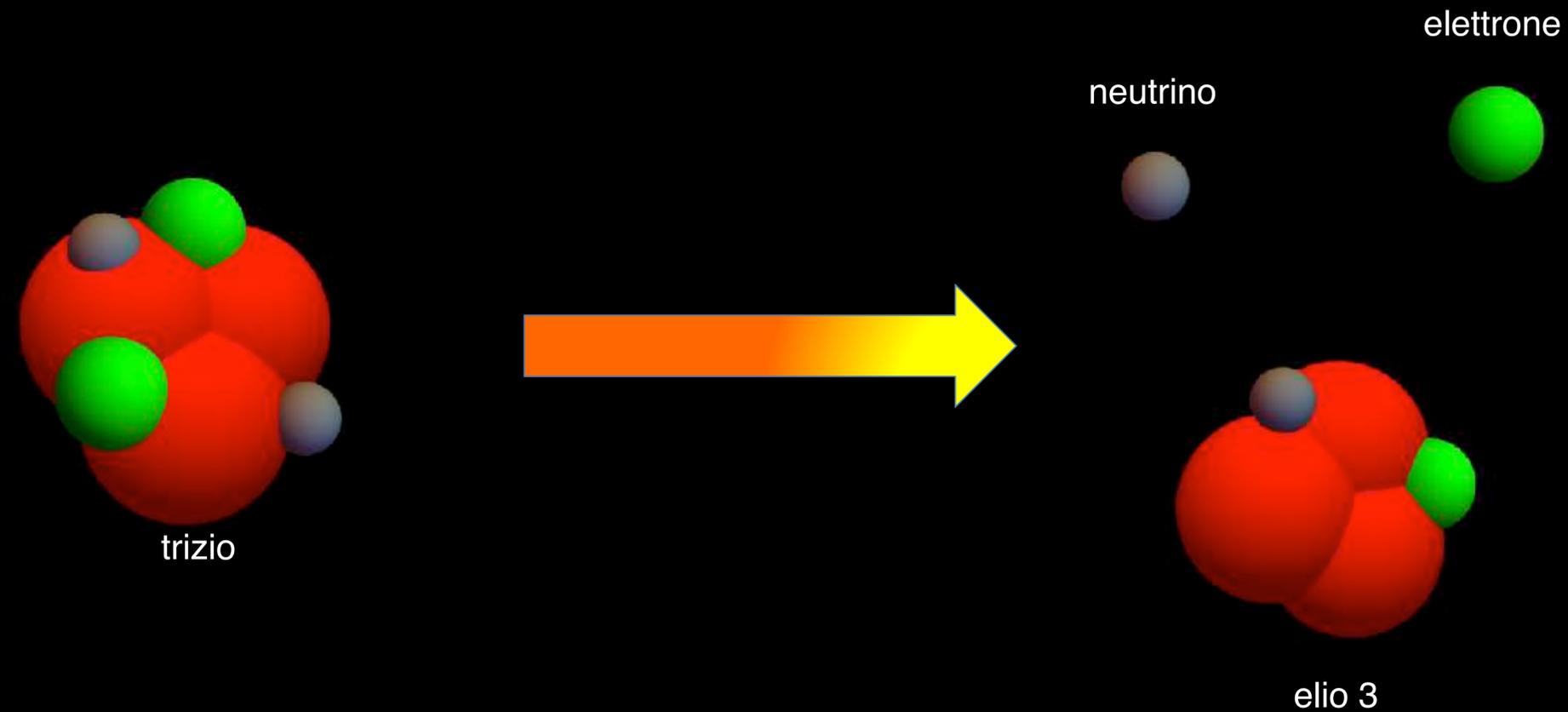
il trizio dovrebbe emettere un elettrone di energia fissa:
ma le misure mostrano che questo è falso!!!

~~2013-09-09~~

la teoria di Pauli (1930)



la teoria di Pauli (1930)



il nucleo contiene elettroni, protoni & neutrini;
il neutrino porta via (ruba) un pò di energia

la scoperta del neutrone

**interludio, prima di esporre le idee moderne: la scoperta dei
“protoni neutri”; il modello corrente del nucleo dell’atomo**

- Bothe (1930) bombarda con raggi α certe sostanze e osserva una *radiazione penetrante e neutra*.

- Bothe (1930) bombarda con raggi α certe sostanze e osserva una *radiazione penetrante e neutra*.
- Curie e Joliot (1932) notano che questa nuova radiazione estrae protoni di alta energia. Loro ipotesi: sono raggi γ

- Bothe (1930) bombarda con raggi α certe sostanze e osserva una *radiazione penetrante e neutra*.
- Curie e Joliot (1932) notano che questa nuova radiazione estrae protoni di alta energia. Loro ipotesi: sono raggi γ
- Majorana *capisce* che sono “protoni neutri” ma non pubblica le sue idee.

- Bothe (1930) bombarda con raggi α certe sostanze e osserva una *radiazione penetrante e neutra*.
- Curie e Joliot (1932) notano che questa nuova radiazione estrae protoni di alta energia. Loro ipotesi: sono raggi γ
- Majorana *capisce* che sono “protoni neutri” ma non pubblica le sue idee.
- Chadwick (1932) mostra che devono essere particelle pesanti, di massa simile ai protoni. Ipotizza che siano i *neutroni*

- Bothe (1930) bombarda con raggi α certe sostanze e osserva una *radiazione penetrante e neutra*.
- Curie e Joliot (1932) notano che questa nuova radiazione estrae protoni di alta energia. Loro ipotesi: sono raggi γ
- Majorana *capisce* che sono “protoni neutri” ma non pubblica le sue idee.
- Chadwick (1932) mostra che devono essere particelle pesanti, di massa simile ai protoni. Ipotizza che siano i *neutroni*

PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A

MATHEMATICAL, PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES

692

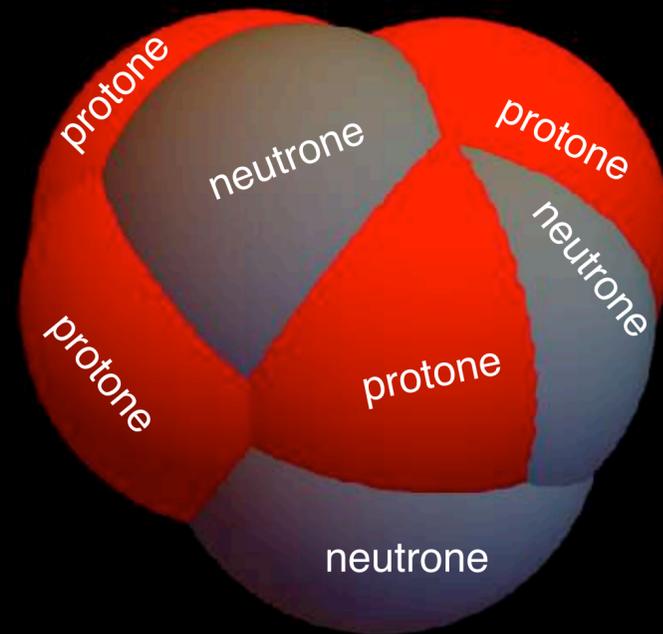
The Existence of a Neutron.

By J. CHADWICK, F.R.S.

(Received May 10, 1932.)

§ 1. It was shown by Bothe and Becker* that some light elements when bombarded by α -particles of polonium emit radiations which appear to be of the γ -ray type. The element beryllium gave a particularly marked effect of this kind, and later observations by Bothe, by Mme. Curie-Joliot† and by Webster‡ showed that the radiation excited in beryllium possessed a penetrating power distinctly greater than that of any γ -radiation yet found from the radioactive elements. In Webster's experiments the intensity of the radiation was measured both by means of the Geiger-Müller tube counter and in a high pressure ionisation chamber. He found that the beryllium radiation had an absorption coefficient in lead of about 0.22 cm.^{-1} as measured under his experimental conditions. Making the necessary corrections for these conditions, and using the results of Gray and Tarrant to estimate the relative

così si perviene al modello corrente del nucleo atomico, che contiene solo particelle “pesanti”

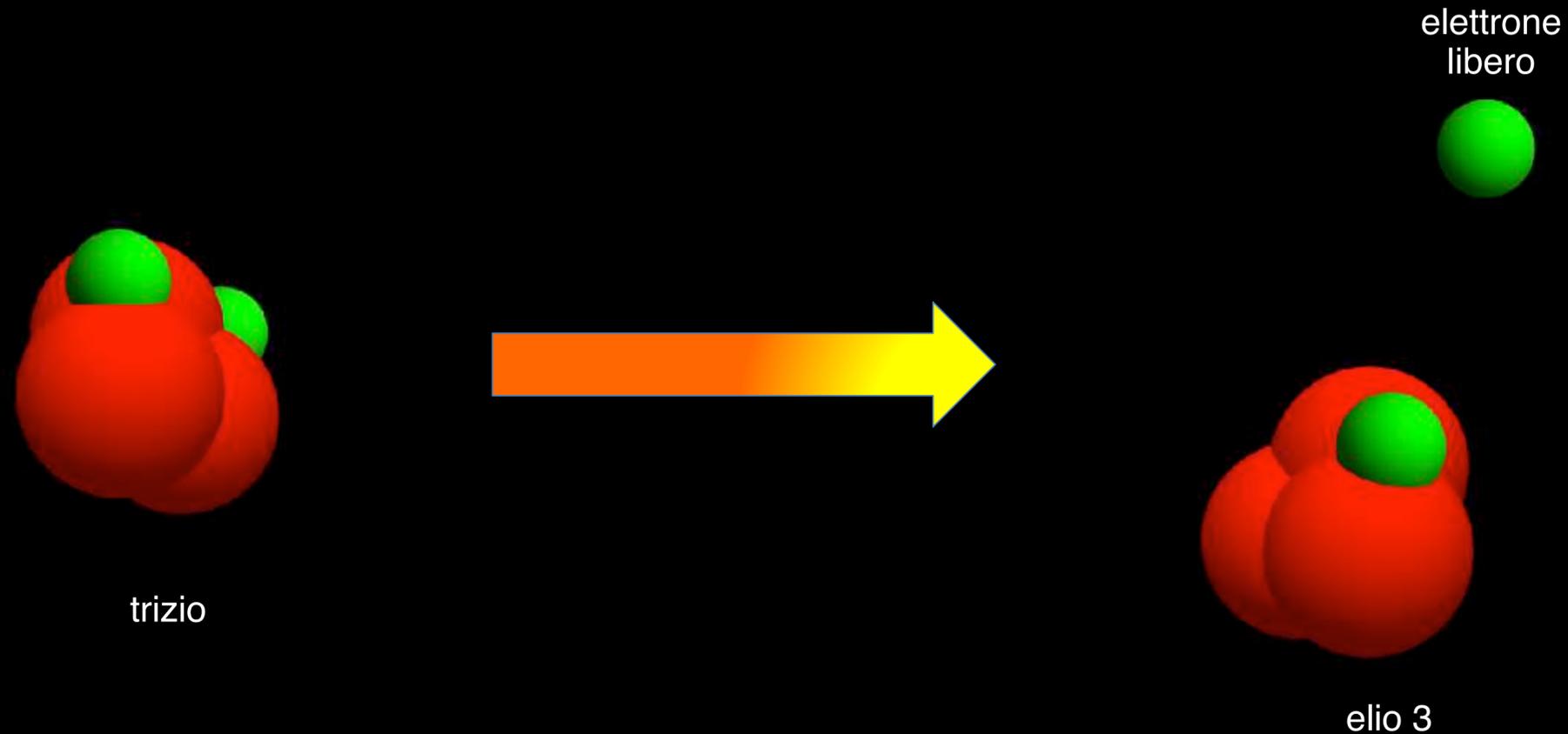


(Iwanenko, Heisenberg, Majorana 1932-1933)

cosa si pensa oggi del neutrino

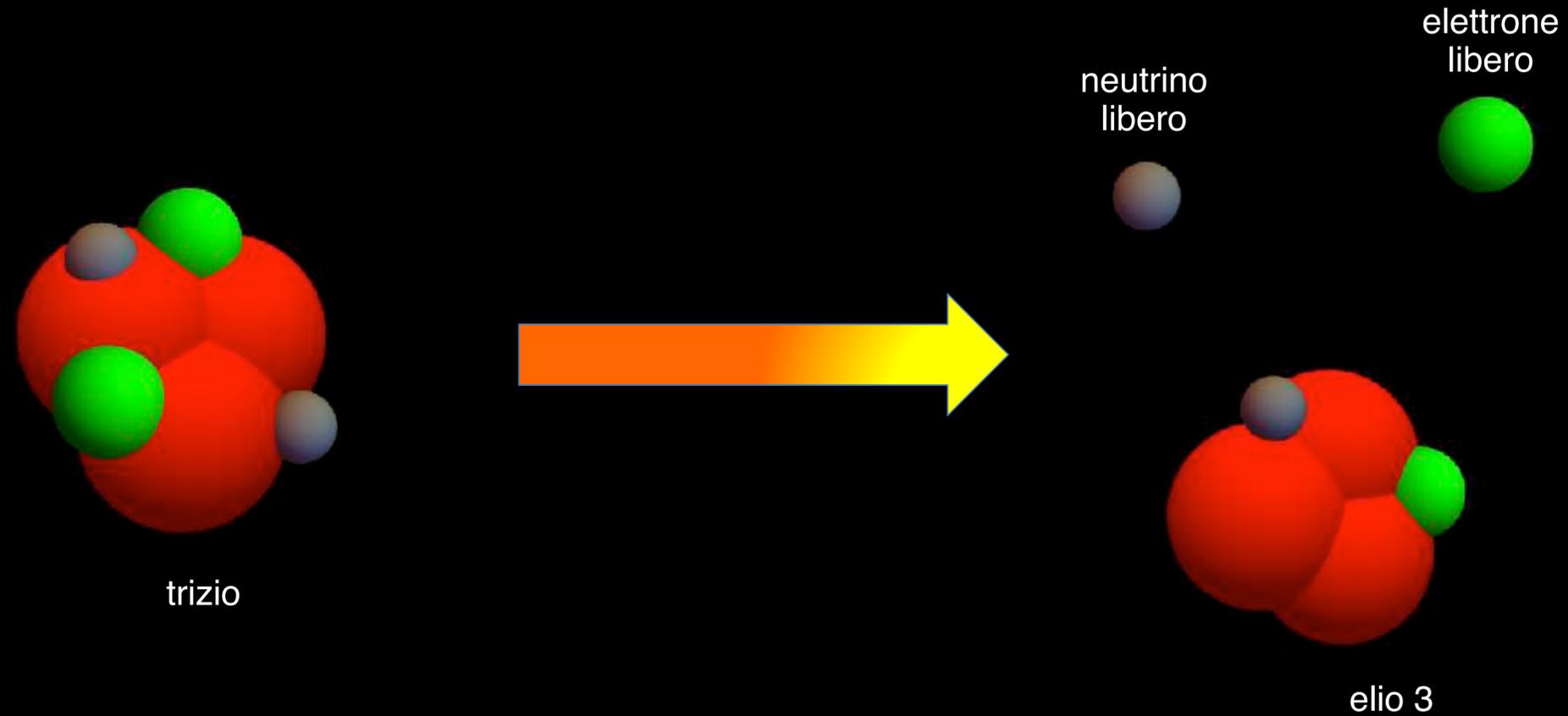
prima un **riassunto** poi: teoria di Fermi disintegrazione del neutrone;
predizione delle reazioni dei neutrini con le particelle ordinarie

si pensava che i nuclei fossero fatti di **protoni** ed **elettroni**
ma all'elettrone emesso mancava dell'energia!

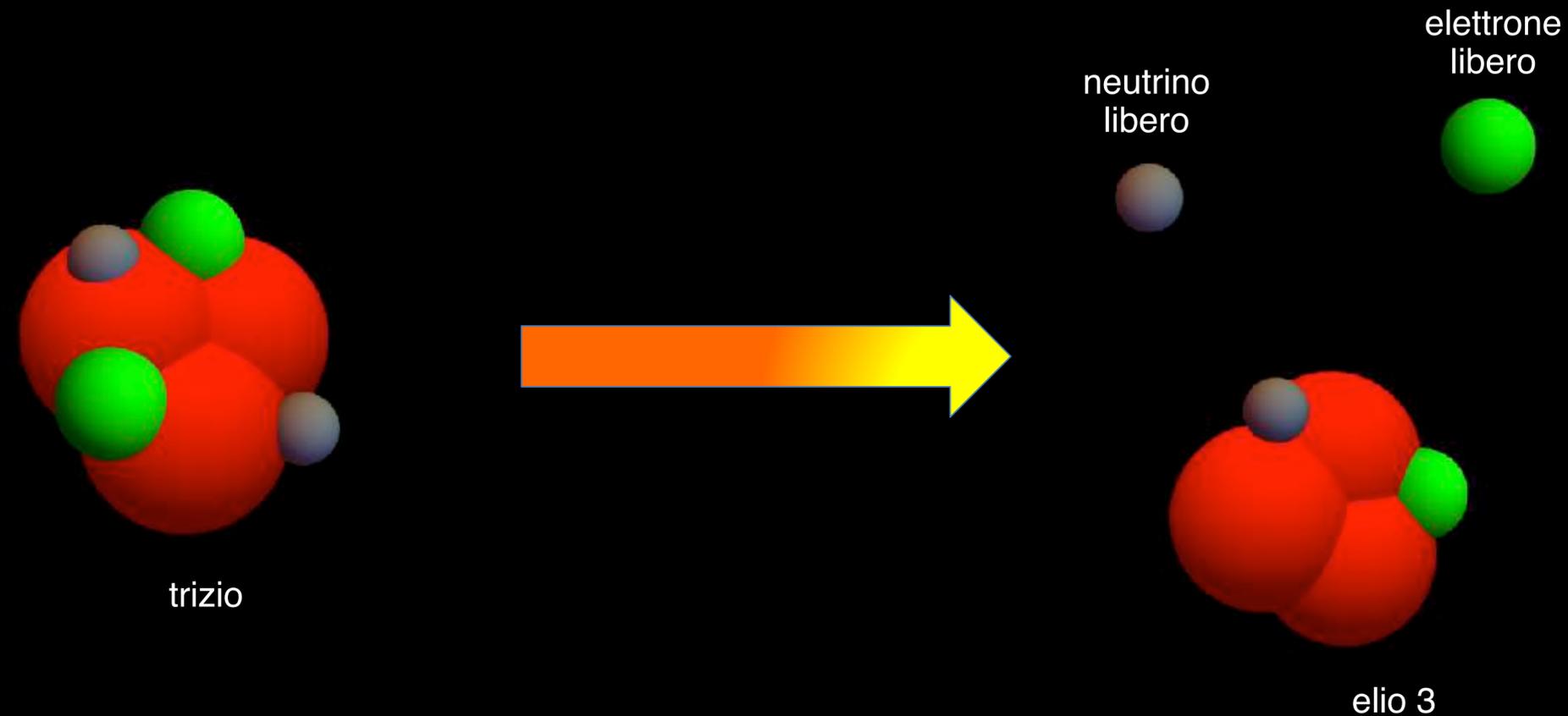


il vecchio modello dei processi di emissione di elettroni
(radioattività di tipo β)

Pauli si chiede se l'energia mancante sia rubata da una particella quasi invisibile (1930)

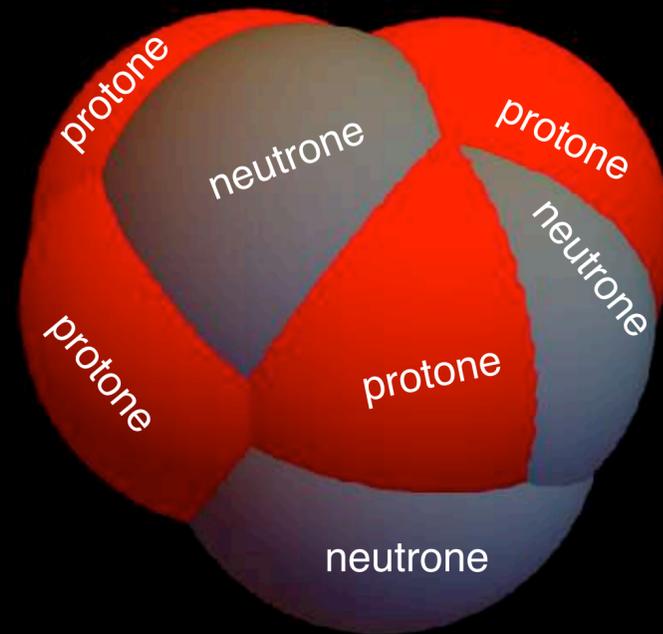


Pauli si chiede se l'energia mancante sia rubata da una particella quasi invisibile (1930)

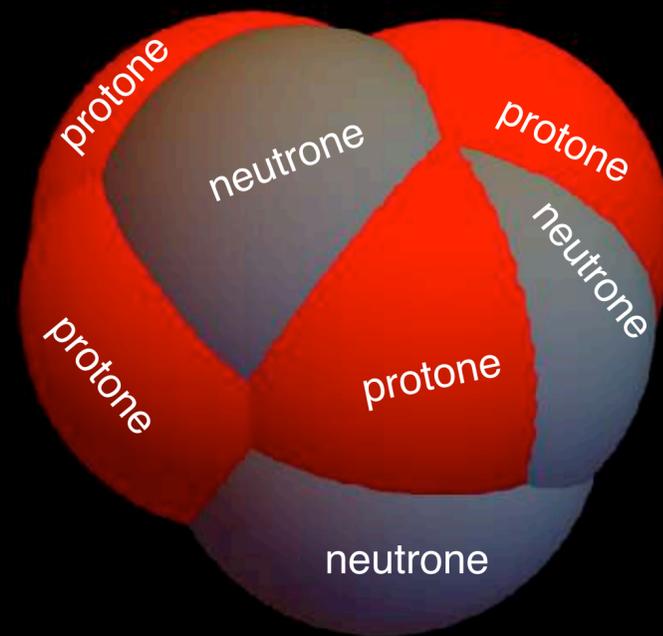


in questo modo si iniziò a parlare di neutrini
(pur nel contesto di un modello del nucleo, oggi superato)

oggi sappiamo che i nuclei sono fatti
di **protoni** & neutroni

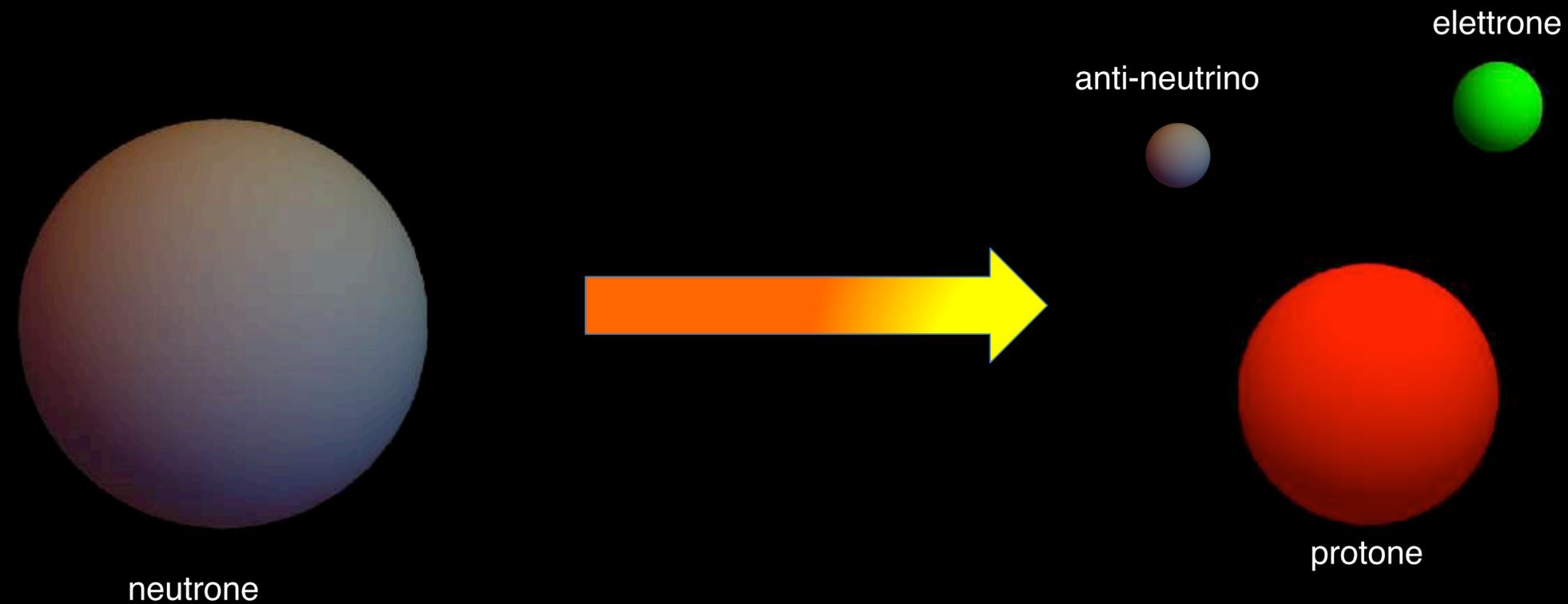


oggi sappiamo che i nuclei sono fatti
di **protoni** & neutroni



(ma solo perché nel 1932 si scopre il neutrone :)

Enrico Fermi mette insieme i pezzi del puzzle (1933)



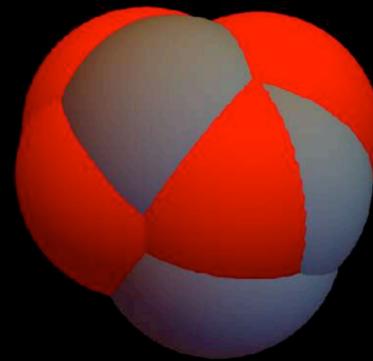
il neutrone scompare, e compaiono
un protone, un elettrone ed un (anti)neutrino

il neutrino esiste davvero

(Wick '34 & Allen '42, ... Bethe Peierls '34 & Reines & Cowan '55)



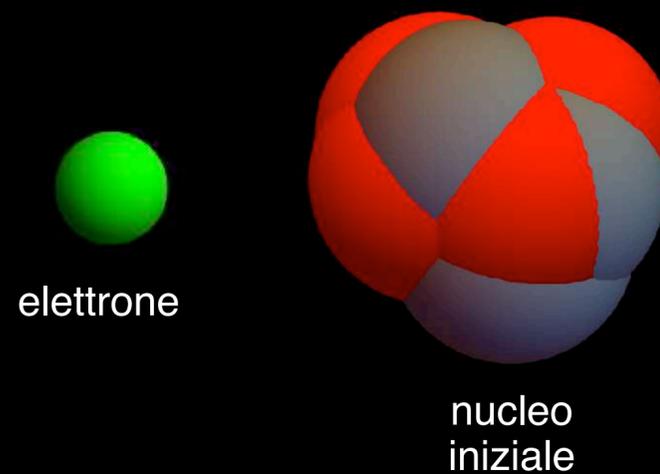
elettrone



nucleo
iniziale

il neutrino esiste davvero

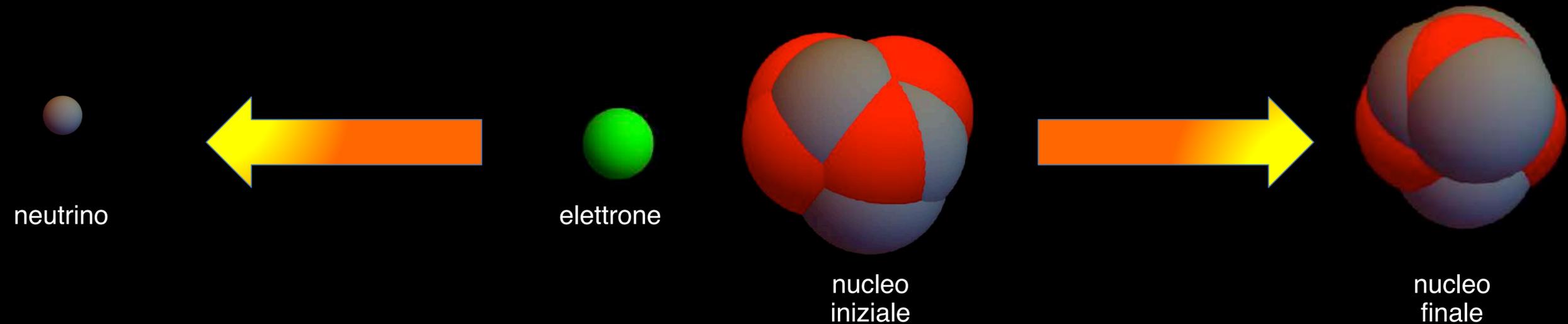
(Wick '34 & Allen '42, ... Bethe Peierls '34 & Reines & Cowan '55)



un nucleo e un elettrone si possono combinare...

il neutrino esiste davvero

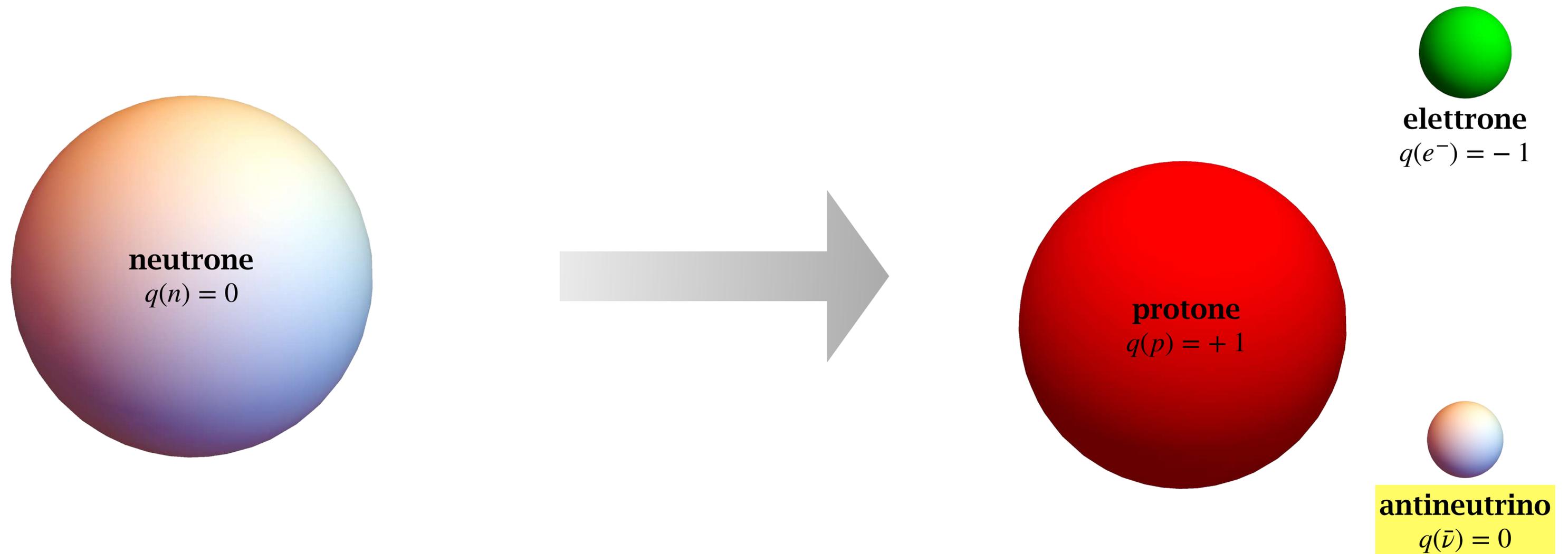
(Wick '34 & Allen '42, ... Bethe Peierls '34 & Reines & Cowan '55)



un nucleo e un elettrone si possono combinare...
e si trasformano in un neutrino (invisibile) ed un nucleo (visibile)

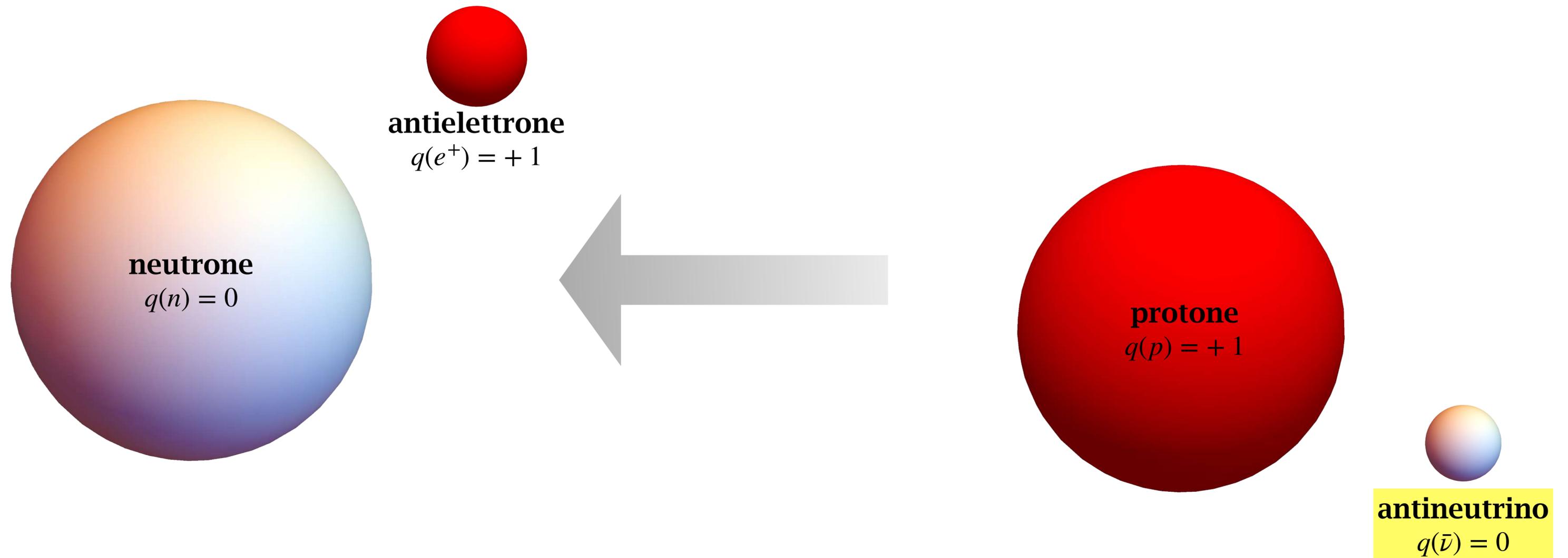
decadimento β

(processo cruciale della teoria di Fermi)



decadimento β inverso

(usato ancora oggi - Bethe & Peierls 1934)



Dalle forze nucleari a un nuovo neutrino

Le forze del nucleo e la particella di Yukawa. L'elettrone pesante (=il muone) e il neutrino associato. La verifica osservativa.

La proliferazione delle particelle

scoperte ed idee sul mondo microscopico a cavallo della guerra

Proprio come fu difficile accettare in chimica la moltiplicazione degli elementi chimici, fu difficile passare dall'idea greca degli atomi a quella di un mondo di particelle distinte.

La proliferazione delle particelle

scoperte ed idee sul mondo microscopico a cavallo della guerra

Proprio come fu difficile accettare in chimica la moltiplicazione degli elementi chimici, fu difficile passare dall'idea greca degli atomi a quella di un mondo di particelle distinte.

- Come abbiamo visto, si iniziò pensando ad atomi fatti di elettroni (Thomson), di elettroni e di nuclei (Perrin, Rutherford), fino a concepire nuclei composti da protoni e neutroni.

La proliferazione delle particelle

scoperte ed idee sul mondo microscopico a cavallo della guerra

Proprio come fu difficile accettare in chimica la moltiplicazione degli elementi chimici, fu difficile passare dall'idea greca degli atomi a quella di un mondo di particelle distinte.

- Come abbiamo visto, si iniziò pensando ad atomi fatti di elettroni (Thomson), di elettroni e di nuclei (Perrin, Rutherford), fino a concepire nuclei composti da protoni e neutroni.
- Nel frattempo, si aggiunsero alla lista delle particelle anche gli antielettroni ed il neutrino.

La proliferazione delle particelle

scoperte ed idee sul mondo microscopico a cavallo della guerra

Proprio come fu difficile accettare in chimica la moltiplicazione degli elementi chimici, fu difficile passare dall'idea greca degli atomi a quella di un mondo di particelle distinte.

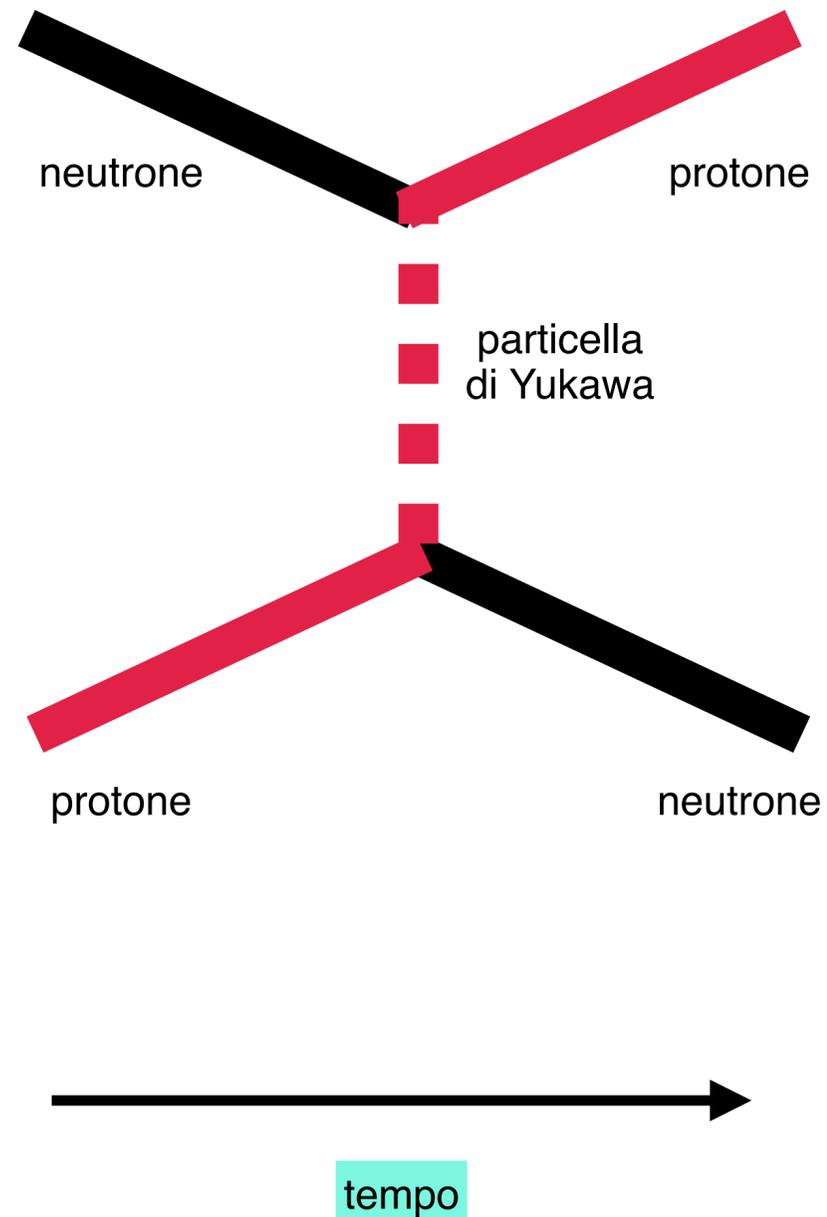
- Come abbiamo visto, si iniziò pensando ad atomi fatti di elettroni (Thomson), di elettroni e di nuclei (Perrin, Rutherford), fino a concepire nuclei composti da protoni e neutroni.
- Nel frattempo, si aggiunsero alla lista delle particelle anche gli antielettroni ed il neutrino.

In questa parte della storia incontreremo tre nuove particelle, incluso un nuovo neutrino.

Le forze nucleari

la teoria di Yukawa (1935)

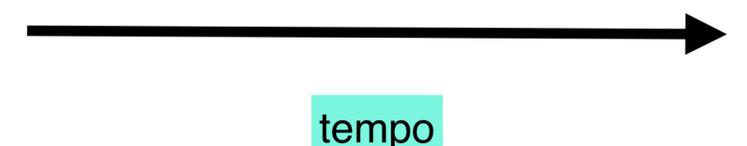
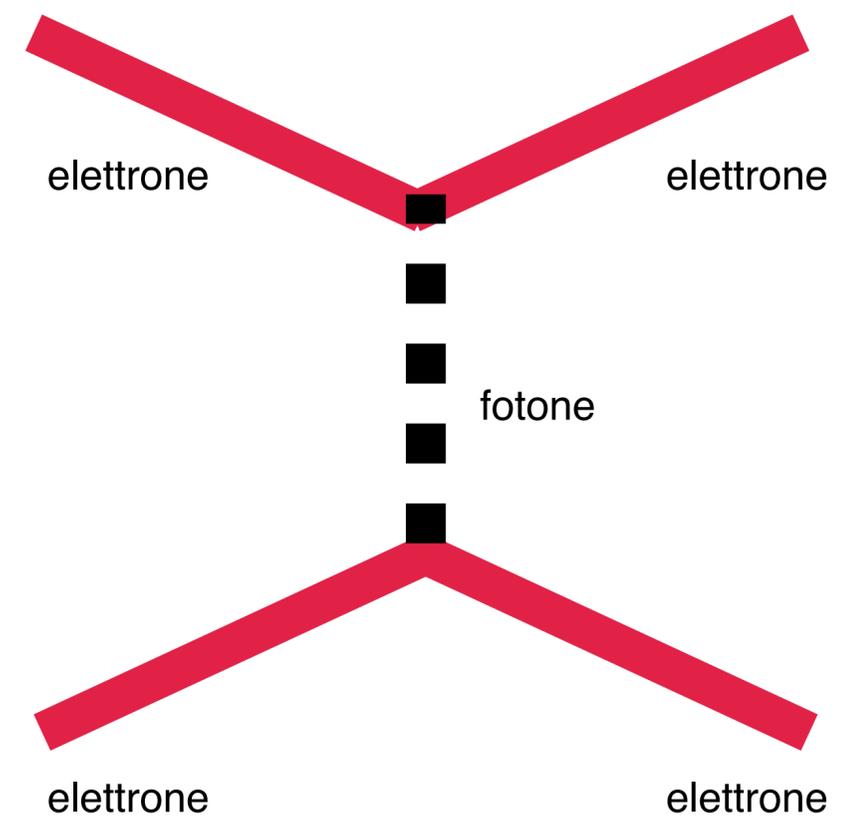
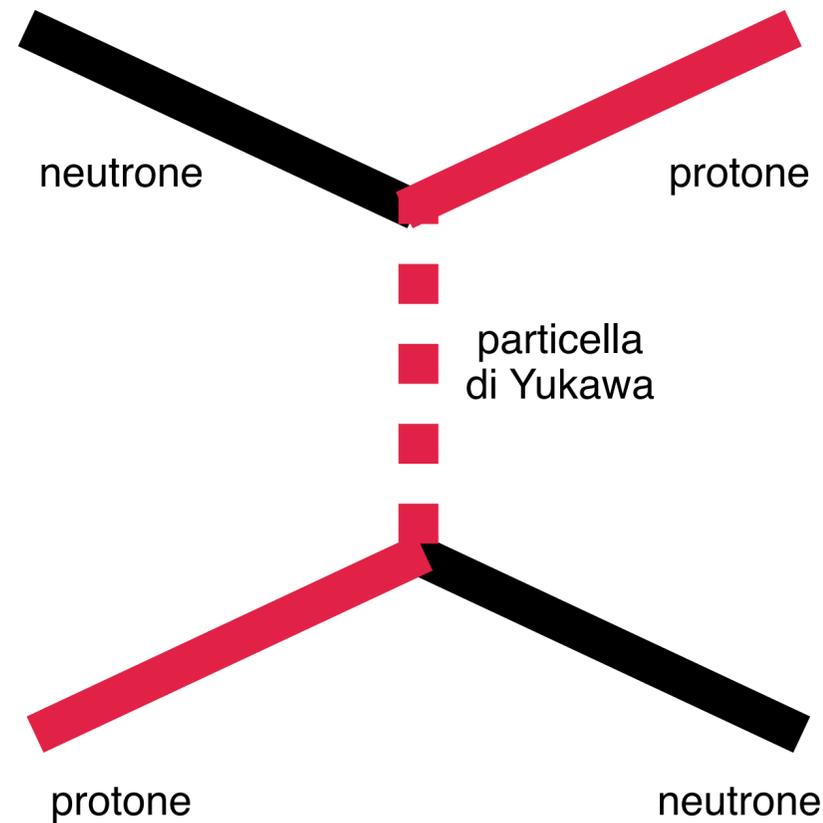
- Ispirato dalla teoria di Fermi, Yukawa cerca di spiegare le interazioni tra protoni e neutroni introducendo una **nuova onda/particella**.



Le forze nucleari

la teoria di Yukawa (1935)

- Ispirato dalla teoria di Fermi, Yukawa cerca di spiegare le interazioni tra protoni e neutroni introducendo una **nuova onda/particella**.
- Essa gioca un ruolo analogo a quello che ha il **fotone** per le interazioni elettromagnetiche

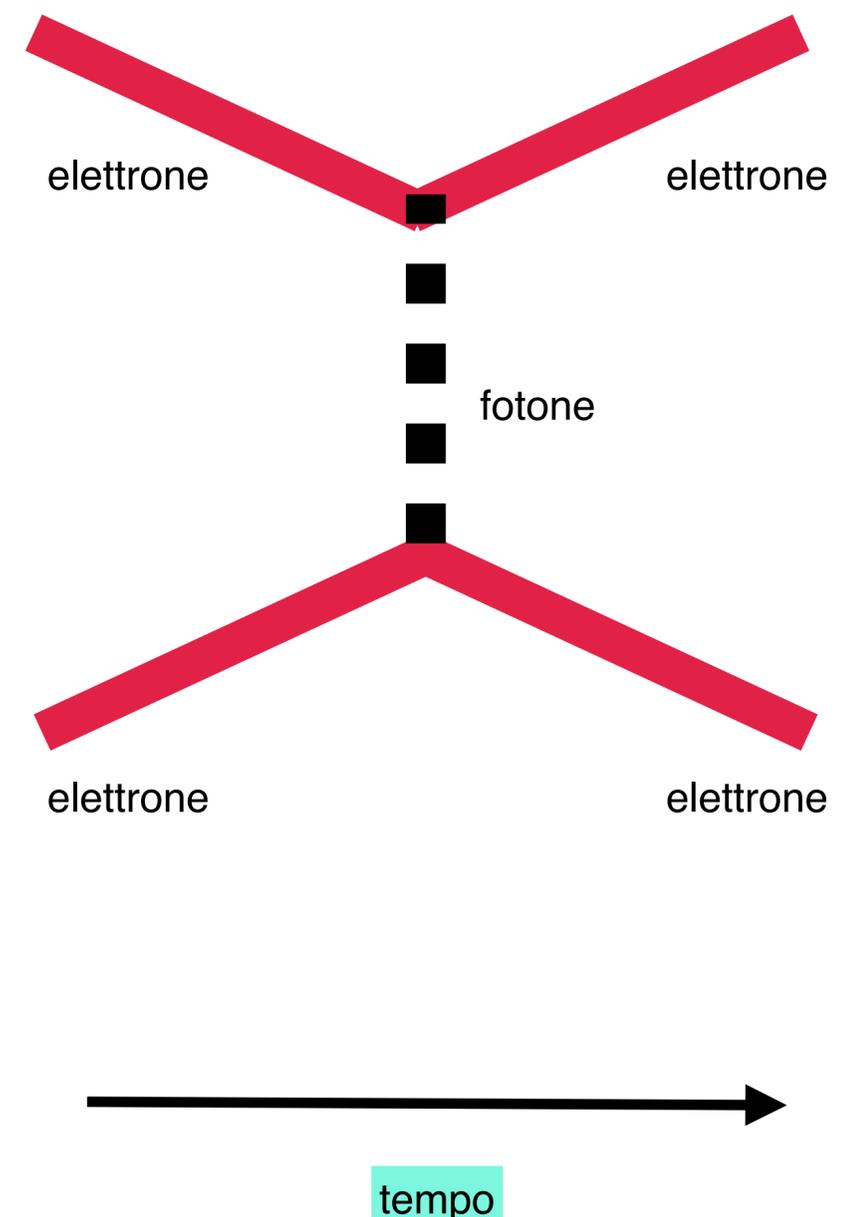
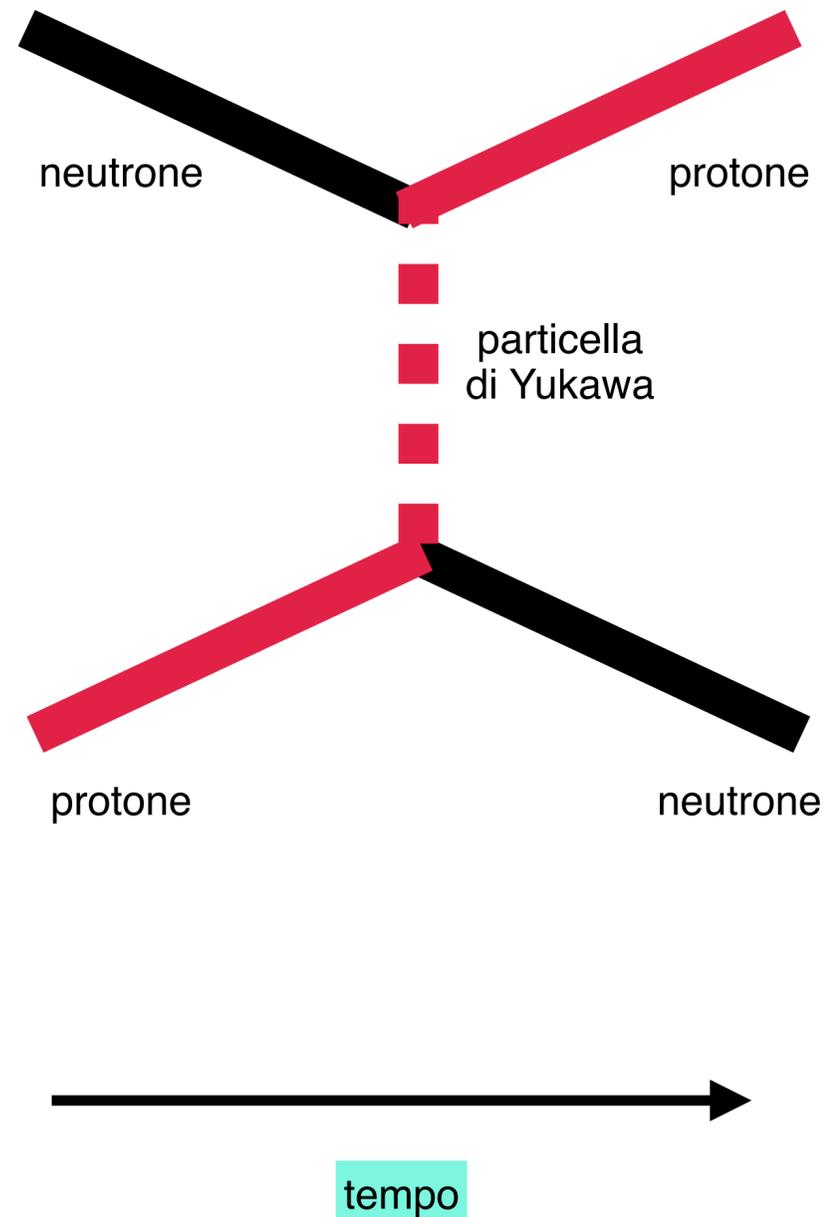


Le forze nucleari

la teoria di Yukawa (1935)

- Ispirato dalla teoria di Fermi, Yukawa cerca di spiegare le interazioni tra protoni e neutroni introducendo una **nuova onda/particella**.
- Essa gioca un ruolo analogo a quello che ha il **fotone** per le interazioni elettromagnetiche

Durante la sua ricerca si effettuarono numerose scoperte; infine si capi' che esiste davvero.



Le forze nucleari

la teoria di Yukawa (1935)

- Ispirato dalla teoria di Fermi, Yukawa cerca di spiegare le interazioni tra protoni e neutroni introducendo una **nuova onda/particella**.
- Essa gioca un ruolo analogo a quello che ha il **fotone** per le interazioni elettromagnetiche

Durante la sua ricerca si effettuarono numerose scoperte; infine si capì che esiste davvero.



Photo from the Nobel Foundation archive.

Hideki Yukawa

The Nobel Prize in Physics 1949

Born: 23 January 1907, Tokyo, Japan

Died: 8 September 1981, Kyoto, Japan

Affiliation at the time of the award: Columbia University, New York, NY, USA; Kyoto University, Kyoto, Japan

Prize motivation: "for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces"

Prize share: 1/1

Teoria di Yukawa 1934; scoperta della particella 1947, di Lattes Occhialini e Powell
Premio Nobel a Yukawa 1949. Premio Nobel a Powell 1950.



la particella di Yukawa

Nel 1936 si scopre una particella simile a quella proposta da Yukawa, ma si capisce che è una sorta di elettrone pesante: il **muone**.

la particella di Yukawa

Nel 1936 si scopre una particella simile a quella proposta da Yukawa, ma si capisce che è una sorta di elettrone pesante: il **muone**.

Sakata & Inoue (1942) speculano su un **secondo neutrino** associato al muone.

Progress of Theoretical Physics, Vol. 1, No. 4, Nov.~Dec., 1946.

On the Correlations between Mesons and Yukawa Particles^{*}.

By Shoichi SAKATA and Takesi INOUE.

(Received Sept. 18, 1946.)

Mass and Lifetime of Yukawa Particle.

3. For phenomena in atomic nuclei (nuclear forces, beta-decay etc.), Yukawa theory is conserved in its original form. But it is to be noted that the particle with mass determined from the range of nuclear forces, is the Yukawa particle and not the meson found in cosmic rays. This point is advantageous to explain the experimental results⁽⁹⁾ about nuclear force range (\hbar/m_0c) which gives half the value ($\hbar/\mu c$) obtained from the meson mass data (m_0 : mass of Yukawa particle, μ : mass of meson). In order to account for these results, $m_0=2\mu$ is a reasonable assumption. More generally speaking, it is allowable to assume $m_0 > \mu$.

Decay and Scattering of Meson.

6. According to our theory, the decay of mesons occurs by following process:

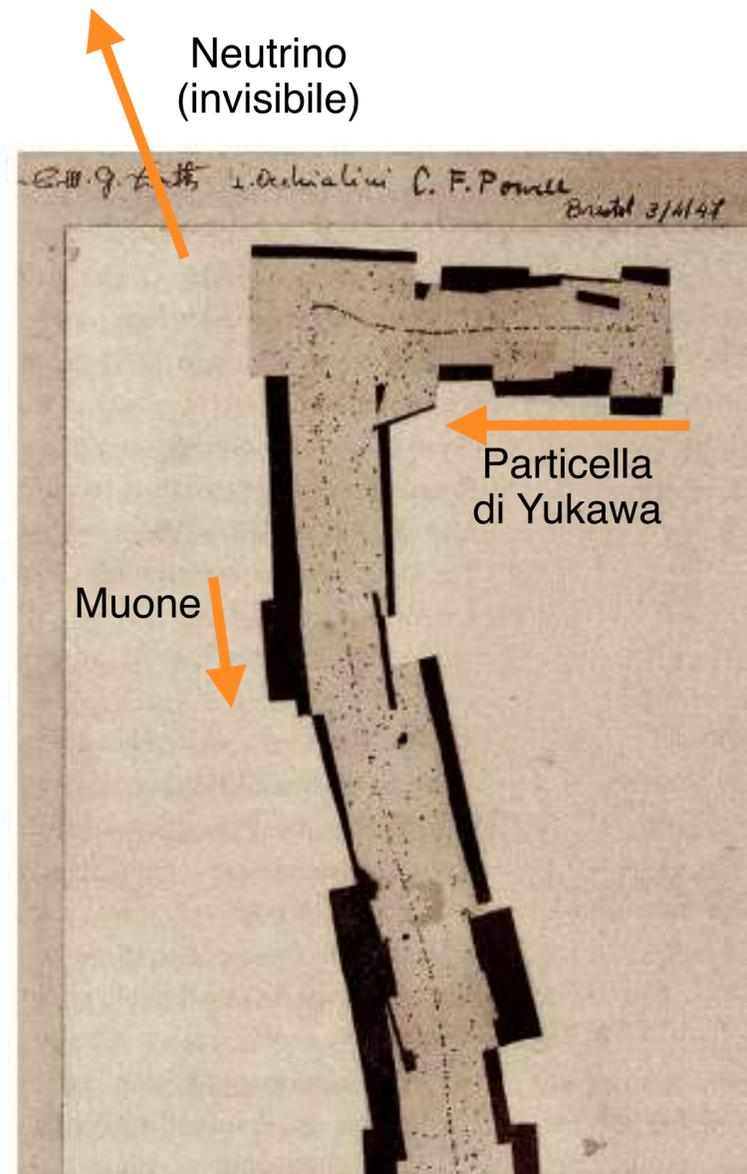
$$m^{\pm} \langle \begin{matrix} Y^{\pm} + \pi \\ m^{\pm} + e^{\pm} + \nu + \gamma^{\pm} \end{matrix} \rangle e^{\pm} + \nu + \pi. \quad (V)$$

la particella di Yukawa

Nel 1936 si scopre una particella simile a quella proposta da Yukawa, ma si capisce che è una sorta di elettrone pesante: il **muone**.

Sakata & Inoue (1942) speculano su un **secondo neutrino** associato al muone.

Nel 1947 si **vede** la particella di Yukawa che si disintegra in un muone ed un neutrino - figura a sinistra



Progress of Theoretical Physics, Vol. 1, No. 4, Nov.~Dec., 1946.

On the Correlations between Mesons and Yukawa Particles^{*}.

By Shoichi SAKATA and Takesi INOUE.

(Received Sept. 18, 1946.)

Mass and Lifetime of Yukawa Particle.

3. For phenomena in atomic nuclei (nuclear forces, beta-decay etc.), Yukawa theory is conserved in its original form. But it is to be noted that the particle with mass determined from the range of nuclear forces, is the Yukawa particle and not the meson found in cosmic rays. This point is advantageous to explain the experimental results⁽⁹⁾ about nuclear force range (\hbar/m_0c) which gives half the value ($\hbar/\mu c$) obtained from the meson mass data (m_0 : mass of Yukawa particle, μ : mass of meson). In order to account for these results, $m_0=2\mu$ is a reasonable assumption. More generally speaking, it is allowable to assume $m_0>\mu$.

Decay and Scattering of Meson.

6. According to our theory, the decay of mesons occurs by following process:

$$m^{\pm} \langle \begin{matrix} Y^{\pm} + \pi \\ m^{\pm} + e^{\pm} + \nu + \gamma^{\pm} \end{matrix} \rangle e^{\pm} + \nu + \pi. \quad (V)$$

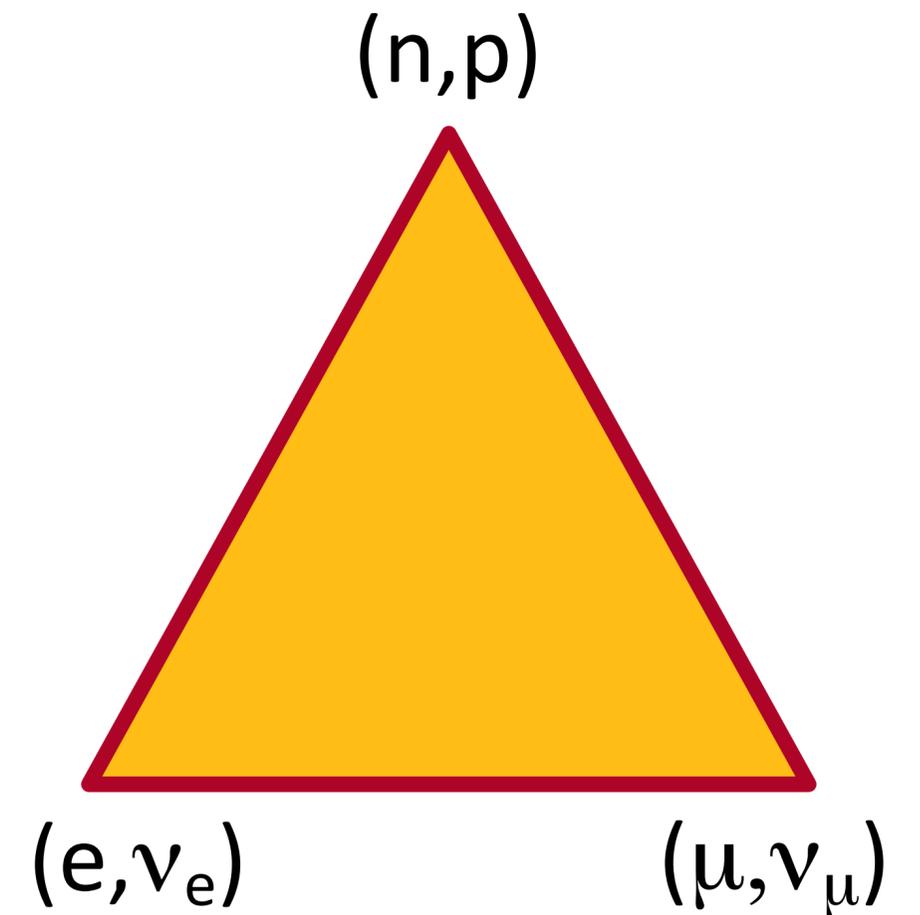


dal muone al neutrino mu

- Pontecorvo studia la cattura di elettroni e il decadimento di muoni; conclude che il comportamento è identico (1947)
- Anche Puppi si convince che il muone è associato a un nuovo tipo di neutrino (1948).

dal muone al neutrino mu

- Pontecorvo studia la cattura di elettroni e il decadimento di muoni; conclude che il comportamento è identico (1947)
- Anche Puppi si convince che il muone è associato a un nuovo tipo di neutrino (1948), in modo simile all'elettrone



triangolo di Puppi

dal muone al
neutrino mu

The Nobel Prize in Physics 1988



Photo from the Nobel
Foundation archive.

Leon M. Lederman

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel
Foundation archive.

Melvin Schwartz

Prize share: 1/3

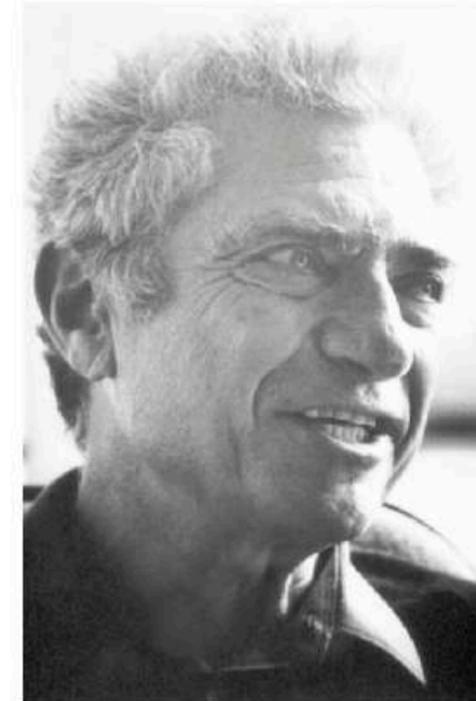


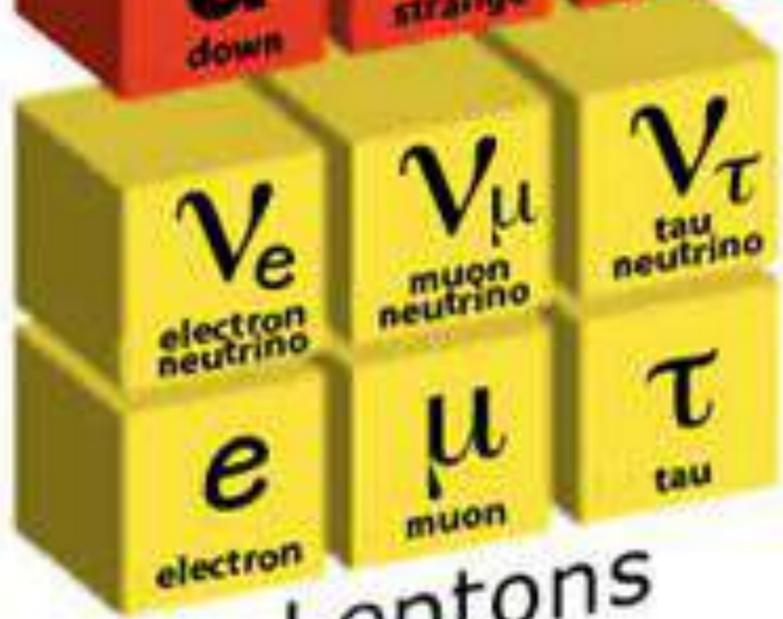
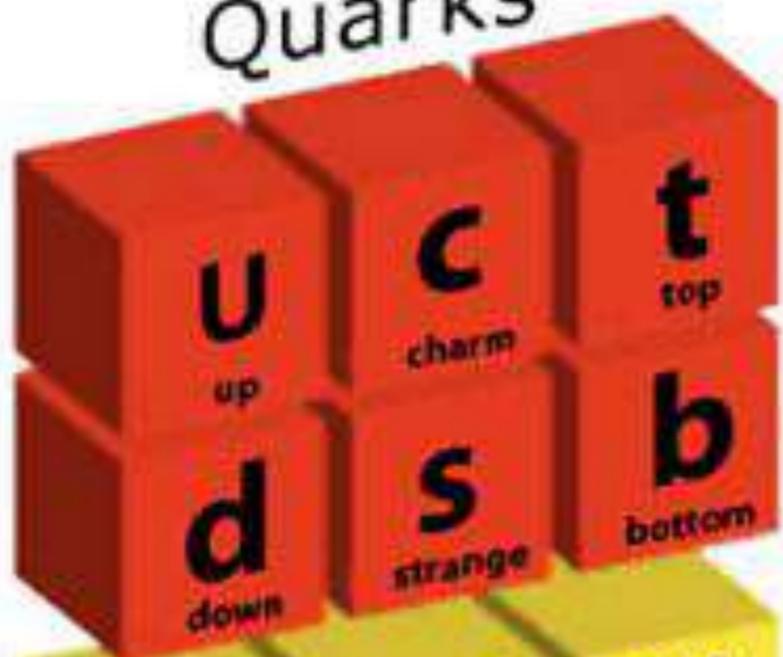
Photo from the Nobel
Foundation archive.

Jack Steinberger

Prize share: 1/3

Nel 1962, si ottiene la prova definitiva che il neutrino associato al muone è **diverso** da quello associato all'elettrone

Quarks



Leptons

Antiquarks

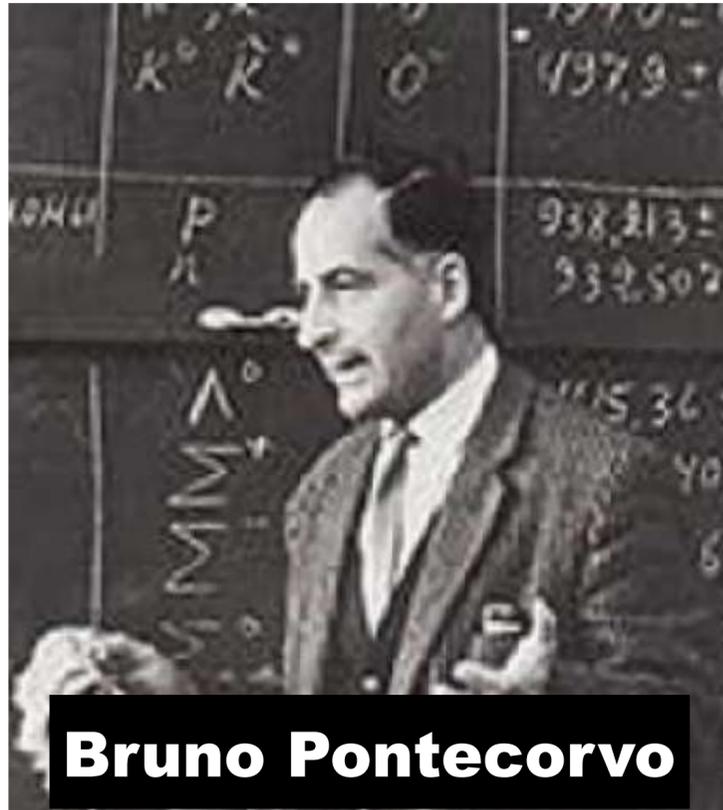


Antileptons

strani comportamenti dei neutrini

**nuove idee di Bruno Pontecorvo e di Shoichi Sakata;
la massa dei neutrini; buffe manifestazioni (osservate)**

i due protagonisti principali



i neutrini si trasformano spontaneamente!

Nel 1957, Pontecorvo specula che i neutrini si possano **trasformare** tra loro

Cinque anni dopo, Sakata e altri **consolidano** la speculazione

Nel 1967, Pontecorvo **formalizza la proposta** in modo definitivo

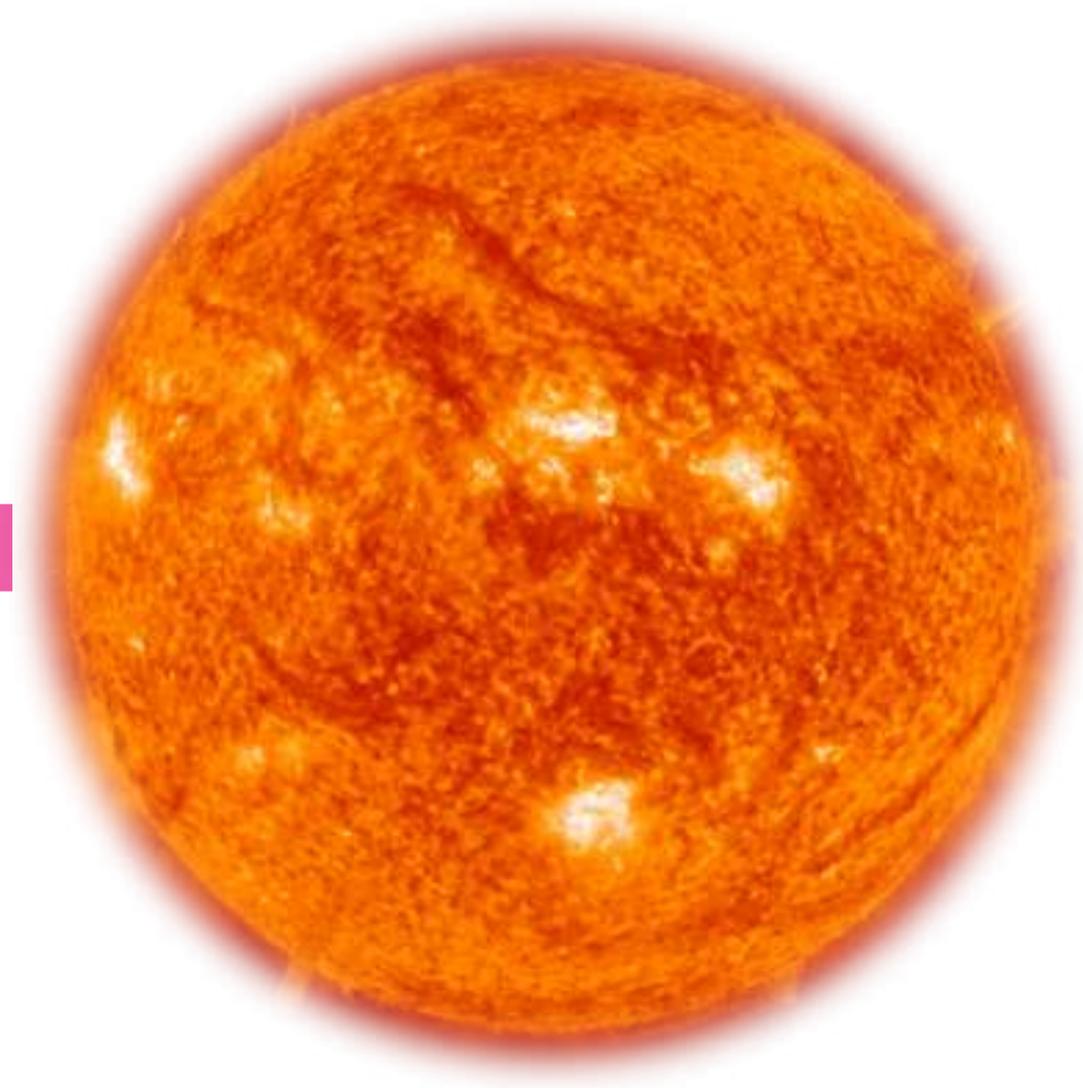
i neutrini si trasformano spontaneamente!

Nel 1957, Pontecorvo specula che i neutrini si possano **trasformare** tra loro

Cinque anni dopo, Sakata e altri **consolidano** la speculazione

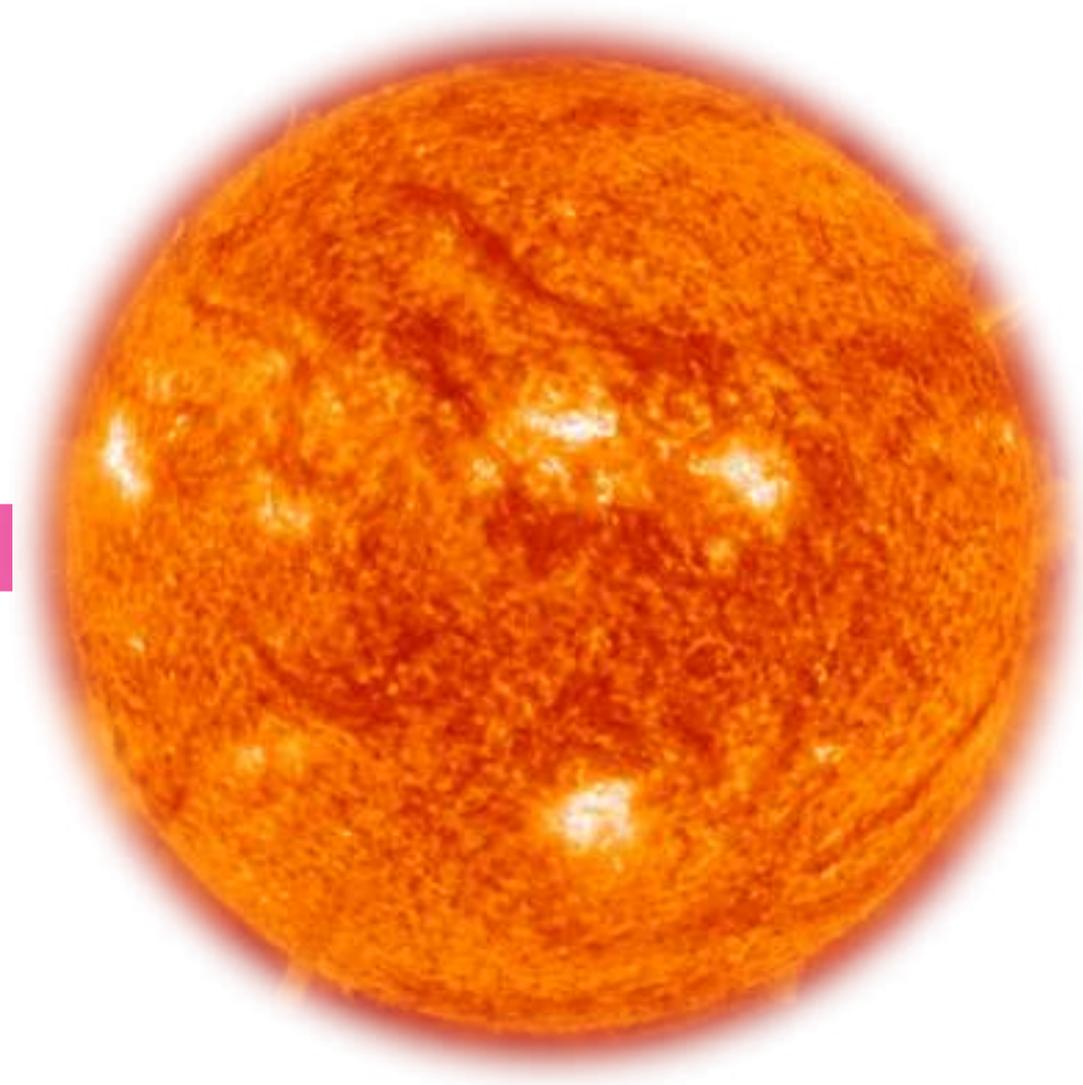
Nel 1967, Pontecorvo **formalizza la proposta** in modo definitivo

Queste idee vengono viste a lungo con diffidenza, però....



ci si aspettava (teoria) un certo numero di neutrini elettronici





**ci si aspettava (teoria) un certo
numero di neutrini elettronici**

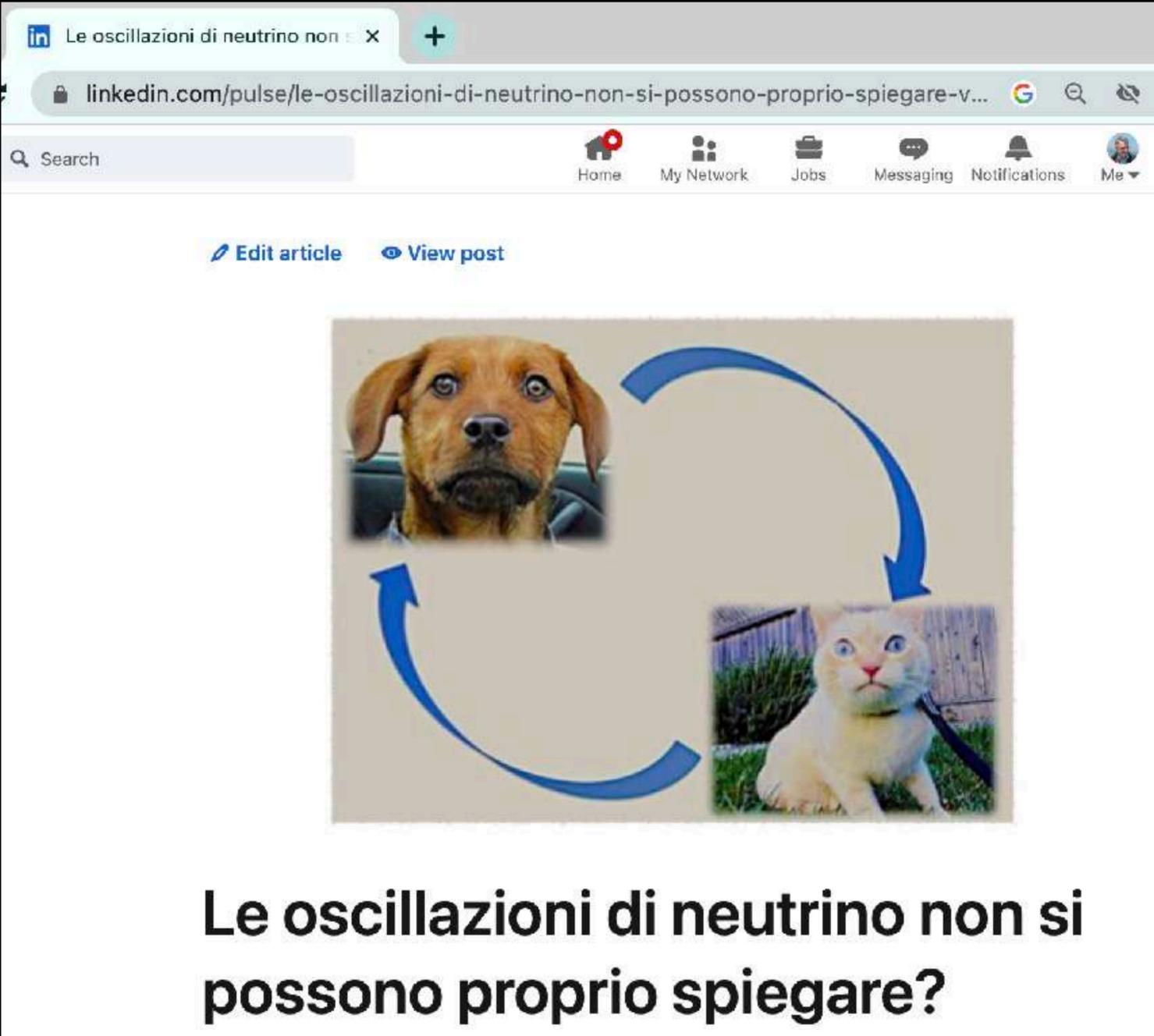


**ma dalla fine anni '60
se ne misurano
meno della metà!**



c'è verso di capirlo?

- Il fenomeno **non ha corrispondenti** nella esperienza quotidiana.
- (Alcuni tentativi, come quelli in certi disegni, valgono quello che valgono)
- Il problema è che il fenomeno ha natura quantistica.
- Il trucco è provare a **pensare ai neutrini come onde**; vediamo cosa si può fare.



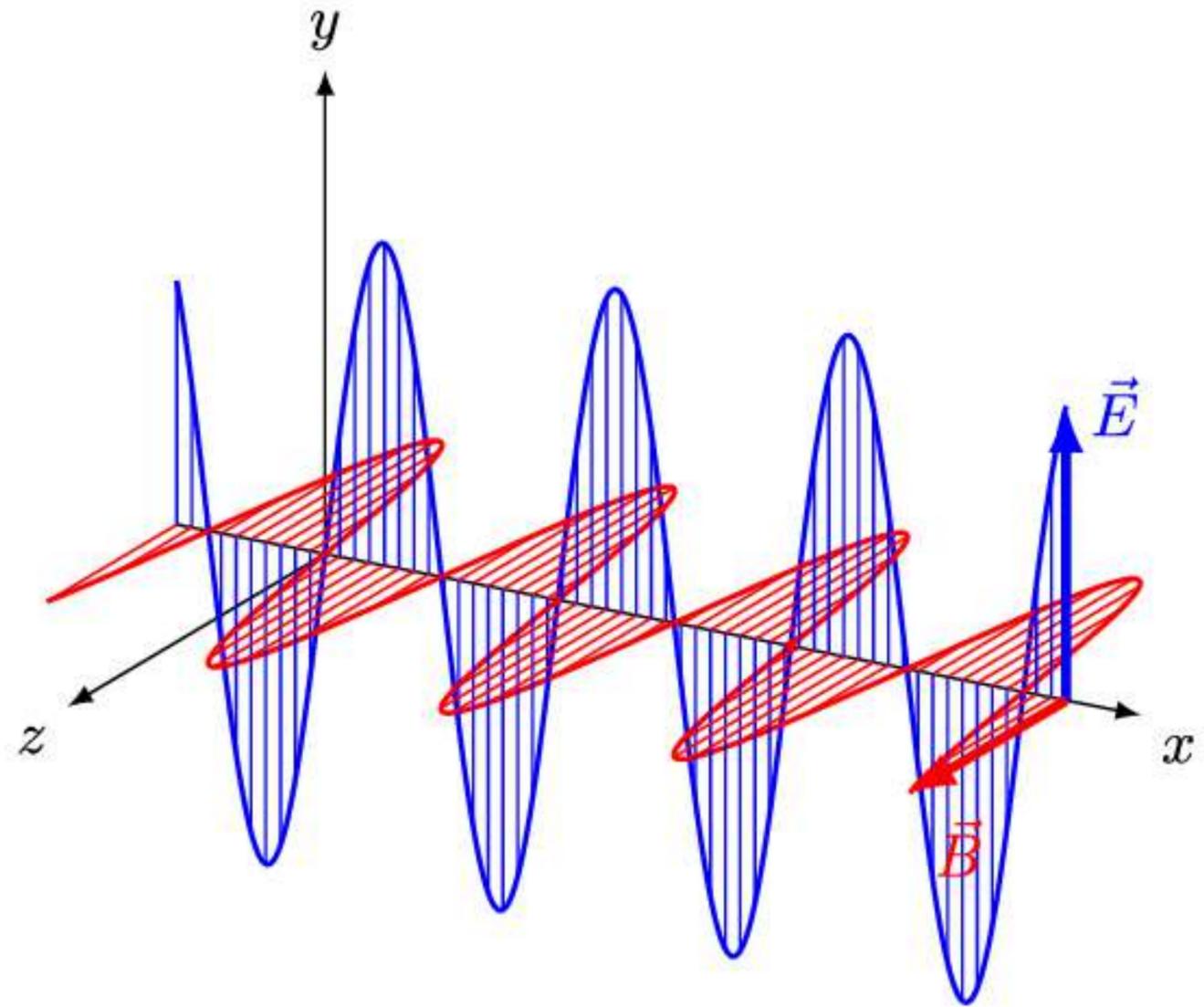
The image shows a screenshot of a LinkedIn article. The browser address bar displays the URL: [linkedin.com/pulse/le-oscillazioni-di-neutrino-non-si-possono-proprio-spiegare-v...](https://www.linkedin.com/pulse/le-oscillazioni-di-neutrino-non-si-possono-proprio-spiegare-v...). The article title is "Le oscillazioni di neutrino non si possono proprio spiegare?". Below the title, there are two buttons: "Edit article" and "View post". The main content of the article is a diagram consisting of two photographs: a brown dog on the left and a white cat on the right. Two blue curved arrows connect them in a circular path, one from the dog to the cat and one from the cat back to the dog, illustrating a cycle or oscillation.

Le oscillazioni di neutrino non si possono proprio spiegare?

analogia con la luce

la polarizzazione

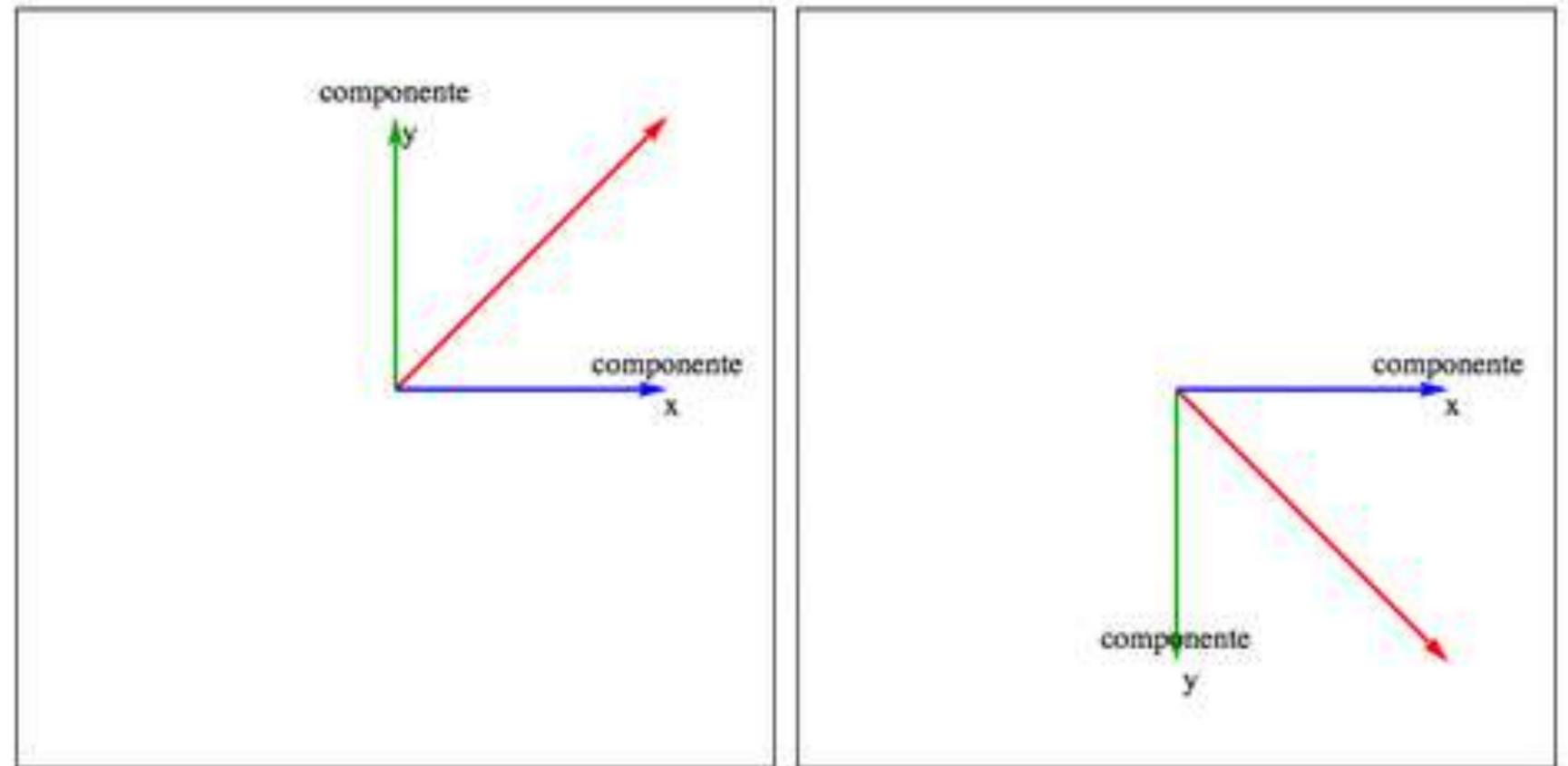
- la figura illustra la propagazione di un'onda elettromagnetica
- per ogni direzione di moto, ci sono **due diversi stati**, a seconda di dove è orientato il campo elettrico
- essi corrispondono alla luce polarizzata



analogia con la luce

la polarizzazione

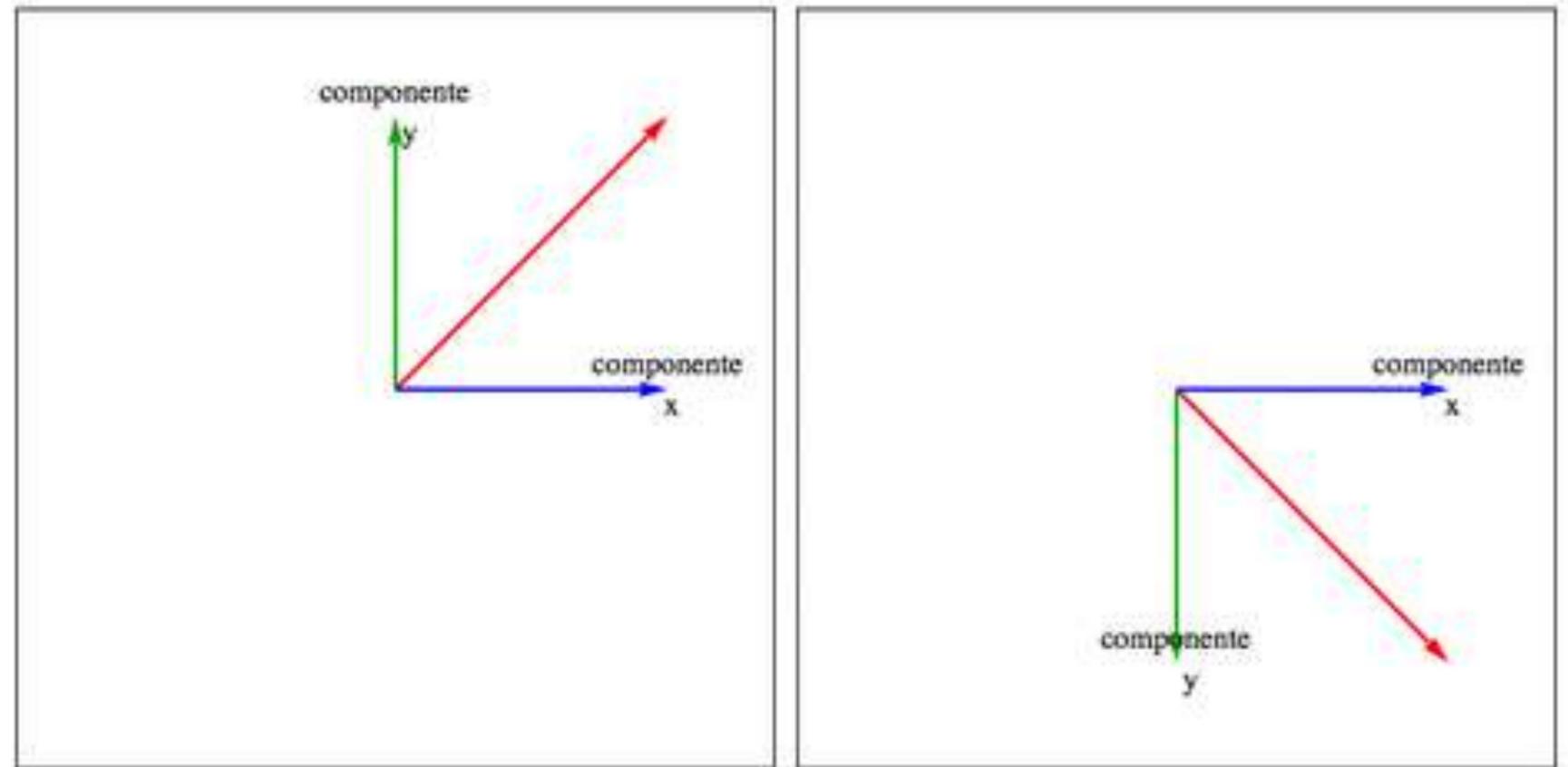
possiamo mica ruotare
la polarizzazione
dell'onda,
trasformando uno
stato nell'altro?



analogia con la luce

la polarizzazione

possiamo mica ruotare
la polarizzazione
dell'onda,
trasformando uno
stato nell'altro?

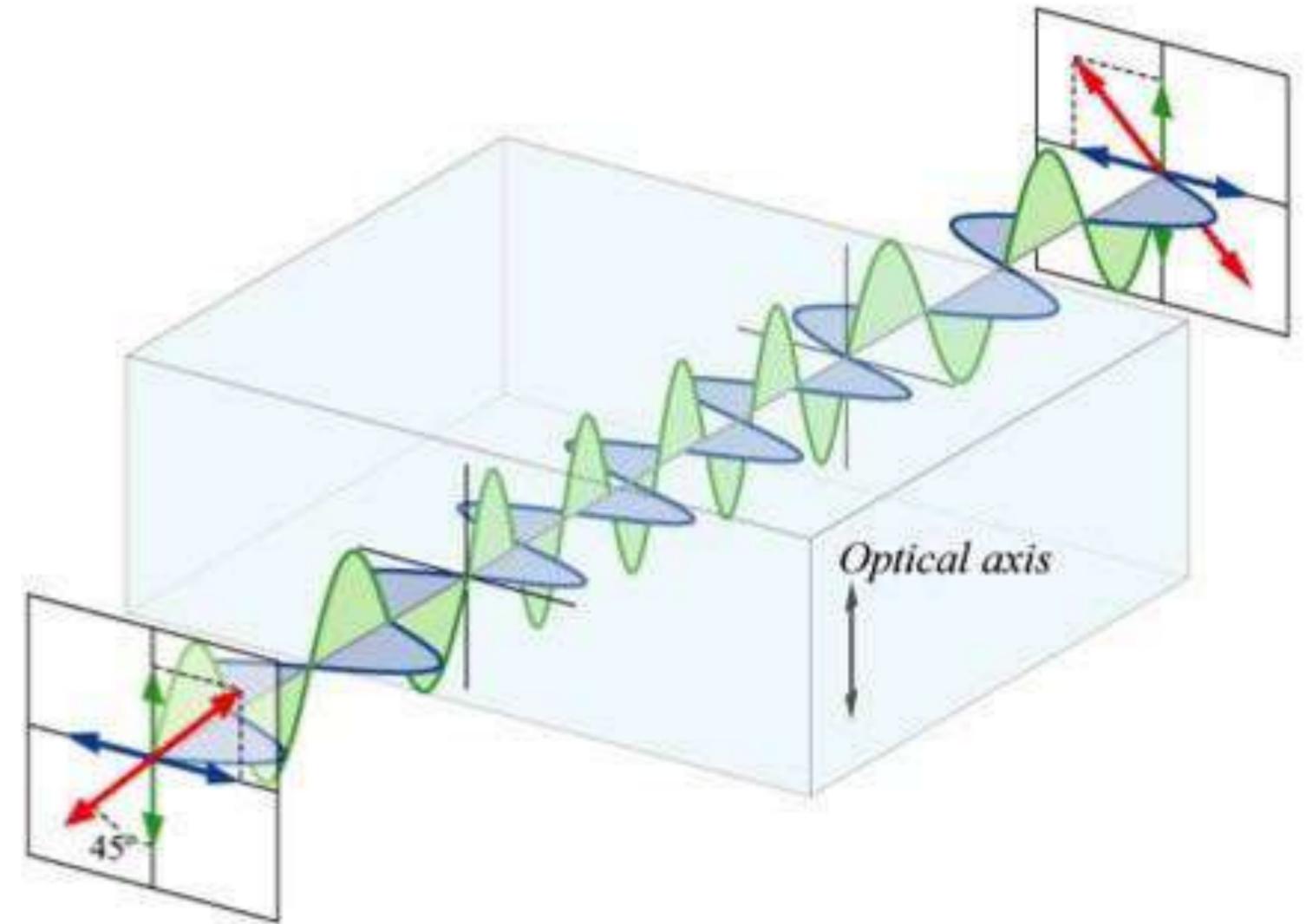


basterebbe **rovesciare** la fase di una componente dell'onda

analogia con la luce

la polarizzazione

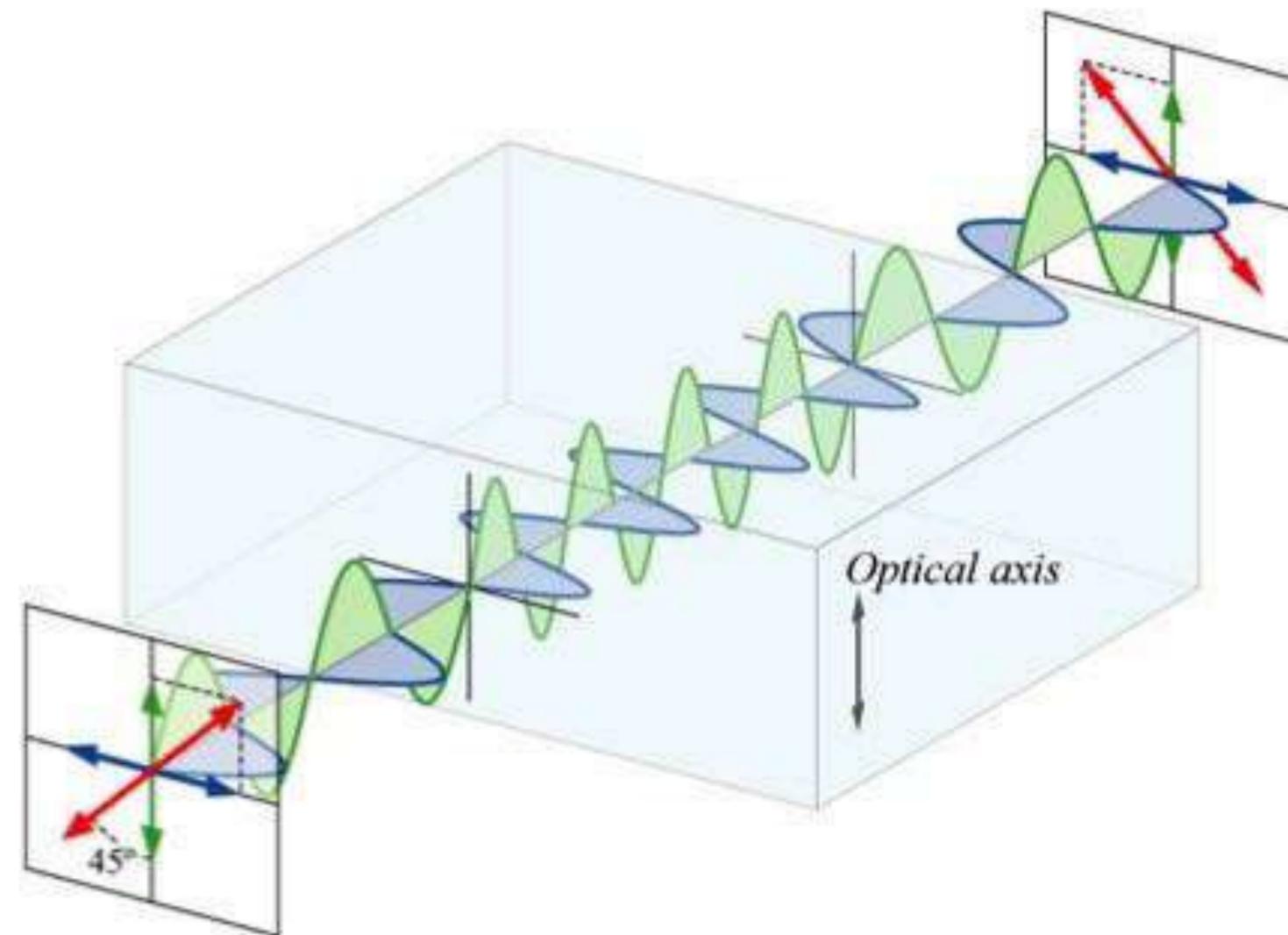
SI:
possiamo
farlo!



analogia con la luce

la polarizzazione

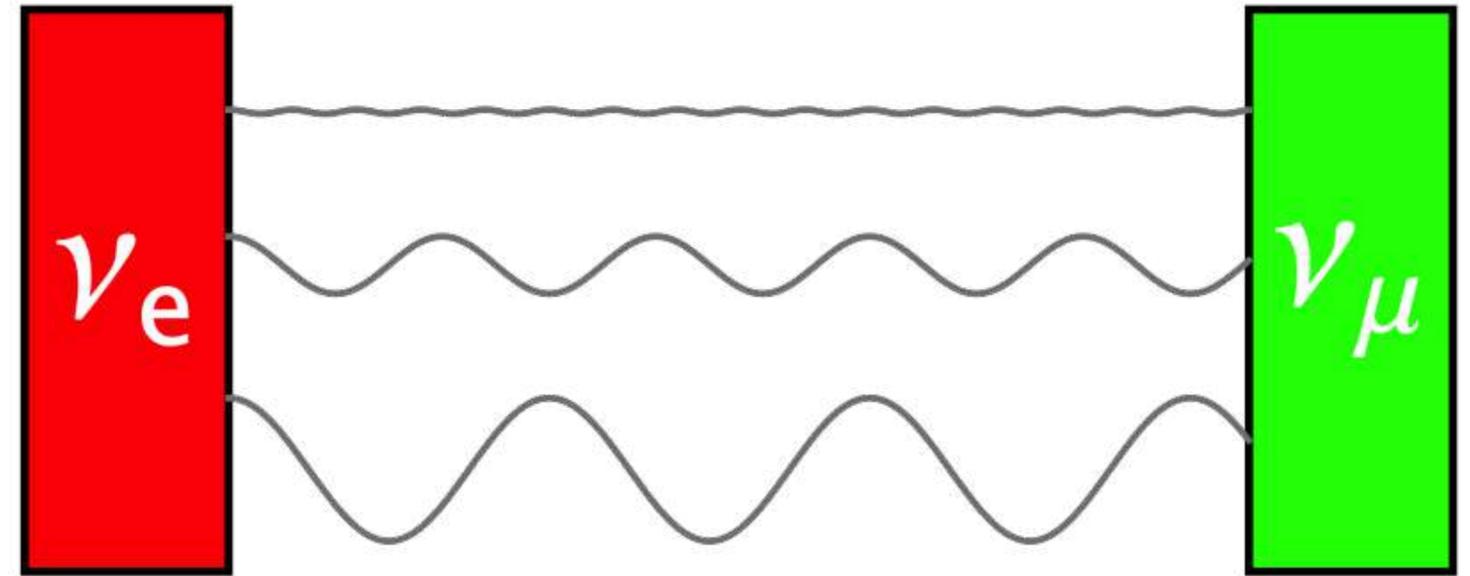
SI:
possiamo
farlo!



coi neutrini è lo stesso

(quasi lo stesso)

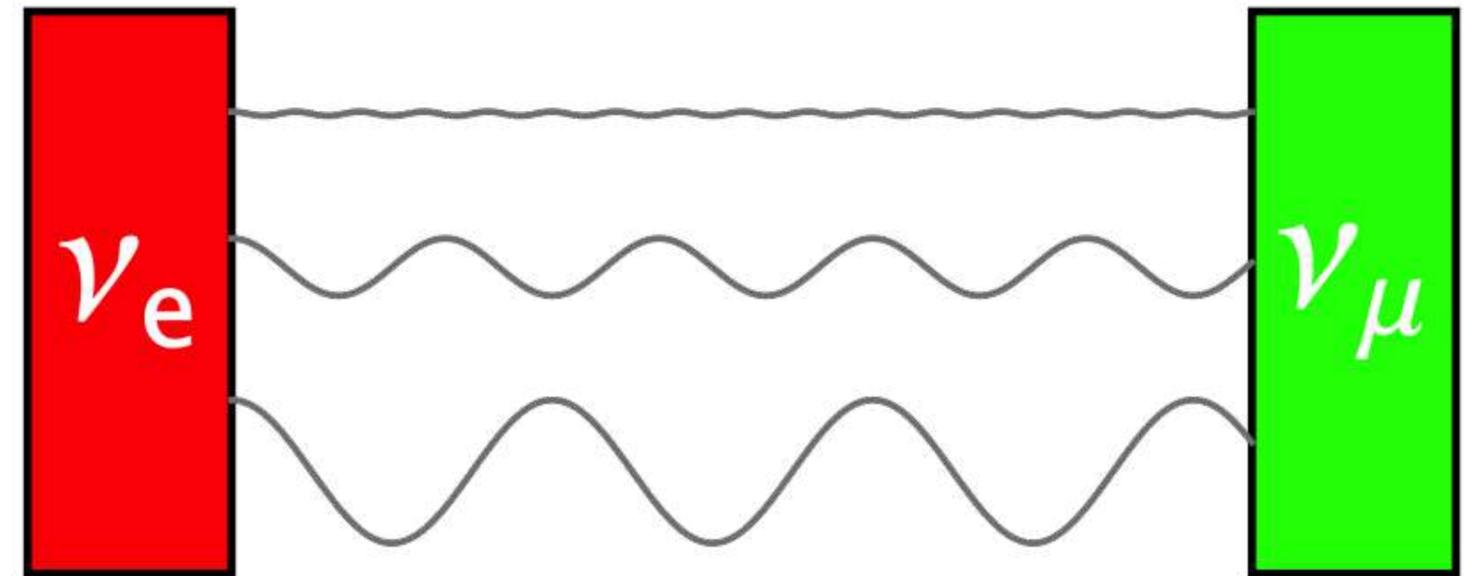
- Si suppone che i neutrini di tipo elettronico e muonico siano costituiti da particelle diverse, con masse piccolissime



coi neutrini è lo stesso

(quasi lo stesso)

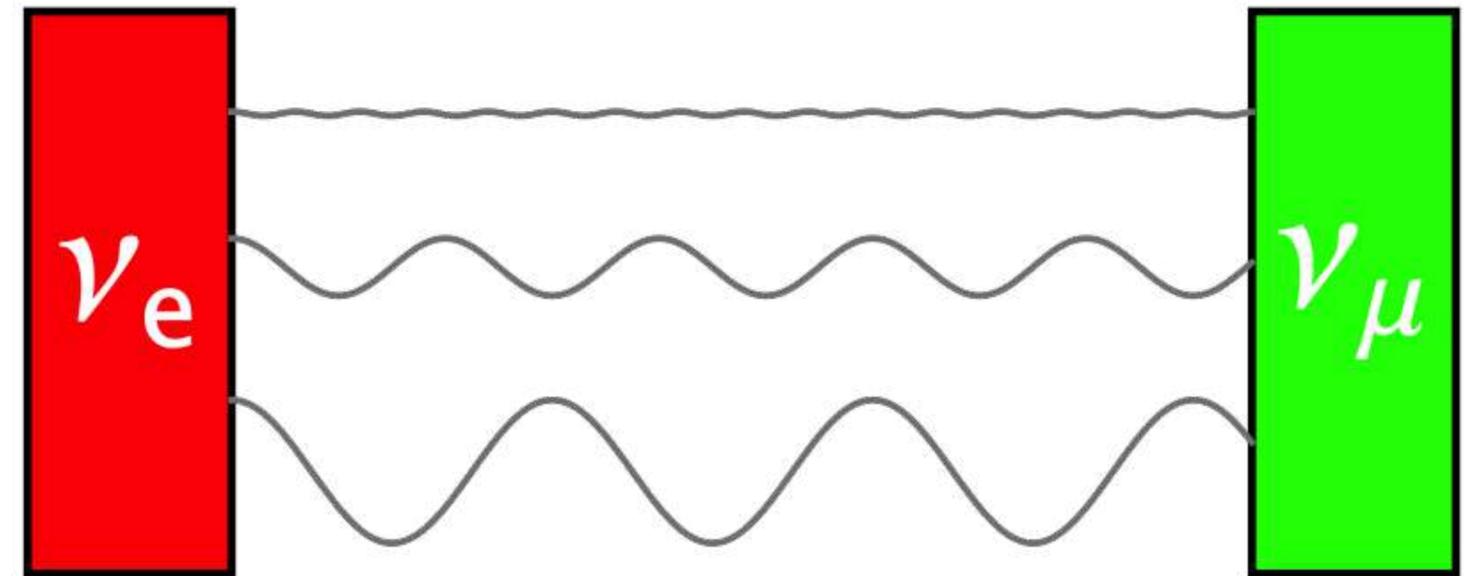
- Si suppone che i neutrini di tipo elettronico e muonico siano costituiti da particelle diverse, con masse piccolissime
- Ogni particella con massa oscilla con una frequenza: $f = \frac{E}{h}$ - Einstein-Bohr



coi neutrini è lo stesso

(quasi lo stesso)

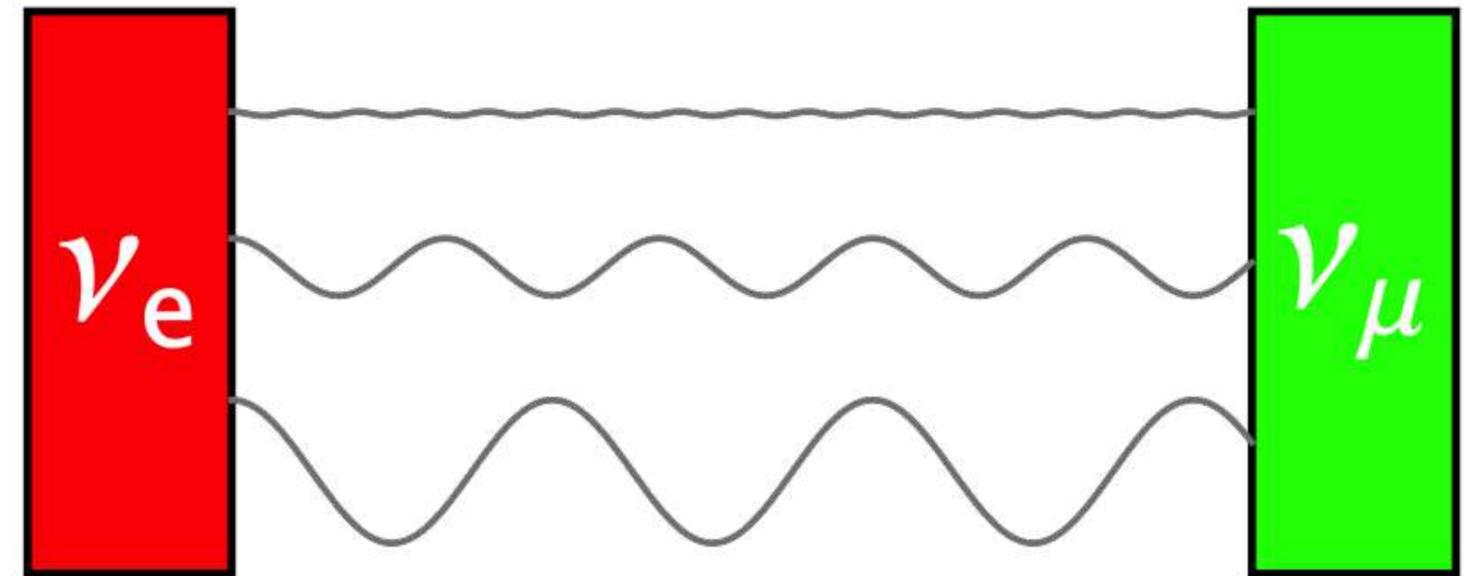
- Si suppone che i neutrini di tipo elettronico e muonico siano costituiti da particelle diverse, con masse piccolissime
- Ogni particella con massa oscilla con una frequenza: $f = \frac{E}{h}$ - Einstein-Bohr
- Gli stati con massa maggiore hanno maggiore E ed oscillano più velocemente



coi neutrini è lo stesso

(quasi lo stesso)

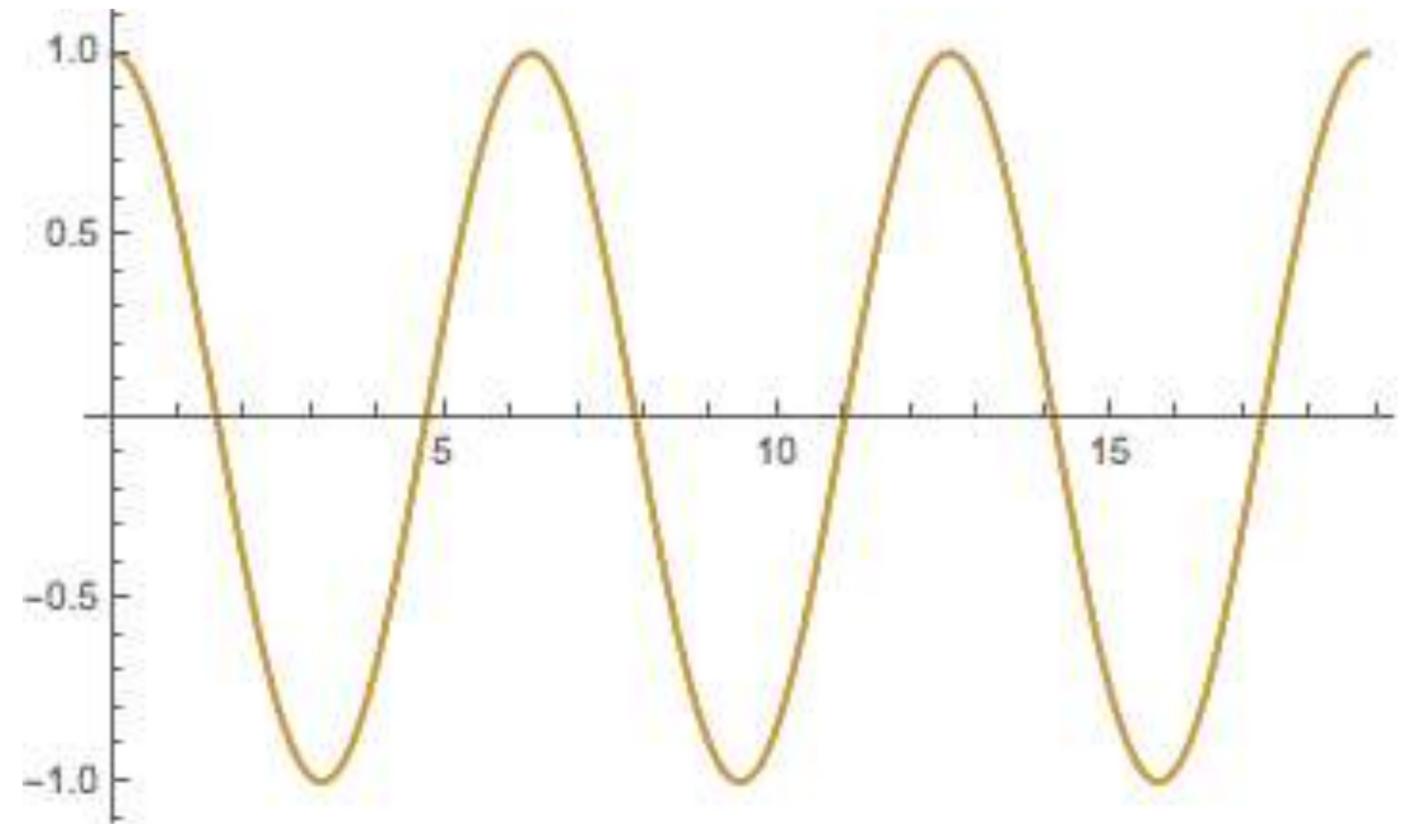
- Si suppone che i neutrini di tipo elettronico e muonico siano costituiti da particelle diverse, con masse piccolissime
- Ogni particella con massa oscilla con una frequenza: $f = \frac{E}{h}$ - Einstein-Bohr
- Gli stati con massa maggiore hanno maggiore E ed oscillano più velocemente
- Allora, i neutrini si trasformano nel tempo



coi neutrini è lo stesso

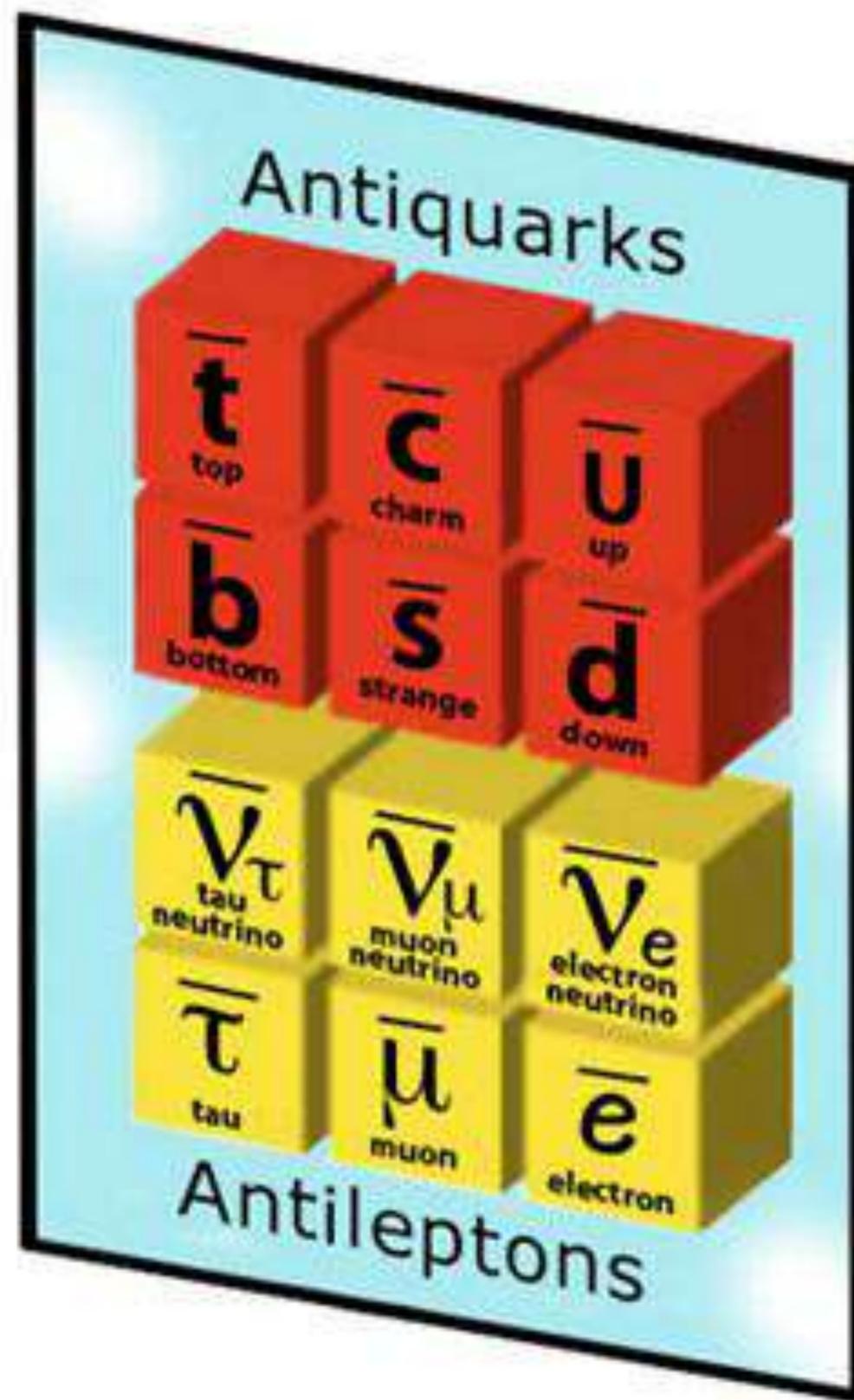
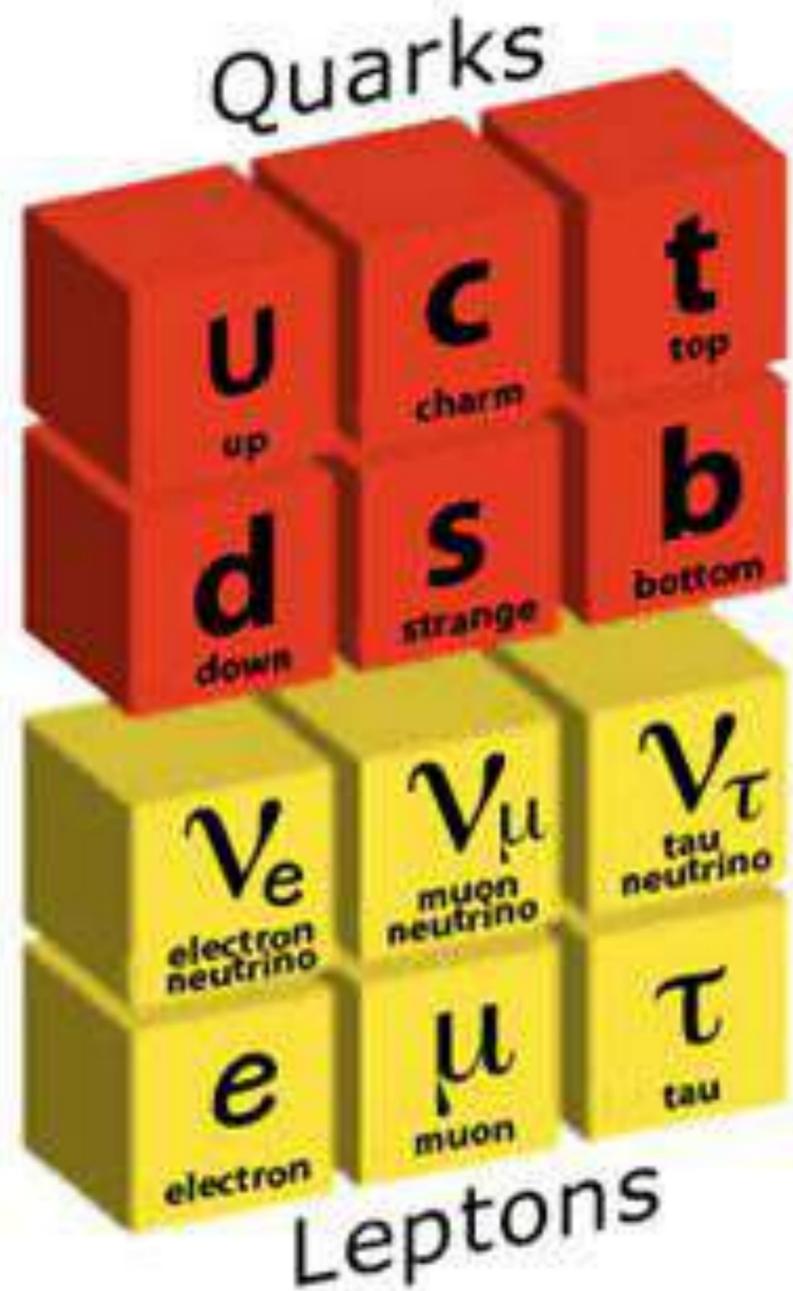
(quasi lo stesso)

- Si suppone che i neutrini di tipo elettronico e muonico siano costituiti da particelle diverse, con masse piccolissime
- Ogni particella con massa oscilla con una frequenza: $f = \frac{E}{h}$ - Einstein-Bohr
- Gli stati con massa maggiore hanno maggiore E ed oscillano più velocemente
- Allora, i neutrini si trasformano nel tempo



attualità delle idee di Majorana

Come, dalle idee di Majorana sul neutrino, si arriva a pensare alla creazione di materia.



Particelle di materia e antimateria
Credito: Fermilab

Questa utile immagine trasmette un'enorme quantità di informazioni, evocando i concetti di:

- * *particelle/antiparticelle*
- * *quark/leptoni*
- * *repliche di "famiglia"*

Ma solleva una domanda:
cosa distingue neutrini ed anti neutrini, visto che sono entrambi privi di carica?

neutrini ed antineutrini

★ I **neutrini di diversi tipi** sono caratterizzati dalle particelle cariche ad essi associate: ci sono neutrini dell'elettrone, del muone, della particella tau.

neutrini ed antineutrini

★ I **neutrini di diversi tipi** sono caratterizzati dalle particelle cariche ad essi associate: ci sono neutrini dell'elettrone, del muone, della particella tau.

★ Gli **antineutrini** sono associati alle relative antiparticelle.

neutrini ed antineutrini

★ I **neutrini di diversi tipi** sono caratterizzati dalle particelle cariche ad essi associate: ci sono neutrini dell'elettrone, del muone, della particella tau.

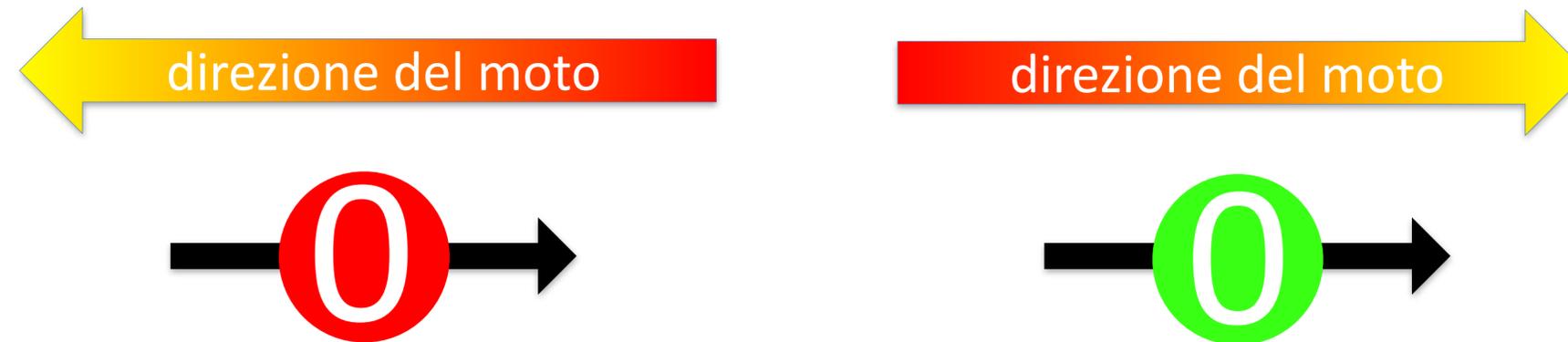
★ Gli **antineutrini** sono associati alle relative antiparticelle.

★ Dalla meta' degli anni 50, abbiamo capito che esiste **anche** un modo intrinseco per **distinguere neutrini da antineutrini**, ovvero: la proiezione dello spin del neutrino sulla sua velocita'.

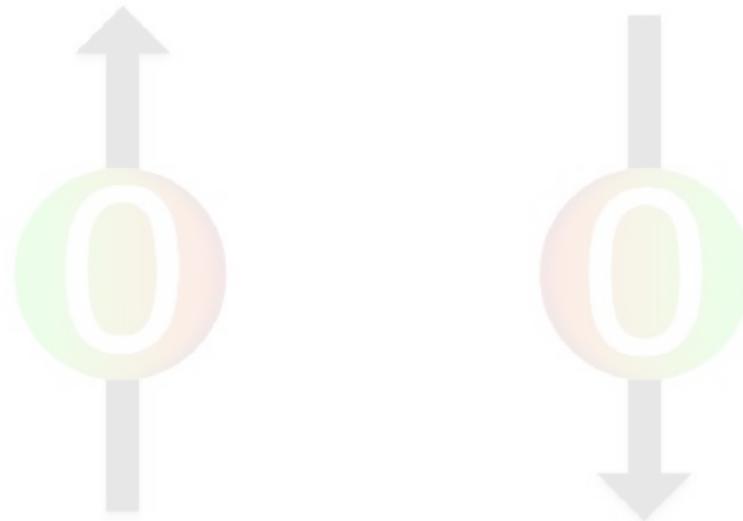
Majorana

in 3 punti

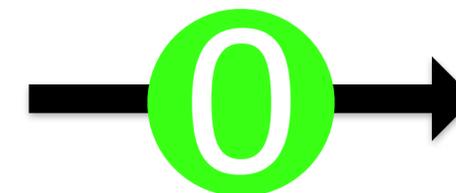
i neutrini di Majorana [1]



quando lo spin è parallelo son **anti-neutrini e vicev.**



i neutrini di Majorana [1]

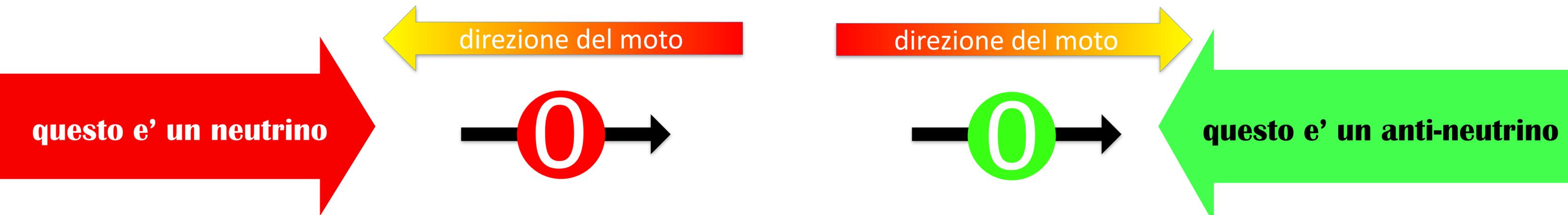


questo e' un anti-neutrino

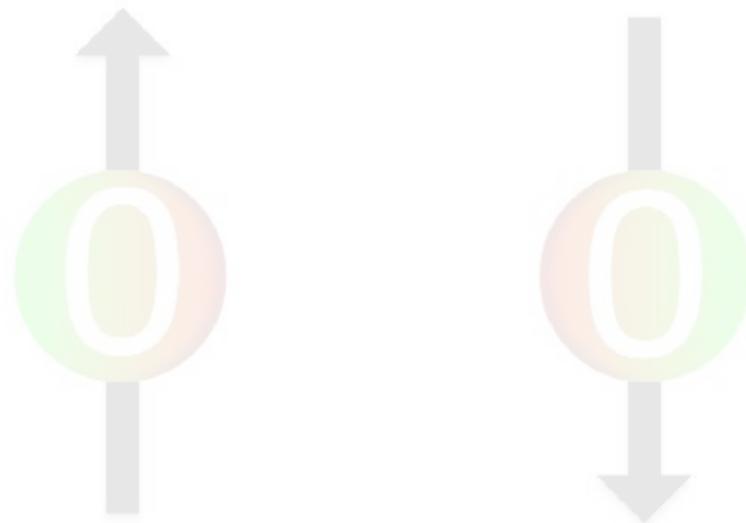
quando lo spin è parallelo son **anti-neutrini e vicev.**



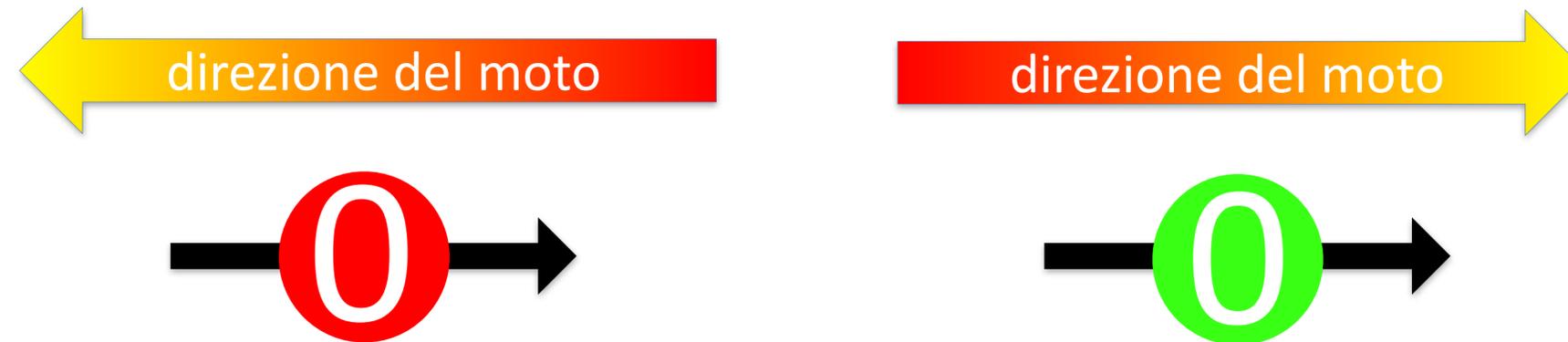
i neutrini di Majorana [1]



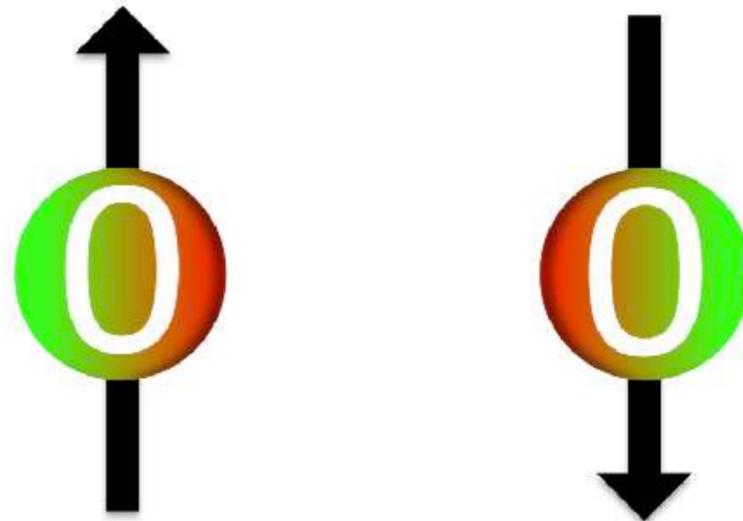
quando lo spin è parallelo son **anti-neutrini e vicev.**



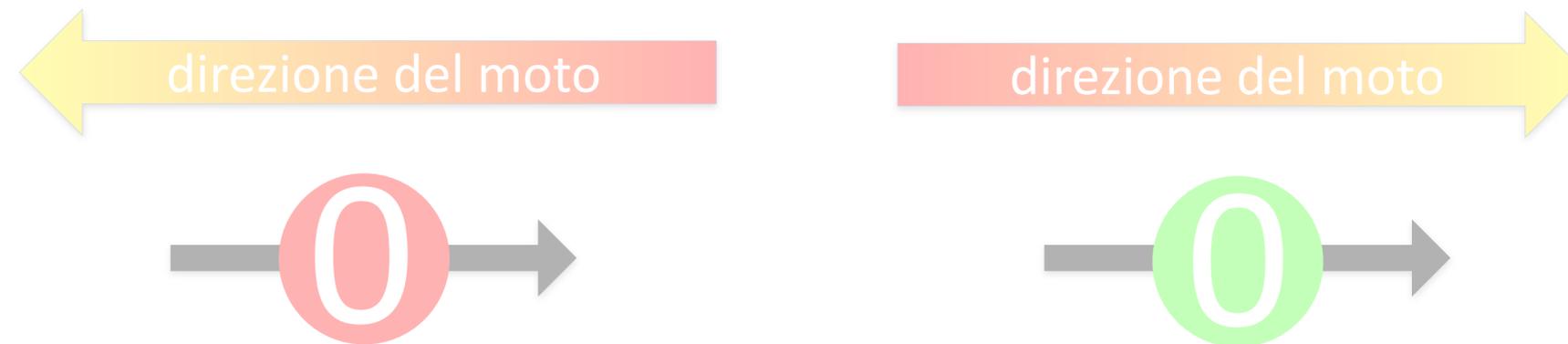
i neutrini di Majorana [2]



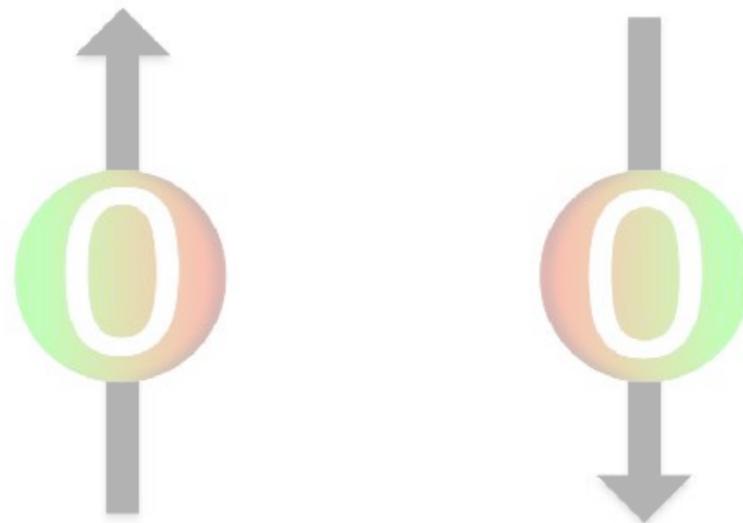
nel sistema a riposo che esiste sembrerebbero uguali



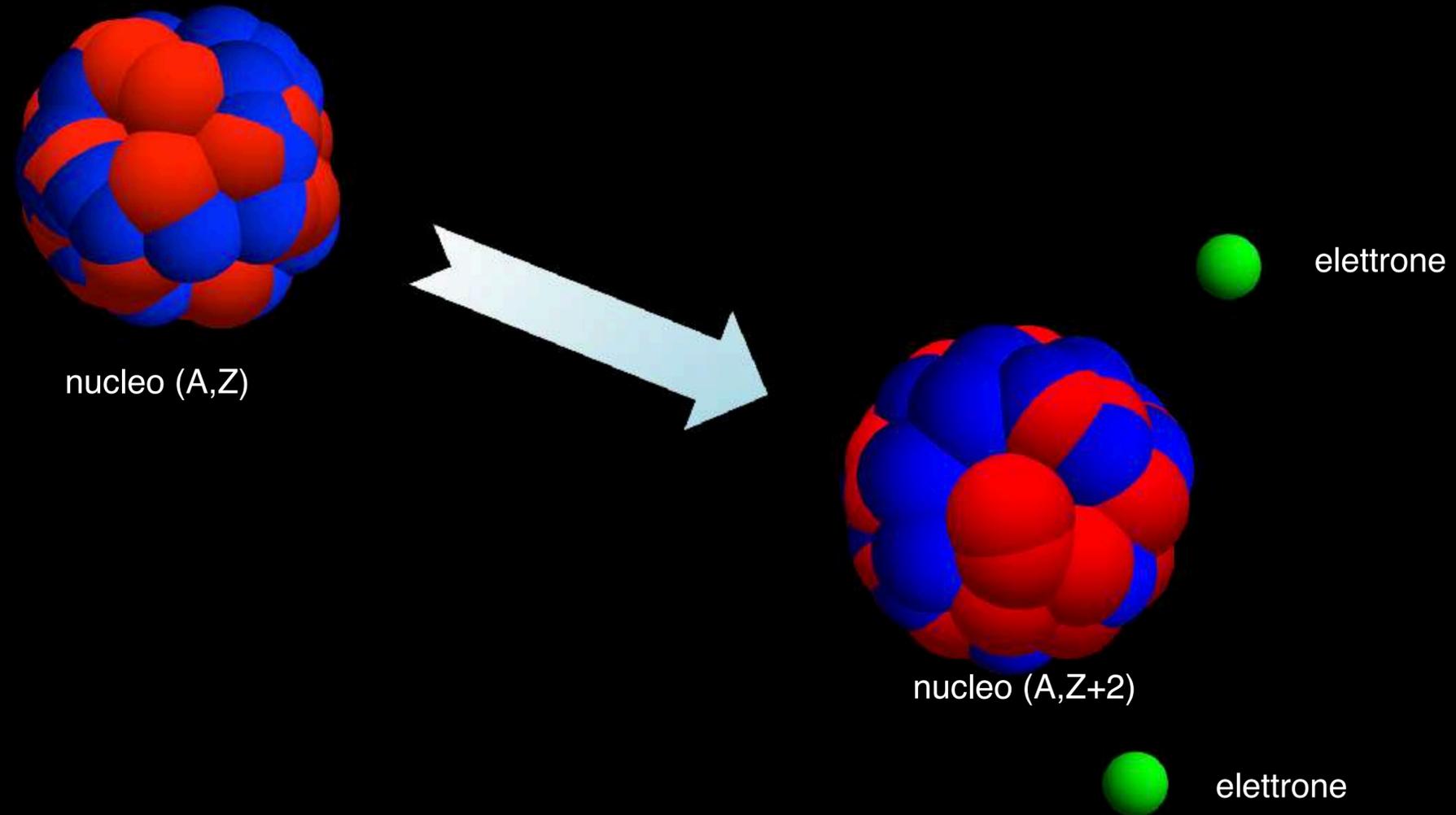
i neutrini di Majorana [3]



ipotesi: i neutrini son materia e antimateria

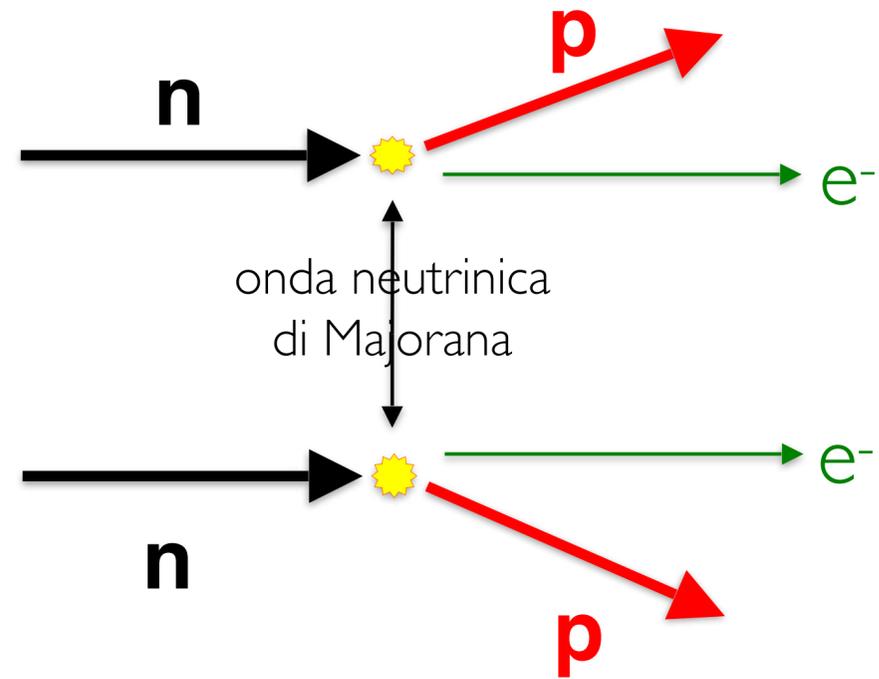


Il neutrino di Majorana fa da ponte tra materia e antimateria

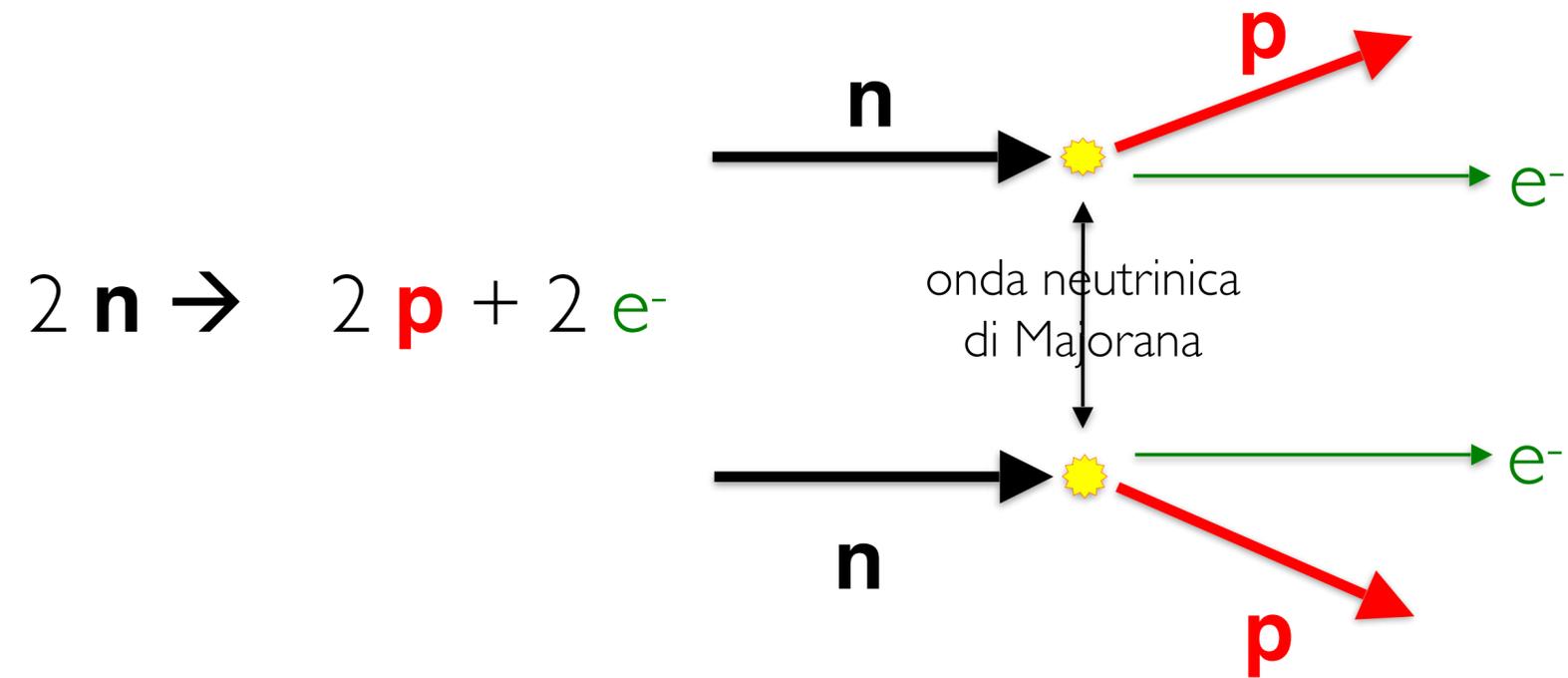


si possono creare 2 elettroni, ovvero, 2 particelle di materia !!!

come funziona la cosa



come funziona la cosa



presso il Lab del Gran Sasso siamo alla ricerca di questo tipo di trasformazioni

discussione

- ★ Molte di quelle idee greche sulla materia, che hanno ispirato il pensiero scientifico, son piene di buon senso. Ma l'atomo non è immutabile; è composto di **particelle** che si trasformano tra di loro.
- ★ Tra le particelle note, il **neutrino** è di certo la più strana.
- ★ La sua massa, implicata in certi processi di **creazione** di elettroni, dimostra che l'attuale descrizione del micromondo è **incompleta**.
- ★ Il neutrino è **utilissimo** anche in astrofisica, p.e. per lo studio dell'interno del Sole e di come funziona effettuato da **Borexino**.

**Grazie per l'attenzione,
spero vi siate divertiti
anche voi! Se vi va di
ragionarne ancora
fatevi vivi, mi trovate a:
vissani@lngs.infn.it**



Riferimenti facilmente reperibili

(miei posts su LinkedIn, con rimandi ad altre cose)

Sull'unità della conoscenza nell'antica Grecia

<https://www.linkedin.com/pulse/sullunit%C3%A0-della-conoscenza-nel-mondo-greco-antico-vissani-phd/>

Atomi ed elettricità

<https://www.linkedin.com/pulse/atomi-ed-elettricit%C3%A0-francesco-vissani-phd/>

Perché la luce è un'onda?

<https://www.linkedin.com/pulse/perch%C3%A9-la-luce-%C3%A8-un-onda-francesco-vissani-phd/>

Le oscillazioni di neutrino non si possono proprio spiegare?

<https://www.linkedin.com/pulse/le-oscillazioni-di-neutrino-non-si-possono-proprio-spiegare-vissani/>

Da Pitagora all'antimateria

<https://www.linkedin.com/pulse/da-pitagora-allantimateria-francesco-vissani-phd/>

Sulle tracce della creazione di materia

<https://www.linkedin.com/pulse/trail-matter-creation-francesco-vissani/>

Altri riferimenti facilmente reperibili

Benedetto Croce, la scienza e la scuola

nov. 19, n. 1

**La parola ai premi Nobel: Einstein,
Feynman, Gamow**

dic. 19, n. 2

Buon compleanno, Isaac Asimov!

gen. 2020, n. 3

La formula più bella (e cosa c'è dietro)

apr. 2020, n. 4

Appunti e riflessioni sulla scienza greca

apr. 2021, n. 5

Dal corpo nero agli atomi di luce

nov. 2021, n. 7

Il primo tentativo di contare gli atomi

nov. 2022, n. 9

<https://fondazionemargheritahack.it/edizioni/quaderni-di-cultura-scientifica.html>

 FONDAZIONE
MARGHERITA HACK

Quaderni di Cultura Scientifica

Creato: 16 Giugno 2021



di Francesco Vissani,
Dirigente di ricerca presso Laboratori Nazionali del Gran Sasso - INFN

piano dettagliato della presentazione

Le prime riflessioni sulla materia	[2]
Quanti di luce e di materia	[13]
Introduzione alle antiparticelle	[37]
Il nucleo e una nuova particella: il neutrino	[46]
La scoperta del neutrone	[65]
La teoria di Fermi	[72]
Nuove particelle, nuovi neutrini	[84]
Le trasformazioni dei neutrini	[98]
Da Majorana alla creazione di materia	[114]