

primi passi verso la conoscenza del neutrino

*un tributo alla fisica teorica italiana in occasione del
90° anniversario del "tentativo" di E. Fermi*

Francesco Vissani, INFN, Laboratori del Gran Sasso - Laboratori di Legnaro, 19 settembre 2023

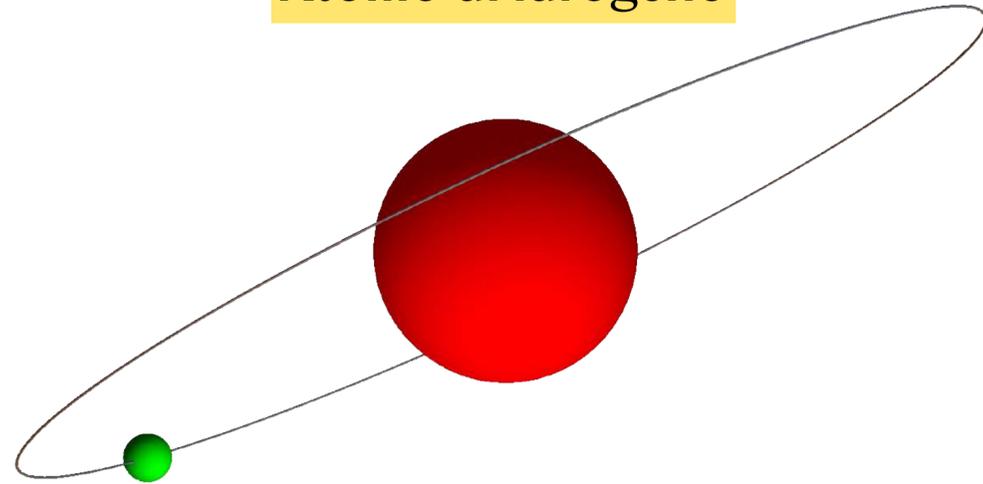
1

i modelli del nucleo dell'inizio del novecento

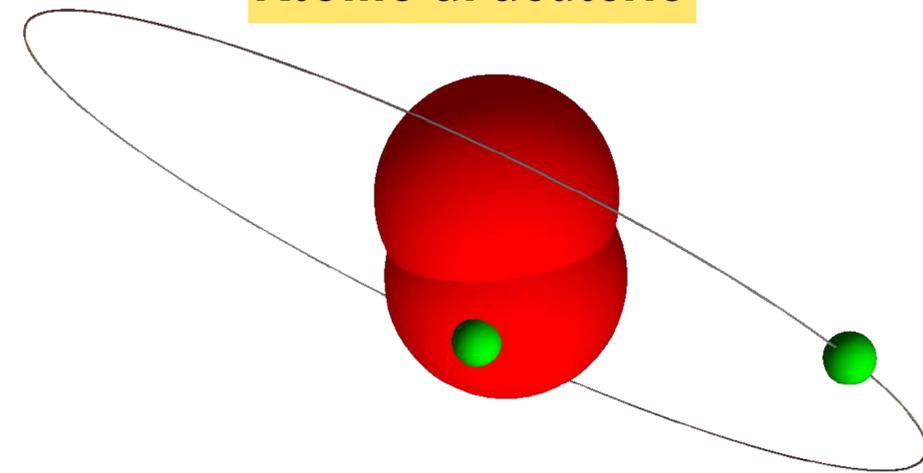
primo modello del nucleo - anni '20

una particella pesante, il **protone**, una leggera, l'**elettrone**

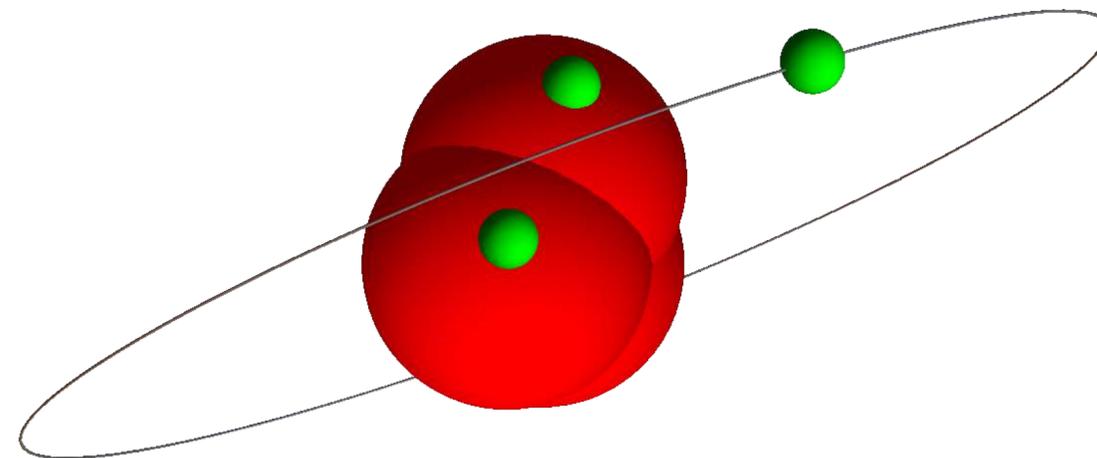
Atomo di idrogeno



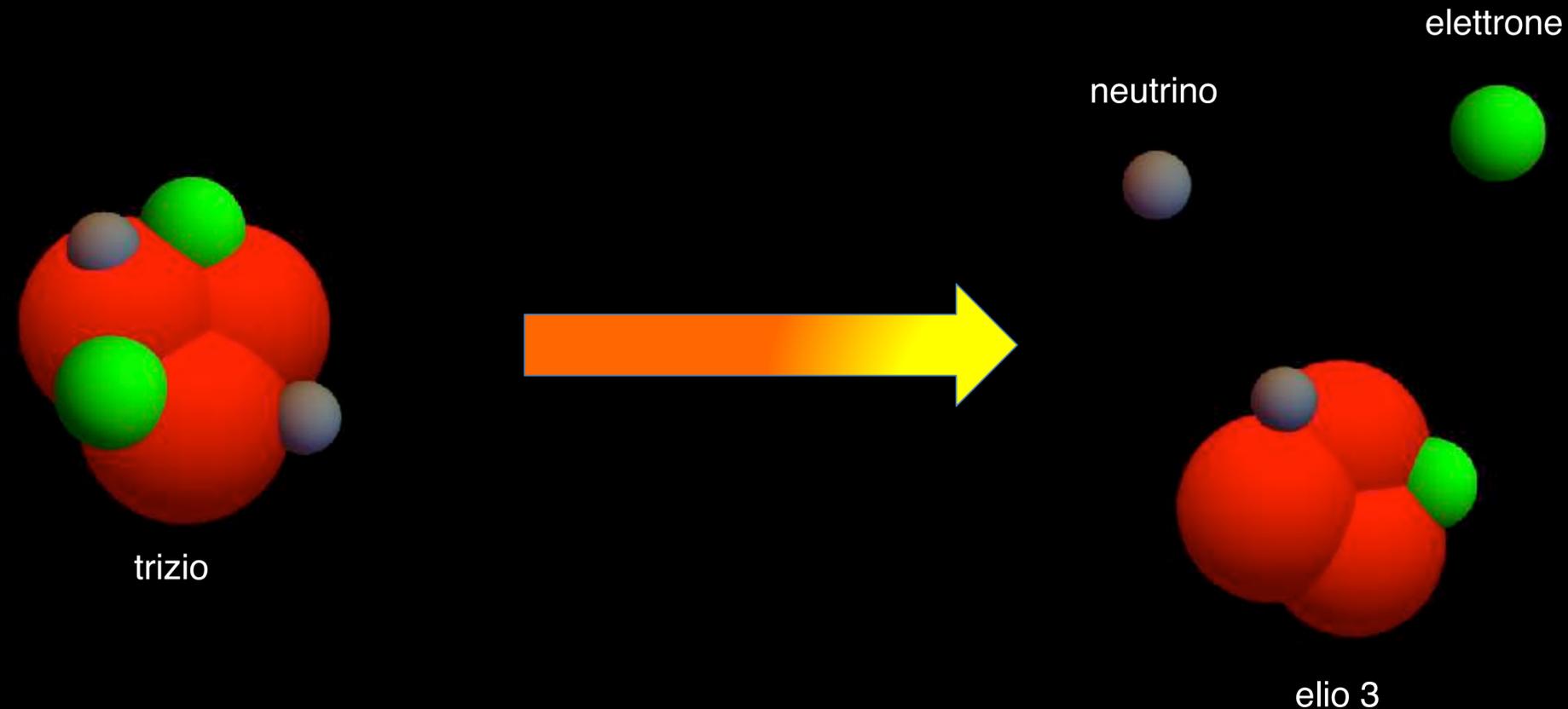
Atomo di deuterio



Atomo di trizio



modello del nucleo di Pauli (1930)

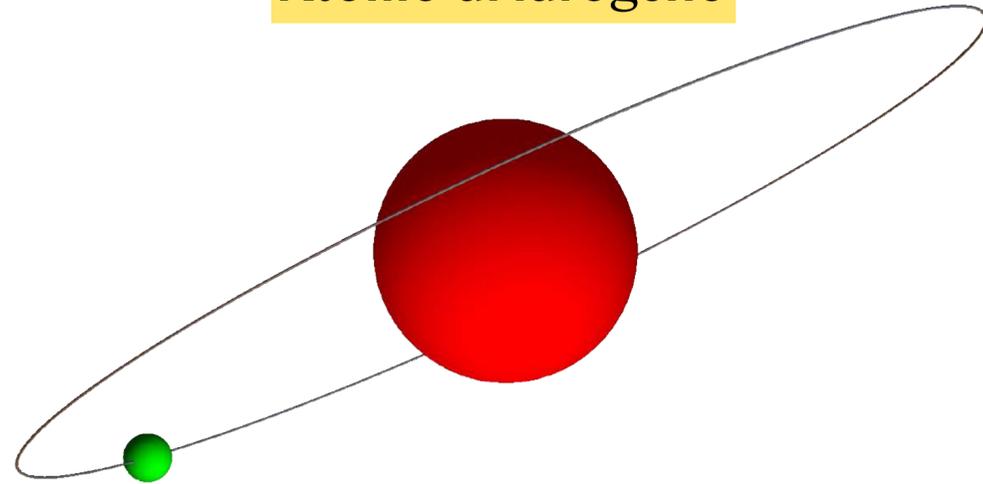


il nucleo contiene elettroni, protoni e neutrini.
questi ultimi sottraggono energia nel decadimento β

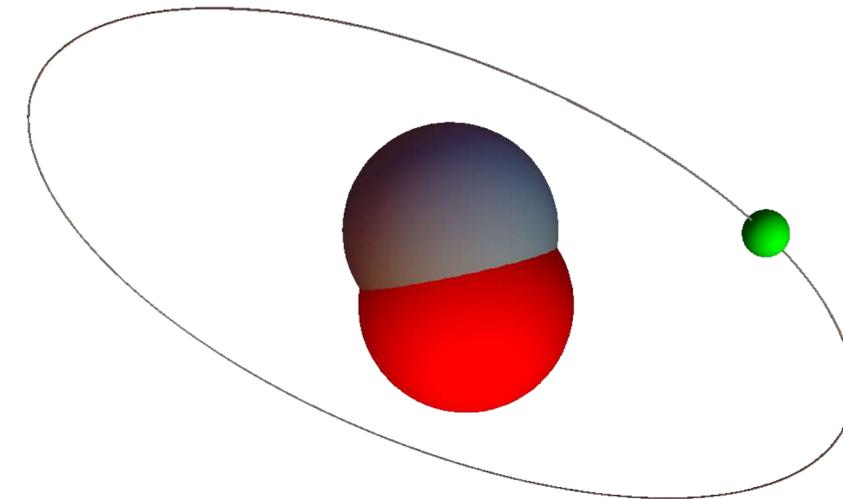
modello finale del nucleo - 1932

due particelle pesanti, il **protone** e il neutrone

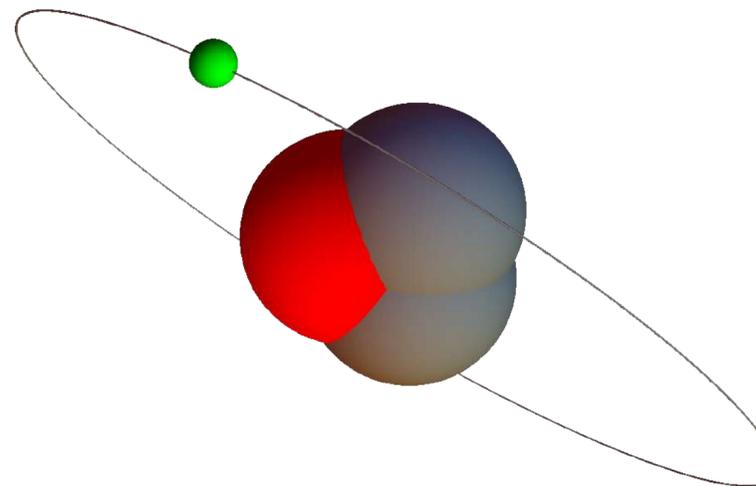
Atomo di idrogeno



Atomo di deuterio



Atomo di trizio



sui primi modelli del nucleo

- **Gli elettroni nel nucleo** furono ipotizzati anche da Thomson. Poco dopo van den Broek li invoca per spiegare la radioattività β (1911). È famosa la versione di Rutherford (1920)
- Il modello di Pauli, coi **neutrini**, ne costituisce una semplice estensione.
- Il modello coi **neutroni** (1932) risolve i problemi della energia cinetica e del momento magnetico del nucleo, ma riapre la questione del decadimento β

2

**idee sulla materia al
tramontare dell'era
degli atomi immutabili**

nuove particelle di materia, inizio anni '30

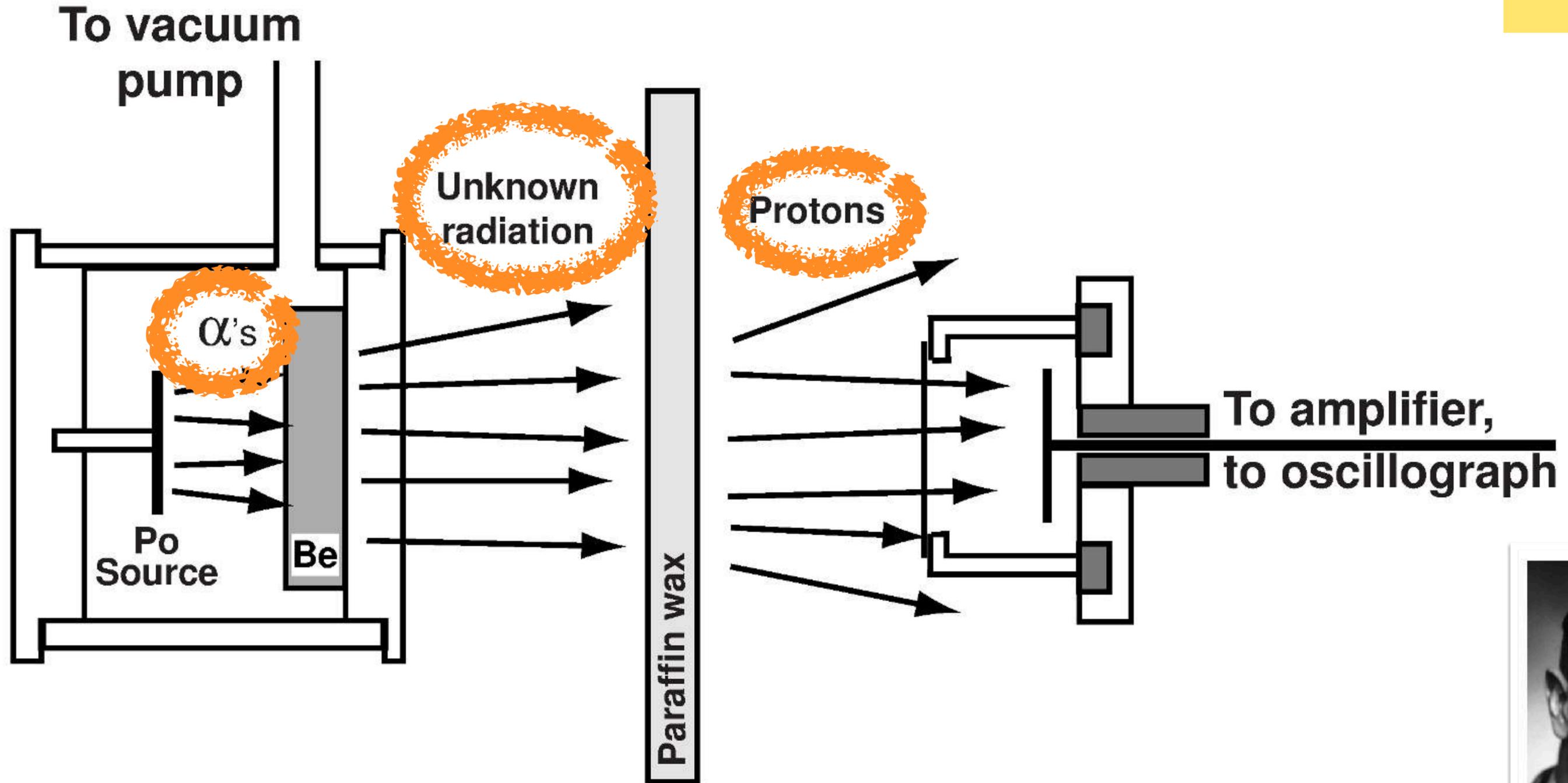
1 antielettroni / antimateria

2 neutroni

3 neutrini (teorizzati)

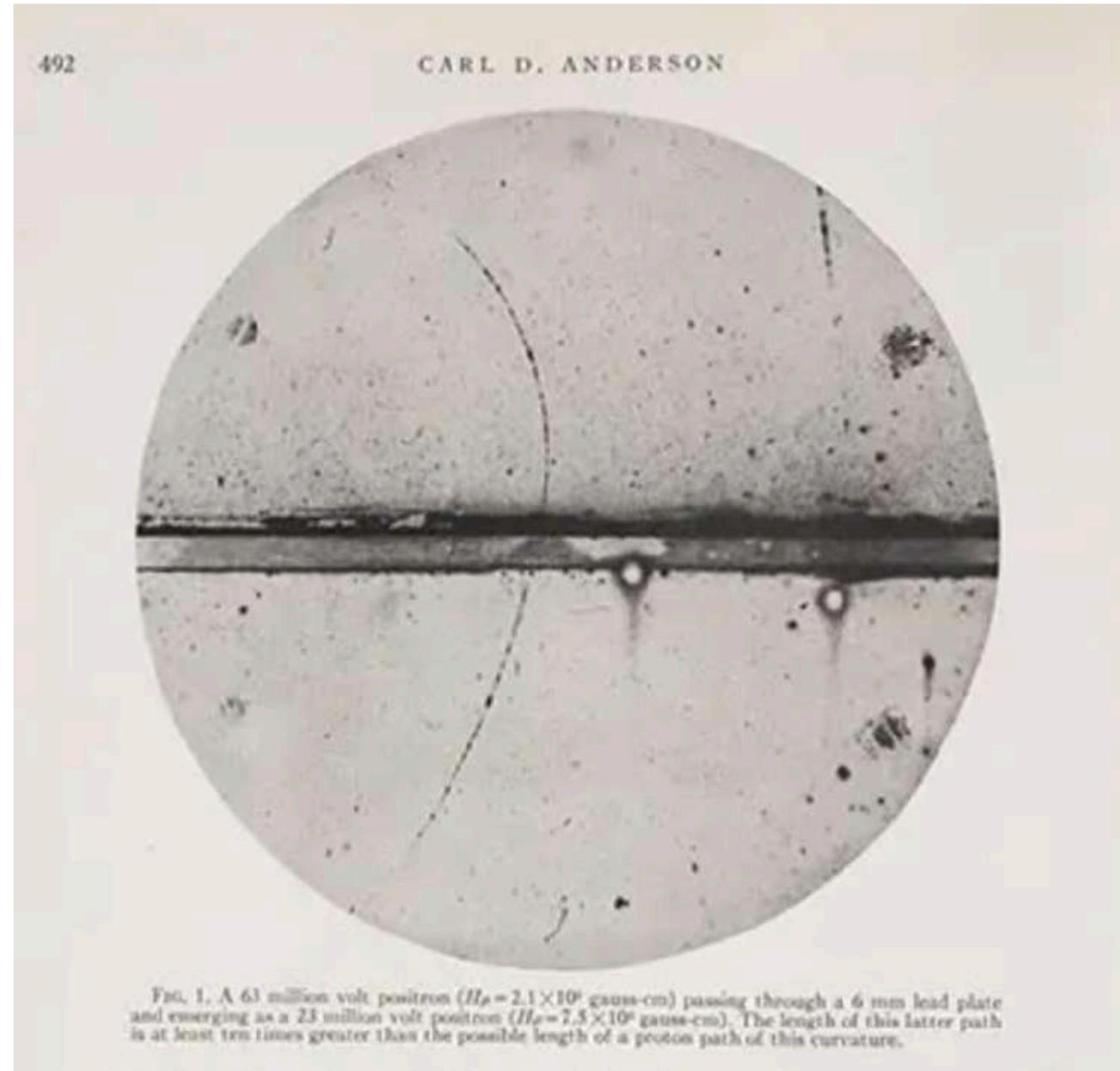
l'esperimento di Chadwick

1932



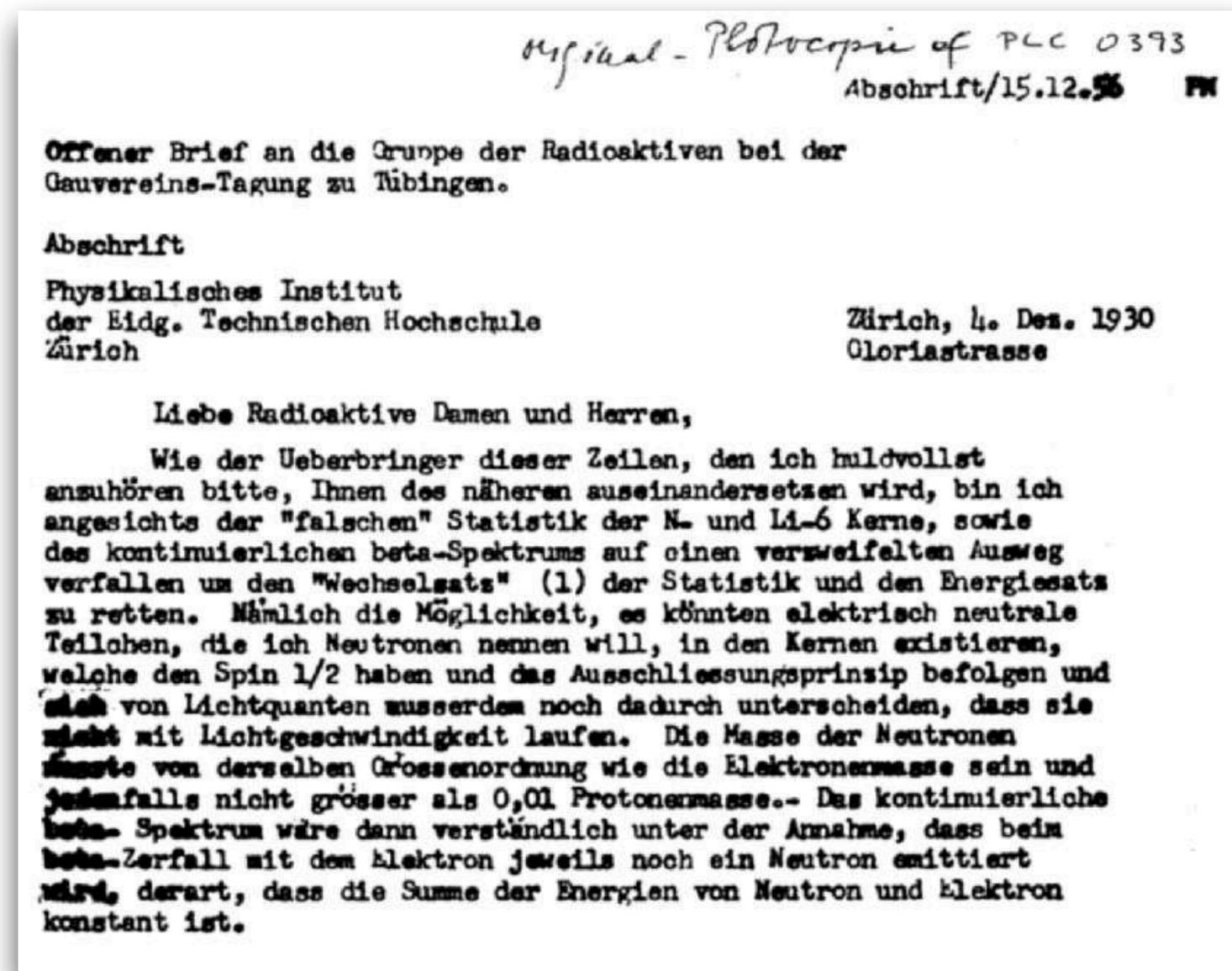
il risultato di Anderson

1932



la lettera di Pauli ai “colleghi radioattivi”

- *il nucleo contiene una nuova particella di materia con spin $1/2$*
- *essa spiega lo spin dei nuclei*
- *l'energia mancante nel decadimento beta viene trasportata da tale particella*
- *(si ipotizza per essi una piccola massa, debolissime interazioni, ecc)*
- ***i neutrini come le altre particelle di materia sono eterni***



reazione dei teorici alle scoperte

il **neutrone**, ipotizzato ben prima della sua scoperta, viene rapidamente accettato

il **positrone** crea sensazione; importanti teorici come Bohr, Pauli, Heisenberg, non Fermi, son a disagio con gli argomenti di Dirac

il **neutrino** *non* vien considerato seriamente fino al 1933 per l'autorevole opposizione di Bohr



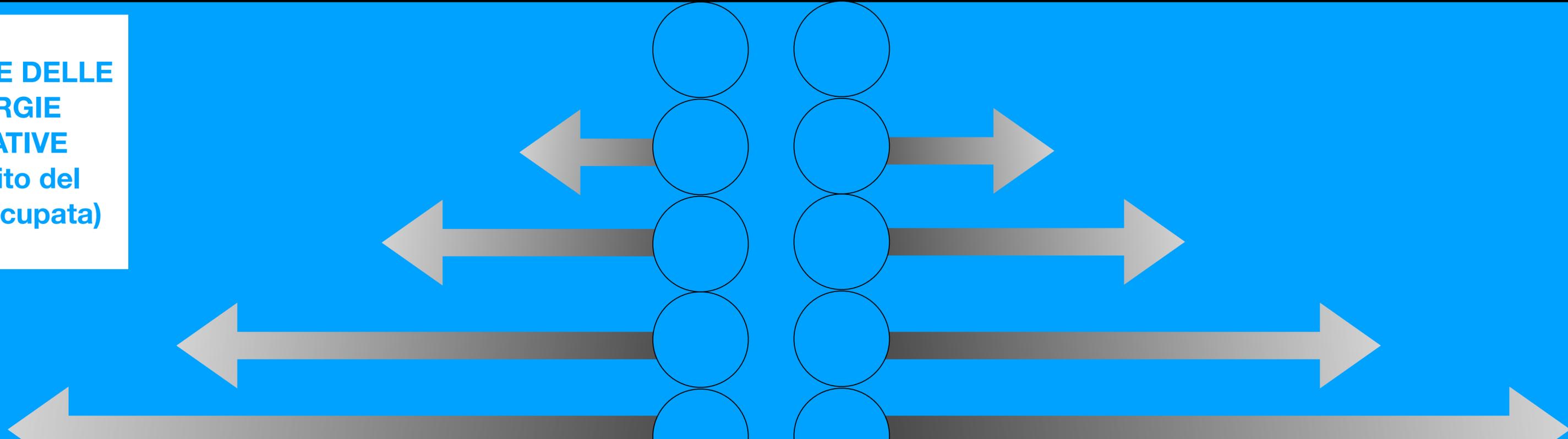
Caricatura del mare di Dirac di Gamow, dal libro "Trenta anni che sconvolsero la fisica"

GLI ELETTRONI CON ENERGIA NEGATIVA E IL “MARE DI DIRAC”

REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)

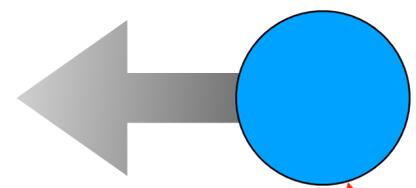
REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)



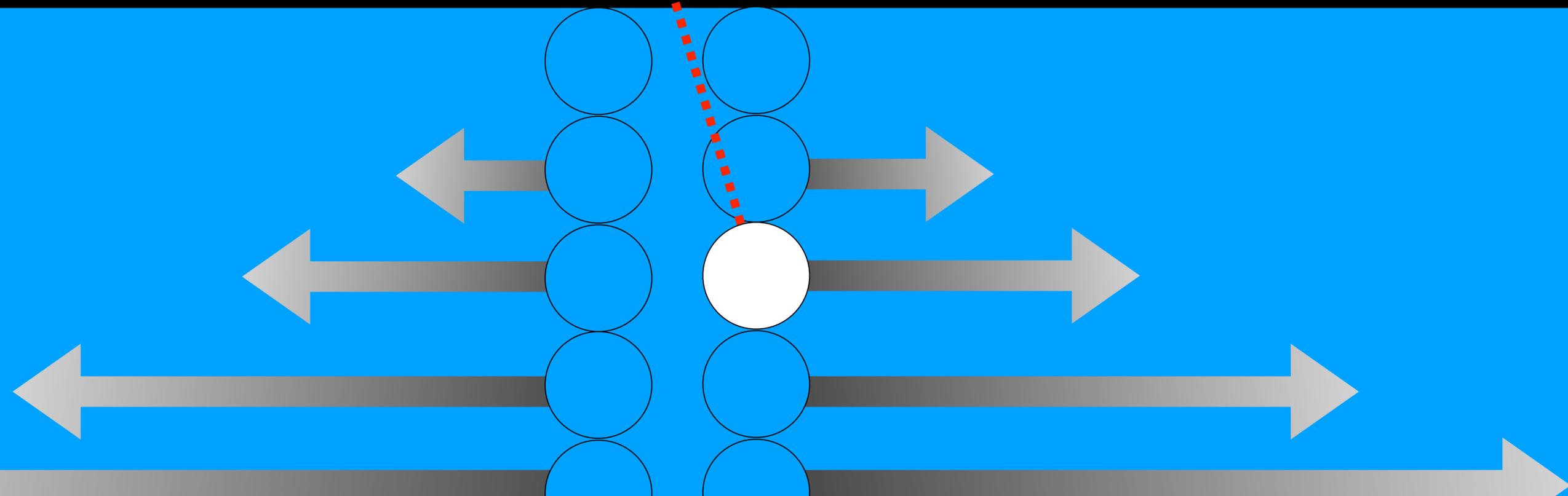
GLI ELETTRONI CON ENERGIA NEGATIVA E IL "MARE DI DIRAC"

REGIONE DELLE ENERGIE POSITIVE (di solito poco occupata)



REGIONE PROIBITA

REGIONE DELLE ENERGIE NEGATIVE (di solito del tutto occupata)



l'era degli atomi immutabili di materia perdura sino all'inizio degli anni 30

3

**esordi di un nuovo
concetto delle
particelle di materia**

- ★ Einstein (1905) suggerisce che i quanti di luce vengano creati o distrutti. L'idea si consolida con Compton; una teoria sarà formulata da Dirac
- ★ de Broglie (1924) propone di assimilare le particelle di materia ad onde
- ★ Questo motiva Ambarzumian e Iwanenko di tentar di modellizzare la creazione di elettroni nel decadimento β (1930), e a Francis Perrin di ragionare di creazione di neutrini di massa nulla (1933)

Fermi 1933

La via più semplice per la costruzione di una teoria che permetta una discussione quantitativa dei fenomeni in cui intervengono gli elettroni nucleari, sembra in conseguenza doversi ricercare nella ipotesi che gli elettroni non esistano come tali nel nucleo prima della emissione β , ma che essi, per così dire, acquistino esistenza nell'istante stesso in cui vengono emessi; allo stesso modo come un quanto di luce emesso da un atomo

elettroni “creati”; e fin qui l'idea potrebbe sembrare già vista, ma...

Fermi 1933

Il formalismo matematico più semplice per costruire una teoria in cui il numero delle particelle leggere (elettroni e neutrini) non sia necessariamente costante, si ha nel metodo di Dirac–Jordan–Klein delle « ampiezze di probabilità quantizzate ». In questo formalismo le ampiezze di probabilità ψ

Nella teoria presente invece la possibilità della variazione del numero degli elettroni si ottiene introducendo i due operatori opposti ψ e ψ^* in termini separati della energia di interazione.

$$\psi = \sum_s \psi_s a_s \quad ; \quad \psi^* = \sum_s \psi_s^* a_s^*.$$

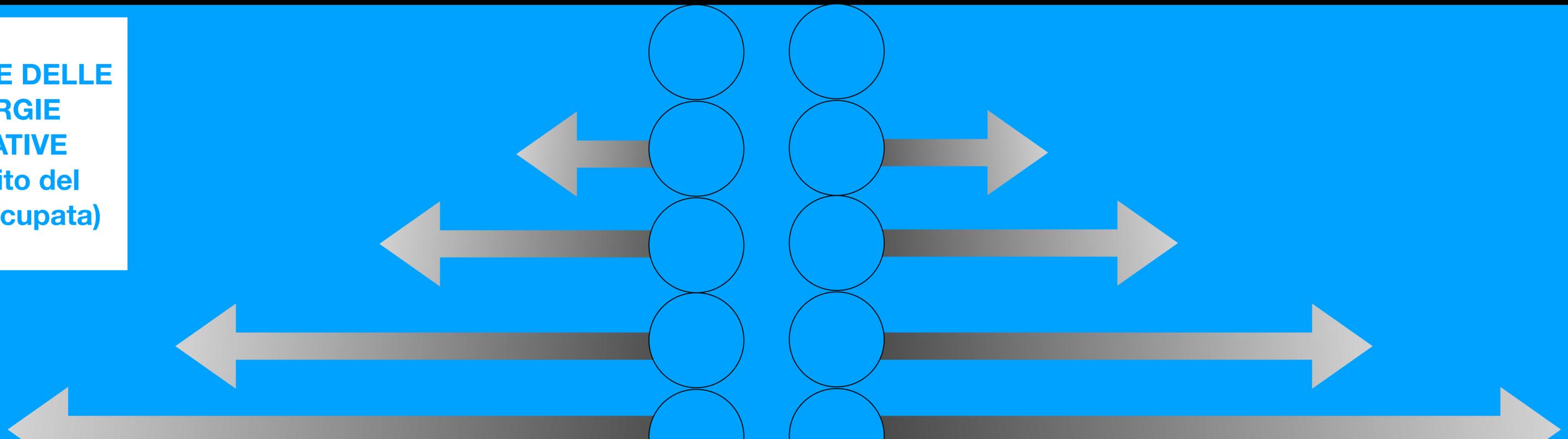
NB l'espressione del campo viene esplicitata nel lavoro del 1934

DESCRIZIONE DI FERMI DELLA CREAZIONE DI PARTICELLE

REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)

REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)



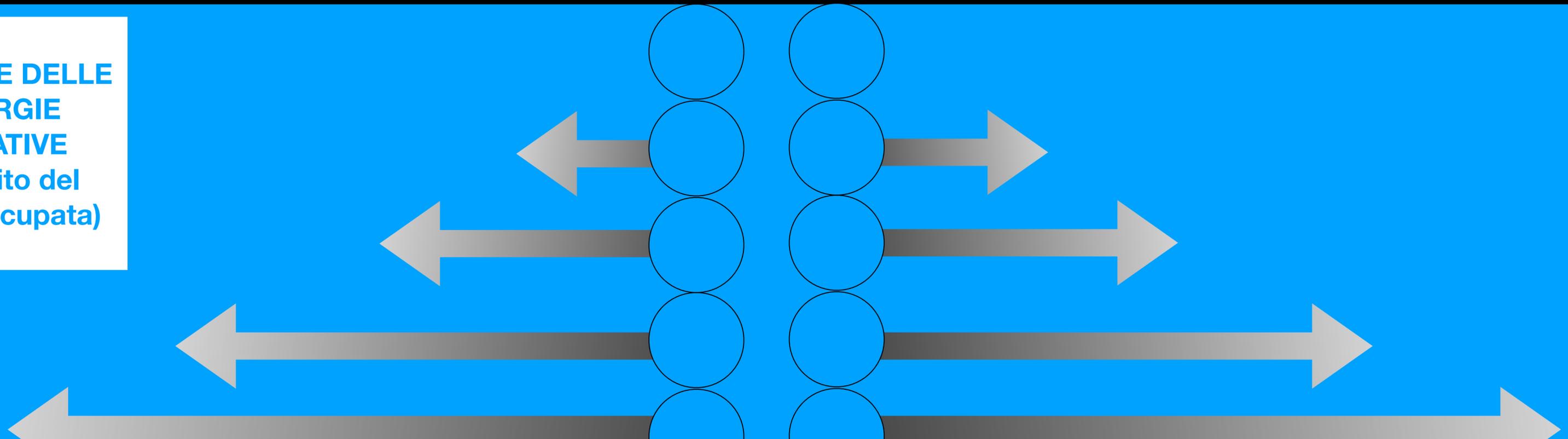
DESCRIZIONE DI FERMI DELLA CREAZIONE DI PARTICELLE

REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)



REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)



l'ipotesi cruciale è dichiarata nel 1934

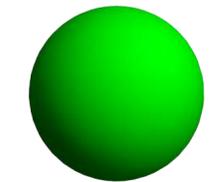
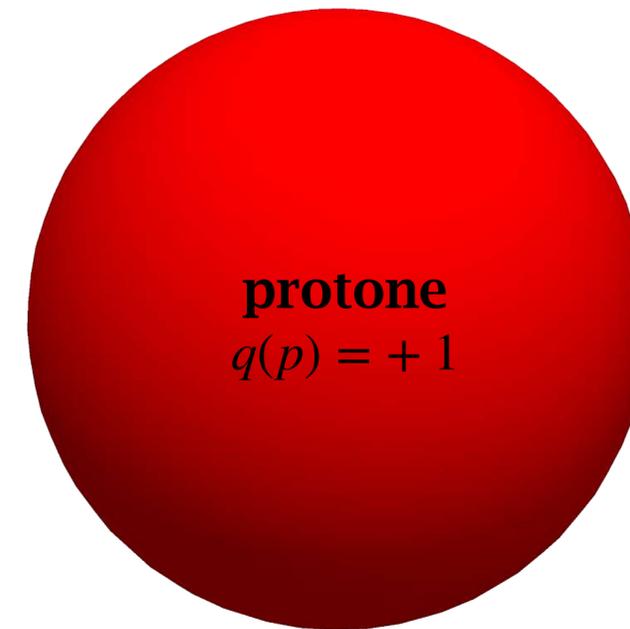
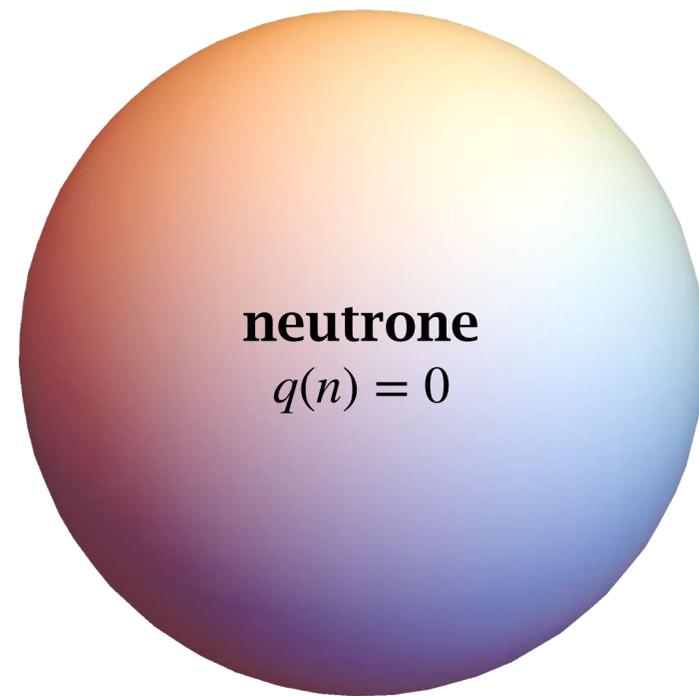
In ciò sono da considerarsi solo gli stati di energia positiva; gli stati di energia negativa debbono eliminarsi con un artificio simile alla teoria dei buchi di Dirac

l'ipotesi cruciale è dichiarata nel 1934

In ciò sono da considerarsi solo gli stati di energia positiva; gli stati di energia negativa debbono eliminarsi con un artificio simile alla teoria dei buchi di Dirac

il mare di Dirac garantisce la stabilità della materia

reazione fondamentale della teoria di Fermi



elettrone
 $q(e^-) = -1$



neutrino
 $q(\nu) = 0$

4

**implicazioni e
influenze del
“tentativo”**

$$\therefore p \rightarrow n + \bar{e} + \bar{\nu}$$

$$\therefore p + e \rightarrow n + \bar{\nu}$$

Atti della Reale Accademia Nazionale dei Lincei (1934) Vol. XIX, p.319

Fisica. — *Sugli elementi radioattivi di F. Joliot e I. Curie*⁽¹⁾.
Nota di G. C. WICK presentata⁽²⁾ dal corrisp. E. FERMI.

Questa Nota contiene un'applicazione della teoria della disintegrazione β , recentemente proposta da E. Fermi⁽³⁾, ai fenomeni di radioattività provocata osservati da F. Joliot e I. Curie⁽⁴⁾.

considerazioni di invarianza relativistica⁽¹⁾. La teoria contiene naturalmente anche la possibilità del processo inverso: trasformazione di un protone in un neutrone, e distruzione di un elettrone e un neutrino. Perché un tale processo possa avvenire è però essenziale che nelle vicinanze del nucleo vi sia una certa densità di neutrini. Questa densità è fornita precisamente dai neutrini di energia negativa; la distruzione di uno di questi neutrini equivale alla formazione di una particella (buco di neutrino) perfettamente analoga al neutrino. Se l'elettrone che viene assorbito è un elettrone di energia cinetica negativa, si ha emissione di un positrone. È naturale identificare questo fenomeno con quello osservato da Curie e Joliot⁽²⁾. Se invece l'elettrone è un elettrone atomico, si ha il fenomeno di cui si è detto. Valutiamo ora la probabilità di questa trasformazione.

La cattura elettronica viene osservata

il momento del nucleo finale è uguale e opposto a quello del neutrino, come previsto

pur non essendo una osservazione diretta è un importante supporto all'ipotesi del neutrino

PHYSICAL REVIEW JOURNALS ARCHIVE

Published by the American Physical Society

[Journals](#) [Authors](#) [Referees](#) [Browse](#) [Search](#) [Press](#) 

Experimental Evidence for the Existence of a Neutrino

James S. Allen

Phys. Rev. **61**, 692 – Published 1 June 1942

Article

References

Citing Articles (40)

PDF

Export Citation



ABSTRACT

Radioactive Be^7 was deposited on a platinum foil by means of a new evaporation technique. An electron multiplier tube was employed to count the recoil nuclei produced in the reaction, $\text{Be}^7 + e_{\text{K}} \rightarrow \text{Li}^7 + \eta + Q$. The maximum energy of the recoils was about 40 to 45 electron volts compared with the value of 58 electron volts to be expected for a neutrino of zero rest mass. An attempt was made to detect coincidences caused by the emission in opposite directions of a gamma-ray and a recoil nucleus. The observed coincidences were less than two percent of those expected for gamma-ray recoils. Apparently the recoils were caused by the emission of a neutrino and not by the emission of a gamma-ray.

Bethe & Peierls

Nature 133, 532 (1934)

- Una stima della sezione d'urto che equivale alla "crossing symmetry"!
- Il valore della sezione d'urto suggerisce agli autori che i neutrini siano **inosservabili**
- (Ma come tutti sanno, i neutrini verranno osservati da Reines e Cowan appena 20 anni dopo)

The cross section σ for such processes for a neutrino of given energy may be estimated from the lifetime t of β -radiating nuclei giving neutrinos of the same energy. (This estimate is in accord with Fermi's model but is more general.) Dimensionally, the connexion will be

$$\sigma = A/t$$

where A has the dimension $\text{cm.}^2 \text{ sec.}$ The longest length and time which can possibly be involved are \hbar/mc and \hbar/mc^2 . Therefore

$$\sigma < \frac{\hbar^3}{m^3 c^4 t}$$

For an energy of 2.3×10^6 volts, t is 3 minutes and therefore $\sigma < 10^{-44} \text{ cm.}^2$ (corresponding to a penetrating power of 10^{16} km. in solid matter). It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino.

H. BETHE.
R. PEIERLS.

Physical Laboratory,
University,
Manchester.
Feb. 20.

Yukawa 1934 passa ai termini moderni

Thus the result is the same as that of Fermi's theory, in this approximation, if we take

$$\frac{4\pi g g'}{\lambda^2} = 4 \times 10^{-50} \text{cm}^3 \cdot \text{erg},$$

from which the constant g' can be determined. Taking, for example, $\lambda = 5 \times 10^{12}$ and $g = 2 \times 10^{-9}$, we obtain $g' \cong 4 \times 10^{-17}$, which is about 10^{-8} times as small as g .

★ Propagatore nello spazio delle coordinate $\sim \exp(-\lambda r)/r$

★ Ponendo $\lambda = 0.5 \text{ fm}$, risulta $m_U c^2 = (\hbar c)\lambda = 100 \text{ MeV}$

★ Le unità di misura di g, g' son quelle della carica, $\sqrt{\text{erg cm}}$

★ Adroni e leptoni si accoppiano con costanti molto diverse



le due idee centrali di Fermi alla prova del tempo

descrizione del decadimento β : dibattito

- ▶ *Pauli: la teoria cessa di valere ad energie abbastanza alte; lo spettro delle transizioni permesse è dato semplicemente dallo spazio delle fasi*
- ▶ *Gamow e Teller: le correnti **non sono puramente vettoriali**. Partendo da **Lee&Yang** si arriverà alla teoria **V-A** e poco dopo a quella di **Cabibbo***
- ▶ *Majorana introduce la **moderna quantizzazione** dei campi fermionici, superiore al formalismo di Dirac-Jordan-Klein basato sul mare di Dirac*

descrizione del decadimento β : dibattito

► Pauli: la teoria cessa di valere ad energie abbastanza alte, la conservazione dell'energia e del momento angolare permesse è dato semplicemente dallo spin

► Gamow e Teller: la teoria di Fermi basata sulla quantizzazione dei campi fermionici, superiore al modello di Fermi basata sulla quantizzazione dei campi bosonici, partendo da Lee & Yang si arriva a una teoria di Fermi basata sulla quantizzazione dei campi fermionici, superiore al modello di Fermi basata sulla quantizzazione dei campi bosonici

queste critiche non han scalzato la teoria di Fermi: l'hanno raffinata!

► Dirac-Jordan-Klein basato sul mare di Dirac

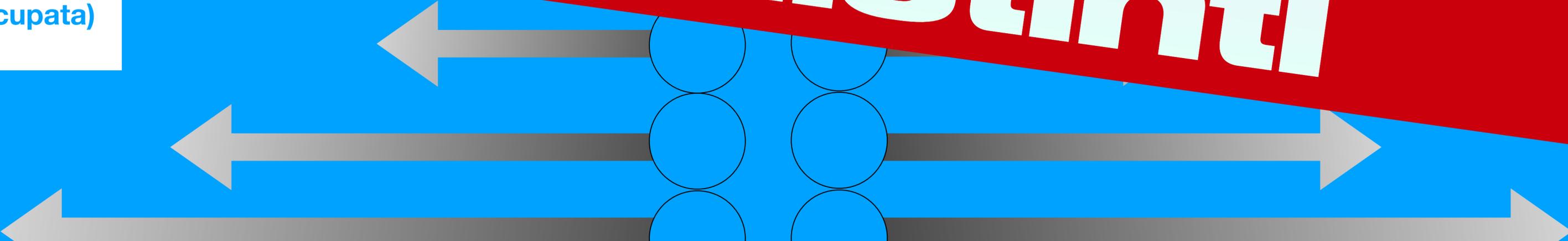
CONCETTO DI NEUTRINO / DESCRIZIONE DEI FERMIONI

...IONE DELLE



neutrini e antineutrini sono distinti

NEGATIVE
(di solito del tutto occupata)



il concetto di neutrino

- ★ Pauli introduce il neutrino nella convinzione che l'energia si conservi
- ★ Il concetto di neutrino è elaborato sulle linee di de Broglie (assimilandolo al fotone di Einstein) da Ambarzumian & Iwanenko e F. Perrin
- ★ Fermi è il primo che propone una teoria predittiva
- ★ Il “neutrino di Fermi” è quello oggi detto “**neutrino di Dirac**”
- ★ La quantizzazione dei fermioni e l'idea di neutrino oggi in auge saranno proposti poco dopo da un altro ragazzo di via Panisperna

il concetto di neutrino

- ★ Pauli introduce il neutrino nella convinzione che l'energia si conservi
- ★ Il concetto di neutrino è elaborato sulle linee di de Broglie (assimilandolo al fotone di Einstein) da Ambarzumian & Iwanenko e F. Perrin
- ★ Fermi è il primo che propone una teoria predittiva
- ★ Il “neutrino di Fermi” è quello oggi detto “neutrino di Dirac”
- ★ La **quantizzazione** dei fermioni e l'idea di **neutrino** oggi in auge saranno proposti poco dopo da un altro ragazzo di via Panisperna

1937

il mare di Dirac si svuota; nuova idea di neutrino

Pauli & Weisskopf 1934 quantizzano (ipotetiche) particelle con spin nullo senza usare il mare Dirac

Majorana 1937 mostra come fare a meno del mare di Dirac per gli elettroni, le particelle più importanti

(Certi piccoli ritocchi di Kramer - la matrice C - ne rinforzano le conclusioni)

Con questo lavoro nasce la moderna teoria dei campi e il concetto di neutrino oggi più in voga

TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

Sunto. - Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di DIRAC ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati di energia negativa; nè a presumere per ogni altro tipo di particelle, particolarmente neutre, l'esistenza di « antiparticelle » corrispondenti ai « vuoti » di energia negativa.

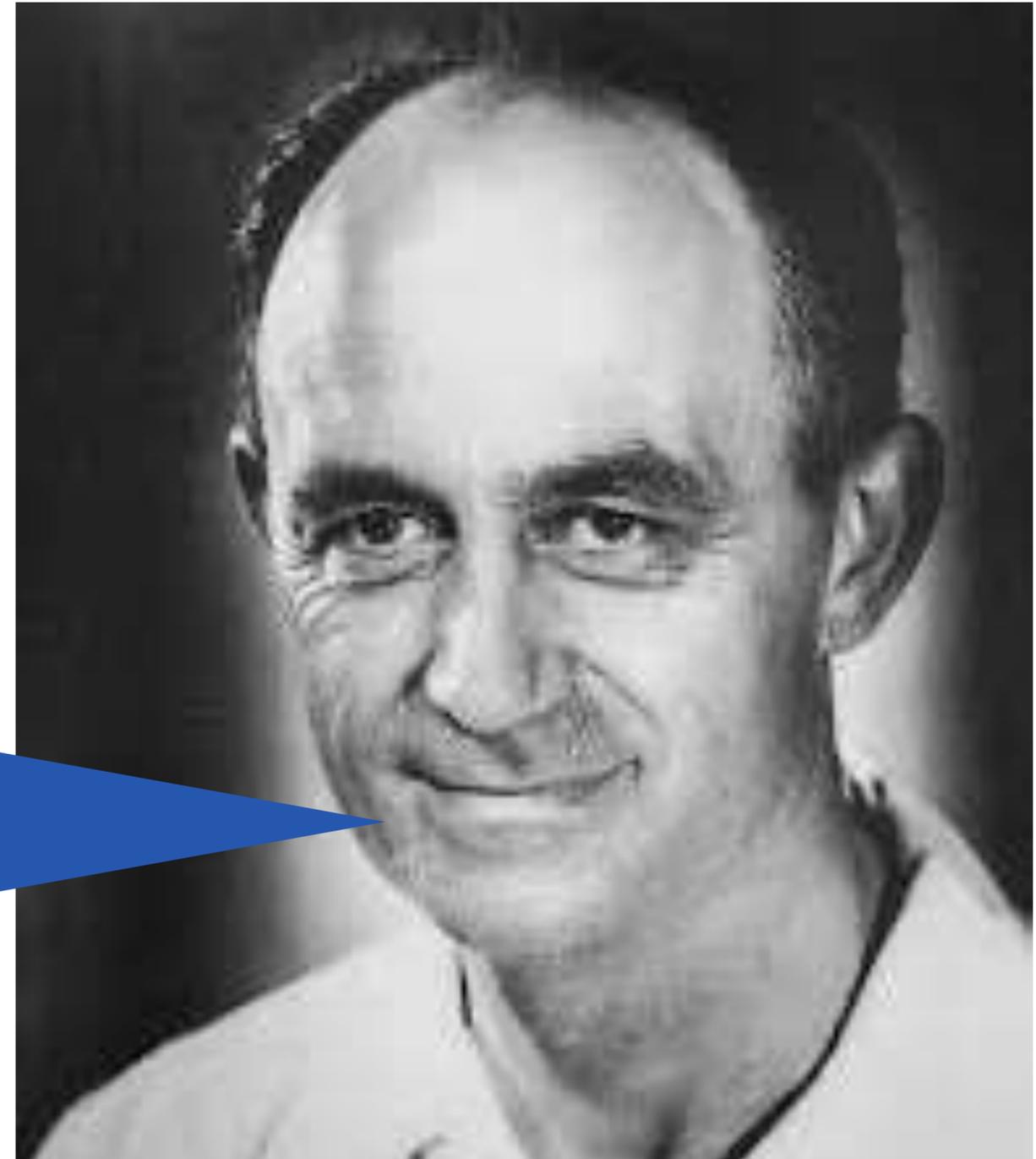
L'interpretazione dei cosiddetti « stati di energia negativa » proposta da DIRAC ⁽¹⁾ conduce, come è ben noto, a una descrizione sostanzialmente simmetrica degli elettroni e dei positroni. La sostanziale simmetria del formalismo consiste precisamente in questo, che fin dove è possibile applicare la teoria girando le difficoltà di convergenza, essa fornisce realmente risultati del tutto simmetrici. Tuttavia gli artifici suggeriti per dare alla teoria una forma simmetrica che si accordi con il suo contenuto, non sono del tutto soddisfacenti; sia perchè si parte sempre da una impostazione asimmetrica, sia perchè la simmetrizzazione viene in seguito ottenuta mediante tali procedimenti (come la cancellazione di costanti infinite) che possibilmente dovrebbero evitarsi. Perciò abbiamo tentato una nuova via che conduce più direttamente alla meta.



l'antimateria e la nuova quantizzazione di Ettore Majorana

... [Majorana] in un recente lavoro infine ha escogitato un **brillante** metodo che permette di trattare in modo simmetrico l'elettrone positivo e negativo, eliminando finalmente la necessità di ricorrere all'ipotesi estremamente artificiosa ed **insoddisfacente** di una carica elettrica infinitamente grande diffusa in tutto lo spazio, questione che era stata invano affrontata da molti altri studiosi.

*Dal giudizio su Majorana per il concorso a
cattedra a Palermo (1937)*



Fermi 1937

Tutto giustissimo, ma ricorderei che

- ~ Nel suo lavoro, Fermi stesso aveva utilizzato l'ipotesi del mare di Dirac.
- ~ I vincitori del concorso furono Wick, Racah, Gentile Jr.: bravissimi, ma anche “annunciati”.
- ~ La commissione chiese una posizione in più per *alta e meritata fama*. Il ministro Gentile disse di sì e Majorana finì a Napoli. (Che tristezza.)

Dirac-Jordan-Klein (Wigner, Fock, Fermi...)

$$\Psi(x) = \sum_s \psi_s(x) a_s$$

Majorana (e tutti quanti dopo di lui)

$$\Psi_a^{\text{real}}(x) = \sum_{s=s_+} \left(\psi_s(x) a_s + \psi_s^*(x) a_s^\dagger \right)$$

Dirac-Jordan-Klein (Wigner, Fock, Fermi...)

$$\Psi(x) = \sum_s \psi_s(x) a_s$$

Majorana (e tutti quanti dopo di lui)

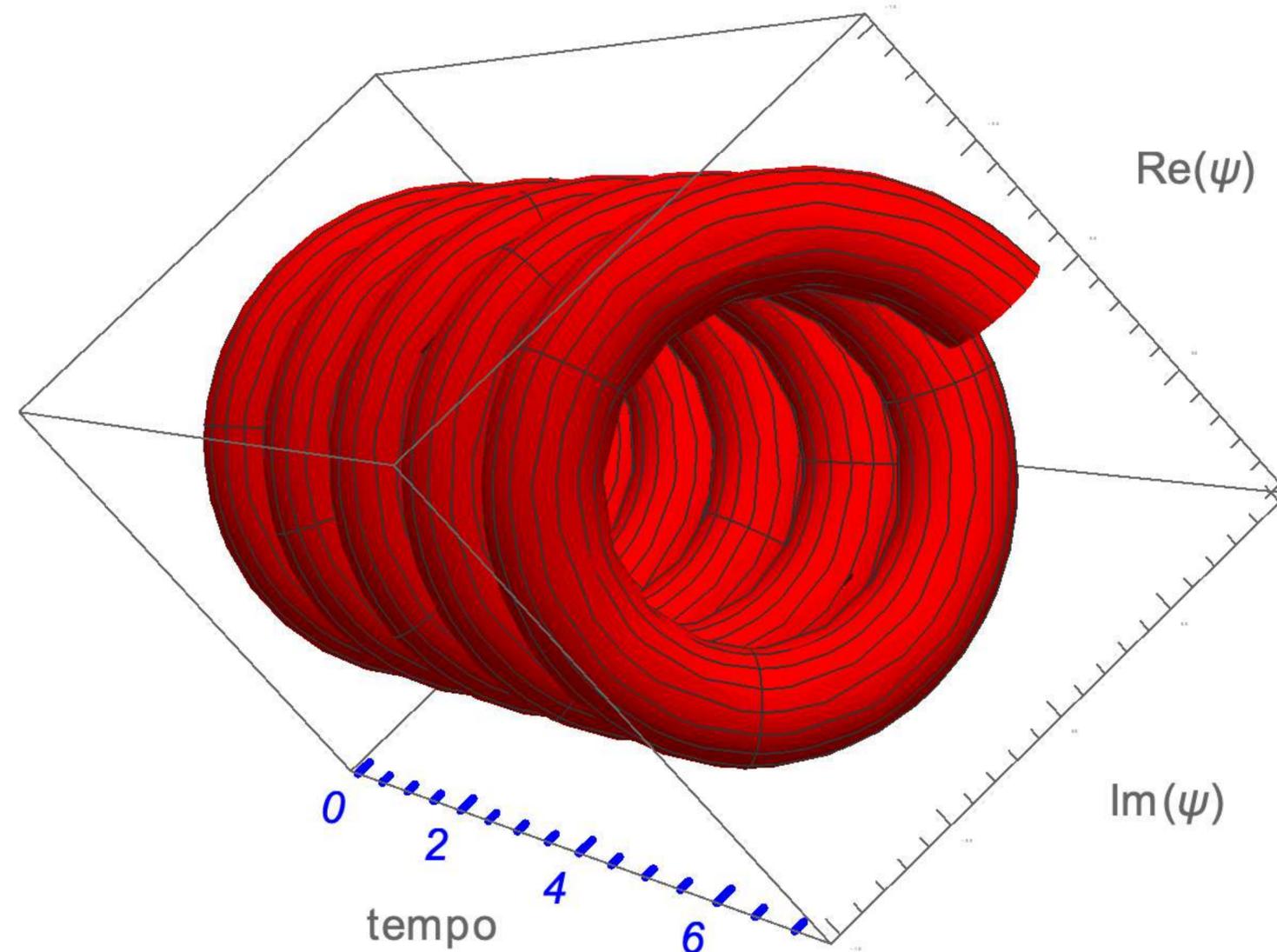
$$\Psi_c^{\text{cplx}}(x) = \sum_{s=s_+} \left(\psi_s(x) c_s + \psi_s^*(x) \bar{c}_s^\dagger \right)$$

capire le anti-particelle direttamente?

- ◎ **L'interpretazione di Dirac** si basa su una serie di ipotesi influenti, in particolare il mare di Dirac, che però oggi (dopo Majorana) non ci sembrano tanto necessarie come all'epoca.
- ◎ C'è poi un modo suggerito da Feynman, che è descritto 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 chiaro, ispirato da Stueckelberg. La teoria di Majorana aiuta molto ad esporlo, richiede di capire almeno equazione d'onda, numeri complessi, teoria di Maxwell. Chi fosse interessato può vedere qui: <https://inspirehep.net/literature/1849976>
- ◎ Di solito nei **percorsi universitari** le antiparticelle vengono presentate in uno dei corsi più difficili, mescolando formalismo e idee. Anche se è matematicamente impeccabile, questa strada è difficile da esporre. Non viene ricordato quasi mai che si basa sulle idee di Majorana.

il nuovo punto di vista

- ◎ Sappiamo da de Broglie che ogni particella è associata ad un **onda**, p.e., quelle che oscillano con un periodo T ovvero con una frequenza $f = 1/T$
- ◎ Einstein ci insegna che le onde con una frequenza f corrispondono a particelle con energia $E = hf$
- ◎ Pertanto, una “energia negativa” corrisponde ad una “frequenza negativa”, ovvero, ad **oscillare all'indietro** nel tempo
- ◎ In base a questo, un evento successo **dopo** un certo istante può essere pensato come un evento successo **prima** di quell'istante. P.e., l'emissione di una particella con energia negativa vien pensata come l'assorbimento di una con energia positiva.



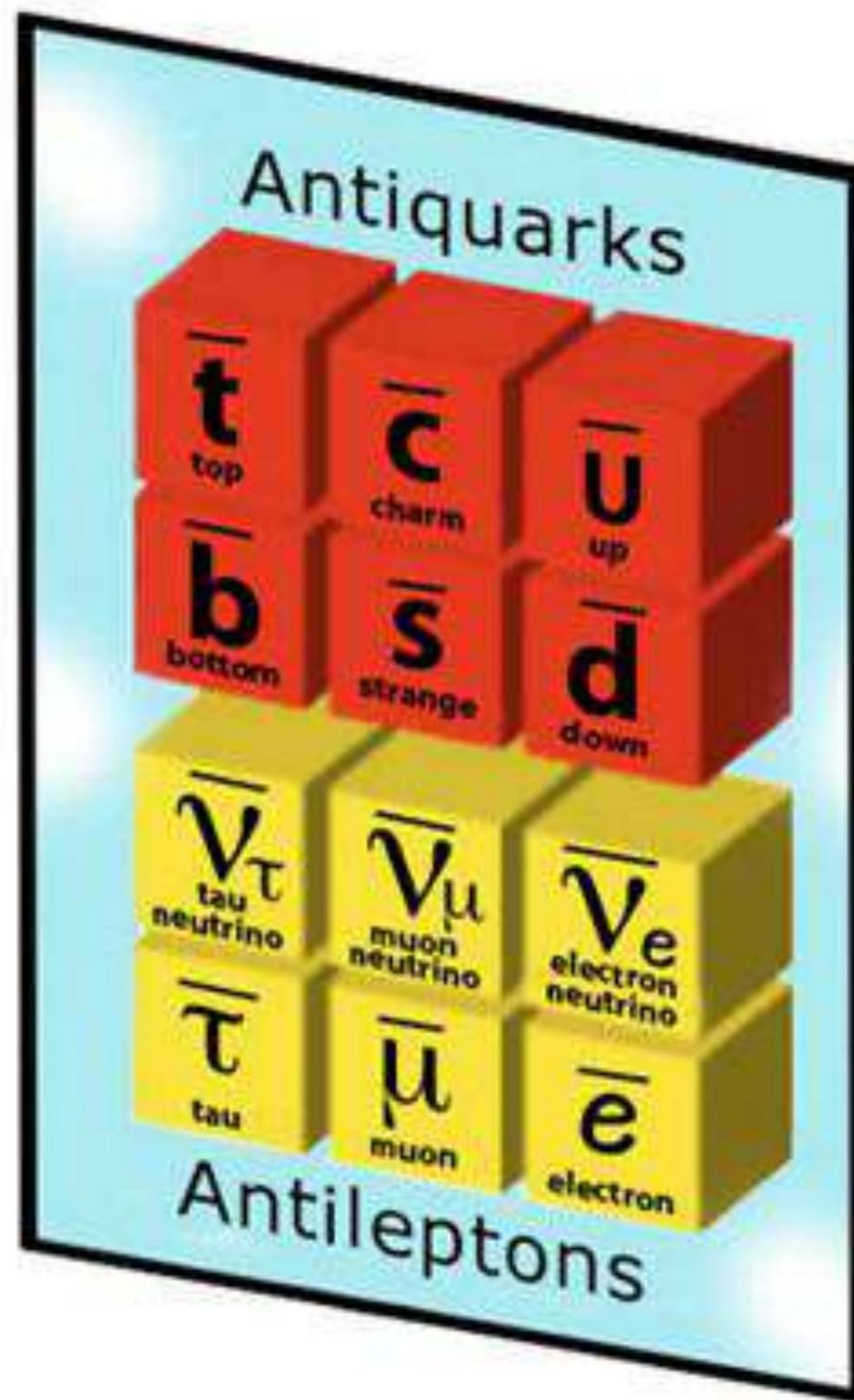
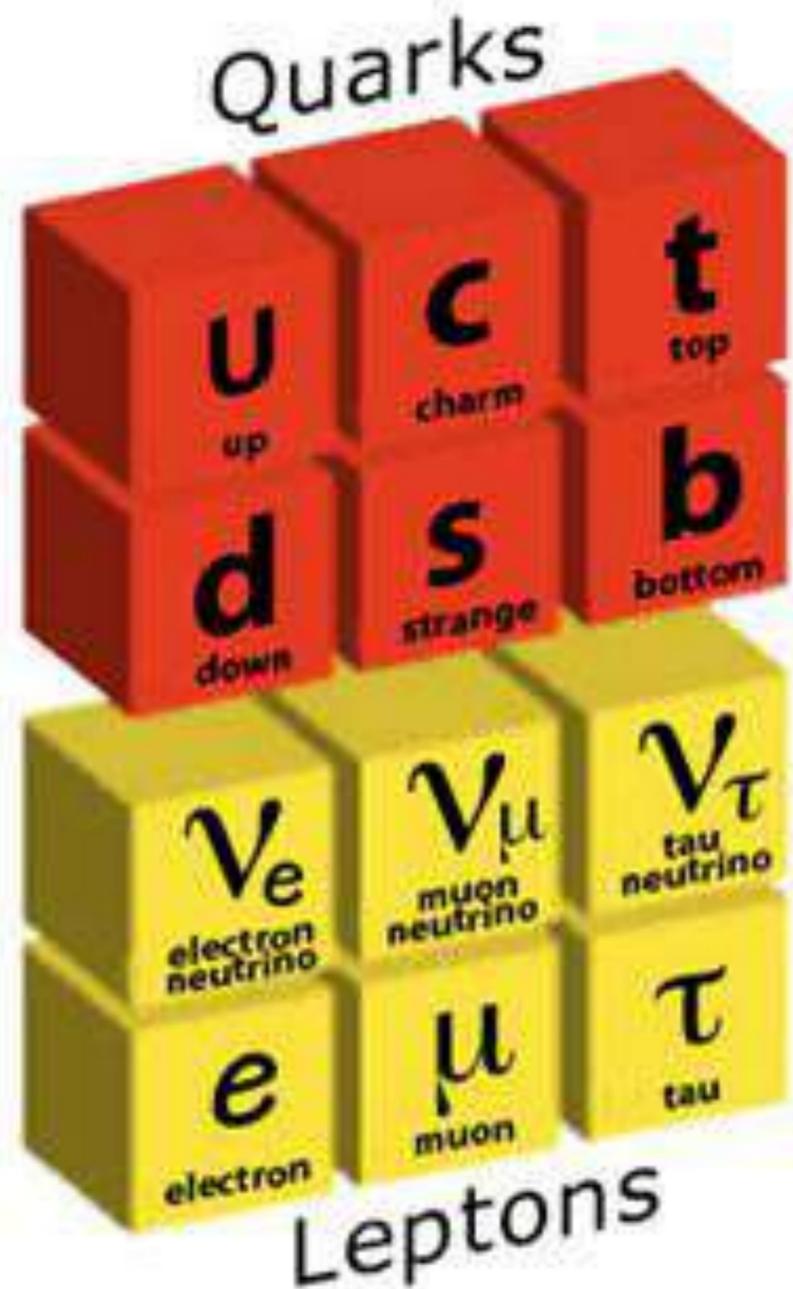
commento su (l'ultimo) lavoro di Majorana

Quella di Majorana è una impresa scientifica **eccezionale**.
Un motivo per cui non se ne parla in questi termini oggi è che
*molti scienziati non amano ricordare i passi falsi: preferiscono
credere in un ordine determinato una volta per tutte.*

(In un certo senso, Majorana ha fatto il suo lavoro troppo bene)



i neutrini di Majorana nel moderno contesto teorico



Particelle di materia e antimateria.

Credito: Fermilab

Questa bella figura trasmette in modo efficace molti concetti:

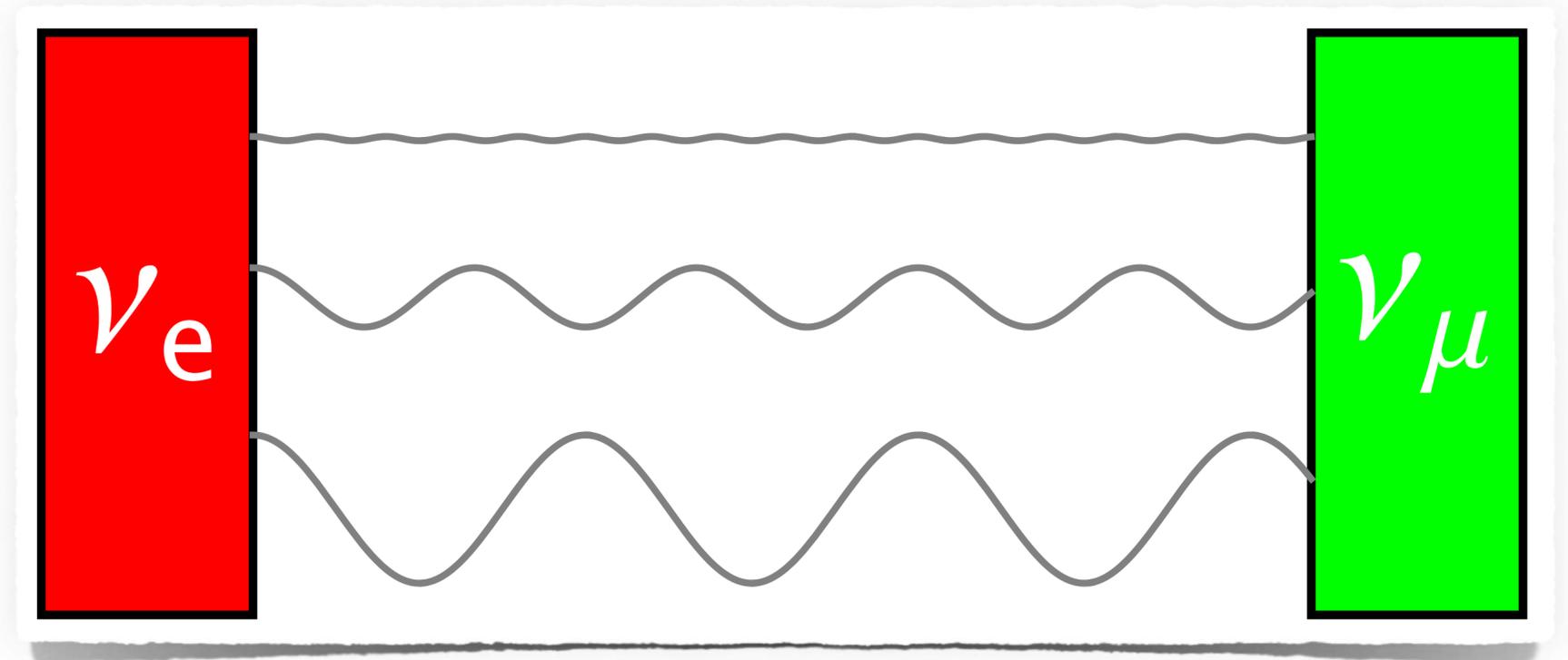
- * *particelle/antiparticelle*
- * *quark/leptoni*
- * *replica delle "famiglie"*

Ma fa nascere un legittimo dubbio:

cosa distingue tra loro neutrini ed antineutrini che non hanno carica elettrica?

i neutrini hanno massa

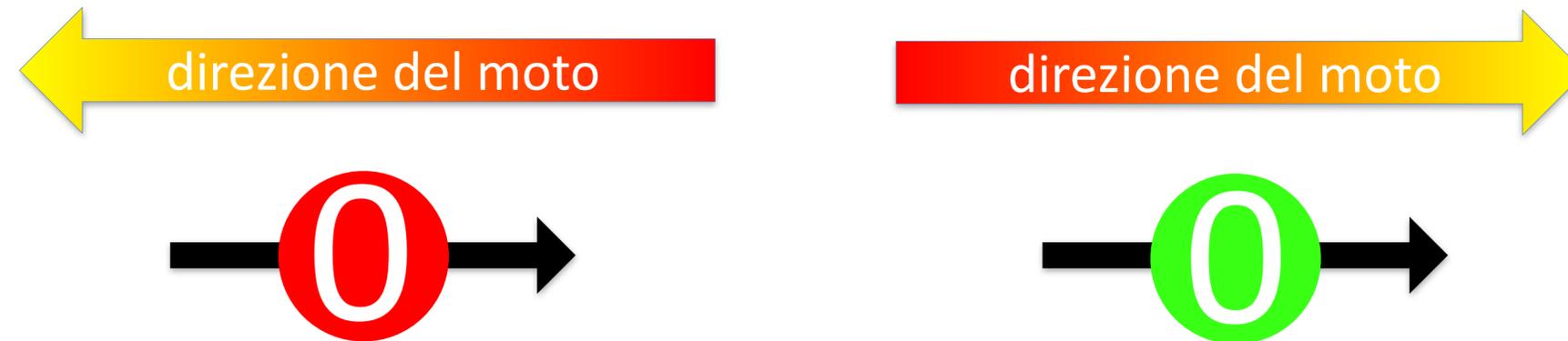
un fenomeno quantistico, previsto tra il 1957-1967, l'ha dimostrato



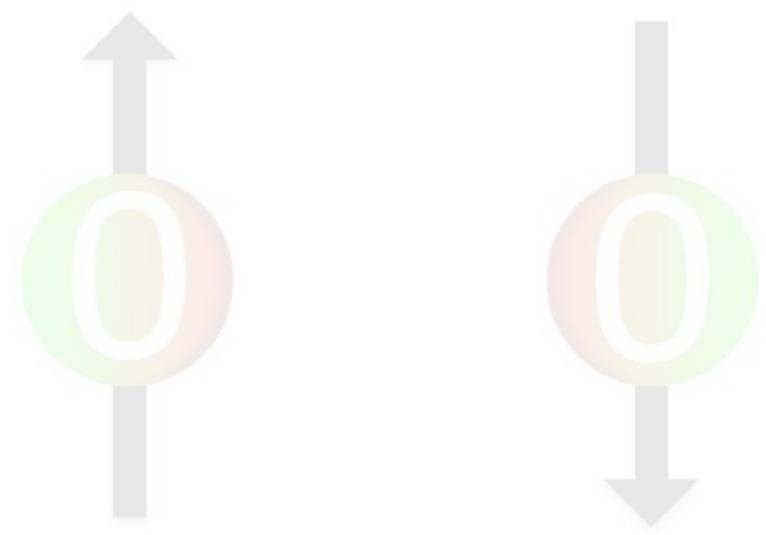
la prova, ottenuta con sforzi durati più di 30 anni, è stata riconosciuta dal Nobel in fisica assegnato a Kajita e a McDonald nel 2015

oscillazioni, B. Pontecorvo (1957-1967); **mescolamento neutrini**, Y. Katayama, K. Matumoto, S. Tanaka, E. Yamada (1962), Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata (1962) M. Nakagawa, H. Okonogi, S. Sakata, A. Toyoda (1963)

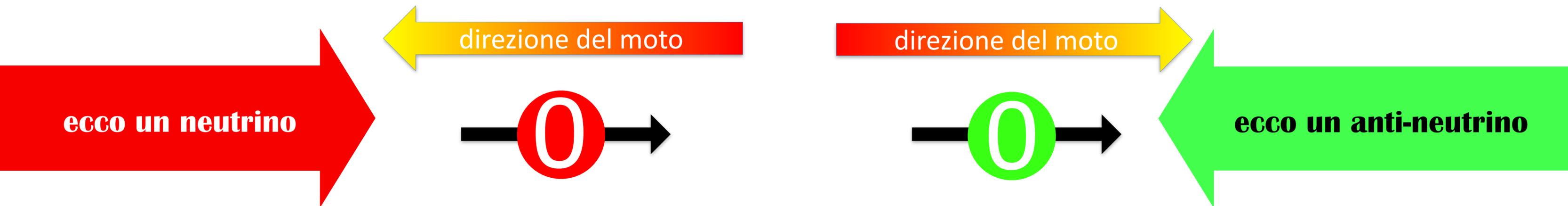
i neutrini di Majorana nel contesto moderno



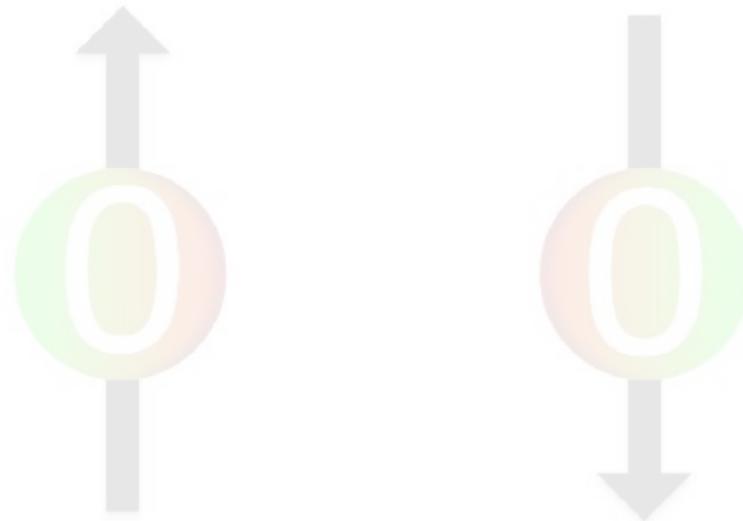
quando lo spin è parallelo son anti-neutrini e vicev.



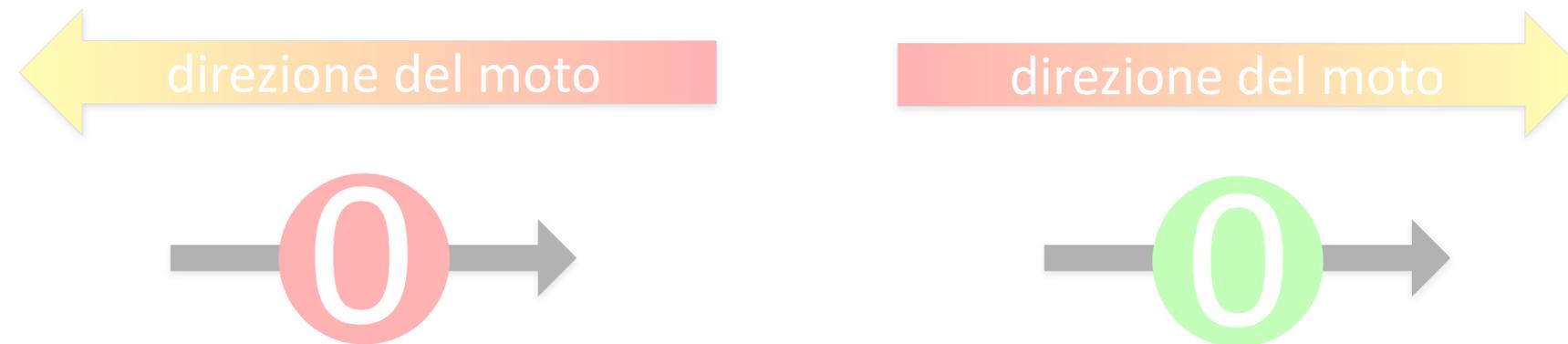
i neutrini di Majorana nel contesto moderno



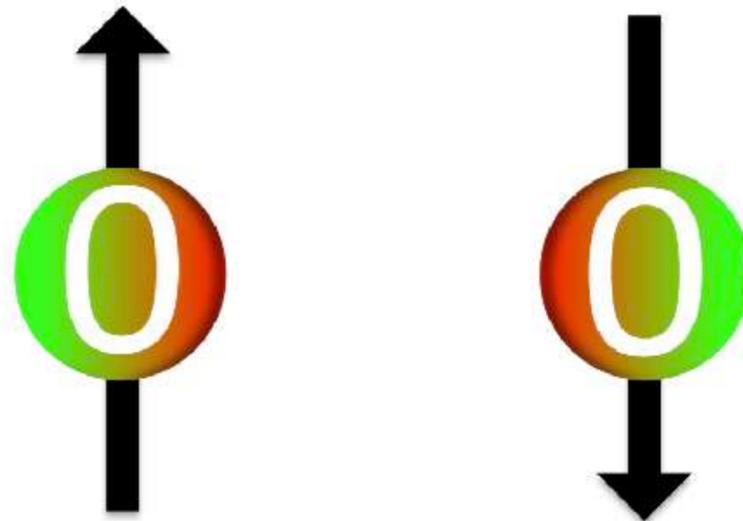
quando lo spin è parallelo son anti-neutrini e vicev.



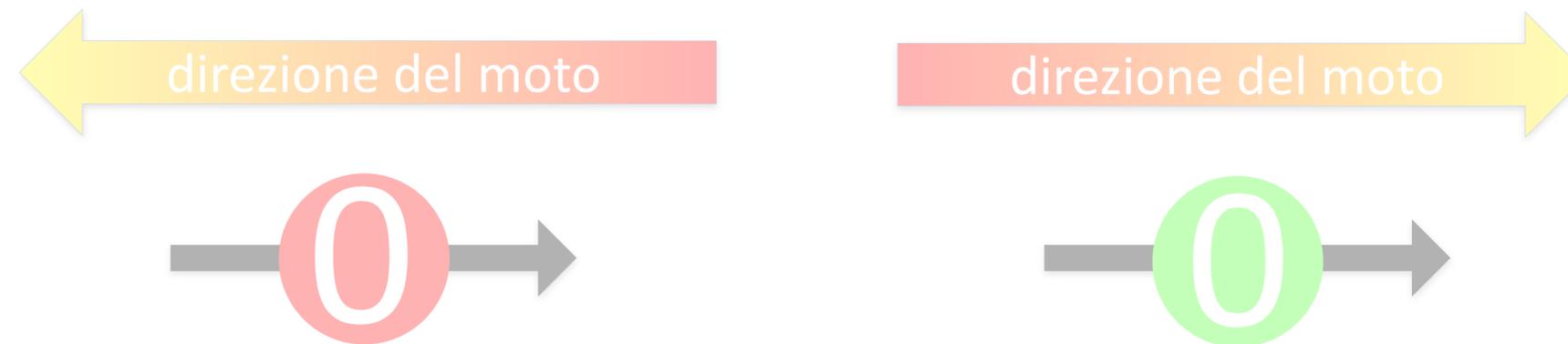
i neutrini di Majorana nel contesto moderno



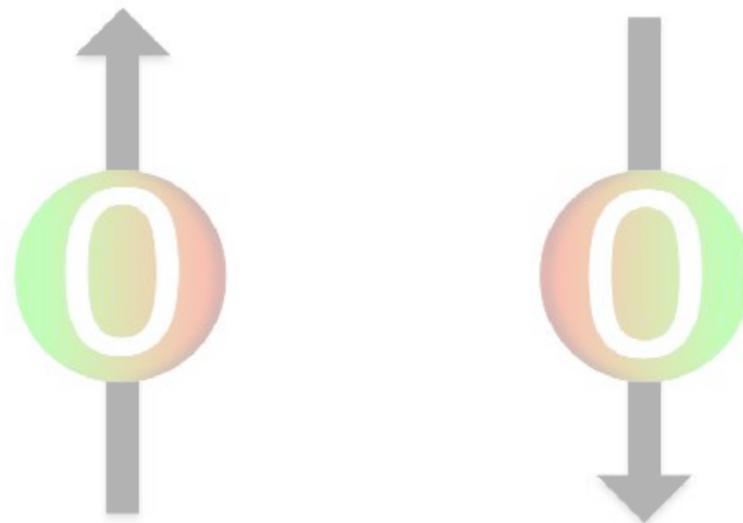
nel sistema a riposo, i due sembrerebbero uguali !!!



i neutrini di Majorana nel contesto moderno



ipotesi: i neutrini son materia e antimateria





implicazioni della teoria di Majorana del neutrino

oggi

Perché Majorana è attuale?

idee sulle particelle senza carica elettrica

Majorana 1937. Idea di particelle di materia reali=neutre; diventa possibile pensare che coincidano con le proprie antiparticelle

Questa ipotesi porta conseguenze osservabili, di cui cerchiamo le prove nei laboratori di tutto il mondo

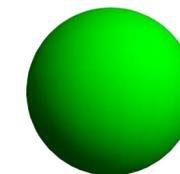
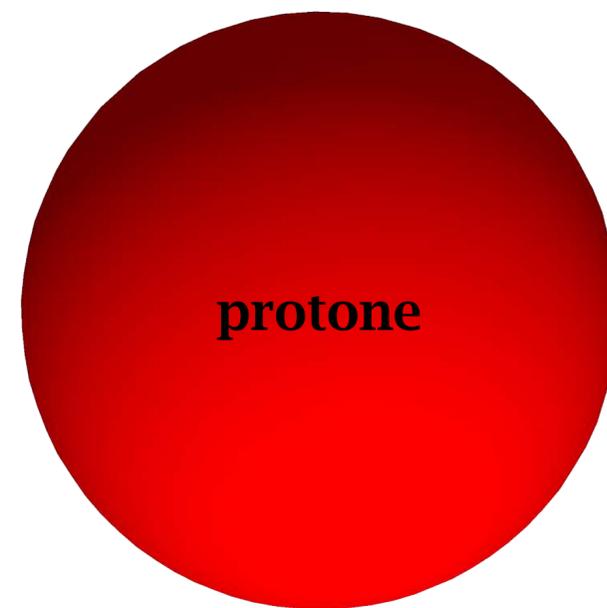
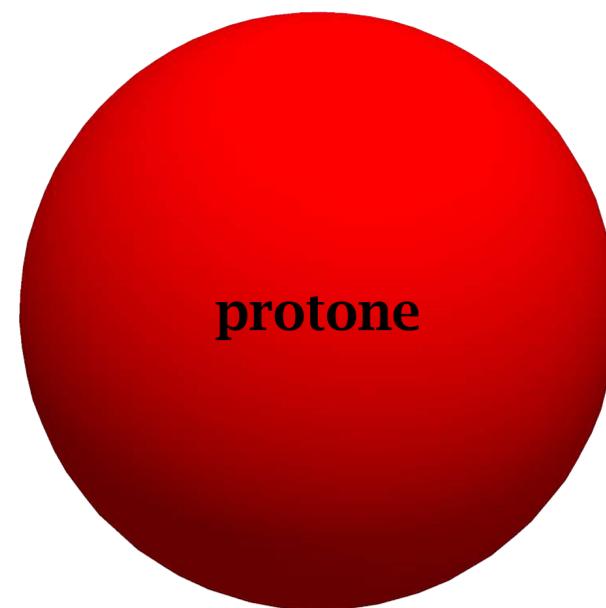
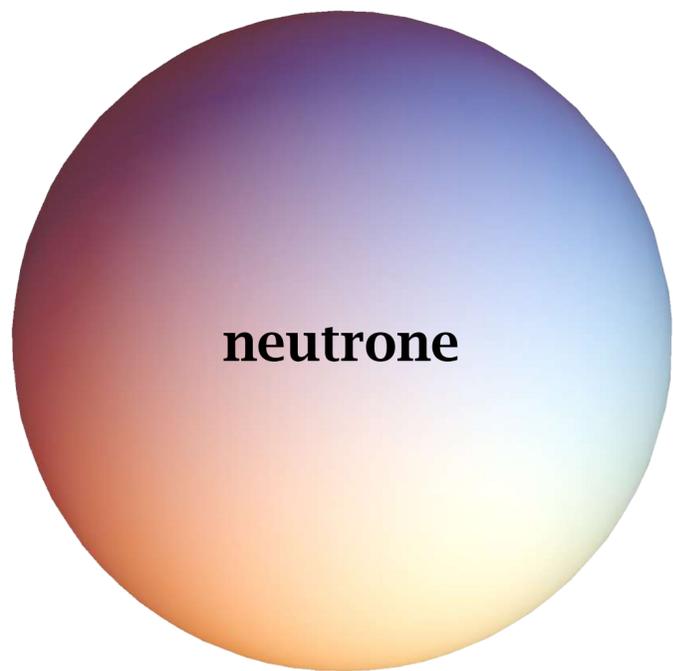
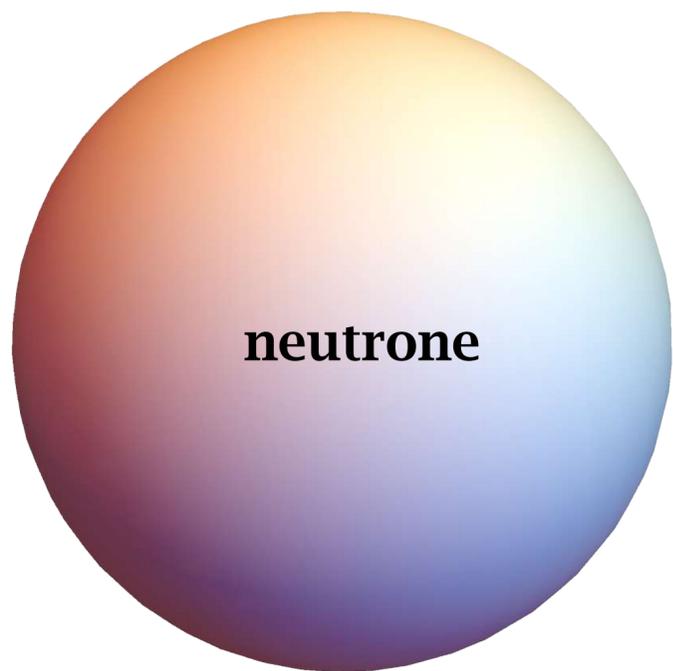
TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

Sunto. - Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di DIRAC ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati di energia negativa; nè a presumere per ogni altro tipo di particelle, particolarmente neutre, l'esistenza di « antiparticelle » corrispondenti ai « vuoti » di energia negativa.

L'interpretazione dei cosiddetti « stati di energia negativa » proposta da DIRAC (¹) conduce, come è ben noto, a una descrizione sostanzialmente simmetrica degli elettroni e dei positroni. La sostanziale simmetria del formalismo consiste precisamente in questo, che fin dove è possibile applicare la teoria girando le difficoltà di convergenza, essa fornisce realmente risultati del tutto simmetrici. Tuttavia gli artifici suggeriti per dare alla teoria una forma simmetrica che si accordi con il suo contenuto, non sono del tutto soddisfacenti; sia perchè si parte sempre da una impostazione asimmetrica, sia perchè la simmetrizzazione viene in seguito ottenuta mediante tali procedimenti (come la cancellazione di costanti infinite) che possibilmente dovrebbero evitarsi. Perciò abbiamo tentato una nuova via che conduce più direttamente alla meta.

**I
M
P
L
I
C
A
Z
I
O
N
I**



elettrone

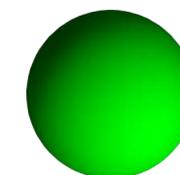


neutrino

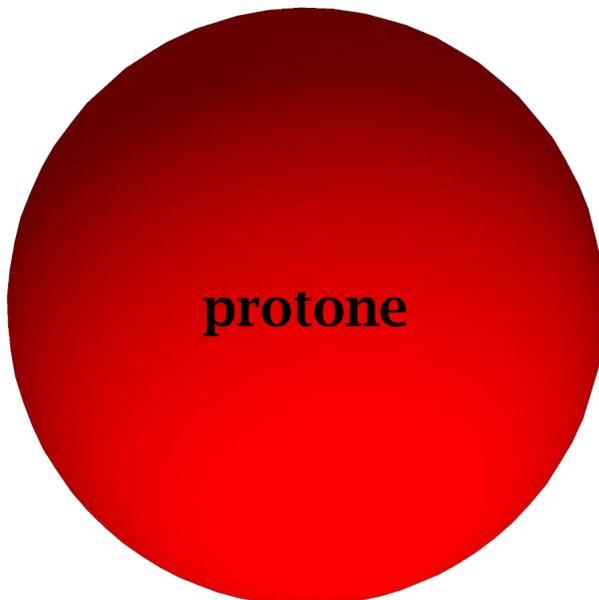
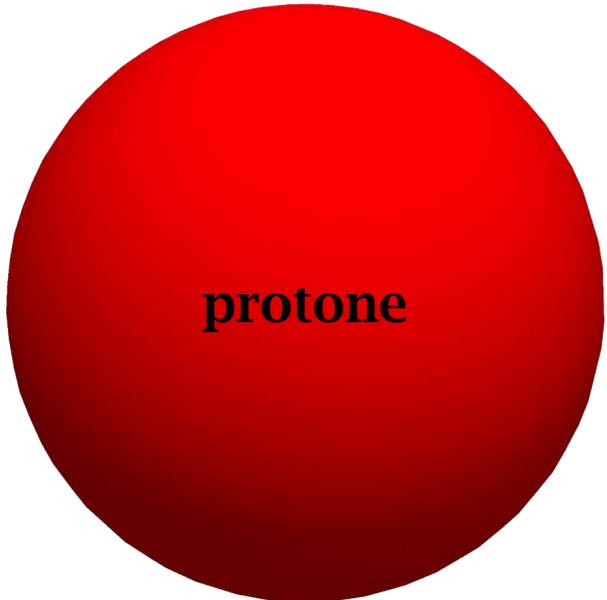
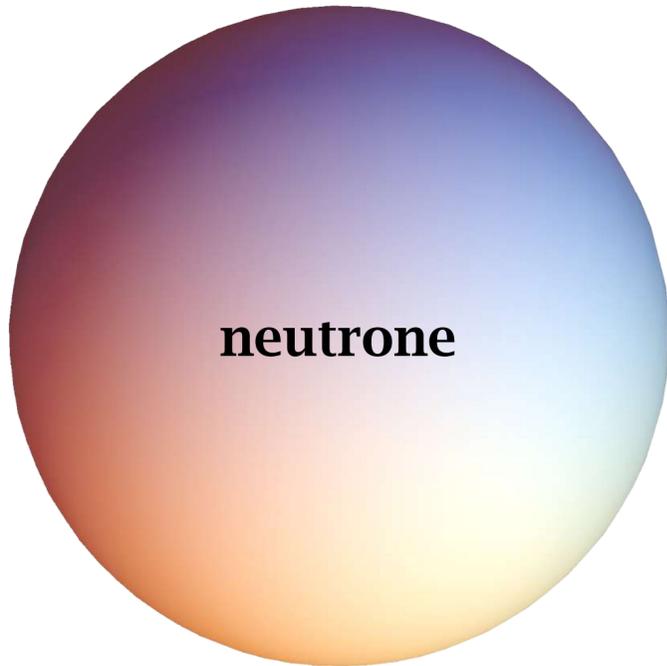
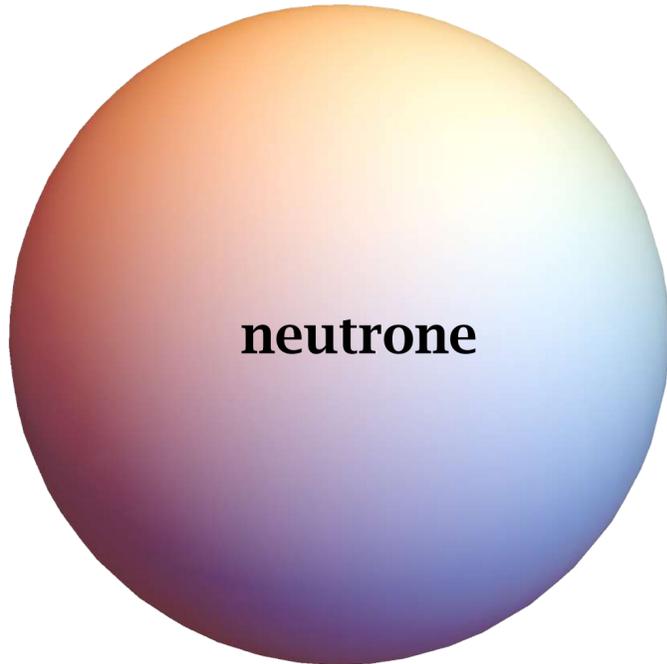


neutrino

elettrone



**I
M
P
L
I
C
A
Z
I
O
N
I**



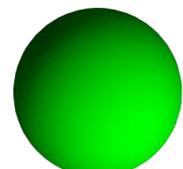
elettrone



neutrino

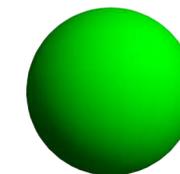
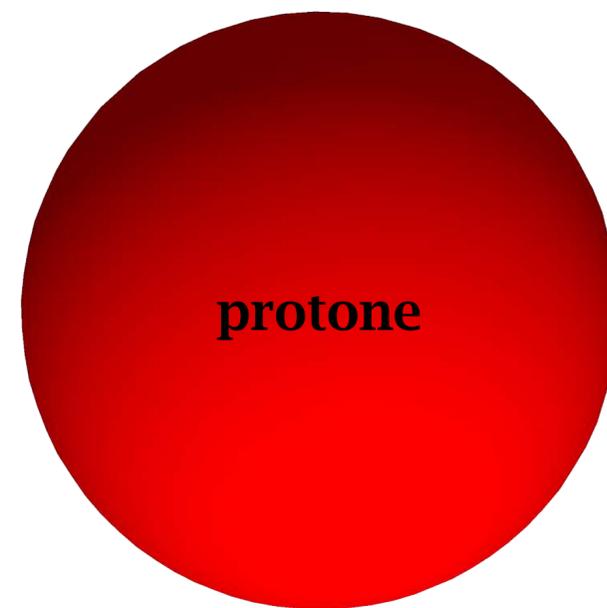
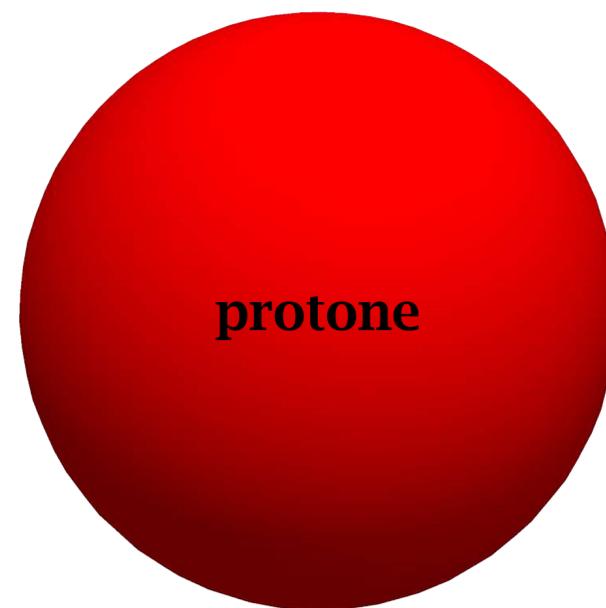
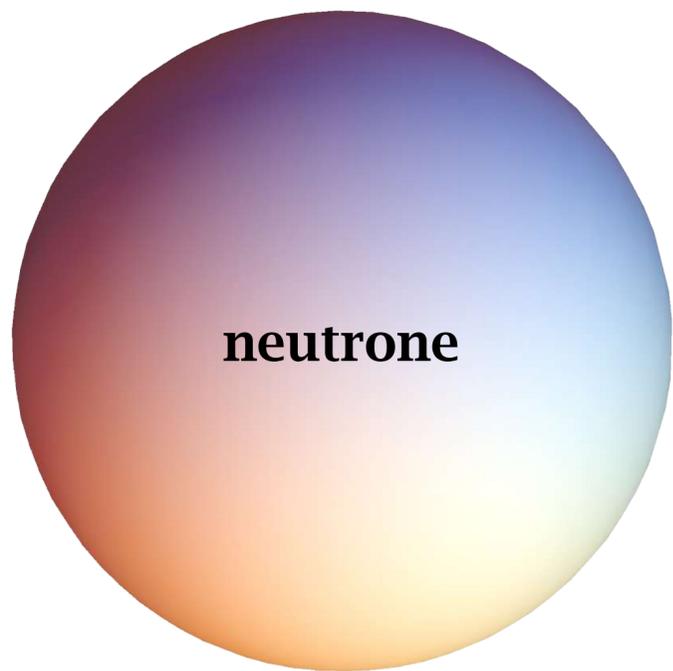
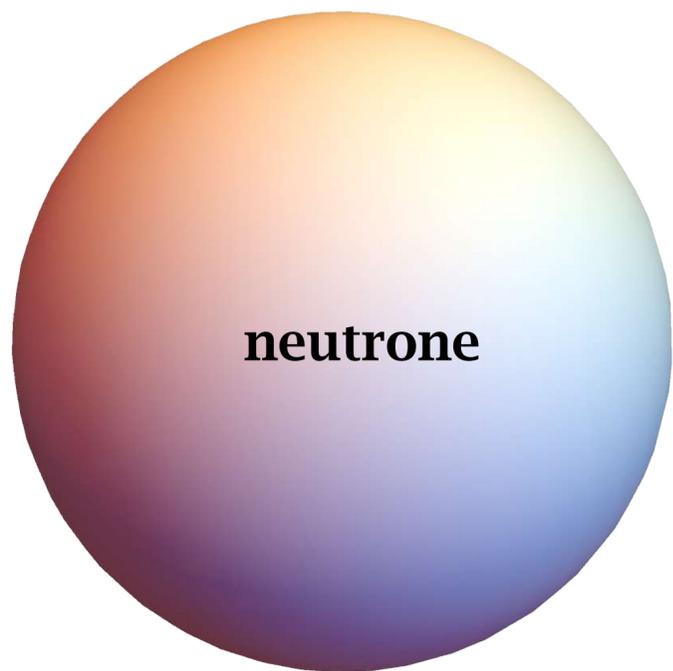


antineutrino

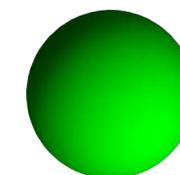


elettrone

**I
M
P
L
I
C
A
Z
I
O
N
I**

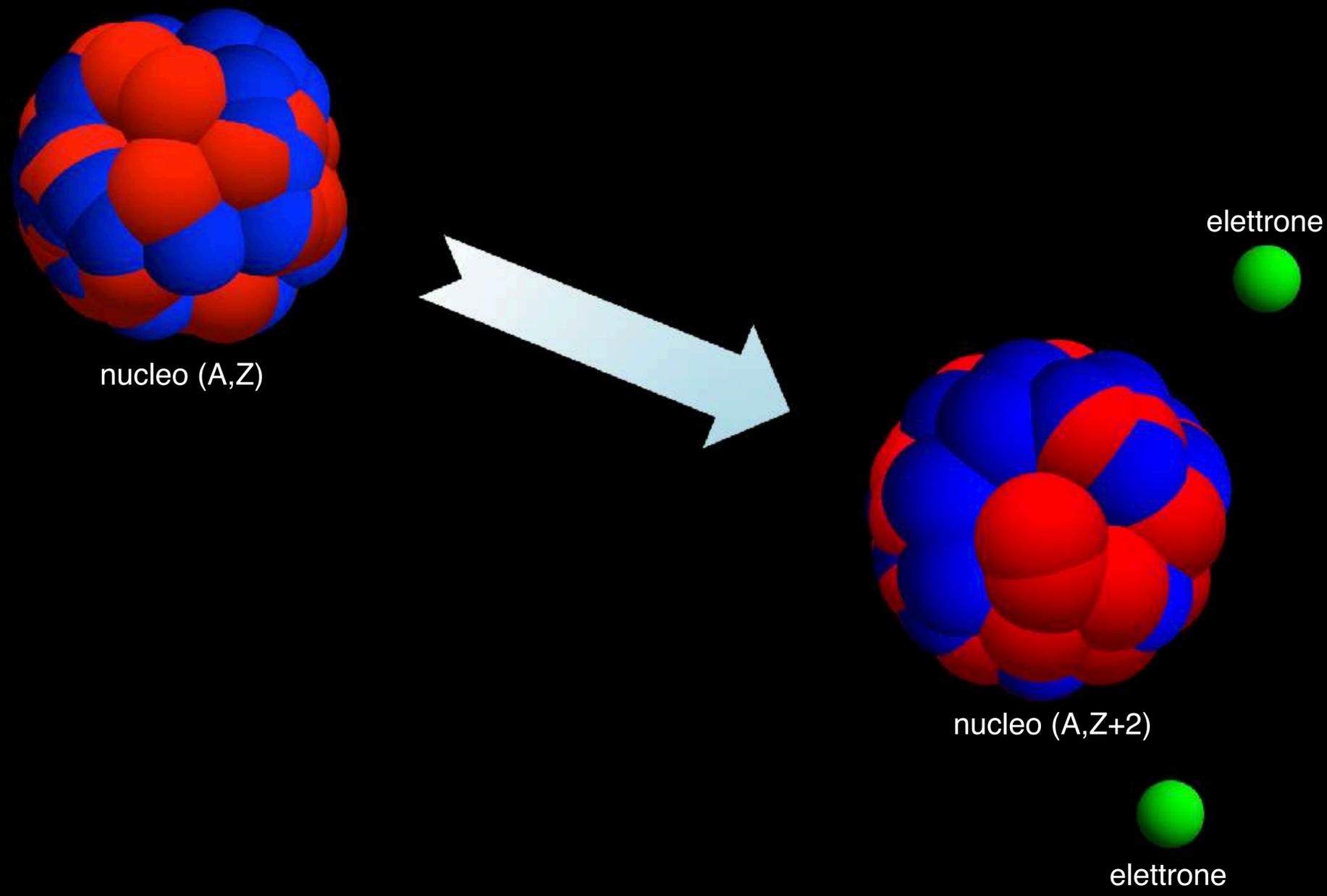


elettrone



elettrone

Il neutrino di Majorana è un ponte tra materia e antimateria



a causa sua, si possono creare elettroni, particelle di materia



Grazie!

- A. Ulteriori spiegazioni sul mare di Dirac***
- B. Commenti sulla teoria di Fermi***
- C. Reines & Cowan vs Bethe & Peierls***
- D. Scoperta del neutrone ed implicazioni***
- E. Ultime note su Ettore Majorana***



ulteriori spiegazioni sul mare di Dirac

Dirac spiega perché esiste lo spin

The Quantum Theory of the Electron.

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

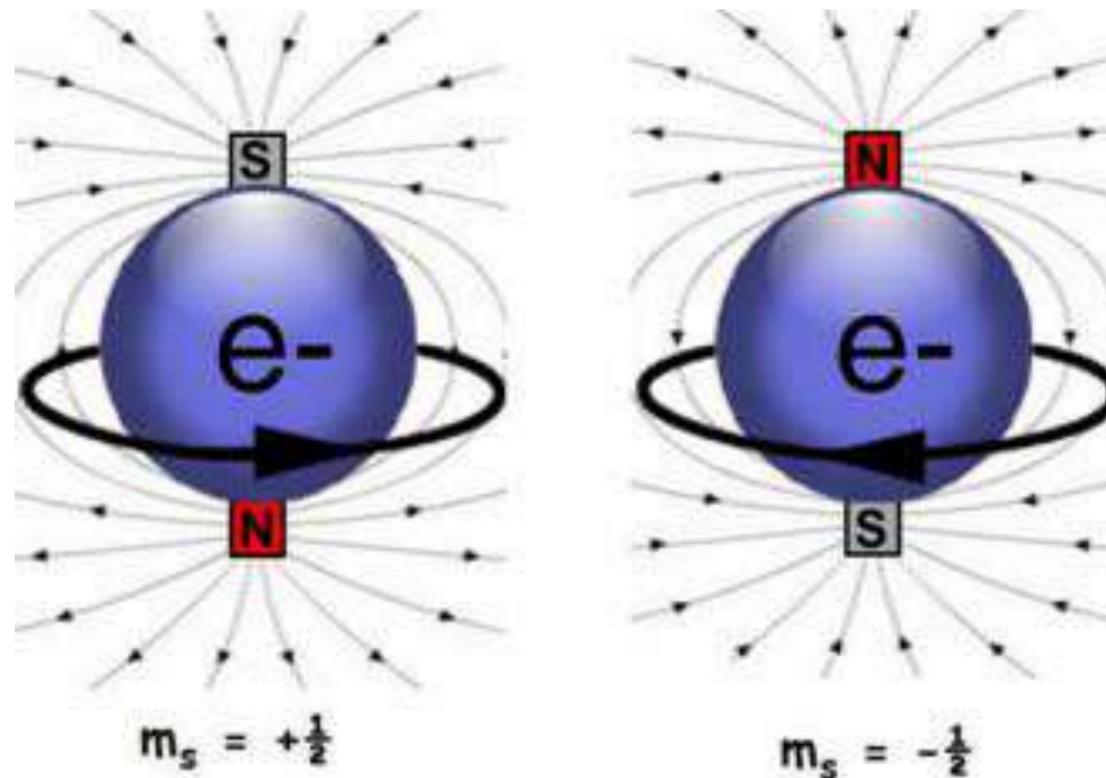


(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

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,†

certo lo spin è importante, ma c'è dell'altro...

spin e momento magnetico
per un elettrone

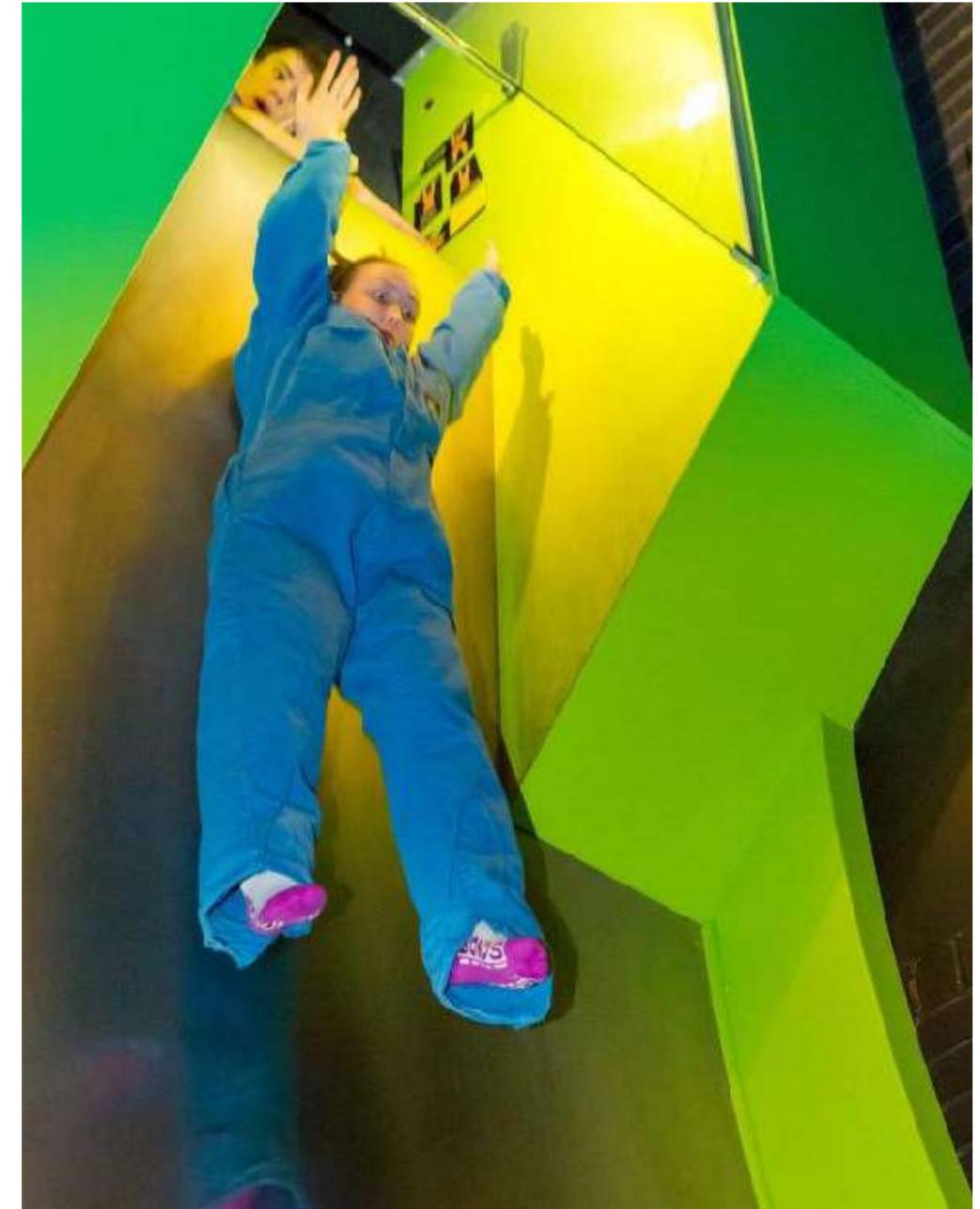


apparecchiatura diagnostica a risonanza
magnetica



Il problema

- Nell'equazione di Dirac ci son soluzioni che sembrano descrivere elettroni con energia negativa.
- Gli elettroni possono emettere radiazioni; e **se non esiste una energia minima a fermarli, ci sarebbe una disastrosa corsa verso il basso.**

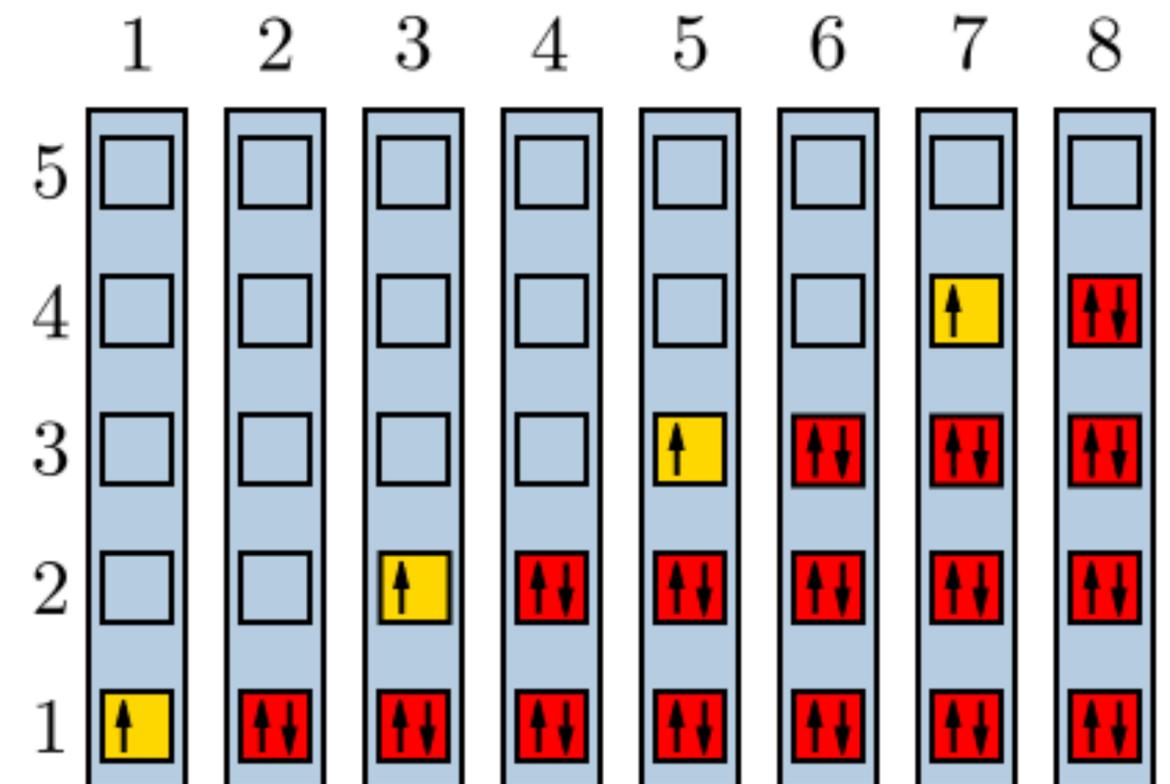


Il problema

- Nell'equazione di Dirac ci son soluzioni che sembrano descrivere elettroni con energia negativa.
- Gli elettroni possono emettere radiazioni; e se non esiste una energia minima a fermarli, ci sarebbe una disastrosa corsa verso il basso.
- Ma si era visto che gli elettroni intorno agli atomi occupano gli stati permessi **al massimo una volta**: parlo del principio di esclusione di Pauli.



idrogeno, elio, litio, berillio, boro, carbonio, azoto, ossigeno



Il problema

- Nell'equazione di Dirac ci son soluzioni che sembrano descrivere elettroni con energia negativa.
- Gli elettroni possono emettere radiazioni; e se non esiste una energia minima a fermarli, ci sarebbe una disastrosa corsa verso il basso.
- Ma si era visto che gli elettroni intorno agli atomi occupano gli stati permessi al massimo una volta: parlo del principio di esclusione di Pauli.
- Questo suggerisce a Dirac una via d'uscita: egli immagina che tutti gli stati con energia negativa siano già occupati. **È l'ipotesi del mare di Dirac.**



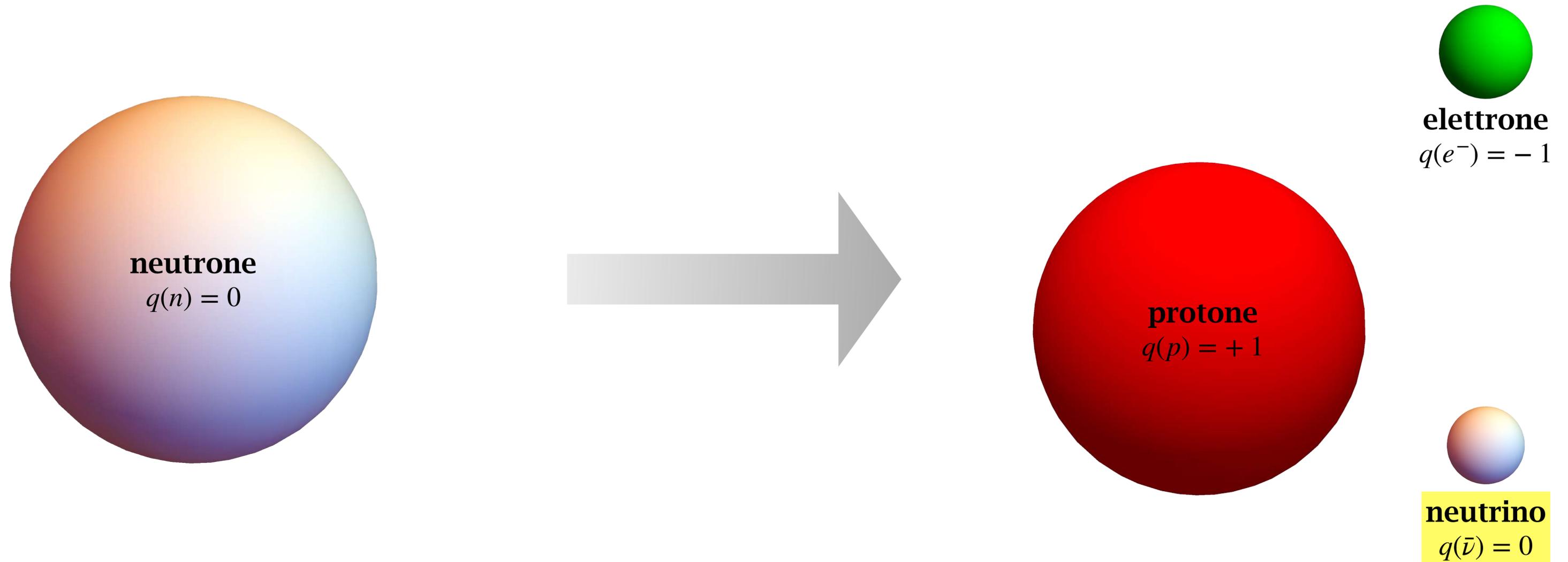
dopo averci pensato tre anni, nel 1931 Dirac se ne esce così:

“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”

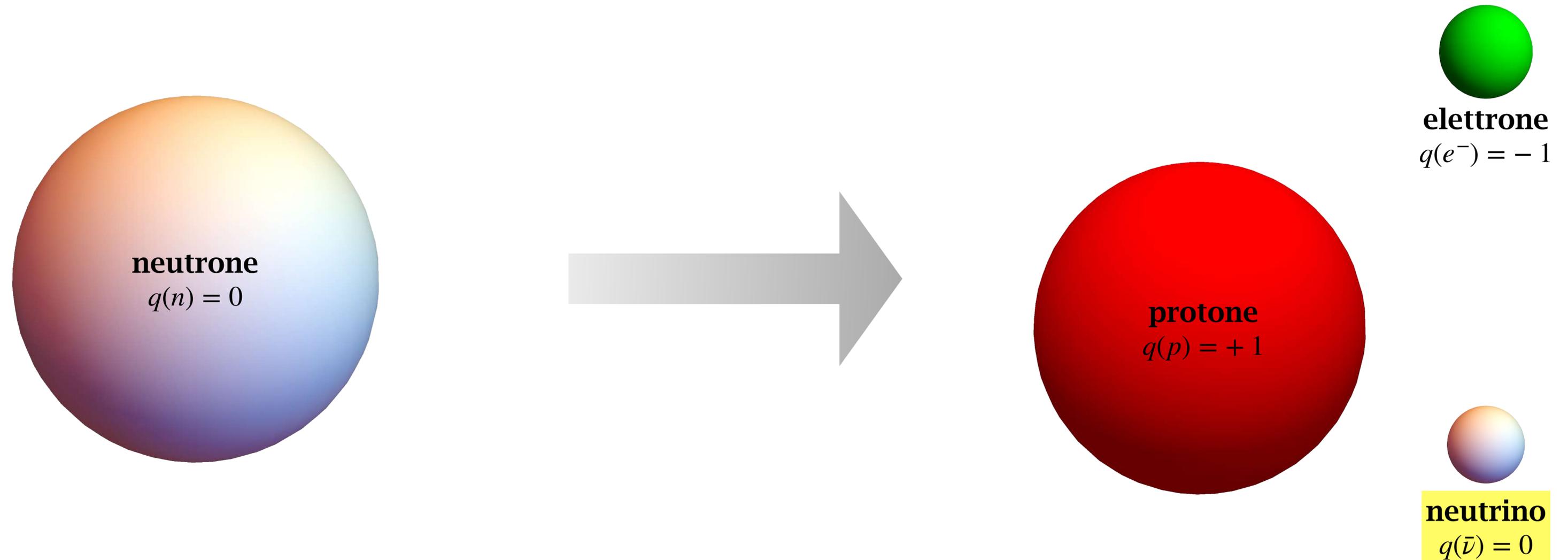


commenti sulla teoria di Fermi

trasformazione spontanea del neutrone nella teoria di Fermi



trasformazione spontanea del neutrone nella teoria di Fermi



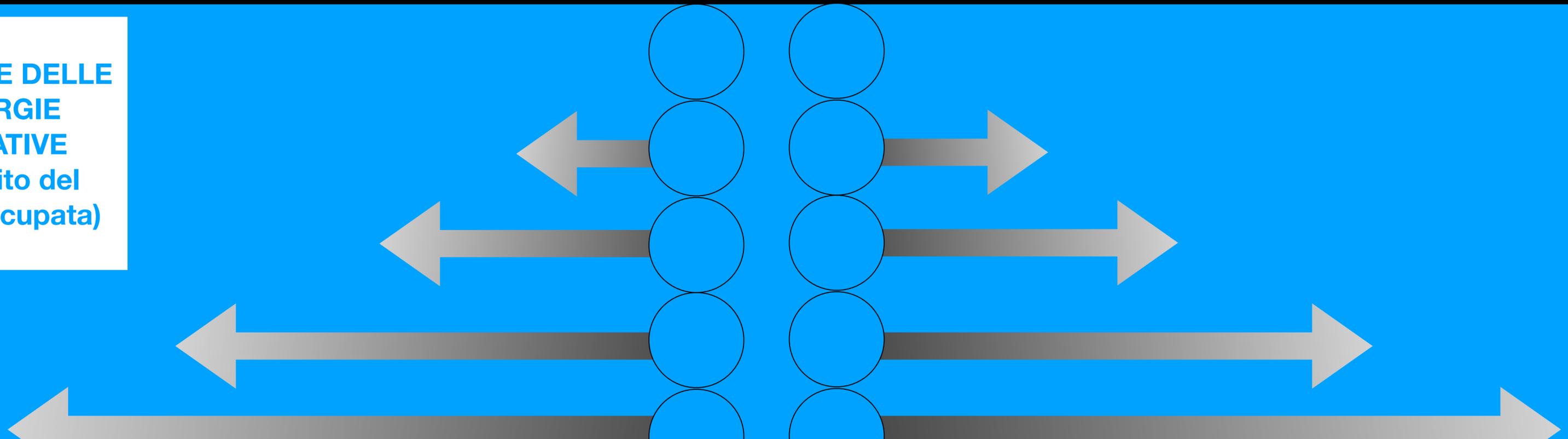
MA COME FUNZIONA?

le basi della teoria di FERMI

REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)

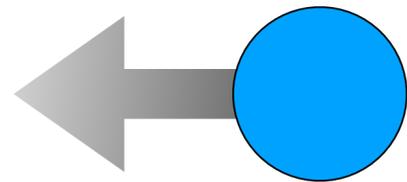
REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)



le basi della teoria di FERMI

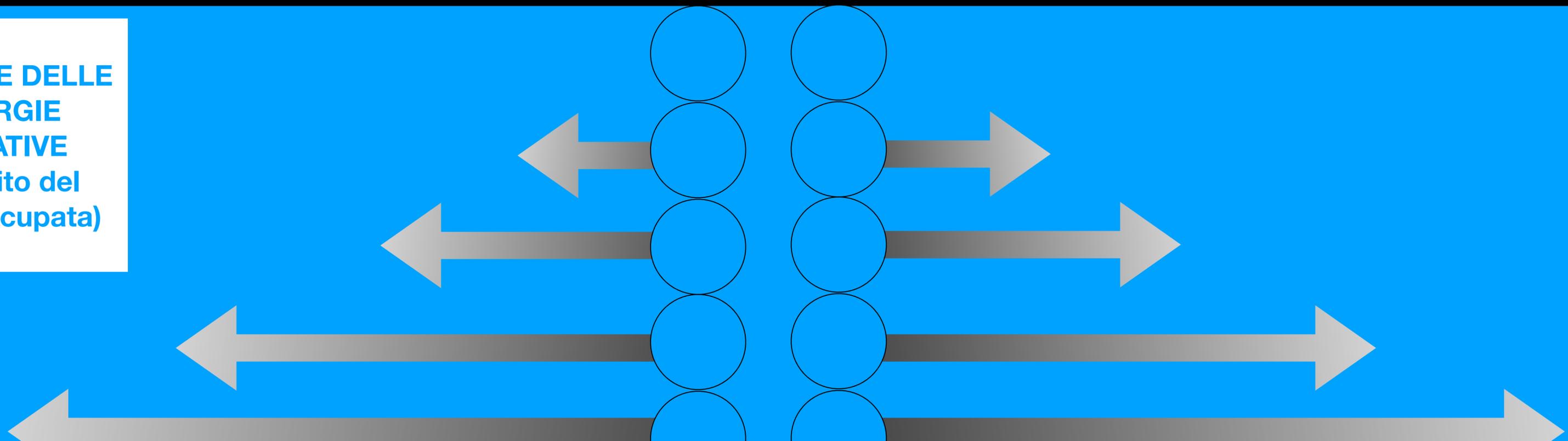
REGIONE DELLE
ENERGIE
POSITIVE
(di solito poco
occupata)



gli elettroni (e i neutrini) con
energia positiva possono essere
creati; quelli con energia negativa
invece ci sono già.

REGIONE
PROIBITA

REGIONE DELLE
ENERGIE
NEGATIVE
(di solito del
tutto occupata)





Reines & Cowan
versus
Bethe & Peierls

Bethe & Peierls

Nature 133, 532 (1934)

- Una graziosa stima della sezione d'urto. Anche questo metodo equivale alla "crossing symmetry" degli anni 50!
- Il valore della sezione d'urto (corretto a meno della scala di massa arbitraria) suggerisce agli autori che i neutrini siano **inosservabili**
- (Ma come tutti sanno, i neutrini verranno osservati da Reines e Cowan appena 20 anni dopo)

The cross section σ for such processes for a neutrino of given energy may be estimated from the lifetime t of β -radiating nuclei giving neutrinos of the same energy. (This estimate is in accord with Fermi's model but is more general.) Dimensionally, the connexion will be

$$\sigma = A/t$$

where A has the dimension $\text{cm.}^2 \text{ sec.}$ The longest length and time which can possibly be involved are \hbar/mc and \hbar/mc^2 . Therefore

$$\sigma < \frac{\hbar^3}{m^3 c^4 t}$$

For an energy of 2.3×10^6 volts, t is 3 minutes and therefore $\sigma < 10^{-44} \text{ cm.}^2$ (corresponding to a penetrating power of 10^{16} km. in solid matter). It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino.

H. BETHE.
R. PEIERLS.

Physical Laboratory,
University,
Manchester.
Feb. 20.



Reines



Reines



Pauli



Reines



Pauli

**you
shouldn't
believe
everything
you read in
the papers**



Reines

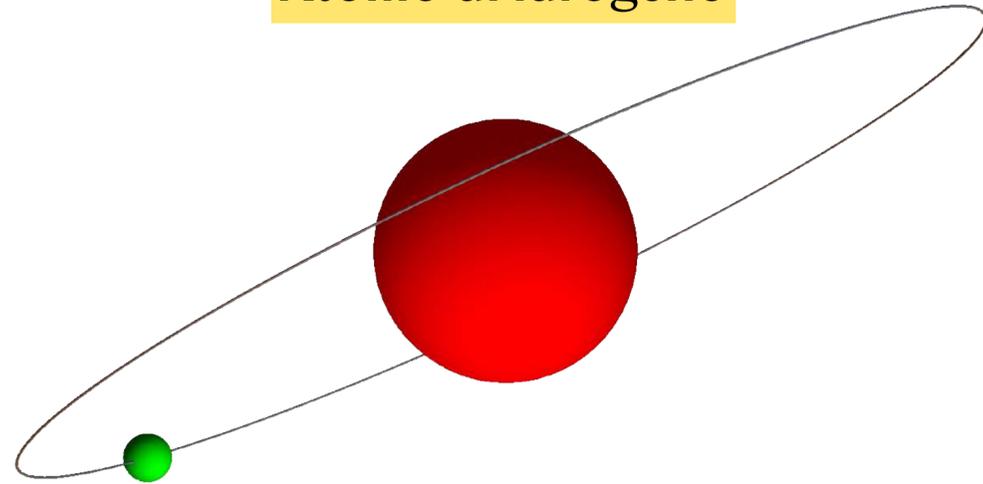


la scoperta del neutrone e le implicazioni

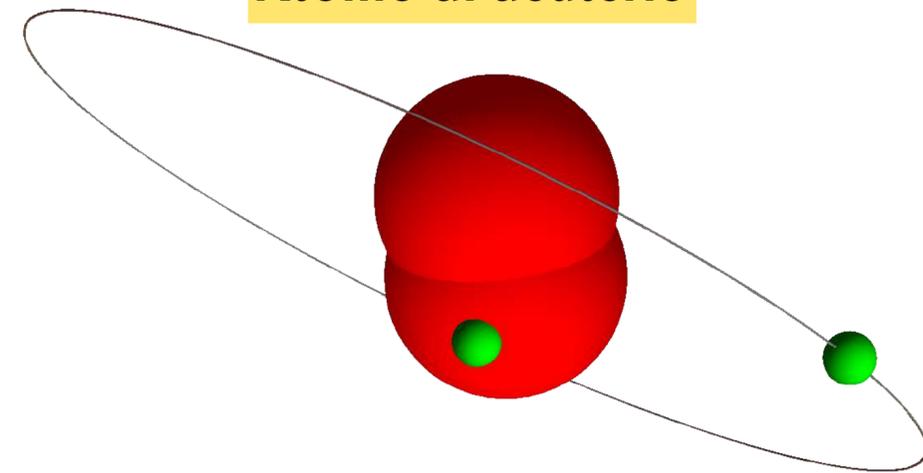
il modello del nucleo degli anni venti

due sole particelle: una pesante, il **protone**; una leggera, l'**elettrone**

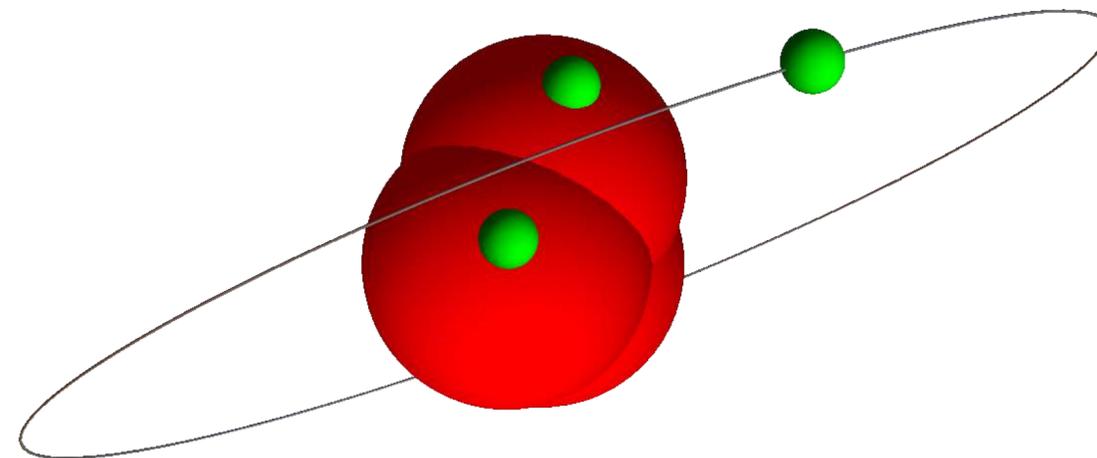
Atomo di idrogeno



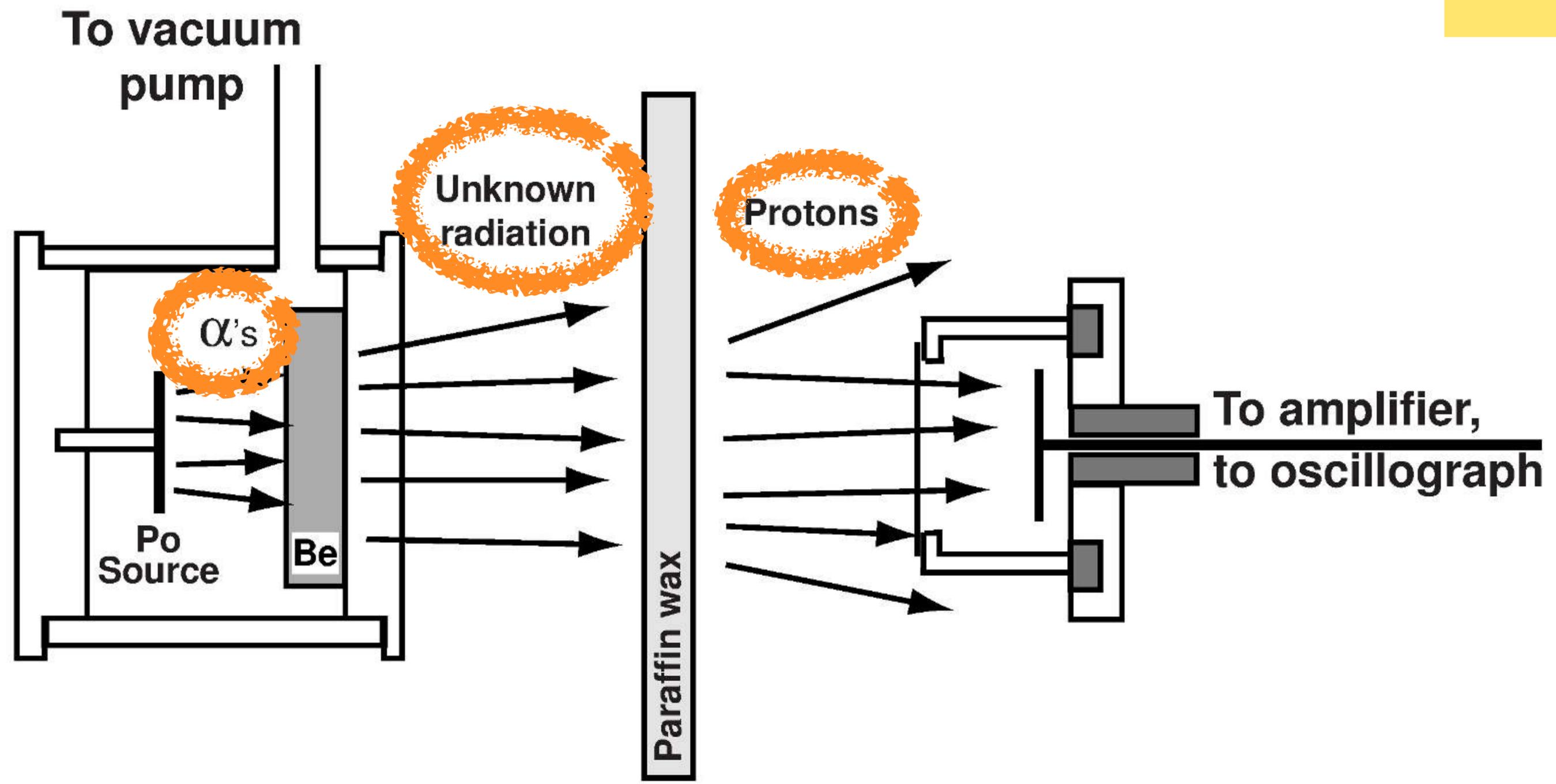
Atomo di deuterio



Atomo di trizio



1932



1932



The Nobel Prize in Physics 1935

1932

To vac
pur



Photo from the Nobel
Foundation archive.

James Chadwick

Prize share: 1/1

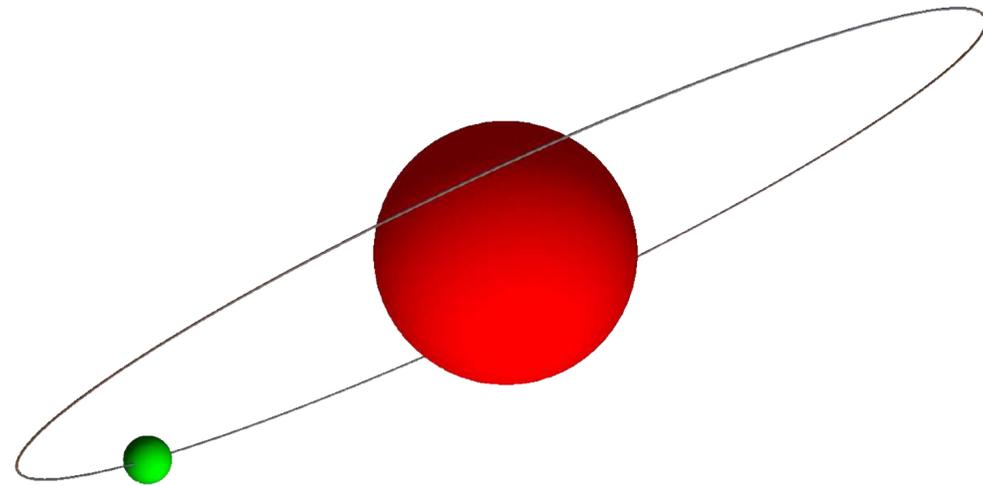
nplifier,
scintillograph

The Nobel Prize in Physics 1935 was awarded to James Chadwick "for the discovery of the neutron"

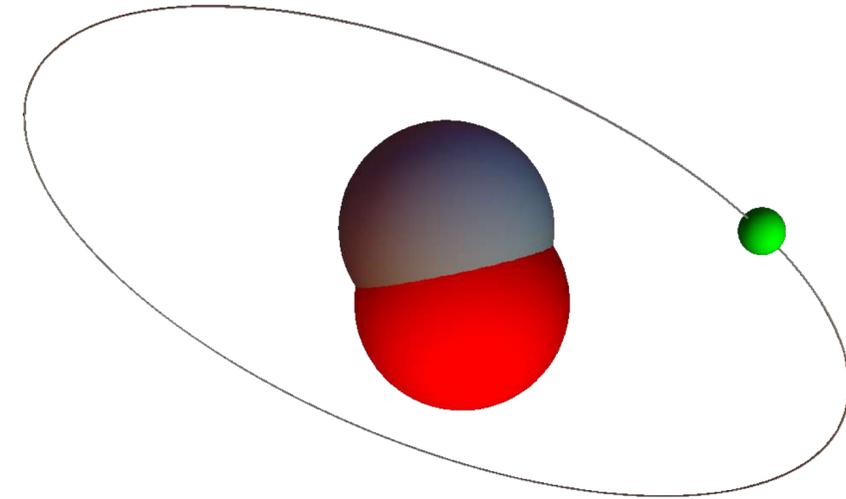
il modello del nucleo dal 1933 in poi

Iwanenko - Heisenberg - Majorana

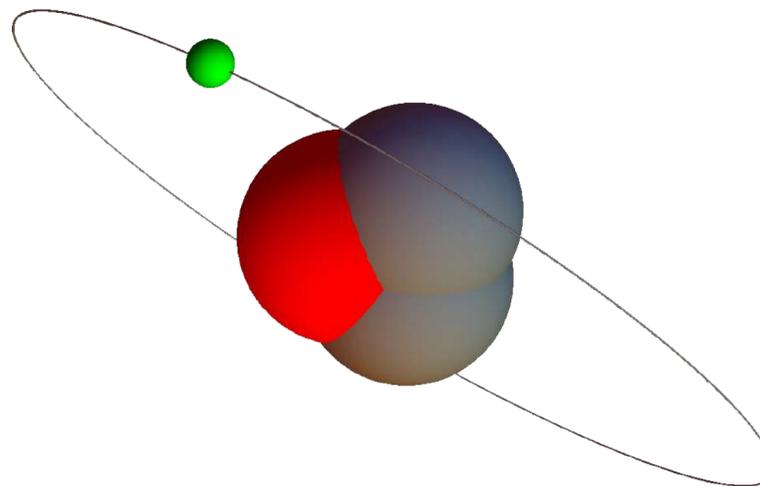
Atomo di idrogeno



Atomo di deuterio



Atomo di trizio





**ultime
annotazioni su
Ettore Majorana**

Ragazzi di Via Panisperna

*In questa strada al civico 89, negli anni 30 i ricercatori
D'Agostino, Fermi (Nobel 1938), Amaldi,
Majorana, Rasetti, Pontecorvo, Segrè (Nobel 1959)
accedevano all'istituto di Fisica, dove insieme
aprono l'era nucleare al mondo.*

The Boys of Via Panisperna

*The entrance in this street at number 89, was used in the 1930s by researchers
D'Agostino, Fermi (Nobel 1938), Amaldi,
Majorana, Rasetti, Pontecorvo and Segrè (Nobel 1959)
to reach the Institute of Physics, where together
they opened the world up to the nuclear age.*



PROGETTO

**CONFRONTANDO LA FOTO E LA TARGA,
MANCANO SOLO DUE "RAGAZZI". UNO ERA IL FOTOGRAFO, PONTECORVO**

DATA

1934

PROBLEMA

DOVE È MAJORANA? PERCHÉ NON C'È?

Un commento del 1937

- Poco dopo il lavoro di Majorana esce un commento di Racah
- Racah nota che la teoria di Fermi può essere modificata
- Poi osserva che se Majorana ha ragione, ci sono conseguenze osservabili
- Infine, corregge Majorana a proposito del neutrone



Majorana e gli altri teorici nell'entourage di Fermi

Majorana, Giancarlo Wick e Giulio Racah

- Majorana (uno dei ragazzi di via Panisperna) è del 1906; Wick e Racah del 1909
- Si laurea a 23 anni a Roma; gli altri due a 21 a Torino e a Firenze
- Dopo la laurea, studierà in Germania con Heisenberg; gli altri con H. + Born, Pauli
- Majorana non sarà assistente di Fermi; gli altri due sì
- Majorana si isola fino dal 1933 al 1937; gli altri due non lo fanno
- Diventa professore a 31 anni; gli altri a 28 (stesso concorso, con le modalità dette)

il concorso del 1937

Majorana

Wick

Racah

Gentile Jr

1900

1920

1940

1960

1980

2000

la scienza di Ettore Majorana

- ★ Il rigore ed il modo di lavorare di Majorana lo assimilano più ad un **matematico** che ad un fisico moderno, e credo che per un fisico questo sia un grande titolo d'onore
- ★ I suoi risultati sono **alla base** della fisica moderna del nucleo e delle particelle
- ★ Che ci sia che non glielo riconosce il merito significa che **ha lavorato bene**; ci siamo avvantaggiati di cosa che ha fatto, scordando chi dovremmo ringraziare
- ★ La sua **ipotesi sui neutrini** punta al futuro della fisica: viene studiata al Lab del Gran Sasso e altrove nel mondo
- ★ La sua vicenda personale è dolorosa; non mi sento preparato a parlarne, ma a volte mi chiedo se riusciremmo a capire, aiutare, salvare le **persone eccezionali** come lui