

# Ettore Majorana e il protone neutro

**Francesco Guerra**

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma  
(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Roma)  
CREF, Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi, Roma

**Nadia Robotti**

Dipartimento di Fisica, Università di Genova  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Genova  
CREF, Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi, Roma

Congresso della Società Italiana di Fisica  
13-17 settembre 2021

Nel 1932 viene scoperto il neutrone, la nuova particella elementare, che rende possibile la formazione del modello nucleare fatto da protoni e neutroni, che soppianta il modello fino ad allora prevalente, formato da protoni ed elettroni, affetto da notevoli ben note difficoltà.

La Fisica Nucleare entra nella sua fase moderna.

La partecipazione documentata di Ettore Majorana a questo processo è ben nota. All'inizio del 1933, durante il suo soggiorno a Lipsia, egli modifica il modello di Heisenberg del nucleo formato da protoni e neutroni, e mostra che tutte le proprietà essenziali dei nuclei possono essere dedotte da pochissime plausibili ipotesi.

Oltre all'interazione Coulombiana tra protoni, basta introdurre una opportuna forza di scambio tra protoni e neutroni, attrattiva, per avere la stabilità dei nuclei, e una densità nucleare sostanzialmente costante al variare del peso atomico.

Nel paragonare il modello nucleare di Majorana con quello di Heisenberg, comunemente viene affermato che Majorana modifica la forma della forza di scambio di Heisenberg. Attenzione! La modifica è molto più drastica. Il nucleo di Heisenberg non è tenuto assieme dalle forze di scambio, che peraltro possono essere addirittura repulsive, ma da un complesso molto macchinoso di varie forze, che include una forza attrattiva tra neutroni, analoga alle forze di polarizzazione della fisica atomica. Le ipotesi di Majorana sono molto semplici e naturali. La sola forza di scambio di Majorana tiene insieme i nuclei.

In realtà sarebbe più opportuno distinguere nettamente i due modelli. Il grande merito di Heisenberg è quello di aver mostrato che è possibile un modello che assicuri la stabilità nucleare introducendo solo protoni e neutroni, che interagiscono con forze suscettibili di essere descritte nell'ambito della ordinaria meccanica quantistica.

Il merito di Majorana è stato quello di aver individuato la forma della forza di scambio, attrattiva, che sotto ipotesi minimali assicura la stabilità nucleare.

Inoltre, la formulazione di Majorana permette immediatamente di interpretare la forza di scambio come un limite a bassa energia di una interazione di teoria quantistica dei campi tra i nucleoni, e il sistema dei pioni, pseudoscalari a spin zero, come mostrato successivamente da Yukawa nel 1935.

- L'articolo principale di Majorana, dal titolo "Ueber die Kerntheorie" (Sulla teoria dei nuclei), compare sulla prestigiosa rivista tedesca Zeitschrifts fuer Physik 82, 137-145 (1933), inviato il 3 marzo. La data ufficiale di pubblicazione e' il 29 aprile.
- Una breve sintetica Lettera, dal titolo "Nuove ricerche sulla teoria dei nuclei", datata Lipsia, 28 aprile 1933, compare sulla Ricerca Scientifica.
- La versione in italiano, richiestagli dalle autorità del CNR, che ha finanziato il suo viaggio, compare sulla Ricerca Scientifica con il titolo "Sulla teoria dei nuclei", datata Lipsia, 11 maggio 1933.

La teoria dei nuclei di Majorana e' piu' semplice e piu' efficace di quella di Heisenberg, che ne e' immediatamente convinto, e ne fa generosa propaganda, in particolare al Congresso Solvay dell'ottobre 1933. Nell'articolo di rassegna di A. Bethe e R.F. Bacher, dal titolo "Stationary States of Nuclei", pubblicato su Reviews of Modern Physics nell'aprile del 1936, il nome "Majorana" compare circa 60 volte nel testo, anche se e' un solo lavoro a essere citato.

Il ruolo di Majorana acquista un incontestabile stato di elevato prestigio internazionale.

Ma e' possibile che le considerazioni fatte non esauriscano l'intera storia.

E' noto che sulla figura di Majorana sono sorti una serie di episodi, immediatamente ripresi dai vari autori, e tramandati nei decenni. Abbiamo diretto la nostra attenzione su uno di questi episodi, particolarmente persistente, e particolarmente importante per i suoi contenuti.

Leggiamo da Laura Fermi "Atoms in the Family", Chicago 1954,

---

**Majorana** had thought out Heisenberg's theory of the nucleus with neutrons and protons as building stones before Heisenberg published it, but he never wrote it.

Si tratta di una testimonianza che e' un vero macigno, perche' molto lontana nel tempo (1954!), quando Fermi era ancora in vita, e poi ripresa e arricchita da moltissimi Autori, anche di grande peso.

La versione piu' accurata e' riportata da Edoardo Amaldi, prima nella sua biografia su Ettore Majorana, edita dall'Accademia dei Lincei nel 1966, poi nel suo poderoso articolo di rassegna (331 pagine) "FROM THE DISCOVERY OF THE NEUTRON TO THE DISCOVERY OF NUCLEAR FISSION", pubblicato su PHYSICS REPORTS (Review Section of Physics Letters) 111, 1-332 (1984).

Qui possiamo leggere

Neither I nor his other friends questioned remember whether Ettore Majorana came to the conclusion that the nucleus consists solely of protons and neutrons independently from other authors. What is certain is that before Easter 1932 he tried to work out a theory of light nuclei, assuming that they consisted solely of protons and neutrons (or neutral protons as he then said) and that the former interacted with the latter through exchange forces. He also reached the conclusion that these exchange forces must act only on the space coordinates (and not on the spin) if one wanted the  $\alpha$  particle, and not the deuteron, to be the system saturated with respect to binding energy.

Non solo c'e' accordo completo con Laura Fermi, ma compare anche una data precisa, Pasqua 1932 (27 marzo).

## Ma Amaldi aggiunge un'altra informazione esplosiva

When the issue of the "Comptes Rendus" containing the first note by F. Joliot and I. Curie [8] on the penetrating radiation discovered by Bothe and Becker arrived at the library of the Institute of Physics of the University of Rome, Ettore read it and, shaking his head said more or less: "They haven't understood a thing. They probably are observing the recoil protons produced by a heavy neutral particle". A few days later we got in Rome the issue of "Nature" containing the "Letter to the Editor" from Chadwick in which he demonstrated the existence of the neutron (section 1.1).

Ricordiamo che nel 1930 Walther Bothe e Herbert Becker avevano mostrato che alcuni nuclei leggeri, Berillio, Boro, Fluoro, e Litio, bombardati con le particelle alfa emesse dal Polonio, producono una radiazione di grande potere penetrante, identificata come raggi gamma. Subito Irene Curie e Frederic Joliot, a Parigi, avevano iniziato lo studio di questa radiazione penetrante, e all'inizio del 1932, in un articolo sui Comptes Rendues, apparso alla fine di gennaio, avevano comunicato, tra l'altro, una loro importante scoperta. La radiazione di Bothe e Becker e` capace di proiettare protoni di grande energia. L'interpretazione di questo fenomeno come una sorta di effetto Compton sui protoni nucleari mostrava serie difficolta`.

Apparato di Chadwick costituito da una sorgente di neutroni, a Polonio-Berillio, e un rivelatore, una piccola camera a ionizzazione collegata a un amplificatore e un oscillografo

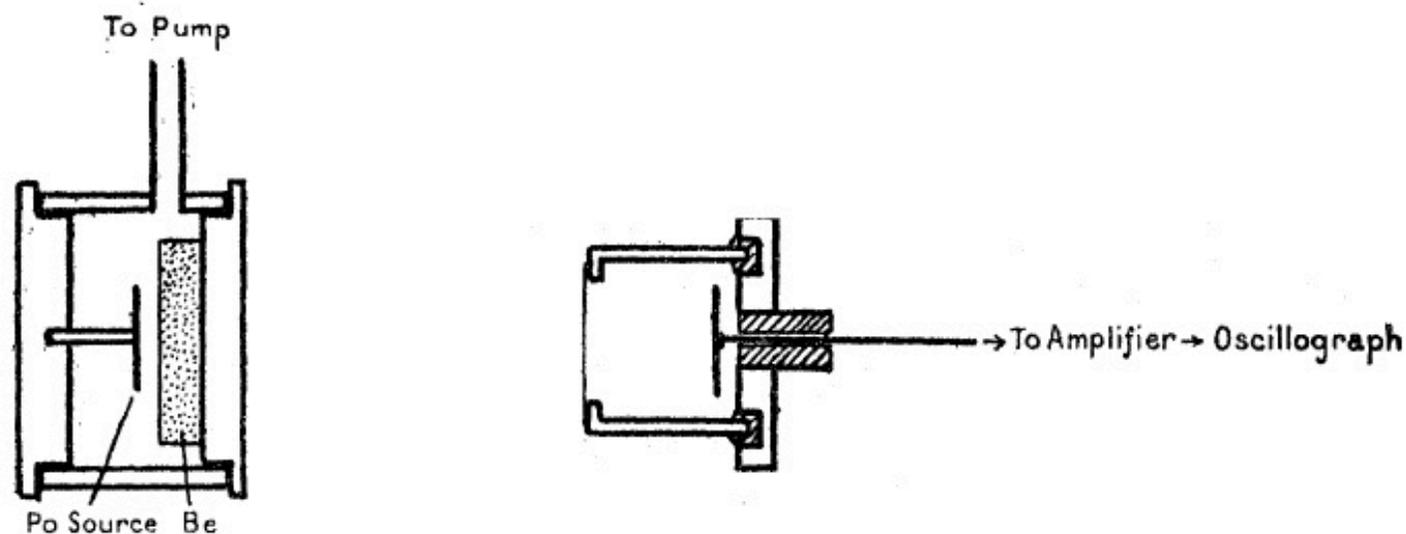
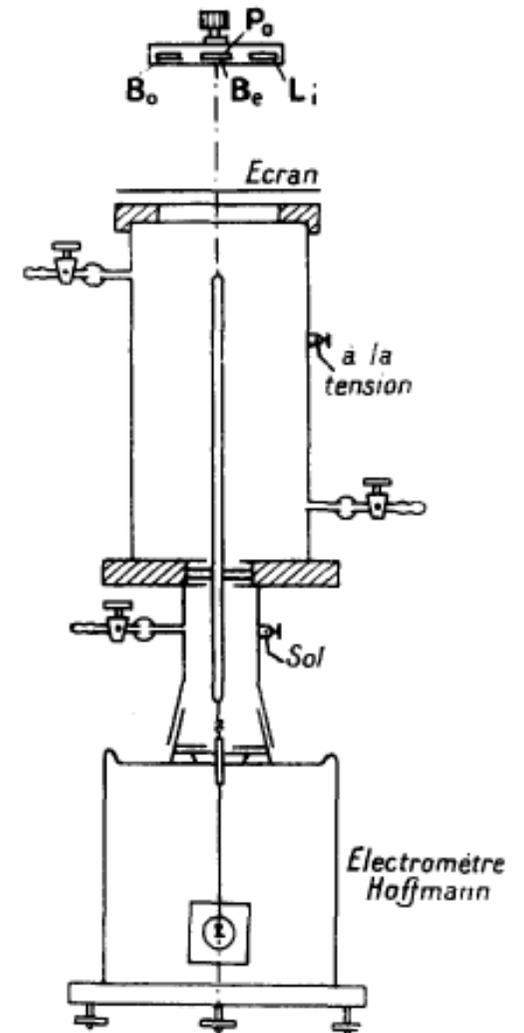


FIG. 1.

Paragonato con l'apparato dei Joliot-Curie, di affascinante aspetto ottocentesco, che pare proprio recuperato da un armadio di Madama Curie:

In alto si vede la sorgente Polonio-Berillio  
 al centro la camera a ionizzazione  
 in fondo un elettrometro di Hoffmann



1917.

Nº 7.

# ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 52.

1. *Über ein Elektrometer hoher Empfindlichkeit. II;*  
 von G. Hoffmann.

(Hierzu Tafel III.)

Inhaltsübersicht: § 1. Spannungs- und Ladungsempfindlichkeit. Maßsystem. Elektrometerkapazität. — Theorie des Elektrometers. § 2. Potenzreihenentwicklung. Zwei Grade der Annäherung. — § 3. Elektrometer mit linearer Skala. — § 4. Astasierbares Elektro-

E' noto che l'interpretazione della scoperta dei Joliot-Curie non fu accettata al laboratorio Cavendish, in particolare da Ernest Rutherford. Pochi giorni dopo James Chadwick, usando una apparecchiatura un po' piu' avanzata di quella dei Joliot-Curie, fu in grado di dimostrare che la proiezione dei protoni, e anche quella possibile di altri nuclei leggeri, non era assolutamente dovuta ad una radiazione elettromagnetica, ma implicava l'esistenza di una nuova particella, il neutrone di massa paragonabile a quella del protone e di carica zero, che agiva semplicemente per urto elastico, secondo modalita' ben note a qualsiasi giocatore di biliardo. Quindi la radiazione di Bothe e Becker aveva come componente importante questa nuova particella, oltre alla componente elettromagnetica. L'articolo esplicativo di Chadwick, "Possible existence of a neutron", e' datato 17 febbraio, e compare il 27 febbraio su Nature.

Quindi in linea di principio Majorana aveva tutto il tempo per realizzare che i Joliot-Curie non avevano capito nulla, che la proiezione dei protoni non avveniva per una sorta di effetto fotoelettrico prodotto da raggi gamma, ma per la presenza di una nuova particella, da lui chiamata protone neutro.

E' molto strano che Fermi non abbia avvertito subito Franco Rasetti, che allora si trovava a Berlino, ospite nel laboratorio di Lise Meitner, che aveva tutta la strumentazione necessaria a disposizione, polonio, camere a ionizzazione, contatori Geiger.

Il team diretto, Rutherford (non ci credo) - Chadwick (infatti non e' vero), ha lavorato meglio della possibile catena Majorana (sono degli scemi) - Fermi (Majorana dice che ...) - Rasetti (ora vedo tutto io e vi faccio sapere).

La situazione e' stata da noi analizzata nella monografia F.G. e Nadia Robotti, "Enrico Fermi e il quaderno ritrovato", Societa' Italiana di Fisica, Bologna, 2015.

Una volta compresa l'esistenza del protone neutro, Majorana poteva procedere alla costruzione del modello nucleare. Solo particelle pesanti sono coinvolte. Sulla base della sua esperienza con il decadimento alfa, descritto con l'effetto tunnel nella sua Tesi di Laurea, Majorana sapeva che con particelle pesanti la meccanica quantistica funzionava bene. Si tratta di trovare le interazioni coinvolte. Quella Coulombiana protone-protone era scontata. L'interazione protone-neutrone doveva essere una forza di scambio per assicurare la saturazione e la costanza della densità nucleare. Nessuna interazione neutrone-neutrone era necessaria.

Quindi globalmente l'ipotesi Laura Fermi - Edoardo Amaldi, ripresa in tutti i modi nella letteratura, anche da parte di Emilio Segre', Gian Carlo Wick, Bruno Pontecorvo, Leonardo Sciascia, ha una sua coerenza concettuale intrinseca.

Naturalmente sarebbero necessari altri documenti prima di poter arrivare ad una conclusione definitiva, ben motivata.

C'è da osservare che queste considerazioni portano a ritenere Ettore Majorana come un vero pioniere, prima nella scoperta del neutrone, e poi nella formulazione del primo modello nucleare, fatto dai soli protoni e neutroni, tenuti assieme da forze di scambio.

Recentemente, abbiamo trovato alcuni documenti, che sembrano confermare la versione di Laura Fermi, e poi di Edoardo Amaldi e i loro numerosi seguaci.

Nel 1940, Giuseppe Majorana Calatabiano (Catania 23 Settembre 1863 - Catania 23 Dicembre 1940), figlio primogenito del Patriarca Senatore Salvatore, decide di scrivere una biografia dello “smarrito”, il nipote Ettore, figlio di suo Fratello Fabio Massimo. Questa biografia, scritta in varie stesure e mai definitiva, si trova tra il materiale della Famiglia Majorana Calatabiano, presso la Biblioteca Regionale Universitaria di Catania, un gigantesco fondo che conta circa centomila fogli.

Di questo fondo esiste un inventario, opera di Anna Maria Palazzolo, che però copre solo il periodo iniziale relativo al Patriarca Salvatore. Per il resto non esiste ancora l'inventario. Occorre spulciare direttamente.

Comunque in uno dei centomila fogli del fondo, nella nitida scrittura di Giuseppe, di non certo agevole lettura, troviamo una notizia molto significativa.

Parlando dei lavori scientifici del nipote Ettore, Giuseppe afferma “il lavoro che più lo fece conoscere, di 10 o 15 pagine, fu concepito nel 1932, e scritto in Germania a Lipsia, dove egli andò con la borsa di studio presso Heisenberg ...”

Giuseppe attinge le sue informazioni da una lettera molto interessante di Salvatore, fratello di Ettore, datata Rimini, Alb. Parco, 27 Agosto (1940), che è anche conservata nel fondo di Catania.

Facciamo vedere il frammento di Giuseppe, e la lettera di Salvatore.



scritto v'era un'importante scoperta matematica. Non ricordo affatto il titolo; forse Luciano lo saprà.<sup>2</sup> Per tre anni E. nulla scrisse. Nel 1937 fece un nuovo lavoro, poco prima del concorso. Gentile, figlio del senatore, ora prof. di fis. teorica a Milano, mi disse che non era inferiore ai precedenti. Nella mia cerchia, mi disse Gentile, E. era considerato il più puntante fisico teor. italiano, compreso Fermi. Il che confermai lo stesso Fermi in una lettera al Duce<sup>3</sup> proposito delle ricerche che facemmo dopo la scomparsa; lettera che abbiamo a Roma e, se credi, ti manderò in copia. — Il provvedimento preso dopo la scomparsa ha questa forma: "è considerato dimissionario in data 25 marzo 1938"; — Papa fu nella clinica Giannuzzi, ai prati, del novembre 1933 fin verso aprile 1934. Quanto al titolo consegnato all'ingegner Birani, si tratta d'una cosa tecnica sul cambio degli automobili; ma fu esaminata da E. e da altri e trovata incompleta; è meglio non parlarne, perché vi fu una parte d'illusione.

27 Agosto 48

Bimini Alb. Paese

Caro zio,

rispondo un poco alla tua che ci ha raggiunto qui, me, la mamma e Maria, mentre Luciano è in prov. di Brescia militare e Rossina sul lago di Como. Vedo dalla tua attività che stai abbastanza bene; auguro che il tuo lavoro ti sia insieme di sollievo e riposo. Spero pure che la zia e gli altri stiano bene. Di Totino so, che è a Roma e sta bene, da un certo Bertoli, siciliano, amico di Luciano, che l'ha visto una settimana fa, il giorno prima di venire qui. — Per quello che chiedi non posso scriverti i titoli dei lavori di Ettore, perché

troppo tecnici e complicati. A Broma  
spero trovare la domanda per concorso  
di Napoli, quantunque forse si trovi solo  
al ministero. Egli presentò 9 lavori, tutti  
di poche pagine. Ne aveva scritti forse  
altri due che non presentò. Il lavoro  
che più lo fece conoscere, di 10 o 15 pagine,  
fu concepito nel 1932 e scritto in Germania,  
a Lipsia, dove fu con una borsa di studio,  
presso Heisenberg, tra la fine del 1932 e  
il giugno 1933. Fu scritto in tedesco da lui  
stesso e Heisenberg gli corresse personalmente  
gli errori di lingua; poiché erano diventati  
subito amici; anche perché Heisenberg discutendo  
con lui modificò abbastanza profondamente  
i suoi punti di vista e gli offrì di  
collaborare nella sua rivista, cosa che  
Ettore non accettò forse perché già allora  
si sentiva stanco. Per questo lavoro E. fu

subito molto conosciuto perché Heisenberg,  
che è forse il maggiore fisico teorico vivente,  
scrive parecchi ~~paragrafi~~ articoli nominandolo  
almeno cento volte. Tuttavia E. non credeva  
al valore assoluto di quello scritto e lo  
considerava piuttosto un'ipotesi; lui mi disse  
che non credeva che la natura potesse  
essere così semplice e che il suo scritto  
aveva valore di metodo allo stato attuale  
della scienza. Poi dopo 5 anni quel suo  
scritto non era stato oltrepassato. E nel corso  
di fisica teorica di Braxetti (premio Mondini)  
c'è un capitolo, sui dieci, dedicato interamente  
ad Heisenberg e a quello scritto di E., in parti  
eguali. - <sup>2</sup>Altra volta E. mi disse che il suo  
lavoro più profondo era un altro di nove,  
ma che era stato poco ammirato perché  
era più matematico che fisico; e che solo  
un matematico tedesco, che conobbe a Lipsia,  
se ne era accorto, dicendogli che in quello

Etti feci quel solo viaggio all'estero,  
 ma oltre che a Lissa fu a Capri per  
 un mese o due mesi presso Bohr, e fu  
 lì che dissi d'essermi guastato lo stomaco  
 mangiando nei bar automatici. Ma forse  
 s'illudesse e doveva essere il principio di  
 un'ulcera nervosa. Noi abbiamo sempre  
 creduto trattarsi di malattia di stomaco,  
 intermittente e senza gravi disturbi. Pensai che  
 fosse ulcera, ma fu escluso dai medici.  
 Non vi furono apparenti peggioramenti fino  
 alla scomparsa. — Di certo risulta che negli  
 immediati giorni intorno al 25 marzo 1918  
 si presentò nella chiesa detta del Gesù Nuovo,  
 nel centro di Napoli e non lungi dal mio  
 albergo, chiedendo di fare "un esperimento di vita  
 religiosa". — Ti scriverei in seguito qualche altra  
 cosa. Noi stiamo bene; facciamo bagni; c'è  
 discreta gente. Questa notte abbiamo avuto

L'allarme c'è per la incursione  
su Torino e Milano. — Non so se e  
quando verrò in Sicilia. Qualcosa  
molto probabilmente verrà. Saluti  
affettuosi e auguri, anche alla zia,  
ti abbraccio, aff. Salvatore

Dopo tutto, Laura Fermi, Edoardo Amaldi, e gli altri, potrebbero avere ragione, e la figura di Ettore Majorana ne sarebbe ulteriormente esaltata. Majorana sarebbe andato a Lipsia con la teoria del nucleo già sviluppata, per convincere Heisenberg, e ci è riuscito.

Consideriamo che già il 18 febbraio 1933 Majorana scrive al padre Fabio “Ho scritto un articolo sulla struttura dei nuclei che a Heisenberg è piaciuto molto benché contenesse alcune correzioni a una sua teoria”

e il 22 febbraio scrive alla madre Dorina:

“Nell’ultimo “colloquio”, riunione settimanale a cui partecipano un centinaio tra fisici, matematici, chimici, etc., Heisenberg ha parlato della teoria dei nuclei e mi ha fatto molta réclame a proposito di un lavoro che ho scritto qui.

Siamo diventati abbastanza amici in seguito a molte discussioni scientifiche e ad alcune partite a scacchi.”

Sembra quindi che il 22 febbraio il lavoro fosse già scritto, anche se risulta sottomesso alla Zeitschrift solo il 3 Marzo.

La genesi del lavoro sarebbe stata quindi fulminea, tenendo presente che Majorana era arrivato a Lipsia solo alla fine di Gennaio.

Ulteriori informazioni possono essere ricavate da una analisi degli appunti depositati alla Domus Galilaeana in Pisa. Ci limitiamo a poche considerazioni.

Il materiale alla Domus copre in maniera dettagliata il lavoro di Majorana solo fino al 1932.

Comunque possiamo fare le seguenti importanti osservazioni.

Il Tomo (detto Volumetto) 5, il cui testo completo è stato pubblicato da Salvatore Esposito e Erasmo Recami, contiene, tra l'altro, un capitolo sull'urto fra protoni e neutroni. L'interazione è data da un potenziale quadrato, non da una forza di scambio. Quindi il testo è stato composto DOPO la scoperta di Chadwick, ma PRIMA dell'introduzione delle forze di scambio.

Nel Tomo 5, sono date anche tutte le rappresentazioni unitarie in infinite dimensioni del gruppo di Lorentz. Nell'articolo sul Nuovo Cimento del 1932, solo una particolare classe di rappresentazioni viene pubblicata.

Majorana ha fretta, perché deve prendere la libera docenza.

Quindi il Tomo 5 si riferisce certamente al 1932.

Materiale estremamente suggestivo e` presente nel Quaderno 17, anche esso del 1932.

Tra l'altro, vi troviamo una espressione molto significativa delle forze di scambio, nella forma di Majorana, identica a quella pubblicata sulla Zeitschrift

140

Ettore Majorana,

und Protonen wird, wie wir beweisen werden, durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$(Q', q' | J | Q'', q'') = - \delta (q' - Q'') \delta (q'' - Q') J (r). \quad (1)$$

Hierbei ist  $r = | q' - Q' |$  gesetzt worden und  $Q$  und  $q$  sind die Koordinaten eines Neutrons bzw. eines Protons. Die Funktion  $J (r)$  ist positiv und sie

2<sup>a</sup> forma di interazione

$$(q', a' | V | q'', a'') = -\delta(q'' - a') \delta(a'' - q') A e^{-\frac{|q' - q''|}{\epsilon}}$$

potenzi  $e = \sum_{i=1}^N \psi_i \tilde{\psi}_i$   
 numeri  $e' = \sum_{i=1}^N \varphi_i \tilde{\varphi}_i$

$$(q' | V_P | q'') = -A e^{-\frac{|q' - q''|}{\epsilon}} (q' | e' | q'') + \delta(q' - q'') \int \frac{e^2}{|q - q'|} (q | e | q) dq$$

$$(q' | V_N | q'') = -A e^{-\frac{|q' - q''|}{\epsilon}} (q' | e | q'')$$

meccanica classica

asse  $e = \begin{cases} 2 & p < P \\ 0 & p > P \end{cases}$   $e' = \begin{cases} 2 & p' < P' \\ 0 & p' > P' \end{cases}$

$$A e^{-\frac{|q' - q''|}{\epsilon}} = A e^{-\frac{v}{\epsilon}} = A e^{-\frac{1}{2} \frac{v}{\lambda}} \quad g^N \text{ deg}$$

$$= A e^{-\kappa \frac{v}{\lambda}} \quad (\kappa = \frac{1}{2})$$

$$V_P(p, q) = \frac{1}{4\pi^3} \int \frac{e^2}{|q - q'|} e(q', p') dq' dp' - A \int \frac{8\pi \frac{1}{\epsilon}}{(\frac{1}{\epsilon^2} + 4\pi^2 |p - p'|^2)^2} e'(q, p') dp'$$

$$V_N(p, q) = -A \int \frac{8\pi \frac{1}{\epsilon}}{(\frac{1}{\epsilon^2} + 4\pi^2 |p - p'|^2)^2} e(q, p') dp'$$

Pomeron

$$P_0 = \frac{4}{2\pi\epsilon} \quad \frac{4}{\epsilon} = 2\pi P_0$$

Troviamo anche un'altra espressione altamente suggestiva. Si tratta della funzione d'onda spaziale di quattro nucleoni, ciascuno con la stessa funzione d'onda, che rappresentano la particella alfa (protone, neutrone, ciascuno con lo spin in alto o in basso). Questa espressione entra nella discussione della stabilita` massima della particella alfa. L'espressione non e` esplicitamente riprodotta nelle pubblicazioni di Majorana. Una analisi piu` dettagliata verra` presentata altrove.

18400 13540  
 5500 10900  
 1000 500  
 24900 24900

Nuclei semplici

(prima forma di interazione)

-31-

$$k_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 M \cdot e^2} = 2,9 \cdot 10^{-12} \frac{m}{M}$$

$$S = \frac{2\pi^2 M \cdot e^4}{h^2} = R \lambda \frac{M}{m} = 25000 V$$

$$E_0 = -\frac{\lambda^2 S}{2} \quad \frac{e^2}{k_0} = 50000 V$$

$H^2$

$$q = q_1 - q_2 \quad \psi_0 = e^{-\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n q_i}$$

$Z + Y = N > 2$

$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 0$

$\psi \sim \psi_1(q_1) \psi_2(q_2) \dots \psi_n(q_n) \quad \text{con } q_1 + q_2 + \dots + q_n = 0$

~~$p_1 + p_2 + \dots + p_n = \frac{1}{n} (q_1 + q_2 + \dots + q_n)$~~       $Q = \frac{1}{n} (q_1 + q_2 + \dots + q_n)$

~~$\psi = \psi_1(q_1 - Q) \psi_2(q_2 - Q) \dots \psi_n(q_n - Q)$~~

~~$\psi$~~   $\psi = \psi(q_1 - Q; q_2 - Q; q_3 - Q; \dots; q_n - Q)$

$q'_1 = q_1 - Q; q'_2 = q_2 - Q; \dots; q'_n = q_n - Q$

$q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n = 0$

$p'_i = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q_i}; \quad p'_i = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q_i}$

~~$\psi$~~   $\psi = \psi(q'_1, q'_2, \dots, q'_n)$

$p_i = p'_i - \frac{1}{n} (p'_1 + p'_2 + \dots + p'_n)$

$p_i = p'_i - \frac{1}{n} (p'_1 + p'_2 + \dots + p'_n)$

$p_i = p'_i - \frac{1}{n} \sum p'_i$

$\sum p_i^2 = \sum p_i'^2 - \frac{2}{n} (\sum p'_i)^2 + \frac{1}{n} (\sum p'_i)^2 = \sum p_i'^2 - \frac{1}{n} (\sum p'_i)^2$

$T = \frac{1}{2M} \left\{ \sum p_i'^2 - \frac{1}{n} (\sum p'_i)^2 \right\}$

particella 2

$\psi \sim e^{-5 \frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{k_0}}$

$q_1 = |q_1|; q_2 = |q_2|; q_3 = |q_3|; q_4 = |q_4|$

In conclusione possiamo dire che e' molto plausibile che Majorana sia arrivato a Lipsia con il lavoro gia' concepito nei mesi precedenti a Roma, secondo cui era possibile pervenire ad un modello nucleare, in cui protoni e neutroni entrano come costituenti elementari, tenuti insieme da una semplice forza di scambio, che rende la particella alfa il nucleo piu' stabile. A Lipsia Majorana ha dato la stesura definitiva e si e' prodigato a convincere Heisenberg. Impresa pienamente riuscita.  
Ettore Majorana non cessa di stupirci!