Fermi e Yukawa

Francesco Guerra
Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza"
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma
Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi, Roma

.

Nadia Robotti
Dipartimento di Fisica, Università di Genova

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare,
Sezione di Genova
Museo Storico della Fisica e Centro Studi e
Ricerche Enrico Fermi, Roma

Scuola AIF 2018
Il nucleo: da Rutherford ai quark, via Los Alamos
Policoro, 20 febbraio 2018

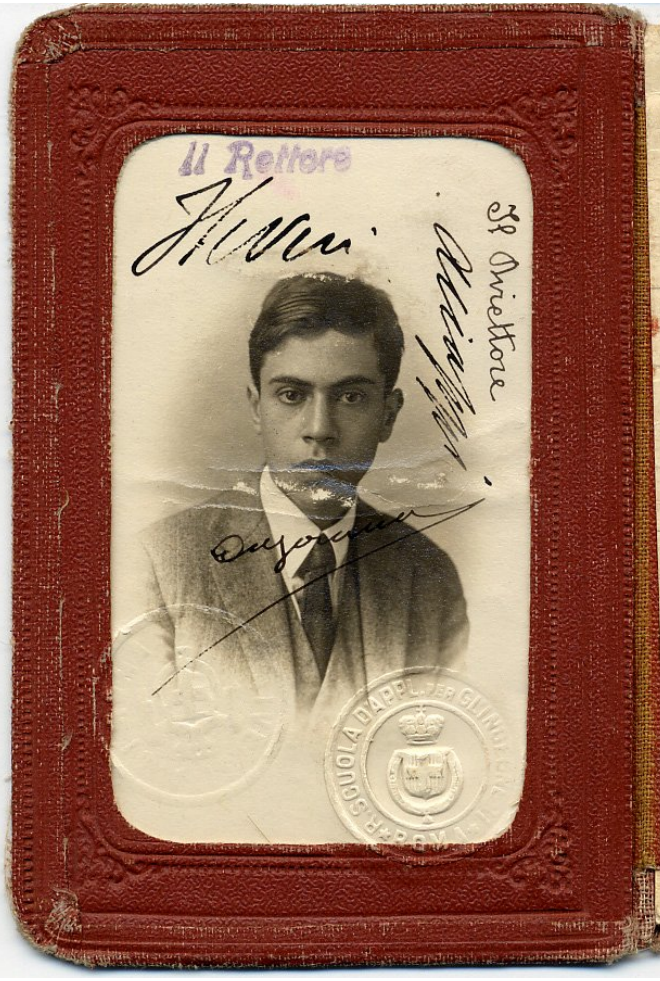
CENTRO FERMI
Museo Storico della Fisica e
Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi

Nel 2018 ricorrono gli ottanta anni di due avvenimenti importanti.

Alla fine di marzo 1938, Ettore Majorana scompare dalla sua Cattedra di Fisica Teorica all'Università di Napoli, in circostanze ritenute da molti ancora misteriose.

Nel dicembre 1938, Enrico Fermi abbandona la sua Cattedra di Fisica Teorica all'Università di Roma, per recarsi alla cerimonia per il Premio Nobel a Stoccolma, e poi emigrare definitivamente negli Stati Uniti.

A distanza di pochi mesi, l'Italia perde i suoi due massimi esperti di Fisica Nucleare.



N. di Matricola ~~10.17~~ 5906

TESSERA DI RICONOSCIMENTO

Il Sig. Maiorana Ettore

figlio di Fabio Massimo

nato a Catania

è stato immatricolato studente nella R. Università di ROMA al 1° anno per gli studi di Lett. Lug.

il giorno 3. 11. 923

Firma dell'Immatricolato

Il Rettore

R. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA 1923-1924

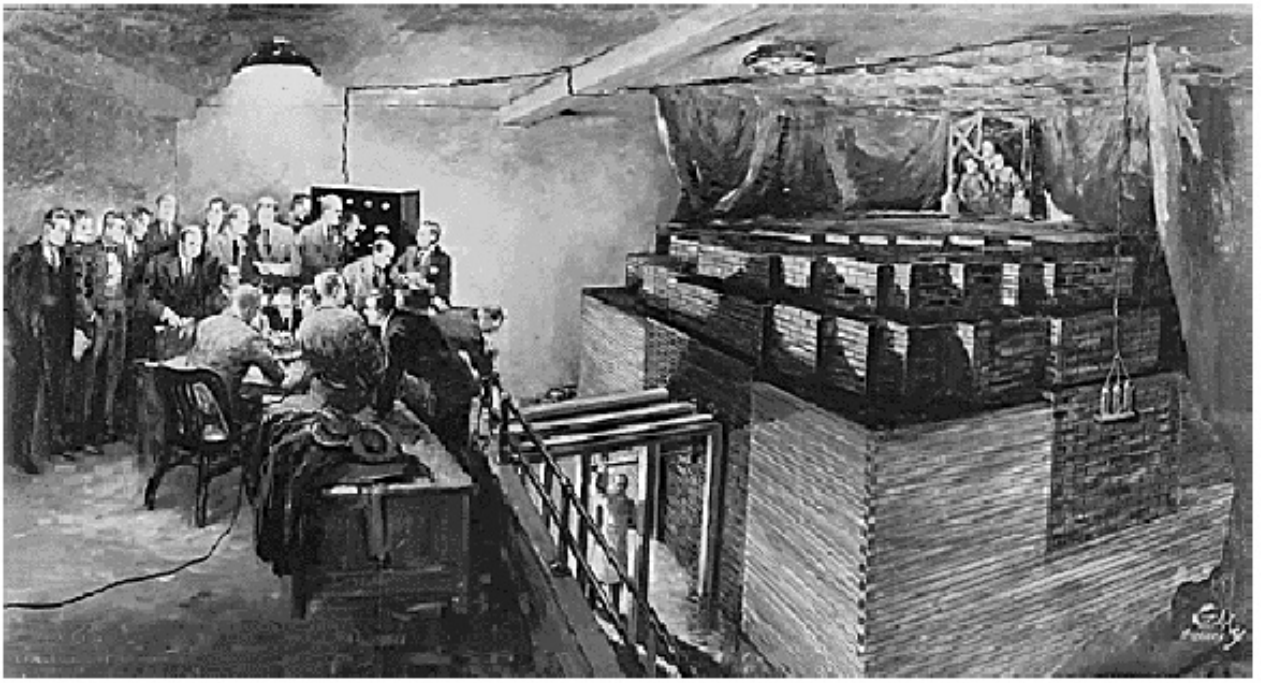
BOLLI DEGLI ANNI SCOLASTICI

Nel caso di Fermi, l'espatrio ha conseguenze drammatiche. Si era aperta una miracolosa stagione di lavoro e di ricerche, iniziata alla fine del 1933 con la formulazione della teoria del decadimento beta, ed esplosa poi nel 1934 con la scoperta della radioattività indotta da neutroni (marzo) e degli effetti del loro rallentamento (ottobre), proseguita poi con lo studio delle proprietà di diffusione, assorbimento e rallentamento dei neutroni nelle varie sostanze. Roma era di colpo diventata la capitale mondiale della fisica

dei neutroni. Ma il miracolo non poteva durare, a causa della difficoltà di proseguire le ricerche in assenza di imponenti attrezzature sperimentali.

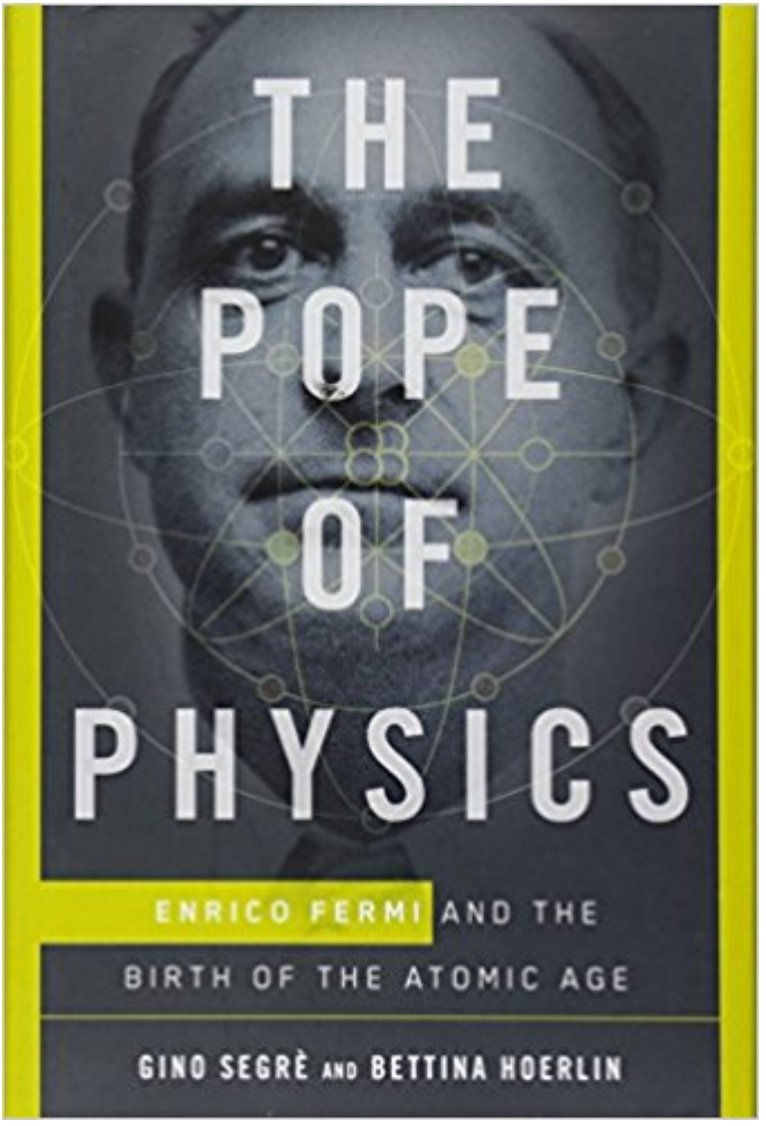
Ormai il baricentro delle ricerche si spostava verso gli Stati Uniti, dove si concentravano le più ampie disponibilità strumentali e finanziarie. Ed infatti nel giro di pochi anni "il navigatore italiano" realizza prima il successo strepitoso della reazione di fissione nucleare a catena autosostenuta e controllata con la

pila nucleare CP-1, ad uranio naturale e grafite, messa in criticità in un campo sportivo di Chicago (dicembre 1941), partecipa poi al progetto Manhattan, con le note conseguenze del Trinity Test di Los Alamos (luglio 1945) e del bombardamento di Hiroshima e Nagasaki (agosto 1945).

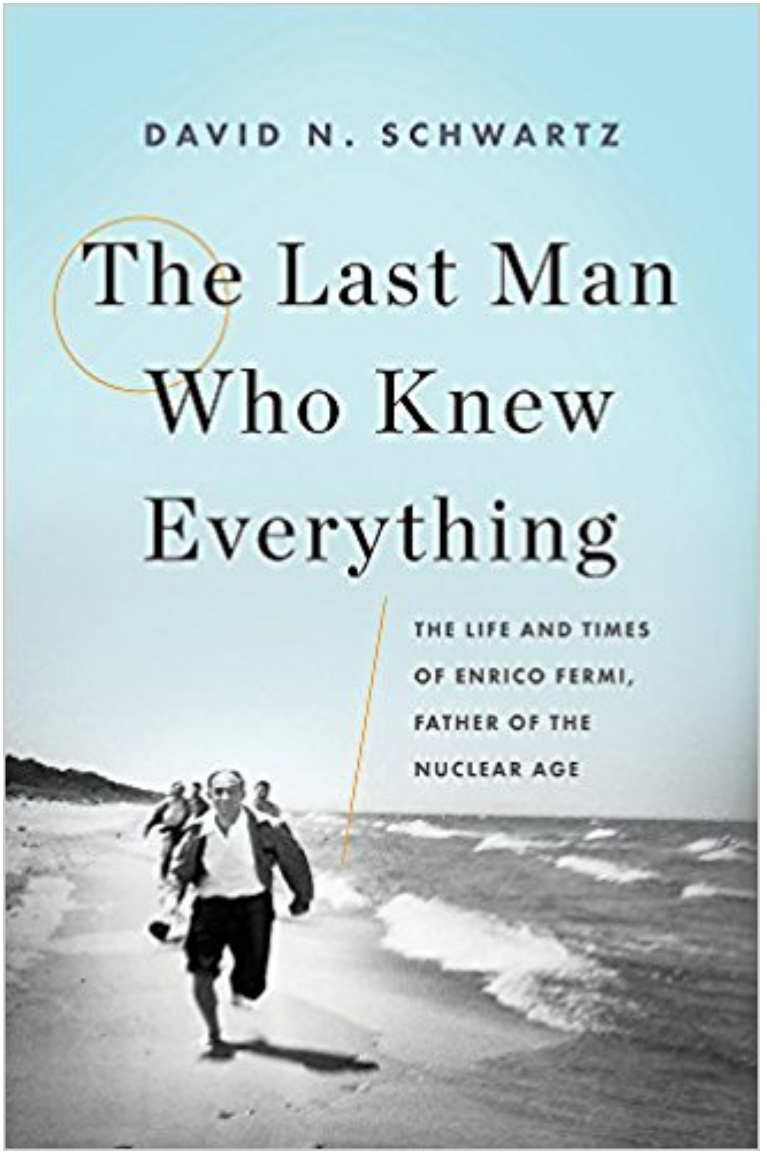


La grande attualità di Fermi è testimoniata anche dalla comparsa recente di due autorevoli monografie sulla sua vita e la sua opera scientifica.

La prima da parte di Gino Segrè e Bettina Hoerlin:
"The Pope of Physics - Enrico Fermi and the birth of the atomic age", Henry Holt and Company, New York, 2016.


THE POPE OF PHYSICS
ENRICO FERMI AND THE BIRTH OF THE ATOMIC AGE
GINO SEGRÈ AND BETTINA HOERLIN

A cui segue il volume di David N. Schwartz: ”The Last Man Who Knew Everything - The life and times of Enrico Fermi, father of the nuclear age”, Basic Books, New York, 2017.


DAVID N. SCHWARTZ
The Last Man Who Knew Everything
THE LIFE AND TIMES OF ENRICO FERMI, FATHER OF THE NUCLEAR AGE

Per entrambi i volumi è pronta anche l'edizione in italiano.

In questa Scuola, dal titolo suggestivo "Il nucleo: da Rutherford ai quark, via Los Alamos", tra i vari temi proposti, la scelta è stata di parlare su "Fermi e Yukawa".

Sarà utilizzato molto materiale proveniente dalla nostra monografia:
Francesco Guerra e Nadia Robotti: "Enrico Fermi e il quaderno ritrovato - 20 marzo 1934 - La vera storia della scoperta della radioattività indotta da neutroni, SIF, 2015.

€ 40,00

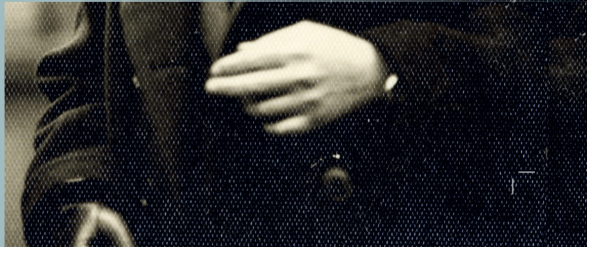
ISBN 978-88-7438-096-1

ENRICO FERMI E IL QUADERNO RITROVATO

Francesco Guerra Nadia Robotti

ENRICO FERMI E IL QUADERNO RITROVATO

20 marzo 1934 - La vera storia della scoperta
della radioattività indotta da neutroni



Anche di questa è stata preparata la versione in inglese:
Francesco Guerra and Nadia Robotti: "The Lost Notebook of ENRICO FERMI - The True Story of the Discovery of Neutron-Induced Radioactivity", SIF and Springer, 2017.

Seguiremo un itinerario molto significativo, che tocca i punti seguenti:

- la scoperta del neutrone (e l'avvio dei modelli nucleari: Werner Heisenberg ed Ettore Majorana)

- Enrico Fermi e la sua teoria del decadimento beta, la conseguente scoperta della radioattività indotta dai neutroni

- l'interazione di Fermi come possibile origine delle forze nucleari (un coraggioso tentativo di Heisenberg)

- Hideki Yukawa e le forze nucleari mediate da una nuova particella

- Mesotroni e Yukoni

- Il mesotrone NON è responsabile delle forze nucleari (Conversi-Pancini-Piccioni)

- il vero Yukone (mesone π)

- il Premio Nobel per Hideki Yukawa (1949)

Il neutrone

Agli inizi del 1932, la struttura del nucleo era ancora ristretta al modello protoni-elettroni.

Per esempio, la particella alfa (il nucleo dell'elio), di peso atomico A=4 e numero atomico Z=2, era assunta come costituita da quattro protoni, che assicuravano il corretto A=4, e due elettroni, che bilanciavano la carica 4 dei protoni e assicuravano la carica corretta complessiva Z=2.

Sono note le enormi difficoltà del modello a protoni-elettroni. Esse riguardano molte delle proprietà nucleari, in particolare il momento angolare e la statistica, come discusso

a lungo nel corso del congresso di fisica nucleare organizzato da Orso Mario Corbino ed Enrico Fermi a Roma nell'ottobre del 1931. Un utile approfondimento di queste questioni si può trovare nella nostra monografia.

Da un punto di vista dinamico, c'è una difficoltà insormontabile. L'elettrone è una particella leggera, rispetto al protone. Non c'è modo di mantenere confinato un elettrone in una regione dell'ordine di dimensioni del nucleo, quindi di circa 10^{-13} cm. Il principio di indeterminazione di Heisenberg forzerebbe

l'elettrone ad avere una energia enorme, di gran lunga maggiore di quella tipica con cui un elettrone è espulso dal nucleo nel corso di un decadimento beta. Inoltre, non sono conosciute le forze che potrebbero confinare gli elettroni nei nuclei.

Il modello nucleare a protoni-elettroni è gravemente ed irrimediabilmente insufficiente.

Le cose cambiano in modo drastico con la scoperta del neutrone, una particella *pesante*, con una massa quasi uguale a quella del protone, ma con una carica zero.

La scoperta del neutrone avviene secondo linee tortuose.

Già nel 1930 Walther Bothe (1891-1956) (Premio Nobel per la Fisica 1954, per il metodo delle coincidenze, "for the coincidence method and his discoveries made therewith"), insieme con il suo giovane assistente Herbert Becker, aveva scoperto che alcuni elementi leggeri (litio, berillio, boro, ...) bombardati con particelle alfa emettevano una "radiazione molto penetrante", oltre a subire le consuete trasformazioni nucleari con

l'espulsione di un protone, e la formazione di nuclei stabili. La radiazione era particolarmente intensa nel caso del berillio. Ecco l'apparato utilizzato, come descritto nell'articolo: Künstliche Erregung von Kern-γ-Strahlen, Zeitschrift für Physik **66**, 289-306 (1930).

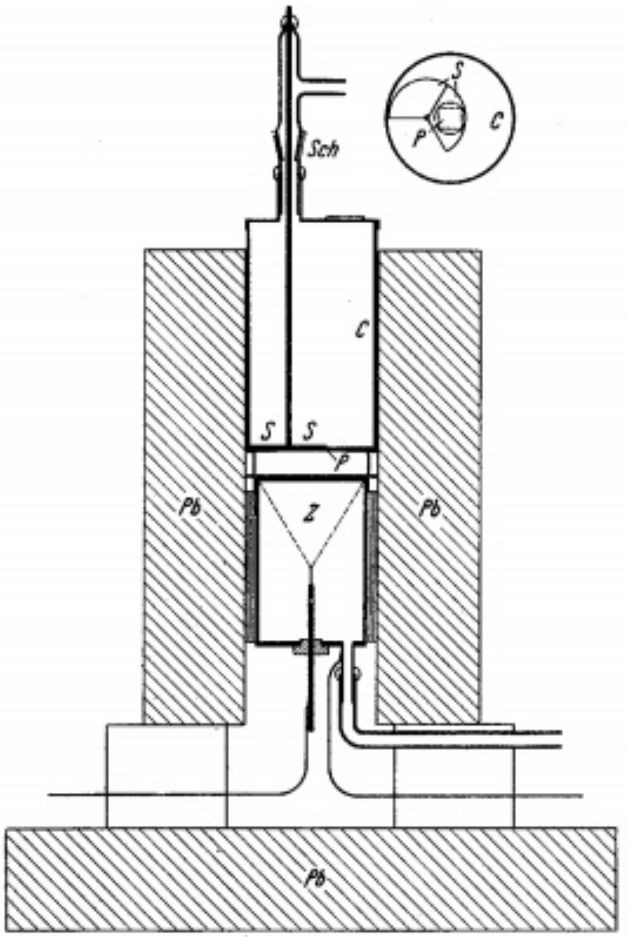


Fig. 1.

L'interpretazione di Bothe era semplice ed efficace. Il bombardamento alfa provocava una "eccitazione artificiale nel nucleo", che poi decadeva emettendo una radiazione gamma. Questa interpretazione era completamente corretta, anche perché Bothe e Becker utilizzavano come rivelatore un contatore Geiger a punta molto sensibile, che poteva rivelare solo radiazione gamma, oltre ad eventuali elettroni, qui però esclusi.

Bothe aveva comunicato questi importanti risultati anche nel corso della sua relazione su invito alla conferenza di Roma nel 1931.

Le ricerche furono proseguite da Frédéric Joliot e Irène Curie al Laboratorio del Radio a Parigi. Lavorando con una camera di Wilson, i Joliot-Curie, che avevano a disposizione sorgenti di alfa molto intense sotto forma di preparati di polonio, fecero la scoperta cruciale. La radiazione prodotta dalle alfa sul berillio era in grado di mettere in movimento (proiettare) protoni, e anche altri nuclei leggeri, fino a fargli raggiungere energie di qualche Mev. Purtroppo, l'interpretazione data a questi importanti risultati era completamente sbagliata. I Joliot-Curie, seguendo Bothe-

Becker, pensavano che i protoni fossero messi in movimento per effetto Compton dalla radiazione gamma del berillio.

Infatti, con questa interpretazione i gamma avrebbero dovuto possedere una energia enorme, dell'ordine di decine di MeV, completeamente irrealistica nel caso di fenomeni nucleari. Ancora maggiore doveva essere poi l'energia dei gamma capaci di spostare nuclei ancora più pesanti dei protoni. La situazione quindi era quanto mai confusa. Di

certo venivano emessi raggi gamma. Di certo la radiazione poteva spostare protoni e altri nuclei leggeri. Ma lo spostamento dei protoni non poteva essere spiegata tramite l'azione dei gamma.

Su questo punto si inserisce bene il famoso apologo, secondo cui Ettore Majorana avrebbe violentemente criticato l'interpretazione dei Joliot-Curie, e avrebbe fornito l'interpretazione corretta del fenomeno.

"Che stupidi, non si sono accorti di avere scoperto il protone neutro".

Infatti, se la radiazione del berillio avesse avuto una componente corpuscolare, di particelle neutre, in modo da non essere viste

nella camera di Wilson, con massa comparabile a quella del protone, allora lo spostamento osservato dei protoni avrebbe richiesto per queste particelle neutre solo l'energia di qualche MeV, come sanno bene tutti i giocatori di biliardo, e quindi perfettamente naturali per fenomeni nucleari.

Certamente Ettore Majorana, che proveniva da Catania, dove il gioco del biliardo era molto popolare, avrebbe capito che bastava un semplice urto elastico tra particelle,

protone neutro e protone carico, per spiegare completamente il fenomeno scoperto dai Joliot-Curie.

Purtroppo non conosciamo l'attendibilità dell'episodio, che sembra stato fabbricato *a posteriori* più che altro per dare una ulteriore "prova" che Majorana era "riluttante" a pubblicare i risultati delle sue ricerche, e che i Joliot-Curie stentavano a dare l'interpretazione fisica corretta dei loro importanti risultati sperimentali, in generale. In ogni caso,

sia Majorana che i Joliot-Curie non sono gli scopritori del "neutrone".

Invece è James Chadwick, membro del mitico laboratorio Cavendish di Ernest Rutherford a Cambridge, a concludere con pieno successo questa linea di ricerca. Lavorando con una piccola camera a ionizzazione e sensibilissimi amplificatori proporzionali, egli riesce a dimostrare, senza ombra di dubbio, che la radiazione capace di spostare i protoni, e gli altri nuclei leggeri, è costituita da corpuscoli aventi la massa del protone, con gran-

de approssimazione, e carica zero. Il neutrone è così scoperto come nuova particella elementare.

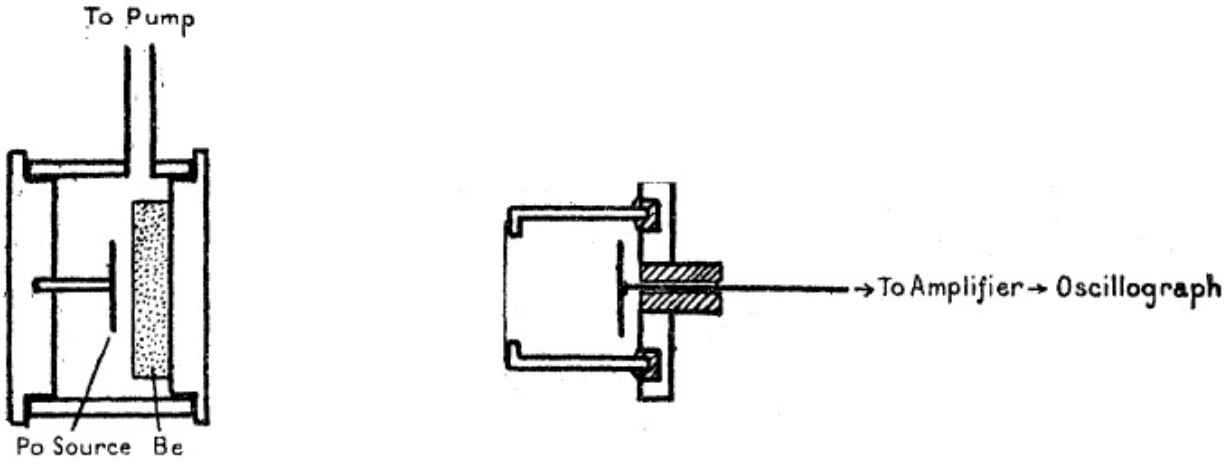


FIG. 1.

Chadwick's Neutron Chamber (1932)
With Insert

Occorre dire che a Cambridge il neutrone era nell'aria. Rutherford, e si suoi collaboratori, avevano tentato a lungo di accertarne l'esistenza. Anche il nome definitivo era stato già coniato.

Tuttavia, visti *a posteriori*, i risultati di Chadwick sono un semplice corollario di quelli dei Joliot-Curie, tanto che nella letteratura scientifica per molti anni sono stati i Joliot-Curie ad essere considerati gli scopritori del neutrone. Se le presunte affermazioni di Majorana

fossero vere e fossero state esternate pubblicamente all'inizio del 1932, *dopo* i risultati dei Joliot-Curie e *prima* di quelli di Chadwick, allora Majorana sarebbe stato considerato lo scopritore del neutrone in quanto avrebbe fornito l'interpretazione fisica corretta ai risultati sperimentali dei francesi.

In ogni caso, il Premio Nobel per la Fisica 1935 fu assegnato a James Chadwick "for the discovery of the neutron". Naturalmente i Joliot-Curie non restano senza Premio

Nobel, ma si dividono quello per la Chimica 1935 “in recognition of their synthesis of new radioactive elements” .

Il Premio Nobel per la Fisica non era stato assegnato nel 1934. La scoperta più importante del momento era il neutrone. Ma allora i vincitori sarebbero stati necessariamente Joliot-Curie-Chadwick, perché i risultati di Chadwick erano impensabili senza quelli preliminari dei francesi. Per fortuna proprio nel gennaio 1934 i Joliot-Curie avevano scoperto la radioattività artificiale indotta dal bombardamento di particelle alfa. La consumata

abilità accademica di Lord Rutherford riesce a neutralizzare la sessione 1934, in modo che Chadwick potesse avere il Premio pieno dell'anno successivo 1935, senza scontentare i Joliot-Curie, che avevano fatto una ulteriore grandissima scoperta e potevano essere dirottati sulla Chimica.

Naturalmente con la scoperta del neutrone sorge la possibilità di costruire modelli nucleari realistici.

Secondo una affermata tradizione romana il primo sarebbe stato naturalmente Ettore Majorana, che però non avrebbe voluto pubblicare i suoi risultati ancora non definitivi. Non c'è nessuna evidenza che questo sia vero, anche consultando gli appunti di Majorana dell'epoca, che sono tutti disponibili liberamente in rete sul sito della Domus Galilaeana di Pisa.

In realtà è stato Werner Heisenberg a pubblicare i primi risultati sui modelli nucleari a protoni-neutroni.

La disponibilità dei neutroni permette immediatamente di interpretare il nucleo come costituito da N_p protoni e N_n neutroni, in modo che il peso atomico sia $A = N_p + N_n$, e il numero atomico $Z = N_p$. Ora la meccanica quantistica non offre ostacoli per il confinamento dei neutroni nel nucleo, in quanto si tratta di una particella "pesante", come il protone, e il principio di indeterminazione di Heisenberg richiede che, nel confinamento in una regione di dimensioni circa 10^{-13} cm, le energie coinvolte siano realistiche su scala nucleare.

Si tratta naturalmente di trovare le giuste interazioni tra i costituenti nucleari. Heisenberg sviluppa le sue considerazioni in una serie di tre lavori sulla Zeitschrift für Physik, comparsi tra l'estate del 1932, e la primavera del 1933. Non è necessario spiegare in dettaglio il modello di Heisenberg, anche perché esso viene completamente superato dalle considerazioni di Majorana.

Majorana si trovava a Lipsia all'inizio del 1933.

Sächs. Gepäckausgabe
in der Ausgangshalle
Droschken
Fahrkarten
II
Eingangshalle
Handgepäck
19
20
20

Heisenberg gli fa prendere visione del suo terzo lavoro. Majorana si accorge immediatamente che sono possibili miglioramenti sostanziali, e presenta la sua proposta, pubblicata in un articolo sulla prestigiosa Zeitschrift nella primavera del 1933.

Heisenberg accoglie immediatamente le proposte di modifica apportate da Majorana, ne fa un'attiva propaganda in Germania e all'estero. Nella sua relazione su invito al Congresso Solvay dell'ottobre 1933 Heisenberg

presenta in tutti i dettagli la teoria di Majorana, e ne ottiene il riconoscimento ufficiale. Ormai il modello del nucleo si chiama Heisenberg-Majorana.

In questi modelli nucleari giocano un ruolo alcune caratteristiche fondamentali. I nuclei sono a densità approssivamente costante. Heisenberg, molto lucidamente, si accorge che tra le varie forze che agiscono sui nucleoni, un ruolo importante deve essere giocato da forze di scambio, che hanno la

proprietà di saturarsi progressivamente, con l'aggiunta di nuovi nucleoni.

Le forze di scambio, o forze di risonanza sono forze fenomenologiche che entrano nella meccanica quantistica delle interazioni omeopolari. Supponiamo che due particelle abbiano funzione d'onda $\psi(\vec{x}, \vec{y})$, dove $\vec{x}, \vec{y}$ sono le coordinate che descrivono i gradi di libertà configurazionali delle due particelle, per esempio le posizioni.

Le forze ordinarie di interazione sono tipicamente descritte da una Hamiltoniana della

forma

$$H\psi(\vec{x},\vec{y}) = V(|\vec{x}-\vec{y}|)\psi(\vec{x},\vec{y}),$$

dove V è un opportuno potenziale.

Una forza di scambio è invece profondamente diversa, e può porsi per esempio nella forma

$$H\psi(\vec{x},\vec{y}) = V(|\vec{x}-\vec{y}|)\psi(\vec{y},\vec{x}),$$

dove si deve notare che le coordinate delle due particelle sono state scambiate.

Facciamo un semplice esempio proveniente dalla fisica atomica. Consideriamo una molecola di idrogeno ionizzata, e quindi costituita da due protoni e un elettrone. Trattiamo il sistema secondo la meccanica quantistica. L'Hamiltoniana complessiva contiene oltre alle parti cinetiche anche le tre interazioni Coulombiane, repulsive tra i due protoni, e attrattive tra i protoni e l'elettrone. L'equazione di Schrödinger permetterà di descrivere per esempio i livelli energetici del sistema.

Secondo i metodi consueti della fisica molecolare, è possibile dare una descrizione più

semplice e sostanzialmente equivalente di questo sistema, considerando solo i due protoni, con la consueta repulsione Coulombiana, a cui viene aggiunta una conveniente forza di scambio attrattiva. Ciascuno dei due protoni tenta di attirare l'unico elettrone esistente, che per così dire passa una parte del suo tempo vicino a ciascuno dei due protoni. Il risultato netto è una particolare forza attrattiva tra i due protoni, che viene riconosciuta come forza di scambio. Naturalmente in questo schema è l'elettrone che viene "scambiato", e l'elettrone è una particella reale. Il sistema

infatti può essere descritto da una equazione quantistica complessiva in cui intervengono le tre particelle.

Nel caso del modello nucleare le forze di scambio hanno solo un valore fenomenologico, non intervenendo esplicitamente nelle equazioni i gradi di libertà delle particelle "scambiate" .

Naturalmente sia Heisenberg che Majorana hanno una profonda dimestichezza con le forze di scambio, che entravano nelle questioni

di fisica molecolare da loro precedentemente affrontate. In particolare, Majorana aveva affrontato da anni il problema del legame omeopolare, anche in collaborazione indiretta con il suo amico Giovannino Gentile.

Abbiamo detto che il modello nucleare di Majorana è profondamente innovatore rispetto a quello di Heisenberg, anche condividendone i tratti fondamentali, secondo cui si tratta di modelli a protoni-neutroni in cui intervengono forze di scambio.

Può essere utile rileggere il breve annunzio dei suoi risultati che Majorana fa sulla Ricerca Scientifica, prima della pubblicazione dell'articolo completo sulla Zeitschrift, in una lettera dal titolo "Nuove ricerche sulla teoria dei nuclei", Ricerca Scientifica **4** (1), 522 (1933).

LETTERE ALLA DIREZIONE
E RICERCHE IN CORSO

Questa rubrica comprende le informazioni sulle *Ricerche scientifiche in corso* di mano in mano che ci vengono comunicate.

Le lettere alla Direzione dovranno essere brevi, chiare, e firmate. *La Ricerca Scientifica* nel pubblicarle lascia ai firmatari la responsabilità del loro contenuto.

Nuove ricerche sulla teoria dei nuclei

E' in corso di stampa una mia memoria che riassume lavori eseguiti in Lipsia e che verranno in luce sul *Zeitschrift für Physik*.

In questo studio dimostro la possibilità di raccogliere in un sistema chiuso di notevole semplicità alcuni fra i tratti più caratteristici della fenomenologia nucleare, come l'alta stabilità della particella α e l'andamento generale delle curve dei difetti di massa e di volumi nucleari.

Si suppone che i nuclei siano costituiti esclusivamente da protoni e da neutroni, come nella teoria precedentemente avanzata da Heisenberg, ma a questa vengono apportate due sostanziali modificazioni per ristabilire l'accordo con l'esperienza.

La prima di esse consiste nel cambiamento di segno delle forze di risonanza fra particelle eterogenee, necessario per spiegare senza artificiose ipotesi aggiunte l'apparente impenetrabilità dei costituenti nucleari. La seconda modificazione viene introdotta per rendere conto della struttura compatta dei nuclei di elio e riguarda la dipendenza di dette forze dall'orientazione dei momenti intrinseci.

Lipsia, 28 *aprile* 1933.

Prof. ETTORE MAJORANA

A proposito di gazometri e di esplosioni

Nella mia memoria pubblicata con questo titolo, nel fascicolo N. 4 del 28 febbraio u. s. di questo periodico, sono incorsi alcuni errori a proposito dell'incidente ad un gazometro della Officina del Gas di Stuttgart e precisamente: l'incidente non è avvenuto nel 1922 ma invece il 16 novembre 1921 — il gazometro era da 100.000 mc. e non da 10.000 mc. — e l'olio incendiato era un olio minerale qualunque e non *immunol* perchè questo fu introdotto nell'uso soltanto nell'anno successivo.

La pratica di oleare i gazometri, invece di verniciarli, data dal 1900 quando fu applicata con buoni risultati a Vienna.

Nel 1910, otto fra i maggiori gazometri delle officine di Gitschinerstrasse e di Holzmarktstrasse a Berlino, furono trattati a questo modo e nessun lavoro è occorso in seguito. Successivamente questo sistema è divenuto popolare e sempre con buoni risultati. Ma non ostante che fino dal 1922 fossero state fissate le caratteristiche che dovevano avere gli oli da mettere nei gazometri, alcuni incendi si sono verificati con conseguenze più o meno gravi.

L'*immunol* è stato studiato appunto per evitare questi pericoli.

Roma, 30 *aprile* 1933.

Ing. ALBERTO PACCHIONI

Concimazioni rameiche nella coltura del tabacco

Nel 2° congresso internazionale di studi e ricerche sul terreno agrario, Alison ha riferito su alcune interessanti esperienze eseguite nella Florida (1), per studiare l'effetto dei sali di zinco, di rame e dell'associazione degli uni e degli altri su varie colture; particolarmente favorevoli sono i risultati ottenuti in quest'ultimo caso, sia come aumento che come precocità di prodotto. Della opportunità di sperimentare in qualche caso l'effetto di concimazioni rameiche avevo già parlato varii anni fa a proposito

(1) Proc. 2 Int. Cong. Soil Sci. *6*, 275 (1932).

“È in corso di stampa una mia memoria che riassume lavori eseguiti in Lipsia e che verranno in luce sul *Zeitschrift für Physik*.
In questo studio dimostro la possibilità di raccogliere in un sistema chiuso di notevole semplicità alcuni tra i tratti più caratteristici della fenomenologia nucleare, come l'alta stabilità della particella α e l'andamento generale delle curve dei difetti di massa e di volumi nucleari.
Si suppone che i nuclei siano costituiti esclusivamente da protoni e da neutroni, come

nella teoria precedentemente avanzata da Heisenberg, ma a questa vengono apportate due sostanziali modificazioni per ristabilire l'accordo con l'esperienza.
La prima di esse consiste nel cambiamento di segno delle forze di risonanza fra particelle eterogenee, necessario per spiegare senza artificiose ipotesi aggiunte l'apparente impenetrabilità dei costituenti nucleari. La seconda modificazione viene introdotta per rendere conto della struttura compatta dei nuclei di elio e riguarda la dipendenza di dette forze

dall'orientazione dei momenti intrinseci.
Lipsia, 28 aprile 1933.

Prof. Ettore Majorana"

Si tratta di una descrizione sintetica dei risultati espressa in forma estremamente efficace. Da notare la critica non tanto velata alla formulazione data da Heisenberg ("spiegare senza artificiose ipotesi aggiunte").

Nella formulazione di Majorana le uniche forze introdotte sono la repulsione Coulombiana tra i protoni e una forza di scambio attrattiva tra protoni e neutroni.

È molto interessante capire come mai la particella alfa è il nucleo più stabile. Consideriamo due protoni e due neutroni, ciascuno con i suoi due possibili stati di spin, in alto e in basso. Il principio di esclusione di Pauli non impedisce di porre le quattro particelle nello stesso stato quantico localizzato configurazionale. Qui l'attrazione è massima e il nucleo nel suo stato fondamentale si trova in equilibrio tra le forze coulombiane repulsive e le forze di scambio attrattive. Aggiungendo un nuovo nucleone, per esempio un neutrone, questo non potrà trovarsi nello stesso

stato quantico degli altri, perché il principio di Pauli lo impedisce. Dovra quindi andare su una funzione d'onda localizzata più lontana, e il suo legame con i protoni sarà minore che non per gli altri due neutroni.

In ultima istanza, l'approssimata costanza della densità nucleare, per i vari nuclei, è dovuta al principio di esclusione di Pauli.

Scriviamo esplicitamente la forza di scambio tra un protone e un neutrone, con funzione d'onda

$$\psi(\vec{x}, \sigma; \vec{y}, \tau),$$

dove $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ ($\vec{y} \in \mathbb{R}^3$) è la posizione del protone (neutrone) e $\sigma = \pm 1$ ($\tau = \pm 1$) il suo spin.

Per Heisenberg la forza di scambio è

$$(H\psi)(\vec{x}, \sigma; \vec{y}, \tau) = -J(|\vec{x} - \vec{y}|)\psi(\vec{y}, \tau; \vec{x}, \sigma),$$

dove sono scambiate sia le posizioni che gli spin. Per Majorana si ha invece

$$(H\psi)(\vec{x}, \sigma; \vec{y}, \tau) = -J(|\vec{x} - \vec{y}|)\psi(\vec{y}, \sigma; \vec{x}, \tau),$$

e quindi solo le posizioni sono scambiate.

Inoltre, per Majorana $J(|\vec{x} - \vec{y}|) \geq 0$, mentre $J(|\vec{x} - \vec{y}|) \leq 0$ per Heisenberg. Nella formulazione di Heisenberg esistono anche altre forze agenti (le "artificiose ipotesi").

La modifica della forza di scambio non è un semplice effetto estetico, ma ha profonde ripercussioni fisiche. In un certo senso, Heisenberg è un conservatore, e la sua forza di scambio presuppone che la particella scambiata sia un elettrone, anche se virtuale. Mentre Majorana è più drasticamente fenomenologico. Nel suo schema la particella vir-

tuale scambiata ha spin zero. È quindi Majorana che espelle definitivamente gli elettroni dal nucleo, anche se solo come particelle virtuali.

Il congresso Solvay 1933 è un trionfo per Majorana, anche se non è stato invitato e non può parlare. Però Heisenberg nella sua relazione gli dà ampio credito, e riconosce la superiorità dello schema di Majorana.

Ormai i modelli fenomenologici a protoni-neutroni per il nucleo sono ben affermati.

Il decadimento beta e la radioattività artificiale indotta da neutroni

Il modello di Heisenberg-Majorana a protoni-neutroni per il nucleo si afferma in modo incontestabile. Però apre una falla notevole nella comprensione della fenomenologia nucleare. Molti nuclei pesanti subiscono decadimento beta, in cui il nucleo espelle un elettrone, che viene emesso con energie variabili fino a un massimo ben definito per ciascun decadimento. Se non ci sono elettroni nel

nucleo, come è possibile che elettroni vengano espulsi nel decadimento beta? E come si spiega lo spettro continuo nell'energia?

Qui Enrico Fermi interviene con tutta la sua genialità, e alla fine del 1933 perviene alla sua rivoluzionaria teoria del decadimento beta.

Fermi era stato presente al congresso Solvay 1933, ed era completamente convinto della

correttezza della teoria nucleare di Heisenberg-Majorana. Inoltre era un profondo conoscitore della teoria quantistica dei campi, avendo studiato a fondo l'elettrodinamica quantistica.

La sua soluzione del mistero del decadimento beta fa leva sulla teoria quantistica dei campi, e si basa su una profonda intuizione di una analogia tra l'emissione elettromagnetica nei fenomeni atomici e il decadimento beta.

Nell'emissione di un quanto luminoso la nuvola elettronica dell'atomo si riassesta perdendo energia. Il contrario avviene nel caso di assorbimento. Naturalmente sarebbe profondamente sbagliato assumere che il fotone pre-esista nell'atomo prima dell'emissione. La natura quantistica del campo elettromagnetico permette la creazione e distruzione di fotoni.

L'assunzione fondamentale di Fermi è che nel decadimento beta un neutrone si trasformi in protone, emettendo contemporaneamente l'elettrone, in modo da conservare la

carica, ma anche una nuova particella, a carica zero e massa piccolissima ipotizzata alcuni anni prima da Wolfgang Pauli, e battezzata "neutrino" da Fermi. La nuova particella può prendere parte dell'energia disponibile. In questo modo viene spiegato lo spettro continuo della particella beta emessa.

La teoria di Fermi è espressa in termini di teoria quantistica dei campi, come è necessario perché particelle vengono create e distrutte. La teoria porta a previsioni quantitative in accordo con l'esperienza. In sostanza

Fermi ha introdotto una nuova interazione, l'interazione "debole".

In buona sostanza, la scoperta della radioattività indotta da bombardamento con neutroni è una sorta di "esercizio" per verificare la teoria del decadimento beta al di là del caso di nuclei naturali. Nel bombardamento il neutrone, privo di carica, penetra nel nucleo e può trovare una situazione energetica favorevole perché possa trasformarsi in un protone, se è disponibile uno stato quantico di energia inferiore, emettendo nel con-

tempo un elettrone, che viene rivelato come decadimento beta artificiale, e un neutrino.

L'interazione di Fermi come possibile spiegazione delle forze di scambio nucleari

La teoria di Fermi del decadimento beta si diffonde rapidamente in Europa. Prima del Natale 1933, Felix Bloch, allora visitatore a Roma, avverte per lettera Gregor Wentzel a Zurigo, affermando che *Fermi ha prodotto una bella teoria del decadimento beta introducendo il neutrino, che riproduce i fatti*

sperimentali in maniera così semplice che io credo fortemente in essa. Wentzel comunica i risultati a Wolfgang Pauli, che ne è molto felice tanto da scrivere ad Heisenberg la famosa frase: *Das wäre also Wasser auf unsere Mühle* (*È tutta acqua per il nostro mulino*). Infatti, la validità fisica dell'ipotesi del "neutrone" di Pauli veniva confermata nell'ambito di un ben precisa formulazione quantitativa, anche se il nome era stato cambiato da Fermi in "neutrino".

La diffusione della teoria di Fermi nell'ambito dell'Istituto fisico di Roma avviene inve-

ce con insolita lentezza. Secondo una ben precisa testimonianza di Edoardo Amaldi, i ragazzi di via Panisperna vengono a sapere della teoria di Fermi solo durante le vacanze invernali in una serata passata a discutere mentre erano tutti in albergo.

Con molto coraggio, Werner Heisenberg coglie al balzo l'opportunità offerta dalla teoria di Fermi, e tenta di spiegare, in un ambito di teoria quantistica dei campi, le forze di scambio nucleari di Heisenberg-Majorana come dovute all'effettivo scambio di una coppia di elettrone-neutrino tra neutrone e protone.

C'è una corrispondenza molto interessante tra Heisenberg e Fermi su questa possibilità all'inizio del 1934. Naturalmente il tentativo fallisce. L'interazione di Fermi descrive una forza debole, mentre la forza nucleare è forte. La forza di scambio dovuta alle coppie virtuali elettrone-neutrino, che pure c'è, risulta di parecchi ordini di grandezza inferiore a quella necessaria per tenere insieme i nuclei.

Però il contributo di Heisenberg è concettualmente molto importante. Viene introdotta l'idea che le forze di scambio nucleari,

introdotte fenomenologicamente, potrebbero essere interpretate nell'ambito di una teoria quantistica dei campi, come scambio di oggetti virtuali.

Mentre nella fisica molecolare le forze di scambio sono dovute allo scambio di elettroni reali, in condizioni di risonanza quantistica, invece in fisica nucleare, a causa della grande differenza nelle scale energetiche e spaziali, le forze di scambio vanno interpretate come scambio di oggetti virtuali, nell'ambito di

una teoria quantistica dei campi. Lo sfortunato tentativo di Heisenberg fa da battipista alla formulazione di Yukawa.

Hideki Yukawa e le forze nucleari mediate da una nuova particella

Possiamo seguire il ragionamento svolto da Yukawa, che nel 1934 era ancora professore incaricato all'Università di Osaka, usando la relazione da lui tenuta in occasione del Premio Nobel: "Meson theory in its developments", Stoccolma, Nobel Lecture, 12 dicembre 1949.

Riassumiamo. La teoria mesonica prese origine dall'estensione del concetto di campo di forza, in modo da poter includere le forze nucleari, oltre alle forze gravitazionali ed elettromagnetiche. Queste forze devono avere un carattere di saturazione, in modo da rendere conto del rapido incremento dell'energia di legame dal deuterone alla particella alfa. Viene riconosciuto che Heisenberg aveva introdotto forze di scambio che mostravano in modo naturale proprietà di saturazione. Viene poi richiamata la teoria del decadimento beta di Fermi, e il tentativo di Heisenberg di

spiegare le forze nucleari come dovute allo scambio di un elettrone e un neutrino, allo stesso modo come le forze elettromagnetiche possono essere considerate come dovute allo scambio di un fotone. Tuttavie queste forze di Fermi-Heisenberg sono troppo deboli.

L'idea del campo mesonico fu introdotta nel 1935 (in realtà il primo annunzio era del 1934) allo scopo di ovviare a questo inconveniente. Si assume che le forze nucleari siano

dovute ad un campo scalare U che soddisfa l'equazione d'onda relativistica nel vuoto

$$\Big(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}-\kappa^2\Big)U=0,$$

dove κ è una costante con le dimensioni dell'inverso di una lunghezza.

Quindi il potenziale statico tra due nucleoni a distanza r è proporzionale a

$$\frac{e^{-\kappa r}}{r}.$$

Il range delle forze è proprio dato da $1/\kappa$. Per contrasto nel caso elettromagnetico la massa del fotone è nulla e le forze sono a lungo range, decadendo solo come $1/r$.

Lo schema viene inquadrato nella teoria quantistica dei campi. Al campo U corrispondono nuove particelle, o quanti, che hanno massa

$$\mu = \frac{\kappa\hbar}{c},$$

e spin zero, soggette alla statistica di Bose-Einstein.

La massa di queste particelle può essere dedotta dal range delle forze nucleari. Assumendo per esempio $\kappa = 5 \times 10^{-12}$ cm^{-1}, otteniamo $\mu \approx 200 m_e$, dove m_e è la massa dell'elettrone.

Per ottenere le forze di scambio protone-nucleone dobbiamo assumere che questi mesoni hanno carica elettrica $+e$ e $-e$, e che

un mesone negativo (positivo) viene emesso (assorbito) quando il nucleone passa dallo stato di neutrone a quello di protone.

Quindi un neutrone e un protone posso interagire tra di loro tramite uno scambio di mesoni allo steso modo come due particelle cariche interagiscono tramite scambio di fotoni.

Infatti, possiamo ottenere forze di scambio del tipo di Heisenberg se assumiamo che la

costante di accoppiamento g tra i campi mesonico e nucleonico, che ha le stesse dimensioni della carica elettrica elementare e, è poco più grande che lo stesso valore di e.

Ma la corretta forza di scambio di Majorana ha segno opposto a quello di Heisenberg. Yukawa si accorge che si ottengono forze di Majorana se si assume che il mesone abbia un carattere pseudoscalare rispetto alle inversioni spaziali.

Nel frattempo, dall'epoca di Heisenberg-Majorana si erano accumulate nuove evidenze sperimentali che mostravano per esempio che il tipo e la grandezza dell'interazione protone-protone erano gli stessi che quelli dell'interazione protone-neutrone, a parte il contributo Coulombiano. Esistono quindi anche interazioni nucleari protone-protone (e neutrone-neutrone). Yukawa ne deduce la necessità di postulare anche l'esistenza di mesoni neutri, con le stesse caratteristiche di quelli carichi.

Come possiamo vedere il ragionamento di Yukawa è estremamente lineare e diretto, so-

lidamente inserito nelle precedenti considerazioni di Heisenberg, Majorana, Fermi. La sua ipotesi del tripletto di mesoni carichi e neutri è oltremodo naturale.

Ci si può addirittura chiedere come mai la teoria mesonica di Yukawa non sia stata inventata da Heisenberg, o Majorana, o Fermi, che avevano tutta l'attrezzatura mentale per arrivare a queste conclusioni. Forse l'ardire di inventarsi "nuove particelle" non era consono alla mentalità dei nostri. Ci sarebbe una lunga analisi da fare, per capire fino in fondo

le linee metodologiche dei tre, le loro cautele e i conseguenti limiti che gli impediscono la meta.

Hideki Yukawa risulta più spregiudicato, e può utilizzare al meglio le risorse culturali e i precedenti risultati dei tre.

C'è da dire che la cultura giapponese dell'epoca, anche se solidamente ancorata ai fortissimi motivi tradizionali, è estremamente aperta all'apporto europeo, e in particolare italiano. Basti dire che Galileo Galilei è

molto popolare in Giappone. Addirittura, in contributi generali di insigni fisici giapponesi recenti ho potuto trovare espliciti riferimenti alla teoria dei livelli di conoscenza di Antonio Gramsci: *Passaggio dal sapere al comprendere, al sentire e viceversa, dal sentire al comprendere, al sapere*.

(Kamefuchi S., Summary talk. Hiroomi Umezawa, his physics and research. Int J Mod Phys B 1996).

Inoltre, esistono precise testimonianze secondo cui Yukawa leggeva in anteprima i lavori di

Fermi e Majorana pubblicati in italiano sulla Ricerca Scientifica e sul Nuovo Cimento.

Naturalmente sorge il problema di accertare se i mesoni di Yukawa sono effettivamente osservabili *fuori* dal nucleo. *Dentro* il nucleo la teoria di Yukawa è sostanzialmente equivalente a quella di Heisenberg-Majorana.

Qui la storia prende un percorso molto tortuoso ma ricco di conseguenze.

Mesotroni e Yukoni

Nel 1937 una nuova particella (instabile) viene scoperta nei raggi cosmici (C. Anderson, S. Neddermeyer), con una massa intermedia tra quella dell'elettrone e del protone (circa 100 MeV). È il *mesotrone*, costituente la componente "dura" (più penetrante) dei raggi cosmici nella bassa atmosfera. Immediatamente una intensa attività di ricerca si sviluppa sul mesotrone. Gli italiano partecipano con grande impegno. Sia quelli rimasti in Italia (Gilberto Bernardini, Gian Carlo Wick, Marcello Conversi, Ettore Pancini,

Oreste Piccioni, ...), sia gli emigrati (Franco Rasetti, Bruno Rossi, ...).

Naturalmente, Yukawa propone di identificare il mesotrone con la particella da lui ipotizzata come mediatrice delle interazioni nucleari. L'ipotesi sembra molto naturale, tanto che molti autori parlano del mesotrone come "yukone". Ma alla ripresa delle attività a Roma, dopo la fine della guerra, quando Ettore Pancini ha lasciato le sue mansioni di comandante Achille, viene fatta una scoperta sensazionale. Un celebre esperimento

di Marcello Conversi, Ettore Pancini, Oreste Piccioni, mostra senza ombra di dubbio che il mesotrone interagisce molto debolmente con la materia nucleare, in completo contrasto con le proprietà attese per uno yukone.

Il mesotrone è "degradato" a una nuova particella elementare, il muone, strettamente imparentato con l'elettrone, e soggetto a interazioni deboli.

La teoria di Yukawa precipita in un limbo indistinto. Pare che lo Yukone sia solo un costrutto teorico.

Finalmente nel 1947, attraverso l'analisi di emulsioni fotografiche esposte ai raggi cosmici, avviene la scoperta del pione, il vero yukone, che interagisce fortemente con la materia nucleare, e decade in muoni e neutrini (Lattes, Muirhead, Powell, Occhialini).

Incidentalmente osserviamo che si tratta di un ulteriore Premio Nobel mancato per G.P.S. Occhialini, infatti:

The Nobel Prize in Physics 1950 was awarded to Cecil Powell "for his development of

the photographic method of studying nuclear processes and his discoveries regarding mesons made with this method",

come due anni prima:

The Nobel Prize in Physics 1948 was awarded to Patrick M.S. Blackett "for his development of the Wilson cloud chamber method, and his discoveries therewith in the fields of nuclear physics and cosmic radiation".

Il Premio Nobel per Hideki Yukawa (1949)

L'ipotesi di Yukawa dell'origine delle forze nucleari non solo è quindi solo un capolavoro della fisica teorica, ma ha anche trovato piena conferma sperimentale, con la scoperta della tripletta dei pioni (π^+, π^-, π^0), avvenuta nel 1947.

Dopo una ventina di nominations, che partono un po' prematuramente fin dal 1940, riceve finalmente il Premio Nobel 1949, con una motivazione redatta con la consueta precisione e sinteticità:

“for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces” .

Per il 1949 avevano ricevuto nominations, tra gli altri, Hans Bethe, Max Born, Walther Bothe, John Cockroft, Donald Kerst, Lise Meitner, Cecil Powell, Bruno Rossi, Arnold Sommerfeld, Leo Szilard, Carl Anderson, Felix Bloch, Giuseppe Occhialini, Pierre Auger, Hendrik Kramers.

Tra gli sponsor di Yukawa figurano Victor Weisskopf, John Slater, Bruno Rossi, Otto Stern.

E con questo termina il nostro breve percorso.