

ENRICO FERMI

# NOTE E MEMORIE

(COLLECTED PAPERS)

VOLUME I  
ITALIA 1921-1938

ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI - ROMA

---

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

79.

LE ULTIME PARTICELLE COSTITUTIVE DELLA  
MATERIA

\*Atti Soc. It. Progr. Sci.», 22<sup>a</sup> Riunione, Bari 1933-XI vol. 2, 7-14; \*Scientia», 55, 21-28 (1934-XII).

Forse la più essenziale delle differenze tra gli oggetti del mondo macroscopico, cioè gli oggetti comuni e gli oggetti del microscopico mondo degli atomi è la seguente:

Nel mondo macroscopico non si trovano mai due oggetti eguali. Consideriamo per esempio due pezzi di ferro: noi potremo ridurli ad avere lo stesso peso e la stessa forma esteriore; potremo anche cercare di rendere il più possibile eguale la grana della loro struttura microcristallina, lo stato di tempera, il contenuto delle varie impurità e così di seguito. Evidentemente però mai potremo sperare che i due pezzi di ferro siano ridotti ad essere completamente eguali, e la ragione di questa impossibilità è da ricercarsi nella estrema complessità degli oggetti in esame, costituiti da aggregati di miliardi di miliardi di atomi e di molecole: basta che uno di questi atomi in uno dei due pezzi di ferro sia spostato rispetto all'atomo corrispondente dell'altro pezzo, perché i due oggetti non possano più chiamarsi identici. In questo senso dunque la non esistenza di corpi identici nel mondo macroscopico può interpretarsi come un indizio di una struttura molto complessa.

La situazione diventa da questo punto di vista assai diversa se, dalla considerazione degli oggetti comuni, passiamo a quella degli atomi e delle molecole o, più ancora, dei loro costituenti, i nuclei e gli elettroni. Nel mondo atomico infatti si incontrano frequentemente oggetti eguali tra di loro; così per esempio, può affermarsi che due qualsiasi elettroni, o anche due qualsiasi atomi della stessa specie sono eguali tra di loro. Naturalmente, si dirà, l'identità assoluta di due oggetti qualsiasi è impossibile a constatarsi: essa può controllarsi soltanto entro certi limiti di approssimazione, dipendenti dalle nostre possibilità di osservazione. E se pur questi limiti, col progredire dei mezzi tecnici, potranno ridursi sempre più piccoli, non si può certo mai pensare che essi scendano fino a zero. Tutto ciò, naturalmente, è vero, e così anche la affermazione che per esempio due elettroni qualsiasi sono eguali tra di loro deve necessariamente intendersi in senso relativo alle nostre attuali possibilità di osservazione. E tuttavia queste, per il caso specifico della constatazione della identità tra due elettroni, sono estremamente accurate. Senza entrare qui in dettagli, che ci porterebbero troppo lontano, mi limiterò ad osservare che la grande precisione con cui può constatarsi l'identità di due elettroni dipende dalla possibilità di osservare gli effetti di una eventuale differenza accumulati per un tempo molto lungo. Così per esempio se tra

due elettroni contenuti nello stesso atomo vi fosse una differenza sia pure assai lieve, l'effetto di questa sarebbe pure lieve, se considerato durante un breve periodo di tempo della vita dell'atomo, ma alla lunga finirebbe per alterare in modo essenziale la struttura e le proprietà esterne dell'atomo. Possiamo pertanto affermare l'identità di due elettroni, se non in senso assoluto, per lo meno entro limiti di precisione straordinariamente piccoli.

Il fatto che nel mondo atomico si incontrino frequentemente oggetti eguali ci incoraggia a pensare che la struttura dei corpuscoli atomici non sia estremamente complessa, e che, una volta che si sia riusciti ad analizzare la natura dei corpuscoli atomici, nuclei ed elettroni, non ci si trovi semplicemente ad avere spostato il problema della struttura della materia un gradino più in basso verso elementi più minuti, ma si sia, per così dire, raggiunto un pianerottolo che, se pur non rappresenti la base ultima su cui è costruito l'edificio materiale, e che forse non è raggiungibile dalla intelligenza umana, possa per lo meno considerarsi sufficiente per un tempo molto lungo. Naturalmente tutto questo non è che una semplice supposizione, se pure esistono ragioni serie per farla considerare attendibile.

Oggi che la struttura dell'atomo è conosciuta con notevole sicurezza sappiamo che ogni atomo è fatto da un nucleo e da un numero maggiore o minore di elettroni e possiamo contare quanti sono i tipi di particelle differenti dai cui aggregati sono costituiti tutti i corpi. Si tratta in tutto di poche centinaia di corpuscoli diversi, ciò che, come sopra si diceva, sembrava indicare che non si sia lontani da una analisi completa degli elementi strutturali della materia. Forse i più importanti tra questi diversi tipi di corpuscoli sono gli elettroni, i quali sono presenti in tutti gli atomi; essi sono anche quelli che sono conosciuti da più lungo tempo, essendo stato possibile produrli e studiarli isolatamente nella scarica elettrica nei gas rarefatti; i così detti raggi catodici non sono infatti che una proiezione di elettroni liberi con velocità assai elevata e, come tutti sanno, dallo studio delle proprietà di questi si può determinare la carica e la massa dell'elettrone.

Si ritiene generalmente che l'elettrone sia un vero e proprio corpuscolo elementare, e cioè che esso non sia ulteriormente analizzabile in elementi più semplici; e certamente non si è mai avuta fino ad oggi alcuna indicazione che possa far supporre una struttura complessa di esso. Per contro vi sono delle buone ragioni per ritenere che i nuclei positivi degli atomi non siano corpuscoli semplici ma aggregati, in qualche caso abbastanza numerosi, di elementi più semplici.

Ciò è già indicato in qualche modo dal numero relativamente grande di possibili nuclei, che indica di per sé una struttura di una certa complicazione. Ma un argomento assai più diretto per dimostrare la complessità dei nuclei ci è dato dalle disintegrazioni nucleari, sia quelle spontanee che si osservano nelle sostanze radioattive, sia quelle artificiali prodotte bombardando un nucleo con particelle alfa o con protoni velocissimi. In tutti questi casi assistiamo a uno spezzamento o a un riassetto della compagine nucleare; un nucleo può emettere dei corpuscoli oppure assorbirne trasformandosi così in un altro nucleo di specie differente. Oggi che la struttura dell'atomo è sostanzialmente conosciuta, il problema di analizzare e comprendere le strut-

ture dei nuclei è venuto ad essere il problema più centrale e profondo degli studi di fisica.

Tra tutti i nuclei certamente il più semplice è quello dell'idrogeno o protone; esso è il nucleo che ha la massa più piccola (circa una unità di peso atomico) e la carica elettrica più piccola (eguale, salvo il segno, alla carica elettronica). Il protone, al pari dell'elettrone, si considera generalmente come una particella elementare, non costituita da elementi ulteriori; semplice o no, esso è certo uno degli elementi fondamentali della struttura nucleare.

Fino a un paio di anni fa, l'elettrone e il protone erano gli unici corpuscoli semplici conosciuti, e si riteneva che tutti i nuclei altro non fossero che aggregati di protoni e di elettroni, in numero tale che il nucleo risultante venisse ad avere il giusto valore per la carica elettrica e il peso atomico. Oggi le possibilità per costruire una teoria dei nuclei si sono assai notevolmente arricchite con la scoperta sperimentale di due nuove particelle elementari o, per lo meno, semplicissime: il neutrone e l'elettrone positivo o positrone.

Di queste la prima ad essere scoperta è stato il neutrone. Per primo Bothe, nel 1931, osservava che il Berillio, bombardato con delle particelle alfa, emetteva una radiazione di potere penetrante notevolmente superiore a quello di tutte le radiazioni gamma allora conosciute; poco dopo F. Joliot e sua moglie Irene Curie, figlia della celebre scopritrice del Radio, osservarono che le radiazioni emesse dal Berillio nelle condizioni accennate avevano la proprietà di proiettare dei protoni fuori dalla paraffina o da altre sostanze contenenti idrogeno. Questa proprietà dimostrava che la radiazione del Berillio certo non era costituita da soli raggi gamma, poiché questi non possono trasmettere che un impulso lievissimo a corpuscoli relativamente pesanti come i protoni. Al principio del 1932 Chadwick, riprendendo le esperienze dei Joliot, poté dimostrare che la radiazione del Berillio era capace anche di trasmettere un impulso a nuclei più pesanti del protone e, interpretando questi risultati, arrivò alla conclusione che la radiazione doveva essere costituita da un nuovo tipo di particelle, la cui esistenza era stata spesso volte sospettata ma mai dimostrata, e che egli chiamò neutroni. Essi sono elettricamente neutri, ed hanno massa assai prossima a quella del protone, cioè di circa una unità di peso atomico. Il forte potere penetrante dei neutroni, che sono capaci di attraversare uno spessore di piombo di parecchi centimetri, si spiega facilmente col fatto che essi sono elettricamente neutri; per questa ragione infatti, quando i neutroni attraversano la materia, essi non risentono alcun effetto dei campi elettrici dovuti agli elettroni del corpo attraversato, che avrebbero una azione frenante su di essi, ma possono soltanto interagire con un nucleo, quando per caso vengano a passare a una distanza straordinariamente piccola da esso. Dall'essere questi corpuscoli elettricamente neutri, resta giustificata anche la loro efficacia come agenti per produrre disintegrazioni artificiali di nuclei. Se infatti si vuole produrre una disintegrazione nucleare, lanciando contro al nucleo un corpuscolo carico di elettricità positiva, quale un protone o una particella alfa, il campo elettrico del nucleo urtato respinge la particella urtante, ostacolando il suo avvicinarsi; mentre un neutrone, non avendo carica elettrica, non viene respinto e può giungere indisturbato fino al nucleo.

La scoperta dell'altra particella elementare a cui abbiamo accennato, il positrone o elettrone positivo, fu annunciata per la prima volta da Anderson circa un anno fa; dopo pochi mesi la scoperta fu confermata e dimostrata in modo assai più completo da Blackett e Occhialini. Questi fisici, osservando in una camera di Wilson le disintegrazioni della materia prodotte dall'urto dei corpuscoli della radiazione cosmica, osservarono in alcuni casi delle vere e proprie esplosioni in cui un nucleo veniva spezzato in una ventina di corpuscoli proiettati da esso come le pallottole di uno shrapnell. Deflettendo questi proiettili in un campo magnetico, essi poterono constatare che, mentre alcuni di essi venivano incurvati in un verso tale da indicare che si trattava di elettroni negativi, le traiettorie di altri venivano piegate in verso opposto indicando trattarsi di corpuscoli con carica elettrica positiva. Dalla densità della ionizzazione prodotta da questi corpuscoli, e con altre considerazioni che non è qui il caso di esporre, si poté anche riconoscere che la loro massa doveva essere dell'ordine di grandezza della massa dell'elettrone. Si trattava dunque di un vero e proprio elettrone positivo. Dopo la scoperta del positrone la sua presenza fu riscontrata anche in fenomeni indipendenti dalla radiazione penetrante. Importante in particolare fu la scoperta, che irradiando atomi, specialmente di elevato peso atomico, con delle radiazioni gamma assai dure, ha luogo una produzione di elettroni positivi o meglio, almeno nella maggior parte dei casi, di una coppia costituita da un normale elettrone negativo e da uno positivo. Vedremo tra un momento la notevole portata teorica di questo fatto.

La scoperta del neutrone permette, secondo Heisenberg e E. Majorana, di costruire uno schema generale della struttura dei nuclei, esente da molte delle obiezioni che si potevano elevare contro il modello primitivo secondo cui i nuclei dovevano pensarsi costituiti da soli protoni ed elettroni. Invero, data la piccolissima massa di questi ultimi corpuscoli, un elettrone, costretto entro una orbita con dimensioni dell'ordine di grandezza di un nucleo, dovrebbe acquistare delle energie cinetiche enormi, che dovrebbero essere fortemente sensibili nel difetto di massa dell'atomo; a questa difficoltà di carattere quantitativo se ne aggiungono altre di carattere più qualitativo, ma che non è possibile illustrare completamente date le limitazioni di spazio imposte a questo discorso. Vorrei qui solamente accennare che il comportamento statistico del nucleo dell'azoto, messo per la prima volta in evidenza dalle belle osservazioni di Rasetti sopra l'effetto Raman dell'azoto allo stato gassoso, sembra incompatibile con l'ammettere che esso sia costituito da un numero dispari di particelle elementari (14 protoni e 7 elettroni secondo il vecchio schema); incompatibilità di questo genere, osservate per la prima volta nell'azoto, sono state in seguito incontrate in numerosi altri esempi, tanto da far perdere ogni credito allo schema di struttura per protoni ed elettroni.

Secondo le teorie di Heisenberg e di Majorana invece, come elementi fondamentali della struttura nucleare si debbono considerare protoni e neutroni. Potrebbero poi forse questi ultimi essere pensati a loro volta costituiti dalla unione di un protone con un elettrone, ciò che probabilmente è necessario per spiegare la possibilità di una disintegrazione con emissione di raggi  $\beta$ ,

si tratterebbe in ogni caso di una aggregazione fatta secondo leggi diverse da quelle della ordinaria meccanica quantistica: come la meccanica ordinaria perde la sua validità per descrivere il comportamento degli elettroni nel cambiamento di scala da quella ordinaria a quella atomica, così il nuovo cambiamento di scala dai fenomeni atomici a quelli nucleari renderebbe necessario un nuovo cambiamento, i cui particolari naturalmente ci sono per ora sconosciuti; sembra invece che la ordinaria meccanica quantistica sia sufficiente per descrivere, anche nell'interno del nucleo, il comportamento di corpuscoli relativamente pesanti, quali i protoni e i neutroni. Questi infatti, per la loro considerevole massa, hanno, anche nelle orbite nucleari, delle velocità abbastanza piccole a confronto di quella della luce, per modo che le correzioni relativistiche al loro movimento restano sempre di importanza secondaria. Se dunque veramente si potrà dimostrare che gli elettroni nucleari, la cui esistenza si deve certo ammettere se si vuol spiegare l'emissione delle particelle  $\beta$ , non esistono tuttavia allo stato libero, ma sono per esempio intimamente associati a dei protoni in modo da formare dei neutroni, resterà aperta una possibilità relativamente agevole di costruire, almeno fino ad un punto abbastanza avanzato, una teoria del nucleo, in quanto sarà possibile, almeno fino a che non si vogliano studiare quei fenomeni nei quali viene intaccata la struttura neutronica, servirsi dei procedimenti e dello schema generale interpretativo della meccanica quantistica. Naturalmente, una volta che si fosse a questo punto, anche a prescindere dalle difficoltà matematiche, resterebbe sempre il problema essenziale di conoscere le leggi delle forze agenti tra i corpuscoli costitutivi del nucleo. Resterebbe poi in un secondo tempo da chiarire la struttura del neutrone, per la quale, come si diceva, non dovrebbe verosimilmente essere più applicabile lo schema della meccanica quantistica; si ha innanzi in proposito, nello spettro continuo dei raggi  $\beta$ , qualche indizio, che secondo Bohr indurrebbe a pensare che in queste nuove leggi sconosciute non sia forse più valido nemmeno il principio della conservazione dell'energia; quando almeno non si voglia ammettere con Pauli l'esistenza del così detto « neutrino » e cioè di una ipotetica particella elettricamente neutra ed avente massa dell'ordine di grandezza della massa elettronica. Questa, per il suo enorme potere penetrante, sfuggirebbe praticamente a ogni attuale mezzo di osservazione, e la sua energia cinetica servirebbe a ristabilire la bilancia energetica nelle disintegrazioni  $\beta$ . Certamente su tutte queste questioni sopra la struttura nucleare porterà molta luce l'accumularsi delle nostre conoscenze sopra le varie possibilità di disintegrazione dei nuclei; e dà ragione a bene sperare la rapidità veramente impreveduta con cui si sono succeduti i progressi sperimentali in questo campo negli ultimi due anni.

Ci resta ancora da aggiungere poche parole sopra la importanza teorica della scoperta dell'elettrone positivo. Nei tentativi di costruire una meccanica quantistica per l'elettrone, che fosse compatibile con il principio di relatività, tentativi culminati con i lavori di Dirac, si era sempre incontrata la difficoltà dell'apparire, accanto agli stati normali che descrivono il comportamento dell'elettrone, di altri stati, senza un'apparente corrispondenza fisica, in cui l'elettrone avrebbe avuta una energia cinetica negativa. Dirac propose allora di ammettere che tutti questi stati anomali fossero occupati;

si verrebbe così ad avere un riempimento uniforme di tutto lo spazio che, appunto per la sua uniformità non sarebbe osservabile; potrebbe invece osservarsi solamente una lacuna in questa distribuzione uniforme, e cioè la mancanza di un elettrone da uno degli stati di energia negativa. Dirac dimostrò che una di queste lacune si comporterebbe a tutti gli effetti come un normale corpuscolo, dotato di carica elettrica positiva, e propose originariamente l'ipotesi che i protoni dovessero identificarsi con queste lacune. L'ipotesi originaria di Dirac si mostrò insostenibile, perché incapace di spiegare la grande differenza di massa tra l'elettrone e il protone, e siccome l'esperienza non aveva allora ancora dimostrata l'esistenza di un corpuscolo che avesse le proprietà delle lacune di Dirac, si pensò che esse effettivamente non dovessero avere nessun corrispondente reale. La scoperta dell'elettrone positivo ha sostanzialmente modificata questa situazione: il nuovo corpuscolo ha infatti, almeno per quanto ne sappiamo fino ad oggi, esattamente tutte quelle proprietà che la teoria di Dirac prevede per le lacune; è naturale dunque identificare le lacune con l'elettrone positivo. Se questa veduta è corretta, deve essere possibile, estraendo un elettrone da uno stato di energia negativa e portandolo in uno di energia positiva, dar luogo alla formazione simultanea di una lacuna, e cioè di un elettrone positivo e di un normale elettrone negativo, a sole spese dell'energia necessaria per lo spostamento dell'elettrone. Sembra che un fenomeno di questo genere abbia veramente luogo nella formazione di coppie di un elettrone e di un positrone prodotta dall'azione dei raggi gamma duri. Se sarà dimostrato che così è effettivamente gli elettroni positivi e negativi che così si formano potranno a buon diritto chiamarsi, secondo la proposta di Madame Curie, elettroni di materializzazione, rappresentando la trasformazione completa di energia raggiante in corpuscoli materiali.