

# Enrico Fermi e la Fisica dello Stato Solido

FRANCO BASSANI

## 1. – Introduzione

In ogni libro di Fisica dello Stato Solido il nome di Enrico Fermi è quello che appare più spesso, accanto ai nomi di W. Pauli, A. Einstein, W. Heisenberg, E. Schrödinger, F. Bloch, R. Peierls e L. Landau. Egli può essere infatti considerato uno dei fondatori della moderna teoria dei solidi, anche se si è raramente occupato di problemi specifici di Fisica dello Stato Solido.

I suoi contributi riguardano principalmente i fondamenti teorici, ed è su tali fondamenti che si è sviluppata la comprensione dei più importanti fenomeni fisici dei corpi solidi. Sono i risultati delle ricerche del periodo successivo alla sua laurea, prima che, all'inizio degli anni trenta, i suoi interessi si volgessero allo studio del nucleo atomico, e poi allo studio delle particelle elementari. A tali problematiche teoriche pensò però per tutta la vita, come dimostrano contributi saltuari e articoli divulgativi, nonché calcoli e documenti dell'epoca di Los Alamos apparsi in parte nel 1955 dopo la sua morte, e come testimoniano concordi i suoi numerosi allievi.

I contributi principali di Fermi, che sono ancora alla base dei più recenti sviluppi della Fisica dello Stato Solido, sono sostanzialmente i seguenti. Anzitutto la formulazione della legge di distribuzione statistica delle particelle che obbediscono al principio di esclusione di Pauli. Poi il modello dell'atomo basato sulla densità elettronica e sulla distribuzione statistica (Modello di Thomas-Fermi). Quindi la teoria dello pseudopotenziale, che da lui introdotta per interpretare gli stati di Rydberg dei sistemi gassosi, è stata poi sviluppata in forma diversa per calcolare gli stati elettronici di valenza e gli stati eccitati dei cristalli.

A questi occorre aggiungere la teoria della perdita di energia di elettroni veloci nei mezzi materiali e, dopo la realizzazione di altri flussi di neutroni con la pila atomica, gli

studi iniziali di diffrazione neutronica dei cristalli, che hanno aperto un nuovo capitolo della Fisica dello Stato Solido.

L'origine di tutti questi contributi è ampiamente documentata nei libri di Emilio Segrè e Bruno Pontecorvo, che sono i suoi principali biografi, e per gli aspetti storico-personali nel bel libro di Laura Fermi, "Atomi in famiglia", apparso subito dopo la sua morte [1]. I lavori scientifici di E. Fermi sono stati ripubblicati nel 1961-65 in due volumi dall'Accademia dei Lincei e dalla University of Chicago Press, in ordine cronologico e per argomenti, con corredo di commenti di collaboratori e allievi allora viventi (come FNM  $n$  verranno spesso indicati in seguito) [2]. L'opera di Fermi comprende anche un rilevante numero di libri, articoli di rassegna, conferenze varie [3]; ad essi è opportuno rifarsi per comprendere la continuità del suo pensiero e il suo impegno come educatore e divulgatore della scienza. Nel seguito vorrei toccare alcuni punti di particolare rilievo per la Fisica dello Stato Solido, cercando di evidenziarne l'attualità.

## 2. – Statistica di Fermi

L'interesse per le problematiche della meccanica statistica nasce in Fermi studente e non lo abbandonerà per tutta la vita. La tesi di abilitazione, da lui presentata alla Scuola Normale Superiore il 22 giugno 1922, è intitolata: "Un teorema di calcolo delle probabilità ed alcune sue applicazioni". È stata ritrovata da Giovanni Polvani negli archivi della Scuola, e pubblicata postuma (FNM 38b). Consiste nell'estendere un teorema di Laplace, che dà la probabilità che un numero di variabili incognite abbia valore totale compreso tra limiti prefissati, alla probabilità che almeno una di esse superi un valore prefissato. È interessante notare che il giovane studente non si limita all'aspetto matematico, ma applica il teorema a due casi concreti: la probabilità che in un gioco d'azzardo, dopo un numero  $n$  di giocate, il giocatore con disponibilità finanziarie illimitate sbanchi il giocatore che ha a disposizione una somma finita, e la probabilità che una cometa, dopo un certo tempo, si allontani parabolicamente dal corpo celeste attorno al quale sta orbitando, o collida con esso. Si manifesta così la tendenza ad applicare a problemi concreti gli aspetti generali della teoria, che sarà una caratteristica di tutta l'attività di Fermi.

Altri lavori immediatamente successivi riguardano le problematiche della meccanica statistica. Un primo lavoro sull'ergodicità di un sistema meccanico normale dimostra che ogni sistema normale è quasi ergodico, cioè in un tempo illimitato passa infinitamente vicino ad ogni punto nello spazio delle fasi di energia definita ("Nuovo Cimento", **25** (1923) 367 e "Phys. Zeits.", **24** (1923) 261). Un secondo riguarda la teoria statistica di Richardson dell'effetto fotoelettrico con le correzioni dovute alla formula di distribuzione di Planck ("Nuovo Cimento", **27** (1923) 97).

Ma due lavori sono particolarmente rilevanti per la meccanica statistica, uno sulla costante assoluta dell'entropia del gas perfetto (FNM 16) e uno pubblicato nel "Nuovo Cimento" nel 1924 dal titolo "Considerazioni sulla quantizzazione dei sistemi che contengono degli elementi identici" (FNM 19). In quest'ultimo si mostra chiaramente che occorre un principio nuovo per capire il comportamento di particelle identiche che obbe-

discono alle condizioni della meccanica quantistica di Bohr-Sommerfeld, e in particolare l'annullarsi dell'entropia allo zero assoluto. Tale principio nuovo, il principio di esclusione, fu formulato da Pauli l'anno seguente. Fermi era estremamente cauto e concreto nel suo approccio alla fisica, e forse per questo non ebbe quel volo di fantasia necessario per la formulazione del principio di esclusione e un po' se ne dispiacque, come scrivono i suoi biografi. Ne comprese però immediatamente l'importanza, e già il 7 febbraio 1926 presentò all'Accademia dei Lincei, tramite il socio A. Garbasso, la legge di distribuzione statistica di un gas quantistico di particelle che obbediscono al principio di esclusione di Pauli (FNM 30).

Per un'analisi storica e tecnica delle vicende legate alla scoperta, si rinvia agli articoli di F. Cordella e F. Sebastiani, apparsi recentemente su "Il Nuovo Saggiatore" e il "Giornale di Fisica" [4]. Ci basti osservare che nel lavoro menzionato, e nel lavoro successivo, apparsi su "Z. Physik" (FNM 31), il conteggio degli stati viene effettuato in un potenziale armonico soltanto per comodità, ma si mostra che "il risultato è indipendente dal modo particolare che si adotta". È chiaro quindi che Fermi ben capisce la generalità del principio di esclusione, e nell'applicarlo al gas di particelle libere lo estende ai moti di traslazione, mentre nella formulazione originale era riferito al moto interno degli elettroni negli atomi. È anche da osservare che già in questi lavori Fermi ricava la legge di dipendenza lineare del calore specifico dalla temperatura nei metalli e il valore della costante entropica dei gas, a conferma della sua esigenza già segnalata di applicare la teoria a problemi concreti.

I fisici più eminenti dell'epoca compresero immediatamente l'importanza della statistica di Fermi, e più tardi Dirac e Pauli stesso ne stabilirono la connessione con la simmetria della funzione d'onda per lo scambio di particelle e con lo spin. Ma già al famoso Congresso di Como del 1927, del quale il punto focale fu la presentazione dei principi della nuova meccanica quantistica, tra i commenti alla presentazione di Bohr dell'interpretazione probabilistica, troviamo un lungo intervento di Fermi, che chiarisce l'esistenza di due tipi di particelle, quelle che obbediscono alla statistica di Bose-Einstein (bosoni) e quelle che obbediscono al principio di esclusione (fermioni). Tra queste ultime, si sofferma sugli elettroni, e dopo aver citato i risultati di Pauli sul paramagnetismo anomalo dei metalli e quelli di Sommerfeld sulle proprietà termiche e di trasporto, così conclude il suo intervento profetico:

"Si può anche cercare di costruire una teoria dei metalli capace di rendere conto delle forze che tengono insieme la compagine del metallo. Basta per ciò considerare gli ioni positivi disposti ai vertici del reticolo cristallino del metallo e calcolare poi la distribuzione degli elettroni di valenza sotto l'azione delle forze elettrostatiche con metodo simile a quello applicato da Debye e Hückel nella loro teoria degli elettroliti forti, ed applicando naturalmente la nuova statistica al posto di quella classica. I calcoli numerici necessari per questa teoria sono però assai lunghi e non sono ancora completi" [5].

Queste parole delineano un campo di studi che sarà alla base della Fisica dello Stato Solido per tutto il resto del secolo. Per affrontare il problema enormemente complesso del calcolo degli stati elettronici dei cristalli occorreva tuttavia il teorema di Bloch, che venne formulato l'anno seguente. Esso stabilisce che la funzione d'onda di Schrödinger

di un sistema periodico è del tipo

$$(1) \quad \psi_n(\vec{r}, \vec{k}) = \exp [i\vec{k} \cdot \vec{r}] u_{n,\vec{k}}(\vec{r}),$$

dove  $u_{n,\vec{k}}(\vec{r})$  è una funzione periodica, e  $\vec{k}$  è un vettore d'onda nello spazio reciproco. Questo consente in linea di principio il calcolo degli stati elettronici per ogni valore del numero quantistico  $\vec{k}$ , in ogni cristallo.

Tale programma viene per la prima volta affrontato da Wigner e Seitz nel 1933 con il loro famoso articolo sull'energia coesiva del sodio metallico [6], e questo dà inizio allo studio dei livelli elettronici nei solidi, le cosiddette “bande di energia”  $E_n(\vec{k})$ . È ben noto che dalla loro conoscenza, e dalla loro occupazione in base alla statistica di Fermi deriva la comprensione delle proprietà termiche, di trasporto, e delle proprietà ottiche di tutti i cristalli [7].

Si potrebbero esaminare tutte le proprietà dei solidi ed evidenziare il ruolo cruciale che in esse svolge l'energia di separazione tra gli stati occupati e gli stati “vuoti”, il cosiddetto livello di Fermi  $E_F$ . Ad esso corrisponde nello spazio reciproco una “superficie di Fermi” nel caso dei metalli

$$(2) \quad E_n(\vec{k}) = E_F,$$

con relativa velocità di Fermi, impulso di Fermi, temperatura di Fermi etc. Nel caso di isolanti e semiconduttori il livello di Fermi è invece all'interno di un intervallo di energia proibita (“gap” di energia). La forma della superficie di Fermi determina le proprietà termiche e di trasporto dei metalli e la posizione del livello di Fermi quelle degli isolanti e dei semiconduttori, con tutte le applicazioni che da esse derivano.

Ma dalla statistica di Fermi applicata ai solidi discendono conseguenze specifiche di grande valore concettuale [8]. Basti ricordare la spiegazione della superconduttività, riconducibile alla capacità degli elettroni alla superficie di Fermi di costituire, per effetto dell'interazione con le vibrazioni, coppie con spin totale nullo e impulso nullo. Tali coppie sono simili ai “bosoni”, ma ricordano la loro origine fermionica con regole di commutazione modificate rispetto a quelle delle particelle a spin intero. È questa la ragione per cui, anziché condensare nello stato di energia minima (condensazione di Bose-Einstein) creano un nuovo stato collettivo a energia inferiore a quella minima dello stato normale (stato superconduttore di Bardeen, Cooper e Schrieffer o BCS).

È anche importante ricordare che dalla statistica di Fermi discende il concetto fondamentale di “buca” di elettrone, introdotto da Peierls per spiegare il trasporto di corrente da parte di cariche positive, quale è rivelato nell'effetto Hall anomalo. La “buca” è analoga al “positrone” di Dirac, ma è di natura diversa, perché corrisponde al comportamento collettivo degli elettroni di una banda  $E_n(\vec{k})$ , quando uno stato vicino al massimo non è occupato. Inutile aggiungere che le “buche” sono essenziali in tutta l'elettronica dei semiconduttori e delle nanostrutture (transistor, microcircuiti, etc.).

Alla statistica di Fermi è legata anche la spiegazione delle proprietà ottiche, perché sono dovute alle transizioni elettroniche [7]. In particolare, alla possibilità di invertire la

popolazione degli stati alle giunzioni dei semiconduttori mediante il controllo del livello di Fermi è dovuta la proprietà di emissione stimolata per ricombinazione di elettroni e buche (“laser” semiconduttori).

### 3. – Modello di Thomas-Fermi

Dopo aver ottenuto la funzione di distribuzione statistica e averla usata per le prime applicazioni ai calori specifici e all’entropia, Fermi la utilizzò per calcolare il potenziale efficace che agisce sugli elettroni di un atomo. Il lavoro venne presentato da O. M. Corbino all’Accademia dei Lincei nella seduta del 4 dicembre 1927 ed è pubblicato sui “Rendiconti Lincei” dello stesso anno (FNM 43). Fermi non conosceva il lavoro di L. H. Thomas, che era giunto alle stesse conclusioni circa un anno prima [9]. Dal punto di vista cronologico la priorità della scoperta sarebbe quindi da attribuire a Thomas, ma la più articolata discussione dei limiti e le successive applicazioni di Fermi stesso e dei suoi allievi giustificano pienamente il fatto che questo metodo sia universalmente noto come “modello di Thomas-Fermi”.

L’idea fondamentale consiste nell’identificare l’energia cinetica massima degli elettroni con quella di un gas uniforme, che può essere espressa in funzione della sola densità elettronica. L’energia totale deve essere costante in ogni punto altrimenti si avrebbe un flusso di elettroni da un punto all’altro, e pertanto l’energia potenziale, definita a meno di una costante, dipende dalla posizione tramite la densità elettronica in quel punto (è proporzionale a  $n^{2/3}$ ). Fermi considera anche la dipendenza dalla temperatura, mentre Thomas usa soltanto il principio di esclusione. Tuttavia la differenza non è significativa perchè gli elettroni degli stati occupati di un atomo hanno densità elevata per il piccolo spazio in cui sono racchiusi e costituiscono un gas completamente degenere, per cui la correzione al potenziale efficace è un piccolo termine costante proporzionale a  $T$ , che non modifica l’equazione al limite  $T = 0$ .

Il potenziale elettrico efficace  $eV(\vec{r})$  e la densità elettronica in ogni punto  $n(\vec{r})$  devono inoltre essere collegati tramite l’equazione di Poisson dell’elettrostatica e, sostituendo a  $n(\vec{r})$  l’espressione del modello statistico precedentemente descritta, si ottiene per il potenziale efficace  $eV(\vec{r})$  un’equazione differenziale del secondo ordine non omogenea, con un termine proporzionale a  $V^{3/2}$ . Quest’equazione consente il calcolo del potenziale di ogni atomo di numero atomico  $Z$ , con le condizioni al contorno  $rV(r) = -Ze^2$  per  $r \rightarrow 0$ ,  $V(r) = 0$  per  $r \rightarrow \infty$ , e con la condizione aggiuntiva  $\int n d\vec{r} = Z$ .

Il metodo è molto semplice e il potenziale può essere espresso tramite un potenziale efficace universale, adattabile ad ogni atomo con opportuni fattori di scala. La soluzione dell’equazione generale che ne risulta fu ottenuta numericamente da Fermi stesso, e con matematica più raffinata da Ettore Majorana, come ricordano nel descrivere il loro primo incontro i biografisti di Fermi [1].

Il potenziale efficace che nasce dal modello di Thomas-Fermi introduce un’espressione approssimata, ma molto semplice e facilmente utilizzabile, per lo schermo del potenziale coulombiano dovuto agli elettroni nel loro insieme, e dipendente soltanto dalla densità. Tale espressione è stata universalmente utilizzata nei solidi in tutta la seconda metà del

secolo. L'idea di base è stata in seguito estesa ai contributi al potenziale medio dovuti all'antisimmetria della funzione d'onda (termini di scambio) e ad ulteriori contributi dovuti alle correlazioni, sempre espressi tramite la densità locale. Questo ha consentito di costruire potenziali cristallini medi, coi quali si sono potuti calcolare gli stati elettronici nei diversi cristalli, con risultati utili per l'interpretazione delle loro proprietà ottiche e di trasporto [7]. È per questo che Gianfranco Chiarotti, nel descrivere il debito della Fisica dello Stato Solido a Fermi, afferma che il suo contributo più diretto è il modello di Thomas-Fermi [10].

Nonostante il fatto che l'accuratezza dei calcoli dei livelli elettronici con i metodi autoconsistenti di Hartree-Fock sia molto maggiore di quella del metodo di Thomas-Fermi, l'affermazione di Chiarotti è certamente condivisibile anche alla luce dei successivi sviluppi della teoria del funzionale densità. Alla base di tali sviluppi è il famoso teorema di Hohenberg e Kohn del 1964, nel quale si dimostra che lo stato fondamentale degli elettroni in un cristallo, e quindi il potenziale efficace che ne consente il calcolo, dipende unicamente dalla densità elettronica e dal nudo potenziale esterno dovuto alla distribuzione spaziale dei nuclei. La densità elettronica è sufficiente alla definizione esatta dell'hamiltoniana del sistema a molti corpi, con inclusione di tutti gli effetti di correlazione, che non sono considerati nel metodo a elettroni indipendenti di Hartree-Fock.

Gli sviluppi del concetto di funzionale densità, con le sue applicazioni ad atomi, molecole e cristalli, hanno valso a Walter Kohn il Premio Nobel per la Chimica nel 1998. Lo stesso Kohn, nel presentare la sua teoria alla Scuola "E. Fermi" della Società Italiana di Fisica di Varenna nel 1983, prende le mosse del modello di Thomas-Fermi [11] e mostra che esso può essere derivato con il principio variazionale da una forma semplice poissoniana dell'energia totale in funzione della densità elettronica locale  $n(\vec{r})$ . Il concetto alla base del modello di Thomas-Fermi è quindi lo stesso che viene poi rielaborato come teorema esatto. Tale teorema, utilizzato con forme approssimate, ma sempre più precise, del funzionale densità, tra cui espressioni in termini di densità locale, è stato determinante per calcoli precisi di energia dello stato fondamentale, includendo anche gli effetti di correlazione tra gli elettroni.

#### 4. – Teoria dello pseudopotenziale

Un altro aspetto della Fisica dello Stato Solido, che ha enormemente contribuito alla conoscenza degli stati di valenza occupati e degli stati di eccitazione a energie più elevate, è la teoria dello pseudopotenziale. Tale teoria è basata sul fatto che per tali stati si può costruire un potenziale fittizio *ad hoc*, che è più semplice del vero potenziale medio che agisce su tali stati. Un modo di ottenerlo è di utilizzare la conoscenza di autofunzioni  $\psi_i(\vec{r})$  ed autovalori  $E_i$  degli stati più interni e di imporre che quelli di valenza e di eccitazione siano ad essi ortogonali [7]. La funzione di tali stati si può quindi scrivere

$$(3) \quad \psi_v(r) = |\varphi\rangle - \sum_i \langle \psi_i | \varphi \rangle \psi_i,$$

che sostituita nell'equazione di Schrödinger con potenziale cristallino  $U_c(\vec{r})$  ed autovalori  $E$ , dà per la “pseudofunzione  $\varphi(\vec{r})$ ” l'equazione seguente:

$$(4) \quad -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\varphi + [U_c(r)\varphi + \sum_i (E - E_i)\langle\psi_i|\varphi\rangle\psi_i] = E\varphi,$$

dove lo pseudopotenziale è la somma dei due termini che agiscono sulla pseudofunzione  $\varphi(\vec{r})$ , evidenziati in parentesi quadre.

Si può notare che la condizione di ortogonalità agli stati interni introduce un termine di tipo repulsivo “non locale”, che compensa quasi completamente il potenziale  $U_c(\vec{r})$  vicino ai nuclei, e ne cancella le forti oscillazioni. Lo pseudopotenziale risulta quindi di forma assai più semplice del vero potenziale, e consente il calcolo degli stati di valenza e degli stati eccitati a partire dalla conoscenza degli stati interni a energie inferiori. Nel caso dei cristalli, in cui gli stati di valenza ed eccitati sono calcolabili a partire dalle trasformate di Fourier dello pseudopotenziale corrispondenti a vettori del reticolo reciproco, si verifica che solo poche trasformate di Fourier (corrispondenti ai vettori più piccoli) sono diverse da zero. Esse possono essere calcolate direttamente con varie approssimazioni, in cui gli pseudopotenziali sono costruiti a partire dagli atomi del reticolo cristallino, o possono essere utilizzate come un piccolo numero di parametri disponibili.

Le semplificazioni che la teoria dello pseudopotenziale ha introdotto sono state assai rilevanti, ed hanno consentito di calcolare struttura elettronica dei metalli, isolanti, e semiconduttori di interesse. In particolare, essa ha consentito di calcolare anche gli stati eccitati, e quindi le transizioni ottiche e le proprietà optoelettroniche.

È stato interessante scoprire, anche se *a posteriori*, che questa teoria è riconducibile a Fermi, come ha ben chiarito M. L. Cohen in un articolo a carattere storico [12] e nella presentazione delle applicazioni della teoria dello pseudopotenziale atomico di Fermi ad un corso della Scuola “E. Fermi” di Varenna [13].

Segrè ricorda così l'origine di questa teoria:

“Amaldi ed io osservammo righe di assorbimento nel gas di atomi di sodio in corrispondenza ad orbite enormi. Io chiamai gli atomi così eccitati “atomi gonfi”, oggi più scientificamente ma meno espressivamente, sono noti come “stati di Rydberg”. I gas estranei che avevamo introdotto nei nostri tubi di assorbimento della luce, per evitare la distillazione del vapore alcalino, con nostra sorpresa non allargavano le righe, ma le spostavano. Parlammo a Fermi, di questo inatteso fenomeno; egli ci pensò un po' e poi disse che probabilmente era causato dallo schermo prodotto dalla costante dielettrica del gas aggiunto. La cosa sembrava ovvia, e credo che calcolassimo noi la formula relativa che prevedeva uno spostamento delle righe in direzione del blu. Però per alcuni gas lo spostamento aveva la direzione opposta a quella prevista! Ciò era sorprendente, e non ci restava che ricorrere nuovamente a Fermi. Questa volta la spiegazione non venne istantaneamente. Solo qualche giorno dopo Fermi trovò la ragione e scrisse un importante lavoro che contiene per la prima volta l'idea di pseudopotenziale, e una figura famosa che ricorrerà in seguito molte volte nei più diversi lavori di Fermi” [14].

Il lavoro sperimentale cui fa riferimento Segrè apparve sul “Nuovo Cimento” nel 1934, seguito dal lavoro di Fermi sulla teoria dello pseudopotenziale [15]. L’approccio è stato ridiscusso da Chiarotti nel suo articolo che apparve nel cinquantenario della pila atomica e non intendiamo ripresentarlo [10]. Ci basti ricordare che si rappresenta il potenziale degli atomi esterni come la media di buche di potenziale in una piccola regione dello spazio, dove anche la funzione d’onda varia poco e può essere sostituita con un valore medio  $\bar{\psi}(\vec{r})$ . Fermi ottiene per il potenziale medio dovuto agli atomi esterni un’espressione che deve essere aggiunta al potenziale dell’atomo nel quale l’elettrone si trova, è proporzionale alla densità di tali atomi e ad una lunghezza caratteristica  $a$ , che può essere positiva o negativa, a seconda del tipo di atomo. Questo rende conto dello spostamento dei livelli degli stati di Rydberg, e lo esprime mediante uno pseudopotenziale applicato alla funzione mediata  $\bar{\psi}(\vec{r})$ . Questa forma dello pseudopotenziale fu poi utilizzata per lo scattering di elettroni da parte degli atomi e di neutroni da parte dei nuclei atomici, portando all’identificazione della lunghezza caratteristica  $a$  come lunghezza della sezione d’urto di diffusione.

Il concetto dello pseudopotenziale di Fermi è simile a quello rappresentato con l’equazione (4), anche se la sua forma è molto più semplice e l’origine è diversa. È però da notare che anche nei cristalli forme semplificate dello pseudopotenziale sono state proposte e utilizzate. Tra esse la somma di pseudopotenziali atomici, nei quali la parte vicina ai nuclei è rappresentata da una semplice costante, di valore diverso, positivo e negativo, per ogni tipo di atomo. Tale forma è del tutto analoga a quella originale di Fermi.

## 5. – Perdita di energia degli elettroni nella materia condensata

Dopo il suo arrivo negli Stati Uniti Fermi si interessò al problema della perdita di energia di particelle cariche che attraversano gas densi o materia condensata. Il problema era allora di stabilire se i mesoni  $\mu$  perdessero energia per decadimento spontaneo o per cessione al materiale attraversato. Gli esperimenti di Rossi ed altri mostrarono poi che la prima ipotesi era corretta, ma il lavoro di Fermi del 1940 (FNM 136) può essere considerato all’origine di quella che diventerà poi una tecnica molto efficace per lo studio delle proprietà elettroniche dei solidi, la perdita di energia di elettroni veloci.

Il suo approccio fenomenologico è tuttora utilizzato, e consiste nel calcolare i campi elettrici e magnetici prodotti da una particella carica di data velocità  $\vec{v}$  in un mezzo caratterizzato da una funzione dielettrica complessa  $\tilde{\epsilon}(\omega)$ . Se la funzione dielettrica è schematizzata con l’uso di oscillatori di Lorentz i campi possono essere calcolati analiticamente. Ad essi è associata la perdita di energia mediante il vettore di Poynting che si allontana dal cammino della particella o il lavoro compiuto sulla densità di corrente  $e\vec{v}\delta(\vec{r})$ .

Fermi mostrò che in tal modo si ottiene che gran parte dell’energia è ceduta alle eccitazioni del mezzo, e una parte è perduta sotto forma di radiazione Cherenkov quando  $v > c/\sqrt{\epsilon}$ , come già spiegato da I. Frank e Ig. Tamm.

La teoria della perdita di energia di elettroni veloci è stata poi perfezionata da Paolo Budini e da L. D. Landau negli anni cinquanta, ed è poi stata ampiamente utilizzata per



lo studio delle eccitazioni elementari nei solidi; in particolare ha consentito di evidenziare i plasmoni, gli eccitoni, e le transizioni elettroniche interbanda.

Anche in questo Fermi ha aperto una strada perseguita poi da altri, perchè ormai i suoi interessi principali lo portavano ai neutroni, ai nuclei ed alle particelle elementari.

## 6. – Diffrazione di neutroni

I risultati di Fermi in quella che poi fu chiamata la Fisica dei Neutroni richiedono un'analisi speciale perchè costituiscono una parte particolarmente significativa del contributo alla fisica di Enrico Fermi. A noi basti notare che è stata la disponibilità di intensi flussi di neutroni, quali quelli ottenuti con le pile atomiche a partire dalla pila C.P. 1 del dicembre 1942, a fornire un mezzo di indagine analogo a quello della diffrazione X nei cristalli, e per molti aspetti ad esso complementare [16]. Infatti la lunghezza d'onda dei neutroni a temperature tipiche nei reattori è dell'ordine delle distanze interatomiche nei cristalli.

La tecnica della diffrazione neutronica è oggi fondamentale per la determinazione della struttura dei materiali. È in tutto simile a quella della diffrazione X, ma in questo caso sono i nuclei anziché gli elettroni a diffondere le onde associate alle particelle. È possibile in tal modo determinare la posizione di atomi leggeri, in particolare le posizioni degli atomi di idrogeno che non diffondono gli elettroni, con conseguenze importanti per le sostanze organiche e la scoperta del legame idrogeno [16]. L'interazione dei neutroni con i momenti magnetici degli elettroni rende anche possibile la determinazione delle simmetrie delle sostanze ferromagnetiche.

Queste potenzialità non erano sfuggite a Fermi, che in effetti condusse all'Argonne National Laboratory esperimenti cruciali con i flussi neutronici del reattore C.P.3 nell'immediato dopoguerra, e pose le basi della teoria e della tecnologia della diffrazione neutronica [17]. Impiegando il tipo di pseudopotenziale prima descritto nel rappresentare la diffusione dei neutroni da parte dei nuclei, stabili che la differenza di fase tra i neutroni diffusi e quelli incidenti ha soltanto due possibilità, zero se la costante di correzione al potenziale è negativa, e  $\pi$  se la costante di correzione è positiva. Questo dipende dalla struttura interna del nucleo, ed è stato misurato sperimentalmente da Fermi e Marshall con un metodo raffinato e allo stesso tempo semplice [18]. Il metodo consiste nel considerare più ordini di riflessione di Bragg corrispondenti a piani paralleli definiti da atomi diversi, per esempio i piani (111) nel cloruro di sodio, alternativamente costituiti da piani di atomi di Na e da piani di Cl. I diversi ordini di riflessione danno intensità diverse se le differenze di fase per diffusione sono le stesse nei due nuclei o sono di segno opposto. In altri termini, i fattori di struttura della diffrazione neutronica dipendono dagli sfasamenti dei neutroni diffusi, in un modo che può essere determinato confrontando opportunamente le intensità dei fasci diffratti alle diverse condizioni di Laue. Risultati sulla diffrazione neutronica del Be e del BeO furono subito ottenuti, e collegati con la relativa differenza di fase [19].

È significativo che anche questo capitolo della Fisica dello Stato Solido sia stato aperto da Fermi, mentre i suoi interessi si stavano orientando su problemi di natura assai diversa, quali quelli delle particelle elementari. Questa è un'ulteriore conferma dell'opinione dif-

fusa che Fermi sia forse l'ultimo esponente della categoria dei fisici universali, interessati a tutti gli aspetti della Fisica e in grado di portare contributi nei campi più diversi.

Per quanto riguarda il settore specifico della Fisica dello Stato Solido, i suoi interessi in questo campo sono stati continui per tutta la vita, a partire dall'intervento al Congresso di Como già menzionato [5]. Questo è documentato dal libro "Molecole e Cristalli" del 1930, e persiste fino agli scritti del periodo di Los Alamos [20]. Che ciò sia stato in qualche modo influenzato dall'amicizia e dalla collaborazione con O. M. Corbino, che della Fisica dello stato Solido fu tra i pionieri, è molto probabile. Nel suo articolo sul debito a Fermi della Fisica dello Stato Solido [10], G. Chiarotti conclude ricordando le parole pronunciate da Corbino nel 1929 ad un Convegno della Società per il Progresso delle Scienze [21], nelle quali si preannunciava un grande futuro per la Fisica Teorica e Sperimentale degli Stati Condensati, e se ne anticipava l'importanza per le applicazioni. I settant'anni trascorsi hanno visto realizzarsi i sogni di Corbino, sia nella Fisica fondamentale che nelle applicazioni tecnologiche, e hanno mostrato quanto in essi il ruolo di Fermi sia stato determinante.

\* \* \*

Desidero esprimere la mia gratitudine a GIORGIO SALVINI, GIANFRANCO CHIAROTTI e GIUSEPPE LA ROCCA per gli utili suggerimenti che mi hanno fornito.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Biografie di Enrico Fermi: FERMI L., *Atoms in the Family* (University of Chicago Press, Chicago) 1954 ripubblicato dall'*American Institute of Physics*, Vol. 9 della serie *The History of Modern Physics* (1987) (traduzione italiana pubblicata da Mondadori Editore) 1954.  
SEGRÈ E., *Enrico Fermi, Fisico* (Zanichelli, Bologna) 1971 (seconda edizione: 1987);  
SEGRÈ E., *Enrico Fermi* (University of Chicago Press) 1970.  
PONTECORVO B., *Enrico Fermi* (Edizioni Studio Tesi, Pordenone) 1993. Traduzione dell'edizione in lingua russa.  
Vedere anche VERGARA CAFFARELLI R., *Fermi a Pisa* (E.T.S., Pisa) in corso di stampa.
- [2] Lavori scientifici di Enrico Fermi: *Enrico Fermi, Note e Memorie (Collected Papers)* (Accademia Nazionale dei Lincei e The University of Chicago Press, 2 Volumi, Roma e Chicago) 1961-1965 (ogni lavoro è indicato FNM seguito dal numero d'ordine con cui è presentato).
- [3] Libri e opere divulgative di E. Fermi: *Introduzione alla Fisica Atomica* (Zanichelli, Bologna) 1928; *Fisica ad uso dei licei*, 2 Volumi (Zanichelli, Bologna) 1928; *Molecole e Cristalli* (Zanichelli, Bologna, 1934 e ristampa anastatica del 1988); *Meccanica Statistica, Voce dell'Enciclopedia Italiana*, Vol. 32 (Istituto Treccani, Roma) 1936.  
Vedere anche: *Meccanica Statistica*, scritti scelti, a cura di ALTARELLI G. e CAPON G. (Edizione Teknos, Roma) 1988; *Nuclear Physics* (The University of Chicago Press, Chicago) 1949; *Conferenze di Fisica Atomica* (Accademia Nazionale dei Lincei, Roma) 1950; *Particelle Elementari* (Einaudi, Torino) 1958; *Termodinamica* (Boringhieri, Torino) 1958; *Notes on Quantum Mechanics* (University of Chicago Press, Chicago) 1961; *Notes on Thermodynamics and Statistics* (University of Chicago Press, Chicago) 1966.
- [4] CORDELLA F. e SEBASTIANI F., *Sul percorso di Fermi verso la statistica quantica*, Il Nuovo Saggiatore, 16, no. 1-2 (2000) 11; *La statistica di Fermi*, Giornale di Fisica, 41 (2000) 131.

- [5] *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici* (Zanichelli, Bologna) 1928; si veda ad esempio l'articolo di A. Sommerfeld, Volume II, pag. 449, e il lungo intervento di Fermi nell'ambito della discussione sulla comunicazione di Bohr, Vol. II, pag. 594-596.
- [6] WIGNER E. e SEITZ F., *Phys. Rev.*, **43** (1933) 804 e **46** (1934) 809; vedere anche l'articolo degli stessi autori *Qualitative analysis of the cohesion in metals*, in *Solid State Physics*, Vol. **1** (Academic Press, New York) 1955, pag. 97.
- [7] Vedere ad esempio: BASSANI F. e PASTORI-PARRAVICINI G., *Electronic States and Optical Transitions in Solids* (Pergamon Press, Oxford) 1975; BASSANI F. e GRASSANO V., *Fisica dello Stato Solido* (Bollati-Boringhieri, Torino) 2000.
- [8] Si veda ad esempio: SEITZ F., *Fermi Statistics*, in *Symposium Dedicated to E. Fermi on the Occasion of the 50th Anniversary of the First Reactor* (Accademia dei Lincei, Roma) 1993 pag. 47.
- [9] THOMAS L. H., *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, **23** (1927) 542.
- [10] CHIAROTTI G., *The Debt of Solid State Physics to Enrico Fermi*, in *Symposium dedicated to E. Fermi*, op. cit. rif. [8], pag. 113.
- [11] KOHN W., *Density functional theory: fundamentals and applications*, in *Punti focali nella teoria degli stati condensati, Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course LXXXIX*, a cura di F. BASSANI, F. FUMI e M. P. TOSI (North Holland) 1985, pag. 1.
- [12] COHEN M. L., *Am. J. Phys.*, **52** (1984) 695.
- [13] COHEN M. L., *Application of the Fermi atomic pseudopotential theory to the electronic structure of nonmetals*, in *Punti focali della teoria degli stati condensati*, op. cit. rif. [11], pag. 16.
- [14] SEGRÈ E., *Autobiografia di un fisico* (Il Mulino, Bologna) 1995, pag. 111.
- [15] AMALDI E. e SEGRÈ E., *Nuovo Cimento*, **17** (1934) 145; FERMI E., *Nuovo Cimento*, **11** (1934) 157.
- [16] BACON G. E., *Neutron Diffraction* (Pergamon Press, Oxford) 1975.
- [17] BACON G. E., in *Fifty Years of Neutron Diffraction* (Hilger, Bristol) 1986.
- [18] FERMI E. e MARSHALL L., *Phys. Rev.*, **71** (1947) 666.
- [19] FERMI E., STURM W. J. e SACHS R. G., *Phys. Rev.*, **71** (1947) 589.
- [20] FERMI E., PASTA J. e ULAM S., *Documento L.A.* (1940), maggio 1955 (FNM 266) pubblicato in italiano nel volume citato rif. [3], pagg. 130-141.
- [21] CORBINO O. M., *I Nuovi Compiti della Fisica Sperimentale, Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze XVIII Riunione Firenze*, 1929.

---

Franco Bassani è Nato a Milano il 29 Ottobre 1929. Si laurea in Fisica nel 1952 a Pavia quale alunno del Collegio Ghislieri. Ricercatore alle Università di Milano, dell'Illinois (USA), di Pavia e all'Argonne National Laboratory, dopo il 1963 è Professore nelle Università di Messina, Pisa e Roma. Dal 1980 è Professore di Fisica dello Stato Solido alla Scuola Normale Superiore di Pisa e dal 1999 Presidente della Società Italiana di Fisica. Autore di tre libri e circa 200 pubblicazioni scientifiche, è socio nazionale dell'Accademia dei Lincei dal 1990, dottore *Honoris Causa* delle Università di Tolosa, Losanna e Purdue (USA), vincitore del premio Somaini e del premio Italgas.

---