

Fermi nel centenario della nascita

(29 settembre 1901 - 29 novembre 1954)

(Relazione tenuta alla *Casa delle Culture* di Cosenza il 28 settembre 2001 su invito del Liceo Scientifico "Fermi" di Cosenza).

Parlare di Fermi significa parlare di buona parte della fisica che fu sviluppata dagli anni '20 agli anni '50 del novecento, cioè degli anni più fecondi di sviluppo della nuova fisica, la meccanica quantistica e la sua applicazione alla fisica atomica prima, alla fisica nucleare poi.

Fermi aveva la straordinaria capacità di impadronirsi con estrema facilità delle nuove idee, di svilupparle in modo originale e di vedere molto lontano, in modo direi profetico.

Valga, a sostegno di questa affermazione, la seguente considerazione.

Nel 1923 l'Editore Ulrico Hoepli pubblicò " *I fondamenti della Relatività Einsteiniana*" di Augusto Kopff e i curatori italiani (Contu e Bembo) inserirono in appendice gli scritti di fisici, matematici e filosofi italiani, all'uopo richiesti, sul valore e l'interpretazione della teoria. I grossi nomi dei fisici dell'epoca : Boccardi , Burgatti, La Rosa, per citarne alcuni, diedero giudizi molto critici o addirittura negativi. Sferzante quello del Prof. Giovanni Boccardi della Regia Università di Torino e del Regio Osservatorio di Pino Torinese, che conclude ironicamente: " C'è un vecchio detto italiano che dice: *se non è vero è ben trovato*, ma nei riguardi della Relatività io vorrei dire: *sarà ben trovato, ma non è vero!!* ". Molti dei filosofi e matematici apprezzano l'eleganza della teoria, ma vanno cauti sul contenuto fisico. C'è però lo scritto, in mezzo a quelli di tanti titolari di cattedra, del giovane Dott Enrico Fermi, fresco di laurea (Normale di Pisa 1921), che però si era già fatto conoscere negli ambienti della ricerca scientifica. Il giovane Fermi, con molta modestia ma con sicurezza di giudizio, osserva che quasi tutto il dibattito è centrato sul problema della connessione tra spazio e tempo e dei suoi apparenti paradossi, ma che pochi si erano soffermati sulla conseguente connessione tra massa ed energia. Dopo aver accennato semplici calcoli, con sorprendente preveggenza indica i futuri sviluppi interpretativi, scientifici e tecnologici di quella che doveva diventare la più famosa formula, molto citata ma spesso non capita, della Relatività.

Siccome non è possibile trattare tutti i contributi di Fermi alla fisica atomica, mi limiterò a parlare della creazione della statistica, detta oggi di FERMI - DIRAC, e alla sua applicazione alla teoria dei metalli, della teoria dell'emissione beta e del rallentamento dei neutroni .

E' noto che i fenomeni collettivi sono retti da leggi statistiche. Il primo esempio è la statistica classica di Maxwell - Boltzmann, che permette di interpretare la termodinamica in termini di meccanica statistica (teoria cinetica). In essa due particelle, per esempio molecole, si considerano distinguibili e inoltre si ammette che in uno stesso stato energetico ce ne possa essere un numero arbitrario. Ciò permette di spiegare i calori specifici dei gas e anche dei metalli (legge di Dulong e Petit), almeno a temperature sufficientemente alte. La spiegazione però non è valida alle basse temperature e inoltre, applicata a una cavità riempita di radiazione in equilibrio

termico, conduce alla legge di Wien dell'irraggiamento, in completo disaccordo con l'esperienza. Non solo, ma per i metalli, anche a tener conto di un solo elettrone per atomo (l'elettrone di conduzione), anche a temperatura ambiente non si dovrebbe trovare la legge di Dulong e Petit, $C=3R$ confermata dall'esperienza, ma per il principio di equipartizione di Boltzmann, $C=(3+3/2)R$.

Le cose andavano come se gli elettroni non dovessero contribuire al calore specifico. Come è noto, il fisico indiano Bose aveva proposto poco tempo prima (1924) una statistica in cui due particelle identiche sono indistinguibili e Einstein l'applicò a un gas di fotoni, ottenendo la corretta legge dell'irraggiamento scoperta da Planck.

Fermi ebbe l'idea (1926) di costruire una nuova statistica analoga a quella di Bose (indistinguibilità di due particelle identiche), però con il vincolo imposto dal principio di esclusione di Pauli per cui in uno stesso stato può stare al massimo una sola particella. Questa nuova statistica diede conto del trascurabile contributo degli elettroni al calore specifico. Il contributo di Dirac al problema delle statistiche fu di aver compreso che la statistica è legata allo spin: particelle di spin intero, come i fotoni, le particelle alfa, i nuclei di massa pari, i pioni, obbediscono alla statistica di Bose - Einstein e sono dette *bosoni*, particelle di spin semintero (elettroni, protoni, neutroni...) obbediscono alla statistica di Fermi - Dirac e sono dette *fermioni*.

Una altra conseguenza della statistica di Fermi è l'esistenza di un'energia residua allo zero assoluto. In effetti, poiché ciascuna cellula corrisponde a due stati quantici tenendo conto dello spin 1/2 degli elettroni, lo stato di energia massima del metallo corrisponde al riempimento graduale delle cellule secondo energie crescenti fino a un livello determinato dalla metà del numero degli elettroni.

Si tenga presente che per il principio di indeterminazione anche un elettrone singolo vincolato a stare in una regione limitata di spazio ha una quantità di moto e un'energia quantizzata e che i valori minimi non sono nulli. L'elettrone non può stare quindi mai in quiete, a differenza del masso di manzoniana memoria (*Il Natale*).

Ad esempio, per l'argento, nell'ipotesi di un elettrone libero per atomo, si trova $N/V = 5,8 \cdot 10^{28}$ elettroni/m³ e per l'energia di Fermi $W_F = 5,63$ eV.

(Vedi, per esempio, Fleury e Mathieu: *Trattato di fisica generale*, 8° volume).

A titolo di esempio, nella pagina seguente sono mostrati i tre diversi modi di conteggio, nell'ipotesi di tre celle e due particelle.

Esempi di distribuzioni statistiche													
tre stati 1°,2°,3°, due particelle a,b													
Maxwell-Boltzman													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1°	a	b		a		a	b		b	(ba)			In tutto 12 disposizioni $x=g(g+n-1)!/g!$
2°		a	b		b	a		a	b		(ba)		Considerando ininfluyente lo scambio ab con ba
3°			a	b		b	b		a	a		(ba)	le disposizioni si riducono a 9
$x=g^n$													
Bose - Einstein													
1°	a	a			a			a					Particelle indistinguibili
													Fotoni, elioni,...
2°		a	a		a	a							$x=(g+n-1)!/(g-1)!n!$
3°			a	a		a	a						
Fermi - Dirac													
1°	a			a									Particelle indistinguibili e principio di Pauli
2°	a	a											Elettroni, protoni, neutroni...
3°		a	a										$x=g!/((g-n)!n!)=C(g,n)$

Un altro fondamentale contributo di Fermi fu la spiegazione del decadimento β . Ancora nel 1929 fisici del calibro di Planck ritenevano che il nucleo atomico fosse costituito di protoni ed elettroni. Così il nucleo dell'ossigeno, numero atomico 8, peso atomico 16, si immaginava costituito di 8 elettroni e 16 protoni.

L'esistenza di elettroni nel nucleo era suffragata dal decadimento β : un nucleo radioattivo a volte si disintegrava con l'emissione di un elettrone.

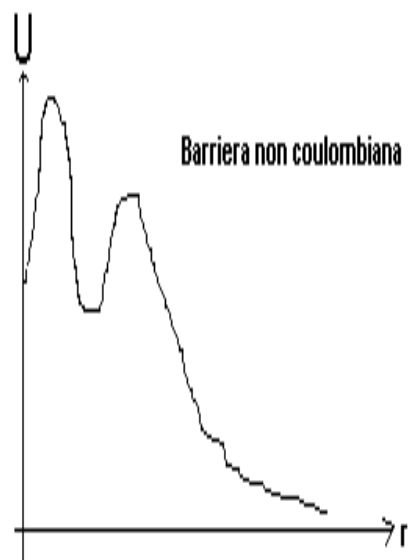
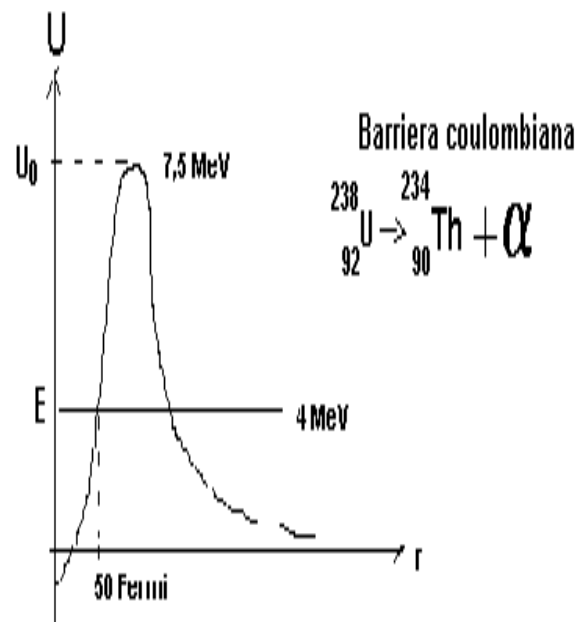
Se dal nucleo escono elettroni, è apparentemente ovvio che gli elettroni siano costituenti del nucleo.

Il nucleo, perdendo un elettrone, saliva di un posto nella tavola periodica.

(si pensava che le cose stessero così).

Perché una particella β (un elettrone) non può stare in un nucleo:

- 1) La lunghezza d'onda di de Broglie dell'elettrone è un 40 volte maggiore del diametro nucleare e perciò nell'angusto spazio del nucleo non possono formarsi onde stazionarie interpretabili come presenza di elettroni;
- 2) I nuclei hanno momento magnetico dell'ordine di quello del protone, invece l'elettrone ha momento magnetico 2000 volte maggiore;
- 3) La forza che il nucleo esercita sull'elettrone a grande distanza è attrattiva e dovrebbe essere ancora attrattiva quando l'elettrone è nel nucleo, altrimenti sarebbe immediatamente espulso; ma ciò richiede che la barriera di potenziale sia in parte non coulombiana e dovrebbe perturbare il moto degli elettroni k;



4) I nuclei di numero di massa A dispari obbediscono al principio di Pauli, come gli elettroni, quelli di A pari non obbediscono al principio di Pauli. Se il nucleo fosse composto di protoni ed elettroni (numero di massa A , numero atomico Z), il numero complessivo di particelle nucleari sarebbe $2A - Z$ e il nucleo avrebbe la parità di Z ; ora risulta da misure spettroscopiche che vi è almeno un nucleo, l'Azoto $Z=7$, $A=14$, che non obbedisce al principio di Pauli, pur avendo Z dispari. Dal 1932 (Chadwick) si ritiene che il nucleo sia costituito da protoni e neutroni; perciò il numero di massa è $A=Z+N$ (anche i neutroni sono fermioni, obbediscono cioè al principio di Pauli).

Gli elettroni nucleari (raggi β) sono dunque creati all'atto della loro emissione dal nucleo (come i fotoni, la luce, quando si strofina un fiammifero: Fermi).

La scoperta del neutrone era dunque nell'aria: Irene Curie e Frederic Joliot, Chadwick (1932).

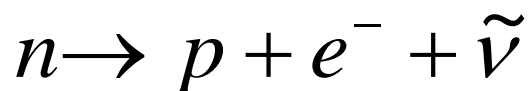
Il nucleo doveva essere perciò costituito di protoni e neutroni: $A=Z+N$ e l'emissione beta doveva essere interpretata come il seguente decadimento del neutrone:



Problemi dell'energia e dello spin: perché il neutrino.

Lo spettro energetico dei raggi β è però continuo, mentre il nucleo *padre* e il nucleo *figlio* hanno energie ben definite, la cui differenza è uguale al massimo dell'energia dei raggi β . Inoltre, il neutrone, il protone e l'elettrone hanno spin $\frac{1}{2}$, perciò occorre ipotizzare una particella (il neutrino) neutra e di spin $\frac{1}{2}$ che porti via l'energia mancante all'elettrone (Pauli).

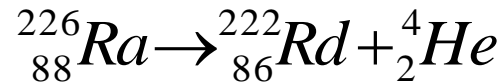
Decadimento del neutrone libero (vita media circa 16 minuti):



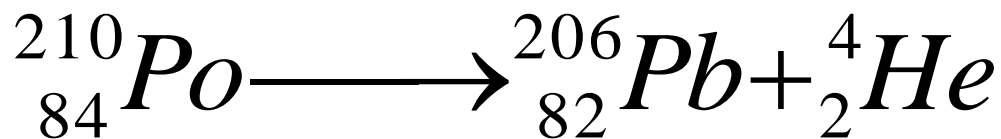
Fermi non sa ancora che, come per ogni particella, esiste l'antiparticella avente la stessa massa e lo stesso spin, in generale le stesse proprietà scalari, e proprietà vettoriali opposte: carica elettrica, momento magnetico, elicità. Non tiene conto, per ovvi motivi, della violazione della parità nelle interazioni deboli, ipotizzata da Yang e Lee nel 1956 e scoperta dal gruppo di fisici diretti dalla Signora Wu. Tuttavia la sua teoria è in larga misura indipendente da queste idee e rappresentò una pietra miliare nello sviluppo della fisica delle particelle, fino all'unificazione delle forze elettrodeboli, come riconobbero Abdus Salam e Carlo Rubbia.

Da questo momento (1933) Fermi si convince che il futuro della ricerca fondamentale è nella fisica nucleare e indirizza il gruppo di via Panisperna verso lo studio dei neutroni.

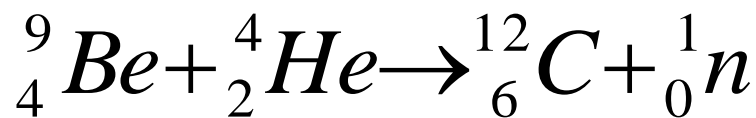
Tra le diverse strade che portano a neutroni liberi si può indicare la seguente:



oppure



seguita da:



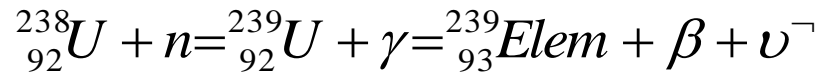
I neutroni prodotti venivano usati, dal gruppo guidato da Fermi come proiettili, al posto delle particelle α utilizzate dai Joliot a Parigi, per ottenere svariate reazioni nucleari e radionuclidi. Corbino, che intravide le applicazioni diagnostiche e terapeutiche, oltre che industriali, spinse Fermi a brevettare l'uso dei neutroni. Il vantaggio dei neutroni è dovuto al fatto che sono privi di carica e non subiscono la repulsione coulombiana.

Fermi e suoi collaboratori fecero in quel periodo (1933-34) la fondamentale scoperta che i neutroni lenti erano più efficaci di quelli veloci per produrre reazioni. Siccome però sono neutri, l'unico modo per rallentarli era di farli urtare contro nuclei leggeri. Applicando infatti le leggi di conservazione dell'impulso e dell'energia, si ricava che l'energia massima (urto centrale) ceduta al nucleo bersaglio, supposto inizialmente in quiete, è (M massa del bersaglio, m e w_0 massa ed energia del neutrone):

$$W_{\max} = \frac{4Mm}{(M+m)^2} w_0$$

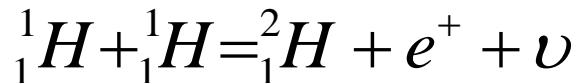
L'ideale è di usare come bersaglio nuclei di idrogeno, di massa praticamente uguale a quella del protone, e per avere una densità di idrogeno abbastanza alta Fermi usò la paraffina. In seguito Fermi usò come moderatore anche la grafite (carbonio), meno efficiente dell'idrogeno, ma più comoda perché solida e ad alta densità.

Usando neutroni lenti fu bombardato anche l'Uranio. Si ottenevano risultati abbastanza misteriosi e Fermi pensava di aver ottenuto elementi transuranici, come



Elem e il successivo, che poi si chiamarono Nettunio e Plutonio, furono battezzati privatamente Ausonio ed Esperio, anche se Fermi prudentemente non rese ufficiale la scoperta. Ne accennò il 1938 a Stoccolma in occasione del premio Nobel, ma proprio in quel periodo Hahn e Strassmann stavano scoprendo la fissione dell'Uranio, il che provò che i presunti transuranici erano il risultato di una chimica non buona, come ricorda Segrè (*Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Mondadori).

Una volta andato in America, Fermi riprese i suoi studi con i neutroni lenti e, sfruttando i risultati dei fisici tedeschi sulla fissione, nonché la sua vasta esperienza sulla fisica dei neutroni, realizzò la prima reazione a catena controllata e autosostenuta (*pila atomica*), con la quale ottenne effettivamente i primi elementi transuranici. Da questa scoperta seguirono i reattori nucleari e purtroppo anche la bomba. Occorre notare che i reattori nucleari sono anche generatori di intensi fasci di antineutrini. Ricordo che quelli provenienti dal Sole sono neutrini:



Perché i neutroni lenti sono più efficaci per produrre reazioni nucleari e indurre radioattività artificiale? La spiegazione di Fermi, detta alla buona, è che il neutrone passa più tempo nel nucleo bersaglio distribuendo la sua energia su tutti i nucleoni. Esso può restare intrappolato nel nucleo aumentandone il numero di massa e produrre transuranici oppure, immaginando il nucleo come una goccia di liquido, lo mette in oscillazione fino a quanto si spezza in due o più frammenti (fissione) più neutroni e liberando l'eccesso di energia corrispondente al difetto di massa.

L'opera di Fermi è stata veramente poliedrica e nei casi in cui non è arrivato per primo a una scoperta, l'ha saputa elaborare rapidamente traendone tutte le conseguenze. Negli ultimi anni della sua vita, venuto a contatto con gli elaboratori elettronici (Von Neuman) già dal periodo di Los Alamos, ne intuì l'estrema importanza per lo studio dei sistemi complessi e non lineari, tramite simulazione numerica.

Con Lui, come dice Segrè nell'opera citata, è scomparso forse l'ultimo fisico che seppe padroneggiare in modo mirabile tutti i rami della fisica, teorica e sperimentale.

Ottavio Serra