

NADIA ROBOTTI (*)

Le origini del concetto di spin nucleare

La presente comunicazione tratterà soltanto un aspetto dell'evoluzione del concetto di spin nucleare, in particolare l'introduzione di tale concetto in spettroscopia.

A questo proposito molti ricordano un lavoro di Pauli del 1924 (1) in cui la struttura iperfine delle righe spettrali veniva associata a un « momento angolare » del nucleo, e individuano in tale lavoro la nascita del concetto di « spin » nucleare. Al fine di comprendere appieno l'intervento di Pauli e i successivi sviluppi nel campo della spettroscopia del concetto di « momento nucleare », ho cercato di analizzare l'intervento di Pauli inserendolo nell'ambito dell'evoluzione delle indagini sugli spettri a righe degli elementi chimici portate avanti tra la fine del 1890 e il 1928.

Uno dei risultati emersi da questa analisi e che cercherò di illustrare in questa sede è che Pauli nel 1924, per ragioni interne allo sviluppo delle stesse teorie spettroscopiche, non poteva introdurre il concetto di spin nucleare, inteso come proprietà di una singola particella.

Se si analizza lo sviluppo delle indagini spettroscopiche tra la fine dell'Ottocento e il 1913 si può osservare che esse erano volte essenzialmente alla ricerca di relazioni matematiche tra le varie righe che componevano gli spettri degli elementi chimici e si fondavano su una presunta analogia tra tutti gli spettri (2). L'idrogeno, in particolare, non occupava dal punto di vista spettroscopico alcun posto privilegiato all'interno dell'ordinamento degli elementi chimici. Ad esso, analogamente agli altri elementi, venivano attribuiti tre tipi di serie spettrali (la serie Sharp, che coincideva con la serie di Balmer, la serie Diffuse e la serie Principal) e la struttura a « doppietti », individuata all'interno delle prime due righe della serie Sharp di Balmer, veniva accomunata alla configurazione a « doppietti » delle serie Sharp dei metalli alcalini. Nello stesso tempo, la struttura « complessa » (inizialmente denominata « satellites » e poi « struttura iperfine ») individuata dapprima nelle righe componenti i doppietti delle serie Sharp dei metalli alcalini e in seguito nelle righe di elementi più pesanti portava a prevedere (per analogia tra tutti gli spettri) una struttura « complessa » anche per le righe componenti i « doppietti » dell'idrogeno.

Questo ordinamento interno ai vari fenomeni spettrali mutò drasticamente negli anni 1913-1925.

(*) N. ROBOTTI, Dipartimento di Fisica, Università di Genova.

(1) W. PAULI, *Naturwissenschaften*, 22, 1924, 741-743.

(2) A questo proposito si veda: N. ROBOTTI, *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 24, 1983, 123-145.

Infatti con lo sviluppo, da un lato, della teoria di Bohr-Sommerfeld per l'atomo di idrogeno e, dall'altro lato, del modello vettoriale R, K, J per gli atomi non idrogenoidi, l'idrogeno divenne non solo l'unico atomo con una sola serie spettrale (la serie di Balmer generalizzata), ma la struttura a « doppietti » presentata dalle sue righe (e comunemente definita « struttura fine dell'idrogeno ») fu interpretata come un fenomeno fisico diverso dalla struttura a « doppietti », « tripletti », ecc. (e genericamente definita « struttura a multipletti ») presentata dalle righe degli altri elementi chimici.

Questa distinzione a livello teorico, imposta dallo sviluppo delle indagini atomiche tra il 1913 e il 1925, tra « struttura fine dell'idrogeno » e « struttura a multipletti » portava nello stesso tempo a equiparare la « struttura fine » delle righe dell'idrogeno alla « struttura a satellites » delle altre righe. Entrambe queste strutture venivano infatti definite genericamente « strutture fini » e la loro origine veniva collegata a una « struttura fine » dei livelli energetici caratterizzati dagli stessi numeri quantici (nel caso dell'idrogeno dallo stesso numero quantico n , nel caso degli altri atomi dagli stessi numeri quantici r, k, j).

Tuttavia, mentre per l'idrogeno la struttura fine dei livelli energetici sembrava trarre origine dalla variazione relativistica della massa dell'elettrone (si ricordino a questo proposito i successi, seppur apparenti, incontrati dalla teoria di Sommerfeld tra il 1916 e il 1924 (3)), nel caso degli atomi diversi dall'idrogeno l'origine della struttura fine dei livelli energetici risultava problematica.

Essa non sembrava interpretabile in termini di correzione relativistica della massa degli elettroni (infatti una tale spiegazione avrebbe portato a un comportamento dei « satellites » in presenza di campi magnetici diverso da quello visto in sede sperimentale) e neppure sembrava interpretabile sulla base della teoria quantistica degli elettroni interni all'atomo, facendo riferimento al principio di corrispondenza. Anche il tentativo portato avanti da Nagaoka, Sugiura e Mishima nel 1924 (4) di spostare l'attenzione, fino a quel momento concentrata sugli elettroni, sul nucleo, attribuendo, nel caso degli atomi pesanti, l'origine della « struttura fine » alla « compresenza di diversi isotopi nello stesso elemento » sembrava essere messo in serie difficoltà da alcuni dati sperimentali.

In questo ambito di indagini si inseriva Pauli con il lavoro del 1924, significativamente intitolato « Sul problema dell'interpretazione teorica dei satelliti di alcune righe spettrali e dell'influenza su di esse di campi magnetici ». Si trattava di un lavoro specificatamente dedicato ad atomi diversi dall'idrogeno, in cui l'ipotesi di Nagaoka sull'origine nucleare dei « satellites » veniva ripresa e reinterpretata in termini di interazione tra elettroni esterni e nucleo (5).

In particolare, al nucleo veniva associato un « momento di impulso con risultante non nulla » che si componeva con il momento angolare totale degli elet-

(3) Questo argomento è stato da me già trattato in: N. ROBERTI, *Atti del IV Congresso Nazionale di Storia della Fisica*, Como 1982, 197-204.

(4) A. NAGAOKA, M. SUGIURA, G. MISHIMA, *Nature*, 113, 1924, 459-460.

(5) Per i legami intercorrenti tra il lavoro di Pauli e il programma di A. E. Ruark si rimanda a L. BELLONI, *Am. J. Phys.*, 10, 1982, 461-463.

troni esterni. Questo accoppiamento avveniva secondo definiti orientamenti, determinati quantisticamente, che corrispondevano ai diversi valori del momento angolare dell'atomo. L'origine dei « satellites » veniva allora attribuita da Pauli all'energia di scambio tra elettroni esterni e nucleo in corrispondenza ai vari orientamenti « del sistema atomico ».

Tale modello portava nel caso di atomi con numero atomico $Z > 30$ a separazioni tra i vari « satellites » dello stesso ordine di grandezza di quelle stabilite empiricamente e implicava un comportamento dei « satellites » in presenza di campi magnetici conforme all'evidenza sperimentale.

Va osservato che Pauli non entrava nel merito dei costituenti nucleari. Egli si limitava a considerare il nucleo degli elementi pesanti una struttura « complessa » e individuava in tale complessità l'origine del « momento nucleare »: in particolare, assimilava il nucleo a un quadrupolo elettrico e identificava il momento nucleare con il momento di quadrupolo ed^2 (dove e rappresentava la carica dell'elettrone e d il diametro nucleare).

Chiaramente, tale momento di quadrupolo non era associabile al nucleo di idrogeno che si sapeva essere costituito da una sola carica (il protone), ma ciò corrispondeva alle aspettative teoriche di quegli anni. Infatti, ancora nel 1924 l'interpretazione della « struttura fine dell'idrogeno » data dalla teoria di Sommerfeld appariva così completa che non sembrava giustificato applicare all'idrogeno lo stesso modello interpretativo usato per spiegare l'origine dei « satellites »: il modello cercato doveva essere un modello per atomi diversi dall'idrogeno, che spiegava la struttura a « satellites » delle righe spettrali e che nello stesso tempo lasciava immutata l'interpretazione relativistica della struttura fine dell'idrogeno. Per queste ragioni Pauli, nel 1924, non poteva introdurre come modello interpretativo dei « satellites » lo spin nucleare, inteso come proprietà di una singola particella (e quindi applicabile anche al protone).

Il concetto di spin nucleare poté essere introdotto in spettroscopia soltanto dopo l'abbandono della teoria di Sommerfeld per la « struttura fine dell'idrogeno » e soltanto dopo che per la « struttura fine dell'idrogeno » e per la « struttura a multipletti » venne trovata un'interpretazione comune in termini di spin dell'elettrone (6). Infatti, una volta che furono tolti i vincoli imposti dalla teoria di Sommerfeld e una volta che fu recuperata l'analogia tra « struttura fine dell'idrogeno » e « struttura a multipletti » si poté pensare a un modello interpretativo dei « satellites » che fosse nello stesso tempo applicabile all'idrogeno.

Questo modello verrà fondato, a partire dal 1928, sul concetto di « spin del protone », introdotto da Dennison nel 1927 (7) sulla base di problematiche che esulavano dalle indagini sugli spettri a righe. Tale modello portava alla previsione di una struttura a « satellites » (ormai definita struttura « iperfine ») anche per le righe dell'idrogeno e completava in questo modo quella presunta e tanto discussa analogia tra tutti gli spettri.

(6) G. E. ULLINICK, S. GOTTSMY, *Nature*, 53, 1925, 953-954.

(7) D. M. DENNISON, *Proc. Roy. Soc.*, 115, 1927, 483-487.