

Il concetto di *spettro* di emissione e di *corpo nero*

Il termine *spettro di emissione* indica l'insieme delle frequenze emesse da una sorgente di onde e, in particolare, da una sorgente di luce.

Uno *spettro di emissione* può assumere l'aspetto di ***spettro continuo*** oppure quello di ***spettro discontinuo***. Nel primo caso si passa, senza interruzione della continuità, da una frequenza all'altra come avviene, se si tratta di una emissione di luce, quando la luce emessa dal Sole dà luogo all'arcobaleno; nel secondo caso, le varie frequenze dello *spettro* si presentano come righe separate e colorate a seconda della frequenza alla quale corrispondono.

Limitandosi alle emissioni di frequenze corrispondenti alla luce, emettono luce dotata di *spettro continuo*, **i solidi, i liquidi, gli aeriformi densi** e, in una parola, **il *corpo nero***; emettono luce dotata di *spettro discontinuo*, **gli aeriformi rarefatti e a bassa pressione** che bene approssimano la condizione di *gas ideale* ossia di un insieme di particelle libere. Gli *spettri* continui sono, in quanto tali, tutti uguali e non permettono di distinguere una sostanza dall'altra al contrario degli *spettri* discontinui: essendo formati da righe caratteristiche dell'aeriforme che fa da sorgente, permettono di distinguere le sostanze.

Il motivo della emissione di *spettri* continui e indifferenziati da parte di sistemi di particelle legate, sta nel fatto che tali particelle interagiscono scambiandosi e ripartendosi in tutti i modi possibili, l'energia in precedenza assorbita dal sistema. Al contrario, il motivo della emissione di uno *spettro discontinuo* sta nell'isolamento delle particelle che, non potendo interagire ed essendo tutte uguali, assorbono tutte la stessa energia rimettendo, poi, tutte la stessa energia. D'altra parte, i due tipi di *spettro* hanno un aspetto comune: **le particelle di materia emettono energia che hanno in precedenza assorbito** ossia **non emettono la loro energia**; **gli atomi** – a meno che non si tratti di atomi di sostanze *radioattive* che, infatti, “decadono” negli atomi di altre sostanze sempre meno instabili – **mostrano di essere stabili**.

Il concetto e la struttura di atomo stabile

Per poter tentare di dare interpretazione a uno *spettro* di emissione e, in particolare, a uno *spettro discontinuo*, è prima necessario costruire una struttura atomica stabile che possa render conto della **evidente stabilità atomica**; tale struttura deve, quindi, esser modello di un *atomo* che **non può emettere la propria energia**.

La costruzione di una struttura atomica dotata di quella stabilità che la materia mostra di possedere, è stato un processo lungo che si colloca fra la fine del 19° secolo e i primi anni del 20° e che è parte di una di quelle fasi “rivoluzionarie” durante le quali la Fisica deve ricostruire il proprio fondamento teorico; in particolare, il processo al quale ci si sta riferendo, è quello che segna il passaggio dal fondamento deterministico proprio della *Meccanica Classica* e, quindi, di tutte le teorie costruite sulla sua base, a quello probabilistico proprio della *Meccanica Quantistica* sulla cui base vengono costruite le teorie successive mentre tutte quelle precedenti – *Meccanica Classica* compresa – ne vanno a rappresentare il *limite macroscopico*.

E' evidente che il primo modello di *atomo* nucleare di *Rutherford* – per non parlare di quello precedente non ancora nucleare di *Thomson* – non si presenta stabile e non può, di conseguenza, spiegare il motivo per cui gli atomi liberi dei gas rarefatti, presentino tutti la stessa emissione; a maggior ragione, l'*atomo* di *Rutherford* non riesce a spiegare il motivo della discontinuità propria delle emissioni degli atomi liberi dei gas rarefatti.

Per arrivare a costruire una struttura atomica stabile e capace di render conto degli *spettri* di emissione dei gas rarefatti, è necessario passare per lo **studio dello *spettro del corpo nero*** che, insieme allo **studio dell'effetto fotoelettrico**, conduce alla **quantizzazione dell'energia emessa**,

assorbita e trasmessa. Soltanto a questo punto il modello atomico di *Rutherford* ha la possibilità di esser trasformato nel **modello quantizzato e stabile** di *Bohr* che, insieme anche alle altre successive quantizzazioni, permette di dare **interpretazione agli spettri discontinui**.

Affinchè sia più chiaro il percorso che conduce a **questa interpretazione**, risulta assai utile ascoltare direttamente i protagonisti attraverso i loro scritti e le loro relazioni.

Studio della distribuzione energetica nello spettro del calore raggianti o spettro del corpo nero, e ipotesi del quanto d'azione ¹

Alla fine del 19° secolo uno dei fenomeni di cui la Fisica non riusciva a dare interpretazione teorica era la **distribuzione dell'energia nello spettro del calore raggianti o spettro del corpo nero**; mentre gli *spettri* di emissione dei *gas* rarefatti, discontinui, sono caratteristici delle sostanze dalle quali sono emessi, **quelli dell'energia irraggiata da un solido, da un liquido o da un gas denso appaiono "universali" nel senso che i loro caratteri non dipendono dalla natura dell'emettitore**; infatti, si presentano continui e, proprio per questo, uguali per tutte le sostanze.

<<Gustav Kirchhoff, alla fine dei suoi studi, è arrivato a ipotizzare che la natura della radiazione termica prodotta in una cavità delimitata da pareti emittenti e assorbenti a temperatura uniforme, sia del tutto indipendente dalla natura di tali pareti e dipendente soltanto dalla temperatura, senza alcun legame con le caratteristiche della sostanza...Il solo modo per andare avanti a dare interpretazione a questo fatto, è quello di scegliere, fra tutti gli oggetti esistenti in natura, uno di cui risultino noti sia il potere emissivo che quello assorbente e di ricavare la distribuzione dell'energia nello spettro emesso all'equilibrio. L'oggetto più indicato sembra essere l'oscillatore elettromagnetico: ... in una cavità isolata e delimitata da pareti i cui atomi consideriamo oscillatori, dovrebbe aver luogo uno scambio di energia attraverso l'emissione e la ricezione di onde elettromagnetiche che si propagano in tutte le direzioni all'interno della cavità. Se in una parete è praticato un foro piccolissimo, senza praticamente disturbare l'equilibrio, una piccola frazione della radiazione esce all'esterno e si dovrebbe ottenere qualcosa di molto simile alla radiazione di un corpo nero...>>

Nel 1899, l'interesse era concentrato su una relazione proposta da Wien che schematizzava l'energia dello spettro della radiazione di una cavità in funzione di λ e della temperatura della superficie; la curva corrispondente, però, si discostava sempre più da quella ottenuta sperimentalmente, al crescere di λ . Invece, con l'acquisizione di nuovi risultati sperimentali si approdò ad una seconda relazione che, al contrario della legge di Wien, schematizzava il fenomeno sempre meglio man mano che si consideravano onde più lunghe; niente sembrava più semplice che servirsi insieme dei due termini... Dal giorno in cui questa interpolazione è stata realizzata, io sono stato occupato nel tentativo di darle un reale significato fisico...perché tutto sembra andare a posto se si accetta l'operazione stranissima di attribuire ad ogni oscillatore lineare la possibilità di avere soltanto certi valori di energia tutti multipli di un valore proporzionale alla frequenza della radiazione emessa; su questa strada, si ricava lo spettro della energia della radiazione riuscendo finalmente a far coincidere l'andamento teorico con quello sperimentale. La costante di proporzionalità fra energia e frequenza, il cui valore risulta essere $6.55 \cdot 10^{-27}$ erg secondo, fu chiamata "quanto di azione". Questa costante h è assolutamente indispensabile per raggiungere, relativamente all'emissione del corpo nero, una legge utilizzabile,....>>

Interpretazione dell'effetto fotoelettrico ²

Già dal 1887 *Hertz* aveva rilevato un fenomeno di **emissione di elettroni da parte di un metallo colpito da una radiazione elettromagnetica appropriata**. La cosa non sembrò particolarmente strana perché l'*elettromagnetismo classico* non esclude che un'onda elettromagnetica possa fornire agli *elettroni* degli *atomi*, tramite l'oscillazione del proprio *campo elettrico*, l'energia sufficiente per staccarsi. Gli esperimenti permettono di rendersi conto del fatto che **l'energia degli elettroni emessi è indipendente dall'intensità della radiazione**, cioè dall'*ampiezza* dell'oscillazione del suo *campo elettrico*, mentre **dipende direttamente dalla frequenza**: anzi, ogni materiale presenta una *frequenza*

¹ I brani utilizzati sono tratti dalla relazione presentata da *M. Planck* in occasione del conferimento del premio *Nobel*, 1919; <<Nobel Lectures: Physics>>, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-NewYork, 1967; traduzione di G. Catania

² I brani utilizzati sono tratti da *Emissione e assorbimento della luce da un punto di vista euristico* di *A. Einstein*, <<Annalen der Physik>>, 17, 1905, pag.132; traduzione di G. Catania

della radiazione incidente al di sotto della quale il fenomeno non avviene e dall'intensità della radiazione dipende solo il numero di elettroni liberati. Inoltre, l'emissione degli elettroni avviene in un tempo brevissimo che va da 10^{-9} a 10^{-7} secondi; andando a determinare, per mezzo dell'elettromagnetismo classico, quale sarebbe il tempo di emissione, si trova che, avendo per esempio una sorgente di 1 Watt di potenza a distanza di 1 metro dal metallo, sarebbe necessario un tempo dell'ordine del minuto primo.

<< La teoria ondulatoria della luce che fa uso del concetto di continuità è stata verificata ottima per quel che riguarda i fenomeni puramente ottici e sembra veramente insostituibile in questo campo. Sebbene abbiano trovato conferma le teorie della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, ecc., è pensabile che il concetto di luce fondato sulla continuità della propagazione, possa entrare in conflitto con l'esperienza qualora venga applicato ai fenomeni di trasformazione della luce. Infatti, mi sembra che le osservazioni compiute sull'emissione di elettroni tramite luce ultravioletta... risultino molto più comprensibili se vengono considerate in base all'ipotesi che l'energia sia distribuita in modo discontinuo. Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre, quando un raggio di luce parte da un punto, l'energia non si distribuisce su volumi sempre più grandi ma **rimane distribuita in un numero finito di quanti che non possono essere assorbiti o emessi parzialmente**... Infatti, la concezione per la quale l'energia della luce si distribuisce in modo continuo nello spazio irradiato, incontra, se si tenta di spiegare i fenomeni fotoelettrici, notevoli difficoltà... Facendo l'ipotesi che la luce eccitatrice sia costituita di quanti di energia, la fotoemissione di raggi catodici si può spiegare nel modo seguente: **i quanti di energia penetrano nello strato superficiale del corpo e la loro energia si trasforma, almeno in parte, in energia cinetica degli elettroni**. Bisogna supporre che ogni elettrone, quando raggiunge la superficie del corpo e per poterlo abbandonare, debba effettuare un lavoro W caratteristico del materiale considerato. **L'energia cinetica degli elettroni sarà, quindi, pari all'energia comunicata dai quanti e dipendente direttamente dalla frequenza ν della luce eccitatrice, diminuita del lavoro necessario per staccare dal corpo gli elettroni stessi:**

$$E_{cin} = K\nu - W$$

... Riportando E_{cin} su assi cartesiani in funzione di ν , si ottiene una retta la cui inclinazione è indipendente dalla sostanza, uguale per tutte le sostanze e pari, come valore, proprio alla costante h introdotta da Planck per poter spiegare la radiazione termica; le mie considerazioni dimostrano che il Signor Planck ha messo in piedi una ben più generale teoria della radiazione e che ha introdotto nella fisica un elemento ipotetico nuovo: **il concetto di fotone**. >>

Quello riportato è un brano importantissimo e la sua importanza non risiede soltanto nell'interpretazione dell'effetto fotoelettrico o nel fatto che per la prima volta un ricercatore si servisse della teoria quantistica ma sta, soprattutto, nell'**ipotesi del concetto di fotone**. L'introduzione del quanto di luce è fondamentale perché completa il lavoro di Planck **quantizzando anche la propagazione dell'energia** ed eliminando le difficoltà legate ad un assorbimento quantizzato di energia alla quale veniva associata una propagazione continua.

Il terzo modello di struttura atomica ³

... il prof. Rutherford ha fornito una sua ipotesi di struttura atomica secondo la quale gli atomi sono formati da un nucleo di carica positiva circondato da un sistema di elettroni tenuti insieme dalle forze attrattive sviluppate dal nucleo. In seguito, ha ipotizzato che nel nucleo sia concentrata la maggior parte della massa atomica. ... Nel tentativo di spiegare, sulla base di questo modello atomico, alcuni fenomeni si incontrano, tuttavia, grosse difficoltà derivanti dalla instabilità del sistema di elettroni insita nell'ipotesi... Il modo di avvicinarsi ad un problema del genere ha, tuttavia, subito cambiamenti sostanziali negli ultimi anni... Il risultato sembra essere una diffusa coscienza della inadeguatezza della elettrodinamica classica quando si tratta di discutere sistemi di dimensioni atomiche. Sembra necessario introdurre nelle relazioni del moto degli elettroni una quantità sconosciuta alla elettrodinamica classica, cioè la costante di Planck o quanto elementare di azione... Questo scritto è un tentativo di dimostrare che le nuove idee applicate all'atomo di Rutherford offrono una base per poter parlare della costituzione degli atomi...

... Consideriamo un sistema semplice costituito da un nucleo positivo di dimensioni molto piccole e da un elettrone che descrive orbite intorno al nucleo. Per semplicità assumiamo che la velocità dell'elettrone sia piccola rispetto a quella della luce... Facciamo prima il caso che non sia emessa alcuna radiazione, cioè che l'elettrone descriva orbite stazionarie... e consideriamo, poi, che il sistema irraggi: l'elettrone risulterà accelerato, non descriverà più orbite stazionarie e si avvicinerà al nucleo descrivendo orbite di dimensioni sempre più piccole; questo fenomeno continuerà finché le dimensioni dell'orbita non diventano dello stesso ordine di quelle del nucleo.

Il modello atomico, per prima cosa, deve rendere conto della stabilità atomica e poi anche del fatto sperimentale che, ogni sistema, dopo aver irraggiato in modo peculiare al sistema stesso, ritorna in uno stato di equilibrio stabile con le stesse caratteristiche che aveva prima di essere perturbato. Ora, il punto essenziale della teoria della radiazione di Planck è che l'energia non viene irraggiata da un sistema atomico nel modo continuo previsto dalla elettrodinamica

³ I brani utilizzati sono tratti da *La costituzione degli atomi e delle molecole* di N.Bohr, <<Philosophical Magazine and Journal of Science>>, 26 (1913), pag.1; traduzione di G. Catania.

classica ma che, al contrario, essa viene irraggiata per emissioni distinte e il suo valore, se v è la frequenza di una singola emissione, è uguale a nhv con n numero intero.

Ritornando al sistema formato da un elettrone e da un nucleo positivo, ... assumiamo che l'elettrone sia su un'orbita stazionaria intorno al nucleo e che l'orbita sia circolare. ... Utilizzando, per la velocità dell'elettrone sulla sua orbita, $v = sv$... e la condizione di Planck $E = nhv$, si ottengono due espressioni di E e di a , raggio dell'orbita, nelle quali si possono attribuire ad n diversi valori interi arrivando a due serie di valori ogni coppia dei quali corrisponde ad una configurazione del sistema... Coerentemente con le considerazioni fatte sopra, bisogna concludere che ogni configurazione corrisponde a uno stato del sistema nel quale non c'è irraggiamento perché è stazionario...

Prima di procedere può essere utile sintetizzare le idee chiave che sono state esposte:

1) l'equilibrio dinamico di sistemi in stati stazionari può essere discusso sulla base della meccanica ordinaria, mentre il passaggio dei sistemi da uno stato stazionario all'altro non può essere trattato nello stesso modo;

2) il passaggio da uno stato stazionario all'altro è seguito da emissione di una radiazione omogenea la cui frequenza è legata all'energia emessa secondo la teoria di Planck.

Si può mostrare come, sulla base dei due assunti principali, si riesce a spiegare lo spettro di righe dell'idrogeno... L'energia ΔE emessa da un sistema che ritorna da uno stato con $n = n_2$ ad uno stato con $n = n_1$, permette di ricavare la frequenza ν della radiazione emessa che risulta simile, come valore, a quello empirico ricavato dalle misure effettuate sulle linee spettrali dell'idrogeno... Il fatto che la frequenza possa essere scritta come differenza di due funzioni di numeri interi, suggerisce, per le linee di tutti gli spettri, un'origine analoga a quella descritta per le linee dello spettro dell'idrogeno: **ogni linea corrisponde ad una radiazione emessa quando il sistema passa da uno stato stazionario all'altro**... Bisogna introdurre anche per quanto riguarda il meccanismo dell'assorbimento della radiazione, alcune regole che corrispondono a quelle che abbiamo usato nell'esaminare l'emissione. Così, dobbiamo assumere che **un sistema formato da un nucleo e da un elettrone che gli descrive intorno un'orbita circolare, possa assorbire una radiazione di frequenza uguale a quella della radiazione omogenea emessa durante il passaggio del sistema da uno stato stazionario all'altro**... >>.

Quella che prende corpo con il lavoro di Bohr, è una **struttura atomica stabile** e, nello stesso tempo, **coerente con il fenomeno della emissione di spettri discreti** che si andavano rivelando sempre più complessi; ma si tratta di una **struttura quantizzata** dato che, per poter utilizzare la quantizzazione dell'energia emessa o assorbita, è **necessario introdurre discontinuità anche nell'insieme delle orbite elettroniche e, in conclusione, nell'insieme degli stati atomici**. Ne deriva una fondamentale differenza fra un atomo "classico" che emette energia propria a causa del moto dell'elettrone sull'orbita e un atomo "quantistico" che emette energia assorbita in precedenza e, quindi, non propria, ed è legato al passaggio da uno stato stazionario ad un altro. D'altra parte, l'intero n che compare in tutte le espressioni quantizzate da Bohr è, ancora oggi, **il primo dei quattro numeri quantici che contraddistinguono ogni stato stazionario** ed è quello che ha assunto il nome di "numero quantico principale".

La struttura delle linee spettrali ⁴

<< Quando ho proposto un'ipotesi di modello atomico, ho assunto la forma più semplice possibile per le orbite dell'elettrone, cioè ho parlato di orbite circolari. Così, gli elettroni hanno un solo grado di libertà nel loro moto e l'energia corrispondente ad una determinata orbita dipende da un solo numero intero n che determina proprio il raggio dell'orbita.

Tuttavia, andando a risolvere il problema di un elettrone che si muove in un campo elettrico (quello del nucleo) usando la meccanica classica, si ottengono orbite ellittiche. Sappiamo dalla teoria planetaria che, ad ogni asse maggiore, può essere associato un numero infinito di forme ellittiche che variano in modo continuo fra la forma circolare e la linea retta e che un elettrone avrebbe la stessa energia su tutta la serie di orbite. In questo caso dovremmo concludere che quando un elettrone passa da un'orbita di una serie ad un'orbita di un'altra serie, la quantità di energia emessa o assorbita è uguale a quella emessa o assorbita nel passaggio fra altri due stati delle stesse serie; in altre parole, ogni linea spettrale sarebbe associata non a due orbite ma a due serie di orbite; con questo non abbiamo fatto nemmeno un passo avanti per spiegare la complessità delle linee spettrali... non parliamo, poi, dello "split" delle stesse linee per effetto di campi magnetici. >>.

Come si vede, si tratta del rendiconto di un tentativo di dare spiegazione a righe spettroscopiche che, ad un esame più raffinato, risultano composte di frequenze tanto vicine da non poterle spiegare come emissioni dovute al passaggio di un elettrone da uno stato a un altro (spettri a multipletti). Dopo aver spiegato la struttura discreta degli spettri atomici grazie all'allontanamento dalle teorie classiche, Bohr prende in considerazione altri fenomeni spettroscopici che la sua ipotesi non basta a

⁴ I brani utilizzati sono tratti da *Influenza di campi elettrici e magnetici sulle linee spettrali* di N.Bohr, <<Philosophical Magazine and Journal of Science>>, 27 (1914), pag. 506; traduzione di G.Catania.

spiegare. E' proprio servendosi della *meccanica classica* che, tornando a ragionare su una delle approssimazioni introdotte a suo tempo - **la circolarità delle orbite stazionarie** - arriva a parlare di una serie di orbite ellittiche a disposizione di un elettrone per ogni valore di energia; purtroppo la serie di orbite, essendo di provenienza "classica", si presenta come un insieme continuo mentre il fenomeno da spiegare è proprio la composizione discontinua di alcune linee spettrali. A questo scopo, basta riprendere anche un'altra approssimazione usata da *Bohr* e cioè **la velocità dell'elettrone, bassa rispetto a quella della luce.**

I sottostati atomici ⁵

<< Non è stato mai considerato che, grazie all'alta velocità di rivoluzione dell'elettrone, la sua massa non è uguale alla massa a riposo ma varia proprio per effetto della velocità. Se l'orbita dell'elettrone fosse circolare, la velocità dell'elettrone sarebbe costante e così pure la massa, sia pure diversa da quella a riposo e, perciò, non influenzerebbe il moto. Per un'orbita ellittica la situazione è diversa; la massa dell'elettrone cambia continuamente perché è la velocità a cambiare continuamente e se, nonostante questa variazione della massa, l'energia legata alla rivoluzione dell'elettrone deve essere uguale su tutte le ellissi di una stessa serie, è necessario ipotizzare che a questa energia se ne aggiunga un'altra dovuta ad un secondo movimento che dovrà per forza dipendere dalla eccentricità dell'ellisse specifica della serie; si può solo pensare ad un moto di rotazione dell'orbita intorno al fuoco concorde con il moto dell'elettrone. Assumiamo che il periodo di questa rotazione sia indipendente dal periodo del moto dell'elettrone che ha, in questo caso, due gradi di libertà. Quindi risulterebbe che a tutte le orbite di determinato asse maggiore è associabile la stessa energia per quanto riguarda il moto di rivoluzione dell'elettrone e che ad ognuna bisogna associare una energia specifica dovuta al moto dell'orbita e, perciò, alla sua forma.

Dato che dobbiamo cercar di spiegare con questo moto la struttura fine delle linee spettrali, possiamo pensare soltanto ad una nuova quantizzazione e, per descrivere il secondo grado di libertà, è necessario introdurre un altro numero quantico intero che, tuttavia, non può essere indipendente dal numero quantico principale n . Si riesce a rendere conto della struttura fine di ogni linea se si assume che il numero quantico legato alla forma dell'orbita possa avere, per ogni n , tutti i valori interi che vanno da 1 (compreso) ad n (compreso). Così, ad ogni orbita di Bohr sono associate n sub - orbite descritte dal numero quantico orbitale k ⁶ che non può assumere il valore 0 (quindi si esclude l'ellisse degenerata in retta) perché significherebbe passaggio dell'elettrone attraverso il nucleo. >>.

Il lavoro di *Sommerfeld* non è importante soltanto perché contribuisce validamente ad un progressivo spostamento della distribuzione della fiducia a vantaggio dell'ipotesi quantistica utilizzandola ed allargandone le possibilità ma anche perché, per la prima volta, qualcuno se ne serve insieme con la teoria relativistica: applicandola a un oggetto le cui orbite erano state definite ellittiche tramite la classicissima teoria planetaria, *Sommerfeld* arriva a una nuova quantizzazione: **quella della forma delle orbite ellittiche a disposizione di un elettrone per ogni stato energetico.** In questo modo può finalmente essere spiegata **la discontinuità di linee spettrali che erano apparse "semplici"** a lungo, ma i problemi erano tutt'altro che esauriti: già da molto tempo era stato osservato il fenomeno dello *split* di linee spettrali quando gli atomi erano sottoposti all'azione di un campo magnetico. Di questo fenomeno, osservato nel 1896 dal fisico olandese *Zeeman*, c'era stato chi aveva tentato una spiegazione "classica" il cui fallimento è simile, per molti versi, a quello di *Bohr* che aveva provato a spiegare la complessità di alcune righe spettrali usando solo la teoria planetaria. Ma l'esperienza ormai diceva che, **dove c'è una linea spettrale, c'è un elettrone che passa da un livello ad un altro; se, in un campo magnetico, una linea si divide, vuol dire che anche un livello elettronico si divide in due o più energeticamente molto vicini, dai quali gli elettroni tornano a livelli con energia più bassa emettendo frequenze assai prossime.** A questo punto, si può concludere che, **in campo magnetico, ogni livello di energia contrassegnato da un n e da un k , dà luogo a un certo numero di sottolivelli** tanto più alto quanto più alto è k e ognuno di questi deve essere indicato, oltre che con n e con k , anche con **un terzo numero quantico m** o "numero quantico magnetico"; tutto va a posto se si ipotizza, per m , la possibilità di assumere **tutti i valori interi fra $-(k-1)$ e $+(k-1)$, compresi gli estremi e lo 0.** Questa ulteriore quantizzazione

⁵ I brani utilizzati sono tratti da *Atombau und Spektrallinien* di A. *Sommerfeld*, Vieweg e Sohn, Braunschweig, 1921; traduzione di G. Catania.

⁶ Il "numero quantico orbitale", diventato in seguito $\ell = k-1$ ha assunto, come intervallo di variabilità, quello dei valori interi fra 0 e $n-1$ compresi gli estremi.

significa che, **in campo magnetico, le orbite elettroniche non possono precedere con tutte le frequenze ma possono assumerne soltanto alcune** e che, inoltre, **l'energia di ognuno dei livelli elettronici dipende dalla lunghezza dell'asse maggiore dell'orbita (n), dalla sua eccentricità (k) e dal suo moto di precessione (m).**

Il principio di esclusione ⁷

*<<... nel 1923, all' Università di Amburgo, ripresi il problema non risolto del riempimento dei livelli elettronici; l'unica idea chiara che avevo in testa era la convinzione che si potesse trovare una soluzione attraverso lo studio della struttura a multipletti. Perciò tentai di esaminare criticamente il caso più semplice: il doppio dello spettro degli alcalini... Siccome un livello energetico è completamente "non degenerato" se è occupato da un solo elettrone, ... la proposta era quella di assumere **una nuova proprietà teorica dell'elettrone** dato che il numero di elettroni ipotizzabili in ogni sub-orbita si riduce a 1 se si utilizzano quattro numeri quantici per un elettrone rimuovendo, così, qualunque degenerazione; a partire da questa ipotesi, si sarebbero dovuti **escludere** stati in contraddizione con questo assunto... cioè stati che non abbiano differenti tutti i quattro numeri quantici. I fisici trovarono difficoltà nell'accettare questa ipotesi perché non era ancora chiaro il significato fisico del quarto grado di libertà dell'elettrone.>>.*

Il racconto di Pauli è lineare: dovunque si evidenzia una linea spettrale complessa, lì è necessario ipotizzare che due o più (dipende dal numero delle "sottorighe" che compongono la linea) elettroni appartenenti a uno stesso livello principale, ci ritornino a partire da sottolivelli specifici ma pochissimo differenti. Il "doppio" degli alcalini, effettivamente la più semplice delle strutture spettrali a multipletti, proprio per questo, sarebbe inspiegabile: se questi spettri mostrano una riga "doppia" (non due righe) vuol dire che due elettroni, pur nello stesso stato, si trovano in sottostati prossimi; ma gli alcalini hanno tutti un solo elettrone "ottico", cioè un solo elettrone che, non facendo parte di gruppi elettronici completi, è disponibile per transizioni. È questa la situazione di fatto che, sulla base dell'esperienza precedente, conduce Pauli ad attribuire a ogni elettrone anche **un quarto numero quantico necessario per quantizzare una quarta proprietà elettronica** la quale basti, da sola, a distinguere un elettrone da un altro anche se si trovano nello stesso stato. L'ottima idea ha, tuttavia, un "difetto": non è immediatamente chiaro quale sia la quarta proprietà elettronica.

Lo spin elettronico ⁸

L'intervento successivo di Goudsmit e Uhlenbeck individua proprio la quarta proprietà elettronica: una rotazione parallela o antiparallela rispetto alla traslazione lungo l'orbita.

*<<... Poiché un elettrone con momento angolare proprio (intrinseco), posto in un campo magnetico, precede e poiché tale precessione non può non essere quantizzata, l'ipotesi dello **spin richiede quel quarto numero quantico introdotto da Pauli senza che ne fosse chiaro il significato fisico**; l'unico modo per spiegare alcuni effetti osservati, è supporre che **il momento angolare intrinseco non sia un multiplo intero di $h/2 \pi$** , l'unità di momento angolare secondo la teoria quantistica, ma soltanto **la metà**: dato che lo spin dell'elettrone può soltanto essere aggiunto alla rotazione orbitale o sottratto, ci sono **due sub-livelli associati a ogni orbita e il numero quantico di spin vale $\pm 1/2$** . Se non si introduce l'ipotesi dello spin, l'elettrone deve essere descritto come un piccolo magnete a causa del moto intorno al nucleo; se gli si attribuisce uno spin, **l'elettrone si comporta come un piccolo magnete anche se non percorre un'orbita**. Continuando a ipotizzare il moto dell'elettrone intorno al nucleo, quando l'atomo è in un campo magnetico, i due campi magnetici elettronici possono disporsi parallelamente o antiparallelamente e **questo corrisponde a due diversi stati energetici e, quindi, a due sub-orbite di uguale m** .*

Un'immediata applicazione dello spin la otteniamo se consideriamo i metalli alcalini il cui caratteristico e ben noto doppio spettro può essere spiegato proprio in questo modo; la semplicità di questi spettri è dovuta al fatto che l'atomo è formato, in sostanza, da un solo elettrone disponibile che si muove intorno a un residuo atomico contenente soltanto gruppi elettronici completi.>>.

⁷ I brani utilizzati sono tratti dalla relazione presentata da W. Pauli in occasione del conferimento del premio Nobel, 1945; <<Nobel lectures: Physics>>, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York 1967; traduzione di G. Catania

⁸ I brani utilizzati sono tratti da *Elettroni ruotanti su se stessi e strutture degli spettri* di S. Goudsmit e G. Uhlenbeck, <<Nature>>, 117 (1926), pag. 264; traduzione di G. Catania