

8 Introduzione alla Fisica Quantistica

8.1 Il punto sulla "filosofia" della fisica classica

Da: Carlo Tarsitani – Professore presso L' Università di Roma "La Sapienza"

In generale la Fisica Classica, *con l'importante eccezione della meccanica statistica*, aspira alla **descrizione e alla previsione esatta dei valori delle grandezze che caratterizzano un sistema**. Tali grandezze sono concepite come *proprietà* (intrinseche, cinematiche, dinamiche) del sistema considerato e i loro valori come valori posseduti dal sistema all'atto della misura e semplicemente registrati dall'apparato di misura. Se le proprietà del sistema subiscono un'*evoluzione spazio-temporale*, la teoria deve fornire la "legge" di tale evoluzione, dalla quale si possono dedurre i valori delle sue proprietà in qualsiasi istante.

Il moto del sistema consiste nella variazione della sua configurazione nello spazio e nel tempo. Ciò presuppone l'esistenza di uno spazio (nel secolo scorso nessuno dubitava che tale spazio avesse una geometria euclidea), in cui il sistema ha in ogni istante una determinata configurazione. Di per sé lo spazio non interferisce minimamente con il moto del sistema e le cause che lo determinano, ossia è uno spazio la cui struttura geometrica non è influenzata dalle proprietà fisiche degli oggetti che si trovano al suo "interno".

Così come gli oggetti fisici sono collocati nello spazio, essi sono anche "collocati" nel tempo. Nelle leggi del moto, il tempo è una variabile indipendente: per ogni valore del tempo le proprietà del sistema assumono valori esattamente definiti. Il tempo, come lo spazio, non agisce in alcun modo sul comportamento del sistema, né è influenzato da tale comportamento.

In FC, dunque, non c'è alcun limite di principio alla possibilità di **determinare e prevedere con esattezza i valori delle grandezze che caratterizzano il sistema analizzato**, sia esso "discreto" o "continuo". Questa caratteristica essenziale della FC, che ha costituito e costituisce ancora per molti l'espressione di un "ideale" di spiegazione dei fenomeni fisici, dipende essenzialmente dai **criteri di rappresentazione matematica** su cui essa si basa.

Si definisce *sistema dinamico* un sistema di cui siano note le **equazioni differenziali** che ne determinano l'evoluzione temporale. Il *teorema di esistenza e unicità della soluzione di un sistema di equazioni differenziali* ci assicura allora che un sistema dinamico ha un'evoluzione esattamente definita, che è appunto descritta dalla soluzione del sistema di equazioni differenziali cui deve conformarsi il suo comportamento (a patto, naturalmente, che siano note le *condizioni iniziali*).

Ne segue che i processi descritti da FC sono, come si suole dire, *deterministici*: *in FC non esistono in linea di principio processi intrinsecamente "casuali", ossia tali che condizioni iniziali identiche possono dar luogo a evoluzioni diverse tra loro*.

In realtà, proprio questo schema rappresentativo porta con sé alcune contraddizioni interne, che hanno cominciato a rivelarsi già alla fine del XIX secolo. Lo studio di tali problemi, assistito dai moderni sviluppi tecnologici, che hanno consentito di estendere enormemente la "potenza" del calcolo numerico, ha prodotto, in anni recenti, una specie di "rivoluzione interna" alla stessa visione classica dell'evoluzione di un sistema fisico. Ci riferiamo al grande sviluppo delle teorie che fanno riferimento al cosiddetto **caos deterministico**.

Queste teorie si basano sulla constatazione del fatto che, in generale, l'evoluzione dei sistemi dinamici, è in linea di principio deducibile da equazioni differenziali che, salvo casi particolari, sono *non lineari* e quindi non sono, salvo casi particolari, risolvibili con metodi strettamente analitici (possono essere risolte solo mediante approssimazioni successive e mediante un pesante utilizzo dei calcolatori). Oppure che tali equazioni sono *molto sensibili alle condizioni iniziali* cioè danno esiti molto differenti anche per piccole variazioni di tali condizioni e, essendo tali condizioni esiti di misurazioni, è ovvio che abbiano quel margine di *errore* tale da compromettere una soluzione deterministica in senso stretto. E' così per le equazioni legate alle previsioni del tempo: per questo sono affidabili solo per pochi giorni!

Il determinismo della fisica classica ci porta a mettere in evidenza un'altra sua caratteristica distintiva. Sappiamo che quando il sistema è troppo complesso per poter effettuare una descrizione *completa* del suo stato di moto, sia per mancanza di conoscenze di dettaglio, sia per il numero troppo elevato dei suoi gradi di libertà (come nel caso della teoria cinetica), si fa ricorso a considerazioni **statistiche**, basate, in genere, su ipotesi plausibili circa il comportamento "medio" degli oggetti che formano il sistema. Le considerazioni statistiche chiamano ovviamente in causa il concetto di **probabilità**.

Tuttavia, ancora una volta occorre sottolineare che **la probabilità classica non mette in discussione il fatto che i fenomeni sono retti da leggi causali**: la descrizione probabilistica interviene solo laddove, per motivi contingenti, la conoscenza dello stato dinamico del sistema è parziale. Proprio perché la visione del mondo tipica di FC è deterministica, le ipotesi probabilistiche non possono fare riferimento a processi intrinsecamente *casuali*, ma sono rese necessarie dalla nostra ignoranza dei dettagli o dei limiti delle nostre possibilità di calcolo (si parla, in tal caso, di probabilità "*epistemica*").

Veniamo ora a un'altra caratteristica essenziale della FC. Se ragioniamo da fisici classici noi siamo convinti che in definitiva le grandezze che corrispondono alle proprietà fisiche di un qualsiasi sistema variano sempre con **continuità**. Ora, il principio di continuità dei moti comporta anche che il sistema può subire "perturbazioni" (alterazioni del suo stato di moto o della sua configurazione) piccole quanto si vuole per effetto di "azioni" fisiche piccole quanto si vuole. In FC, *l'azione fisica che si può esercitare su un sistema può essere piccola quanto si vuole*. Ed essa avrà un effetto *piccolo quanto si vuole*.

Questa constatazione assume un valore particolare ed è un presupposto della concezione classica del **processo di misura**. Il risultato di una misura deriva sempre da un'interazione con un apparato, o strumento, di misura, e la perturbazione introdotta dallo strumento sul valore della grandezza misurata non può mai essere del tutto trascurata. Tuttavia, in linea di principio e anche con adeguati accorgimenti tecnici, essa può essere resa *sufficientemente piccola* per soddisfare le nostre esigenze pratiche. In ogni caso, il "dato" numerico rilevato da uno strumento è sempre affetto da un'*incertezza statistica*, ossia è di fatto costituito da un intervallo tra due numeri. Ciò però non ha niente a che fare con la teoria o con il modello del sistema misurato, bensì dipende esclusivamente dalle perturbazioni casuali introdotte dal processo di misurazione.¹ Non esistono in FC *limiti teorici* che impediscono di ridurre l'incertezza statistica al di sotto di un valore determinato.

I concetti che la Fisica dei Quanti prima e la Meccanica Quantistica poi (d'ora innanzi rispettivamente **FQ** e **MQ**) andranno a scardinare sono proprio i seguenti: **continuità, determinismo, misura**.

8.2 I modelli come *falsificatori* potenziali: dai modelli di atomo alle soglie della meccanica quantistica

Abbiamo visto come la fisica ci ponga di fronte ad un intrico di *leggi sperimentali e modelli*: i postulati delle *teorie* e le *deduzioni* che da essi derivano non sono sufficienti a rendere conto dei fenomeni ma devono sempre essere integrati da qualcosa di più e di diverso.

Questo già per fenomeni macroscopici, rilevabili con i nostri sensi. Vediamo cosa produce quest'attitudine d'indagine mediante modelli quando dobbiamo addentrarci all'interno della materia. Prendiamo quindi in esame il caso esemplare dei **modelli atomici**.

All'inizio del XX secolo, una volta scoperto l'elettrone, il problema della struttura atomica diventa di grande attualità. All'inizio del secondo decennio del secolo, si fronteggiano due proposte: l'atomo cosiddetto "*a panettone*" di **J. J. Thomson** e l'atomo "*nucleare*" di **Ernest Rutherford**.

¹ Per esempio, il "rumore termico" è di fatto inevitabile: per questo, a volte, per effettuare misurazioni molto accurate si è costretti a raffreddare l'intero apparato fino a temperature molto basse.

Si tratta, appunto di due modelli. Entrambi si richiamano alle leggi della meccanica e dell'elettrodinamica classiche. Eppure, le configurazioni dell'atomo di Thomson e dell'atomo di Rutherford non sono deducibili da tali leggi poiché introducono ipotesi ad hoc, che restano mere possibilità ipotetiche da confrontare con la ricerca sperimentale.

La vicenda dei modelli atomici illumina alcuni aspetti caratteristici della dinamica della conoscenza fisica. In primo luogo, come vedremo, entrambi i modelli citati **non** sono modelli coerentemente "elettromeccanici". A ben guardare, essi sono addirittura *incompatibili* con le leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo. Non ci può essere allora esempio più chiaro dell'insostituibile **funzione euristica² dei modelli**.

Se fu il **verdetto sperimentale** a condannare il modello di Thomson, fu **l'inconsistenza teorica** a condannare quello di Rutherford: vedremo tra breve in che senso. Anticipiamo anche che, subito dopo l'affermazione definitiva del modello di Rutherford, un giovane fisico teorico danese: **Niels Bohr**, cominciò ad accorgersi che l'inconsistenza teorica di quel modello aveva ragioni profonde, presumibilmente collegabili ad inconsistenze addirittura strutturali tra elettromagnetismo e termodinamica, già individuate da Max Planck dieci anni prima.

Possiamo allora giungere a una constatazione: si parla spesso di rapporto tra teorie ed esperimenti, come se fossero gli unici poli dialettici dello sviluppo della fisica. E ci si dimentica dei modelli.

La vicenda che abbiamo appena, brevemente, descritto e che ci apprestiamo ad approfondire, ci suggerisce piuttosto uno scenario diverso, sicuramente più articolato e più vicino alla realtà storica della fisica. In base ad essa, si può infatti affermare che, talvolta, le teorie non sono falsificate dagli esperimenti, bensì dai modelli.

Il modello di Rutherford infatti, non era compatibile né con le leggi della meccanica, né con le leggi fondamentali dell'elettrodinamica. Eppure l'atomo, in base agli esiti sperimentali, *doveva* avere una carica centrale positiva praticamente puntiforme e molto massiva. Ciò implicava che gli elettroni orbitassero stabilmente attorno a questa carica. Questa rappresentazione non era teoricamente ammissibile. Si decise allora di buttare via il modello? No, si decise di cambiare le leggi fondamentali della meccanica e dell'elettrodinamica!

I modelli possono dunque giocare un ruolo di grande importanza. Abbiamo detto che, proprio perché si riferiscono alla struttura di oggetti particolari, i modelli non possono essere ricavati dalle sole leggi teoriche. Per lo stesso motivo, i modelli possono essere sottoposti a controlli sperimentali che risultano più "severi" di quelli a cui possono essere sottoposte le teorie. Per questo la conferma di un modello vale certamente di più della conferma di una teoria. Se il modello appare sufficientemente corroborato dai risultati sperimentali, almeno in alcune sue caratteristiche strutturali, esso può essere usato per falsificare le stesse teorie su cui era stato basato. Questa fu l'operazione che Bohr mise in atto nel 1913.

² Cioè di accesso a nuove conoscenze. Teoriche, in questo caso

8.3 Antefatto: Max Planck e la *quantizzazione dell'energia*

Nel 1889 Planck rese nota un'ipotesi derivante da osservazioni sperimentali cui la fisica classica forniva una spiegazione assurda. I calcoli portavano infatti un risultato tendente all'infinito per la somma delle energie emesse dal cosiddetto "corpo nero"³, quando i valori energetici considerati erano palesemente finiti.

Planck, per ovviare a ciò, suppose che gli scambi di energia nei fenomeni di emissione e di assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche avvengono in **forma discreta**: proporzionale alla loro frequenza di oscillazione, secondo una costante universale: h o

$h = \frac{h}{2\pi}$ [si legge: *acca tagliato*], a seconda dei conti che si debbono fare, non già in **forma continua**, come sosteneva la teoria elettromagnetica classica.

- La luce emessa da un corpo nero viene detta **radiazione del corpo nero** e la densità di energia irradiata **spettro di corpo nero**.
- La differenza tra lo spettro di un oggetto e quello di un corpo nero ideale permette di individuare la composizione chimica di tale oggetto.

8.4 Breve storia (interrotta) dei modelli atomici: "salta" la *continuità*

Da: Marco Giliberti – Ricercatore presso l'Università degli Studi di Milano

Nei primi anni del Novecento, l'avvenuta dimostrazione dell'esistenza di particelle subatomiche, i cosiddetti "elettroni", di massa molto inferiore a quella di un atomo di idrogeno (l'elemento più semplice), spinge la ricerca a costruire un **modello della struttura dell'atomo**, capace di dar conto dei diversi aspetti dell'evidenza sperimentale che si erano andati accumulando nei decenni precedenti.

La costruzione di un *modello* dell'atomo è rivolta a stabilire quale configurazione possa avere il sistema di **cariche positive e negative** che forma un atomo neutro.

Alcune proprietà degli atomi erano note: gli atomi contengono **elettroni**; sono normalmente **stabili**; emettono e assorbono radiazione elettromagnetica sotto forma di **spettri discreti**; sono **elettricamente neutri**.

Queste proprietà spinsero a chiedersi come sono distribuite le cariche negative e positive all'interno dell'atomo, in modo da poterne spiegare la **stabilità meccanica**⁴.

Le congetture principali erano due:

1. una considerava l'atomo dotato di un **nucleo positivo** (Nagaoka 1904),
2. l'altra considerava una carica positiva uniformemente distribuita su tutto l'atomo (Thomson 1904).

I **modelli a nucleo** erano difficilmente sostenibili per due motivi:

- gli elettroni ruotanti avrebbero dovuto **perdere energia** emettendo onde elettromagnetiche (le leggi dell'elettromagnetismo classico impongono che una *carica accelerata* debba emettere onde elettromagnetiche, cioè irraggiare) e, quindi, precipitare sul nucleo (con semplici calcoli si può mostrare che ciò dovrebbe avvenire in un tempo

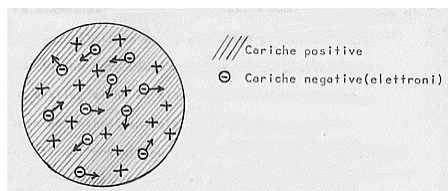
³ In fisica un **corpo nero** è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente (e quindi non ne riflette). Nonostante il nome, il corpo nero irradia comunque, e deve il suo nome solo all'assenza di riflessione. Lo spettro (intensità della radiazione emessa ad ogni lunghezza d'onda) di un corpo nero è caratteristico, e dipende unicamente dalla sua temperatura

⁴ gli atomi e le molecole, anche dopo essere stati sottoposti a violente perturbazioni, conservano sempre le stesse caratteristiche strutturali: lo spettro della radiazione emessa da ciascun elemento chimico è sempre lo stesso; tale spettro è legato direttamente alla configurazione interna degli atomi e delle molecole di *quell'elemento*: equivale quindi alle *sue "impronte digitali"*. Esiste un sistema fisico classico che preserva le sue caratteristiche dinamiche e strutturali, indipendentemente dalle *condizioni iniziali* e dalle perturbazione cui è soggetto?

dell'ordine dei 10^{-10} s e che in tale tempo l'atomo dovrebbe irraggiare un'energia dell'ordine di 1 MeV⁵!

- inoltre non era nota alcuna fenomenologia che avesse bisogno dell'ipotesi di nucleo atomico per essere spiegata.

8.4.1 Il modello di Thomson



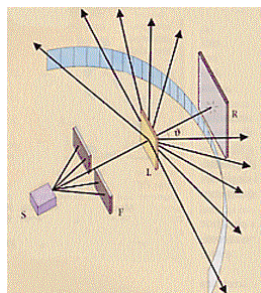
I modelli a "carica positiva distribuita" erano quindi più gettonati; in particolare lo era il modello di Thomson che si basava sull'assunto che la carica fosse distribuita "...nel modo più semplice dal punto di vista matematico." [*Phil. Mag.*, VII 237 (1904)]. Nel modello di Thomson gli elettroni erano disposti (in condizioni di equilibrio) ai vertici di

poligoni regolari, poggiati su circonferenze, interne e concentriche ad una sfera con densità uniforme di carica positiva, in modo che le forze elettriche fossero bilanciate dalla disposizione delle cariche e dal moto circolare degli elettroni.

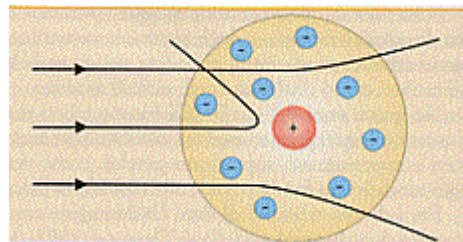
Per quanto riguarda la **stabilità radiativa Larmor** [*Phil. Mag.*, XLVI 237, (1904)] aveva già osservato che "Quando il vettore somma delle accelerazioni di n elettroni è costantemente nullo (cioè le velocità sono distribuite in modo simmetrico e "si elidono" l'una con l'altra), non vi è radiazione o ve ne sarà molto poca e pertanto questo moto sarà permanente [perché se non irraggia non precipita nel nucleo]." La simmetria del modello di Thomson garantisce quindi la stabilità dell'atomo.

Osserviamo che il suo modello è noto come modello "*plum pudding*", in Italia come modello a "panettone"; riteniamo che questa terminologia, sebbene certamente evocativa, sia abbastanza fuorviante; infatti il modello di Thomson ha una **struttura matematica** molto precisa (che l'immagine da me proposta non riesce a rendere: non ve n'è una facilmente reperibile in internet!) e per nulla casuale e riesce a rendere conto di alcuni fatti fisici importanti. L'idea del panettone con l'uvetta a rappresentare gli elettroni disposti casualmente è certamente molto distante da questo modello.

8.4.2 L'atomo di Rutherford

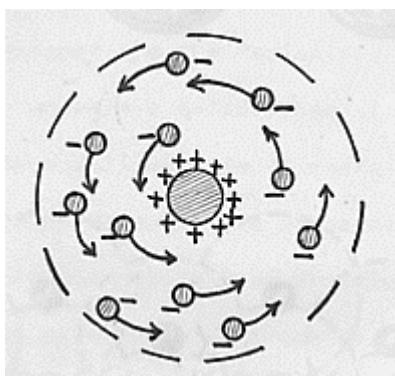


Dopo alcuni anni il modello di Thomson fu però abbandonato, a causa di evidenti prove sperimentali a favore di una **struttura nucleare dell'atomo**.



Infatti in una serie di famosissimi esperimenti sullo *scattering* (deviazione) di particelle alfa da parte di *target* (bersagli) sottili, Geiger e Marsden, mostrarono che il modello di Thomson non poteva spiegare i dati osservati.

Nel 1911 nacque così il (che interpreta i dati termini di meccanica considerare l'atomo come con il nucleo centrale ed un ruotano intorno trattenuti così come i pianeti ruotano all'attrazione gravitazionale. elettroni negativi carica positiva del nucleo;



famoso modello di **Rutherford** sperimentali interamente in classica): Rutherford propone di un sistema solare in miniatura certo numero di elettroni che gli dal l'attrazione coulombiana, intorno al Sole, sottoposti Alla periferia dell'atomo, questi neutralizzano l'effetto della così che, complessivamente,

⁵ Un **elettronvolt** (simbolo **eV**) è l'energia acquistata da un elettrone libero quando passa attraverso una differenza di potenziale elettrico di 1 **volt**. Sono molto usati i suoi multipli **keV** (kilo-eV, ossia 1000 elettronvolt) , **MeV** (mega-eV, cioè un milione di elettronvolt) e **GeV** (giga-eV, cioè un miliardo di elettronvolt)

l'atomo è neutro. Questo significa che il nucleo ha un numero di cariche elementari positive uguale al numero degli elettroni

Rutherford **non** si preoccupò della stabilità radiativa del modello; infatti riportiamo qui le sue parole: *"La questione della stabilità dell'atomo proposto non ha bisogno di essere considerata a questo stadio, perché essa dipenderà ovviamente dalla struttura minuta dell'atomo, e dal moto delle sue parti cariche costitutive"* [Phil. Mag. XXI 669 (1911)].

In altre parole: non importa se il modello di Thomson ha tanti pregi e quello nucleare non sta i piedi per motivi teorici: l'atomo ha un nucleo. E così il modello di Thomson viene spazzato via dagli esperimenti di Geiger e Marsden e dall'interpretazione datane da Rutherford che, infatti, nel suo articolo si dilunga a spiegare che il modello di Thomson non può spiegare i dati sperimentali.

Si afferma definitivamente il modello di atomo "nucleare".

8.4.3 Il modello atomico di Bohr

Bohr si serve dell'ipotesi di Planck per risolvere il problema sulla stabilità radiativa lasciato in sospeso da Rutherford. Il suo modello di atomo si fonda su quattro **postulati**:

1. Un elettrone in un atomo si muove su orbite circolari attorno al nucleo, sotto l'influenza dell'attrazione coulombiana, obbedendo alle leggi della **meccanica classica**.
2. Al contrario di quanto avviene in meccanica classica **non** tutte le orbite sono possibili. Un elettrone può muoversi solo su un'orbita per la quale il momento angolare L sia un multiplo intero di \hbar . Tali orbite sono dette **stati stazionari**.
3. Un elettrone che si muove su un'orbita permessa **non** irraggia energia elettromagnetica.
4. L'atomo emette radiazione elettromagnetica solo quando l'elettrone passa da un'orbita con energia totale E_i ad un'orbita con energia totale E_f . In tal caso la frequenza della radiazione emessa è:

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$$

A commento di queste ipotesi, dopo aver osservato le difficoltà della fisica classica a spiegare la stabilità di un atomo nucleare, Bohr sottolinea: "Il risultato della discussione di questi problemi sembra essere il riconoscimento generale dell'inadeguatezza dell'elettrodinamica classica nel descrivere il comportamento di sistemi di dimensioni atomiche.

Qualunque modifica ci possa essere nelle leggi del moto degli elettroni, sembra necessario introdurre nelle leggi in questione una quantità estranea all'elettrodinamica classica, cioè la costante di Planck...

[Si assume] che l'equilibrio dinamico del sistema negli stati stazionari possa essere discusso con l'aiuto della meccanica ordinaria, mentre la transizione dei sistemi tra stati stazionari diversi non può essere trattata sulle stesse basi." [Phil. Mag., XXVI, 1 (1913)].

Con queste ipotesi Bohr ricavò subito i valori r_n ed E_n dei raggi e delle energie associati alle orbite permesse. Vi risparmio formule che fatichereste a comprendere.

Le giustificazioni ai postulati di Bohr possono essere trovate solo confrontando le predizioni che si ricavano dal modello con i risultati sperimentali. I successi furono molti. Tale modello riesce a:

⁶ Il momento angolare polare o momento della **quantità di moto** rispetto ad una determinata origine (detta anche *polo*) è definito come il prodotto vettoriale tra il vettore posizione (rispetto alla stessa origine) e il vettore quantità di moto: $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v}$

1. Ricondurre a grandezze note la costante di Rydberg per l'idrogeno⁷ (già precedentemente determinata sperimentalmente dalla misura dei termini spettroscopici),
2. a determinare il valore corretto dell'energia di ionizzazione dell'idrogeno,
3. a determinare correttamente le dimensioni atomiche (basta porre $n=1$ e $Z=1$ nella formula dei raggi permessi per ottenere che le dimensioni dell'atomo di idrogeno nello stato fondamentale),
4. a spiegare la serie di Balmer (si tratta della configurazione delle righe dello spettro dell'idrogeno) e, soprattutto,
5. a **predire** (è un aspetto molto importante in fisica la **capacità predittiva** di un modello o di una teoria) le serie (non ancora osservate sperimentalmente all'epoca della sua formulazione) di Lyman, Brackett e Pfund;
6. a **predire** lo spettro dell'elio
7. spiegare **l'effetto isotopico** e cioè la piccola differenza che si nota negli spettri di isotopi differenti dello stesso elemento.

Per di più, nel 1914, Frank e Hertz diedero una conferma sperimentale della validità dell'idea di Bohr, della discretizzazione dei livelli energetici negli atomi, e della regola per la determinazione della frequenza delle righe emesse dagli atomi eccitati. Tutto ciò rese il modello di Bohr sempre più popolare e universalmente noto.

8.4.4 Molte questioni, rimasero, però non chiarite.

1. Il modello è, infatti, incompleto, in quanto si applica solo ad atomi idrogenoidi (cioè con un solo elettrone);
2. Anche per tali atomi, pur fornendo le corrette frequenze delle righe spettrali, il modello di Bohr non fornisce alcun modo per calcolarne l'intensità (e ciò è collegato al fatto che non riesce a dare risposta alle domande riguardanti la probabilità che un elettrone salti da un'orbita all'altra).
3. Un'analisi spettroscopica raffinata mostra che la maggior parte delle righe spettrali risulta costituita da più componenti vicine, presenta, cioè, una struttura fine che il modello non è in grado di spiegare.
4. Il modello di Bohr fornisce una stima errata del momento angolare L dell'elettrone nello stato fondamentale (cioè quello di minima energia) dell'atomo di idrogeno; infatti per il secondo postulato, L dovrebbe valere \hbar , mentre gli esperimenti forniscono chiaramente $L=0$. Pertanto, contrariamente all'ipotesi di Bohr, l'elettrone nello stato fondamentale non può ruotare.
5. Il modello "costruisce" un atomo bidimensionale!...
6. I postulati di Bohr non possiedono una convincente motivazione né teorica né empirica.

Risposta a tali questioni si ebbe solo rinunciando definitivamente alla fisica classica in favore di una trattazione nuova: la **fisica quantistica**, della quale la fisica classica risultava un *caso particolare*.

Ma approfondiamo, per oggi, l'aspetto della **quantizzazione** completando la trattazione di un argomento che abbiamo già cominciato ad affrontare: la luce (e che voi credevate concluso...).

8.5 L'effetto fotoelettrico e i quanti di luce

Einstein, *ibidem*, pag. 241: *Facciamo cadere su una lastra metallica luce omogenea **violetta** che, come sappiamo, è luce di una determinata lunghezza d'onda. La luce espelle dal metallo degli elettroni che si allontanano in gruppo, tutti con una stessa velocità ben definita. Dal*

⁷ E' una costante che permette di calcolare la disposizione delle righe di uno spettro e anche i livelli di energia

*punto di vista della conservazione dell'energia possiamo dire: l'energia della luce si è parzialmente trasformata nell'energia cinetica degli elettroni espulsi. LA tecnica sperimentale moderna ci pone in grado d'individuare questi proietti, come anche di determinarne la velocità e pertanto l'energia. L'estrazione degli elettroni per mezzo di luce incidente sui metalli porta il nome di **effetto fotoelettrico**.*

Se la nostra congettura è giusta, cioè se la "velocità di fuga" degli elettroni è proporzionale all'energia della luce incidente, aumentando l'intensità della luce, quindi la sua energia, dovrebbe aumentare la velocità di fuga degli elettroni.

Ma l'esperimento smentisce le nostre previsioni: aumentando l'intensità della luce aumenta il numero di elettroni espulsi dal metallo ma hanno la stessa velocità di fuga di quelli espulsi dalla luce ad intensità minore...Questo risultato è in contraddizione con la teoria ondulatoria della luce... Dovremo cambiarla di nuovo? E in che modo?

Proviamo a tornare sulla strada vecchia ma rinnovandola con conoscenze nuove.

Einstein ibidem, pag 243 All'epoca di Newton il concetto di energia non esisteva: secondo lui i corpuscoli luminosi erano imponderabili ancorché avessero carattere sostanziale e che questo [carattere sostanziale] fosse diverso per ogni colore. Posteriormente, quando venne creato il concetto di energia e si riconobbe che la luce era un veicolo di energia, nessuno pensò ad applicare tali vedute alla teoria corpuscolare della luce: la teoria di Newton era morta e fino all'inizio del nostro secolo si è ritenuto che non potesse resuscitare.

Per valerci dell'idea di Newton dobbiamo figurarci che la luce omogenea si componga non già di corpuscoli bensì di grani di energia, ossia di quanti di luce che chiameremo fotoni: piccolissime particelle di energia che attraversano lo spazio vuoto con la velocità della luce.

Vediamo come la quantizzazione della luce renda conto dell'**effetto fotoelettrico** (e di altri esperimenti come, ad esempio, **l'effetto Compton**)

Un getto di fotoni colpisce una lastra metallica. L'interazione fra radiazione e materia consiste in tal caso in una moltitudine di singoli processi, per cui un fotone "percuote un atomo divellendone un elettrone". Questi singoli processi sono tutti identici e perciò tutti gli elettroni divelti devono avere la stessa energia. E' altresì chiaro che accrescere l'intensità della luce significa accrescere il numero dei proiettili fotonici. In tal caso avverrà che un maggior numero di elettroni sarà espulso dalla lastra metallica, senza che l'energia di nessuno di essi si differenzia da quella degli altri. Vediamo dunque che la teoria è in perfetto accordo con l'esperienza.

*Cosa succederà se un fascio di luce omogenea di un altro colore, ad esempio il **rosso**, invece del **violetto**, colpisce la superficie metallica? Affidiamo la risposta all'esperimento: misuriamo l'energia degli elettroni espulsi, comparandola a quella degli elettroni divelti dalla luce violetta. L'energia dell'elettrone espulso dalla luce rossa risulta inferiore all'energia dell'elettrone emesso allorché la luce è violetta. Ciò significa che l'energia dei quanti di luce differisce secondo i colori, cioè secondo la frequenza (o la lunghezza d'onda: come preferisci).*

In particolare: l'energia dei quanti di luce è direttamente proporzionale alla frequenza (e inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda).

Ti mostro il filmato "fotoni" del PSSC per darti ulteriori elementi che possano convincerti

8.6 Visione del filmato PSSC: i fotoni

Ma le stranezze non sono finite: infatti un altro esperimento di cui ti mostro ora il filmato mostra un aspetto simmetrico rispetto al considerare caratteristiche corpuscolari nell'interazione della luce con gli elettroni: la propagazione degli elettroni stessi, infatti, avviene con modalità ondulatorie. Peggio: il singolo elettrone si propaga con modalità ondulatorie. Infatti nel filmato vedrai come il singolo elettrone interferisca con gli altri elettroni producendo la caratteristica figura di diffrazione che abbiamo attribuito alle onde:

Visione filmato del CNR esperimento della doppia fenditura di Young applicata all'interferenza dei singoli elettroni

8.7 Propagazione ondulatoria e interazione corpuscolare

Senza modelli non si potrebbe proporre nessuna teoria scientifica, l'unica accortezza è di *non affezionarsi troppo al modello*: non confondere il modello con il fenomeno che rappresenta (del quale, in ultima istanza, non avremo mai una conoscenza oggettiva! Soprattutto è inutile, perchè attraverso il modello descrivo solo, ciò che ritengo utile e importante; tralasciando cio' che ritengo inessenziale).

Pensa ad esempio al *modello grafico* più elementare di essere umano: sì il/la classico omino/donnina che trovi nei cartelli sull'autobus, per esempio. In quei contesti espleta alla perfezione la sua funzione: ma se il tuo scopo fosse rappresentare la fisionomia del corpo dovresti utilizzare un modello completamente diverso: molto più dettagliato, per esempio.

Esagero. Se ti chiedessi di dirmi chi sei, tu non mi sapresti rispondere che genericamente. E se chiedessi a diverse persone di te, probabilmente avrei da ciascuna dettagli differenti. Forse persino contraddittori... Eppure tu esisti, no? Eccome...

Ebbene gli esperimenti a nostra disposizione ci dicono che il modello migliore che abbiamo per la materia, in ultima istanza, è il modello di **CAMPO**. Tale modello prevede che, la propagazione (cioè ogni moto nello spaziotempo), avvenga con modalità ondulatoria, cioè dando origine, nelle rilevazioni degli stessi, ai fenomeni tipici delle onde: interferenza e diffrazione principalmente; e che l'interazione avvenga con modalità corpuscolari: cioè seguendo le leggi degli urti: la conservazione della quantità di moto, in ultima istanza.

La prossima volta vedremo quali conseguenze ha sulle nostre possibilità di conoscenza di un fenomeno, quindi sull'operazione di misura, questa componente ondulatoria.