

Insegnare la fisica moderna

La fisica quantistica

Premessa

Questa seconda parte, dedicata alla fisica quantistica, verrà trattata per sommi capi, date le limitazioni di tempo.

Per un maggiore sviluppo delle motivazioni e dell'impostazione metodologica, faccio riferimento a

[fq13.pdf](#)

Per i contenuti, a

[fq21p1.pdf](#) [fq21p2.pdf](#) [fq21p3.pdf](#)

Partire dai fatti

Ci sono due ordini di fatti da cui partire:

a) la quantizzazione della radiazione e.m.

b) la quantizzazione dei livelli atomici

Per quanto riguarda *a)* è tradizionale parlare della *radiazione nera*.

Sebbene la radiazione nera sia stato il tema del lavoro di Planck e anche di quello di Einstein di cui dirò tra poco, si tratta di argomento troppo complesso e astratto per la s.s.s.

Non ritengo quindi sia il caso di trattarlo, salvo al più un brevissimo accenno senza spiegazioni, giusto per definire la successione storica.

Meglio concentrarsi sulla proposta di E. (accennando che nasce dal problema della radiazione nera e dal lavoro di Planck).

Non è certo il caso di riproporre il ragionamento di E.: meglio limitarsi a mostrare che l'ipotesi dei “quanti” spiega bene in tutti i suoi aspetti l'effetto fotoelettrico.

Ecco le parole di E.:

Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre, quando un raggio di luce si espande partendo da un punto, l'energia non si distribuisce su volumi sempre più grandi, bensì rimane costituita da un numero finito di quanti di energia localizzati nello spazio e che si muovono senza suddividersi, e che non possono essere assorbiti o emessi parzialmente.

I fatti sono incompatibili con la teoria!

Occorre mettere bene in evidenza che l'esistenza dei fotoni è *incompatibile con la teoria di Maxwell*, ma ciononostante è *un fatto*.

Accettati i fotoni, ci sono tutta una serie di conseguenze, legate alle soglie fotoelettriche, che è bene trattare.

A titolo di esempio:

- reazioni fotochimiche (inclusa la fotosintesi),
- applicazioni tecniche (fotorivelatori, celle fotovoltaiche).

Lo scopo è mostrare che il nuovo paradigma s'impone anche a causa della massa di *successi esplicativi* che permette, anche in assenza di una teoria soddisfacente.

Il fotomoltiplicatore

Si tratta di una particolare applicazione dell'effetto fotoelettrico, che è bene trattare in maggior dettaglio perché è di grandissima utilità per sviluppare i ragionamenti che seguono.

Nota: questo approccio è fortemente ispirato a quello di Feynman in *QED*.

Il fotomoltiplicatore (FM) ci servirà come *rivelatore di singoli fotoni*.

Non è strettamente necessario discuterne la costituzione: può bastare vederlo *a scatola chiusa*, come un qualcosa che *risponde alla luce incidente* sul fotocatodo.

Come risponde?

Risposta del fotomoltiplicatore

Con luce intensa si ottiene una corrente costante, di grandezza *proporzionale all'intensità* della luce.

Con luce debole si vede invece l'arrivo dei singoli fotoni, e si capisce che la corrente costante è solo un *effetto statistico*, dovuto al gran numero di fotoni.

(È opportuno che queste considerazioni siano corredate da *numeri!*)

Nell'interpretazione corpuscolare della radiazione e.m. l'intensità della radiazione dà una misura del numero di fotoni che incidono sul rivelatore (per unità di tempo e di superficie).

L'arrivo di questa “pioggia” di fotoni ha carattere *casuale*: l'intensità ci permette di fare previsioni *statistiche*, ma l'arrivo dei fotoni è del tutto irregolare, anche nel senso che ciascun fotone arriva *indipendentemente dagli altri*.

La quantizzazione dei livelli atomici

Ci si basa sul famoso *esperimento di Franck–Hertz* (1913).

Nell'urto fra elettroni e atomi praticamente fermi, finché l'energia cinetica degli elettroni non raggiunge una certa soglia l'urto è *elastico*, ossia gli elettroni rimbalzano con l'energia cinetica iniziale.

Quando invece si supera quella soglia diventano possibili urti *anelastici*, in cui l'energia cinetica non si conserva.

L'energia perduta dall'elettrone urtante (e acquistata dall'atomo) non è qualsiasi, ma ha sempre uno stesso valore, pari all'energia di soglia sopra citata.

In realtà *esistono più soglie*, ossia più valori possibili per l'energia che l'atomo può acquistare: dunque l'energia interna dell'atomo è *quantizzata*.

A titolo di esempio, per il mercurio (usato originariamente da Franck e Hertz) i valori di soglia sono all'incirca

4.9, 6.7, 8.8 ... eV.

La quantizzazione dell'energia non è spiegabile con la fisica classica.

Infatti in un modello “planetario” alla Rutherford un elettrone può percorrere una *infinità continua* di orbite, e quindi la sua energia può assumere una infinità continua di valori.

Tuttavia se accettiamo la quantizzazione dei livelli *come fatto*, anche senza saperne dare una giustificazione teorica, possiamo trarne delle *conseguenze*, anche quantitative:

- sulle dimensioni degli atomi e delle molecole
- sulla loro stabilità
- sulla “solidità” della materia.

Una parentesi

l'instabilità per irraggiamento del modello di Rutherford

Secondo l'elettromagnetismo di Maxwell, una carica accelerata emette onde e.m., perdendo energia.

Questo deve accadere agli elettroni nel modello di Rutherford, che dunque *non sarebbe stabile*: in breve tempo (nanosecondi) gli elettroni finirebbero per cadere sul nucleo.

Per risolvere l'instabilità occorre postulare qualcosa di nuovo: che un elettrone che occupa uno dei livelli discreti *non irraggia*.

Questa sarà una delle ipotesi di Bohr.

Il modello di Rutherford mette in crisi la meccanica statistica?

La meccanica statistica di Maxwell–Boltzmann si basa sull'ipotesi che gli atomi siano dei punti materiali, privi di gradi di libertà interni.

Su questa base si ricava il teorema di equipartizione, si calcolano i calori specifici dei gas, ecc.

La teoria ha un buon successo (con alcune difficoltà su cui dobbiamo sorvolare): *spiega* in modo soddisfacente *i fatti sperimentali*.

Ma il modello di Rutherford è in assoluto contrasto con l'ipotesi di base!

Tuttavia, se i livelli sono quantizzati, e se le loro distanze sono molto maggiori dell'energia media di agitazione termica, allora gli urti fra gli atomi (molecole) saranno elastici e i gradi di libertà interni saranno invisibili (congelati).

Paradossalmente, *un fatto inspiegabile* (la quantizzazione) *salva una teoria che funziona* (la meccanica statistica classica).

Partire dai fatti

Ci sono due ordini di fatti da cui partire:

a) la quantizzazione della radiazione e.m.

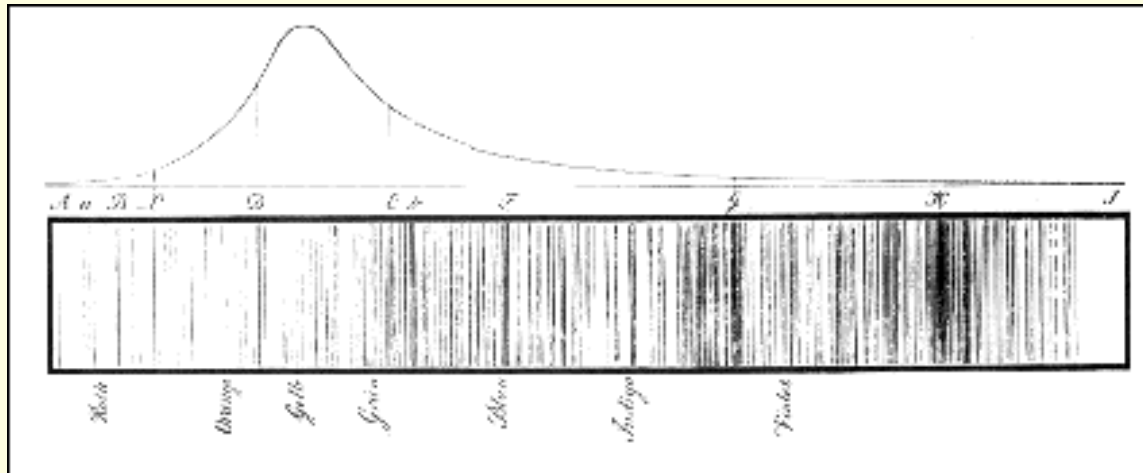
b) la quantizzazione dei livelli atomici.

Con questi, si possono spiegare diversi altri fatti, già noti ma senza spiegazione.

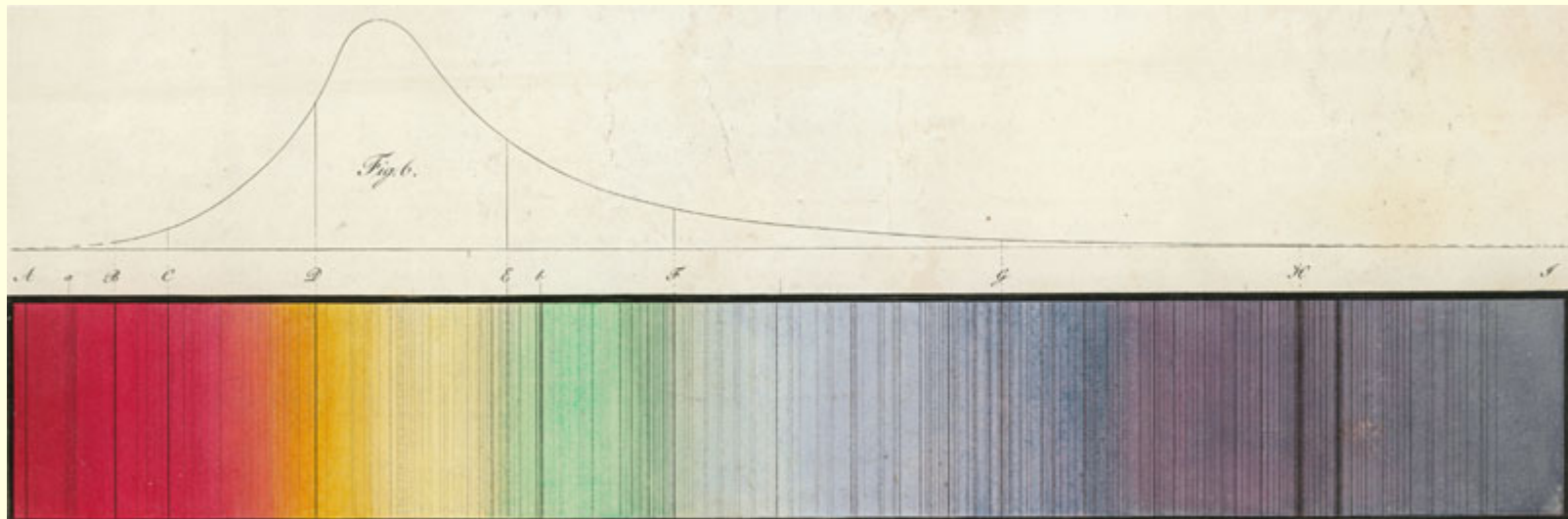
Notizie sugli spettri

Nel 1814 Fraunhofer (1787-1826) inventa lo *spettroscopio*, e studia lo spettro del Sole.

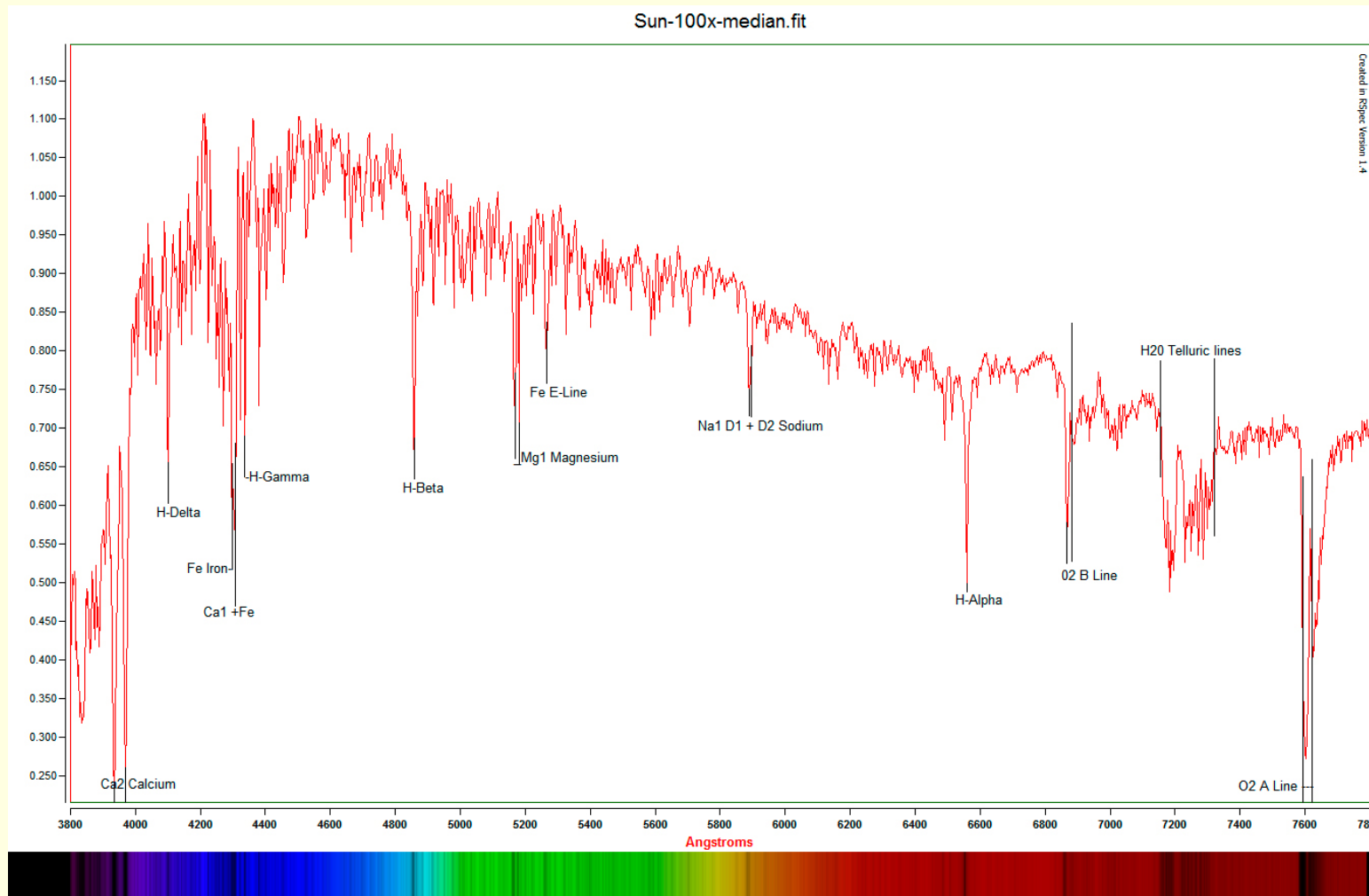
La figura qui sotto è l'originale di Fraunhofer, dove è riportato un grafico dell'intensità dello *spettro continuo*, e sotto le *righe di assorbimento* (che si trattasse di assorbimento, Fraunhofer non lo sapeva ancora).



Qui alla figura di Fraunhofer sono stati sovrapposti i colori dello spettro continuo, e le righe sono riprodotte con maggior dettaglio.



Ecco invece lo spettro del Sole sotto forma di grafico (intensità – lunghezza d'onda) dove le righe di assorbimento appaiono come “picchi negativi”.



Nota didattica

È molto importante, non solo per questo caso, che gli studenti *sappiano leggere un grafico*, e collegare le due rappresentazioni: quella “pittorica” di uno *spettrogramma* e quella “matematica” di un *diagramma cartesiano*.

La spettroscopia

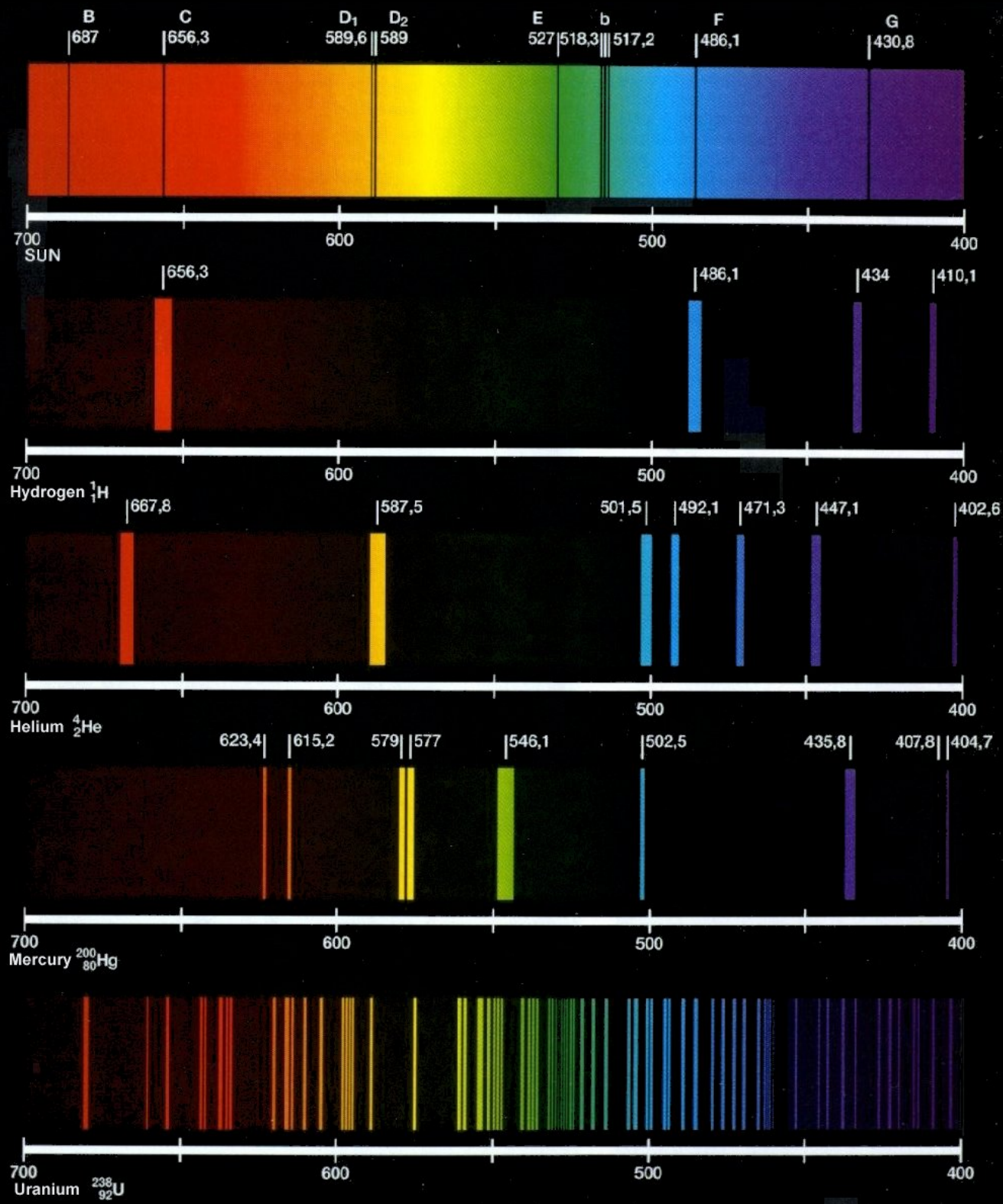
A metà dell'800 Bunsen e Kirchhoff iniziano a usare sistematicamente gli spettri di *emissione* delle *fiamme* come mezzo di *analisi chimica*.



Per questa via scoprono *due nuovi elementi*: il **rubidio** e il **cesio**.

L'invenzione dei tubi a scarica a bassa pressione permette misure molto più precise e dettagliate, su molti elementi.

Però gli spettri sono molto complicati...



Però gli spettri sono molto complicati...

... e non si riesce a trovare una chiara regolarità per le lunghezze d'onda delle righe.

Solo nel 1885 Balmer trova una formula empirica per le righe dell'idrogeno:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}.$$

Nel 1888 Rydberg generalizza la formula di Balmer alle righe fuori del visibile:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

(la serie di Balmer si ottiene per $m = 2$).

Il problema

Anche nel caso dell'idrogeno, che dovrebbe essere semplice (un solo elettrone) lo spettro è *incomprensibile*.

L'elettrone dovrebbe percorrere un'orbita ellittica attorno al nucleo.

L'elettromagnetismo maxwelliano prevede che una carica accelerata irraggi, ma se il moto è periodico anche le *onde* emesse dovrebbero essere *periodiche*, con la *frequenza del moto* dell'elettrone ed eventualmente con *armoniche*.

Invece la formula di Rydberg, *che descrive i dati sperimentali*, dice tutt'altro:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R c \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Nel 1908 Ritz scopre una generalizzazione della formula di Rydberg: tutte le righe spettrali, di qualsiasi atomo, si possono rappresentare nella forma

$$\frac{1}{\lambda} = T_m - T_n.$$

T_m , T_n sono detti "termini spettrali".

Per l'idrogeno:

$$T_n = R/n^2.$$

È chiara la semplificazione: relativamente pochi termini bastano per calcolare molte righe.

Ma l'interpretazione fisica resta oscura.

Usiamo però le *due quantizzazioni*: della radiazione e.m. e dei livelli atomici.

Dalla legge di Planck–Einstein per l'energia di un fotone:

$$\varepsilon = h \nu.$$

Dalla conservazione dell'energia in una transizione fra due livelli:

$$\varepsilon = E_m - E_n.$$

Combinando queste:

$$\nu = (E_m - E_n) / h$$

che è la *regola di Bohr*.

Si ritrova la regola di Ritz se si pone

$$T_n = E_n / (hc)$$

Ne segue che se conosciamo i *livelli di energia* di un atomo possiamo prevedere *quali frequenze* esso potrà emettere o assorbire.

Viceversa i *dati spettroscopici*, ossia la lista delle frequenze misurate delle righe spettrali di una data specie atomica, permettono di ricavare la *struttura dei livelli* di quell'atomo.

In particolare la formula di Rydberg per i termini spettrali dell'atomo d'idrogeno diventa una *formula dei livelli energetici*:

$$E_n = - Rhc / n^2.$$

Rimane il problema di spiegare perché i livelli siano proprio quelli.

Questo lo fa Bohr (1913) postulando che i livelli siano le energie di orbite circolari con momento angolare multiplo intero di $\hbar = h / (2\pi)$.

Si ottiene (in unità cgs)

$$R h c = \frac{m e^4}{2 \hbar^2}.$$

Esempi di applicazioni

Già nel lavoro di Einstein si trova la spiegazione della fluorescenza e della *legge di Stokes*.

Un'applicazione astrofisica è lo spettro delle *nebulose planetarie* (il mistero del “nebulio”).

Per alcuni commenti generali rimando al punto 1.4 di fq13.pdf

Per l'approfondimento sui contenuti, si veda fq21p1.pdf

Meccanica statistica dei sistemi quantizzati

Una presentazione della fisica quantistica non può prescindere dagli effetti che la quantizzazione dei livelli produce negli *equilibri statistici*, in varie situazioni.

Ciò serve tra l'altro a mostrare che si possono dare conseguenze fisicamente assai significative della quantizzazione anche prima di averne fatta una teoria completa.

Anche qui, il tempo mi obbliga a tagliare drasticamente: darò solo dei titoli o poco più.

La distribuzione di Boltzmann

L'obbiettivo è di arrivare alla distribuzione di Boltzmann per i sistemi con livelli discreti.

Distribuzione di Boltzmann e livelli discreti permettono di spiegare le anomalie dei calori specifici (congelamento dei gradi di libertà a bassa temperatura).

Si può mostrare l'effetto della distribuzione di Boltzmann sull'emissione e assorbimento della luce da parte degli atomi.

Una bella applicazione astrofisica è l'influenza della temperatura sugli spettri stellari: più in particolare l'aumento e poi la diminuzione nell'intensità della serie di Balmer in assorbimento, al crescere della temperatura nelle classi spettrali da M a O.

O4



B5



A0



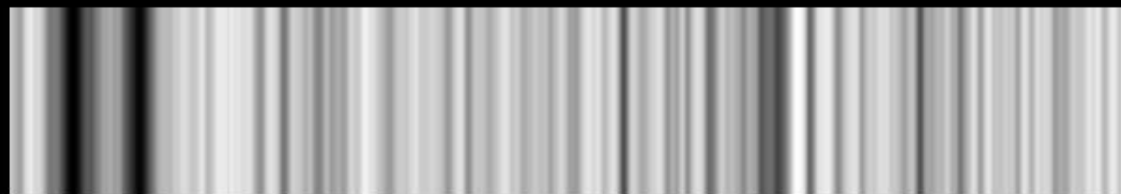
F0



G0



K0



M2



Le leggi di propagazione

Sebbene il *carattere corpuscolare* della radiazione sia un fatto, esso sembra *incompatibile* non solo con la teoria di Maxwell, ma anche con altri fatti: quelli che “provano” il *carattere ondulatorio* della radiazione.

Per di più lo stesso problema si presenta in altri casi.

Nei primi esperimenti gli *elettroni* appaiono come *corpuscoli* descritti dalla meccanica classica, ma esistono fatti che ne mostrano un “*comportamento ondulatorio*”.

In realtà un tale comportamento “duale” risulta *un fatto universale*.

Comportamento ondulatorio dei fotoni

La propagazione rettilinea della luce è spiegata nel modo più naturale dall'ipotesi dei fotoni.

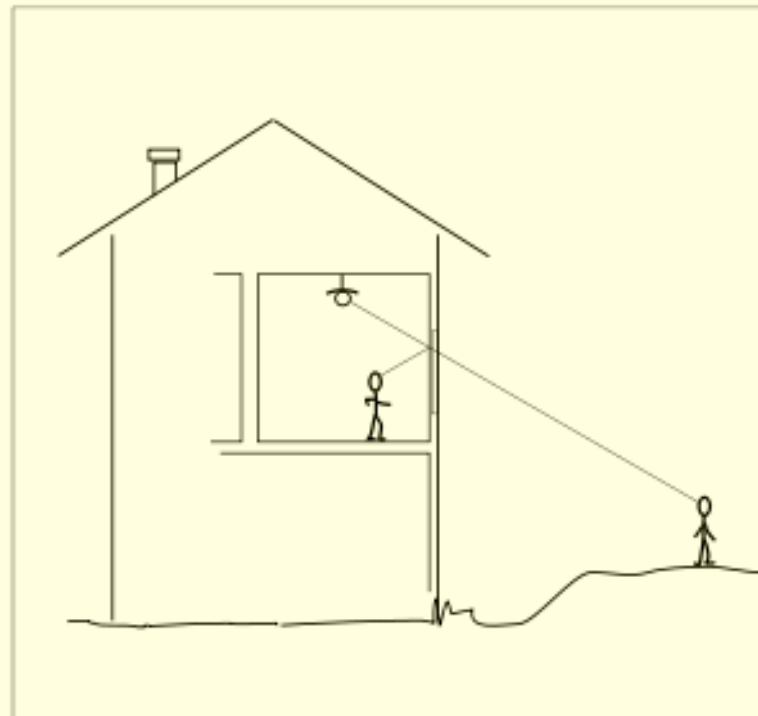
Del resto, è proprio per questa ragione che storicamente i primi modelli fisici della luce sono stati corpuscolari, e sono stati abbandonati solo quando sono apparsi incompatibili con altre proprietà della luce.

È il momento di presentare le “proprietà ondulatorie” come *fatto sperimentale*, basandosi su esperimenti di *riflessione* e *d'interferenza*.

Esperimenti coi FM

È molto istruttivo impiegare un FM per studiare la riflessione parziale della luce.

Se in un locale c'è una lampada accesa, chi sta nella stanza può vedere la sua immagine riflessa nel vetro di una finestra, e allo stesso tempo chi sta fuori vede la lampada attraverso il vetro.



Ciò significa che parte della luce della lampada *si riflette* verso l'osservatore interno, e parte *attraversa il vetro* e arriva a quello esterno.

Usando due FM si constata che dei fotoni emessi dalla lampada *alcuni si riflettono* sul vetro, e *altri* (la maggior parte: circa il 92% a incidenza normale) *lo attraversano*.

La “scelta” fra i due comportamenti appare casuale: la riflessione di un fotone è un evento *intrinsecamente casuale*, e si deve quindi parlare di *probabilità di riflessione* per un fotone, che risulta uguale a 0.08 nelle nostre condizioni.

Occorre osservare che nel caso di una lastra le riflessioni *sono in realtà due*, sulle due facce: dunque su ciascuna faccia la probabilità di riflessione è solo 0.04, e non 0.08 (le riflessioni multiple hanno intensità molto minori, e possono essere trascurate).

Un rompicapo

Ripetiamo l'esperimento di riflessione parziale con lastre "speciali" (è meglio non dire all'inizio in che cosa sono speciali).

Scopriamo che la percentuale di fotoni riflessi può variare, a seconda della lastra usata, da 0 al 16%!

Il rompicapo è costituito *soprattutto dallo 0*.

Infatti un fotone, quando incontra la prima faccia della lastra, deve “decidere” di non riflettersi *a causa della presenza della seconda faccia*, che non ha ancora raggiunto.

I fotoni sono “strani”

Abbiamo visto un esempio, in una situazione piuttosto semplice e vicina a quelle della vita quotidiana, del comportamento “strano”, controintuitivo, dei fotoni.

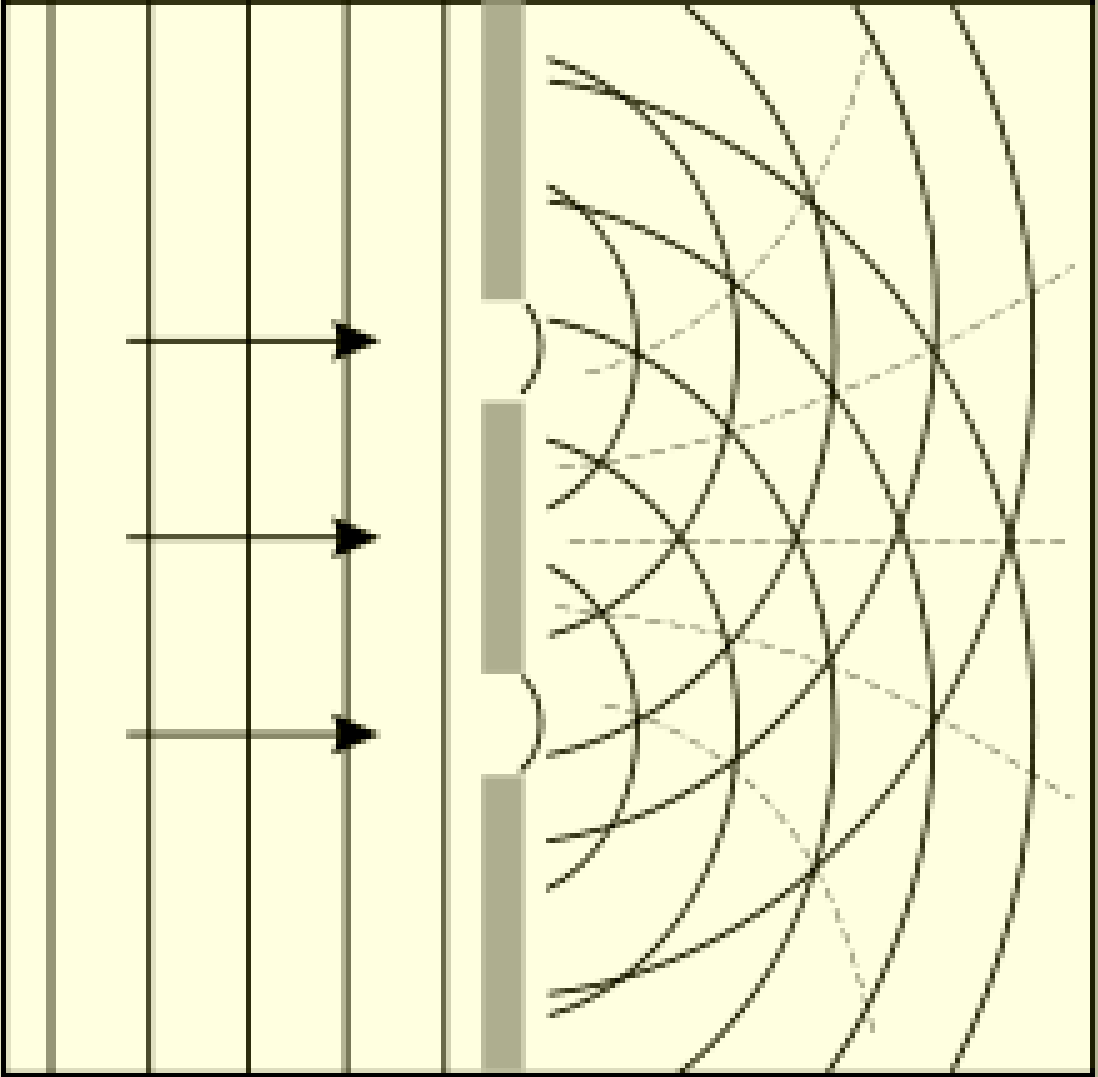
Per arrivare a un tentativo d'interpretazione teorica occorre però prendere un'altra strada.

Gli esperimenti di Young e Taylor coi fotoni

Ripetiamo lo storico *esperimento di Young* (1803) usando un FM come rivelatore.

Troviamo che *ad alte intensità* il comportamento della luce riproduce quello di un'*onda classica*, come lo si può vedere ad es. con un *ondoscopio*.

Si ha *interferenza*, ossia l'effetto sul rivelatore con i due fori aperti *non è additivo* in termini d'intensità.



L'analisi della figura d'interferenza nell'ondoscopio permette di misurare *come la fase dipende dal cammino*, ossia di misurare la *lunghezza d'onda*, definita come il cammino lungo il quale la fase varia di 2π .

L'esperimento eseguito con la luce e un FM *dà esattamente lo stesso risultato*, ed è per questo motivo che riesce naturale attribuire carattere ondulatorio alla luce.

Occorre però tener presente che in realtà, fino a questo punto, si tratta solo di un'*analogia* (per quanto profonda).

L'esperimento di Taylor

Taylor (1909) ripeté l'esperimento di Young a bassa intensità, usando una lastra fotografica.

Se usiamo un FM possiamo contare i singoli impulsi, cioè registrare l'arrivo di ciascun fotone.

Anche in questo caso si conferma il carattere corpuscolare della radiazione; tuttavia la *distribuzione dei conteggi* riproduce la figura d'interferenza classica.

(Questo esperimento è mostrato nel film PSSC *Interferenza dei fotoni*.)

Siamo dunque costretti ad attribuire in qualche modo un'ampiezza *al singolo fotone*.

Occorrerà *trovarne le leggi*, e *ricavarne previsioni* da confrontare con altri esperimenti.

Ampiezza e dualismo

Non abbiamo il tempo per seguire lo sviluppo del discorso...

Ma è necessario qualche commento a proposito del cosiddetto “dualismo onda-corpuscolo”.

Ampiezza e fase sono concetti che nel pensiero fisico si associano tradizionalmente ai fenomeni ondulatori.

È meglio però non parlare di “onda associata alla particella”, e non ce n'è bisogno.

In tal modo si evitano i problemi (o meglio i falsi problemi) connessi al “dualismo onda-corpuscolo”.

È per questo motivo che in precedenza la parola “ondulatorio” è apparsa frequentemente tra virgolette, al fine di segnalarne un uso non del tutto appropriato.

Le espressioni virgolettate possono essere viste più che altro come *residui storici*.

Nessun fisico che si occupa di elettroni, protoni, quarks ... usa mai nella sua pratica quotidiana termini connessi al supposto dualismo.

Tutte le entità citate si chiamano sempre e soltanto “particelle”.

Ciò che è necessario tener presente è che nell'ambito della fisica quantistica le particelle hanno proprietà “strane”, che si riassumono nell'avere associata un'*ampiezza* e non una posizione, una velocità, una traiettoria.