

Insegnare la fisica moderna

Il caso della fisica quantistica

Motivazione

Dobbiamo chiederci: perché insegnare la fisica quantistica?

(Non solo perché la troviamo nelle “indicazioni nazionali”...)

Da un lato si può dire che occuparsi di fisica moderna è un lusso:

- con tutto quello che c'è da fare
- con la scarsità di tempo
- con le difficoltà che i ragazzi trovano in questioni ben più elementari...

Da un altro però

- si tratta di un pezzo ormai grosso della fisica che esiste (oltre un secolo)
- c'è una richiesta, un interesse dei ragazzi
- senza la fisica del 20-mo secolo gran parte del mondo attuale non si capisce.

La fisica moderna non è solo m.q. e relatività

Il 20-mo secolo ha prodotto molto altro, sia dal punto di vista teorico, sia da quello sperimentale.

Qui non è possibile fare un elenco; la questione è discussa per es. in

<http://www.df.unipi.it/~fabri/sagredo/varie/fismod.pdf>

Eppure quando si parla di “fisica moderna” si pensa quasi sempre solo a relatività e m.q. Perché?

In parte ciò ha a che fare con la visione “filosofica” su cui tornerò più avanti.

Da un altro punto di vista, gioca il fatto che queste sono *metateorie*.

Detto in due parole: si tratta di *quadri di riferimento* assai generali, che però da soli non permettono di costruire fisica.

Due soli esempi:

1) Non si può capire come sono fatti gli atomi con la sola m.q.: occorre anche sapere che sono composti di *nucleo ed elettroni*, e che questi costituenti sono tenuti insieme dall'*interazione e.m.*

2) La relatività generale non spiega *da sola* struttura ed evoluzione dell'universo: occorre avere informazioni sulla *materia* che vi si trova, sulle sue *proprietà fisiche* (materia “fredda”, particelle relativistiche, altro per ora “oscuro”...) e sulle sue interazioni.

Quale approccio?

Non sono in genere favorevole a un approccio storico, per diverse ragioni:

a) quello che spesso viene presentato come approccio storico è in realtà solo una *ricostruzione col senno di poi*, che spesso con la vera storia dei fatti e delle idee ha poco in comune (v. Feynman, *QED*)

b) in particolare, un'analisi storica accurata dimostra che spesso i cosiddetti “esperimenti cruciali” *non hanno avuto affatto* quella funzione (un esempio canonico è l'esperimento di Michelson per la relatività)

c) non è detto che il modo in cui si è arrivati a capire le cose nel tempo sia quello *didatticamente* più accessibile

d) può accadere che altre vie portino meglio a cogliere la sostanza delle idee che si vogliono trasmettere, senza passare per i *tentativi ed errori* di cui è piena qualsiasi ricerca viva.

Un'anomalia

L'approccio storico *non è affatto seguito* per i capitoli più tradizionali della fisica, quelli la cui nascita e sistemazione sono più lontani da noi.

Per esempio, nessuno si sogna d'insegnare la meccanica passando per Newton, Huygens, Leibniz, d'Alembert, Lagrange, Eulero...

Basti pensare alla fatica che ha richiesto districarsi tra *quantità di moto* ed *energia cinetica*.

O all'uso dei *vettori*, che nascono solo alla fine dell'800...

Sembra dunque che l'attrazione che esercita l'idea d'insegnare nel suo sviluppo storico la fisica moderna derivi più che altro da una certa *inerzia*.

Così veniva insegnata oltre 50 anni fa, e così si continua a fare...

Un mondo strano e “incerto”

Da un altro lato, la fisica quantistica si caratterizza, agli occhi del profano — e temo anche di non pochi docenti, sicuramente in molti libri di testo — come un campo pieno di paradossi, dove non si è mai sicuri di quello che sembra più ovvio e naturale, dove accadono cose che sfidano il senso comune, ecc.

È perciò essenziale mettere gli allievi al riparo da tali false impressioni, e far capire subito che la fisica moderna è una scienza *comprensibile, razionale*, con le sue regole, il suo linguaggio, e prima di tutto i suoi *fatti*.

Solo che parla di un mondo lontano per *molti ordini di grandezza* da quello dell'esperienza comune.

Occorre quindi essere preparati alla possibilità che alcune o molte delle categorie concettuali che abbiamo costruito in base alla *nostra esperienza* vadano *rivedute* o anche *rimpiazzate* da altre.

Credo che sia il principale ostacolo da superare, ed è quello che ha dato luogo a certe interpretazioni filosofiche, a mio parere discutibili.

Filosofia?

Nella tradizione didattica della fisica quantistica si è inserita una “filosofia” che se ha certamente le sue radici nelle idee di alcuni dei fondatori della m.q. (principalmente Bohr e Heisenberg) non è però in una *relazione necessaria* con la *teoria fisica*.

Purtroppo gran parte dei testi danno a questa filosofia uno spazio e un ruolo a mio parere ingiustificato e dannoso.

Cosa che non succede con tutto il resto della fisica, come se

- a) questo fosse l'unico campo in cui ha senso fare filosofia della fisica
- b) non fosse più importante e prioritario occuparsi della *fisica in senso stretto*.

Inoltre, la presentazione è spesso viziata di *parzialità*: non si accenna neppure al fatto che l'*interpretazione* della m.q. è un problema *tuttora aperto*, che non c'è affatto unanimità di visione tra gli studiosi.

In realtà non si tratta solo di tradizione didattica: c'è quella che ho definito “immagine esterna” della m.q.

Intendo come la m.q. è vista e concepita da persone anche “colte”, ma senza conoscenze specifiche di fisica.

L'argomento è sviluppato in

<http://www.df.unipi.it/sagredo/candela/>

puntate 79 e 81 (un'altra sarà in preparazione tra non molto).

In particolare la puntata 79 discute l'idea di *complementarità* di Bohr, di cui viene dato un giudizio sostanzialmente negativo.

La puntata 81 è dedicata invece al “*principio*” d'*indeterminazione*.

Breve storia

La mia ricerca è iniziata attorno al 1987, e si è basata su un primo principio: *partire dai fatti*.

Spiego: la fisica quantistica si appoggia su di un insieme di *fatti*.

Questi da un lato sono *inconciliabili* con la struttura teorica della fisica quale era conosciuta alla fine del secolo scorso.

Ma se presi per buoni, com'è inevitabile, già consentono di *comprendere* molte cose, di *collegare* tra loro campi di fenomeni: e questo anche prima di una teoria che ne dia una spiegazione unitaria e coerente.

Il lavoro successivo mi ha portato a capire che su un altro punto occorreva distaccarsi dalla tradizione: dare adeguato spazio alla *fisica statistica*.

Primo: 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.

Bisogna però dissipare un equivoco assai diffuso: il lavoro di Einstein del 1905 *non ha* per tema principale l'effetto fotoelettrico.

In quel lavoro E. dimostra, con argomenti esclusivamente teorici, che dalla legge di Planck per la radiazione nera, vista al limite di basse temperature o di alte frequenze, segue un'espressione per l'*entropia della radiazione* del tutto analoga a quella valida per un *gas di particelle*.

La spiegazione delle leggi dell'effetto fotoelettrico (e di altri fenomeni) stanno solo nella parte finale dell'articolo, come “applicazione” del suo risultato principale.

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 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*, pur 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!

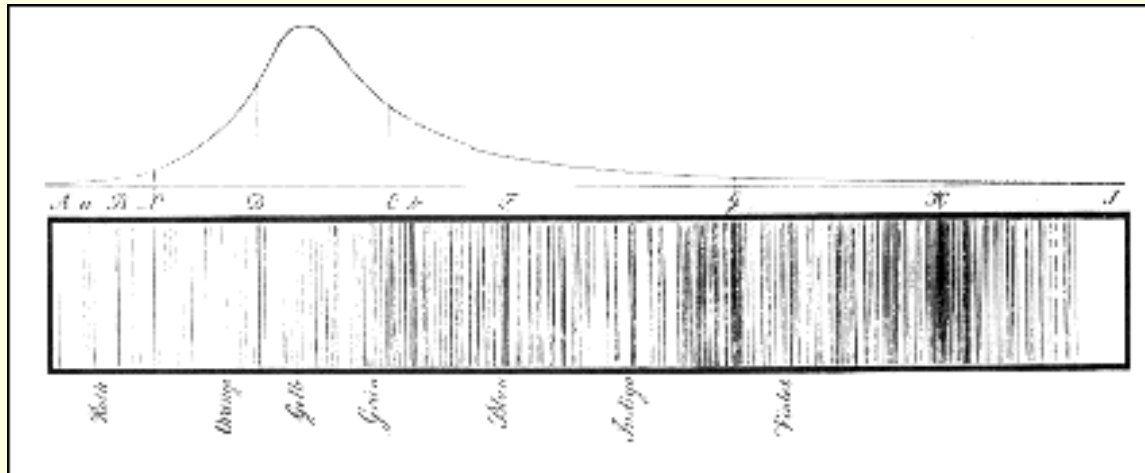
Tuttavia, se i livelli sono quantizzati, e se le loro distanze sono molto maggiori dell'energia media di agitazione termica, allora gli urti fra gli atomi (molecole) saranno elastici e i gradi di libertà interni saranno invisibili (congelati).

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

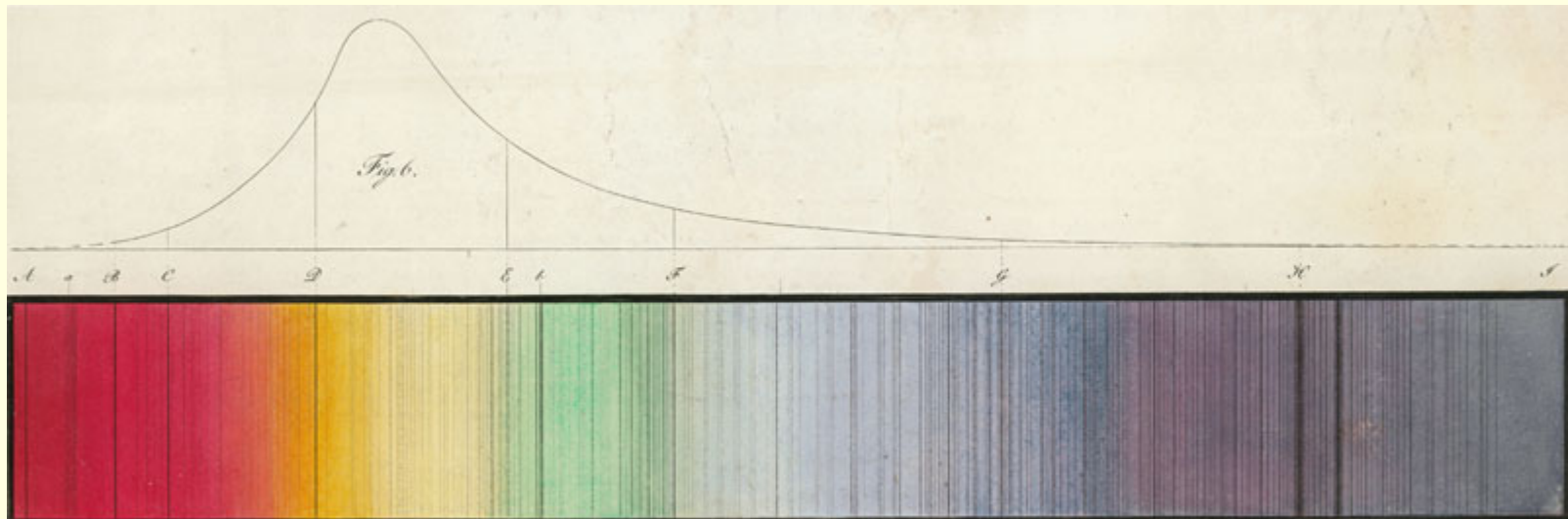
Notizie sugli spettri

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

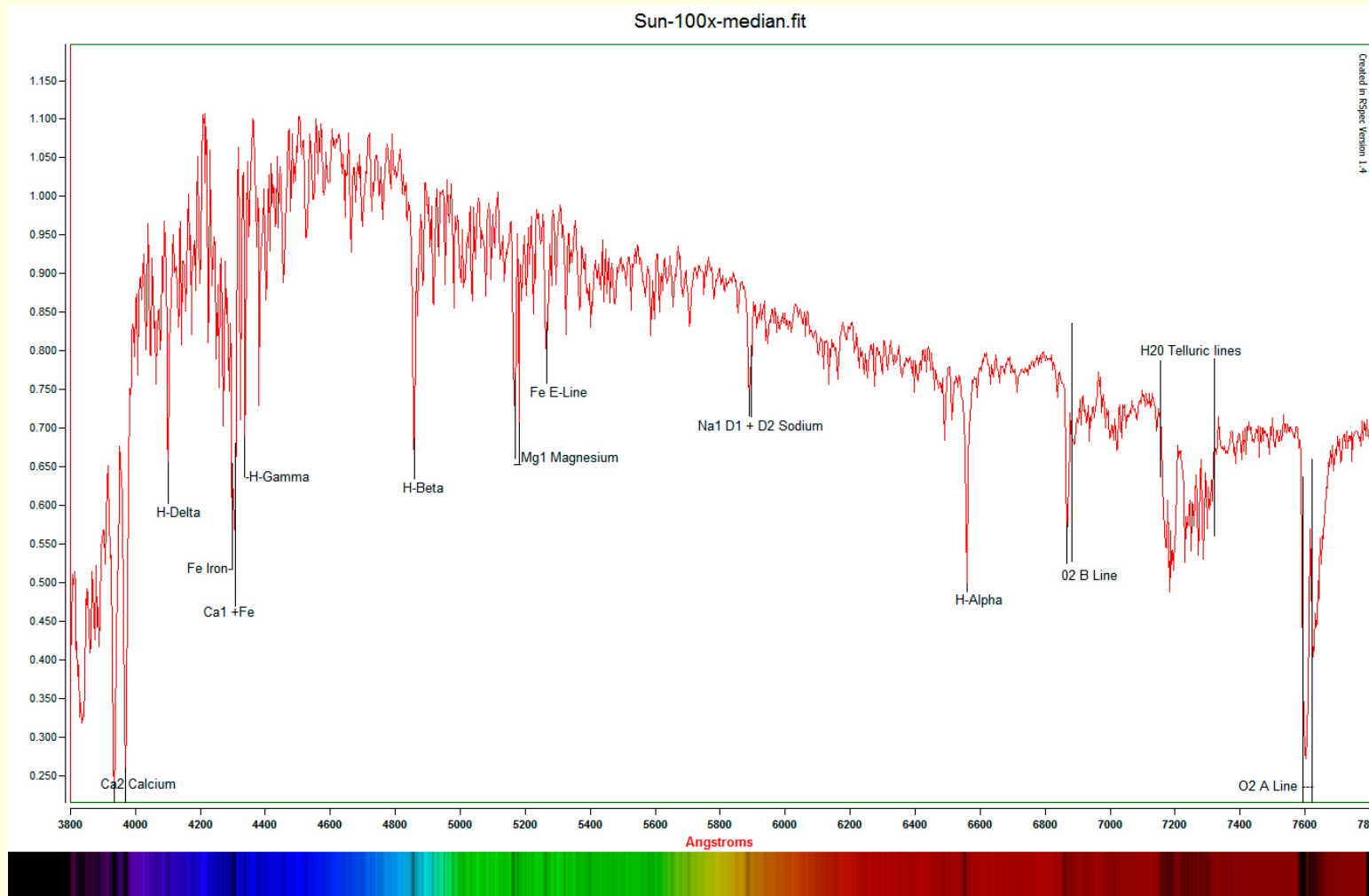
La figura qui sotto è l'originale di Fraunhofer, dove è riportato un grafico dell'intensità dello *spettro continuo*, e sotto le *righe di assorbimento* (che si trattasse di assorbimento, Fraunhofer non lo sapeva ancora).



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”.

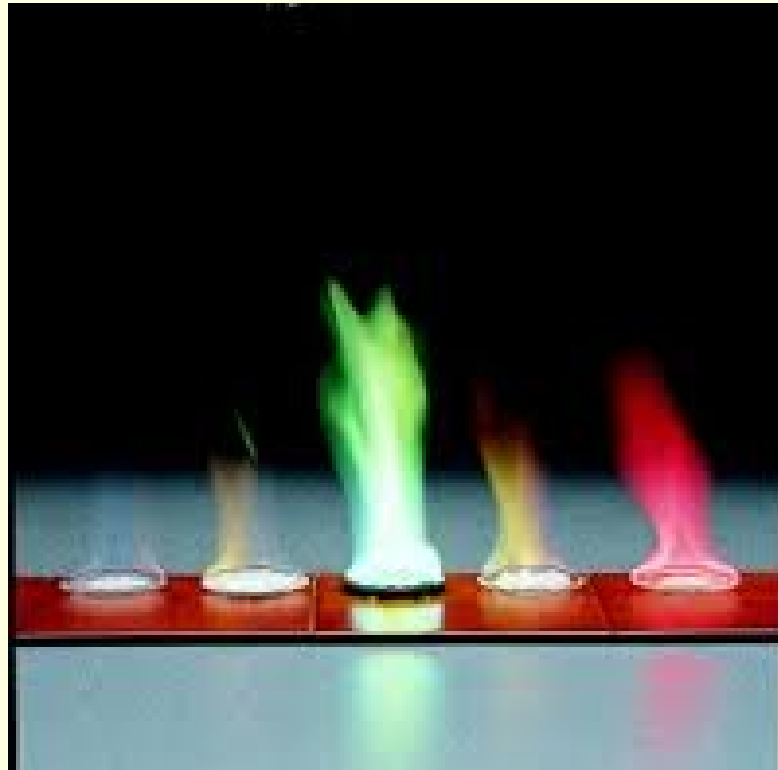


Nota didattica

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

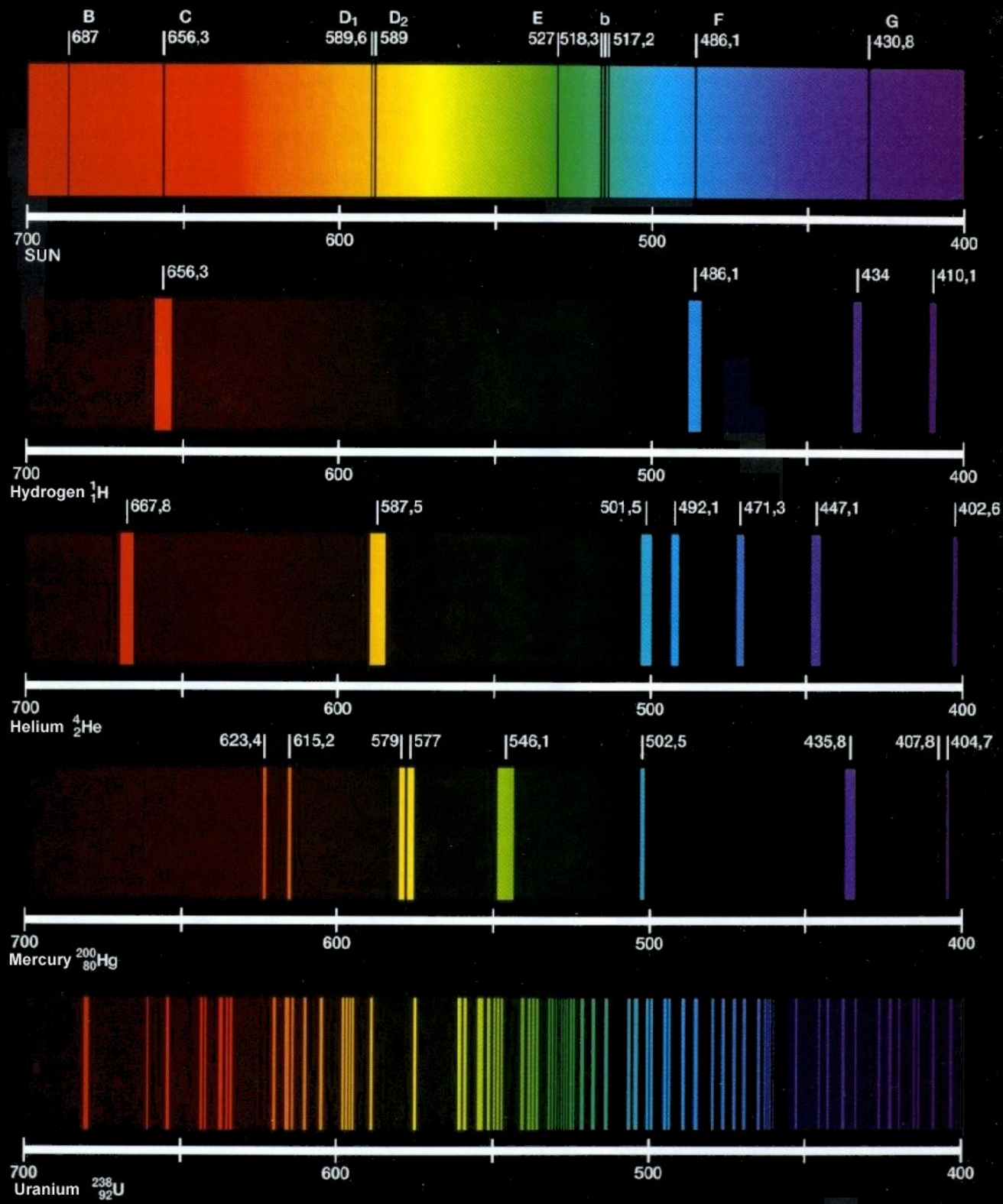
A metà dell'800 Bunsen e Kirchhoff iniziano a usare sistematicamente gli spettri di *emissione* delle *fiamme* come mezzo di *analisi chimica*.



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 $m = 2$).

Una parentesi storico/didattica

Anche per capire la f.q., ma non solo, sarebbe utile dedicare un po' di tempo nell'ultimo anno a ripercorrere le conquiste più significative dei secoli precedenti.

Qui interessa soprattutto l'800.

Questo secolo è da un lato quello in cui nascono alcune grandi teorie (la *termodinamica*, la *meccanica statistica*, l'*elettromagnetismo*).

Ma è anche quello in cui si raccoglie un'enorme quantità di fatti sperimentali, si formulano leggi empiriche di fenomeni ... molte senza una spiegazione teorica. L'elenco sarebbe assai lungo...

È su questo terreno che si troveranno a lavorare i fisici teorici degli anni '20-'30 del '900, che *in breve tempo* daranno le spiegazioni mancanti, risolveranno anomalie rimaste insolte per decenni.

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 (unità di Gauss)

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

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

Secondo: 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. Lo si può fare con una simulazione a computer.

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.

Le classi spettrali

La classificazione delle stelle secondo le caratteristiche del loro spettro fu iniziata da Angelo Secchi intorno al 1860.

Quella ancor oggi in uso è la classificazione detta “di Harvard” (inizio 20-mo secolo):

O B A F G K M

(Oh Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me)

Ma perché queste lettere, e perché in quest'ordine?

L'ordine è nato in un secondo tempo, ed è per *temperatura* decrescente della *fotosfera*.

Mettiamole in ordine alfabetico:

A B F G K M O

(le lettere che mancano erano presenti in classificazioni precedenti).

La figura che segue mostra dei tipici spettri stellari, ordinati secondo O B A F G K M, con evidenti *righe di assorbimento*.

O4



B5



A0



F0



G0



K0



M2



La classe A mostra righe assai intense della *serie di Balmer* dell'idrogeno: le stesse righe appaiono anche negli altri spettri, ma con intensità decrescente, *secondo l'ordine alfabetico*.

Ed ecco il problema:

perché sia le stelle più calde (classe O) sia quelle più fredde (K,M)
hanno righe di Balmer *più deboli*?

È qui che si rende necessaria la fisica statistica, almeno nella forma minima di *distribuzione di Boltzmann*.

I livelli dell'idrogeno

Riprendiamo la formula già vista:

$$E_n = - R h c / n^2 \quad (1)$$

dove

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

Mettendo i valori numerici si ottiene $R h c = 13.6 \text{ eV}$ e si deve osservare che questa è l'*energia di ionizzazione*, ossia la distanza dal livello più basso allo zero, dove cominciano i valori di energia per cui l'elettrone non è più legato.

I livelli successivi si ottengono dalla (1) per $n = 2, 3, \dots$ e le distanze del livello fondamentale risultano:

$$E_2 - E_1 = 10.2 \text{ eV}, \quad E_3 - E_1 = 12.1 \text{ eV}, \quad (E_3 - E_2) = 1.9 \text{ eV} \dots$$

La serie di Balmer inizia con la transizione $2 \rightarrow 3$, la cui lunghezza d'onda è circa 650 nm (rosso: riga H_α).

Ma perché questa transizione sia possibile, occorre che ci sia un buon numero di atomi nel livello $n = 2$.

La legge della distribuzione di Boltzmann ci dice che la probabilità di trovare un atomo nel livello n è (a meno di un fattore di normalizzazione, e di un altro fattore — “peso statistico”, poco diverso dall'unità)

$$p_n = e^{-E_n/kT}.$$

A temperatura ambiente ($T = 300$ K) kT vale circa 0.025 eV, per cui

$$\frac{p_2}{p_1} = e^{-10.2/0.025} = e^{-408} = 10^{-177}$$

che è un numero impossibile da intuire.

Quanti atomi ci sono in una bottiglia?

Stimare questo numero serve per capire quanto sia piccolo 10^{-177} .

Ricordiamo che in condizioni normali una mole occupa 22.4 litri; quindi in una bottiglia da un litro ci sono $1/22.4 = 0.045$ mol.

Una mole contiene $6 \cdot 10^{23}$ molecole, quindi $1.2 \cdot 10^{24}$ atomi di gas biatomico. Perciò la bottiglia contiene intorno a $5 \cdot 10^{22}$ atomi.

Si vede che a temperatura ambiente è *del tutto impossibile* trovare nella bottiglia anche un solo atomo d'idrogeno in stato eccitato.

Ma anche a 3000 K, invece di 10^{-177} avremo $10^{-17.7}$, che è comunque una frazione piccolissima: questo spiega perché non si possa vedere la serie di Balmer nelle stelle fredde.

Però le stelle di classe A hanno $T \simeq 10^4$ K, e allora si ha

$$\frac{p_2}{p_1} = 10^{-5.3}$$

che è un numero piccolo ma ragionevole.

Ma non abbiamo finito: se prendiamo una stella di classe O ($T \simeq 3 \times 10^4$ K)

$$\frac{p_2}{p_1} = 10^{-4.8}$$

quindi la serie di Balmer dovrebbe essere ancora più intensa; invece in queste stelle è poco visibile...

Purtroppo spiegare perché ciò accade è al di là delle nostre possibilità.

Mi limito a dire che cosa succede: a quella temperatura gran parte degli atomi sono *ionizzati*.

Commento sui numeri, e su altro...

La discussione che precede mostra una delle molte ragioni per cui insegnare la f.q. (se non si vogliono fare soltanto chiacchiere) è *difficile*.

Non si tratta di una difficoltà matematica, ma *genuinamente fisica*.

Occorre:

- avere a mente un buon numero di concetti fisici precedenti
- saperli collegare l'uno con l'altro, e usarli insieme
- avere dimestichezza coi numeri e con le stime di ordini di grandezza.

Ma la fisica è questa!

Terzo: 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.

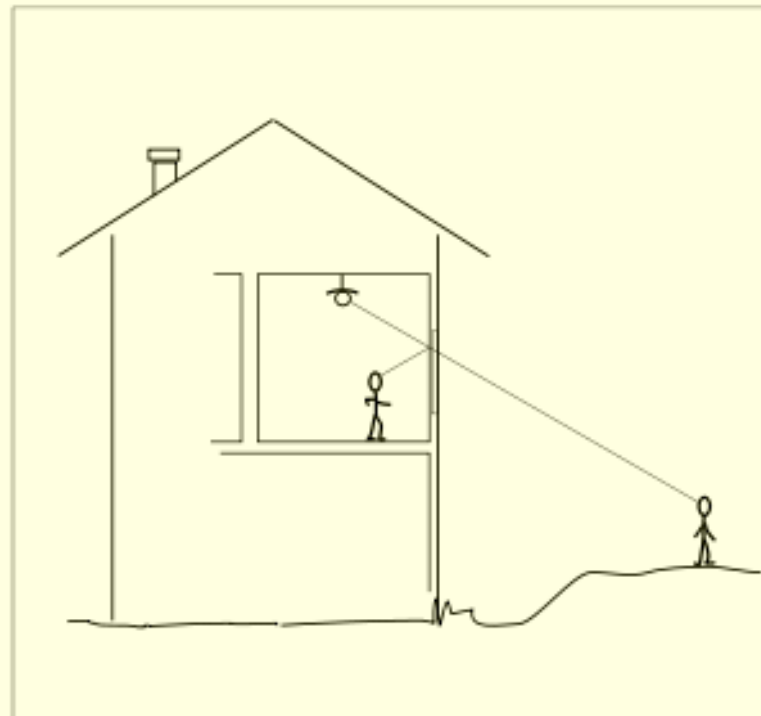
Del resto, è proprio per questa ragione che storicamente i primi modelli fisici della luce sono stati corpuscolari, e sono stati abbandonati solo quando sono apparsi incompatibili con altre proprietà della luce.

Dopo aver fatto conoscenza coi fotoni, 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 l'immagine della lampada 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 possibili *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.

Perché speciali?

Col vetro di una finestra questo comportamento strano non si manifesta.

Occorrono, come già detto, lastre “speciali”.

I fisici le chiamano “lavorate otticamente”: vuol dire che le due superfici sono accuratamente piane e parallele, con irregolarità piccole rispetto alla lunghezza d'onda della luce impiegata.

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.

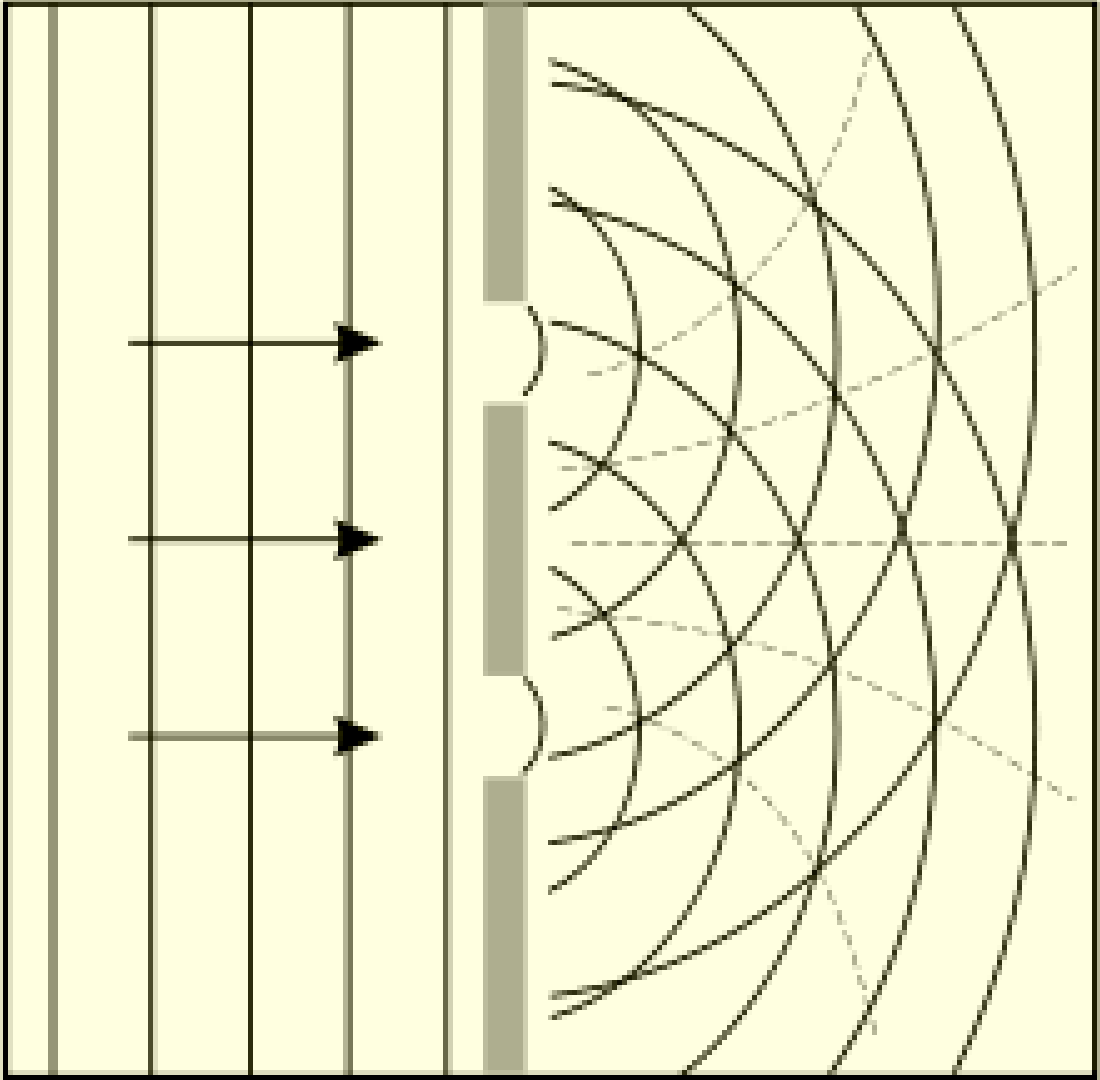
Per arrivare a un tentativo d'interpretazione teorica occorre però prendere un'altra strada.

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). Ne riparleremo.

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

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*.

Ma attenzione:

- è vero che tutti i pesci vivono nell'acqua
- è vero che i delfini vivono nell'acqua
- ma non ne segue (e infatti è falso) che i delfini siano pesci!

Analogamente:

- tutte le *onde* producono *interferenza*, e possiedono un'ampiezza e una fase
- i *fotoni* producono *interferenza*, e possiedono un'ampiezza e una fase
- ma *non ne segue che i fotoni siano onde!*

È dunque meglio 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.

La storiella di Feynman

Feynman racconta una storiella: qualcuno disse che per i fisici il lunedì, mercoledì e venerdì i fotoni erano onde; il martedì, giovedì e sabato erano particelle.

E la domenica? La domenica ci si pensava su...

Il calcolo delle ampiezze

Parlare di ampiezza senza andare più a fondo è inutile: non si sa che cosa farsene di questa ampiezza...

(Come del resto è inutile parlare di funzione d'onda, se non riesce a usarla in modo significativo.)

Ma è possibile dare delle *regole* precise per calcolare l'ampiezza associata a una particella (elettrone, fotone ...) in una data situazione fisica.

Con queste regole è possibile prevedere il risultato di un esperimento in cui le particelle vengono rivelate.

Qui non posso dire di più.

Differenza con la funzione d'onda?

In sostanza le differenze sono due.

1) Il nome: non si parla di “onda”.

2) Il metodo di calcolo.

Anche se molto semplificato, riproduce la “somma sui cammini” alla Feynman, al posto dell'equazione di Schrödinger, che è più difficile giustificare ed è praticamente inutilizzabile per difficoltà matematiche.

Non è difficile produrre delle simulazioni che riproducono situazioni d'interesse fisico, e che possono essere esplorate variando i parametri significativi.

Difficoltà

Non nascondo che questo approccio alla f.q. presenta varie difficoltà.

La prima è che si tratta di un progetto molto *impegnativo* e *ampio*.

Inoltre manca ancor oggi un'esposizione abbastanza vicina a ciò che si può proporre agli studenti.

fq21 è stato scritto un po' con quello scopo, ma non è ancora soddisfacente, temo.

Un'altra ragione è la *quantità di prerequisiti*.

Al confronto, la relatività è quasi autosufficiente: richiede i sistemi di riferimento, il principio di relatività e poco altro.

La f.q. praticamente richiede *tutta* la fisica.

(Non a caso il PSSC era stato pensato, nel suo complesso, avendo in vista la parte finale...)

Alla fine di fq21p3 si legge “questa parte è ancora largamente incompleta”. Perché?

La questione è discussa in fq13, in “Conseguenze, applicazioni, problemi aperti”.

(A differenza di fq21, che cominciava a essere pensato per studenti, fq13 è ancora un'esposizione per insegnanti, con spazio dedicato a motivazioni, problemi didattici...)

Una lunga citazione da fq13

È indispensabile trattare alcune conseguenze e applicazioni, oltre quelle già viste: il problema è solo quello della scelta.

Ecco un paio d'idee:

- Usare la relazione d'indeterminazione, se è stata introdotta, per stimare l'energia dello stato fondamentale dell'atomo d'idrogeno (a questo abbiamo già accennato). L'importanza sta nel fatto che si ottiene, a meno di un fattore numerico, la corretta dipendenza dalle costanti fondamentali.
- Calcolo analogo per un nucleo (serve a spiegare il salto di qualche ordine di grandezza, già ricordato, fra le energie atomiche e quelle nucleari).
- Effetto tunnel (trattato qualitativamente) come conseguenza delle proprietà dell'ampiezza: un'applicazione recente è quella delle reazioni chimiche a bassa temperatura [11]. C'è però un problema: come si fa a giustificare l'estrapolazione della relazione di de Broglie a valori immaginari dell'impulso, e a darne la corretta interpretazione matematica?

Sembrerebbe naturale discutere come applicazione la struttura degli atomi e il sistema periodico, ma a questo ostano molte difficoltà: non si vede come dare una giustificazione accettabile dei vari numeri quantici, degenerazioni, ecc.; c'è il problema di spiegare lo spin; il principio di formazione è tutt'altro che semplice (forse impossibile senza l'intero apparato della meccanica quantistica).

È già spiacevole che molti testi di chimica “strapazzino” tutto l'argomento, e non è il caso d'incoraggiare questo costume di dare una serie di pre-cetti incomprensibili, che non lasceranno alcuna traccia educativa.

È però giusto riconoscere che se non riusciamo a dare una soluzione soddisfacente a questo problema ci troviamo obbligati a rinunciare non solo alla struttura degli atomi e alle connessioni con la chimica, ma anche a dare le idee di base della struttura dei solidi (e in particolare dei semiconduttori); a meno di non ricorrere anche qui a regole dogmatiche per trattare di bande di valenza e di conduzione, di livelli di accettori e donatori, ecc.

Si tratta di una rinuncia grave, che non può essere fatta senza meditarla a fondo; ma neppure una soluzione quale che sia, della quale non siano state valutate motivazioni e conseguenze didattiche, potrebbe essere accettata.

Questo scrivevo giusto 20 anni fa. E oggi?

Che cosa salverei o come cambierei dopo 20 anni?

Salverei senz'altro la necessità di partire dai fatti e l'importanza della fisica statistica.

Rimango contrario al dualismo e alla “influenza dell'osservatore”.

Trovo un grave errore il metodo del “tocca tocca”, praticato — credo — in molti libri di testo.

È inutile tentare di parlare di tutto, fino ai quark e al modello standard, in modo totalmente incomprensibile.

Che traccia culturale resterà? Zero.

Invece sottolineerei in positivo i risultati raggiunti nel secolo scorso grazie alle nuove idee: come comprensione del mondo e come *applicazioni pratiche*.

Queste sono le prove migliori che quelle idee sono “giuste”: fermo restando il carattere *storico* (meglio che “provvisorio”) di ogni conoscenza scientifica.

Resta la difficoltà di base: la materia è vasta e difficile.

Ma non vedo modo di semplificarla: quello che si farebbe sarebbe in pratica della (cattiva) divulgazione, ossia un inganno verso gli allievi.

Continuo a ritenere che scopo dell'insegnamento della fisica nella s.s.s. non possa essere una “divulgazione forzata”.

Mi piacerebbe però una discussione di fondo: qual è lo scopo dell'insegnamento della fisica?