

# La Fisica Quantistica nella Scuola Secondaria: proposte e problemi \*

*Elio Fabri*

Dipartimento di Fisica – Università di Pisa

————— o —————

## **Premessa**

L'introduzione di argomenti di fisica quantistica nella scuola secondaria è oggetto di studio e discussione in tutto il mondo da alcuni decenni, in forme che dipendono naturalmente dalle diverse situazioni nazionali. Anche in Italia il problema è ben presente, ma non sembra che sia stata raggiunta una soluzione allo stesso tempo sufficientemente approfondita e che incontri un ragionevole consenso tra i ricercatori. Non si possono certo considerare “soluzioni” le presentazioni che molti libri di testo danno di “argomenti di fisica moderna.”

Si vuole qui illustrare lo stato provvisorio di una ricerca condotta sotto lo stimolo di un gruppo di lavoro dell'AIF, ricerca che si propone i seguenti obbiettivi:

- definire, per quanto possibile, un insieme di contenuti (fenomeni, concetti, applicazioni pratiche, ecc.) di fisica quantistica che possano trovar posto nei corsi di fisica del triennio della nostra scuola secondaria superiore;
- identificare le linee di approccio alla materia che consentano di fornire i contenuti indicati in un tempo ragionevole e con efficacia accettabile;
- mettere a fuoco i problemi nodali, cioè da un lato le scelte che occorre fare dati i limiti temporali e quelli imposti dal livello di maturità degli allievi, dall'altro i punti dove si prevedono particolari difficoltà, o dove non si sa al momento identificare una soluzione soddisfacente.

La vastità e complessità del problema rendono chiaramente impossibile raggiungere risultati completi in breve tempo; inoltre una ricerca su temi di questa portata dovrebbe essere condotta su scala più ampia, se non altro per consentire un confronto d'idee, e verificare concordanze e divergenze. Pertanto qui si vogliono solo enunciare in modo sommario alcune idee, allo scopo di avviare una prima discussione.

Un problema a parte, che non rientra in questa ricerca ma dev'essere tenuto presente, è quello della formazione degli insegnanti. Credo sia riconosciuto da tutti che la preparazione dell'insegnante di fisica medio in Italia sulla fisica quantistica non può essere ritenuta sufficiente (il che naturalmente pone qualche domanda, qui fuori tema, sull'efficacia dell'insegnamento universitario). Perciò

---

\* Relazione al Convegno GNDF, Roma 12–11–1987;  
*Atti del VI Convegno del GNDF*, 99 (1988).

la traduzione di qualsiasi progetto in concrete sperimentazioni, o ancor più l'inserimento organico della materia in un programma ministeriale, richiederebbero iniziative organiche di formazione.

Anche se dovrebbe essere cosa ovvia, è bene sottolineare la necessità che tutto il corso di fisica sia pensato in vista dello scopo che qui ci si propone (molti libri di testo non danno certo questa impressione). Qualunque giudizio se ne voglia dare per altri versi, il PSSC resta a mio parere l'esempio più chiaro di ciò che intendo: un corso concepito fin dall'inizio in modo da preparare l'allievo alla fisica moderna.

Questo può anche essere enunciato (in modo un po' riduttivo) come il "problema dei prerequisiti": quali idee e parti della fisica tradizionale sono assolutamente essenziali e formative per la fisica quantistica?

Altro problema scontato, ma non per questo meno scottante, è quello dei "tagli." È chiaro che non si può semplicemente aggiungere materia al programma di fisica, almeno se le ore restano le stesse; ma anche un consistente aumento dell'orario non dovrebbe indurre a un puro accumulo di materia: la maturità generale degli allievi e i loro tempi di assimilazione non consentono di anticipare semplicemente alcune parti per far posto in seguito ad altre "più moderne."

Le virgolette hanno lo scopo di porre un terzo problema: si può tagliare un argomento solo perché "vecchio"? La mia risposta è che esiste un *valore della fisica classica* che non sta solo nel suo significato storico, nè nella sua ampia validità attuale in tantissime applicazioni (e questo bisognerebbe farlo capire bene: i fisici di oggi non fanno tutto con l'equazione di Schrödinger o di Dirac, e tanto meno con le teorie di gauge o con le superstringhe). Esiste anche un *valore concettuale* della fisica classica: idee che sono di grandissima importanza ancor oggi negli sviluppi più avanzati, e che sono nate nel secolo scorso o ancora più indietro (alcuni esempi che possono venire in mente: l'idea di campo e il principio di sovrapposizione, i principi di relatività e di equivalenza, i concetti della termodinamica).

Senza per ciò volersi avviluppare in una situazione in cui ogni problema richiede che prima ne venga risolto un altro, il quale a sua volta . . . , è chiaro che una proposta organica sull'introduzione di argomenti di fisica quantistica dovrà indicare quali siano i prerequisiti necessari, e viceversa quali "economie" siano possibili nell'intero curriculum. Per il momento, a questi aspetti ho potuto dedicare solo cenni occasionali.

### **Quale approccio per la fisica quantistica?**

Entrando in argomento, la prima cosa che forse occorre discutere è la scelta dell'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;
- b) in particolare, un'analisi storica accurata dimostra che spesso i cosiddetti “esperimenti cruciali” non hanno avuto affatto quella funzione (v. esperimento di Michelson);
- c) non è affatto 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.

Va anche osservato che 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: 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, ossia dalla tendenza a ripetere il modo come noi l'abbiamo imparata. Il che ci riporterebbe all'insegnamento universitario: basti qui osservare che se una presentazione storica è forse inevitabile per argomenti freschissimi (e in tal caso non è neppure storica, è solo “d'attualità”) non lo è, e non si giustifica più, quando si parla della fisica di 50 o 100 anni fa, che ormai ha assunto una sistemazione concettuale ben diversa da quella che aveva agli inizi.

Naturalmente non c'è dubbio che uno studio della storia di una ricerca, proprio attraverso i tentativi, gli esperimenti decisivi e quelli contestati, le influenze dei pregiudizi o in generale le visioni filosofiche dell'epoca e di certi gruppi, possa avere un grande valore per capire il significato della ricerca scientifica e dei suoi risultati in diverse fasi della storia della civiltà; solo che si tratta di un obiettivo totalmente diverso dalla didattica della fisica, e si dovrebbe anche discutere se tale obiettivo sia perseguibile (o almeno in che misura reale lo sia) nella scuola secondaria.

Sempre sul tema dell'approccio migliore, un'osservazione va fatta: la fisica quantistica (come per altro verso anche la relatività) si caratterizza, agli occhi del profano — e temo anche di molti docenti — come un campo pieno di paradossi, dove non si è mai sicuri di quello che sembra più ovvio e naturale, dove accadono cose che sembrano sfidare il senso comune, ecc. S'intende che questo non è affatto vero per gli “addetti ai lavori,” i quali anzi mostrano spesso il difetto opposto: tendono ad essere acritici, a usare le “prescrizioni di calcolo” senza domandarsi più che cosa significano da un punto di vista generale (il famoso disprezzo di molti fisici per la “filosofia”) e di conseguenza nel loro insegnamento trascurano di discutere i problemi inerenti, lasciando così disarmati i loro allievi (tra cui i futuri insegnanti) proprio di fronte ai presunti paradossi di cui si diceva.

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*. Non è il caso qui di addentrarsi in una discussione — che sarebbe davvero filosofica — di che cosa sia un “fatto” in fisica; ma il punto è centrale, per quello che segue, poiché la linea didattica che sto per esporre si basa prima di tutto su questo principio: la fisica quantistica si appoggia su di un insieme di *fatti*, i quali da un lato sono inconciliabili con la struttura teorica della fisica quale era conosciuta alla fine del secolo scorso; ma dall’altro — 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.

La presentazione che al momento ritengo soddisfi meglio le esigenze sopra espresse si sviluppa in 4 capitoli:

1. La quantizzazione come fatto
2. Statistica dei sistemi quantizzati
3. Leggi di propagazione della radiazione e. m. e della materia
4. Conseguenze e applicazioni.

## 1. La quantizzazione come fatto

È mia opinione che sia opportuno iniziare il discorso dal riconoscimento di fatto che esiste la quantizzazione:

- a) dei livelli atomici
- b) della radiazione e. m.

Intendo con ciò proporre che si mostrino i fatti fondamentali che provano questa realtà, *senza avanzare alcuna interpretazione* al di là della pura evidenza.

Naturalmente questa proposta si scontra con un problema ben noto: esistono fatti sperimentali *neutri* (cioè che non presuppongono uno schema teorico)? E in conseguenza: è possibile parlare di fatti “senza interpretazione”? La mia risposta è che naturalmente non si può essere così ingenui, ma la proposta va intesa non tanto nel senso in cui la leggerebbe un filosofo della scienza, ma in quello più modesto del “fisico qualunque”: intendo dire che alla luce degli stessi schemi interpretativi della fisica classica alcuni esperimenti impongono un’evidenza a cui è difficile sfuggire — e che perciò è bene presentare al più presto — circa l’esistenza di situazioni quantistiche. Questo andrebbe fatto all’inizio senza tentare immediatamente di proporre un nuovo schema interpretativo, e ciò per due ragioni:

- a) uno schema soddisfacente sarebbe prematuro, e uno possibile a quel punto è largamente insoddisfacente;
- b) anche senza tentare un nuovo schema, i fatti quantistici consentono di trarre deduzioni e di spiegare altri fatti, e questo è un insegnamento di metodo che mi sembra utilissimo in sé: la fisica procede sempre in questo modo, non si attende la “teoria generale” per cercare di capire quello che è possibile.

### 1.1. La quantizzazione dei livelli atomici

L'esperienza dimostra che nei sistemi atomici sono possibili soltanto valori discreti di energia, caratteristici di ciascun sistema. Il punto di partenza più adatto è l'esperimento di Franck–Hertz, per diverse ragioni:

- si tratta di un esperimento direttamente eseguibile, per il quale esistono attrezzature già pronte, nonché il film del PSSC;
- l'interpretazione dell'esperimento fa uso di concetti semplici ma fondamentali della fisica classica: principi di conservazione, campo elettrico e potenziale; ha quindi un'utile funzione di richiamo e motivazione dell'importanza di tali concetti;
- è un esempio importante di un fatto generale: nella fisica microscopica i numeri hanno un ruolo basilare: l'esperimento permette di *misurare* le distanze fra i livelli, cioè non è solo qualitativo.

Naturalmente dovranno essere state premesse le idee sulla struttura atomica (elettroni, modello di Rutherford, ordine di grandezza delle dimensioni).

Si dovrà far notare in modo chiaro che la quantizzazione dell'energia non è spiegabile con la fisica classica, e quindi pone un grave problema: però *è un fatto*. Niente impedisce di osservare anche che la quantizzazione non è una particolarità dei sistemi atomici; solo che in quel caso l'effetto è molto più visibile, mentre nei casi macroscopici è generalmente del tutto trascurabile.

È molto importante far vedere che la quantizzazione dei livelli permette già di trarre delle conseguenze (con ordini di grandezza): prima di tutto sulle dimensioni e sulla stabilità degli atomi e delle molecole, sulla “solidità” della materia. È ben noto che una grave difficoltà del modello di Rutherford è la sua instabilità per irraggiamento. A parte ciò, le dimensioni delle orbite appaiono arbitrarie, e perciò non si vede come mai gli atomi di uno stesso elemento risultino tutti uguali (come è provato ad es. dall'esistenza dei cristalli). Se invece l'energia è quantizzata, e in particolare se esiste un'energia minima, esiste anche una dimensione minima degli atomi, fissata una volta per tutte per gli atomi della stessa specie.

Su questo punto vorrei insistere, perché si tratta di qualcosa che è facile dare per scontato. Nella fisica classica non ci sono grandezze fondamentali che fissino le dimensioni degli oggetti (ad es. del sistema solare): tanti Soli uguali potrebbero benissimo avere sistemi planetari molto differenti per dimensioni, numero di pianeti, ecc. Invece gli atomi d'Idrogeno *sono tutti identici*, e questo è essenziale per la chimica. La spiegazione di questa identità non esiste nella fisica classica. Ora non abbiamo “la spiegazione,” ma abbiamo ricondotto questo fatto a un altro più semplice: la quantizzazione dell'energia.

Un'altra idea che mi sembra affascinante è quella del *quantum ladder*. La quantizzazione dell'energia spiega perché nella fisica dei gas possiamo trattare gli atomi come palline senza gradi di libertà interni. Infatti a temperatura ambiente

le energie cinetiche tipiche degli atomi sono molto più piccole dei salti tra i livelli atomici, ed è perciò molto improbabile che un atomo venga eccitato per urto; il che è quanto dire che resta sempre nello stato fondamentale e non scambia energia con gli altri: si comporta dunque come un sistema privo di gradi di libertà interni. In particolare, questo spiega il successo della teoria classica dei calori specifici in molti casi; dei casi anomali (sia per le molecole, sia per i solidi) dirò qualcosa più oltre. Paradossalmente, in questo caso la quantizzazione salva dunque una teoria classica (la meccanica statistica di Maxwell–Boltzmann) che sarebbe invece incompatibile con la struttura interna degli atomi, se la fisica classica avesse validità incondizionata.

Lo stesso accade per i nuclei nella fisica atomica: le distanze dei livelli nucleari sono molto maggiori (dell'ordine di  $10^4$  volte) di quelle dei livelli atomici, e perciò negli esperimenti di fisica atomica (chimica, spettroscopia, ecc.) il nucleo si comporta come un punto senza gradi di libertà interni.

Ritengo assolutamente cruciale che tutti questi discorsi siano accompagnati dalla discussione degli ordini di grandezza: mentre nella fisica classica masse, cariche, distanze, sono poco rilevanti, nel senso che le formule vanno sempre bene e la fisica non cambia qualitativamente, nella fisica microscopica ciò non è più vero, a causa dell'intervento delle *costanti fondamentali*.

I prerequisiti essenziali per questo capitolo sono: il modello atomico dei gas, le unità di misura, energia meccanica ed elettrostatica, quantizzazione della carica.

## 1.2. *La quantizzazione della radiazione e. m.*

La linea è quella canonica: si parte dall'effetto fotoelettrico, presentando in primo luogo il fenomeno e dando poi l'interpretazione di Einstein.

Mentre nel punto di partenza non c'è niente di originale, le questioni sorgono sull'interpretazione. Di solito si usa l'effetto fotoelettrico (o analoghi) per introdurre la natura corpuscolare della radiazione e il dualismo onda-corpuscolo. Poiché la questione del dualismo mi sembra una delle più delicate dell'intero argomento, sarei stato in un primo tempo del parere di non toccarla affatto, rimandandola al momento in cui si parla di proprietà ondulatorie degli elettroni. All'inizio si sarebbe potuto trattare l'effetto fotoelettrico come prova soltanto del carattere quantistico dell'assorbimento (e poi dell'emissione) di radiazione. Questo approccio "reticente" aveva però il difetto di lasciare nel buio circa il misterioso comportamento di una radiazione che si propagherebbe secondo le leggi classiche, ma verrebbe emessa e assorbita in modo quantizzato. Senza contare che di fotoni ormai se ne parla dappertutto, più o meno a sproposito, e sarebbe quasi ridicolo tacerne, come se si trattasse di cose oscene. . .

Resta il fatto che le trattazioni usuali mi sembrano poco comprensibili (anche quando siano corrette come sostanza) e restano sempre soggette all'obiezione d'introdurre questo misterioso dualismo, che è un esempio tipico di quelle cose

che vanno contro il senso comune, cui facevo riferimento più sopra. In una seconda riflessione mi sono perciò orientato verso una presentazione che affronti la questione in modo diretto: anche in questo caso abbiamo dei fatti che ci obbligano a prendere atto che la descrizione accettata dalla fisica dell'800 (le onde e. m.) non descrive correttamente la realtà: la luce (e la radiazione e. m. in generale) è *fatta di particelle*.

Sono certo che un'affermazione così perentoria sarà accolta con qualche sorpresa. Anche se il lettore vorrà farmi credito di conoscere perfettamente come viene generalmente presentato questo argomento anche nei corsi universitari (compresi quelli tenuti da chi scrive, lungo molti anni) ritengo di coprirmi le spalle con le parole di un'indiscutibile autorità nel campo:

“I want to emphasize that light comes in this form — particles. It is very important to know that light behaves like particles, especially for those of you who have gone to school, where you were probably told something about light behaving like waves. I'm telling you the way it does behave — like particles.

“You might say that it's just the photomultiplier that detects light as particles, but no, every instrument that has been designed to be sensitive enough to detect weak light has always ended up discovering the same thing: light is made of particles.” ([5], p. 15)

Scherzi a parte, la citazione di Feynman svolge a questo punto una funzione molto più importante: quella di presentare la fonte di un approccio alla meccanica ondulatoria che mi sembra più soddisfacente di altri a me noti, e che mi propongo di tradurre in una proposta didattica. Ma su questo si tornerà più avanti.

Una volta introdotti i fotoni, e messo bene in evidenza che la loro esistenza è incompatibile con la teoria di Maxwell, ma ciononostante è *un fatto*, 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 quello già indicato: prima di affrontare questioni più di principio, è bene mostrare che il nuovo paradigma s'impone anche a causa della massa di successi esplicativi che i nuovi fatti permettono.

Non mi sembra invece il caso di affrontare il problema del corpo nero, anche se storicamente è stato il punto di partenza. Ritengo infatti che nella scuola secondaria non sia possibile esporre in modo accessibile neppure la natura del problema, che richiede potenti astrazioni, a cominciare dalla stessa applicazione della termodinamica alla radiazione.

### 1.3. *Conseguenze combinate di 1.1 e 1.2*

Nello spirito già illustrato, di far vedere che i nuovi fatti quantistici consentono un primo schema interpretativo anche in assenza di una teoria comprensiva,

trovo molto opportuno presentare alcune conseguenze delle due specie di quantizzazione già viste.

In primo luogo si tratterà degli spettri atomici in emissione e assorbimento: la relazione di Planck per i fotoni e la quantizzazione dei livelli atomici portano alla regola di Bohr; viceversa i dati spettroscopici permettono di ricavare la struttura dei livelli di un dato tipo di atomo. Si arriva così *per via empirica* alla formula dei livelli dell'atomo d'Idrogeno.

Pensando alle applicazioni, si può ad es. trattare della fluorescenza, con relativi sviluppi tecnici (es. i tubi fluorescenti). Un'elegante conseguenza delle stesse idee si ha nell'astrofisica con la spiegazione del meccanismo di emissione di luce nelle nebulose planetarie (e volendo, si potrebbe accennare alla storia del Nebulio).

Verrebbe qui naturale parlare di emissione spontanea e indotta, ma esiste un problema non solo didattico. Non è corretto presentare, come spesso si fa, l'emissione spontanea come una "tendenza" di un sistema a tornare allo stato di minima energia. Una tale tendenza per un sistema isolato non esiste affatto, e se spesso lo stato fondamentale appare favorito è solo in conseguenza di un equilibrio statistico: esattamente come, a bassa temperatura, una fase condensata è favorita rispetto alla fase gassosa, o come un gas neutro è lo stato stabile rispetto a un plasma. Basta però cambiare le condizioni per avere equilibri diversi, e ciò accade anche per l'equilibrio tra emissione e assorbimento di radiazione. Com'è noto, la scoperta della relazione necessaria tra le probabilità di emissione e assorbimento è dovuta ad Einstein (1917).

Non ho trovato (almeno per ora) come affrontare questo argomento in modo semplice e senza dare idee sbagliate. Di conseguenza, non so in che forma si possa parlare del laser, che oltre all'equilibrio emissione-assorbimento richiede di chiarire l'emissione indotta, e soprattutto il suo carattere di coerenza.

## **2. Statistica dei sistemi quantizzati**

Una presentazione della fisica quantistica non può prescindere, a mio giudizio, dagli aspetti statistici: mi riferisco alle implicazioni della quantizzazione dei livelli negli equilibri statistici, in varie situazioni. Tra l'altro, questo è un esempio della tesi enunciata sopra: che si possono dare conseguenze fisicamente assai significative della quantizzazione anche prima di averne fatta una teoria completa. Inoltre questo aspetto è relativamente più semplice e accessibile anche nella scuola secondaria.

Come obiettivo, si dovrebbe arrivare alla distribuzione di Boltzmann per sistemi discreti di livelli: una soluzione potrebbe essere di far vedere come un sistema di atomi evolve verso la distribuzione di Boltzmann dei livelli di energia interna in conseguenza degli urti, cosa ottenibile ad es. con una simulazione a calcolatore. Tra parentesi, è questo un caso nel quale non vedo obiezioni all'uso di una simulazione, che sostituisce un calcolo impossibile con gli strumenti



matematici disponibili, e nello stesso tempo trasmette bene l'idea fisica sottostante.

Quale primo esempio di conseguenza della diversa popolazione dei livelli, si potrebbe mostrare l'effetto 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 al crescere della temperatura nelle classi spettrali da M a O, dovuta al fatto che la popolazione del primo livello eccitato (da cui parte la serie di Balmer in assorbimento) dapprima aumenta al crescere della temperatura, e poi ricade man mano che si popolano i livelli più eccitati, fino alla ionizzazione.

Distribuzione di Boltzmann e livelli discreti permettono poi di spiegare le anomalie dei calori specifici (congelamento dei gradi di libertà a bassa temperatura). Anche qui il calcolatore può essere un ausilio prezioso.

Darei anche spazio alle reazioni chimiche, introducendo l'energia di attivazione per spiegare la dipendenza della velocità di reazione dalla temperatura: fenomeno di grande importanza sia nella chimica industriale sia nella biologia.

Non mi sembra invece opportuno trattare le statistiche di Bose e Fermi: le presentazioni "elementari" in termini di conteggio di stati hanno sempre qualcosa di misterioso, mentre una discussione più seria, basata sulle proprietà di simmetria del vettore di stato rispetto allo scambio, non può essere introdotta a questo punto (e neppure dopo, a mio parere). Purtroppo questa rinuncia ha il grave inconveniente di rendere impossibile di trattare i livelli elettronici dei solidi, e quindi di parlare di metalli, isolanti, semiconduttori, ecc. Credo perciò che sia necessario studiare ancora questo punto, per vedere se esista una soluzione.

Detti in breve, i prerequisiti essenziali sono: concetto di probabilità, teoria cinetica dei gas, calori specifici in termodinamica.

### **3. Leggi di propagazione della radiazione e della materia**

Occorre ora discutere una questione lasciata da parte all'inizio: 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: sebbene gli elettroni appaiano, alla luce dei primi esperimenti, come corpuscoli descritti dalla meccanica classica, esistono fatti che ne mostrano un "comportamento ondulatorio." In realtà, una volta chiariti gli aspetti quantitativi, cioè gli ordini di grandezza dei parametri rilevanti in ciascun caso, un tale comportamento "duale" risulta un fatto universale.

La linea che si propone è di presentare tali "proprietà ondulatorie" come *fatto sperimentale*, basandosi su esperimenti d'interferenza. È qui particolarmente importante evitare termini e considerazioni che possano indurre falsi problemi filosofici, quali un presunto "ruolo dell'osservatore" e simili. L'esposizione segue

da vicino quella adottata da Feynman in diversi libri, scritti per lettori di diversi livelli (v. bibliografia) e sarà esposta in forma più estesa del resto, per il suo carattere un po' meno tradizionale.

### 3.1. *Gli esperimenti di Young e di Taylor con i fotoni*

Un buon punto di partenza è la descrizione di un fotomoltiplicatore. A forti intensità di luce, il fotomoltiplicatore può essere visto come un misuratore d'intensità: fornisce una corrente proporzionale all'intensità della radiazione. A bassi livelli invece il fotomoltiplicatore dà impulsi discreti, uno per ciascun atto elementare di assorbimento.

Se si ripete lo storico esperimento di Young usando un fotomoltiplicatore come rivelatore, si trova che ad alte intensità il comportamento della luce è 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. Se però si considerano le ampiezze delle due onde difratte, si vede che coi due fori aperti queste si sommano (principio di sovrapposizione). Più esattamente: per calcolare l'ampiezza dell'onda sul rivelatore occorre tener presente che l'onda può arrivare in quel punto, partendo dalla sorgente, lungo due strade diverse (passando per il primo o per il secondo foro). A ciascuna delle due strade corrisponde un'ampiezza e una fase, e l'effetto complessivo si ottiene sommando le due ampiezze, ciascuna con la sua fase. L'intensità dell'onda risultante è proporzionale al quadrato dell'ampiezza.

Misurando l'intensità in diversi punti si ottiene una figura d'interferenza, dovuta alle diverse fasi con cui le due onde arrivano, causa il diverso cammino: ne segue che l'analisi della figura d'interferenza permette di misurare come la fase dipende dal cammino, ossia di misurare la lunghezza d'onda.

A bassa intensità (esperimento di Taylor) è possibile contare i singoli impulsi, cioè registrare l'arrivo di ciascun fotone: tuttavia la distribuzione dei conteggi riproduce la figura d'interferenza classica. Dunque l'ampiezza non è una proprietà dell'insieme dei fotoni, ma della singola particella. Occorrerà trovarne le leggi, e ricavarne previsioni da confrontare con altri esperimenti.

Già l'esperimento di Young-Taylor consente però di ricavare una prima legge (sperimentale): la lunghezza d'onda è legata in modo semplice all'energia dei fotoni. Se è stata trattata la pressione di radiazione, se ne può dedurre che i fotoni trasportano anche impulso, e arrivare così alla relazione di de Broglie.

### 3.2. *Esperimenti con gli elettroni*

Conviene partire da un esperimento alla Young (ideale): anche in questo caso il conteggio coi due fori aperti *non è additivo*. L'esperimento mostra invece una figura d'interferenza, e quindi porta a introdurre anche per gli elettroni, come già per i fotoni:

- a) l'idea di un' *ampiezza* di propagazione che segue un principio di sovrapposizione;
- b) l'idea di una *probabilità* di rivelazione, proporzionale al quadrato dell' *ampiezza*.

Sebbene l'esperimento descritto sia ideale, occorre mettere bene in evidenza che questi sono *fatti sperimentali* (esperimenti analoghi, anche se più complessi, sono stati fatti realmente): non è dunque questione d'interpretazione, d'influenza dell'osservatore, ecc. Per dirla con Feynman: “this is the way things are.”

Ovviamente a questo punto si farà notare che anche per gli elettroni gli esperimenti d'interferenza permettono la misura della lunghezza d'onda, e che vale ancora la relazione di de Broglie.

Sorge il problema: da quale foro passa il singolo elettrone? Se s'introduce nell'apparato sperimentale un congegno capace di rivelare il passaggio degli elettroni, si trova che ogni singola particella passa o da uno o dall'altro foro; ma in queste condizioni il risultato dei conteggi diventa additivo, senza più traccia d'interferenza. La cosa non è strana: abbiamo modificato il dispositivo sperimentale, e quindi le sue interazioni con gli elettroni. È questo il senso della *complementarità* di Bohr, sfrondato di connotazioni soggettive.

Andando più in dettaglio si può dire che l'interazione rende incoerenti le due ampiezze, ossia distrugge la loro precisa relazione di fase, così che in termini statistici il termine d'interferenza si annulla, e si ottiene la somma delle probabilità, come ci si aspetterebbe se si trattasse non di elettroni, ma di normali proiettili macroscopici. Non ritengo però che sia possibile arrivare a questo grado di profondità nella discussione.

### 3.3. Interpretazione: l'ampiezza di propagazione

Molte cose sono già state dette: resta solo da tirare le somme, e preparare il terreno per i successivi sviluppi. Il punto cruciale è la scoperta che il moto di una particella non può essere descritto, come dice la meccanica classica, con una traiettoria: gli esperimenti alla Young dimostrano che una particella emessa da una sorgente e raccolta da un rivelatore “usa” allo stesso tempo *tutti i percorsi possibili, ciascuno con una certa ampiezza*; la probabilità di trovare la particella nel punto di arrivo si ottiene sommando le ampiezze e poi facendo il quadrato del risultato.

In questa somma di ampiezze è essenziale l'intervento delle fasi (le ampiezze sono numeri complessi). Non si può fare a meno di trattare questo punto, ma è da vedere quale sia la strada migliore. Ad es. Feynman [5] usa una rappresentazione grafica dei numeri complessi come vettori nel piano.

Una seconda osservazione va fatta circa l'opportunità di parlare di “onda associata alla particella.” Tutto sommato sarebbe meglio evitarlo, anche se ampiezza e fase sono idee che nel pensiero fisico si associano tradizionalmente ai fenomeni ondulatori. Non parlando affatto di onde associate si evitano i problemi

(o meglio i falsi problemi) connessi al “dualismo onda-corpuscolo.” È questo il motivo per cui in precedenza la parola “ondulatorio” stava sempre tra virgolette, allo scopo di segnalarne un uso non del tutto appropriato.

Quello di cui non si può fare a meno è la variazione della fase lungo il cammino della particella. È abituale chiamare “lunghezza d’onda” la misura del tratto nel quale la fase varia di  $2\pi$ : si potrebbe forse inventare un altro nome, ma non credo che si risolverebbe gran che: resterebbe comunque la necessità di citare, se non altro per ragioni storiche, la relazione di de Broglie nella forma classica.

Per concludere questa parte rimarrebbero tre cose:

- spiegare il comportamento corpuscolare “classico” nelle condizioni macroscopiche;
- spiegare perché un insieme di fotoni si comporta come un’onda, nel senso che si può misurare ampiezza e fase dell’onda, e non solo la sua intensità (ad es. con le tecniche radio);
- mostrare le conseguenze delle nuove idee.

Il primo punto non pone grandi problemi: basta forse osservare che gli effetti d’interferenza per un oggetto macroscopico sono invisibili a causa della piccolissima lunghezza d’onda (questa non è tutta la storia, come vedremo più avanti parlando della relazione d’indeterminazione, ma potrebbe bastare).

Quanto al secondo punto, le cose si complicano: abbiamo a che fare col problema della coerenza nell’emissione indotta e più in generale col fatto che i fotoni sono bosoni. Sarei perciò del parere di non sollevare il problema, oppure di ricorrere alla solita scappatoia: “andando più a fondo, si può dimostrare che . . .” Del resto non mi sembra che ci sia niente di male a ricordare che non si può capire tutto subito.

Al terzo punto è dedicato il discorso che resta.

### 3.4. *La propagazione rettilinea e la relazione d’indeterminazione*

Il problema della propagazione rettilinea consiste in questo: se la propagazione di una particella dalla sorgente al rivelatore si descrive con un’ampiezza, quando gli elettroni (o i fotoni) attraversano un foro quest’ampiezza — e quindi la probabilità di rivelare la particella — non sarà mai nulla, anche in un punto non allineato con la sorgente e il foro. Stando così le cose, come si spiega la propagazione rettilinea?

Naturalmente stiamo scoprendo la diffrazione, solo che dal punto di vista didattico la questione è capovolta rispetto alla presentazione tradizionale: dobbiamo spiegare perché la diffrazione non è un fenomeno dominante in ogni situazione.

La soluzione che mi sento di proporre è di far ricorso anche qui a un calcolatore: ma non a scopo di simulazione, bensì di calcolo numerico. Non è affatto

difficile calcolare l'ampiezza per diverse geometrie, e dimostrare quello che ogni fisico sa: che l'angolo di diffrazione è dell'ordine del rapporto fra lunghezza d'onda e dimensioni del foro. Non solo: si può anche far capire perché questo accade: sommando le ampiezze di propagazione per diversi punti del foro si vede che solo vicino alla propagazione rettilinea le fasi sono pressoché uguali, in modo che le ampiezze si sommano costruttivamente.

Dalla diffrazione attraverso un foro alla relazione d'indeterminazione il passo è breve. Com'è noto, questo è il “cavallo di battaglia” di molta filosofia — specie della cattiva filosofia — e basterebbe questo per essere molto prudenti nel parlarne.

Si sarà osservato l'uso del termine “relazione” al posto del più tradizionale “principio”: ciò allo scopo di mettere in evidenza:

- a) che non si tratta di un postulato indipendente;
- b) che esso ha un significato oggettivo, esprime una proprietà della materia, e non dipende dall'osservatore.

Tutto sommato non credo però che la relazione d'indeterminazione svolga un ruolo utile nella didattica della fisica a questo livello. È perfettamente vero che ancor oggi nella pratica fisica ci si può fare ricorso come scorciatoia per stimare qualche effetto importante: ma per un principiante i rischi di fraintendimenti sono troppo alti rispetto alla sua utilità. Altra cosa sarebbe il suo interesse storico, ma di ciò si è già detto. In conclusione, anche qui vorrei appoggiarmi a Feynman:

“... This is an example of the ‘uncertainty principle’: there is a kind of complementarity between knowledge of where the light goes between the blocks and where it goes afterwards — precise knowledge of both is impossible. I would like to put the uncertainty principle in its historical place: when the revolutionary ideas of quantum physics were first coming out, people still tried to understand them in terms of old-fashioned ideas (such as, light goes in straight lines). But at a certain point the old-fashioned ideas would begin to fail, so a warning was developed that said, in effect, ‘Your old-fashioned ideas are no damn good when ...’ If you get rid of all the old-fashioned ideas and instead use the ideas that I’m explaining in these lectures — adding *arrows* for all the ways an event can happen — there is no need for an uncertainty principle!” [5] (p. 55, nota)

### 3.5. *Gli stati stazionari*

Si può capire la possibilità di stati stazionari studiando la riflessione dei fotoni su due specchi paralleli affacciati. Un fotone può andare da A a B (due punti tra i due specchi) per molte vie: in primo luogo quella diretta, ma poi tutte quelle che comportano una o più riflessioni tra i due specchi.

In generale tutti questi percorsi danno ampiezze sfasate in modo da cancellarsi a vicenda, a meno che lo sfasamento nel percorso di andata e ritorno fra i due specchi non sia multiplo di  $2\pi$ , ciò che equivale a dire che la distanza tra gli specchi è multipla di mezza lunghezza d'onda. Quando questo accade l'ampiezza si mantiene da sé senza bisogno di una sorgente, e abbiamo un moto del fotone che può durare indefinitamente: uno *stato stazionario*.

Quello che è vero per i fotoni è vero per qualsiasi tipo di particella, ad es. per gli elettroni: dunque un elettrone fra due pareti riflettenti (barriere di potenziale) può trovarsi in uno stato stazionario, ma solo per certe lunghezze d'onda, ossia — grazie alla relazione di de Broglie — per certe energie. Abbiamo così ritrovato la quantizzazione dei livelli di energia, in un caso particolare, sulla base della nuova meccanica delle ampiezze.

Non discuterei l'estensione a casi più complicati, ma mi limiterei a indicare che il problema fisico è lo stesso, solo la matematica è più complicata (equazione di Schrödinger). In particolare, non mi sembra il caso di trattare — come talvolta si fa — gli stati stazionari dell'atomo d'Idrogeno come onde stazionarie su un'orbita circolare. L'aspetto che non mi soddisfa è proprio che bisogna partire da un'orbita circolare, e poi imporre la condizione di onda stazionaria *sull'orbita*: il che è alquanto contraddittorio, e può generare confusioni.

### 3.6. *L'interpretazione probabilistica*

È già stata anticipata, ma la discussione degli stati stazionari sul segmento permette di precisarla.

Il ragionamento che ha portato agli stati stazionari fornisce anche l'ampiezza punto per punto, con andamento sinusoidale. Se dunque montiamo un rivelatore di elettroni sul nostro sistema, esso fornirà per ogni singolo caso un risultato determinato; ma se si ripete la misura per diversi elettroni si avrà una distribuzione statistica, secondo una densità di probabilità proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda (si noti che preferisco non usare il termine “funzione d'onda,” che a rigore non significa niente). Questa è la classica interpretazione di Born, nella forma che definirei “ortodossa minima,” perché evita tutte le implicazioni filosofiche.

Ecco ora una domanda: è il caso di notare che la discussione sull'interpretazione della m. q. non si è mai chiusa, ma che fino ad oggi tutte le prove sperimentali hanno dato esito favorevole?

### 3.7. *Lo stato come vettore astratto*

Sarebbe un argomento interessante dal punto di vista epistemologico perché illustra i rapporti tra la realtà fisica e la struttura matematica della teoria, ma non credo che lo si possa affrontare. Lo includo perciò solo per completezza, e per un'eventuale discussione.

I risultati visti richiedono una nuova formulazione matematica dello stato di un sistema; il principio di sovrapposizione suggerisce una struttura lineare

(spazio vettoriale). Tutti i possibili stati di un sistema sono elementi di questo spazio astratto (vettori). L'interpretazione probabilistica si traduce nel dire che una misura fornisce una probabilità che è il quadrato (del modulo) di una componente del vettore di stato.

#### 4. Conseguenze e applicazioni

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

- Usare la relazione d'indeterminazione, se è stata introdotta, per stimare l'energia dello stato fondamentale dell'atomo d'Idrogeno. L'importanza sta nel fatto che si ottiene, a meno di un fattore numerico, la corretta dipendenza dalle costanti fondamentali, ed è forse questo l'argomento più forte che vedo in favore della relazione d'indeterminazione.
- Calcolo analogo per un nucleo (serve a spiegare il “quantum ladder” citato sopra).
- Effetto tunnel (trattato qualitativamente) come conseguenza delle proprietà dell'ampiezza: un'applicazione recente è quella delle reazioni chimiche a bassa temperatura [6]. 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?

Non sarei invece del parere di discutere la struttura degli atomi e il sistema periodico, per molte ragioni: non vedo il modo di 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'apparato della meccanica quantistica). In poche parole: è già spiacevole che molti testi di chimica “strapazzino” tutto l'argomento; non mi pare il caso d'incoraggiare questo costume di dare una serie di precetti incomprensibili, e che non lasceranno alcuna traccia educativa. È però evidente che questo è un grosso problema insoluto.

Per tutto questo capitolo i prerequisiti essenziali mi sembrano quelli sulle onde, soprattutto interferenza e onde stazionarie; non tanto perché siano veramente necessari, quanto perché danno un riferimento di fatti e idee che possono far risparmiare parecchio tempo.

#### Alcuni commenti finali

A parte cose già dette all'inizio circa le scelte, sia di approccio sia di contenuti, che sono ovviamente opinabili, un tema fondamentale di discussione dovrebbe essere quello riassunto nella domanda: quanto tempo ci vuole per fare tutte queste cose?

Sono il primo a rendermi conto che questa proposta è molto estesa, ma al momento non saprei che cosa si possa togliere senza grave danno. Purtroppo

stiamo parlando di almeno 80 anni di fisica, pieni di fatti e d'idee che non si possono riassumere in poche parole. Del resto ho già scelto di fare alcuni tagli di cui non sono affatto contento, ma che erano motivati dall'incapacità di trovare soluzioni che mi soddisfacessero dal punto di vista didattico. Può darsi che un ulteriore lavoro permetta di semplificare un po' o di trovare soluzioni accessibili per qualche tema che è stato sacrificato: tuttavia vorrei che una discussione tenesse ben distinti questi aspetti — in certo modo accessori — dalla valutazione della linea di base.

Un altro tipo di obiezione possibile è che questa proposta sia troppo “difficile.” Qui distinguerei: difficile per gli insegnanti senz'altro, per ragioni che in parte ho spiegate all'inizio, in parte ho esaminato altrove [7]. È per questo che avevo ricordato il problema della preparazione degli insegnanti. Se invece si pensa alla difficoltà per gli allievi, allora vorrei fare qualche esperienza, prima di decidere. Al momento dispongo solo di alcuni indizi, che mi portano a credere che certe difficoltà ci siano più a causa di “incrostazioni culturali” dei docenti che per ragioni di fondo; o quanto meno, che la fisica è tutta difficile, anche quella che ormai ci sembra facile perché ci abbiamo fatto l'abitudine... Ma su questo punto credo di sfondare una porta aperta.

## Bibliografia (con aggiornamenti 1992)

- [1] R. P. Feynman: *Quantum Electrodynamics* (Benjamin 1962)
- [2] R. P. Feynman: *The Theory of Fundamental Processes* (Benjamin 1962)
- [3] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *The Feynman Lectures in Physics* vol. 3 (Addison–Wesley 1965).
- [4] R. P. Feynman, A. R. Hibbs: *Quantum Mechanics and Path Integrals* (McGraw–Hill 1965).
- [5] R. P. Feynman: *Q E D — The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton 1985, trad. ital. Zanichelli).
- [6] V. I. Goldanskij: *Sc. Am.* **254** (1986), 38.
- [7] E. Fabri: *Per un insegnamento moderno della relatività* (Sez. AIF di Lucca e Pisa, 1989).