

## Come introdurre la fisica quantistica nella scuola secondaria superiore

*Elio Fabri*

Dipartimento di Fisica – Università di Pisa

———— o ————

*Bohr used to say that if you aren't  
confused by quantum physics, then  
you haven't really understood it.*

*J. A. Wheeler*

### **Premessa**

In questa nota si presenta una proposta per l'introduzione della fisica quantistica nella s.s.s., seguendo le linee già descritte in [1]. Alla stessa fonte si rimanda il lettore per una discussione delle motivazioni di alcune scelte e per commenti generali, mentre qui ci si vuole concentrare su di una più precisa indicazione di contenuti.

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

La presente proposta differisce dalle linee più tradizionali in primo luogo perché non segue un approccio storico. Per le motivazioni si veda [1]; qui si vuole soltanto sottolineare che rispetto a una (presunta) ricostruzione storica si è scelto di concentrarsi sulla necessità di risolvere (o tentare di risolvere) un problema, che ora esaminiamo brevemente.

È ben noto che la fisica quantistica si caratterizza, agli occhi di chi non vi sia ben addentro, 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 false impressioni,

---

\* La versione 1.0 della presente nota, datata Gennaio 1993, è stata distribuita in occasione di un ciclo di lezioni al Liceo Scientifico “E. Fermi” di Massa. La versione 1.1, datata Ottobre 1993, è stata distribuita al Congresso AIF di Montesilvano (PE). La versione 1.2, datata Dicembre 1993, preparata in occasione del Convegno di Torino del GNDF, era largamente modificata e soprattutto ampliata. Questa versione, preparata dopo un corso di aggiornamento tenuto a Pisa, presenta ulteriori modifiche e ampliamenti.

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*.

Il punto è centrale per ciò che segue, poiché la linea didattica che qui si presenta si basa prima di tutto su questo principio: la fisica quantistica poggia 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.

Per soddisfare le esigenze sopra espresse si è adottata una presentazione che si sviluppa in 4 capitoli:

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

Esamineremo ora in successione i detti capitoli.

## 1. La quantizzazione come fatto

Sembra opportuno iniziare il discorso dal riconoscimento di fatto che esistono due distinte quantizzazioni:

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

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

Su questo tema non sembra necessario discostarsi troppo dalla linea canonica. Partiamo dall'effetto fotoelettrico, presentando in primo luogo il fenomeno nei suoi aspetti qualitativi: esistenza di una soglia, influenza dell'intensità della luce sul numero degli elettroni emessi. Si passerà poi agli aspetti quantitativi: l'effetto si presenta anche con luce molto debole (la corrente prodotta è proporzionale all'intensità della luce) e senza apprezzabile ritardo; invece l'energia dei fotoelettroni dipende solo dal colore (lunghezza d'onda) della luce.

A questo punto si potrà già osservare che i fatti sperimentali da un lato sono del tutto incompatibili con un modello ondulatorio della luce, secondo la teoria di Maxwell, mentre dall'altro si spiegano perfettamente assumendo, con Einstein, che la radiazione e.m. consiste di *quanti* (di grandezza proporzionale alla frequenza della radiazione, ma questo non può essere asserito finché non si mostra la relazione fra energia di soglia e frequenza).

Conviene rinforzare l'interpretazione corpuscolare mostrando il comportamento di un fotomoltiplicatore (FM), con luce intensa e con luce debole: nel

primo caso si ottiene una corrente costante, di grandezza proporzionale all'intensità della luce; nel secondo si vede l'arrivo dei singoli fotoni, e si capisce che la corrente costante è solo un effetto statistico, dovuto al gran numero di fotoni. Se si ritiene difficile un esperimento con FM, ci si può appoggiare sul film "I fotoni" del PSSC.

Nell'interpretazione corpuscolare della radiazione e.m. l'intensità della radiazione dà dunque una misura del numero di fotoni che incidono sul rivelatore (per unità di tempo e di superficie). Si vede anche che l'arrivo di questa "pioggia" di fotoni ha carattere *casuale*: come abbiamo già detto 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*. Torneremo più avanti su questo punto.

Di solito si usa l'effetto fotoelettrico per introdurre la natura corpuscolare della radiazione e il "dualismo onda-corpuscolo." Purtroppo questo dualismo è un esempio tipico di quelle cose che vanno contro il senso comune, cui si faceva riferimento all'inizio. Sembra perciò più opportuno prendere un'altra strada: 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) *non consiste di onde, bensì di particelle*. Si veda Feynman:

"Voglio sottolineare che la luce si presenta in forma di particelle. È molto importante sapere che la luce si comporta come particelle, specialmente per quelli tra voi che a scuola hanno sentito parlare di una luce che si comporta come onde. Io vi dico qual è il vero comportamento della luce: particelle.

"Potreste dirmi che è il FM che vede la luce come fatta di particelle; ma non è così: qualsiasi strumento abbastanza sensibile per rivelare una luce molto debole ha sempre fornito lo stesso risultato: la luce è fatta di particelle." ([2], p. 15; trad. del presente autore)

Incontreremo ancora più avanti il riferimento a Feynman: infatti l'approccio che abbiamo scelto di seguire, in quanto lo riteniamo più soddisfacente di altri, è dovuto a questo autore, che lo ha presentato in numerosi scritti, a diversi livelli [3], [4], [5], [6].

Osserviamo che Einstein arriva all'idea dei quanti di luce con un'argomentazione assai complessa, nella quale il ruolo centrale non è giocato dall'effetto fotoelettrico, bensì da considerazioni strettamente teoriche, circa i rapporti tra le leggi della termodinamica e dell'elettromagnetismo da un lato, e i dati sperimentali sulla radiazione di corpo nero *ad alte frequenze* (limite di Wien) dall'altro. L'effetto fotoelettrico, insieme ad altri fatti sperimentali, è usato da Einstein come verifica che l'ipotesi proposta è in accordo con gli esperimenti, ossia che ha un buon potere predittivo [7]. Abbiamo qui un esempio di quanto sia difficile

proporre una ricostruzione storica a fini didattici. Comunque ecco ciò che scrive Einstein nell'articolo citato:

“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 od emessi parzialmente.”

Per quanto ci concerne, si può forse ritenere insufficiente l'effetto fotoelettrico come fondamento del carattere corpuscolare della radiazione e.m.: in tal caso si potrà ricorrere, a titolo di rafforzamento dell'idea, all'effetto Compton e all'esperimento di Compton e Simon. A tale scopo sarebbe però necessario introdurre diversi altri argomenti: la diffusione della radiazione e.m., forse i raggi X, la camera di Wilson come rivelatore di particelle cariche, l'impulso della radiazione. Lasciamo per ora impregiudicata, in attesa di uno studio più approfondito, l'opportunità di seguire questa strada.

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.

Riteniamo invece opportuno lasciare da parte il problema del corpo nero, anche se storicamente è stato il punto di partenza. Infatti nella scuola secondaria non è possibile proporre neppure la natura del problema, che richiede potenti astrazioni, a cominciare dalla stessa applicazione della termodinamica alla radiazione.

[...]

#### 1.4. *Alcuni commenti*

Nel discorso che precede abbiamo nominato le relazioni di Einstein e di Bohr, che legano energia (dei fotoni o dei livelli atomici) e frequenza della radiazione e.m.; allo stesso tempo abbiamo affermato che la radiazione e.m. è fatta di fotoni. Con questo non siamo caduti in contraddizione? Ovvero: non abbiamo fatto rientrare dalla finestra il dualismo onda-corpuscolo, che credevamo di avere scacciato dalla porta?

Non c'è dubbio che frequenza e lunghezza d'onda sono concetti che storicamente nascono dalla fisica dei moti ondulatori, e che vengono applicati alla luce in quanto per essa si ritiene adatto un modello ondulatorio. Per di più queste grandezze sono accessibili a misura diretta (per la luce, fino a tempi recenti, solo la lunghezza d'onda, ma per altri tipi di onde e.m. entrambe). Sarebbe però

un passaggio logico non giustificato asserire che tutte le volte che si può parlare di lunghezza d'onda ci si trova necessariamente in presenza di un fenomeno ondulatorio: vedremo più avanti che in effetti ha senso attribuire una "lunghezza d'onda" ai fotoni, senza per questo essere costretti a parlare di onde.

Al momento basterà osservare che possiamo misurare (se si preferisce, dare una definizione operativa) della lunghezza d'onda della luce (interferenza, reticoli) e insieme dell'energia dei fotoni (effetto fotoelettrico): la relazione di Einstein, scritta in termini di lunghezza d'onda, ha dunque una precisa base sperimentale.

Un'obiezione che riguarda non il presente approccio, ma la stessa storia dell'idea di quantizzazione, è la seguente (reale: è stata fatta da un'insegnante). Abbiamo detto che esperimenti come quello di Franck e Hertz mostrano che l'estrapolazione della meccanica newtoniana alla scala atomica è illecita: tuttavia nel discutere gli esperimenti facciamo uso della conservazione dell'energia, principio che trae la sua origine dalla fisica newtoniana. Non è questa una contraddizione?

Risposta: ovviamente siamo in contraddizione se guardiamo alla situazione con gli occhi della logica deduttiva. Ma questa è un'ottica sbagliata: siamo nella fase storica in cui stiamo scoprendo qualcosa di nuovo, e sappiamo che le vecchie idee non sono più certe. In tali situazioni i fisici (e gli scienziati in generale) non sono soliti buttare a mare tutto quello che hanno accettato fino allora, ma procedono per congetture, o ipotesi di lavoro se si preferisce: scelgono dal repertorio di concetti, leggi, principi quelli su cui ritengono — per qualsiasi ragione — di poter fare più affidamento, e provano ad andare avanti. Come sempre, è solo il successo del tentativo che ne dà la giustificazione *a posteriori*.

Nel caso specifico, la conservazione dell'energia appariva qualcosa di più fondamentale (si ricordi anche la termodinamica) che non la descrizione dettagliata delle interazioni e delle leggi del moto; per questo si è scelto di salvarla dalla crisi della fisica classica. Pochi anni dopo, la scoperta dell'effetto Compton rimise in discussione tale ipotesi, che venne in seguito confermata dalla verifica diretta (Compton e Simon) che l'energia perduta dal fotone era acquistata dall'elettrone, in un normale urto elastico relativistico.

Commento a un altro livello: il fatto che un'obiezione del genere venga avanzata è di per sé sintomatico: prova che anche agli insegnanti riesce difficile vedere la fisica come una scienza non sistemata assiomaticamente una volta per tutte, ma in continua trasformazione (magari più acuta e veloce nei momenti cosiddetti di "crisi," come quello di cui stiamo parlando). Sarebbe invece assai importante che tale carattere della costruzione della fisica venisse evidenziato anche in altre occasioni e in relazione ad altri argomenti, per evitare di dare una falsa impressione: che la nascita della fisica quantistica sia caratterizzata da una situazione di "crisi logica" senza precedenti.

A proposito di crisi, è ancora aperta la discussione se sia o no corretto parlare di crisi per la transizione, avvenuta agli inizi di questo secolo, dalla fisica classica a quella quantistica (ecco perché le virgolette, poco sopra). Si discute anche se ci si possa riferire alla transizione come a un cambiamento di paradigma, alla Kuhn. C'è chi sostiene, con buona ragione, che in realtà gli elementi di crisi erano già presenti da tempo, e la soluzione è arrivata per passi graduali, col contributo di molti progressi teorici e sperimentali. Per accennare un unico esempio, era certamente già noto a Maxwell che la meccanica statistica classica non dava un'interpretazione del tutto soddisfacente dei calori specifici dei gas.

A parere di chi scrive, la risposta alla seconda questione è affermativa: ci sono infatti sia le “anomalie” (come quella già citata dei calori specifici, quella ancor più nota della radiazione nera, e lo stesso effetto fotoelettrico) sia il cambiamento di punto di vista, di problemi rilevanti e di fenomeni considerati cruciali, che caratterizzano appunto la situazione che Kuhn descrive come “cambiamento di paradigma.” Basti pensare, anche qui con solo esempio, al più volte citato lavoro di Einstein sulla natura quantistica della radiazione.

## 2. Statistica dei sistemi quantizzati

Una presentazione della fisica quantistica non può prescindere dagli aspetti statistici, ossia 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.

[...]

### 2.1. La distribuzione di Boltzmann per livelli discreti

[...]

Nota storica: la deduzione di Boltzmann è di molto anteriore alla scoperta della quantizzazione, ed era perciò intesa per distribuzioni *continue* di energia, sia relativa ai moti d'insieme (traslatori) degli atomi o molecole di un gas, sia ai moti interni. È assai notevole che la stessa legge di distribuzione resti valida anche in presenza di quantizzazione: ciò dipende dal fatto che la distribuzione di Boltzmann è quella di *massima probabilità* per un dato numero di atomi e una data energia totale: la massima probabilità si ottiene nelle stesse condizioni, tanto se lo spettro delle energie è discreto, quanto se è continuo.

### 2.2. Introduzione statistica alla temperatura

Sarà apparso evidente un punto debole del discorso che precede: abbiamo parlato di temperatura in un contesto statistico, senza alcuna giustificazione. In effetti si apre qui un problema dell'insegnamento della fisica moderna: è *assolutamente indispensabile che vi siano inclusi argomenti di fisica statistica*. (Non

sembra che ciò fosse presente alla Commissione Brocca per il triennio, visto che questa parte della fisica è assente dai programmi della più parte degli indirizzi, ed è sostanzialmente facoltativa per l'indirizzo scientifico-tecnologico.) Ci porterebbe troppo fuori strada affrontare la questione: accenniamo solo che si può ricorrere ancora una volta a una simulazione per far comprendere il legame fra energia media e temperatura nel caso semplice dei gas perfetti monoatomici.

Osserviamo di passaggio che tutto l'argomento della fisica statistica ha a monte un prerequisito: la comprensione *fisica* dei fenomeni casuali. La sottolineatura vuole distinguere ciò che occorre da una trattazione astrattamente matematica: è necessario acquisire un "feeling" di che cosa significa casuale, della relazione fra entità delle fluttuazioni e numero degli eventi (componenti del sistema, numero di misure, ecc.)

### 2.3. Applicazioni

[...]

In maniera analoga si spiega la dipendenza della velocità di una reazione chimica dalla temperatura, fenomeno di grande importanza sia nella chimica industriale sia nella biologia. Basta introdurre l'energia di attivazione: la minima energia necessaria perché due atomi o molecole possano entrare in contatto e dar luogo alla reazione. La velocità di reazione è proporzionale alla frazione di atomi che hanno energia superiore all'energia di attivazione, e questa frazione dipende dalla temperatura sempre secondo la legge di Boltzmann. Ne segue che la velocità della reazione (da non confondere con l'equilibrio) cresce molto con la temperatura, tanto che reazioni pressoché impossibili ("congelate") a temperatura ambiente avvengono velocemente a temperature superiori.

[...]

## 3. Leggi di propagazione

[...]

### 3.1. Esperimenti con il FM

[...]

Un breve commento a carattere sperimentale: è didatticamente più efficace presentare gli esperimenti per mezzo di FM e di sorgenti a bassa intensità, perché così resta sempre ben fermo che il comportamento "strano" è dei singoli fotoni. Però gli esperimenti fatti in questo modo sono tutt'altro che semplici, ed è molto probabile che ci si debba ridurre a descriverli come esperimenti ideali (a meno che non si riesca a preparare qualche sussidio su film o videocassetta che presenti

un esperimento vero). Volendo dare al discorso una base sperimentale concreta, si potrà ricordare che se si usa luce più intensa e un rivelatore lineare (ad es. un fototransistor) si conta ugualmente il numero di fotoni attraverso la corrente. Ciò posto, ci si riconduce a eseguire classici esperimenti d'interferenza, oggi assai facili usando come sorgente un laser.

Gli esperimenti d'interferenza su lastra hanno lo scopo di mettere in evidenza, in una situazione piuttosto semplice e vicina a quelle della vita quotidiana, il comportamento “strano” dei fotoni. Per arrivare a un tentativo d'interpretazione teorica occorre però prendere un'altra strada.

[...]

### 3.5. *Il calcolo delle ampiezze*

[...]

Prima di proseguire il discorso sono opportuni alcuni commenti. Sebbene ampiezza e fase siano idee che nel pensiero fisico si associano tradizionalmente ai fenomeni ondulatori, è meglio non parlare di “onda associata alla particella.” 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. Del resto le espressioni virgolettate in questo capoverso possono essere viste più che altro come residui storici; basti pensare che 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.”

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 si risolverebbe gran che: resterebbe comunque la necessità di citare, se non altro per ragioni storiche, la relazione di de Broglie nella forma classica.

[...]

### 3.6. *La propagazione rettilinea e la relazione d'indeterminazione*

[...]

Dalla diffrazione attraverso un foro alla relazione d'indeterminazione il passo è breve. Com'è noto, siamo sul terreno d'elezione di molte speculazioni filosofiche, 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.

(Non è forse inutile osservare che il termine “indeterminazione” si è affermato solo in italiano: il termine originario di Heisenberg era “Unsicherheit,” che in inglese è divenuto “uncertainty,” e in francese “incertitude”; parole tutte che si traducono “incertezza.”)

È ben noto il ruolo centrale che la relazione d'indeterminazione ha avuto nella storia della meccanica quantistica e nelle discussioni sulla sua interpretazione. Inoltre è vero che ancor oggi nella pratica fisica ci si può fare ricorso come scorciatoia per stimare qualche effetto importante. Tuttavia per un principiante i rischi di fraintendimenti sono troppo alti rispetto alla sua utilità. Citando di nuovo Feynman:

“... Questo è un esempio del ‘principio d'indeterminazione’: c'è una specie di complementarità fra la conoscenza del punto preciso in cui la luce attraversa il foro e quella della direzione in cui esce: è impossibile conoscerle esattamente entrambe. Desidero però porre il principio d'indeterminazione nella sua posizione storica: al tempo in cui le idee rivoluzionarie della fisica quantistica stavano sorgendo, gli scienziati cercavano ancora di comprenderle sulla base di idee antiquate (come quella che la luce viaggia in linea retta). Ma a un certo punto dei ragionamenti le vecchie idee finivano per cadere in difetto; fu allora escogitato un avvertimento che in pratica suonava così: ‘Le tue vecchie idee non funzionano quando ...’ Se però vi liberate del tutto delle vecchie idee, e al loro posto usate quelle che vi sto spiegando (che bisogna sommare le *freccette* per tutti i possibili modi in cui un evento può accadere) non c'è alcun bisogno del principio d'indeterminazione!”  
 ([2] p. 55, nota; trad. del presente autore)

In conclusione, tutto quello che si può ottenere dalla relazione d'indeterminazione si può ottenere più chiaramente per altre vie. Quanto al suo valore epistemologico, sembra meglio non esagerarlo: il punto centrale della meccanica quantistica non sta tanto lì, quanto nel “calcolo delle ampiezze.”

Si trova continuamente scritto, anche da parte di fisici, che la relazione d'indeterminazione mostra che “la nostra conoscenza della natura è fondamentalmente limitata: appena ne afferriamo una parte, un'altra ci scappa tra le dita.” [9] Sembra però più corretto asserire che la descrizione newtoniana, secondo la quale lo stato di ogni corpo è definito dalla conoscenza della sua posizione e della sua velocità, ha validità approssimata, ed è praticamente utilizzabile solo su scala macroscopica. Nell'ambito microscopico invece la definizione di stato è diversa, e non permette la conoscenza simultanea di posizione e velocità. In questo non c'è niente di preoccupante, dal momento che la conoscenza dello stato quantistico permette ugualmente lo sviluppo della teoria, la previsione di

fatti sperimentali, ecc. Altro discorso è quello sulla necessità che alcune previsioni abbiano carattere probabilistico: ciò non ha direttamente a che fare con la relazione d'indeterminazione.

[...]

### 3.9. *Rapporti con l'elettromagnetismo classico*

Non è possibile eludere del tutto un problema: in molte situazioni sperimentali la radiazione e.m. è descritta adeguatamente dalla teoria di Maxwell, che attribuisce significato ai campi elettrico e magnetico e alla propagazione di quei campi per onde. È un fatto che si può misurare ampiezza e fase di tali onde, e non solo la loro intensità: ad es. questo accade, nell'ambito delle tecniche radio, quando si osserva con un oscilloscopio la corrente indotta da un'onda e.m. in un'opportuna antenna.

Se si guardano i dati quantitativi, si scopre che in tali situazioni si ha sempre a che fare con numeri assai grandi di fotoni: perciò il comportamento ondulatorio classico risulta una *proprietà dell'insieme di molti fotoni*, e non del singolo fotone.

È per questo motivo che non appare corretto asserire, come talvolta si legge, che il campo e.m. vada considerato come la “funzione d'onda” del fotone. A tale interpretazione si oppongono difficoltà profonde — connesse col problema di dare una definizione corretta di funzione d'onda per particelle di massa nulla e spin 1, come sono i fotoni — che non sarebbe possibile neppure accennare al livello di approfondimento tecnico di cui qui si tratta; ma soprattutto c'è il fatto essenziale che il campo e.m. ha caratteri di “osservabilità” che non sono propri di una funzione d'onda.

Dunque le cose si complicano: abbiamo qui a che fare con fenomeni come la coerenza nell'emissione indotta, e più in generale col fatto che i fotoni sono bosoni. In sostanza, la connessione fra la meccanica quantistica della singola particella fotone e la teoria e.m. classica si realizza solo nell'ambito di una teoria quantistica del campo e.m., ossia a un livello molto superiore a quello di cui qui ci si sta occupando. Appare perciò consigliabile non sollevare il problema, e alla peggio ricorrere alla solita scappatoia: “andando più a fondo, si può dimostrare che ...” Del resto non c'è niente di male a ricordare che non si può capire tutto subito.

## 4. **Conseguenze, applicazioni, problemi aperti**

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 precetti 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 regolette 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.

Al momento non vedo di meglio che segnalare il problema come oggetto di ricerca, osservando però che occorrerebbe anzitutto chiarezza sugli obiettivi. Infatti sia la maggiore o minore urgenza di affrontare certi argomenti, sia la maggiore o minore accettazione di regole poco comprensibili, dipendono in larga misura da ciò che ci si propone come obiettivo dell'insegnamento della fisica quantistica.

Schematizzando due visioni estreme, abbiamo da un lato un obiettivo “applicativo,” dove non conta tanto la comprensione di base, quanto il possesso di alcune nozioni (o forse solo di un vocabolario) su cui sia possibile poggiare un bagaglio di conoscenze tecniche. Dall'altro c'è invece l'enfasi sulla fisica moderna come contributo a una diversa visione del mondo, nell'ambito scientifico ma non solo; e allora la quantità delle nozioni passa in secondo piano rispetto alla solidità dei concetti di fondo. È chiaro che in questo modo ho rappresentato l'attuale dicotomia di obiettivi fra “istituti tecnici” e “licei.” Il fatto che nella scuola futura tale dicotomia dovrebbe (?) scomparire, in favore di un'“integralità” della formazione (il termine è preso dalle premesse ai programmi Brocca del triennio) rende solo più grave il problema: non lo si potrà più risolvere nella pratica

tenendo distinte e non comunicanti le due strade, ma si dovrà farle incontrare, e non sembra che la soluzione sia a portata di mano.

## Prerequisiti

L'introduzione di un importante tema, come la fisica quantistica, nell'insegnamento secondario, non può avvenire per semplice aggiunta: tutto il curriculum di fisica, sia come contenuti sia come approccio, ne viene influenzato. Poiché sarebbe troppo lungo discutere a fondo il problema, per il quale del resto non sono ancora disponibili soluzioni certe, ci limitiamo a un aspetto semplificato: quello dei prerequisiti. Elenchiamo pertanto qui di seguito quelli che appaiono i prerequisiti minimi per una trattazione della fisica quantistica secondo la linea qui proposta. È doveroso avvertire che l'elenco è probabilmente incompleto.

*Per 1.1:* Dovranno essere state premesse le idee sulla struttura atomica (elettroni, modello di Rutherford, ordine di grandezza delle dimensioni). Occorre inoltre aver trattato il modello atomico dei gas, le unità di misura in uso nell'argomento, l'energia meccanica ed elettrostatica, la quantizzazione della carica.

*Per 1.2:* Oltre a gran parte dei temi precedenti, c'è bisogno delle onde e.m. e della natura e.m. della luce; degli aspetti energetici. Sarà pure utile una qualche conoscenza di circuiti elettrici e relativi strumenti di misura.

*Per 1.3:* Gas, atomi e ioni; analisi spettrale, spettri di righe.

*Per 2:* Concetto di probabilità, fluttuazioni statistiche, teoria cinetica dei gas, calori specifici, equipartizione dell'energia all'equilibrio.

*Per 3:* Per tutto questo capitolo i prerequisiti essenziali stanno nella fisica delle 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.

## Bibliografia

- [1] E. Fabri: *La Fisica Quantistica nella Scuola Secondaria: proposte e problemi*; Atti del VI Convegno del GNDF, 99 (1988).
- [2] R. P. Feynman: *Q E D — The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton 1985, trad. ital. Adelphi).
- [3] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *The Feynman Lectures in Physics* vol. 3 (Addison–Wesley 1965).
- [4] R. P. Feynman: *Quantum Electrodynamics* (Benjamin 1962).
- [5] R. P. Feynman: *The Theory of Fundamental Processes* (Benjamin 1962).
- [6] R. P. Feynman, A. R. Hibbs: *Quantum Mechanics and Path Integrals* (McGraw–Hill 1965).
- [7] A. Einstein, *Ann. d. Physik* **17**, 549 (1905); trad. ital. in *La teoria dei quanti di luce* (a cura di A. Hermann), (Newton Compton 1975).
- [8] P. G. Merli, G. F. Missiroli, G. Pozzi, *Giornale di Fisica* **17**, 83 (1976).
- [9] J. Horgan: *Sc. Am.* **267**, n. 1, 72 (1992).
- [10] R. Y. Chiao, P. G. Kwiat, A. M. Steinberg: *Sc. Am.* **269**, n. 2, 38 (1993).
- [11] V. I. Goldanskij: *Sc. Am.* **254**, n. 2, 38 (1986).