

Possibile introduzione di modelli quantomeccanici a livello di scuola secondaria superiore.

Avvicinamento al concetto di orbitale - Parte II

Roberto Soldà
roberto.solda@libero.it

Riassunto

Dopo che nella prima parte del presente articolo sono state discusse le difficoltà e le opportunità che si possono incontrare nell'affrontare gli aspetti fondamentali della meccanica quantistica a livello di insegnamento secondario, nella presente, seconda parte viene proposto un possibile approccio sperimentale, a partire da concetti fisici di base ed esperimenti relativamente semplici alla portata di qualsiasi scuola che sia dotata di attrezzature elementari o comunque facilmente reperibili. L'articolo si propone di aprire la strada per un approccio al concetto di orbitale.

1. Premessa

Alcuni anni fa in questa rivista, si è osservato[1] che il concetto scientifico d'orbitale viene presentato, nei testi di chimica per la scuola media superiore ed anche in quelli universitari, secondo due opposte visioni:

- come una cosa “molto reale”, un ente materiale, cioè la regione di spazio in cui la probabilità di trovare l'elettrone è uguale ad un numero fissato (per esempio il 99%);

- o come una cosa “molto astratta”, una specie di ente matematico detto funzione d'onda.

Questi due modi di vedere portano a confondere il concetto di orbitale:

- con la sua rappresentazione “spaziale” (ad esempio, a quest'idea “spaziale” dell'orbitale è collegato l'errore apparso in un articolo riportato in un'importante rivista scientifica ove si è affermato di aver visto “l'orbitale” invece della “densità di carica”);

- con la relazione matematica che lo descrive, cioè con la funzione d'onda.

Infatti, come è stato sottolineato da Villani, la definizione di orbitale è intermedia tra le due opposte concezioni, in quanto l'orbitale “non è né un ente materiale né un ente matematico, ma un ente astratto che descrive scientificamente lo stato dinamico stazionario possibile o reale di uno o due elettroni in un atomo, secondo la teoria della meccanica quantistica”.

E proprio perché ad ogni orbitale è associata una distribuzione di probabilità reale, interpretata come nuvola di probabilità elettronica, si può dire che: “...gli orbitali sono reali nel senso che al sistema elettronico di un atomo si può associare un insieme di orbitali che consentono di dare una descrizione relativamente semplice e sufficientemente accurata dello stato elettronico globale dell'atomo stesso”. [2]

Pertanto l'itinerario didattico proposto in questo articolo ha come scopo principale di condurre gli allievi a ricostruire i fondamenti della meccanica quantistica, evitando il rischio della confusione accennata sopra e, nello stesso tempo, aiutandoli a formularla come sintesi concettuale con un significato culturale e non come insieme di parole da memorizzare.

2. Obiettivi specifici

a) Fare acquisire agli allievi:

- il comportamento ondulatorio degli elettroni, cioè che gli elettroni si comportano come se fossero “guidati” da un'onda;

- il significato da attribuire all'ampiezza di questa onda e al “tipo” di onda, ossia che l'ampiezza dell'onda associata all'elettrone è **un'ampiezza di probabilità** e l'onda è **un'onda di probabilità** fondamentale in prospettiva per la distinzione fra “**nuvola di probabilità elettronica**” e **orbitale**;

- la relazione di indeterminazione, come conseguenza del comportamento ondulatorio degli elettroni.

b) Aiutare gli allievi a “costruire” la definizione di orbitale, proponendola come problem solving e riconducendo tale problema a quello, familiare ai ragazzi, delle onde di risonanza, stazionarie.

c) fornire a tutti gli studenti un'informazione delle grandi idee della meccanica quantistica e, in particolare, di come si possono applicare gli strumenti concettuali di tale teoria agli elettroni nell'atomo.

3. Prerequisiti.

Per poter conseguire i suddetti obiettivi è necessario che gli allievi conoscano

- i modelli atomici di Thomson, di Rutherford e di Bohr e oltre al modello atomico a gusci;

- i concetti più elementari relativi alla probabilità e alla statistica;
- i concetti basilari e le grandezze fondamentali relative ai fenomeni ondulatori e alla luce;
- i fenomeni dell'interferenza e della diffrazione;
- le nozioni elementari sull'elettricità e sul magnetismo;
- il significato dei termini: sistema, stato di un sistema, grandezze determinate e indeterminate;
- sapere assemblare un semplice circuito elettrico e utilizzare un tester per misure di voltaggio e intensità di corrente.

Inoltre gli allievi dovrebbero padroneggiare, seppure in modo elementare, i concetti relativi a:

- natura corpuscolare delle radiazioni elettromagnetiche e il concetto di spin elettronico ricavati attraverso l'osservazione di esperienze spettroscopiche.

In ogni caso prima di iniziare l'introduzione alla meccanica quantistica è necessario verificare ed eventualmente ricostruire i suddetti concetti.

Inoltre è importante sottolineare che sperimentare con un fascio di elettroni equivale ad eseguire un grande numero di misure e che, in tali condizioni, come con i sistemi costituiti da un numero molto elevato di elementi, assume importanza la statistica e, appunto, il concetto di probabilità.

Infine per conseguire l'obiettivo più ambito e cioè condurre gli allievi a dare la definizione di orbitale, è necessario anche richiamare ed approfondire adeguatamente i concetti di sistema, stato di un sistema fisico e di grandezze determinate e indeterminate.

Per il concetto di **sistema fisico**, si può fare riferimento, ad esempio, alle conoscenze dei ragazzi relativamente al concetto di sistema, come porzione di materia che s'intende studiare.

E, per il **concetto di stato di un sistema fisico**, si può ricorrere alla definizione di stato di un gas, come situazione o condizione caratterizzata dai valori di un insieme di grandezze fisiche.

Mentre, per fare comprendere ai ragazzi il significato del termine **indeterminato**, si può fare ricorso alle loro conoscenze di matematica, facendo l'esempio del quoziente indeterminato nel caso di una divisione, in cui dividendo e divisore sono entrambi uguali a zero.

Se consideriamo una grandezza indeterminata A, allora uno stato fisico generico "contiene" qualsiasi valore di A, ossia tutte le possibilità relative ai valori che tale grandezza può avere.

4. Sequenza operativa.

Affinché l'apprendimento sia significativo, esso deve avvenire non in modo dogmatico bensì, anche in questo caso, mediante un approccio sperimentale-induttivo e lavoro di gruppo.

Premesso ciò, il comportamento ondulatorio degli elettroni, la relazione fra l'ampiezza di probabilità e la probabilità e la definizione del concetto di orbitale potrebbero essere appresi dai ragazzi, sulla base di facili esperimenti uguali o simili a quelli qui indicati e seguendo la sequenza: interferenza della luce, effetto fotoelettrico e simulazione dell'interferenza degli elettroni al PC.

A titolo di esempio, di seguito viene riportata tale sequenza con alcune considerazioni.

> **Interferenza della luce** ottenuta, con luce laser (una livella o una penna laser, reperibili facilmente in commercio) attraverso una doppia fenditura su cartoncino (due fenditure ottenute per interposizione di un filo di cotone in una fessura di un cm).

Dopo l'esperimento, si forniscono agli allievi una figura con le frange d'interferenza e il grafico dell'intensità corrispondente.

I ragazzi, osservando e confrontando il grafico dell'intensità con quello corrispondente delle frange chiare e scure d'interferenza, concludono che un raggio luminoso è tanto più intenso quanto maggiore è l'ampiezza della vibrazione del campo elettromagnetico. L'insegnante, durante la discussione, può eventualmente fare notare che, come l'intensità del suono di un violino dipende dall'ampiezza della vibrazione della corda, così in termini classici (onda), l'intensità della luce dipende dall'ampiezza della vibrazione. E può precisare che, se l'ampiezza di un'onda luminosa viene raddoppiata, la sua intensità si quadruplica (il raggio diventa quattro volte più luminoso), adducendo l'esempio dell'area di un quadrato che quadruplica se si raddoppia il lato.

Si può concludere quindi che l'intensità è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda elettromagnetica (altezza dallo zero delle creste dell'onda). Cioè: $I = K \cdot (A)^2$.

> **Effetto fotoelettrico**, mediante misura di intensità di corrente (tester usato come amperometro) ottenuta per effetto fotoelettrico con una fotocellula o meglio con un fotodiodo, più facilmente reperibile nei negozi di surplus elettronici.

In questo modo si può introdurre sperimentalmente:

1- la natura corpuscolare della luce (fotoni). Si fa quindi osservare che l'intensità della luce è proporzionale alla densità dei fotoni (nel caso dell'interferenza con la doppia fenditura l'intensità è proporzionale al numero di fotoni per unità di superficie e di tempo).

Avvicinamento al concetto di orbitale – Parte II

Ma, in termini quantistici (fotoni), l'intensità nell'intorno di quel dato punto, è una misura della probabilità che un singolo fotone si trovi in quel punto ovvero:

$$\text{Intensità} = \text{Probabilità}$$

(Intuitivamente è facile comprendere che dove vi è un'intensità elevata, vi è anche una probabilità proporzionalmente elevata di presenza di un fotone; viceversa, dove c'è un'intensità modesta, vi è una probabilità proporzionalmente piccola di presenza di un fotone).

Quindi, tramite la relazione precedente, si ha che, in generale, si può dedurre che: la probabilità di trovare un fotone in un certo punto dello spazio è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda elettromagnetica, ossia:

$$P = K \cdot (A)^2$$

2- il metodo di determinazione dei livelli energetici dell'atomo non perturbato mediante la spettroscopia fotoelettronica basata sull'effetto fotoelettrico (facoltativo).

> *Simulazione al PC dell'esperimento relativo all'interferenza degli elettroni.*

Dopo avere effettuato l'esperimento ed avere osservato che la figura d'interferenza viene ottenuta anche usando un fascio di elettroni di intensità così debole da avere un solo elettrone per volta in volo dalla sorgente verso il rivelatore, i ragazzi comprendono che **ogni elettrone singolo** (come le altre particelle microscopiche, a differenza dei corpi con massa più rilevante e a parità di condizioni sperimentali) si comporta, ad esempio nel volo dalla sorgente verso il rivelatore nell'esperimento alla Young, inequivocabilmente come onda.

Inoltre, mettendo a loro disposizione le opportune figure, dall'osservazione delle figure delle frange d'interferenza e d'intensità degli elettroni e dal confronto con quelle corrispondenti della luce, gli allievi deducono facilmente che anche per gli elettroni vale:

$$P = K \cdot (A)^2$$

Ovvero: **la probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto dello spazio è proporzionale al quadrato dell'ampiezza d'onda elettronica.**

A questo punto, tramite domande ed esercizi proposti nella scheda di laboratorio o durante la discussione, gli allievi si rendono conto abbastanza facilmente che il comportamento ondulatorio esclude la conoscenza dell'esatta posizione di un elettrone (o di qualsiasi altra particella microscopica) e hanno la consapevolezza che si deve dire non dove è, ma dove è probabile che si trovi una particella.

Discussione:

- viene messa in crisi la natura corpuscolare degli elettroni e il modello atomico proposto da Bohr; l'interferenza degli elettroni evidenzia il comportamento ondulatorio degli elettroni e della materia e conferma l'ipotesi di De Broglie e il principio d'indeterminazione di Heisenberg.

- si osserva la differenza fra onde dell'acqua, acustiche, di una corda (onde che si propagano in un mezzo) e onde della luce e degli elettroni (onde che non si propagano in un mezzo).

Quindi, sulla base delle risposte fornite dai ragazzi relativamente alle domande e agli esercizi proposti, si può giustificare la relazione:

$$\text{Probabilità} = K \cdot A^2$$

anche per l'ampiezza delle onde associate agli elettroni.

E in questo modo sono abbastanza comprensibili l'onda di probabilità e l'ampiezza di un'onda di probabilità.

In particolare, per quanto riguarda il concetto di funzione d'onda, il suo comportamento come ampiezza di probabilità di un'onda e il riferimento all'equazione di Schroedinger e alle funzioni d'onda (come soluzioni di tale equazione), si possono "sfruttare" anche le conoscenze elementari di fisica e matematica in possesso dei ragazzi, definite dal prof. Paoloni *cognizioni presupposte*. [3]

Infatti gli allievi hanno acquisito, in fisica, il concetto di equazione per il moto dei "corpi" e, in matematica, i concetti di: soluzione/i di un'equazione, funzione e rappresentazione grafica di una funzione. Conoscono fin dalla scuola media, ad esempio, le funzioni di proporzionalità diretta, inversa e quadratica, le loro espressioni matematiche ed i relativi grafici.

> **Analisi dei risultati e discussione sulla relazione di indeterminazione.**

Poiché, come è noto, dal comportamento ondulatorio deriva anche la relazione d'indeterminazione, è possibile affrontare a livello elementare il discorso su tale relazione facendo ricorso alla relazione di proporzionalità inversa e ad alcuni concetti fisici elementari.

È abbastanza comprensibile che se un'onda elettronica ha lunghezza d'onda definita, cioè una quantità di moto perfettamente fissa, essa deve essere infinitamente estesa e perciò la particella deve avere una posizione completamente indeterminata. D'altra parte, se si vuole fissare la posizione, quanto più la posizione diventa strettamente definita (quanto più ristretto il pacchetto d'onda in cui l'ampiezza oscilla) tanto più la quantità di moto risulta indistinta. In questo modo ne deriva che, indicando con Δx l'incertezza che accompagna la misura di posizione e con $\Delta(mv)$ l'incertezza nella misura della quantità di moto, se si cerca di ottenere la

minima incertezza nella misura della velocità (quantità di moto), diventa massima l'incertezza nella misura della posizione e viceversa. Ossia: la relazione di indeterminazione, approssimativamente espressa mediante la formula:

$$\Delta x = K/\Delta(mv)$$

dove $K = h/4\pi$, è una conseguenza diretta della natura ondulatoria delle particelle, oltre che una conseguenza dell'inevitabile perturbazione dello stato di un sistema causata dall'operazione di misura di una grandezza.

A tale proposito, se si ritiene opportuno, si potrebbe anche introdurre il concetto di pacchetto d'onda facendo osservare che in un treno d'onde la posizione di una particella è definita male e la quantità di moto è definita bene, mentre in un pacchetto d'onda accade il contrario.

A questo punto, collegandosi agli esperimenti effettuati ed alla relazione di indeterminazione, si può fare notare che, nella meccanica quantistica, esistono grandezze fisiche tra loro incompatibili (ad esempio la posizione e la quantità di moto) e che in ogni stato fisico di un sistema "quantistico" qualche grandezza è necessariamente indeterminata, cioè può avere qualsiasi valore.

Ossia i sistemi "quantistici" (atomi, elettroni, quanti di luce, ecc.), a causa della relazione d'indeterminazione a cui sono vincolate le grandezze fisiche, sono caratterizzati da stati fisici in cui non tutte le grandezze hanno un valore definito.

La differenza fra meccanica classica e quantistica viene riassunta nello schema che segue.

Meccanica classica	Meccanica quantistica
Non esiste la relazione di indeterminazione	Esiste la relazione di indeterminazione
Tutte le grandezze fisiche sono tra loro compatibili, ossia possono essere determinate simultaneamente.	Esistono grandezze fisiche tra loro incompatibili, ossia grandezze fisiche che non possono essere determinate simultaneamente.
In ogni stato fisico ogni grandezza fisica è determinata.	In ogni stato fisico solo alcune grandezze fisiche possono essere determinate e quelle incompatibili rimangono indeterminate.
In ogni stato fisico tutte le grandezze hanno un valore definito, ossia per nessuna grandezza esistono simultaneamente diverse possibilità.	In ogni stato fisico, in cui una grandezza A è determinata, sono presenti tutte le possibilità relative ai valori delle grandezze fisiche B, C, ecc., indeterminate.
Nello svolgimento di un processo la legge evolutiva è quella della meccanica newtoniana.	Nello svolgimento di un processo avviene l'interferenza tra le possibilità simultaneamente presenti relative alle grandezze indeterminate. Ed essendoci interferenza, la legge evolutiva è di tipo ondulatorio.
In ogni istante si può prevedere con certezza il risultato della misura di ogni grandezza fisica.	In ogni istante si possono prevedere con certezza le probabilità dei risultati della misura di ogni grandezza fisica.

> Applicazione degli strumenti concettuali della teoria quantomeccanica agli elettroni nell'atomo.

Si forniscono agli allievi le note figure con le "forme" di risonanza delle vibrazioni permesse e non permesse di una corda fissata agli estremi, di una membrana di tamburo e di una sfera, facendo trarre dalle loro osservazioni, (ma naturalmente anche aiutandoli specialmente per le vibrazioni relative alla membrana di tamburo e alla sfera), l'interpretazione delle onde stazionarie.

Si sottolinea che le onde vincolate, a differenza di quelle libere, sono soggette a risonanza, cioè sono stazionarie, perché la lunghezza d'onda non può assumere valori qualsiasi, ma tali da stare in una relazione bene definita rispettivamente con la lunghezza della corda, le dimensioni della membrana di tamburo e della sfera.

E' importante evidenziare che le espressioni matematiche relative a tali onde stazionarie, con le corrispondenti reali forme di risonanza, si possono ottenere tramite la risoluzione di opportune equazioni d'onda.

E, tramite domande, simili a quelle riportate nella sezione per gli studenti, gli allievi dovrebbero essere in grado di comprendere che, analogamente, in un atomo, le onde associate agli elettroni, essendo vincolate dalla forza attrattiva del nucleo, hanno solo determinate lunghezze d'onda e quindi solo determinate energie e sono onde di risonanza stazionarie.

A tale proposito, ho sempre notato che è molto stimolante per i ragazzi porre la domanda:
 - Provate a sostituire la relazione di De Broglie : $\lambda = h / (mv)$ nella relazione valida per la condizione di risonanza delle onde: $n\lambda = 2\pi r$.
 Quindi confrontate la relazione da voi ottenuta con la relazione di Bohr:
 $mvr = nh/2\pi$.
 Che cosa notate?
 Infatti i ragazzi "scoprono" così abbastanza facilmente la spiegazione logica (e, di solito, provano un certo entusiasmo!) delle orbite stabili di Bohr e la quantizzazione dell'energia e dei livelli energetici nell'atomo.

Avvicinamento al concetto di orbitale – Parte II

A questo punto si può introdurre il discorso degli orbitali atomici:

- facendo notare che lo **stato dinamico stazionario** (ossia la situazione, cioè la condizione) dell'elettrone in un atomo, dipende non solo dalla forza attrattiva del nucleo, ma anche dalla regione entro cui si muove prevalentemente l'elettrone;

- ponendo la domanda: secondo voi, se fosse possibile formulare un'equazione valida anche per l'onda dell'elettrone nell'atomo, si potrebbero trovare le possibili forme di risonanza dell'elettrone nell'atomo, risolvendo tale equazione?

Discussione: si può dire che, in questo caso, come in quello delle vibrazioni della corda, della membrana di tamburo e della sfera, anche per il comportamento ondulatorio dell'elettrone nell'atomo, ciò è stato reso possibile grazie allo scienziato Schroedinger che, mettendo in relazione le coordinate spaziali, l'energia potenziale e l'energia totale dell'elettrone, riuscì a elaborare un'equazione (detta appunto equazione d'onda di Schroedinger).

E, risolvendola, Schroedinger scoprì che le soluzioni, dette **funzioni d'onda**, permettono di determinare i diversi stati possibili dell'elettrone nell'atomo d'idrogeno.

Inoltre con altri metodi matematici, che tengono conto delle repulsioni tra gli elettroni e del loro comportamento magnetico, si è potuto stabilire che in qualsiasi atomo multielettronico, ogni stato possibile è valido, oltre che per un elettrone, anche per due elettroni con spin opposto.

Ora, sfruttando il fatto che i ragazzi sanno che ciò che non può essere misurato non ha significato, nel prosieguo della discussione si può fare osservare che ogni funzione d'onda:

- è un'espressione matematica che, di per se stessa, non ha significato fisico perché non è misurabile e nemmeno osservabile né direttamente né indirettamente. Infatti sperimentalmente si può determinare solo la densità elettronica globale, alla quale ogni orbitale fornisce un contributo che dipende dal quadrato dell'ampiezza di probabilità.

- è detta funzione, perché il valore di questa grandezza varia in dipendenza della posizione dell'elettrone nello spazio.

- è detta funzione d'onda, perché tale funzione si comporta come l'ampiezza di un'onda, nel senso che come due onde propagantisi in un mezzo interferiscono costruttivamente o distruttivamente dando origine ad un'onda la cui ampiezza è la somma o la differenza delle ampiezze delle prime due, così due funzioni d'onda possono combinarsi generando una nuova funzione d'onda data dalla loro somma algebrica.

- è molto importante in quanto permette di calcolare la probabilità di trovare l'elettrone nelle varie posizioni dello spazio atomico. Infatti, come i ragazzi hanno appreso precedentemente, il quadrato della funzione d'onda, calcolato in una data posizione è uguale alla probabilità di trovare l'elettrone in quella data posizione.

- ad ogni funzione d'onda corrisponde una **forma data dal grafico corrispondente** e **uno stato dinamico** possibile per uno o due elettroni (con spin opposto) caratterizzato da un'energia ben definita.

Quindi, dopo avere ben sottolineato la differenza tra ampiezza e probabilità, si può passare alla rappresentazione grafica spaziale della distribuzione di probabilità, limitandosi, ad esempio, a considerare i diagrammi punteggiati e le mappe di probabilità corrispondenti alla densità di probabilità per le funzioni d'onda s e p .

Nella fase conclusiva del lavoro svolto si aiuteranno gli allievi a "fissare", usando parole del lessico a loro familiare e sfruttando le loro osservazioni in un clima di collaborazione e condivisione, la definizione del concetto di orbitale, facendo "emergere" che **l'orbitale è una descrizione scientifica del possibile stato dinamico fisico di uno o due elettroni nell'atomo quantomeccanico, da non confondere con la rappresentazione spaziale e nemmeno con la funzione d'onda che lo descrive matematicamente.**

Inoltre, dopo avere fornito il diagramma semplificato dei livelli d'energia di un atomo multielettronico, ricavato dalla teoria quantomeccanica, si invitano gli allievi a confrontarlo con quello basato sul modello a gusci.

Infine, per collegare il modello a gusci con quello orbitalico, è opportuno anche fare osservare il collegamento fra la distanza dal nucleo di ogni sottoguscio con la massima probabilità di trovare gli elettroni in quel dato sottoguscio.

A conclusione dell'argomento sul modello quanto-meccanico dell'atomo, si può proporre eventualmente una mappa concettuale sui modelli atomici da Dalton a quello quanto-meccanico.

5. Sezione per gli studenti

Materiale e strumenti

1. Livella laser o penna laser (attenzione: non si deve mai puntare il raggio laser negli occhi!)
2. Cartoncino
3. Filo di cotone, seta o nailon
4. Nastro adesivo
5. Tubo (o scatola) di cartone con "finestre" circolari alle estremità e fenditura sulla parte superiore per inserire rispettivamente una torcia elettrica, un fotodiodo e un filtro colorato (v. figura)
6. Sorgente di luce (torcia elettrica)
7. Filtri di cellofane (o altra sostanza trasparente) rosso, arancio, giallo, verde, viola
8. Fotodiodo
9. Pila da 9 V

- 10. Materiale elettrico per assemblare un circuito elettrico
- 11. Tester
- 12. Computer

Prima fase: esperimento della doppia fenditura con luce laser.

- Nel centro di un cartoncino praticate una fenditura lineare, lunga circa 5 cm e larga circa 1 mm. Mediante un nastro adesivo fissate nella parte superiore e inferiore della fenditura il filo in modo da formare due fenditure come in figura 1.
- Disponete il cartoncino con la doppia fenditura verticale davanti al raggio laser della livella o della penna. Osservate la figura ottenuta su uno schermo (come schermo si può usare eventualmente anche la parete della stanza) a distanza di almeno 1 m dalla sorgente di luce.
- Osservate ora la figura 2, con le frange d'interferenza e il grafico d'intensità corrispondente ottenuti con un esperimento simile al vostro.

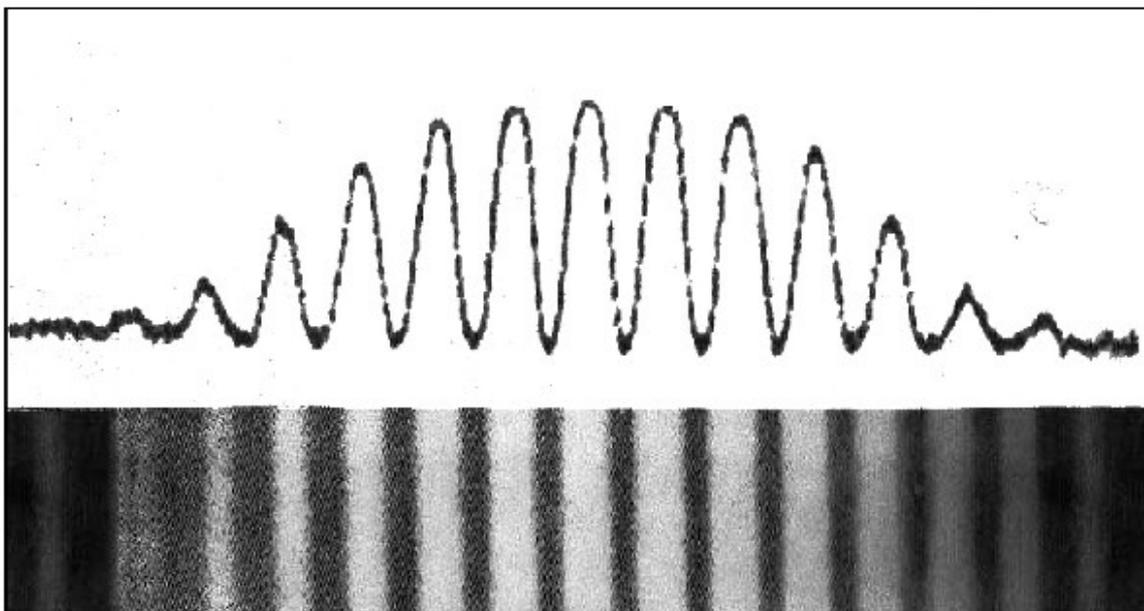
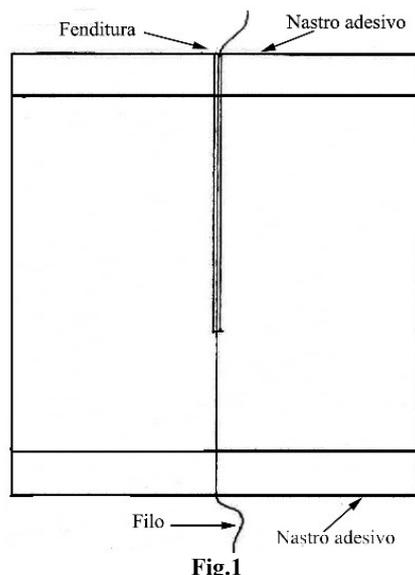


Fig.2

- Completate quindi il testo seguente.
 Quando due onde interferiscono, le loro ampiezze si.....nei punti dello schermo in cui esse arrivano in fase, mentre le loro ampiezze si.....nei punti in cui arrivano in opposizione di fase.
 Nel primo caso si ha interferenza....., nel secondo caso si ha interferenza

Nei punti in cui le onde interferiscono costruttivamente, l'ampiezza risultante è data dalla
 Nei punti in cui le onde interferenti hanno uguale ampiezza, l'ampiezza risultante è.....e l'intensità è.....

Nei punti in cui le onde interferiscono distruttivamente, l'ampiezza risultante è data dalla..... e l'intensità è.....

Nei punti in cui le onde interferenti hanno uguale ma opposta ampiezza, l'ampiezza risultante è..... e l'intensità è.....

Perciò si può dire che un raggio luminoso è tanto.....intenso quanto maggiore è l'ampiezza della vibrazione della luce e tantointenso quanto minore è l'ampiezza della vibrazione.

Ora si è potuto constatare che, come l'area di un quadrato quadruplica quando si raddoppia il lato, così l'intensità di un'onda luminosa si quadruplica se la sua ampiezza viene raddoppiata.

Avvicinamento al concetto di orbitale – Parte II

Basandovi su ciò, si può affermare che l'intensità di un'onda luminosa è proporzionale al quadrato della sua ampiezza?

Indicando con I l'intensità e con A l'ampiezza dell'onda, come esprimete la relazione fra intensità e ampiezza con una formula matematica adeguata?

Seconda fase: effetto fotoelettrico

Avendo l'avvertenza di usare il tester come amperometro e facendovi aiutare dal vostro insegnante per quanto riguarda la scelta del fondo scala più opportuno, assemblate il circuito come nello schema indicato in figura 3. Quindi misurate l'intensità di corrente:

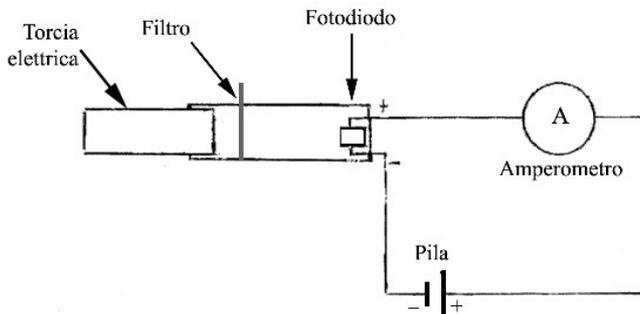


Fig.3

a) quando al posto del fotodiodo viene inserito un filo di metallo, sia al buio che in condizioni normali di luce;

b) quando, al posto del filo, viene inserito il fotodiodo al buio e poi con luce. Inserite poi i filtri e misurate le corrispondenti intensità di corrente, riportandole nella tabella 1 seguente.

Tabella 1

filtro colorato	λ (nm)	ν (Hz)	Intensità di corrente (mA)
violetto	420	$7.14 \cdot 10^{14}$	
blu	470	$6.38 \cdot 10^{14}$	
verde	515	$5.82 \cdot 10^{14}$	
giallo	570	$5.26 \cdot 10^{14}$	
arancio	600	$5.00 \cdot 10^{14}$	
rosso	680	$4.41 \cdot 10^{14}$	

Quindi, in base ai dati sperimentali ottenuti, costruite il grafico che rappresenta la variazione dell'intensità di corrente al variare della lunghezza d'onda.

Inoltre, avvalendovi delle vostre osservazioni e conoscenze, completate il testo seguente:

Il circuito usato illustra il principio dell'effetto fotoelettrico. Quando nel circuito, al posto del fotodiodo, è inserito il filo di metallo, allora l'amperometro rivela sempre la stessa intensità di corrente sia **in condizioni normali di luce che al buio**. Ed il flusso di corrente elettrica avviene perché elettroni vanno dal terminale collegato al polo negativo della pila al terminale collegato al polo positivo della pila.

Quando, al posto del filo, è inserito il fotodiodo, in condizioni di luce, allora l'amperometro
Ciò significa che deglipassano dal terminale del fotodiodo collegato al polo negativo della pila al terminale collegato al polo positivo della pila.

Quando invece si ripete l'operazione precedente con il **fotodiodo al buio**, allora l'amperometro.....

Quando è inserito il filo, inserite la luce il inserito un filo di metallo dalla luce, allora l'gato al polo positivo della pila.....

Questo significa che la luce, quando colpisce un materiale fotosensibile.....

A questo punto, utilizzando i filtri colorati e con le vostre misure, avete ricavato un grafico parzialmente simile a quello riportato in figura 4, ottenuto in un laboratorio molto attrezzato, in cui è stato possibile misurare anche la λ_c , ossia la lunghezza d'onda massima che la radiazione incidente non deve oltrepassare per poter ottenere intensità di corrente.

Comunque il vostro esperimento ha dimostrato che **l'intensità di corrente dipende dalla lunghezza d'onda, cioè dalla frequenza della luce incidente**, perché

Ora, disponendo di maggior tempo e di strumenti adeguati, usando radiazioni elettromagnetiche di **diversa intensità di luce e frequenza**, si potrebbe anche constatare (come è stato dimostrato) che:

- ogni sostanza fotosensibile ha un suo caratteristico **valore di soglia** $\nu_c = c/\lambda_c$;

- se la frequenza della radiazione incidente non supera il valore di soglia, essa non può produrre emissione di elettroni qualsiasi sia l'intensità della radiazione incidente;

- se la frequenza della radiazione incidente è maggiore del valore di soglia, l'intensità di corrente elettrica aumenta all'aumentare dell'intensità luminosa e, anche se l'intensità della radiazione è minima, non occorre attendere molto tempo prima di avere l'emissione di qualche elettrone;

- l'energia cinetica dei fotoelettroni non dipende dall'intensità delle radiazioni incidenti, ma solo dalla frequenza secondo la relazione:

$$\text{Energia cinetica} = h \cdot \nu - h \cdot \nu_c$$

in cui, qualunque sia la sostanza del materiale fotosensibile e la radiazione incidente, **h** è la costante di Planck, a voi già nota.

Tali evidenze sperimentali sono in contrasto con il modello ondulatorio della luce, secondo il quale sarebbe fondamentale l'intensità invece che la frequenza. Perciò i risultati sperimentali mettono in crisi.....

Tali risultati si possono spiegare, come fece Einstein, ammettendo che la luce, nell'interazione con la materia, manifesti non il comportamento ondulatorio, ma quello già noto a voi dal modello atomico di Bohr, cioè il comportamento.....

Infatti in tale modo ogni elettrone emesso dal materiale fotosensibile deriva, come accade negli urti tra palle su un tavolo da biliardo, dall'urto tra un fotone, con un'energia $E = \dots\dots\dots$ alla frequenza della luce, e un elettrone del materiale.

Quandocolpisce un elettrone, gli trasmette questa energia; una parte viene spesa per vincere la forza che lega alla sostanza del materiale fotosensibile e uscire, il resto è l'energia che è collegata alla velocità con cui l'elettrone viene emesso.

Dunque all'elettrone rimane un'energia cinetica data da:

$$\text{Energia cinetica} = h \cdot \nu - \text{energia spesa per uscire}$$

Dal confronto con la relazione trovata sperimentalmente, risulta che:

$$h \cdot \nu_c = \dots\dots\dots$$

Per quanto riguarda l'intensità della radiazione, essa va intesa non in riferimento all'energia dei fotoni, ma al loro numero. Pertanto un fascio di radiazioni di grande intensità è costituito dafotoni, la cui energia è grande se la frequenza....., mentre è piccola se

Ciò spiega il motivo per cui, se la frequenza della radiazione incidente, essa non può produrre emissione di elettroni **qualsiasi sia l'intensità della radiazione incidente**.

Infine rispondete alle seguenti domande e completate le frasi successive.

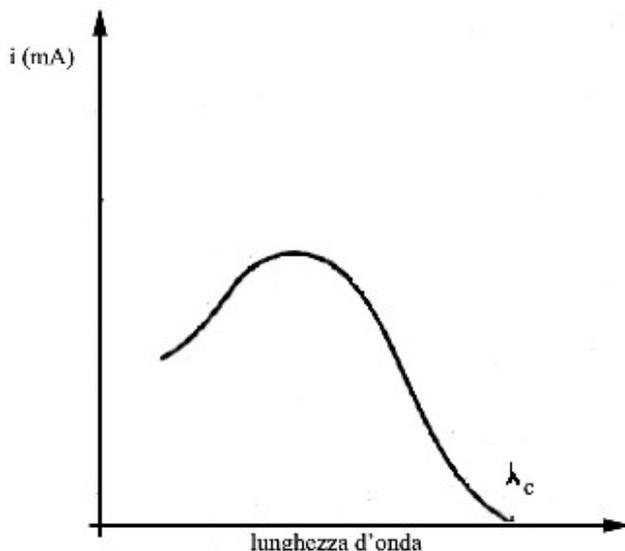


Fig.4

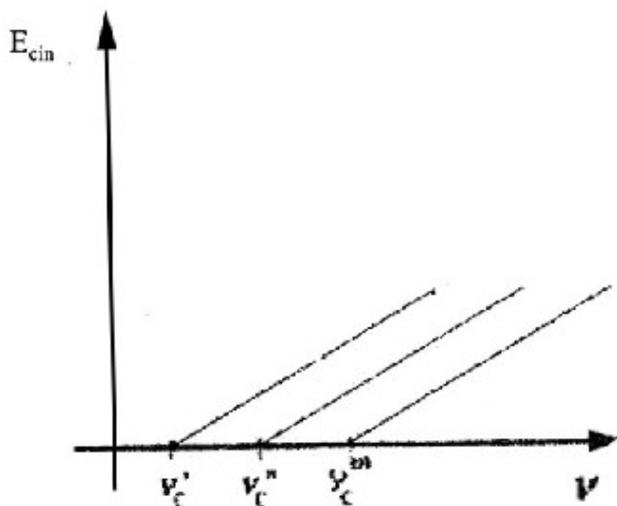


Fig.5

- Nel sistema di assi cartesiani riportato in figura 5 è riportata l'energia cinetica degli elettroni emessi da tre metalli diversi in funzione della frequenza della radiazione incidente.

I grafici ottenuti sono tre rette, in cui: ν'_c , ν''_c e ν'''_c sono i corrispondenti valori soglia. Come è evidente, le tre rette sono parallele perché hanno la stessa inclinazione, dalla quale si ricava il valore $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ che, come vi è noto dal modello atomico di Bohr, è il valore della costante di Planck.

Si può dire che la comparsa della costante di Planck h , rivela la natura quantica e la natura corpuscolare nell'effetto fotoelettrico? Motivate la risposta.

- Si sa che nel caso della luce, intesa in termini classici (onde), la sua intensità è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda in un dato punto dello spazio.

Cioè vale la relazione:

$$\text{Intensità} = K \cdot A^2$$

Ma l'intensità della luce, intesa in termini quantistici (fotoni), nell'intorno di quel dato punto, è una misura della probabilità che un singolo fotone si trovi in quel punto.

Ossia: Intensità = Probabilità. Stabilite se si può anche scrivere:

$$\text{Probabilità} = K \cdot A^2$$

Motivate la vostra risposta ed esprimete tale relazione con parole vostre.

- Se l'ampiezza di un'onda luminosa viene raddoppiata, la sua intensità Il raggio luminoso diventa volte più luminoso e si ha una probabilità volte maggiore di trovare un fotone in una regione particolare.

- Se una funzione d'onda ha, in un certo punto A, un'ampiezza due volte maggiore che in un altro punto B, la probabilità di trovare la particella nel primo punto A è volte maggiore che nel secondo punto B.

Terza fase: esperimento della doppia fenditura con elettroni (simulazione al computer).

Non è possibile eseguire tale esperimento nel vostro laboratorio, tuttavia esso può essere effettuato da voi virtualmente tramite l'ausilio del computer. Per il procedimento, seguite le indicazioni fornite durante l'interazione con il computer.

Annotate, con vostre parole, le osservazioni relative ai risultati ottenuti con una sola fenditura aperta e con entrambe le fenditure aperte.

Poi confrontate la figura 2 delle frange di interferenza e il grafico dell'intensità della luce con la figura 6 (sotto riportata) relativa all'esperimento della doppia fenditura con **elettroni** (il grafico d'intensità è ottenuto con schermo fluorescente, in cui l'arrivo di ogni elettrone è rivelato da un impulso di luce).

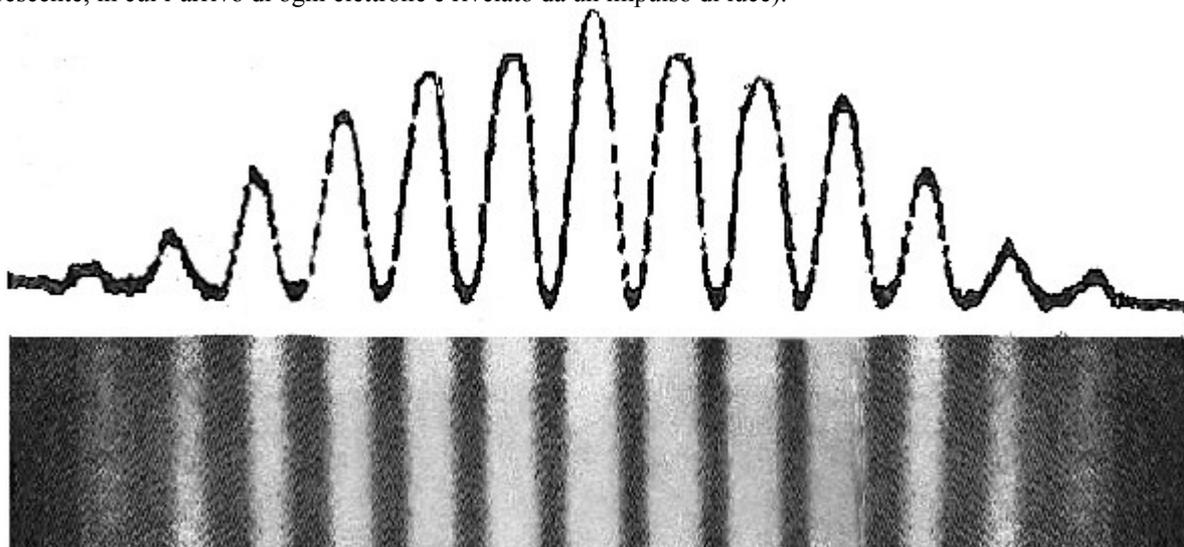


Fig.6

Quindi rispondete alle seguenti domande e risolvete gli esercizi proposti.

- Dopo l'esperimento dell'interferenza della luce e dopo la visione al PC dell'esperimento dell'interferenza degli elettroni attraverso la doppia fenditura, confrontando le figure delle frange d'interferenza e della distribuzione dei fotoni e degli elettroni ottenute rispettivamente:

- con un fascio di luce

- con un fascio di elettroni,

si può dire che.....

- Se l'elettrone e le altre particelle microscopiche si muovono come onde, è possibile dire che si può determinare, ad ogni istante, la posizione di una particella nello spazio?

Motivate la vostra risposta.

- Come voi sapete dalla fisica, per i corpi è valida la relazione per la quantità di moto: $q = mv$, mentre per le onde è valida la relazione:

$$v = c/\lambda.$$

Si può dire che la relazione di De Broglie, $\lambda = h/mv$ pone in evidenza la doppia natura della materia? Motivate la vostra risposta.

- La relazione d'indeterminazione di Heisenberg può essere scritta nella forma: $\Delta x = K/\Delta(mv)$. Che tipo di proporzionalità c'è tra Δx (errore nella misura della posizione x) e $\Delta(mv)$ (errore nella misura della quantità di moto mv)? Basandovi su tale relazione di proporzionalità, esprimete con parole vostre la relazione di Heisenberg.

- Dopo avere letto il seguente testo, commentatelo.

"...Molti, compresi i padri fondatori della meccanica quantistica, ritengono che il principio di Heisenberg limiti la nostra conoscenza del mondo, nel senso che, poiché non possiamo rilevare contemporaneamente posizione e momento di una particella, possiamo giungere solo a una conoscenza incompleta del suo stato..

*...Quello che ci dimostra la meccanica quantistica, e in particolare il principio di indeterminazione, è che un'aspettativa del genere, una descrizione nei termini di entrambi gli attributi, è **ipercompleta**.*

...Ci sono, implica il principio di Heisenberg, due linguaggi con cui parlare del mondo: il linguaggio della posizione e il linguaggio del momento.

*...La fisica classica tende a una inaccettabile e fuorviante conoscenza ipercompleta del presente: questa è l'interpretazione corretta del principio, ed essa ci dice che il momento **da solo** o, in alternativa, la posizione **da sola** sono sufficienti per una conoscenza **completa** del presente."*[4]

- Tenendo presente la relazione d'indeterminazione di Heisenberg, cosa si può affermare circa le orbite del modello atomico di Bohr.

- In un esperimento d'interferenza con una sorgente di elettroni e doppia fenditura si è ottenuto il grafico d'intensità riportato in figura 7, dove ogni punto corrisponde ad un elettrone.

-

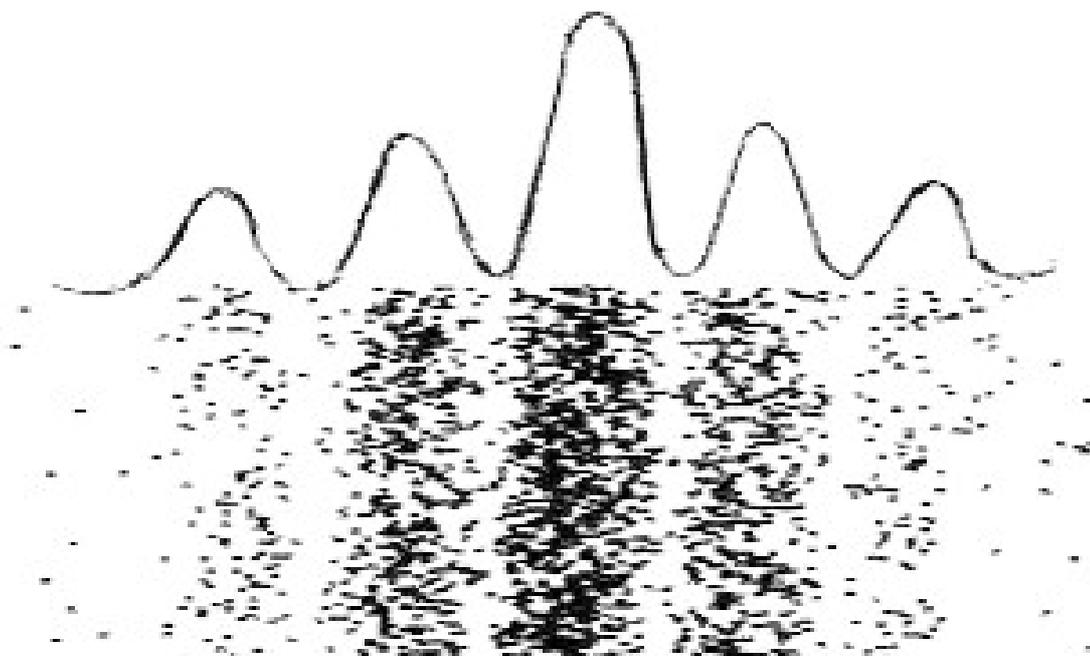


Fig.7

Basandovi su tale grafico d'intensità compilare la tabella 2 seguente.

Tabella 2

Distribuzione probabilistica degli elettroni sul rivelatore.		
N. Picco	Area di picco = b . h *	Probabilità % di trovare un elettrone
1	A ₁ =	(A ₁ / A _T) .100 =
2 = =
3 = =
4 = =
5 = =

*b = ampiezza del picco a metà altezza; h = altezza del picco dalla gola alla cresta dell'onda:

$$A_{T} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

- Secondo voi, si può dire che il grafico dell'intensità rappresenta approssimativamente anche l'andamento della probabilità di trovare un elettrone nei vari punti dello schermo? Motivare la risposta.

- Completare le frasi nella tabella 3:

Tabella 3

Nella meccanica classica le grandezze fisiche non sono vincolate dalla relazione di indeterminazione.	Nella meccanica classica ogni stato di un sistema fisico è caratterizzato da grandezze fisiche che hanno un valore....., cioè le grandezze sono determinate.
Nella meccanica quantistica le grandezze fisiche Sono vincolate dalla relazione di indeterminazione.	Nella meccanica quantistica ogni stato di un sistema fisico è caratterizzato da grandezze fisiche che hanno un valoree da altre grandezze fisiche che non hanno un valore....., cioè solo grandezze sono determinate.

Quarta fase: applicazione dei nuovi concetti della meccanica quantistica all'atomo

Osservate le figure con le “forme” delle vibrazioni permesse e non permesse di una corda fissata agli estremi, di una membrana di tamburo e di una sfera e, facendovi aiutare quando è necessario dall'insegnante, completate il seguente testo.

Le onde vincolate, a differenza di quelle libere, sono soggette a risonanza, cioè sono stazionarie, perché la lunghezza d'onda assumere valori qualsiasi, ma tali da stare in una relazione bene definita rispettivamente con la lunghezza della corda, le dimensioni della membrana di tamburo e della sfera.

Tali onde sono stazionarie perché, per esempio riferendoci alla corda fissata agli estremi, se si pizzica la corda in vicinanza di un'estremità, un'onda si propaga verso l'altra estremità (**onda progressiva**), ma qui essa viene riflessa e costretta a ritornare indietro (**onda retrograda**) e interferisce con l'onda progressiva.

In certi punti in cui l'interferenza è costruttiva, l'ampiezza di vibrazione è....., mentre in altri punti in cui l'interferenza è distruttiva, l'ampiezza è.....

Quindi un'onda stazionaria è data dall'interferenza di un'ondae di un'onda.....e, in ogni caso (corda, membrana di tamburo, sfera), si ha solo quando la lunghezza d'onda assume non valori , ma valori che stanno in una relazione bene definita con le dimensioni della corda, della membrana e della sfera.

Le espressioni matematiche relative a tali onde stazionarie, con le corrispondenti reali forme di risonanza, si possono ottenere tramite la risoluzione di opportune equazioni d'onda. Analogamente, in un atomo, poiché le onde associate agli elettroni sono vincolate dalla forza attrattiva del nucleo, esse non hannolunghezza d'onda, ma solo valori di lunghezza d'onda, ossia solo frequenze e quindi solo energie e sono onde di risonanza, stazionarie.

- Provate a sostituire la relazione di De Broglie $\lambda = h / (mv)$ nella relazione valida per la condizione di risonanza delle onde:

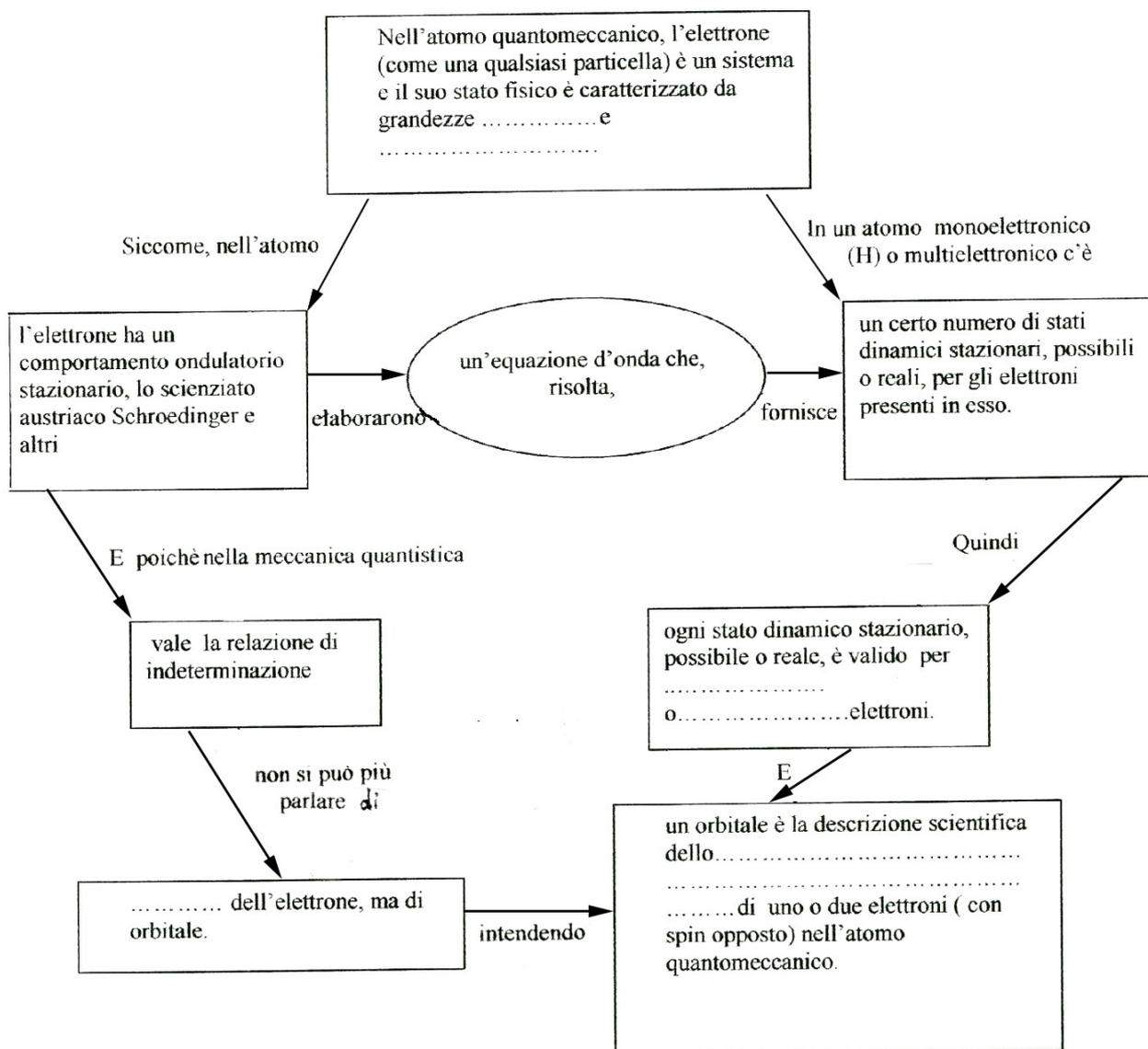
$$n\lambda = 2 \pi r.$$

Quindi confrontate la relazione da voi ottenuta con la relazione di Bohr:

$$mvr = nh/2\pi.$$

Che cosa notate?

- In base alla risposta precedente, spiegate con parole vostre la stabilità delle orbite di Bohr, la quantizzazione dell'energia e i livelli energetici nell'atomo di Bohr.
- Secondo voi, se fosse possibile formulare un'equazione valida anche per l'onda dell'elettrone nell'atomo, si potrebbero trovare le possibili "forme di risonanza" dell'elettrone nell'atomo, risolvendo tale equazione?
Questa domanda porge all'insegnante lo spunto per avviare una lezione dialogata sull'equazione di Schroedinger e sull'orbitale, di cui, nella sezione per l'insegnante, è stata data una possibile traccia di discussione.
Alla fine, se l'insegnante lo ritiene opportuno, si possono proporre le seguenti domande.
- Che differenza esiste fra le onde degli elettroni liberi e quelle degli elettroni vincolati in un atomo?
- In quale mezzo vibrano le onde elettroniche in un atomo? Secondo voi, si può dire che le onde nell'atomo sono onde stazionarie di probabilità? Motivate la risposta.
- Basandovi sul modello atomico quanto- meccanico, come spiegate la quantizzazione dell'energia nell'atomo ed i livelli energetici?
- Completate i testi della seguente mappa concettuale:



- Confrontate il diagramma semplificato dei livelli di energia di un atomo multielettronico, ricavato dalla teoria quanto- meccanica, con quello basato sul modello a gusci. Che cosa si può osservare ? - Utilizzando quanto avete appreso, si può dire che, in un atomo, la massima probabilità di trovare un elettrone 2s si verifica ad una distanza media dal nucleo, corrispondente al raggio del sottoguscio 2s? Motivate la vostra risposta.

Avvicinamento al concetto di orbitale – Parte II

- In alcuni testi le onde associate agli elettroni (e anche alle altre particelle microscopiche) vengono dette onde di probabilità e la funzione d'onda è definita ampiezza di probabilità. Quali domande e quali riflessioni fanno nascere in voi queste definizioni?

- Alcuni anni fa, in una rivista di divulgazione scientifica, è stata riportata la notizia dell'osservazione sperimentale diretta, con relativa immagine, della forma complessa di un orbitale in una sostanza. Da ciò che avete appreso riguardo al concetto di orbitale, quali dubbi e perplessità suscita in voi tale notizia? Quali concetti avete dovuto considerare con attenzione (ed eventualmente farvi rispiegare) per dissipare i vostri dubbi?

- Nel libro: *Alice nel paese dei quanti* di Gilmore,[5] viene descritto in forma romanzata l'esperimento dell'interferenza con elettroni.

Leggendo le pagine relative a tale esperimento riportate nelle fotocopie che vi sono state fornite, provate a rilevare se la descrizione di tale esperimento è espressa correttamente secondo ciò che avete appreso, oppure è esposta in modo pittoresco.

- Nella meccanica quantistica vengono usate spesso le espressioni: onda di probabilità, nuvola di carica, nuvola di probabilità, ampiezza di probabilità, nebbia quantistica, collasso della funzione d'onda. Effettuate una ricerca su Internet e, con l'ausilio del vostro insegnante, cercate di chiarire il significato di tali espressioni.

Conclusione

Come ho detto all'inizio, ritengo che il migliore metodo per affrontare la struttura atomica ed il legame chimico, a livello di chimica di base, sia quello induttivo sperimentale con il modello atomico a gusci fondato su dati sperimentali. Tuttavia, per le motivazioni accennate, sono anche convinto che attualmente sia necessario un approccio alla meccanica quantistica ed un avvicinamento all'orbitale.

Riconosco che ciò implica un impegno notevole da parte dei docenti, soprattutto perché i concetti relativi alla meccanica quantistica sono senz'altro di difficile apprendimento da parte di ragazzi della scuola secondaria di secondo grado.

In ogni caso credo che l'unica via percorribile sia quella sperimentale, del tipo proposto in questo articolo.

Ringraziamenti

Un ringraziamento è dovuto a Giovanni Villani e a Ermanno Niccoli per gli utili suggerimenti.

Riferimenti Bibliografici

[1] G. Villani, *CnS, La chimica nella scuola*, 2003, **25**,123.

[2] G. Del Re, *CnS, La chimica nella scuola*, 2007, **29**,145.

[3] L. Paoloni, *Nuova didattica della chimica*, Bracciodieta Editore, Bari, 1982, pag. 119.

[4] P. Atkins, *Il dito di Galileo – Le dieci grandi idee della scienza*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2004, 286.

[5] R. Gilmore, *Alice nel paese dei quanti*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 1996.