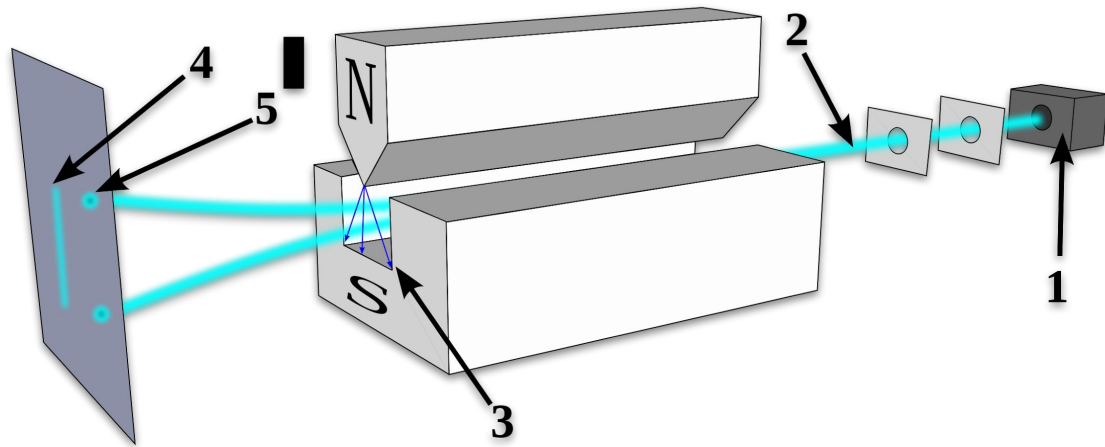

Physics Education

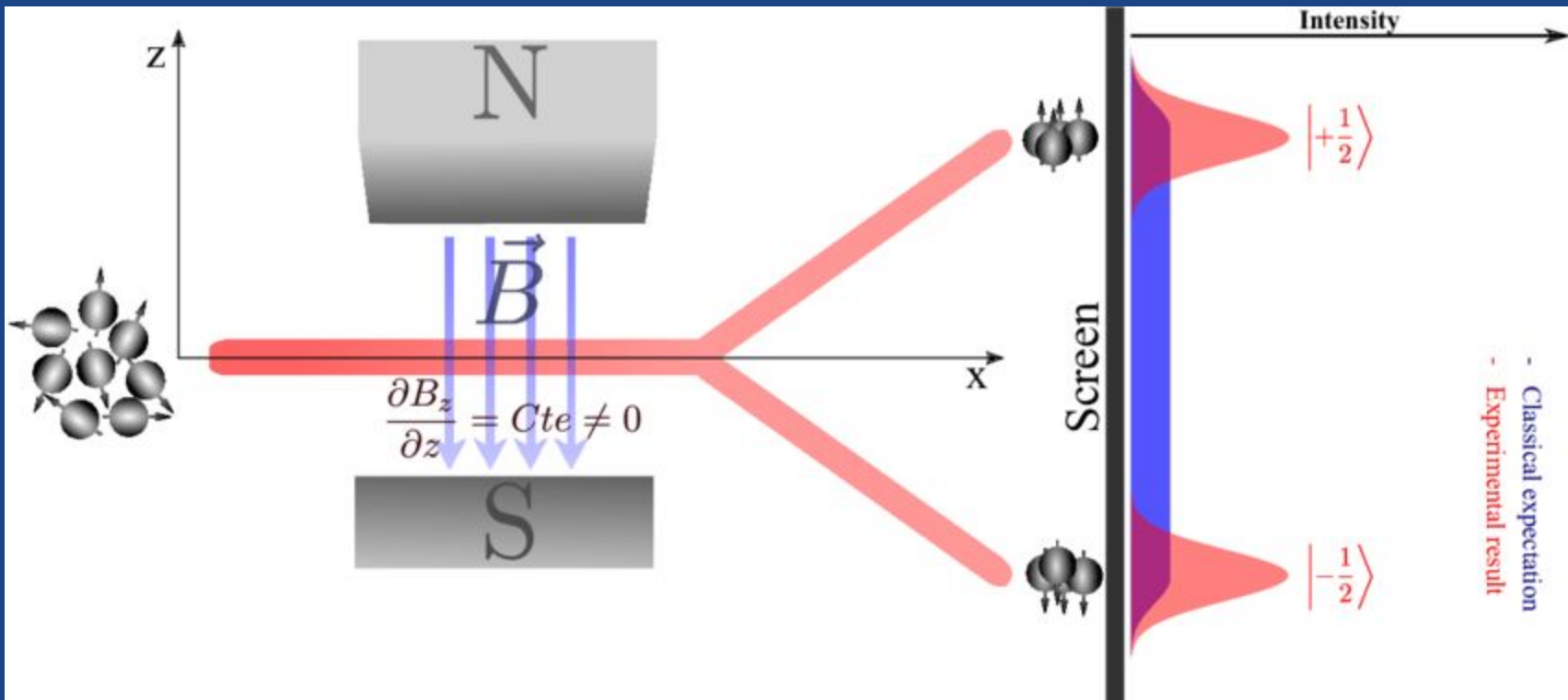
Laboratory

Lecture 20

PCK for Quantum Mechanics Physics

Francesco Longo • 16/12/2020







Historical
approach

Conceptual
approach

Quantum Mechanics in Textbooks



18 PARTICELLE E ONDE

“”

► Qual è la lunghezza d'onda di de Broglie di una pallina da tennis?

► Risposta a pag. 220

1 CORPUSCOLI E ONDE: DUE MODELLI PER I FENOMENI

Un **corpuscolo**, o particella, è un ente a cui possiamo attribuire in ogni istante una posizione; l'insieme delle posizioni assunte nel tempo costituisce la traiettoria di un corpuscolo. Le leggi della dinamica ci permettono di descrivere la legge oraria del corpuscolo, una volta che sono note le forze che agiscono su di esso.

Un' **onda** è un fenomeno di propagazione di una perturbazione, soggetta al principio di sovrapposizione: dove agiscono due perturbazioni, la perturbazione risultante è la somma algebrica delle perturbazioni concorrenti. Questo dà luogo ai fenomeni di interferenza e diffrazione, caratteristici dei fenomeni ondulatori.

Abbiamo usato questi modelli, in modo più o meno esplicito, per interpretare molti fenomeni fisici: i moti di oggetti diversi, spesso considerandoli come particelle puntiformi dotate di massa (anche quando erano pianeti o stelle); gli urti tra oggetti, sempre utilizzando il modello del corpuscolo; un modello per l'atomo come costituito da piccole particelle cariche, gli elettroni e i protoni, e neutri, i neutroni; il suono, interpretandolo come onde di pressione che si propagano in un mezzo materiale; la luce, interpretandola come onde elettromagnetiche, cioè onde dei campi elettrico e magnetico (decisivo per l'interpretazione della luce come un'onda è stato l'esperimento di Young che evidenzia il fenomeno di interferenza).

Tra la fine del XIX secolo e i primi decenni del XX, tuttavia, una serie di risultati sperimentali e modelli teorici mettono in discussione alcuni risultati precedenti:

- in alcuni esperimenti la luce mostra comportamenti che non si riescono a interpretare con un modello ondulatorio e si spiegano invece con un modello corpuscolare;
- in alcuni esperimenti gli elettroni mostrano fenomeni di interferenza, che potrebbero essere descritti con un modello ondulatorio.

In 3 minuti

- $E = hf$
- Il principio di indeterminazione



Elenchiamo alcuni di questi risultati, che poi discuteremo nel dettaglio:

Metà dell'Ottocento	Gli spettri di emissione di diversi elementi chimici, mostrano righe separate, invece che spettri continui.
1887	Hertz descrive l'effetto fotoelettrico (Lenard nel 1902 lo farà in modo più quantitativo) in base al quale la luce che colpisce un metallo provoca l'emissione di elettroni.
Fine dell'Ottocento	Non si riesce a derivare una legge che descriva lo spettro di emissione della radiazione del corpo nero.
1900	Planck ottiene una legge che descrive i dati sull'emissione del corpo nero basandosi sull'ipotesi che la luce venga assorbita e emessa dagli atomi sotto forma di pacchetti discreti di energia (corpuscoli).
1905	Einstein interpreta l'effetto fotoelettrico ipotizzando che la luce sia composta da corpuscoli.
1913	Bohr propone un modello atomico che comprende gli spettri a righe, ipotizzando che gli elettroni in un atomo abbiano alcune proprietà ondulatorie.
1914	Esperimento Franck-Hertz: un atomo può assorbire quantità di energia solo se queste sono multiple di un valore fondamentale.
1923	L'effetto Compton, in base al quale la luce che incide su un elettrone rimbaltza cambiando frequenza, viene interpretato considerando la luce come composta da corpuscoli.
1927	Esperimento di Davisson-Germer: gli elettroni che passano attraverso un cristallo di nichel mostrano una figura di interferenza come se fossero onde.

Il quadro fornito da questi risultati fu raccolto da Bohr nel cosiddetto **principio di complementarità**:

sia la radiazione che le particelle esibiscono proprietà ondulatorie o caratteristiche corpuscolari a seconda dell'apparato sperimentale con cui interagiscono.

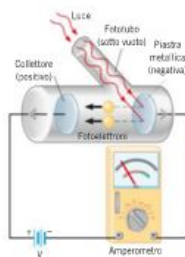
Questo principio cercava di spiegare i nuovi fenomeni osservati tenendo insieme il modello corpuscolare e quello ondulatorio. Come vedremo al termine del capitolo, il principio di complementarità è stato poi superato dallo sviluppo concettuale successivo della fisica quantistica.

2 L'EFFETTO FOTOELETTRICO E I FOTONI

L'effetto fotoelettrico

Figura 1

Nell'effetto fotoelettrico, una superficie metallica emette elettroni quando è illuminata da un fascio di luce di frequenza sufficientemente elevata. Questi fotoelettroni possono essere raccolti su una piastra positiva, producendo una corrente.



L'effetto fotoelettrico fu studiato sistematicamente negli ultimi anni dell'Ottocento dal fisico tedesco Philipp Lenard (1862-1947). La figura 1 mostra l'apparato sperimentale: un fascio di luce incide su una piastra metallica, racchiusa all'interno di un tubo in cui è stato praticato il vuoto. La superficie del metallo emette elettroni, che si muovono verso un elettrodo positivo, chiamato **collettore**, e producono una corrente di elettroni rilevabile con un amperometro. Tali elettroni, estratti con l'ausilio della luce, vengono chiamati **fotoelettroni**.

Per misurare l'energia cinetica massima posseduta dagli elettroni emessi dal metallo si può

applicare una differenza di potenziale variabile e di segno opposto, che invece di attirare gli elettroni verso il collettore li respinga: il valore minimo V_{stop} della ddp per cui la corrente si annulla è detto potenziale di arresto. Il lavoro compiuto dal campo elettrico per fermare gli elettroni è numericamente uguale all'energia cinetica degli elettroni più energetici: $eV_{stop} = K_{max}$. In questo modo misurando V_{stop} si può ricavare K_{max} .

Se si misura l'**energia cinetica massima dei fotoelettroni al variare dell'intensità e della frequenza della luce incidente**, si osservano le seguenti caratteristiche:

- esiste una frequenza minima f_0 , detta frequenza di soglia, al di sotto della quale non vengono emessi elettroni qualunque sia il valore dell'intensità della luce incidente;
- al di sopra della frequenza di soglia, K_{max} dipende linearmente dalla frequenza (figura 2) e non dipende dall'intensità;
- per un valore fissato della frequenza l'intensità di corrente cresce con l'intensità della luce incidente.



Figura 2

I fotoni possono espellere gli elettroni da un metallo quando la frequenza della luce supera un valore minimo f_0 . Per frequenze superiori, gli elettroni emessi hanno un valore massimo di energia cinetica K_{max} che dipende linearmente dalla frequenza, come mostra il grafico.

Difficoltà interpretative

Nel suo complesso, l'effetto fotoelettrico si potrebbe spiegare così: la radiazione elettromagnetica colpisce l'elettrone trasferendogli la sua energia; con questa energia l'elettrone può sfuggire all'attrazione del reticolo cristallino del metallo.

Se però si interpreta l'effetto fotoelettrico utilizzando il modello ondulatorio per la radiazione incidente, i risultati sperimentali lasciano alcuni dubbi:

- non si capisce perché debba esistere una frequenza di soglia; la potenza trasportata da un'onda è infatti proporzionale al quadrato della sua ampiezza: così se la radiazione incide su un elettrone per un tempo sufficientemente lungo, dovrebbe riuscire comunque a trasferire all'elettrone l'energia necessaria per farlo uscire dal metallo;
- non si capisce perché l'energia cinetica massima dei fotoelettroni dipenda solo dalla frequenza della radiazione incidente e non dalla sua intensità, dalla quale dipende l'energia trasportata dalla radiazione.

L'ipotesi del fotone

Nel 1905 Einstein ipotizzò che la luce di frequenza f potesse essere considerata come un insieme di particelle, che in seguito vennero chiamate **fotoni**, ciascuno con un'energia:

$$\text{Energia di un fotone} \quad E = hf \quad [1]$$

dove h è la costante di Planck.

Secondo questa ipotesi, quando aumenta l'intensità della luce, aumenta il numero di fotoni ma l'energia di ciascuno di essi rimane invariata.

Einstein utilizzò l'ipotesi del fotone per spiegare le caratteristiche dell'**effetto fotoelettrico**. Secondo Einstein, quando la luce colpisce un metallo un fotone può cedere la propria energia a un elettrone del metallo: se questa energia è maggiore o uguale al lavoro necessario per estrarre l'elettrone dal metallo, l'elettrone viene emesso.

Il lavoro minimo W_0 per estrarre un elettrone è detto **lavoro di estrazione** e dipende dal metallo. Ma quanto vale l'energia cinetica massima K_{max} di un fotoe-

lettrone che fuoriesce dal metallo? Einstein applicò il principio di conservazione dell'energia e propose la seguente relazione per le grandezze coinvolte nell'effetto fotoelettrico:

$$hf = K_{\max} + W_0 \quad [2]$$

dove hf è l'energia del fotone, K_{\max} l'energia cinetica massima del fotoelettrone e W_0 il lavoro di estrazione del metallo.

In base all'equazione [2], l'energia cinetica massima di un fotoelettrone risulta:

$$K_{\max} = hf - W_0$$

Ora siamo in grado di interpretare meglio il grafico di figura 2. Sappiamo che la frequenza di soglia f_0 è la minima frequenza che la luce incidente deve avere per strappare un elettrone al metallo. In questo caso particolare, il fotoelettrone viene emesso con energia cinetica nulla, così l'energia del fotone hf_0 risulta uguale al lavoro di estrazione $W_0 = hf_0 - W_0$. La frequenza di soglia risulta dunque $f_0 = W_0/h$. Per valori di f minori di f_0 , K_{\max} è negativa ed è per questo che non si ha emissione di elettroni; per valori di f maggiori di f_0 , invece, K_{\max} cresce linearmente con f .

Il fatto che un solo fotone interagisca con un solo elettrone spiega perché l'energia cinetica dei fotoelettroni non dipende dall'intensità. L'aumento dell'intensità della luce, infatti, provoca soltanto l'aumento del numero dei fotoni, ma l'energia che essi trasportano e che possono trasferire agli elettroni del metallo dipende solo dalla frequenza.

RICORDA**Lavoro di estrazione**

Il lavoro di estrazione di un metallo è l'energia minima richiesta per espellere un elettrone dal metallo stesso. Un elettrone che ha ricevuto questa energia ha energia cinetica nulla.

Esempio 1 L'effetto fotoelettrico per una superficie di argento

Il lavoro di estrazione dell'argento è $W_0 = 4,73$ eV.

- Determina la frequenza minima che la luce deve possedere per estrarre elettroni dalla sua superficie.

La soluzione

Poiché $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, il lavoro di estrazione espresso in joule è

$$W_0 = (4,73 \text{ eV}) \left(\frac{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 7,57 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La frequenza di soglia f_0 è la frequenza per cui l'energia del fotone è uguale al lavoro di estrazione W_0 del metallo. Usando l'equazione [2] con $K_{\max} = 0$, otteniamo

$$hf_0 = W_0 \rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{7,57 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}} = \boxed{1,14 \cdot 10^{15} \text{ Hz}}$$

che corrisponde a una lunghezza d'onda $\lambda_0 = 263 \text{ nm}$, nella regione ultravioletta dello spettro.

Esempio 2 La massima velocità dei fotoelettroni

Una luce monocromatica con una lunghezza d'onda di 95 nm colpisce una superficie di selenio, che ha un lavoro di estrazione di $5,9 \text{ eV}$. Gli elettroni emessi hanno un'energia cinetica diversa da zero.

- Determina la massima velocità con cui gli elettroni vengono espulsi.

La soluzione

L'energia cinetica massima K_{\max} dei fotoelettroni è $K_{\max} = (1/2)mv_{\max}^2$, da cui si ottiene l'equazione

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}}$$

dove m è la massa dell'elettrone, che vale $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Dal principio di conservazione dell'energia $hf = K_{\max} + W_0$ ricaviamo

$$K_{\max} = hf - W_0$$

Sappiamo che $f\lambda = c$, da cui segue

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Combinando i vari passaggi si ottiene algebricamente

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} = \sqrt{\frac{2(hf - W_0)}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(h\frac{c}{\lambda} - W_0\right)}{m}}$$

Numericamente risulta

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2\left[2\left(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}\right) \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{95 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - (5,9 \text{ eV}) \frac{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}}\right]}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = \boxed{1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}}$$

Si noti che nel calcolo abbiamo convertito il lavoro di estrazione da elettronvolt a joule ($1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

La quantità di moto di un fotone

Abbiamo visto che il fotone può interagire con un elettrone come se fosse una particella. Il fotone però è una particella molto particolare: nel vuoto si muove sempre alla velocità della luce c ed è privo di massa. Di conseguenza l'energia totale di un fotone coincide con la sua energia cinetica, perché la sua energia a riposo è uguale a zero.

Se consideriamo la relazione tra energia e quantità di moto ottenuta in relatività

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

osserviamo che per una particella di massa nulla la quantità di moto è $p = \frac{E}{c}$, che nel caso di un fotone diventa $p = \frac{hf}{c}$. Anche per il fotone questa grandezza ha carattere vettoriale e la sua direzione e verso sono quelle del fascio di luce.

Esempio 3 Quanti fotoni spara una lampadina?

Un LED da 6 W converte energia elettrica in energia luminosa con un rendimento pari a circa il 21%. Supponiamo che la luce sia verde (lunghezza d'onda nel vuoto = 555 nm).

- Determina il numero di fotoni emessi dal LED ogni secondo.

La soluzione

Il numero di fotoni emessi al secondo può essere ottenuto dividendo la quantità di energia luminosa emessa ogni secondo per l'energia E di un fotone. L'energia del singolo fotone vale $E = hf$. La frequenza f del fotone è legata alla sua lunghezza d'onda λ , ovvero $f = c/\lambda$.

Poiché $f = c/\lambda$, l'energia di un fotone con $\lambda = 555 \text{ nm}$ è

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s})(3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{555 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,58 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ogni secondo un LED da 6 W con un rendimento del 21% emette $0,21 \cdot (6,0 \text{ J/s}) = 1,3 \text{ J/s}$ di energia luminosa. Quindi

$$\begin{aligned} \text{numero di fotoni emessi al secondo} &= \frac{\text{energia luminosa emessa al secondo}}{\text{energia di un fotone}} = \\ &= \frac{1,3 \text{ J/s}}{3,58 \cdot 10^{-19} \text{ J/fotone}} = \boxed{3,6 \cdot 10^{18} \text{ fotoni/s}} \end{aligned}$$

3 LA RADIAZIONE DI CORPO NERO E L'IPOTESI DI PLANCK

Storicamente l'idea che l'interazione tra radiazione e materia avvenisse per pacchetti discreti di energia e non in modo continuo è legata allo studio dello spettro di emissione di un corpo nero.

Tutti i corpi, qualunque sia la loro temperatura, emettono continuamente onde elettromagnetiche. Per determinare le caratteristiche di questa emissione, alla fine dell'Ottocento i fisici iniziarono a studiare in modo sistematico le proprietà di emissione della radiazione elettromagnetica da parte di un **corpo nero**.

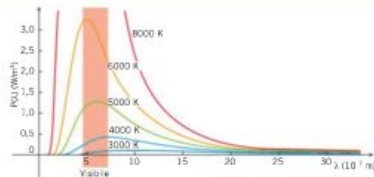
Come abbiamo già visto, un corpo nero è un oggetto qualsiasi che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica che lo colpisce. Per effettuare misure in laboratorio si realizza un corpo nero mediante una cavità, le cui pareti sono mantenute a temperatura uniforme e costante. Le pareti assorbono e riemettono le radiazioni elettromagnetiche di tutte le lunghezze d'onda. Attraverso un foro si analizza la radiazione nella cavità: per mezzo di opportuni strumenti, si misura l'energia presente per ogni lunghezza d'onda.

In questo modo si ottengono le curve di distribuzione dell'energia nella radiazione di corpo nero di **figura 3**, che confermano quanto previsto dalla termodinamica:

la distribuzione dell'energia nella radiazione di corpo nero non dipende dal materiale di cui è costituito ma solo dalla temperatura delle pareti.

Figura 3

La radiazione elettromagnetica emessa da un corpo nero ideale ha un irraggiamento per unità di lunghezza d'onda $P(\lambda)$ che varia con la lunghezza d'onda nel modo indicato in figura. A temperature più elevate, l'intensità spettrale è maggiore e il massimo si verifica a lunghezze d'onda inferiori.



Caratteristiche della radiazione di corpo nero

Analizzando le curve sperimentali, si notano due importanti caratteristiche della radiazione di corpo nero.

1. All'aumentare della temperatura del corpo nero, aumenta l'area sottesa dalla curva. Poiché questa area è proporzionale all'energia totale emessa, ne deriva che un corpo nero irradia tanta più energia quanto più è elevata la sua temperatura. Si dimostra infatti che vale la **legge di Stefan-Boltzmann**, secondo la quale

l'energia irradiata in 1 s da una superficie di 1 m^2 di un corpo che si trova alla temperatura assoluta T è:

$$E = \sigma T^4$$

dove $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ è detta **costante di Stefan-Boltzmann**.

2. All'aumentare della temperatura assoluta T del corpo nero, la lunghezza d'onda λ_{max} per la quale si ha il massimo dell'energia irradiata si sposta verso lunghezze d'onda minori, secondo quanto stabilisce la **legge di spostamento di Wien**:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

La luminosità dei corpi molto caldi è dovuta al fatto che essi emettono onde elettromagnetiche nella regione del visibile. Per esempio, il Sole, che ha una temperatura superficiale di circa 6000 K, appare giallo, mentre la stella Betelgeuse (2900 K) si presenta rossa-arancione.

A temperature più basse gli oggetti emettono solo debolmente nel visibile e, di conseguenza, non appaiono più luminosi. Per esempio, il corpo umano, che ha una temperatura di 310 K, emette, onde elettromagnetiche nella regione degli infrarossi, che possono essere rivelati da uno strumento a essi sensibile (**figura 4**).

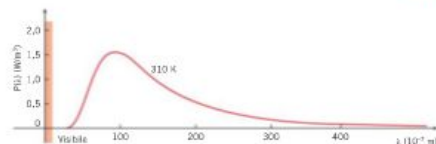


Figura 4

La distribuzione della radiazione emessa da un corpo nero di 310 K. La quantità di energia emessa nel visibile ($4,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) è assolutamente trascurabile rispetto a quella emessa nell'infrarosso.

■ L'ANGOLO MATEMATICO

Lo spettro di emissione di un oggetto è una *distribuzione* che rappresenta in che modo l'irraggiamento complessivo delle onde elettromagnetiche emesse è distribuita tra le varie lunghezze d'onda (o, in alternativa, frequenze).

L'irraggiamento ha unità $\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, perché indica l'energia emessa ogni secondo da ogni metro quadrato di superficie.

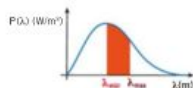
Lo spettro $P(\lambda)$ rappresenta l'irraggiamento per unità di lunghezza d'onda (o densità di irraggiamento) e ha unità $\frac{\text{W}/\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$. Questo significa che la quantità $P(\lambda)$ da sola non ha un vero significato fisico, al contrario del prodotto $P(\lambda) \cdot \Delta\lambda$, che rappresenta l'irraggiamento per lunghezze d'onda comprese tra

λ e $\lambda + \Delta\lambda$ (l'unità di misura di $P(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ è infatti $\frac{W}{m^2} \cdot m = \frac{W}{m^2}$, la stessa dell'irraggiamento).

Considerando un intervallo generico $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$, l'irraggiamento in tale intervallo è dato da

$$I_{\lambda_{\min}; \lambda_{\max}} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

e corrisponde all'area sottesa dallo spettro nell'intervallo considerato.



L'irraggiamento complessivo dell'oggetto quindi è dato dall'area totale sottesa dallo spettro.

L'ipotesi di quantizzazione di Planck

Negli ultimi anni dell'Ottocento i fisici cercarono di derivare la distribuzione di corpo nero utilizzando le equazioni di Maxwell, ma si scontrarono con difficoltà insormontabili. Infatti le leggi della fisica classica prevedono che, a una fissata temperatura, l'energia irradiata aumenti all'aumentare della frequenza (e quindi al diminuire della lunghezza d'onda) contrariamente a quanto mostrano le curve sperimentali e a quanto impone il principio di conservazione dell'energia.

Questa incompatibilità tra figura classica e evidenze sperimentali venne chiamata «catastrofe ultravioletta».

Nel 1900 il fisico tedesco Max Planck (1858-1947) affrontò il problema in modo radicalmente nuovo e riuscì a derivare l'espressione analitica della distribuzione di corpo nero facendo questa ipotesi:

L'interazione fra radiazione e materia avviene per scambio di pacchetti discreti di energia, detti quanti.

Planck fece uso di un modello in cui il corpo nero è composto da un gran numero di oscillatori atomici (cioè atomi che si comportano come oscillatori armonici), ciascuno dei quali emette e assorbe onde elettromagnetiche. Per ottenere l'accordo tra curve teoriche e sperimentali, Planck ipotizzò che l'energia E di un oscillatore atomico (*) avesse solo i valori discreti $E = hf, 2hf, 3hf$ e così via. In altre parole, egli suppose che:

$$E = nhf \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots \quad [3]$$

dove n è un numero naturale, f è la frequenza della radiazione e h una costante.

Oggi sappiamo che h , detta **costante di Planck**, è una delle costanti fondamentali della fisica e vale

$$h = 6,626\,068\,76 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

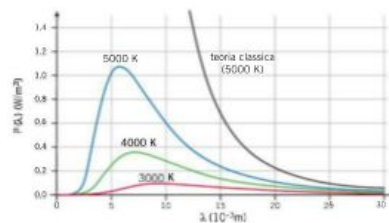
L'idea radicalmente nuova di Planck è che l'energia di un oscillatore atomico non è una grandezza continua, cioè in grado di assumere qualsiasi valore, ma è **quantizzata**, cioè può assumere solo valori discreti ($hf, 2hf, 3hf$ ecc.).

La conservazione dell'energia richiede che l'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche sia uguale a quella persa dagli oscillatori atomici del modello

(*) Attualmente è noto che l'energia di un oscillatore armonico vale $E = (n + 1/2)hf$, ma il termine aggiuntivo $1/2$ non è fondamentale per la nostra discussione.

di Planck. Supponiamo, per esempio, che un oscillatore con energia $3hf$ emetta un'onda elettromagnetica. Secondo la fisica classica, l'energia dell'onda emessa può assumere un qualsiasi valore tra 0 e $3hf$. Al contrario, nel modello di Planck l'energia dell'onda può essere solo uno di questi valori: $hf, 2hf, 3hf$.

Il risultato è una curva in accordo con i dati sperimentali perché, a differenza della previsione classica (vedi figura 5), tende a zero per piccole lunghezze d'onda evitando così la «catastrofe ultravioletta».



Lo stesso Planck riteneva che la sua ipotesi fosse solo un artificio di calcolo e che la sua base fisica, cioè la quantizzazione dell'energia, non fosse fondata. In realtà pochi anni dopo il modello proposto da Einstein per l'effetto fotoelettrico riprese la stessa idea e aprì la strada a una rivoluzione concettuale (figura 6).



Figura 5

Spettro di emissione di un corpo nero a diverse temperature. Nelle curve continue secondo il modello di Planck a differenza di quelle previste dalla teoria classica, l'intensità tende a zero per piccole lunghezze d'onda.

Figura 6

Un termometro a raggi infrarossi determina la temperatura di un oggetto misurando una porzione dello spettro di emissione.

4 LA QUANTITÀ DI MOTO DI UN FOTONE E L'EFFETTO COMPTON

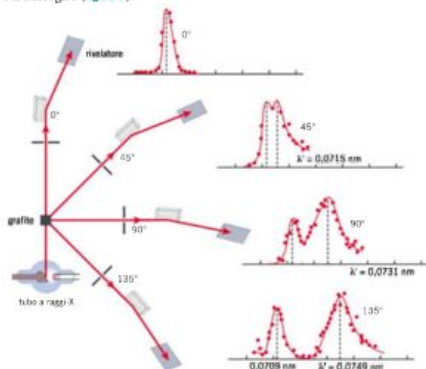
Einstein propose l'ipotesi del fotone nel 1905, ma solo nel 1923 essa cominciò a essere universalmente accettata, quando il fisico americano Arthur H. Compton (1892-1962) la utilizzò per spiegare i risultati sperimentali delle sue ricerche sulla diffusione dei raggi X da parte degli elettroni della grafite.

Secondo il modello ondulatorio della luce i raggi X sono onde elettromagnetiche ad alta frequenza. Quando colpiscono un elettrone questo dovrebbe oscillare con la stessa frequenza dell'onda che lo ha investito e poi emettere a sua volta un'onda sferica, sempre della stessa frequenza. Un rivelatore, posto in qualunque direzione in uscita dal bersaglio di grafite, dovrebbe così ricevere raggi X con la stessa frequenza usata per bombardare il bersaglio.

Quello che si osserva in realtà è molto diverso. A ogni angolo si rilevano raggi X che hanno due frequenze diverse: una parte della radiazione rilevata ha la stessa frequenza della radiazione incidente, una parte ha invece una frequenza minore (quindi lunghezza d'onda maggiore), diversa a seconda dell'angolo tra il rivelatore e il bersaglio (figura 7).

Figura 7

Lo spettro in lunghezza d'onda dei raggi X diffusi da un bersaglio di grafite. A ogni angolo, oltre alla componente con la stessa lunghezza d'onda λ_0 della radiazione incidente, è presente una componente di lunghezza d'onda $\lambda' > \lambda_0$.



Anche in questo caso il modello corpuscolare della luce permette l'interpretazione del fenomeno osservato: vediamo come.

L'interazione tra un fotone e un elettrone può essere analizzata come urto elastico tra due corpi, durante il quale si conservano l'energia cinetica e la quantità di moto totali. Si suppone che l'elettrone sia inizialmente fermo e sostanzialmente libero, ovvero non vincolato agli atomi del materiale cui appartiene. In base al principio di conservazione dell'energia si ha

$$hf = hf' + K \quad [4]$$

dove K è l'energia cinetica del fotone dopo l'urto e si è usata la relazione $E = hf$ per le energie dei fotoni. Ne deriva che $hf' = hf - K$, cioè che l'energia e la corrispondente frequenza f' del fotone diffuso sono inferiori a quelle del fotone incidente, proprio come osservato da Compton. Poiché $\lambda' = cf'$, la lunghezza d'onda del raggio X diffuso è maggiore rispetto a quella del raggio X incidente.

Nell'ipotesi in cui l'elettrone sia inizialmente fermo, la conservazione della quantità di moto totale richiede che

$$\text{quantità di moto del fotone incidente} = \text{quantità di moto del fotone diffuso} + \text{quantità di moto dell'elettrone} \quad [5]$$

Per ottenere un'espressione per il modulo p della quantità di moto di un fotone, ricordiamo che l'energia e la quantità di moto di una particella sono legate dalla relazione $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$. Un fotone ha massa nulla ($m = 0$ kg), quindi la sua quantità di moto è

$$p = \frac{E}{c}$$

Poiché $E = hf$ e $c = \lambda f$, la quantità di moto di un fotone di frequenza f è

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{\lambda f} = \frac{h}{\lambda} \quad [6]$$

Poiché la quantità di moto è una grandezza vettoriale, facendo riferimento alla figura 8 la conservazione della quantità di moto totale si può scrivere

$$\frac{h}{\lambda} \hat{x} = \left(\frac{h}{\lambda'} \cos \theta + m_e v_x \right) \hat{x} + \left(-\frac{h}{\lambda'} \sin \theta + m_e v_y \right) \hat{y} \quad [7]$$

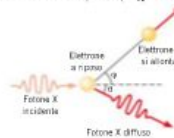


Figura 8

In un esperimento eseguito da Arthur H. Compton, un fotone X urta un elettrone fermo. Il fotone diffuso e l'elettrone si allontanano lungo direzioni differenti.

La conservazione dell'energia è data invece da questa espressione:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2} m_e v^2 \quad [8]$$

Le equazioni [7] e [8] ci permettono di ricavare la relazione tra la lunghezza d'onda del fotone incidente λ , la lunghezza d'onda del fotone diffuso λ' e l'angolo di diffusione θ :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) \quad [9]$$

dove m è la massa dell'elettrone. La quantità $h/(mc)$ viene chiamata **lunghezza d'onda Compton** dell'elettrone e ha il valore $h/(mc) = 2,43 \cdot 10^{-12}$ m. Dal momento che $\cos \theta$ è compreso tra +1 e -1, la variazione di lunghezza d'onda $\lambda' - \lambda$ può andare da 0 a $2h/(mc)$, a seconda del valore di θ , un fatto che Compton aveva osservato.

La presenza di raggi X della stessa frequenza del fascio incidente è dovuta agli urti contro gli elettroni più interni, fortemente legati all'atomo. In questo caso a subire il rinculo è l'intero atomo, che ha una massa molto maggiore di quella dell'elettrone, e la lunghezza d'onda diffusa secondo la formula [9] è quasi identica a quella originale.

Nell'effetto Compton l'elettrone rimbalza poiché acquista una parte della quantità di moto del fotone. In linea di principio, dunque, la quantità di moto che i fotoni possiedono può essere usata per far muovere altri corpi. La figura 9 mostra un sistema di propulsione in via di studio per i viaggi ai confini del Sistema Solare che utilizza una larga vela. L'idea è che la luce solare, colpendo la vela, crei una forza in grado di spingere la navicella lontano dal Sole, nello stesso modo in cui il vento muove una barca a vela.

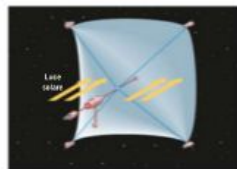


Figura 9

La luce solare che colpisce la vela solare fornisce la propulsione per questa navicella interstellare.

5 LA LUNGHEZZA D'ONDA DI DE BROGLIE E LA NATURA ONDULATORIA DEI CORPI MATERIALI



Figura 10

Se una particella in moto si muove, essa possiede energia, quantità di moto e lunghezza d'onda. La fotografia mostra un notevole ingrandimento del moscerino della frutta, ottenuto con un microscopio elettronico. Questo microscopio utilizza elettroni al posto della luce. La risoluzione dei dettagli è eccezionale perché la lunghezza d'onda di un elettrone può risultare molto inferiore rispetto a quella della luce visibile. I colori sono frutto di un'elaborazione grafica.

Gli esperimenti che abbiamo considerato finora mostrano la manifestazione del principio di complementarità per la luce.

L'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton forniscono una chiara evidenza del fatto che la luce può manifestare caratteristiche corpuscolari attribuibili ai pacchetti di energia chiamati fotoni. D'altro canto, l'interferenza e la diffrazione sono fenomeni in cui la luce si comporta come un'onda.

Nel 1923 il fisico francese Louis de Broglie (1892-1987) avanzò la sorprendente ipotesi che le particelle materiali possano manifestare un comportamento di tipo ondulatorio. Egli suppose che tutti i corpi materiali in movimento abbiano associata una lunghezza d'onda (figura 10) e che questa sia data dalla stessa relazione [6] che vale per un fotone:

$$\text{Lunghezza d'onda di de Broglie} \quad \lambda = \frac{h}{p} \quad [10]$$

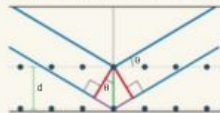
dove h è la costante di Planck e p è il modulo della quantità di moto relativistica della particella.

Oggi λ è nota come **lunghezza d'onda di de Broglie** della particella.

Esempio 4 L'esperimento di Davisson e Germer

Nel 1927 i fisici americani Clinton J. Davisson e Lester H. Germer pensarono di verificare sperimentalmente l'ipotesi di de Broglie, cioè che a ogni particella fosse associata un'onda. Davisson e Germer inviarono un fascio di elettroni su un cristallo di nichel e osservarono che il fascio, riflesso dai piani del reticolo cristallino, produceva una figura di diffrazione.

In figura, i punti neri rappresentano le posizioni dei nuclei degli atomi nel reticolo cristallino. Gli elettroni (le linee blu) vengono mandati contro il cristallo in modo che la loro traiettoria formi un angolo θ con la superficie. Gli elettroni possono essere riflessi dal primo piano cristallino (cioè la superficie del cristallo) oppure dal secondo piano cristallino, a distanza d dal primo.



Se in seguito alla riflessione gli elettroni riflessi dal primo piano interferiscono con quelli riflessi dal secondo, si può osservare a quali angoli θ si ha un massimo di interferenza e a quali angoli si ha un minimo. Poiché i due fasci sono paralleli, quando interferiscono la differenza di cammino è data dai due tratti viola in figura.

► Espriimi la differenza di cammino Δs tra gli elettroni riflessi dal primo piano e quelli riflessi dal secondo in funzione della distanza reticolare d (il segmento verde) e dell'angolo di incidenza θ .

- Espriimi la lunghezza d'onda degli elettroni in funzione dell'angolo θ per cui si ha un massimo di interferenza.
- Sulla base della relazione di de Broglie, calcola l'espressione della lunghezza d'onda di un elettrone in funzione della differenza di potenziale usata per accelerarlo.

La soluzione

- Ciascuno dei due tratti viola ha lunghezza $d \sin \theta$, quindi i due percorsi differiscono di una lunghezza

$$\Delta s = 2d \sin \theta$$

- Se i due fasci si incontrano in un rivelatore, dovremmo avere interferenza costruttiva quando la differenza di cammino è un multiplo della lunghezza d'onda ($\Delta s = n\lambda$).

Il primo massimo è previsto quindi quando:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

- La lunghezza d'onda così ottenuta si può confrontare con quella prevista dalla formula di de Broglie. Una differenza di potenziale V fa raggiungere agli elettroni la velocità di

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

quindi una quantità di moto $p = mv$ e infine una lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Negli esperimenti è stato usato un fascio di elettroni accelerato con differenza di potenziale entro 300 V e le velocità raggiunte sono dell'ordine di 0,03c; possiamo quindi trascurare gli effetti relativistici e usare le relazioni classiche per energia e quantità di moto.

La lunghezza d'onda ricavata dalla figura di diffrazione degli elettroni coincide proprio con quella prevista dall'ipotesi di de Broglie.

Anche altre particelle diverse dagli elettroni possono manifestare proprietà ondulatorie. Per esempio, si usa la diffrazione di neutroni per studiare le strutture dei cristalli. La figura 11 paragona le figure di diffrazione da parte di un cristallo di sale (NaCl) ottenibili con neutroni e con raggi X.

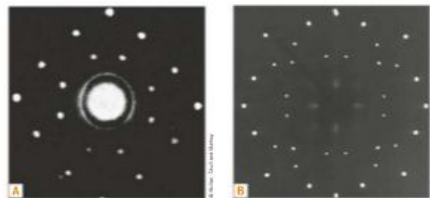


Figura 11

Figura di diffrazione con i neutroni (A) e con i raggi X (B) da parte di un cristallo di cloruro di sodio (NaCl).

Sebbene ogni particella in movimento possieda una lunghezza d'onda di de Broglie, gli effetti di tale lunghezza d'onda sono osservabili solo nel caso di particelle la cui massa sia molto piccola, dell'ordine, per esempio, di quella dell'elettrone o del neutrone.

Esempio 5 Un elettrone e una pallina da tennis a confronto

Determina la lunghezza d'onda di de Broglie:

- ▶ di un elettrone (massa = $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) in moto a una velocità di $6 \cdot 10^6$ m/s;
- ▶ di una pallina da tennis (massa = 0,06 kg) in moto a una velocità di 13 m/s.

La soluzione

Le velocità sono piccole rispetto a quella della luce, quindi possiamo ignorare gli effetti relativistici ed esprimere la quantità di moto come il prodotto tra la massa e la velocità.

▶ Dall'equazione [10] otteniamo

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(6,0 \cdot 10^6 \text{ m/s})} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Una lunghezza d'onda di de Broglie di $1,2 \cdot 10^{-10}$ m è più o meno uguale alle distanze interatomiche di un solido, come il cristallo di nichel usato da Davison e Germer, e, quindi, porta agli effetti di diffrazione osservati.

▶ Un calcolo simile a quello precedente mostra che la lunghezza d'onda di de Broglie di una pallina da tennis è $\lambda = 8,5 \cdot 10^{-24}$ m. Questa lunghezza d'onda è notevolmente piccola, anche se paragonata con le dimensioni di un atomo (10^{-10} m) o di un nucleo (10^{-14} m). Quindi il rapporto λ/d tra questa lunghezza d'onda e la larghezza d di un'apertura ordinaria, come una finestra, è così piccolo che non è possibile osservare la diffrazione di una pallina da tennis da parte di una finestra.

6 ONDE DI PROBABILITÀ

Sia la luce sia le particelle si comportano in alcuni esperimenti come onde e in altri come corpuscoli.

In particolare, sia per la luce sia per le particelle possiamo dire che:

- la loro propagazione può essere prevista utilizzando un modello ondulatorio;
- la loro interazione con la materia (quindi anche con un rivelatore) si può descrivere bene con un modello corpuscolare.

In altri termini:

- possiamo calcolare con il modello ondulatorio dove troveremo massimi e minimi di interferenza sia per la luce che per le particelle;
- la misura dell'intensità dei massimi e dei minimi è in realtà un conteggio di interazioni corpuscolari (quanti fotoni o quanti elettroni interagiscono con il rivelatore).

L'equazione di de Broglie per la lunghezza d'onda di una particella non offre però alcuno spunto per capire di che tipo sia l'onda associata a una particella materiale. Per avere una prima idea della natura di tale onda, osserviamo la figura 12. La parte A mostra la figura a frange su uno schermo, ottenuta eseguendo

un esperimento di Young con la doppia fenditura con l'utilizzo di elettroni al posto della luce. Le frange chiare hanno luogo nei punti in cui le onde provenienti dalle fenditure interferiscono costruttivamente, mentre le frange scure corrispondono a zone in cui le onde interferiscono distruttivamente.

Quando un elettrone passa attraverso la doppia fenditura e colpisce lo schermo, il punto di arrivo diventa luminoso; le parti B, C e D della figura 12 illustrano il modo in cui questi punti diventano sempre più numerosi al passare del tempo. Con l'accumularsi degli elettroni sullo schermo, i punti luminosi finiscono per formare la figura a frange evidente nella parte D.

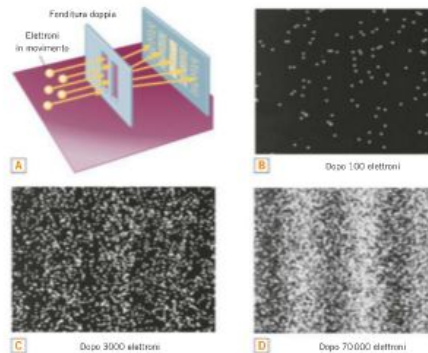


Figura 12

In questa versione dell'esperimento di Young che utilizza elettroni, la caratteristica figura a frange diventa evidente solo dopo che un numero sufficiente di elettroni ha colpito lo schermo (da A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki e H. Ezawa, *Am. J. Phys.* 57 (2): 117, Feb. 1989).

L'esperimento di Young con gli elettroni è stato ripetuto nel 1974 a Bologna da tre fisici italiani, Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi, che riuscirono a costruire un apparato in grado di far arrivare un solo elettrone alla volta sullo schermo. Anche loro ottennero una figura di interferenza, dimostrando che l'interferenza ottenuta non è causata dall'interferenza di una particella con un'altra ma dal comportamento ondulatorio dell'elettrone.

Le frange luminose si ottengono quindi dove esiste un'alta probabilità che gli elettroni colpiscano lo schermo, quelle scure dove la probabilità è bassa.

È questa la chiave per comprendere che cosa sono le onde associate alle particelle. **Le onde associate alle particelle sono onde di probabilità**, il cui valore in un determinato punto dello spazio fornisce un'indicazione della probabilità di trovare la particella in tale punto. Nella zona in cui è situato lo schermo, l'andamento della probabilità associato con le onde dà luogo alla figura a frange. Il fatto che non siano visibili frange nella parte B della figura non significa che lì non siano presenti onde di probabilità; semplicemente sono troppo pochi gli elettroni che hanno colpito lo schermo e la figura non è ancora riconoscibile.

La distribuzione di probabilità che porta alle frange della figura 12 è analoga a quella dell'intensità luminosa responsabile delle frange nell'originario esperimento di Young. Si è dimostrato che l'intensità della luce è proporzionale al quadrato dei campi elettrico o magnetico associati all'onda. In modo analogo, nel caso delle onde associate alle particelle la probabilità è proporzionale al quadrato

del modulo di una grandezza ψ (lettera greca «psi»), che viene chiamata **funzione d'onda** della particella.

Nel 1925 il fisico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961) e il fisico tedesco Werner Heisenberg (1901-1976) svilupparono in maniera indipendente due formulazioni teoriche per calcolare la funzione d'onda. Essi fondarono così una nuova branca della fisica chiamata **meccanica quantistica**. Il termine **quanto** si riferisce al fatto che su scala atomica, laddove occorre considerare le onde associate alle particelle, l'energia è quantizzata, in modo che solo certe particolari energie sono permesse.

La meccanica quantistica è essenziale per capire la struttura atomica e i fenomeni a essa collegati e l'equazione di Schrödinger per il calcolo della funzione d'onda è ormai largamente usata. Esploreremo la struttura dell'atomo basata sulle idee della meccanica quantistica nel prossimo capitolo.

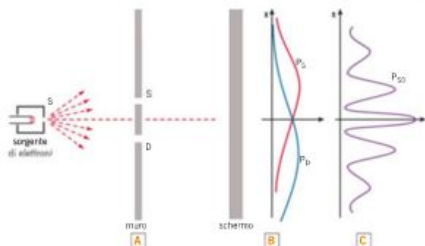
L'esperimento influenza il risultato

L'interpretazione delle onde associate alle particelle come onde di probabilità ci permette di capire in che modo l'allestimento di un esperimento può influenzare il risultato.

Prepariamo un esperimento di Young con doppia fenditura per un fascio di elettroni in modo da poter aprire una, l'altra o entrambe le fenditure (figura 13):

Figura 13

- A. Un fascio di elettroni viene mandato contro una parete con una doppia fenditura.
B. Distribuzione degli elettroni ottenuta aprendo una sola fenditura alla volta.
C. Distribuzione degli elettroni ottenuta con entrambe le fenditure aperte.



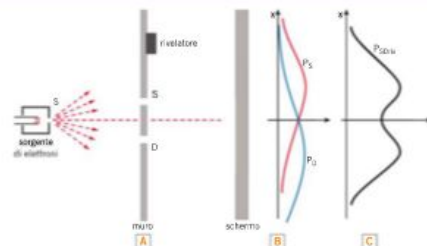
- la curva rossa rappresenta la distribuzione di intensità di elettroni che si ottiene aprendo solo la fenditura di sinistra;
- la curva blu rappresenta la distribuzione di intensità di elettroni che si ottiene aprendo solo la fenditura di destra;
- la curva viola rappresenta la distribuzione di intensità di elettroni che si ottiene aprendo entrambe le fenditure e non è uguale alla somma delle altre due curve.

La distribuzione degli elettroni sullo schermo indica che il fascio si propaga come un'onda. Solo nel momento in cui avviene l'interazione con lo schermo, l'elettrone si comporta come una particella puntiforme ed è possibile dire che «si trova in un punto».

Se ora inseriamo nell'esperimento un rivelatore per determinare da che fenditura passano gli elettroni, sullo schermo appare una figura diversa (figura 14). L'interazione con il rivelatore impone infatti all'elettrone di specificare la sua posizione e l'elettrone si comporta allora da particella. La curva di intensità che si ottiene (curva nera) è in questo caso data dalla somma delle due curve ottenute chiudendo una fenditura alla volta.

Figura 14

L'esperimento degli elettroni con doppia fenditura viene ripetuto con un dispositivo che permette di sapere da che fenditura è passato l'elettrone: in questo caso, la distribuzione che si ottiene è la somma delle due distribuzioni che si hanno con una sola fenditura aperta.



In fisica quantistica il **procedimento di misura** non è più separabile dal fenomeno fisico, nel senso che **concorrer a determinare le caratteristiche del sistema**: un fenomeno non può più essere descritto «in sé», ma in relazione al particolare modo scelto per osservarlo.

In particolare, nell'esempio analizzato l'elettrone si comporta come corpuscolo nella sua interazione con il rivelatore di fenditura o con lo schermo e si comporta come un'onda quando lasciato libero di propagarsi.

L'ANGOLO MATEMATICO

La descrizione matematica del comportamento degli elettroni si basa sulla funzione d'onda.

A ogni punto x dello schermo è associato il valore $\psi(x)$ della funzione d'onda, ma l'unica grandezza osservabile è l'intensità di elettroni sullo schermo, che è proporzionale alla probabilità $P(x)$ che un elettrone arrivi in quel punto, data da $P(x) = |\psi_S(x)|^2$.

Se apriamo solo la fenditura sinistra avremo una certa funzione d'onda $\psi_S(x)$ e quindi

$$P_S(x) = |\psi_S(x)|^2$$

Se apriamo solo la fenditura destra avremo un'altra funzione d'onda e quindi

$$P_D(x) = |\psi_D(x)|^2$$

Se apriamo entrambe le fenditure la funzione d'onda sarà la somma dei due casi precedenti $\psi_{SD}(x) = \psi_S(x) + \psi_D(x)$, e la probabilità che l'elettrone arrivi in x è

$$P_{SD}(x) = |\psi_S(x) + \psi_D(x)|^2$$

che è diversa dalla somma delle due probabilità. Il fatto che la formula preveda di calcolare prima la somma e poi il modulo quadrato permette di avere anche interferenza distruttiva tra le onde di probabilità.

Se infine teniamo entrambe le fenditure aperte, ma con il rivelatore di fenditura presente, la funzione d'onda deve tener conto anche dell'interazione col rivelatore di fenditura e la probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto dello schermo è la somma delle probabilità nei casi di singola fenditura:

$$P_{SDiv}(x) = |\psi_S(x)|^2 + |\psi_D(x)|^2 = P_S(x) + P_D(x)$$

7 IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG

Il fatto che la propagazione di luce e particelle sia descrivibile in termini di onde di probabilità significa che i concetti di posizione, traiettoria e velocità vanno interpretati con molta più cautela di quanto non accada per gli oggetti macroscopici. Il principio di indeterminazione di Heisenberg che discutiamo in questo paragrafo è un modo per tenere conto di alcuni degli aspetti ondulatori nella propagazione delle particelle senza necessariamente abbandonare del tutto il linguaggio classico.

In base a quanto visto nel paragrafo precedente, le frange chiare della figura 12 corrispondono ai punti in cui la probabilità che un elettrone colpisca lo schermo è alta. Dal momento che è presente un certo numero di frange chiare, ciò significa che esiste un certo numero di punti dello schermo in cui questa probabilità è diversa da zero.

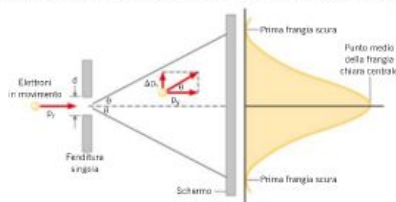
Non possiamo prevedere esattamente quale punto dello schermo verrà colpito dal singolo elettrone. Tutto ciò che possiamo fare è indicare la probabilità che l'elettrone vada a finire in un determinato punto. Non è più possibile affermare, come suggerito dalle leggi di Newton, che il singolo elettrone, inviato contro la doppia fenditura, proceda lungo una determinata traiettoria e colpisca un punto preciso dello schermo.

Questo semplice modello non funziona quando una particella di dimensioni paragonabili a quelle di un elettrone passa attraverso una coppia di fenditure ravvicinate. Poiché in tali circostanze diventa importante la natura ondulatoria delle particelle, si perde la possibilità di prevedere il percorso seguito dal singolo elettrone. Solo il comportamento medio di un elevato numero di particelle risulta prevedibile, mentre il comportamento della singola particella non è determinabile a priori.

Per analizzare più chiaramente la natura di questa indeterminazione, consideriamo degli elettroni inviati attraverso una fenditura singola, come in figura 15.

Figura 15

Quando un numero sufficiente di elettroni passa attraverso una fenditura singola e colpisce uno schermo, viene prodotta una figura a frange chiare e scure (qui viene mostrata solo la frangia centrale). Questa figura è dovuta alla natura ondulatoria dell'elettrone ed è analoga a quella prodotta dalle onde luminose.



Dopo che un numero sufficientemente elevato di elettroni avrà colpito lo schermo, emergerà una figura di diffrazione. La figura che riguarda gli elettroni consiste in un'alternanza di frange chiare e scure ed è analoga a quella associata alla diffrazione della luce. La figura 15 riproduce la fenditura e le prime frange scure da entrambi i lati della frangia chiara centrale. La frangia centrale è chiara perché in tutta la zona compresa tra le frange scure gli elettroni colpiscono lo schermo. Trascurando gli elettroni che colpiscono lo schermo al di fuori della frangia centrale, l'apertura angolare con cui gli elettroni vengono diffratti è fornita dall'angolo θ riportato nella figura.

Per giungere nei punti appartenenti all'intervallo della frangia centrale alcuni elettroni devono aver acquisito una componente della quantità di moto lungo l'asse x , nonostante siano pervenuti sulla fenditura viaggiando lungo l'asse y e quindi siano privi di una quantità di moto iniziale lungo l'asse x . La figura mostra che la componente x della quantità di moto acquisita può valere al massimo Δp_x . Il simbolo Δp_x corrisponde alla differenza tra il massimo valore della quantità di moto acquisita dall'elettrone dopo il passaggio attraverso la fenditura e il suo valore nullo prima di attraversarla. Δp_x rappresenta quindi l'indeterminazione nella componente x della quantità di moto, in quanto tale componente può assumere tutti i valori compresi tra zero e Δp_x .

È possibile collegare Δp_x con la larghezza d della fenditura. Per farlo, supponiamo che l'equazione $\sin \theta = m\lambda/d$, $m = 1, 2, 3 \dots$, applicabile alle onde luminose, sia utilizzabile anche per particelle con lunghezza d'onda di de Broglie λ . Tale equazione scritta per $m = 1$, $\sin \theta = \lambda/d$, specifica l'angolo θ che localizza la prima frangia scura. Se θ è piccolo, allora $\sin \theta = \tan \theta$. Inoltre, la figura 15 indica che $\tan \theta = \Delta p_x/p_y$, dove p_y è la componente y della quantità di moto dell'elettrone. Quindi $\Delta p_x/p_y = \lambda/d$. Ma $p_y = h/\lambda$ secondo l'equazione di de Broglie, in modo che

$$\frac{\Delta p_x}{p_y} = \frac{\Delta p_x}{h/\lambda} = \frac{\lambda}{d}$$

Di conseguenza

$$\Delta p_x = \frac{h}{d} \quad [11]$$

in cui si nota che minore è la larghezza della fenditura, maggiore risulta l'indeterminazione nella componente x della quantità di moto dell'elettrone.

Fu Heisenberg il primo a ipotizzare che l'indeterminazione Δp_x nella componente x della quantità di moto sia collegata all'indeterminazione nella componente x della posizione dell'elettrone che attraversa la fenditura. Siccome l'elettrone può attraversare la fenditura di larghezza d in un suo punto qualsiasi, l'indeterminazione nella componente x della posizione dell'elettrone è $\Delta x = d$. Sostituendo Δx a d nell'equazione [11] si ottiene che $\Delta p_x \approx h/\Delta x$, ovvero $(\Delta p_x) \cdot (\Delta x) = h$.

Il risultato ottenuto nel caso di un esperimento di diffrazione può essere generalizzato e assume la forma di principio, noto come **principio di indeterminazione di Heisenberg**.

$$\text{Quantità di moto e posizione } (\Delta p_x) \cdot (\Delta x) \geq \frac{h}{4\pi} \quad [12]$$

dove Δx è l'indeterminazione nella componente x della posizione di una particella e Δp_x è l'indeterminazione nella componente x della quantità di moto della particella.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg fissa alcuni limiti alla precisione con cui posizione e quantità di moto di una particella possono essere contemporaneamente specificati. Tali limiti non sono semplicemente dovuti a tecniche di misurazione poco precise: essi sono limiti fondamentali imposti dalla natura e non è possibile «aggirarli».

L'equazione [12] indica che Δp_x e Δx non possono essere entrambe arbitrariamente piccole. Se una delle due è piccola, l'altra deve essere grande, in modo che il loro prodotto sia maggiore o uguale a $h/4\pi$. Per esempio, se la posizione di una particella è esattamente nota, in modo che Δx sia zero, allora Δp_x risulta avere un valore «infinitamente grande» e quindi la quantità di moto della particella

è completamente indeterminata. Al contrario, se supponiamo che Δp_x sia zero, allora Δx che assume un valore «infinitamente grande» e la posizione della particella è del tutto indeterminata. In altre parole, il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che è impossibile specificare contemporaneamente con precisione assoluta sia la quantità di moto sia la posizione di una particella.

Esiste un principio di indeterminazione anche a proposito dell'energia e del tempo.

$$\text{Energia e tempo} \quad (\Delta E) \cdot (\Delta t) \geq \frac{h}{4\pi} \quad [13]$$

dove ΔE è l'indeterminazione nell'energia di una particella che si trova in un determinato stato e Δt è l'indeterminazione nell'intervallo di tempo durante il quale la particella permane in quello stato.

Il prodotto delle indeterminazioni nell'energia ΔE di una particella in un certo stato e nell'intervallo di tempo Δt durante il quale la particella rimane in quello stato è maggiore o uguale a $h/4\pi$. Quindi l'indeterminazione nell'energia di una particella in un certo stato è tanto maggiore quanto più brevemente la particella si mantiene in tale stato.

RICORDA

osservazione sul principio di indeterminazione di Heisenberg

Il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che il prodotto tra Δp_x e Δx è maggiore o uguale a $h/4\pi$. L'indeterminazione minima si ha quando tale prodotto vale $h/4\pi$.

Esempio 6 Piccole e grandi masse

Supponiamo che la posizione di un corpo lungo la direzione x sia nota con precisione tale da comportare un'indeterminazione nella posizione pari solo a $\Delta x = 1,5 \cdot 10^{-11}$ m.

- ▶ Determina la minima indeterminazione nella quantità di moto del corpo.
- ▶ Stabilisci la corrispondente minima indeterminazione nella velocità del corpo nel caso in cui esso sia un elettrone ($m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).
- ▶ Esegui lo stesso calcolo nel caso in cui il corpo sia una pallina da ping-pong di massa $2,2 \cdot 10^{-3}$ kg.

La soluzione

- ▶ La minima indeterminazione nella componente x della quantità di moto è

$$\Delta p_x = \frac{h}{4\pi\Delta x} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4\pi(1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m})} = 3,5 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

- ▶ Dal momento che $\Delta p_x = m\Delta v_x$, la minima indeterminazione sulla velocità dell'elettrone è

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} = \frac{3,5 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 3,8 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Quindi la piccola indeterminazione nella componente x della posizione dell'elettrone dà luogo a un'elevata indeterminazione sulla sua velocità.

- ▶ L'indeterminazione nella velocità della pallina da ping-pong è

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} = \frac{3,5 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{2,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = 1,6 \cdot 10^{-21} \text{ m/s}$$

Visto che la massa della pallina da ping-pong è relativamente grande, la piccola indeterminazione nella componente x della sua posizione dà luogo a un'indeterminazione nella sua velocità molto minore di quella dell'elettrone. Quindi, al contrario di quanto avviene per l'elettrone, possiamo sapere contemporaneamente dove si trova la palla e a che velocità si sta muovendo, con una precisione decisamente alta.

Key concepts

I CONCETTI FONDAMENTALI



GUARDA! i video
Recap in English

1 CORPUSCOLI E ONDE: DUE MODELLI PER I FENOMENI

Dualismo onda-corpuscolo: un'onda può manifestare proprietà corpuscolari e una particella caratteristiche ondulatorie.

2 L'EFFETTO FOTOELETRICO E I FOTONI

Energia di un fotone: la radiazione elettromagnetica è formata da fotoni, che sono pacchetti di energia. L'energia di un fotone è

$$E = hf$$

dove h è la costante di Planck e f è la frequenza del fotone.

Un fotone non ha massa e viaggia sempre con velocità pari a c .

Effetto fotoelettrico o lavoro di estrazione: l'effetto fotoelettrico è il fenomeno in cui la luce colpisce la superficie di un metallo estraendone elettroni. Il lavoro di estrazione W_0 di un metallo è il minimo lavoro necessario per estrarre un elettrone dal metallo.

Caratteristiche dell'effetto fotoelettrico

- Un metallo emette fotoelettroni solo se la frequenza della luce incidente è superiore a un valore soglia f_0 .
- L'energia cinetica massima dei fotoelettroni espulsi non varia quando l'intensità della luce aumenta e la sua frequenza resta costante.

Conservazione dell'energia ed effetto fotoelettrico: gli elettroni emessi dal metallo possono avere un'energia cinetica massima K_{max} legata all'energia hf del fotone incidente e al lavoro di estrazione W_0 del metallo:

$$hf = K_{max} + W_0$$

3 LA RADIAZIONE DI CORPO NERO E L'IPOTESI DI PLANCK

Corpo nero: è un qualsiasi oggetto che, a temperatura costante, assorbe tutta la radiazione elettromagnetica che lo colpisce. La distribuzione dell'energia nella radiazione di corpo nero non dipende dal materiale di cui è costituito ma solo dalla temperatura delle pareti.

Legge di Stefan-Boltzmann: un corpo nero a temperatura assoluta T irradia in 1 s da 1 m² di superficie una energia totale

$$E = \sigma T^4$$

σ = costante di Stefan Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ J/(s · m² · K⁴)

Ipotesi di quantizzazione di Planck: l'interazione fra radiazione e materia avviene per scambio di pacchetti discreti di energia, detti *quanti*.

Energie degli oscillatori atomici: Planck ipotizzò che un corpo nero sia costituito da oscillatori atomici che possono avere solo energie quantizzate espresse da

$$E = nhf \quad \text{con} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

h = costante di Planck = $6,626\,068\,76 \cdot 10^{-34}$ J · s

f = frequenza di vibrazione dell'oscillatore

4 LA QUANTITÀ DI MOTO DI UN FOTONE E L'EFFETTO COMPTON

Quantità di moto di un fotone: il modulo della quantità di moto di un fotone vale

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

h = costante di Planck

λ = lunghezza d'onda del fotone

Effetto Compton: corrisponde alla diffusione di un fotone da parte di un elettrone di un determinato materiale. Il fotone diffuso ha una frequenza (e quindi un'energia) inferiore rispetto al fotone incidente.

Variazione della lunghezza d'onda nell'effetto Compton: la differenza fra la lunghezza d'onda λ' del fotone diffuso e la lunghezza d'onda λ del fotone incidente è legata all'angolo di diffusione θ dalla relazione

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

dove m è la massa dell'elettrone. La quantità $h/(mc)$ è detta *lunghezza d'onda Compton* dell'elettrone.

5 LA LUNGHEZZA D'ONDA DI DE BROGLIE E LA NATURA ONDULATORIA DEI CORPI MATERIALI

Lunghezza d'onda di de Broglie di una particella

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

dove h è la costante di Planck e p è il modulo della quantità di moto relativistica della particella.

7 IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG

Fissa dei limiti alle possibilità di conoscere il comportamento di una particella.

È espresso dalla relazione (*quantità di moto e posizione*):

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

dove Δx è l'indeterminazione nella componente x della posizione di una particella e Δp_x è l'indeterminazione nella componente x della quantità di moto della particella.

Oppure può essere espresso dalla relazione (*energia e tempo*):

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

dove ΔE è l'indeterminazione nell'energia della particella quando si trova in un determinato stato e Δt è l'indeterminazione nell'intervallo di tempo durante il quale la particella permane in quello stato.

**Quesito 1**

Considera la formula di Compton sulla differenza tra le lunghezze d'onda del fotone incidente e del fotone diffuso: $\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos\varphi)$.

A Dimostra che, nell'effetto Compton, la differenza fra la frequenza f_0 del fotone incidente e quella del fotone dopo l'urto, indicata con f , è data dalla seguente formula:

$$f_0 - f = \nu_0 \Delta \frac{\sin^2 \varphi}{1 + \cos \varphi}$$

dove $\Delta = \frac{hf}{mc^2}$, mentre φ è l'angolo di diffusione.

Quesito 2

L'espressione dello spettro del corpo nero secondo la teoria di Planck è data da

$$I(f) = \frac{2\pi h}{c^2} f^3 \frac{1}{e^{hf/kT} - 1}$$

Per determinare l'espressione della frequenza per cui si ha il valore massimo della distribuzione in funzione della temperatura si può derivare la distribuzione rispetto a f e porre la derivata uguale a zero.

Con il cambiamento di variabile $x = \frac{hf}{kT}$ si ottiene l'equazione

$$x = 3(1 - e^{-x})$$

A Risolvi approssimativamente l'equazione a meno di 0,1 e ricava quindi il valore $\frac{f_{\max}}{T}$, che esprime la legge di spostamento di Wien, secondo cui la frequenza f_{\max} per cui si ha il massimo dello spettro è direttamente proporzionale alla temperatura.

Problema

In una serie di esperimenti di effetto fotoelettrico condotti con una radiazione visibile, nei quali si è utilizzato come catodo fotoemittente del cesio, si sono ottenuti i seguenti valori

Frequenza della radiazione incidente (Hz)	Potenziale di arresto (V)
$3,50 \cdot 10^{14}$ (luce rossa)	---
$5,5 \cdot 10^{14}$ (luce arancione)	0,34
$6,0 \cdot 10^{14}$ (luce verde)	0,55
$6,9 \cdot 10^{14}$ (luce blu)	0,93
$7,4 \cdot 10^{14}$ (luce viola)	1,15

A Rappresenta i dati in un grafico, traccia la retta che passa per i punti e trovale l'equazione.

B Spiega il significato fisico dei coefficienti che compaiono nell'equazione della retta.

C Calcola la costante di Planck, la frequenza di soglia e il potenziale di estrazione a partire da questi dati sperimentali.

D Perché in tabella non è riportato nessun valore del potenziale di arresto in corrispondenza della luce rossa?

E Rappresenta i dati in un secondo grafico in cui si riporta in ascissa la lunghezza d'onda λ e in ordinata il potenziale di arresto V_{stop} . Quale curva passa per i dati? Qual è la sua equazione $V_{\text{stop}}(\lambda)$? Che significato ha il valore di $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} V_{\text{stop}}(\lambda)$?

$$[V_{\text{stop}} = 4,25 \cdot 10^{-12} f - 2,0; 4,7 \cdot 10^{-14} \text{ Hz}; 2,0 \text{ V}]$$

Math-Phys integration

VERSO L'ESAME

IN 2 ORE

ESERCIZI

Quesito 1

La diffrazione dei neutroni a volte viene utilizzata per ottenere informazioni sulla struttura di un reticolo cristallino. Poiché i neutroni non sono elettricamente carichi non possono venire accelerati da una differenza di potenziale e di solito vengono prodotti in un reattore nucleare.

Le distanze interatomiche nei reticoli cristallini sono dell'ordine di 10^{-10} m e la diffrazione dei neutroni è particolarmente significativa quando la loro lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza.

A Che velocità devono avere perché questo accada?

Neutroni di energia cinetica pari a 0,20 eV incidono su un cristallo e si ottengono dei massimi di diffrazione per un angolo di $5,15^\circ$.

B Calcola la distanza tra i piani cristallini.

$$[3,97 \cdot 10^3 \text{ m/s}; 3,57 \cdot 10^{-10} \text{ m}]$$

Quesito 2

Antares è la stella più luminosa dello Scorpione, una costellazione visibile verso sud, sopra l'orizzonte, durante le notti estive.



A Spiega in quale senso Antares, come tutte le altre stelle, può essere considerata un corpo nero.

B Il massimo dell'energia irradiata da Antares corrisponde a una lunghezza d'onda di 810 nm. Calcola la temperatura superficiale di Antares.

C Spiega come puoi individuare Antares fra le stelle presenti nella foto.

D Antares ha un raggio di circa $1,2 \cdot 10^9$ km. Stima la sua luminosità assoluta, ossia la potenza totale che irradia nello spazio.

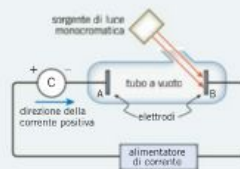
$$[3600 \text{ K}; 1,7 \cdot 10^{32} \text{ W}]$$

Problema

Avendo a disposizione un apparato per sperimentare l'effetto fotoelettrico decidiamo di eseguire diversi esperimenti per verificare la validità del modello del fotone di luce e in particolare la legge che spiega come il fenomeno si possa interpretare correttamente imponendo la conservazione dell'energia nell'interazione uno a uno fotone-elettrone $K_{\text{max}} = hf - W_0$.

L'apparato è formato da un tubo a vuoto che contiene due elettrodi A e B a cui puoi applicare un potenziale. In B possiamo sostituire diverse placchette metalliche di cui conosciamo il lavoro di estrazione:

Metallo	Lavoro di estrazione [eV]
Alluminio	4,28
Rame	4,65
Oro	5,30
Potassio	2,30
Piombo	4,14
Nickel	5,15
Magnesio	3,66
Berillio	4,98



Per prima cosa installiamo la targhetta d'oro nel catodo B e facciamo incidere su di essa una luce monocromatica di frequenza $f = 1200$ THz. Il voltaggio tra gli elettrodi è nullo.

A Spiega perché non circola corrente nel circuito.

B Inizia a circolare corrente se aumentiamo il voltaggio da 0 a 5V? Spiega.

C Inizia a circolare corrente se aumentiamo l'irraggiamento della radiazione luminosa? Spiega.

D Come possiamo modificare la radiazione incidente in termini di lunghezza d'onda/frequenza in modo che inizi a circolare corrente?

E Che placchetta metallica potremmo sostituire, tra quelle a disposizione, per vedere circolare corrente?

Ora sostituiamo nell'apparato una placchetta metallica di piombo e la irraggiamo con una radiazione monocromatica di lunghezza d'onda $\lambda = 220$ nm. Il voltaggio tra gli elettrodi è nullo.

F Spiega perché circola corrente nel circuito.

G Come possiamo modificare l'apparato in termini di lunghezza d'onda della radiazione incidente o tipo di placchetta metallica in modo che siano estratti elettroni con una maggior energia cinetica?

H Per impedire, invece, che circoli corrente nel circuito possiamo applicare un controcampo in modo gli elettroni emessi dalla placchetta vengano fermati prima di raggiungere l'anodo A. Calcola il potenziale minimo che possiamo applicare (potenziale di arresto) per arrestarli nel caso della situazione data.

I Come si modifica il potenziale di arresto raddoppiando la frequenza della radiazione incidente?

Decidiamo di verificare i calcoli fatti applicando una differenza di potenziale ai capi degli elettrodi e, tramite i dati raccolti dall'amperometro, troviamo una curva avente questo andamento:



L Spiega perché, al variare del potenziale, la curva ottenuta ha questa forma.

M Come ti aspetti si modifichi la curva se, lasciando invariata la lunghezza d'onda, aumentiamo l'irraggiamento?

N Come ti aspetti si modifichi il grafico se diminuiamo la lunghezza d'onda?

O Come ti aspetti si modifichi il grafico se la lunghezza d'onda sale a 500 nm?

Infine, tra il materiale, troviamo una placchetta metallica di cui non è indicato il materiale. Variando il potenziale tra gli elettrodi scopriamo che il potenziale di arresto vale 3,62 V se si utilizza una radiazione di lunghezza d'onda pari a 150 nm.

P Di che materiale si può trattare?

$$[1,5 \text{ V}; 4,65 \text{ V}]$$

SPAZIO TEMPO E MOTO Sistemi di riferimento e trasformazioni**SPAZIO TEMPO E MOTO** Cinematica classica e relativistica**GEOMETRIA EUCLIDEA E CARTESIANA** Sistemi di riferimento e luoghi geometrici**Quesito 1**

Un'astronave A lunga 10 m sta passando a fianco di una stazione spaziale orbitante muovendosi alla velocità $v_A = 0,75 c$ rispetto alla stazione. Al suo interno un astronauta sta effettuando un esperimento con un laser, sparando un raggio laser rasoterra dal fondo verso la prua dell'astronave.

A Calcola la velocità del raggio laser misurata rispetto alla stazione orbitante con la legge di composizione delle velocità.

B Calcola le coordinate spazio-temporali dell'evento di arrivo del raggio alla punta della nave nei due sistemi.

Considera le origini dei sistemi astronave e stazione spaziale coincidenti nel punto in cui viene sparato il raggio laser a tempo $t = t' = 0$ e la direzione del moto dell'astronave lungo l'asse x dei due sistemi.

$$[c; E' = (\frac{10}{c} \text{ s}; 10 \text{ m}); E = (2,64 \cdot \frac{10}{c} \text{ s}; 26,4 \text{ m})]$$

SPAZIO TEMPO E MOTO Moto di un punto materiale e di un corpo rigido**SPAZIO TEMPO E MOTO** Cinematica classica e relativistica**ARITMETICA E ALGEBRA** Equazioni, disequazioni e sistemi**Quesito 2**

Considera un elettrone ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) che si muove in un piano secondo la legge oraria:

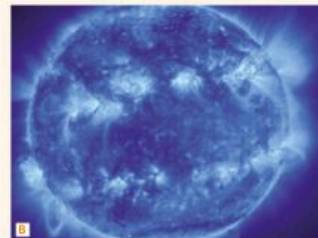
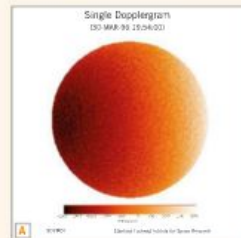
$$\begin{cases} x(t) = \frac{c}{6} e^{-2t} \\ y(t) = \frac{c}{4} (2 - e^{-2t}) \end{cases}$$

A Dimostra che la traiettoria è rettilinea e determina la legge del modulo della velocità al variare del tempo.

B Verifica che il modulo della velocità è sempre minore della velocità della luce e calcola da che istante in poi la velocità si mantiene in modulo minore di 0,1 c . Ricava la lunghezza d'onda di De Broglie dell'elettrone in quest'istante.

ONDE E PARTICELLE Onde armoniche sonore ed elettromagnetiche**FORZE E CAMPI** Campo elettromagnetico**INSIEMI E FUNZIONI** Calcolo differenziale**Problema 1**

L'irradiazione medio del Sole sull'alta atmosfera terrestre è $1,36 \text{ kW/m}^2$. La luce del Sole impiega circa $8'20''$ per raggiungere la Terra.



A Calcola la potenza media irradiata dal Sole.

Nella sonda SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), lo strumento MDI è stato progettato per rilevare la velocità della fotosfera solare lungo la direzione di vista mediante effetto Doppler.

B La ricostruzione grafica in falsi colori di figura A riporta i risultati di un'osservazione della rotazione solare. Illustra le informazioni contenute in essa (il segno \leftarrow indica velocità verso la Terra).

C Nel caso della maggiore velocità di avvicinamento, calcola di quanto differisce da 1 il rapporto f_o/f_e tra la frequenza osservata f_o e la frequenza emessa f_e .

L'immagine di figura B è stata registrata da SOHO durante una fase di intensa attività superficiale, durante la quale i gas ionizzati che formano gli archi hanno raggiunto temperature di 1 milione di K. L'immagine è stata ripresa mediante un filtro che fa passare solo radiazioni elettromagnetiche aventi una lunghezza d'onda di 171 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

D Stabilisci in quale parte dello spettro elettromagnetico si colloca tale emissione. Un osservatore avrebbe visto questo spettacolare fenomeno?

Fuori dall'atmosfera terrestre, la distribuzione dell'energia irradiata per unità di superficie e di tempo, cioè quella emessa per 1 s dalla superficie di 1 m^2 e nell'unità di lunghezza d'onda, ha la seguente espressione in funzione della lunghezza d'onda:

$$J(\lambda) = \frac{\alpha}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

dove α e β sono parametri positivi.

E CON I LIMITI Calcola i seguenti limiti, che corrispondono alla densità di energia irradiata per lunghezze d'onda infinitesime e infinitamente grandi:

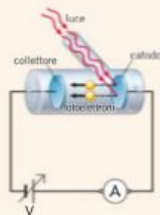
$$\lim_{\lambda \rightarrow 0^+} J(\lambda)$$

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} J(\lambda)$$

$$[3,8 \cdot 10^{19} \text{ W}; 8 \cdot 10^{-14}; 0; 0]$$

ENERGIA E MATERIA Trasformazione dell'energia**ONDE E PARTICELLE** Dualismo onda/particella**Problema 2**

Un apparato per la verifica dell'effetto fotoelettrico è costituito da un catodo metallico illuminato da una radiazione monocromatica, inserito in un circuito con un amperometro, un generatore di tensione e un collettore.



Il catodo è costituito da una lamina di litio, il cui potenziale di estrazione è $V_{\text{cat}} = 2,93 \text{ V}$.

A Spiega che cosa si intende per *frequenza di soglia* e perché la teoria ondulatoria della luce non permetteva di giustificarne l'esistenza mentre il concetto di *fotone* permette di darne un'interpretazione.

B Calcola il valore della frequenza di soglia per questo specifico apparato.

C Se non viene applicata nessuna differenza di potenziale dal generatore, calcola la velocità massima con cui gli elettroni arrivano al collettore quando la luce incidente sul catodo ha frequenza $f = 760 \text{ THz}$.

D Che differenza di potenziale (*potenziale di arresto*) è necessaria perché nessun elettrone arrivi al collettore?

E Costruisci una tabella frequenza/potenziale di arresto con frequenza da 700 THz a 780 THz a intervalli di 20 THz , rappresenta i dati in un grafico e scrivi la relazione teorica tra le due grandezze.

Il catodo ha un'area fotosensibile esposta alla radiazione di $0,5 \text{ cm}^2$. Con una frequenza di 760 THz la radiazione incidente ha un'intensità di 40 W/m^2 . Se la tensione del generatore, invece di frenare gli elettroni per misurare il potenziale di arresto, viene usata per accelerarli verso il collettore, si ottiene una corrente massima di $2,4 \mu\text{A}$, quando tutti gli elettroni emessi dal catodo vengono raccolti dal collettore.

F Considerando un intervallo di 1 s , calcola il numero di fotoni n_f incidenti sul catodo, il numero di elettroni n_e emessi e l'efficienza quantistica dell'apparato $\epsilon = \frac{n_e}{n_f}$.

[707 THz, $2,78 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, $0,22 \text{ V}$]

CHE VOTO TI DARESTI?

Metti una spunta:

 Ho fatto bene

 Ho fatto così così

 Ho fatto male

Assegnati un voto per ogni competenza, poi calcola il tuo voto finale in centesimi.

COMPETENZE		Quesito 1	Quesito 2	Problema 1	Problema 2	Autovalutazione
Analizza						
Hai individuato le leggi o il modello?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>/25
Risolvi						
Hai ottenuto il risultato?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>/30
Interpreta i dati						
Hai interpretato o elaborato i dati?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>/25
Argomenta						
Hai spiegato come sei arrivato al risultato?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>/20

TOTALE/100



GUARDA! gli svolgimenti della simulazione d'esame



CAPITOLO 21 LA TEORIA ATOMICA**Competenze**

Comprendere le principali tappe del passaggio dalla fisica classica alla fisica moderna
Conoscere e descrivere gli esperimenti che portarono alla scoperta dell'elettrone e della quantizzazione della carica elettrica
Descrivere i limiti dell'interpretazione classica degli spettri a righe
Conoscere e confrontare i modelli atomici

Contenuti

Dalla fisica classica alla fisica moderna
Il moto browniano
I raggi catodici e la scoperta dell'elettrone
L'esperimento di Millikan e l'unità fondamentale di carica
Gli spettri a righe
I raggi X
I primi modelli dell'atomo e la scoperta del nucleo

Obiettivi minimi

Illustrare l'esperimento di Thomson
Illustrare l'esperimento di Millikan
Conoscere la legge della diffrazione dei raggi X
Conoscere i modelli atomici di Thomson e Rutherford

Schede

La fisica risponde *La tomografia assiale computerizzata*
CLIL Physics *Synchrotron light*

CAPITOLO 22 LA FISICA QUANTISTICA

Competenze	Obiettivi minimi
<p>Argomentare l'ipotesi quantistica di Planck sulla radiazione del corpo nero</p> <p>Analizzare i singoli esperimenti, mostrare i limiti della spiegazione classica e la necessità di un'ipotesi di quantizzazione dell'energia</p> <p>Definire e descrivere i fotoni</p> <p>Descrivere le ipotesi di Bohr per il modello atomico e le caratteristiche del modello</p> <p>Applicare le ipotesi quantistiche nella risoluzione dei problemi</p> <p>Identificare e analizzare i comportamenti di onde e particelle</p> <p>Comprendere il significato del principio di indeterminazione di Heisenberg</p>	<p>Conoscere l'ipotesi di Planck sulla radiazione del corpo nero</p> <p>Comprendere l'effetto fotoelettrico</p> <p>Comprendere l'effetto Compton</p> <p>Definire energia e quantità di moto per i fotoni</p> <p>Conoscere le caratteristiche dell'atomo di Bohr</p> <p>Calcolare orbite, energie e spettri dell'atomo di idrogeno</p> <p>Conoscere i numeri quantici e il loro significato</p> <p>Calcolare l'indeterminazione su posizione o quantità di moto di una particella</p>

Programmazione didattica 13

CAPITOLO 22 LA FISICA QUANTISTICA

Contenuti	Schede
<p>La radiazione del corpo nero e l'ipotesi di Planck</p> <p>I fotoni e l'effetto fotoelettrico</p> <p>La massa e la quantità di moto del fotone</p> <p>L'effetto Compton</p> <p>Il modello di Bohr dell'atomo di idrogeno</p> <p>L'ipotesi di de Broglie e il dualismo onda-particella</p> <p>Dalle onde di de Broglie alla meccanica quantistica</p> <p>La teoria quantistica dell'atomo di idrogeno</p> <p>Il principio di indeterminazione di Heisenberg</p> <p>L'effetto tunnel quantistico</p>	<p>La fisica risponde <i>I pannelli fotovoltaici</i></p> <p>CLIL Physics <i>Quantum information and teleportation</i></p>

1. La lunghezza d'onda a cui corrisponde il massimo di emissione per un corpo alla temperatura di 2500 °C è:
- A 1,05 μm C 42,5 nm
 B 1,16 μm D 46,3 nm
2. La quantità di moto di un fotone di 3,5 MeV è:
- A $6,6 \cdot 10^{27}$ kg m/s C $5,6 \cdot 10^{-19}$ kg m/s
 B $1,2 \cdot 10^{-2}$ kg m/s D $1,9 \cdot 10^{-21}$ kg m/s
3. Nell'effetto fotoelettrico:
- A al di sopra della frequenza di soglia, maggiore è l'intensità della radiazione, maggiore è la velocità degli elettroni emessi.
 B al di sopra della frequenza di soglia, maggiore è l'intensità della radiazione, minore è il numero degli elettroni emessi.
 C l'emissione di elettroni dalla superficie del metallo si ha solo quando la frequenza della radiazione incidente supera un certo valore di soglia, caratteristico del metallo.
 D l'emissione di elettroni dalla superficie del metallo dipende solo dall'intensità della radiazione incidente e non dalla sua frequenza.
4. In base al modello atomico di Bohr, un elettrone passa dallo stato fondamentale a uno stato eccitato quando l'atomo:
- A acquista energia. C emette luce.
 B emette energia. D si raffredda.
5. L'energia di una possibile orbita permessa nel modello di Bohr dell'atomo di idrogeno è:
- A 6,80 eV C -1,51 eV
 B 1,51 eV D -6,80 eV
6. La velocità di una particella di massa $4,26 \cdot 10^{-27}$ kg alla quale è associata una radiazione di lunghezza d'onda 0,216 Å è:
- A $3,07 \cdot 10^{-23}$ m/s
 B $3,36 \cdot 10^{-18}$ m/s
 C $2,40 \cdot 10^{-3}$ m/s
 D $7,21 \cdot 10^3$ m/s
7. Il modulo del momento angolare di un elettrone secondo la teoria quantistica dell'atomo di idrogeno è:
- A $L_n = \sqrt{\ell(\ell + 1)}h$
 B $L_n = \sqrt{m_\ell(m_\ell + 1)}h$
 C $L_n = \sqrt{\ell(\ell + 1)}h$
 D $L_n = \sqrt{m_\ell(m_\ell + 1)}h$
8. Per quale numero quantico devono differire due elettroni che occupano lo stesso orbitale?
- A Numero quantico principale.
 B Numero quantico del momento angolare.
 C Numero quantico di spin.
 D Numero quantico magnetico.

Risolvi i seguenti problemi

Tempo a disposizione: 50 minuti

Punti totali:/28

1. Illuminando una superficie metallica con una luce verde di lunghezza d'onda 523 nm si misura un'energia cinetica massima degli elettroni di 0,685 eV.
 Determina:
- a) il lavoro di estrazione del metallo;
 b) la massima velocità degli elettroni che si misurerebbe illuminando la superficie con luce verde di frequenza $5,00 \cdot 10^{14}$ Hz;
 c) la massima lunghezza d'onda della luce in grado di estrarre elettroni dalla superficie. Punti/6
2. Un fotone di lunghezza d'onda 32,0 pm è diffuso da un elettrone libero. Lo spostamento di lunghezza d'onda è pari alla lunghezza d'onda Compton dell'elettrone ($\lambda_C = h/m_e c$). Determina:
- a) l'energia del fotone incidente in keV;
 b) l'energia del fotone diffuso;
 c) la velocità dell'elettrone diffuso. Punti/6
3. Un elettrone si trova in un'orbita dell'atomo di idrogeno e possiede un'energia cinetica pari a 0,8464 eV.

Determina:


- a) la quantità di moto dell'elettrone;
 b) la lunghezza d'onda di de Broglie dell'elettrone;
 c) l'orbita in cui si trova l'elettrone;
 d) quanta energia (in eV) è necessario fornire all'elettrone per farlo passare allo stato eccitato $n = 8$;
 e) la lunghezza d'onda del fotone emesso se l'elettrone ritorna allo stato iniziale. Punti/10
4. Un elettrone viaggia con una velocità di $3,5 \cdot 10^3$ m/s in una direzione che forma un angolo di 22° rispetto all'asse x . L'errore relativo sulla componente x della velocità dell'elettrone è $\pm 2 \cdot 10^{-3}$, quello sulla componente y è $\pm 3 \cdot 10^{-3}$. Determina:
- a) l'errore sulle singole componenti della velocità dell'elettrone;
 b) l'errore sulla componente x della quantità di moto dell'elettrone;
 c) con quale errore si può misurare la posizione lungo l'asse x . Punti/6

**WHAT IS REALLY
IMPORTANT TO TEACH?**

<https://www.quantumlab.nat.fau.de/english/index.html>

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

QuantumLab



Introduction:

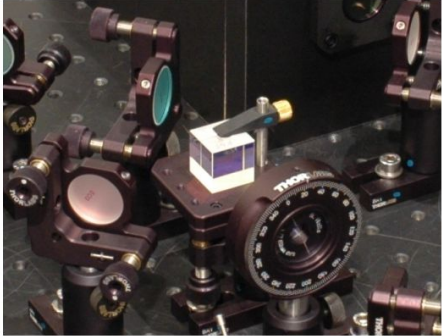
- [start-page](#)
- [concept](#)
- [basics](#)

experiments:

- [setup optic](#)
- [coincidences](#)
- [existence photon](#)
- [quantum-random](#)
- [entanglement](#)
- [cryptography](#)
- [interference](#)
- [photon-statistics](#)
- [Hong-Ou-Mandel](#)
- [Franson](#)

further:


- [literature](#)
- [imprint](#)



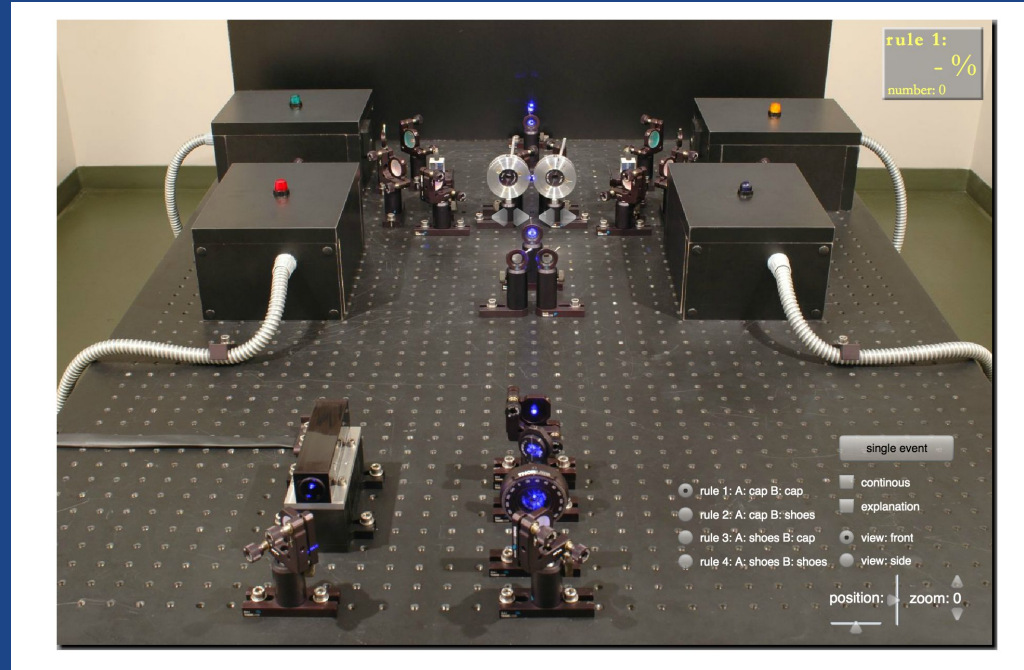
Does light consist of single portions?
Is there randomness in the quantum world?
How does quantum cryptography work?
What is entanglement?

An interactive approach to the fascinating world of quantum physics ([concept](#)).

[German version](#)



Try by yourself !!!



https://phet.colorado.edu/



SIMULATIONS TEACHING RESEARCH ACCESSIBILITY [DONATE](#)



Browse Filter

SUBJECT



21 Results

A-Z

- Physics
 - Motion
 - Sound & Waves
 - Work, Energy & Power
 - Heat & Thermo
 - Quantum Phenomena
 - Light & Radiation
 - Electricity, Magnets & Circuits
- Chemistry
 - General Chemistry
 - Quantum Chemistry

Quantum Phenomena

Alpha Decay

Band Structure

Beta Decay

Blackbody Spectrum

Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics

S. B. McKagan, K. K. Perkins, M. Dubson, C. Malley, S. Reid, R. LeMaster, and C. E. Wieman

Citation: *American Journal of Physics* **76**, 406 (2008); doi: 10.1119/1.2885199

View online: <https://doi.org/10.1119/1.2885199>

View Table of Contents: <https://aapt.scitation.org/toc/ajp/76/4>

Published by the *American Association of Physics Teachers*

<https://doi.org/10.1119/1.2885199>

ABSTRACT

Quantum mechanics is counterintuitive, difficult to visualize, mathematically challenging, and abstract. The Physics Education Technology (PhET) Project now includes 18 simulations on quantum mechanics designed to improve the learning of this subject. These simulations include several key features to help students build mental models and intuition about quantum mechanics: visual representations of abstract concepts and microscopic processes that cannot be directly observed, interactive environments that directly couple students' actions to animations, connections to everyday life, and efficient calculations so that students can focus on the concepts rather than the mathematics. Like all PhET simulations, these are developed using the results of research and feedback from educators, and are tested in student interviews and classroom studies. This article provides an overview of the PhET quantum simulations and their development. We also describe research demonstrating their effectiveness and discuss some insights about student thinking.

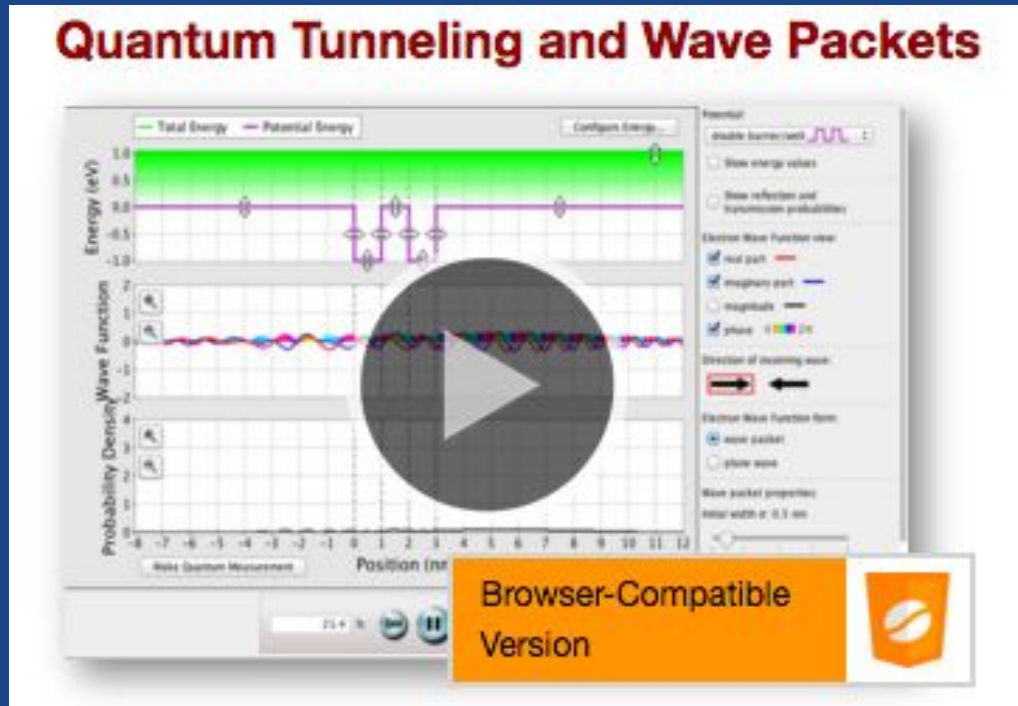
<https://doi.org/10.1119/1.2885199>

Table I. PhET simulations on quantum mechanics.

Fundamental principles	Historical experiments	Applications
Quantum Tunneling and Wave Packets	Photoelectric Effect	Lasers
Quantum Wave Interference	Davisson-Germer: Electron Diffraction	Neon Lights and Other Discharge Lamps
Quantum Bound States	Stern-Gerlach Experiment	Simplified MRI
Double Wells and Covalent Bonds	Rutherford Scattering	Semiconductors
Band Structure	Models of the Hydrogen Atom	Conductivity
Fourier: Making Waves	Blackbody Spectrum	Nuclear Physics

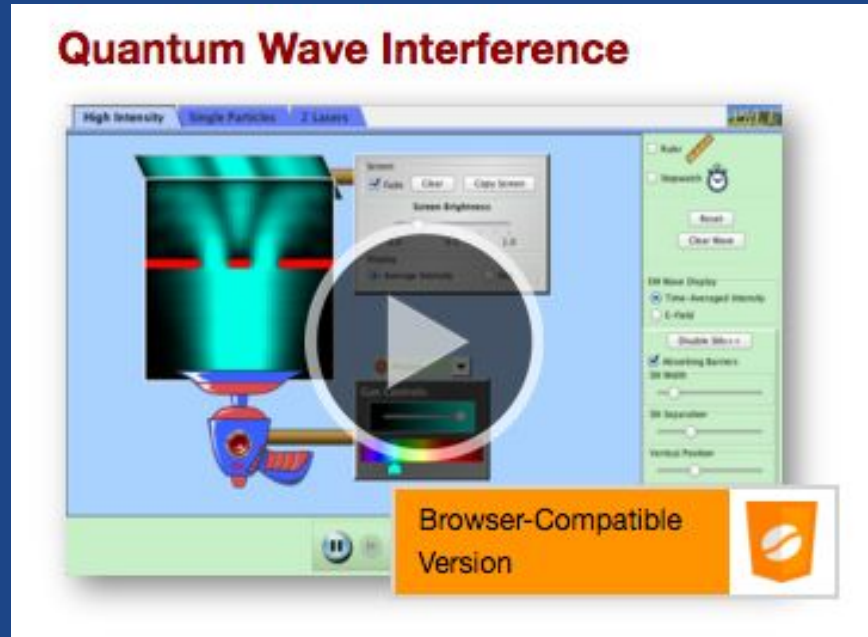
<https://doi.org/10.1119/1.2885199>

Quantum Tunneling and Wave Packets



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>

Quantum Wave Interference



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-wave-interference>

Quantum Bound States

Quantum Bound States

Energy (eV)

Position (nm)

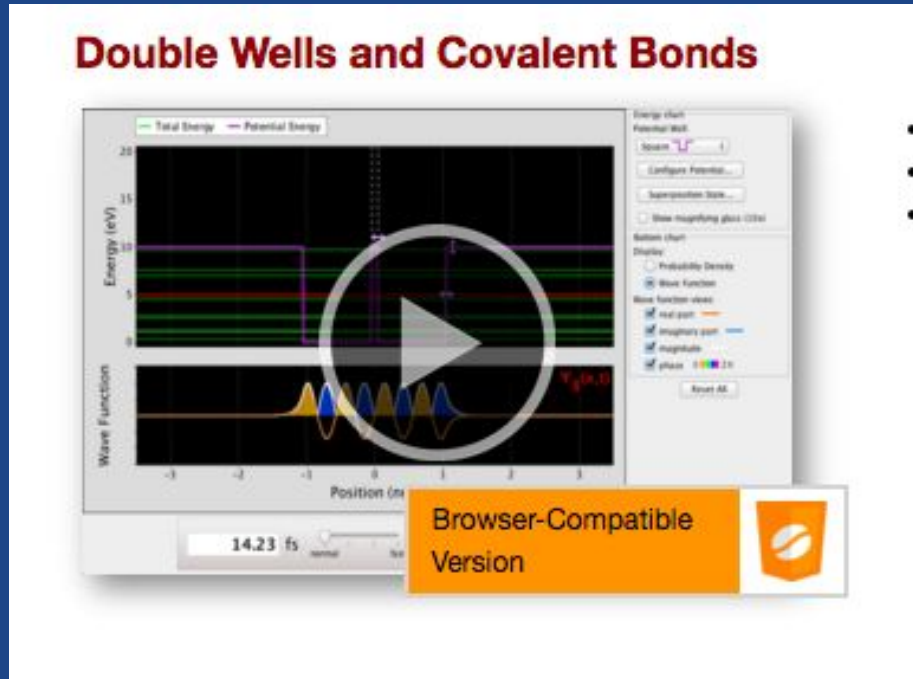
Wave Function

12.21 fs

Browser-Compatible Version

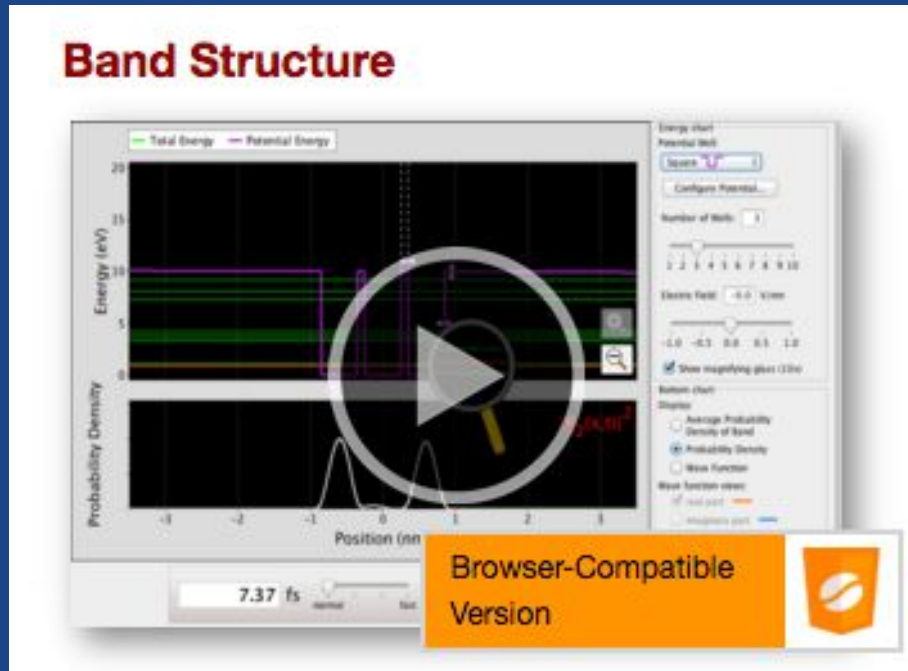
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/bound-states>

Double Wells and Covalent Bond



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/covalent-bonds>

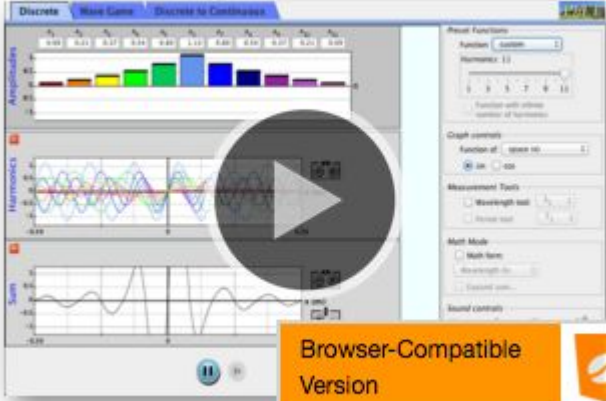
Band Structure



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/band-structure>

Fourier: Making Waves

Fourier: Making Waves

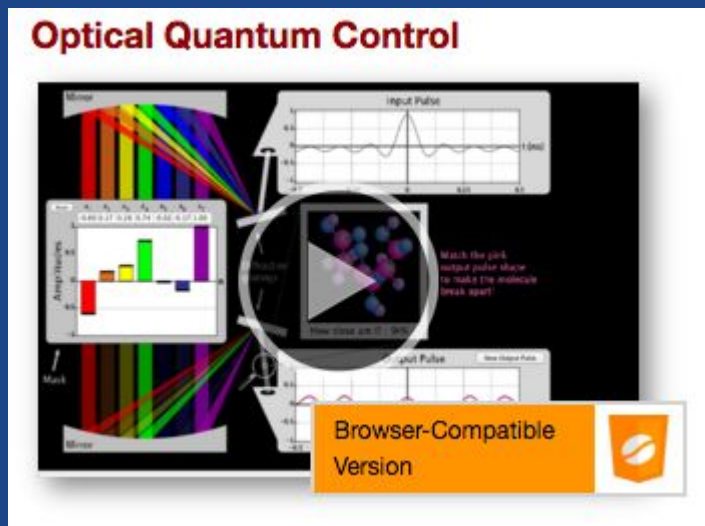


The screenshot displays the PhET simulation interface for 'Fourier: Making Waves'. It features three main panels: 'Amplitudes' at the top with a bar chart showing discrete frequency components; 'HARMONICS' in the middle with a plot of individual sine waves; and 'Sum' at the bottom with a plot of the resulting complex waveform. A large play button is overlaid on the center. The right side contains control panels for 'Phase Functions', 'Graph controls', 'Measurement Tools', 'Math Mode', and 'Sound controls'. An orange banner at the bottom right of the simulation window reads 'Browser-Compatible Version' next to the PhET logo.

Browser-Compatible
Version

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/fourier>

Optical Quantum Control



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/optical-quantum-control>

MQ nella formazione degli insegnanti

GLI INSEGNANTI RIFLETTONO SUI NODI CONCETTUALI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

M. Michelini, L. Santi, A. Stefanel

Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università di Udine

1. Introduzione

Accanto alla formazione in rete sulla meccanica quantistica (MQ) nell'ambito di IDIFO sono state proposte diverse attività nei workshop in presenza. Esse erano in particolare mirate alla riflessione e alla discussione sui nodi concettuali fondanti della teoria:

- una tavola rotonda di presentazione e confronto sulle diverse impostazioni delle proposte sull'insegnamento della MQ offerte in IDIFO (Sperandeo 2004; Stefanel 2008, Battaglia et al. 2010) e delle esperienze di sperimentazione
- una serie di seminari partecipati sui suoi contenuti concettuali, epistemologici, storici
- un work-shop di analisi approfondita di una proposta didattica basata sulla ricerca (Ghirardi et al. 1997; Michelini et al. 2000)
- approfondimenti sull'analisi di casi proposti in forma problematica, come angoli di riflessione di percorsi didattici sulla MQ, in particolare incentrati su: logica quantistica; formalismo; aspetti storici; nodi concettuali

<http://www.fisica.uniud.it/URDF/articoli/ftp/2010/2010-43.pdf>

MQ nella formazione degli insegnanti

- Q1.1** Il comportamento quantistico: quali sono gli elementi che lo caratterizzano/identificano.
- Q1.2** Le proprietà di un sistema: conoscerle o non conoscerle implica l'esistenza di tali proprietà?
- Q1.3** La misura: come cambiano significato e ruolo della misura in MQ rispetto alla fisica classica?
- Q1.4** Il risultato di una misura: sua prevedibilità e natura oggettiva delle proprietà misurate
- Q1.5** Il dominio della MQ: Si può applicare la MQ ai sistemi macroscopici?

MQ nella formazione degli insegnanti

Q2.1 Perché insegnare MQ?

Q2.2 Concetti di base irrinunciabili in una proposta didattica in MQ. Spiegare le ragioni delle scelte.

Q2.3 Quali aspetti privilegiare (formali, storici, logici, concettuali, applicativi)?

<i>Introduction</i> Dean Zollman	1
<i>Conceptual Understanding Of Quantum Mechanics After Using Hands-On And Visualization Instructional Materials</i> N. Sanjay Rebello & Dean Zollman	2
<i>How Computer Simulations Affect High School Students' Reasoning In Quantum Chemistry</i> Charles L. Hurwitz, Gerald Abegg & Peter Garik	7
<i>Using Computer Visualization Software To Teach Quantum Science: The Impact On Pedagogical Content Knowledge</i> Karen M. Robblee, Peter Garik & Gerald Abegg	11
<i>Students' Views of Models and Concepts in Modern Physics</i> Manfred Euler, Markus Hanselmann, Andreas Müller & Dean Zollman	15
<i>Students' Conceptions of Quantum Physics.</i> Rainer Müller and Hartmut Wiesner	20
<i>Evaluation of a New Approach in Quantum Atomic Physics in High School</i> Hans Niedderer & Stefan Deylitz	23
<i>Quantum Mechanics : Exploring Conceptual Change</i> Peter Fletcher & Ian Johnston	28
<i>Introduction to Quantum Physics -Development and Evaluation of a New Course</i> Helmut Fischler	32
<i>The influence of student understanding of classical physics when learning quantum mechanics</i> Richard Steinberg, Michael C. Wittmann, Lei Bao, and Edward F. Redish	41

Quantum Physics Conceptual Survey

<https://drive.google.com/file/d/1IdpAQgjtTmEFQzrFsxhPz5U0RW7Xe0/view?usp=sharing>

password: operator

Formazione sulla Fisica Moderna



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE

DIMA - CIRD



WWW.FISICA.UNIUD.IT/URDF

CIRD@UNIUD.IT

Via delle Scienze 206, 33100 Udine - tel +39 0432 558211 - fax -8222 -8230

PROGETTO IDIFO6 - Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento Unità Operativa di Udine

Responsabile: Michelini Marisa (UniUD)
marisa.michelini@uniud.it

Sedi Cooperanti

Università degli studi di: Bologna (UniBO), Cosenza (UniCAL), Camerino (UniCAM), Firenze (UniFI), Genova (UniGE), Macerata (UniMC), Milano (UniMI), Modena e Reggio-Emilia (UniMORE), Napoli (UniNA), Palermo (UniPA), Pavia (UniPV), Roma-La Sapienza (UniRM-La Sapienza), Roma Tre (UniRM-Tre), Lecce (UniSALENTO), Siena (UniSI), Trento (UniTN), Trieste (UniTS), Udine (UniUD), Verona (UniVR) e INFN Nazionale, INFN – Sezione di Trieste, INFN – Gruppo Collegato di Udine.

Referenti di sede – Comitato Scientifico

Levrini Olivia (UniBO), Bonanno Assunta (UniCAL), Vitali David (UniCAM), Straulino Samuele (Firenze), Robotti Nadia (UniGE), Rossi Pier Giuseppe e Magnoler Patrizia (UniMC), Giliberti Marco Alessandro (UniMI), Corni Federico e Guido Goldoni (Modena e Reggio Emilia), Italo Testa (UniNA); Fazio Claudio (UniPA), De Ambrosi Anna (UniPV), Organtini Giovanni e Cosmelli Carlo (UniRM-La Sapienza), Altamore Aldo (UniRM-Tre), Bochiechio Mario e Longo Antonella (UniSalento), Montalbano Vera A (UniSI), Oss Stefano (UniTN), Peressi Maria (UniTS), Santi Lorenzo e Michelini Marisa (UniUD), Francesca Monti (UniVR); Ferroni Fernando, Andrea Vacchi (INFN – Nazionale - Comunicare Fisica e sezione INFN TS e Gruppo Collegato UniUD).

AREE di Attività

Master, Perfezionamento e Corsi di Formazione IDIFO6

[Master, Perfezionamento e Corsi di formazione IDIFO6](#)

[Scuola Nazionale per Insegnanti sulla Fisica Moderna IDIFO SNIFM18](#)

[Scuola Estiva Nazionale per Studenti sulla Fisica Moderna SENS-FM2018](#)

<http://www.fisica.uniud.it/URDF/laurea/idifo6.htm>

Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning

David T. Brookes

Department of Physics; Loomis Laboratory of Physics; 1110 West Green St.; Urbana, IL 61801-3080

Eugenia Etkina

The Graduate School of Education; 10 Seminary Place; New Brunswick, NJ 08901

This paper introduces a theory about the role of language in learning physics. The theory is developed in the context of physics students' and physicists' talking and writing about the subject of quantum mechanics. We found that physicists' language encodes different varieties of analogical models through the use of grammar and conceptual metaphor. We hypothesize that students categorize concepts into ontological categories based on the grammatical structure of physicists' language. We also hypothesize that students over-extend and misapply conceptual metaphors in physicists' speech and writing. Using our theory, we will show how, in some cases, we can explain student difficulties in quantum mechanics as difficulties with language.

PACS numbers: 01.40.Fk;01.40.Ha;03.65.-w

Interplay between mathematics and physics to catch the nature of a scientific breakthrough: The case of the blackbody

Laura Branchetti*

Department of Mathematical, Physical and Computer sciences, University of Parma, Parma 43124, Italy

Alessia Cattabriga[†]

Department of Mathematics, University of Bologna, Bologna 40126, Italy

Olivia Levrini[‡]

Department of Physics and Astronomy, University of Bologna, Bologna 40126, Italy



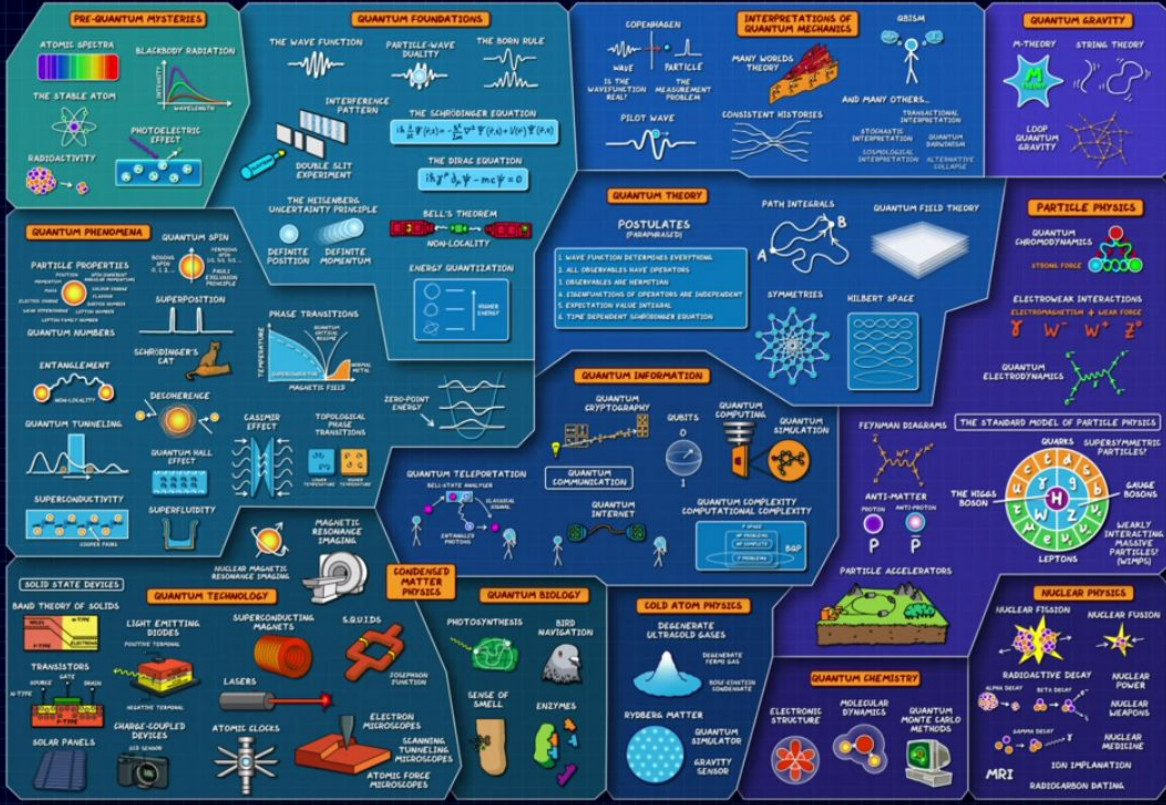
(Received 26 December 2018; published 23 September 2019)

This paper aims to provide a contribution to the research in physics education regarding the interplay between mathematics and physics in teaching and learning physics at the university level. The argument is developed through a study focused on the historical case study of the blackbody that led Planck to make one of the most significant scientific breakthroughs in physics: the introduction of discreteness and quantization into physical processes. The study is methodologically guided by the model that Udden, Karam, Pietrocola, and Pospiech elaborated to highlight the interplay between physics and mathematics within teaching and learning practices [O. Udden, R. Karam, M. Pietrocola, and G. Pospiech, *Modelling mathematical reasoning in physics education*, *Sci. Educ. Netherlands* **21**, 485 (2012)]. The model emphasizes the distinction between the technical and structural roles of mathematics in physics, with the latter role being argued to correspond to processes of mathematization and interpretation. We used this model to analyze Planck's original papers and to reconstruct the reasoning that, thanks to the structural role played by mathematics, paved the way for the quantistic scientific breakthrough. The results of the analysis led us to design a teaching tutorial that we implemented with mathematics and physics university students. Students' reactions are reported to discuss the educational potential of the approach beyond the specific case and to argue for its potential general application to other similar physics topics.

Try by yourself !!!

- Identify a topic on QM you want to teach in High School
 - Prepare / identify proper metaphor to explain it
 - Identify the path you would like to follow to teach it
 - Find an (online?) experiment to try ..
 - Discuss possible evaluation methods for your path ...
-

THE MAP OF QUANTUM PHYSICS

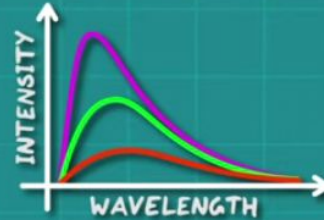


PRE-QUANTUM MYSTERIES

ATOMIC SPECTRA



BLACKBODY RADIATION



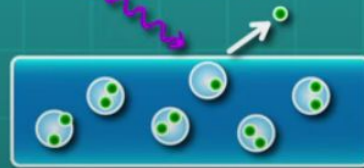
THE STABLE ATOM



RADIOACTIVITY



PHOTOELECTRIC EFFECT



PRE-QUANTUM MYSTERIES

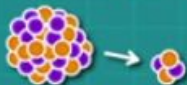
ATOMIC SPECTRA



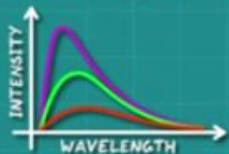
THE STABLE ATOM



RADIOACTIVITY



BLACKBODY RADIATION



PHOTOELECTRIC EFFECT



QUANTUM FOUNDATIONS

THE WAVE FUNCTION



PARTICLE-WAVE DUALITY



THE BORN RULE



INTERFERENCE PATTERN



DOUBLE SLIT EXPERIMENT

THE SCHRÖDINGER EQUATION

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t)$$

THE DIRAC EQUATION

$$i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc\psi = 0$$

THE HEISENBERG UNCERTAINTY PRINCIPLE



DEFINITE POSITION



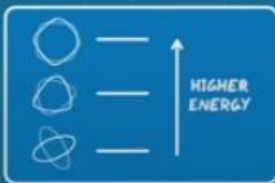
DEFINITE MOMENTUM

BELL'S THEOREM



NON-LOCALITY

ENERGY QUANTIZATION



QUANTUM PHENOMENA

PARTICLE PROPERTIES



QUANTUM NUMBERS

QUANTUM SPIN



SUPERPOSITION



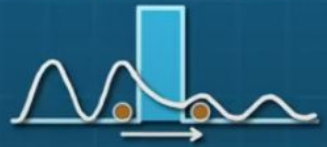
SCHRÖDINGER'S CAT



ENTANGLEMENT



QUANTUM TUNNELING



SUPERCONDUCTIVITY



QUANTUM HALL EFFECT



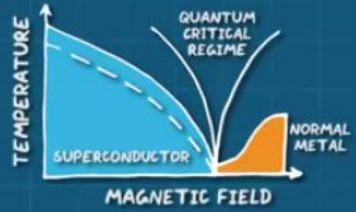
SUPERFLUIDITY



UNCERTAINTY PRINCIPLE



PHASE TRANSITIONS



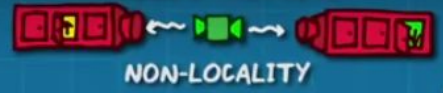
CASIMIR EFFECT



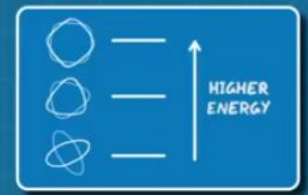
TOPOLOGICAL PHASE TRANSITIONS



BELL'S THEOREM



ENERGY QUANTIZATION



ZERO-POINT ENERGY





SUPERFLUIDITY



MAGNETIC RESONANCE IMAGING

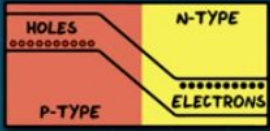
NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE IMAGING



SOLID STATE DEVICES

QUANTUM TECHNOLOGY

BAND THEORY OF SOLIDS



LIGHT EMITTING DIODES

POSITIVE TERMINAL



NEGATIVE TERMINAL

SUPERCONDUCTING MAGNETS

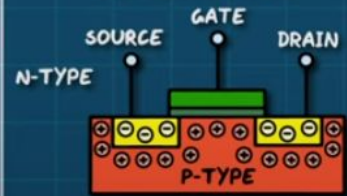


S.Q.U.I.D.S



JOSEPHSON JUNCTION

TRANSISTORS



LASERS



ELECTRON MICROSCOPES

CHARGE-COUPLED DEVICES

CCD SENSOR



ATOMIC CLOCKS



SCANNING TUNNELING MICROSCOPES

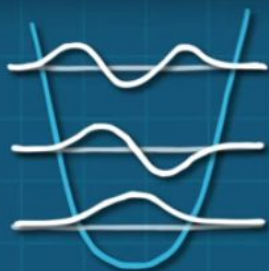


ATOMIC FORCE MICROSCOPES

SOLAR PANELS



ZERO-POINT ENERGY



QUANTUM INFORMATION

QUANTUM CRYPTOGRAPHY



QUBITS



QUANTUM COMPUTING

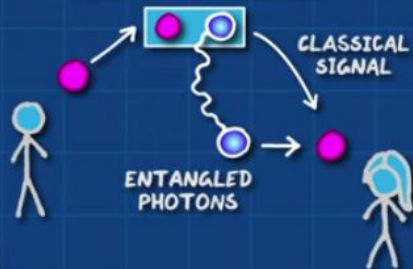


QUANTUM SIMULATION



QUANTUM TELEPORTATION

BELL-STATE ANALYSER

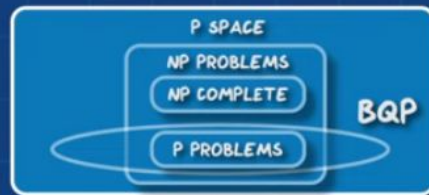


QUANTUM COMMUNICATION

QUANTUM INTERNET



QUANTUM COMPLEXITY
COMPUTATIONAL COMPLEXITY



CONDENSED
MATTER
PHYSICS

QUANTUM BIOLOGY

PHOTOSYNTHESIS



BIRD
NAVIGATION



SENSE OF
SMELL



ENZYMES



COLD ATOM PHYSICS

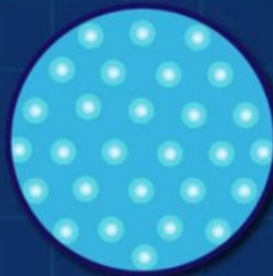
DEGENERATE
ULTRACOLD GASES



DEGENERATE
FERMI GAS

BOSE-EINSTEIN
CONDENSATE

RYDBERG MATTER



QUANTUM
SIMULATOR

GRAVITY
SENSOR

PHONON
TRANSPORT

QUANTUM
TUNNELING

SCANNING
TUNNELING
MICROSCOPES

FORCE
MICROSCOPES

QUANTUM CHEMISTRY

ELECTRONIC
STRUCTURE



MOLECULAR
DYNAMICS



QUANTUM
MONTE CARLO
METHODS



NUCLEAR PHYSICS

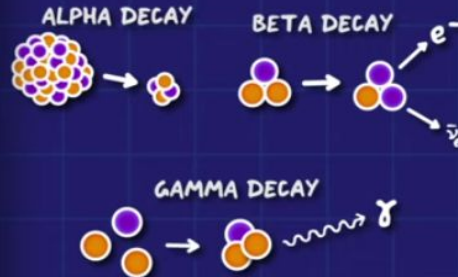
NUCLEAR FISSION



NUCLEAR FUSION



RADIOACTIVE DECAY



NUCLEAR
POWER

NUCLEAR
WEAPONS

NUCLEAR
MEDICINE

MRI

ION IMPLANATION

RADIOCARBON DATING

PARTICLE PHYSICS

QUANTUM CHROMODYNAMICS

STRONG FORCE

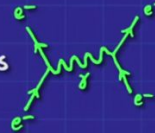


ELECTROWEAK INTERACTIONS

ELECTROMAGNETISM + WEAK FORCE

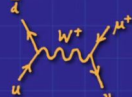
γ W^- W^+ Z^0

QUANTUM ELECTRODYNAMICS



UM
TION

FEYNMAN DIAGRAMS



ANTI-MATTER

PROTON ANTI-PROTON



P



\bar{P}

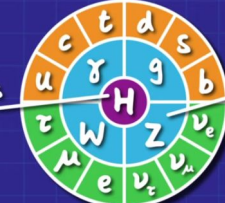
PARTICLE ACCELERATORS



THE STANDARD MODEL OF PARTICLE PHYSICS

QUARKS

THE HIGGS BOSON



GAUGE BOSONS

LEPTONS

NUCLEAR PHYSICS

NUCLEAR FISSION

NUCLEAR FUSION



QUANTUM THEORY

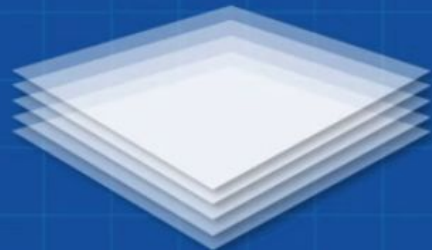
POSTULATES (PARAPHRASED)

1. WAVE FUNCTION DETERMINES EVERYTHING
2. ALL OBSERVABLES HAVE OPERATORS
3. OBSERVABLES ARE HERMITIAN
4. EIGENFUNCTIONS OF OPERATORS ARE INDEPENDENT
5. EXPECTATION VALUE INTEGRAL
6. TIME DEPENDENT SCHRÖDINGER EQUATION

PATH INTEGRALS



QUANTUM FIELD THEORY



SYMMETRIES



HILBERT SPACE



QUANTUM INFORMATION

QUANTUM

INTERPRETATIONS OF QUANTUM MECHANICS

COPENHAGEN



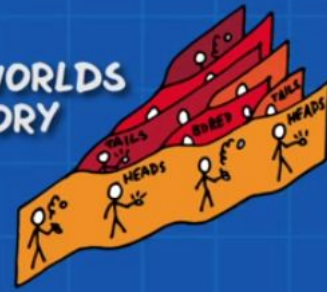
IS THE WAVEFUNCTION REAL?

THE MEASUREMENT PROBLEM

PILOT WAVE



MANY WORLDS THEORY



CONSISTENT HISTORIES



QBISM



AND MANY OTHERS...

TRANSACTIONAL INTERPRETATION

STOCHASTIC INTERPRETATION

QUANTUM DARWINISM

COSMOLOGICAL INTERPRETATION

ALTERNATIVE COLLAPSE

QUANTUM GRAVITY

QUANTUM FIELD THEORY



QUANTUM
MECHANICS

SPECIAL
RELATIVITY

**BUT NOT
GENERAL RELATIVITY
AND SO NOT GRAVITY**

QUANTUM GRAVITY

M-THEORY



STRING THEORY



LOOP
QUANTUM
GRAVITY



BLACK
HOLES



COSMIC MICROWAVE
BACKGROUND