



Fisica Quantistica

**Brevi lezioni per
cominciare**

Giovanni Liveri

Fisica Quantistica

**Brevi lezioni per
cominciare**

Giovanni Liveri

Fisica Quantistica- Brevi lezioni per cominciare

I edizione digitale © 2016

Copyright © 2016- Giovanni
Liveri. Tutti i diritti riservati

E mail: giovanniliveri@libero.it

Gli altri ebook di Giovanni Liveri

**Collana di brevi
lezioni di Elettronica**



Collana di brevi lezioni di Matematica

GIOVANNI LIVERI



**SETTE
BREVI
LEZIONI DI
MATEMATICA**

Statistica e
probabilità

Sommario

Fisica Quantistica

Brevi lezioni per cominciare

Gli altri ebook di Giovanni Liveri

Lezione 1

Introduzione

Lezione 2

Essere discreti: il problema della radiazione emessa da un corpo nero.

Lezione 3

Primo tentativo: la formula di Wien

Lezione 4

Secondo tentativo: la legge di Rayleigh-Jeans

Lezione 5

Facciamo un salto “quantico” di qualità: lo

spettro di Max Planck

Lezione 6

Vedere la luce come particelle. Risolvere il problema dell'effetto fotoelettrico.

Lezione 7

L'effetto Compton. Lo scattering dei fotoni da parte degli elettroni.

Lezione 8

La prova dell'esistenza del positrone. Dirac e l'antimateria.

Lezione 9

Una doppia identità: guardiamo le particelle come se fossero delle onde.

Lezione 10

Non si può conoscere con precisione tutto (ma si può sapere quanto ogni cosa sia probabile!).

Lezione 11

Il principio di indeterminazione di Heisenberg.

Lezione 12

Fisica quantistica e probabilità.

Lezione 1

Introduzione

Secondo la fisica classica, le particelle sono particelle e le onde sono onde. Non capita mai che le due entità si mescolino o si confondano l'una con l'altra. In definitiva, le particelle possiedono una energia E e un vettore momento \mathbf{p} , e questa è la fine della prima storia. Le onde, invece, come quelle luminose ad esempio, possiedono un'ampiezza A e un vettore d'onda \mathbf{k} (la cui ampiezza è pari a $\frac{2\pi}{\lambda}$, essendo λ la lunghezza d'onda) che punta nella esatta direzione in cui l'onda sta viaggiando. E questa è l'altra fine. Il tutto sempre secondo la fisica classica. Tuttavia la realtà è

differente. Le particelle capita che esibiscano dei comportamenti ondulatori e, ulteriormente, le onde risultano talvolta possedere delle proprietà tipiche delle particelle. E l'idea che le onde, come la luce ad esempio, possano agire da particelle, come gli elettroni ad esempio, e viceversa, è stata la principale scoperta che ha aperto le porte alla fisica quantistica come una parte importante del mondo fisico. Al volger del ventesimo secolo, il modo "classico" di vedere la fisica si pensava potesse spiegare praticamente ogni cosa. Tuttavia, il fastidioso e impertinente modo di agire dei fisici sperimentali, portò all'evidenza una manciata di esperimenti che i fisici teorici non erano

in grado di spiegare. Il che fece impazzire i fisici teorici e li costrinse a mettersi nuovamente al lavoro. Il problema risiedeva nel mondo microscopico, quel mondo eccessivamente minuscolo per poter essere osservato con agevole naturalezza. Su larga scala la fisica classica era in grado di spiegare praticamente qualsiasi fenomeno potesse accadere. Ma quando si arrivò a considerare effetti legati al mondo microscopico, ecco che la fisica classica cominciò a sfaldarsi e a scricchiolare. E il modo in cui la fisica classica cominciò a collassare , ci introdurrà pian piano alla fisica

quantistica e ci farà capire perché la gente ne abbia realmente bisogno.

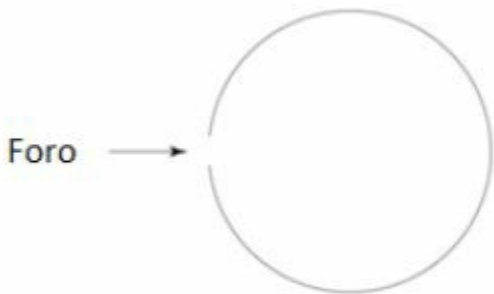
Lezione 2

Essere discreti: il problema della radiazione emessa da un corpo nero.

Una delle idee fondanti della fisica quantistica è la **“quantizzazione”**, ovvero il fatto di misurare le quantità in unità discrete, non più continue. L'idea delle energie quantizzate nacque da una delle prime sfide lanciate alla fisica classica: il problema della radiazione di un corpo nero. Vediamo un po' di cosa si tratta. Quando si riscalda un oggetto, esso comincerà ,dopo un po', a risplendere. Anche prima che tale lucentezza sia visibile, l'oggetto irradia, ma lo fa nello spettro infrarosso. La

ragione per cui inizia ad un certo punto a risplendere è che , riscaldandolo, gli elettroni presenti sulla superficie del materiale vengono agitati termicamente, e il fatto che gli elettroni vengano accelerati e decelerati ha come effetto l'irradiazione di luce. La fisica di fine diciannovesimo secolo e di inizio ventesimo, si preoccupava di dare una spiegazione allo spettro della luce emessa dai corpi neri. Un corpo nero è essenzialmente un pezzo di materia che irradia in maniera corrispondente alla propria temperatura, ma anche assorbe e riflette luce da e verso le sue circostanze. Per rendere le cose semplici, la fisica aveva supposto che un corpo nero non riflettesse niente e

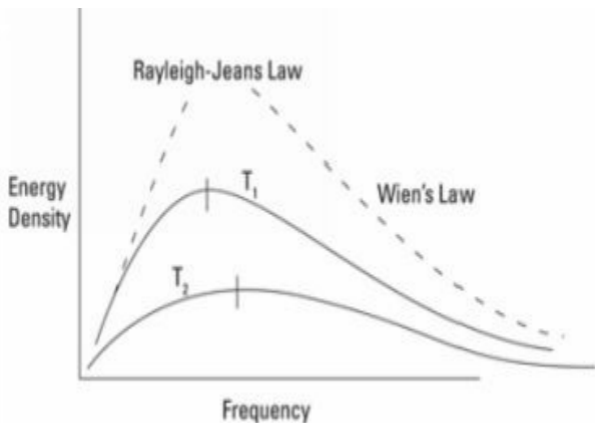
assorbisse tutta quanta la luce che lo investisse (da cui il termine **corpo nero**, perchè l'oggetto sarebbe apparso completamente nero dal momento che avrebbe assorbito tutta quanta la luce che fosse caduta su di esso). Riscaldando un corpo nero, quest'ultimo avrebbe cominciato ad irradiare, emettendo luce. Bene, era molto difficile imbattersi in un esempio fisico di corpo nero. Dopo tutto, quale materiale è in grado di assorbire luce al 100% e di non riflettere alcunchè? Tuttavia i fisici furono ingegnosi e giunsero al modello della cavità vuota con un foro al proprio interno.



Foro

Incidento luce attraverso il foro, tutta quanta quest'ultima sarebbe penetrata all'interno della cavità e, una volta dentro, sarebbe stata riflessa numerose volte, finchè non fosse stata assorbita (una parte trascurabile di luce sarebbe scappata via attraverso il foro). E se avessimo cominciato a riscaldare la cavità, il foro avrebbe iniziato a

risplendere. Ecco ottenuta una buona approssimazione di un corpo nero. Se volessimo osservare lo spettro di un corpo nero (e cercare di modellizzarlo) per due differenti temperature T_1 e T_2 , otterremmo una cosa del genere :



Il problema che sorse fu che nessuno era in grado di giungere ad una spiegazione

teorica per lo spettro di luce generata da un corpo nero. Tutto ciò che si riusciva a prevedere, utilizzando la fisica classica, era sbagliato e si discostava dall'evidenza sperimentale.

Lezione 3

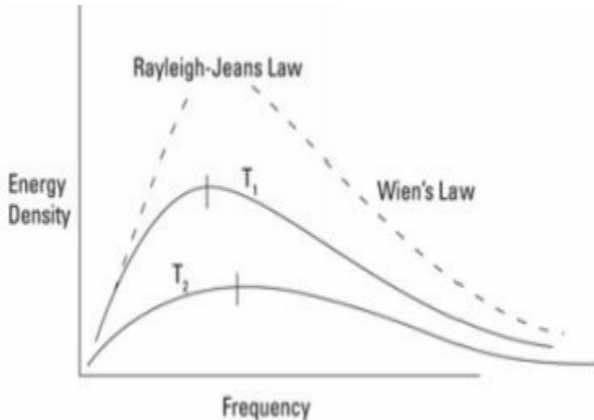
Primo tentativo: la formula di Wien

Il primo che tentò di spiegare lo spettro di un corpo nero fu Wilhelm Wien, nel 1889. Utilizzando la termodinamica classica giunse alla seguente formula:

$$u(\nu, T) = A\nu^5 e^{\frac{-\beta\nu}{T}}$$

dove $u(\nu, T)$ rappresenta la distribuzione di intensità dello spettro di luce alla frequenza ν di un corpo nero alla temperatura T , e A e β sono le costanti che si potevano misurare durante gli esperimenti (lo spettro è dato da $u(\nu, T)$, che è la densità di energia della luce emessa come funzione della frequenza e

della temperatura). Tale equazione, chiamata formula di Wien in suo onore, funzionava bene alle alte frequenze, come si può notare dal diagramma precedente che riproponiamo:



Sfortunatamente, la stessa formula,

risultava fallimentare alle basse
frequenze.

Lezione 4

Secondo tentativo: la legge di Rayleigh-Jeans

Il tentativo successivo di spiegare lo spettro del corpo nero fu la cosiddetta Legge di Rayleigh-Jeans, introdotta attorno al 1900. Tale legge prevedeva che lo spettro del corpo nero fosse modellizzato dall'equazione :

$$u(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^4}{c^3} kT$$

dove k è la costante di Boltzmann (approssimativamente pari a $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$). Tuttavia la legge di Rayleigh-Jeans aveva il problema opposto di quella di Wien: sebbene funzionasse bene alle basse frequenze,

non si accordava affatto ai dati sperimentali ottenuti per le alte frequenze. Infatti la curva divergeva alle alte frequenze. Tale fatto fu definito catastrofe ultravioletta, dal momento che la migliore predizione disponibile a quel tempo divergeva alle alte frequenze (che corrispondono alla luce ultravioletta appunto). Era giunto il momento, per la fisica quantistica, di cominciare a farsi carico di tale problema.

Lezione 5

Facciamo un salto “quantico” di qualità: lo spettro di Max Planck

Quello del corpo nero risultò essere un problema di difficile risoluzione, e con esso iniziò ad affacciarsi al mondo la fisica quantistica. Max Planck venne fuori con una proposta radicale : cosa sarebbe accaduto se l'ammontare di energia che l'onda luminosa poteva scambiare con la materia non fosse stato continuo, come affermato dalla fisica classica, ma **discreto** ? In altre parole, Planck suppose che l'energia luminosa emessa dalle pareti della cavità del

corpo nero venisse fuori soltanto in multipli interi del tipo:

$E = nh\nu$ dove $n = 0,1,2 \dots$ e h è una costante universale

Grazie a tale teoria, che suonava completamente folle agli inizi del 1900, Planck convertì gli integrali continui utilizzati da Rayleigh-Jeans in somme discrete su un infinito numero di termini. Facendo tale semplice cambiamento, Planck ottenne la seguente equazione per lo spettro della radiazione del corpo nero:

$$u(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^5}{c^3 (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)}$$

Tale equazione aveva finalmente centrato nel segno. Essa infatti descrive

esattamente lo spettro del corpo nero, sia per le basse che per le alte frequenze (naturalmente anche per le medie). Tale idea era alquanto nuova e rivoluzionaria. Ciò che Planck stava affermando era che l'energia degli oscillatori radianti all'interno del corpo nero non potessero assumere qualsivoglia livello di energia, cosa invece concessa dalla fisica classica. Essi potevano assumere soltanto specifiche energie **quantizzate**. E Planck ipotizzò che ciò valesse per qualsiasi oscillatore, ovvero che la propria energia fosse un multiplo intero di $h\nu$. Per tale motivo l'equazione di Planck divenne nota come “**la regola di**

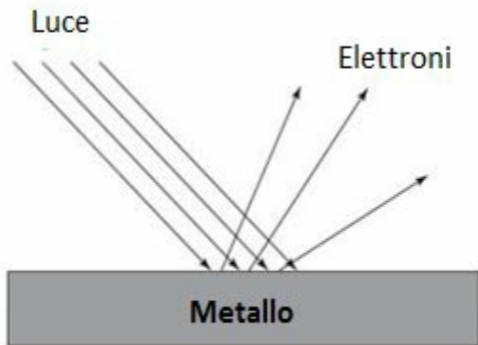
quantizzazione di Planck” e h divenne la **costante di Planck** , pari a 6.626×10^{-24} Joule*secondi. Come starete immaginando, l’affermazione che l’energia di tutti gli oscillatori fosse quantizzata rappresentò la nascita della fisica quantistica. Sarebbe interessante chiedersi in che modo Planck tirò fuori la sua teoria, dato che l’ipotesi alla sua base non era affatto ovvia. Gli oscillatori possono oscillare soltanto a energie discrete? Da dove venne fuori tale idea? Poco importava. Ormai la rivoluzione era stata innescata e niente e nessuno avrebbe potuto fermarla.

Lezione 6

Vedere la luce come particelle. Risolvere il problema dell'effetto fotoelettrico.

La luce come particelle(starete pensando)? Ma la luce non è composta da onde? La luce, si scoprirà, esibisce proprietà tipiche sia delle onde che delle particelle. Ma procediamo per gradi e partiamo con la storia dell'effetto fotoelettrico. L'effetto fotoelettrico fu uno dei tanti risultati sperimentali che mise in crisi la fisica classica al volger del ventesimo secolo. Esso fu anche uno dei primi successi di

Einstein e fornisce una prova della quantizzazione della luce. Ecco in cosa consiste. Quando si incide un metallo con della luce , ciò che si ottiene sarà una emissione di elettroni. Qualcosa del genere, graficamente:

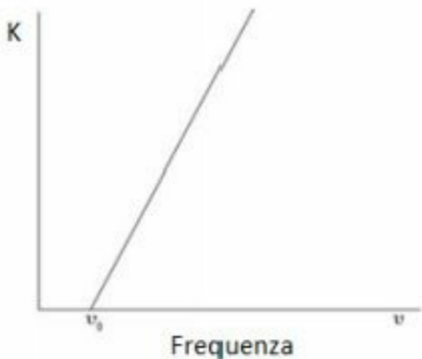


Gli elettroni assorbono la luce incidente

e, qualora acquisiscano sufficiente energia, saranno capaci di liberarsi dalla superficie del metallo. Secondo la fisica classica la luce è soltanto un'onda e può scambiare qualsivoglia quantità di energia con il metallo. Quando si indirizzi un fascio di luce su un pezzo di metallo, gli elettroni del metallo dovrebbero assorbire la luce e piano piano acquisire energia sufficiente a essere emessi dal metallo. L'idea era che, incidendo più luce sul metallo, gli elettroni avrebbero dovuto essere emessi con una maggior energia cinetica. Mentre una luce molto fiavole non avrebbe dovuto essere in grado di emettere elettroni, eccetto in un intervallo di tempo di diverse ore. Ma

ciò non era quello che realmente accadeva. Gli elettroni venivano emessi non appena si illuminasse il metallo con della luce. In realtà, indipendentemente dal fatto che l'intensità della luce incidente fosse fiavole o meno, gli elettroni venivano emessi. E lo facevano immediatamente. Altro che in diverse ore! E vi assicuro che gli scienziati sperimentali provarono un sacco di esperimenti condotti con luce fiavole e per i quali ci si aspettava un'attesa di ore prima che gli elettroni venissero emessi! Niente. Gli esperimenti riguardo all'effetto fotoelettrico mostrarono che l'energia cinetica, K , degli elettroni emessi dipendeva soltanto dalla

frequenza della luce incidente. L'intensità non c'entrava nulla. Un rapporto simile a quanto riportato nella figura seguente:



In figura, ν_0 è chiamata **frequenza di soglia** e, incidendo sul metallo una luce con frequenza inferiore a quella di soglia, nessun elettrone verrà emesso.

Gli elettroni emessi provengono dalla riserva di elettroni del metallo (tutti i metalli possiedono una riserva di elettroni liberi), e bisogna alimentare tali elettroni con una energia equivalente alla funzione lavoro del metallo, W , per fare in modo che essi vengano emessi dalla superficie del metallo. I risultati erano davvero difficili da spiegare classicamente, perciò entrò in gioco per la prima volta Einstein. Questo fu l'inizio della sua memorabile ascesa, siamo intorno al 1905. Incoraggiato dal successo di Planck, Einstein ipotizzò che non soltanto gli oscillatori fossero quantizzati, ma che lo fosse anche la luce, in unità discrete definite fotoni. La luce, suggerì Einstein, si comporta come

le particelle così come tutte le altre onde. Quindi, secondo tale schema mentale, quando la luce incide una superficie metallica i fotoni colpiscono gli elettroni liberi, e un elettrone assorbe completamente ciascun fotone. Quando l'energia, $h\nu$, del fotone è maggiore della funzione lavoro del metallo, l'elettrone viene emesso. Vale a dire:

$$h\nu = W + K$$

dove W è la funzione lavoro del metallo e K è l'energia cinetica dell'elettrone emesso. Risolvendo per K , avremo:

$$K = h\nu - W$$

È anche possibile riscrivere il tutto in termini della frequenza di soglia:

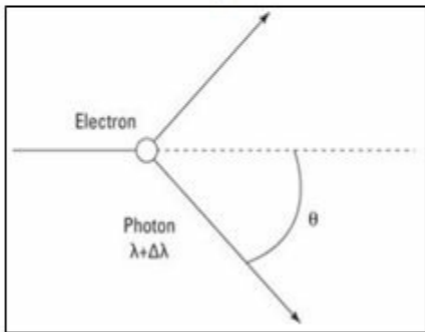
$$K = h(\nu - \nu_0)$$

Quindi, evidentemente la luce non è soltanto un'onda. È possibile vederla anche come una particella, il fotone. In altre parole la luce è quantizzata. Questo fu un altro risultato inaspettato, ottenuto da Einstein, nonostante si basasse sul precedente lavoro di Planck. La luce quantizzata? La luce che avanza in pacchetti discreti di energia? Cos'altro c'era da attendersi?

Lezione 7

L'effetto Compton. Lo scattering dei fotoni da parte degli elettroni.

A un mondo che ancora aveva seri problemi a digerire l'idea della luce come particelle, Arthur Compton fornì la mazzata finale con l'effetto Compton. Il suo esperimento coinvolgeva lo scattering dei fotoni, ovvero la deviazione della traiettoria di quest'ultimi, da parte degli elettroni. Graficamente qualcosa del genere:



La luce incidente arriva con una lunghezza d'onda λ e colpisce

l'elettrone a riposo. Una volta accaduto ciò, la traiettoria della luce viene deviata, ciò che si intende con il termine "scattering". "Classicamente" sarebbe dovuto accadere qualcosa del genere: l'elettrone avrebbe dovuto assorbire la luce incidente, oscillare e infine emetterla, con la stessa lunghezza d'onda di partenza ma con una intensità dipendente dall'intensità della luce incidente. Tuttavia non è ciò che accade in realtà. Infatti, la lunghezza d'onda della luce sarà di fatto cambiata di un $\Delta\lambda$, chiamato in inglese "wavelength shift". La luce deviata ha una lunghezza d'onda pari a $\lambda + \Delta\lambda$. In altre parole, la lunghezza d'onda è aumentata, il che significa che la luce ha perso energia.

Inoltre $\Delta\lambda$ dipende dall'angolo di scattering, θ , e non dall'intensità della luce incidente. Arthur Compton riuscì a spiegare il risultato del suo esperimento soltanto facendo l'ipotesi che si avesse a che fare con due particelle: un fotone e un elettrone. Vale a dire, egli trattò la luce come una particella discreta e non come un'onda. E fece inoltre l'assunzione che fotone ed elettrone collidessero elasticamente, ovvero che l'energia e il momento totale di entrambi si conservasse. Ipotizzando che luce ed elettrone fossero entrambi delle particelle, Compton derivò la sua formula per il "wavelength shift" (si tratta di un calcolo semplice se si

assume che la luce sia rappresentata da un fotone con energia $E=hc/\lambda$ e che il suo momento sia pari a $p=E/c$):

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

dove h è la costante di Planck, m_e è la massa di un elettrone, c la velocità della luce e θ l'angolo di scattering della luce. È anche possibile imbattersi nella seguente forma equivalente dell'equazione:

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \left(\frac{\theta}{2}\right)$$

dove λ_c è la lunghezza d'onda di Compton per l'elettrone, $\lambda_c = \frac{h}{m_e c}$. E l'esperimento confermò tale relazione. Anzi entrambe. Notate bene che

Compton, per derivare il “wavelenght shift”, fu costretto a fare l’assunzione che la luce si stesse comportando come particella e non come onda. Detto altrimenti, la natura particellare della luce era l’aspetto della luce che veniva fuori in maniera predominante.

Lezione 8

La prova dell'esistenza del positrone. Dirac e l'antimateria.

Nel 1928, il fisico Paul Dirac postulò l'esistenza di un anti-elettrone caricato positivamente: il **positrone**. Giunse a tale conclusione spingendo l'avveniristico nuovo campo della fisica quantistica verso nuovi territori, combinando la relatività con la meccanica quantistica per ottenere la meccanica quantistica relativistica. Questa fu la teoria che predisse, attraverso uno scambio di segni positivo e negativo, l'esistenza del positrone. Fu una previsione coraggiosa:

l'**antiparticella** dell'elettrone? Tuttavia soltanto 4 anni più tardi, alcuni fisici osservarono realmente tale positrone. Oggigiorno, la potente fisica delle particelle possiede ogni genere di sincrotrone o vari altri acceleratori di particelle per creare tutte le particelle elementari di cui hanno bisogno, ma agli inizi del ventesimo secolo le cose non andavano proprio nello stesso modo. A quei tempi i fisici si affidavano ai raggi cosmici, quelle particelle e fotoni ad alta energia(denominati raggi gamma) che colpiscono la Terra provenendo dallo Spazio. I fisici utilizzavano le camere a nebbia, le quali erano riempite di vapore derivato dal ghiaccio secco

per riuscire ad osservare le tracce lasciate da tali particelle. Gli scienziati misero tali camere all'interno di campi magnetici per essere in grado di misurare il momento delle particelle nel momento in cui curvavano all'interno di quei campi. Nel 1932 un fisico notò un evento sorprendente. Una coppia di particelle, caricate in maniera opposta (il che era possibile essere determinato dal modo in cui curvavano all'interno del campo magnetico) apparve apparentemente dal nulla. Nessuna traccia di particella riconduceva all'origine delle due particelle che apparvero. Si trattava della produzione di una coppia: la conversione di un fotone ad elevata potenza in un elettrone

e un positrone, il che accade quando un fotone passa vicino a un pesante nucleo atomico. Quindi, sperimentalmente, gli scienziati avevano osservato che un fotone si trasformava in una coppia di particelle. Fantastico. Proprio come se qualcun altro avesse bisogno di maggiore evidenza della natura particellare della luce. Più tardi i ricercatori osservarono anche l'annichilazione di una coppia: ovvero la conversione di un elettrone e di un positrone in luce pura. La produzione e l'annichilazione di una coppia finirono per essere governate dalla nuova teoria della relatività di Einstein, in particolare la sua famosa formula ,

$E = mc^2$, che fornisce l'equivalenza fra energia e massa. A quel punto vi era davvero un'abbondanza di evidenza dell'aspetto particellare della luce.

Lezione 9

Una doppia identità: guardiamo le particelle come se fossero delle onde.

Nel 1923, il fisico Luis de Broglie suggerì che non solo le onde esibivano degli aspetti tipici delle particelle, ma che fosse vero anche il contrario: ovvero che tutte le particelle della materia dovessero mostrare degli aspetti ondulatori. Come funzionava la cosa? Per un fotone valgono le seguenti relazioni:

- 1) Il momento è pari a $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$,
dove ν è la frequenza del fotone e λ è la sua lunghezza d'onda.

2) Il vettore d'onda, \mathbf{k} , è pari a $\mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$,
dove $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

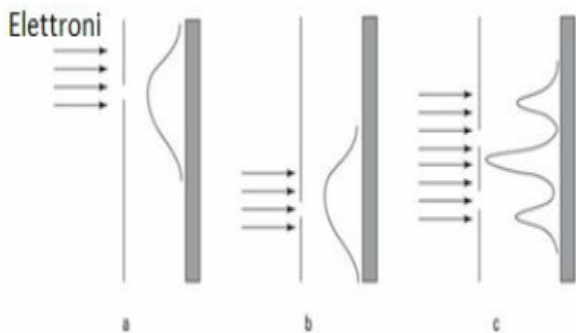
De Broglie affermò che le stesse relazioni dovessero valere per tutte le particelle materiali. Vale a dire:

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

2) $\mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$

De Broglie presentò tali idee, apparentemente sorprendenti, nella sua tesi di dottorato. I ricercatori misero in atto tali idee, inviando un fascio di elettroni attraverso un apparato dotato di un paio di fessure per appurare se il fascio si sarebbe comportato come se fosse composto da particelle oppure da

onde. L'esperimento portato avanti dagli scienziati sperimentali fu il seguente:



Nella figura “a” si può notare il fascio di elettroni che passa attraverso una singola fessura e il corrispondente pattern ottenuto sullo schermo. Nella figura “b”, invece, il fascio viene fatto passare attraverso una seconda fessura.

Classicamente, ci si sarebbe aspettati che le intensità ottenute nelle figure “a” e “b”, semplicemente si sommassero quando entrambe le fessure fossero state aperte contemporaneamente, ovvero:

$$I = I_1 + I_2$$

Tuttavia questo non fu ciò che in realtà si verificò. Ciò che in realtà apparve sullo schermo nella condizione in cui entrambe le fessure fossero aperte, fu un pattern di interferenza e non meramente la somma delle intensità degli elettroni attraverso ciascuna singola fessura (Figura “c”). Tale risultato sperimentale rappresentò allora una validazione dell’invenzione, da parte di de Broglie, delle onde materiali.

L'esperimento confermò la relazione per cui $\lambda = \frac{h}{p}$, e per de Broglie si spalancarono letteralmente le porte del successo. L'idea delle onde materiali rappresentò davvero un enorme scossone per la fisica. In particolare, l'esistenza delle onde materiali, prevede che per sommare due onde, basta sommare le rispettive ampiezze d'onda, $\psi_1(\mathbf{r},t)$ e $\psi_2(\mathbf{r},t)$, e non le loro intensità:

$$\psi(\mathbf{r},t) = \psi_1(\mathbf{r},t) + \psi_2(\mathbf{r},t)$$

per ottenere le intensità si eleveranno al quadrato le ampiezze e, la differenza di fase fra $\psi_1(\mathbf{r},t)$ e $\psi_2(\mathbf{r},t)$, è ciò che in realtà crea il pattern di interferenza che è possibile osservare sperimentalmente.

Lezione 10

Non si può conoscere con precisione tutto (ma si può sapere quanto ogni cosa sia probabile!)

Quindi, le particelle apparentemente esibiscono proprietà tipiche delle onde, e le onde mostrano proprietà tipiche delle particelle. Ma allora, se abbiamo un elettrone, di cosa stiamo parlando? Di un'onda o di una particella? La verità è che fisicamente un elettrone è soltanto un elettrone e non è possibile dire se sia una particella o un'onda. È l'atto della **misurazione** che tira fuori le proprietà particellari o ondulatorie. La meccanica

quantistica vive in questo riquadro di incertezza in maniera abbastanza felice. Tale visione, offese molti eminenti fisici del tempo, primo fra tutti Einstein, del quale è celeberrima la frase: “Dio non gioca a dadi!”. Nel prosieguo delle nostre lezioni discuteremo l’idea di indeterminazione e vedremo come la fisica quantistica lavori in termini di probabilità piuttosto che di certezze.

Lezione 11

Il principio di indeterminazione di Heisenberg.

Il fatto che la materia esibisca proprietà ondulatorie dà luogo a un ulteriore problema: le onde non sono localizzate nello spazio. E la consapevolezza di ciò, ispirò Werner Heisenberg, nel 1927, a tirar fuori dal cilindro il suo celebre principio di indeterminazione. Nella fisica classica è possibile descrivere ,in maniera completa, gli oggetti attraverso il loro momento e la loro posizione. E per entrambi è possibile ottenere una misurazione esatta. In altre parole, la fisica classica

è completamente **deterministica**. Tuttavia, a livello atomico, la fisica quantistica dipinge un quadro differente. Per quest'ultimo caso, infatti, il **Principio di indeterminazione di Heisenberg** afferma che esiste un'incertezza intrinseca nella relazione fra momento e posizione. Nella direzione x , ad esempio, il tutto si traduce in:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

dove Δx è l'incertezza di misura sulla posizione x della particella, Δp_x è l'incertezza di misura sul suo momento lungo la direzione x e $\hbar = h/2\pi$. Il che è equivalente a dire che, più

accuratamente si conosce la posizione di una particella, meno accuratamente se ne conoscerà il momento. E viceversa. Tale relazione vale per tutte e tre le dimensioni:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}$$

Il principio di indeterminazione di Heisenberg è una diretta conseguenza della natura ondulatoria della materia, perché non è possibile definire completamente un'onda. La fisica quantistica, a differenza di quella classica, è completamente

indeterministica. Non si potrà mai conoscere l'esatta posizione e l'esatto momento di una particella, nello stesso istante. È possibile soltanto fornire delle probabilità per tali due misure correlate.

Lezione 12

Fisica quantistica e probabilità.

In fisica quantistica, lo stato di una particella è descritto da una funzione d'onda, $\psi(r,t)$. La funzione d'onda descrive l'onda di de Broglie di una particella, fornendo la sua ampiezza come una funzione della posizione e del tempo. Ricordiamo che la funzione d'onda fornisce l'ampiezza di una particella, non la sua intensità. Qualora si volesse trovare l'intensità della funzione d'onda, bisognerebbe elevare al quadrato quest'ultima: $|\psi(r,t)|^2$. L'intensità di un'onda equivale alla probabilità che una determinata

particella si trovi in una determinata posizione in un determinato istante di tempo. Questo è il modo in cui la fisica quantistica converte le questioni relative a momento e posizione in problemi di probabilità: utilizzando una funzione d'onda il cui quadrato ci fornisce la **densità di probabilità** che una determinata particella occuperà una determinata posizione o avrà un determinato momento. In altre parole, $|\psi(r,t)|^2 d^3r$ è la probabilità che la particella si possa trovare nell'elemento di volume d^3r , localizzato alla posizione r nel tempo t . Oltre alla funzione d'onda spazio-temporale $\psi(r,t)$, esiste anche la versione della funzione d'onda

momento-temporale: $\varphi(p,t)$. Considerate che lo studio della funzione d'onda è un po' la base della predizione del comportamento di tanti sistemi fisici. Giusto per citarne alcuni: le funzioni d'onda delle particelle libere, le funzioni d'onda di particelle intrappolate all'interno di potenziali, le funzioni d'onda di particelle identiche che collidono, le funzioni d'onda di particelle in oscillazione armonica, quelle dello scattering della luce per mezzo di particelle. Come già accennato in precedenza, utilizzando tale tipologia di fisica sarà possibile predire il comportamento di tantissimi tipi differenti di sistemi fisici. Ma questa, è tutt'altra storia. Almeno per il momento!

