

FISICA QUANTISTICA

Esposizione
divulgativa

Giovanni Liveri

FISICA QUANTISTICA

Esposizione
divulgativa

Giovanni Liveri

FISICA QUANTISTICA - ESPOSIZIONE DIVULGATIVA.

I edizione digitale © 2016

Copyright © 2016- Giovanni Liveri.
Tutti i diritti riservati

E mail: giovanniliveri@libero.it

Brevi lezioni di Elettronica, Fisica e Matematica



Sommario

FISICA QUANTISTICA

Esposizione divulgativa

Brevi lezioni di Elettronica, Fisica e Matematica

Introduzione

L'una o l'altra? Entrambe le cose. Dualismo onda-particella

Le particelle e le onde che ci circondano: la fisica classica!

Le onde nella vita di tutti i giorni: luce e suono.

La nascita del quanto: la luce come particella.

Elettroni che interferiscono: le particelle come onde.

Ogni cosa è fatta di onde: l'interferenza delle molecole.

Introduzione

Che cos'è la fisica quantistica? Domanda da un milione di dollari! E risposta da qualche centesimo. La fisica quantistica è una parte della “fisica moderna”, ovvero di quella fisica che si fonda sulle leggi scoperte all'incirca dopo il 1900. Le leggi e i principi che, invece, furono sviluppati prima del 1900, sono considerati appartenere alla cosiddetta “fisica classica”. La fisica classica, per intenderci, è la fisica degli oggetti con cui condividiamo la nostra quotidianità: palloni da calcio, stufe, magneti, fili elettrici, cubetti di ghiaccio.

Insomma, avete capito. Le leggi classiche del moto governano il movimento di qualsiasi cosa sia abbastanza grande da poter essere vista ad occhio nudo. Così, la termodinamica classica spiega la fisica del come riscaldare e raffreddare gli oggetti, e quindi il funzionamento dei motori e dei refrigeratori, ad esempio. Ulteriormente, l'elettromagnetismo classico spiega il comportamento delle lampadine a incandescenza, delle radio e dei magneti. Semplice, vero? Anche perché i risultati di ciò che studiamo con la fisica classica sono esattamente identici a ciò che la nostra esperienza ci ha insegnato e continua a insegnarci ogni giorno della nostra vita. La fisica

moderna, descrive invece lo strano mondo che osserviamo quando riusciamo ad andare oltre il quotidiano. Tale mondo venne per la prima volta rivelato all'interno di alcuni esperimenti condotti fra la fine del 1800 e gli inizi del 1900, i quali non potevano essere spiegati con le leggi della fisica classica. Per cui, nacque immediatamente il bisogno di sviluppare nuovi campi, con differenti leggi rispetto a quelle già note. La fisica moderna si divide in due parti, ciascuna delle quali rappresenta una svolta radicale rispetto alle leggi classiche. La prima parte, la relatività, tratta gli oggetti che si muovono molto velocemente, oppure che

si trovano in presenza di intense forze gravitazionali. Albert Einstein introdusse la relatività nel 1905, e si tratta davvero di un argomento estremamente affascinante che non avrò purtroppo il tempo di discutere all'interno di questo libro. Troverete altri miei libri intenti a farlo! L'altra parte della fisica moderna è l'oggetto del nostro dibattere. Fisica quantistica oppure meccanica quantistica, è il nome dato a quella parte di fisica moderna che studia la luce e un insieme di oggetti decisamente minuscoli: le molecole, i singoli atomi, le particelle subatomiche, ad esempio. Max Planck coniò per primo la parola "quanto" nel 1900, e Einstein vinse il premio Nobel per aver

proposto la prima teoria quantistica per la luce: la sua teoria quantistica sull'effetto fotoelettrico, più che l'invenzione della relatività, fu la ragione ufficiale del Nobel assegnato ad Einstein. L'intera teoria della meccanica quantistica venne sviluppata durante i successivi trent'anni circa. E gli artefici di tale teoria, dai pionieri Planck e Niels Bohr, il quale fornì il primo modello quantistico dell'atomo di idrogeno, fino ai più recenti visionari Richard Feynman e Julian Schwinger, i quali, indipendentemente l'uno dall'altro, lavorarono a ciò che oggi chiamiamo “elettrodinamica quantistica(QED)”, sono considerati, in

maniera estremamente ragionevole, dei veri e propri titani della fisica. Alcuni elementi della teoria dei quanti sono persino riusciti a sfuggire al regno della fisica e a catturare l'immaginazione popolare. Stiamo parlando del celebre principio di indeterminazione di Heisenberg, del paradosso del gatto di Erwin Schrödinger, degli universi paralleli dell'interpretazione dei tanti mondi di Hugh Everett. La vita moderna sarebbe impossibile senza la meccanica quantistica. Ad esempio, senza la conoscenza della natura quantistica dell'elettrone, sarebbe impossibile costruire i chip al semiconduttore che oggi fanno funzionare i nostri computer. Senza la conoscenza della

natura quantistica della luce e degli atomi, sarebbe impossibile costruire i laser che oggi utilizziamo per inviare messaggi lungo le linee di comunicazione a fibra ottica. Tuttavia, l'effetto della teoria quantistica sulla scienza va oltre la semplice pratica. Essa, infatti, costringe l'intera comunità di fisici a essere costantemente alle prese con dibattiti di natura filosofica. La fisica quantistica pone dei limiti a ciò che possiamo conoscere riguardo all'universo e alle proprietà degli oggetti che si trovano all'interno di esso. Modifica anche la nostra comprensione riguardo a ciò che vuol dire fare una misurazione. Essa richiede,

letteralmente, un ripensamento riguardo alla natura della realtà ai suoi livelli più fondamentali. La meccanica quantistica descrive un mondo assolutamente bizzarro, dove nulla è certo e gli oggetti non possiedono proprietà ben definite fintanto che le si sia misurate. È un mondo in cui oggetti distanti fra loro sono collegati in strani modi, dove esistono interi universi con storie differenti, giusto accanto al nostro, e dove “particelle virtuali” appaiono e scompaiono in uno spazio altrimenti vuoto. La fisica quantistica potrebbe sembrare qualcosa di immaginario, fantastico, ma in realtà si tratta di scienza. Il mondo descritto dalla teoria quantistica è il nostro mondo, però su

una scala microscopica, che per i fisici comprende tutto ciò che è troppo piccolo per poter essere osservato ad occhio nudo. La meccanica quantistica è sempre risultata essere problematica e confusionaria agli occhi di noi poveri mortali, dal momento che distorce le nostre aspettative da senso comune riguardo a come funziona il mondo. L'unico modo per venirne a capo, è ammettere che il mondo che ogni giorno viviamo è strano e meraviglioso al tempo stesso e che, in fondo, le previsioni della teoria quantistica non sono più strane o più meravigliose di uno splendido tramonto osservato in riva al mare!

L'una o l'altra? Entrambe le cose. Dualismo onda- particella

La fisica quantistica possiede molti aspetti strani e affascinanti al contempo, ma la scoperta che lanciò la teoria fu, senza dubbio, il dualismo onda-particella, ovvero il fatto che entrambe, luce e materia, possiedano allo stesso tempo proprietà particellari e

ondulatorie. Un raggio di luce, il quale generalmente viene pensato come un'onda, in alcuni esperimenti finisce per comportarsi alla stessa stregua di un flusso di particelle. Allo stesso modo, un fascio di elettroni, il quale viene generalmente associato a un flusso di particelle, in alcuni esperimenti finisce per comportarsi alla stessa stregua di un'onda. Proprietà ondulatorie e particellari sembrano essere in contraddizione, l'una rispetto all'altra, eppure ogni cosa nell'universo riesce ad essere sia un'onda che una particella. La scoperta, nei primi anni del 900', del comportamento della luce come una particella, rappresenta il trampolino di

lancio per l'intera meccanica quantistica. Nel prosieguo delle pagine descriveremo la vera storia del come i fisici giunsero a scoprire tale strano dualismo. Tuttavia, per apprezzare a pieno la stranezza di tale raggiungimento, è necessario, per prima cosa, parlare delle onde e delle particelle che ci capita di incontrare nella vita di tutti i giorni. Perché è da lì che tutto quanto dovrebbe aver inizio. O forse no?

Le particelle e le onde che ci circondano: la fisica classica!

A ognuno di noi è familiare il comportamento delle particelle materiali. Infatti, praticamente quasi tutti gli oggetti che ci circondano si comportano come particelle, nel senso classico, con il proprio moto definito dalle leggi della fisica classica. È vero, essi possiedono forme differenti, ma alla fin fine è possibile prevedere l'essenza

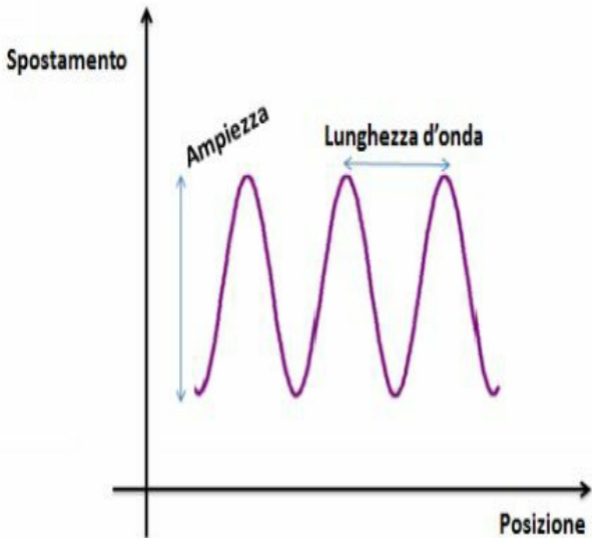
del loro moto immaginandoli come delle semplici palline, senza particolari caratteristiche, dotate di una certa massa – vale a dire la definizione di particella - e applicando loro le leggi del moto di Newton. Conoscerete tutti quanti Sir Isaac Newton, vero? È il famoso tizio legato alla celebre storiella della mela che cade dall'albero, il quale diede i natali alle altrettanto famose tre leggi del moto che governano il comportamento degli oggetti in movimento. Ma torniamo a noi. Una pallina da tennis e un lungo osso della gamba, che capitombolano giù da un alto palazzo, appaiono molto differenti nei loro rispettivi voli, ma se gettati lungo la stessa direzione e con la medesima

rapidità, essi atterreranno esattamente nello stesso punto, ed è possibile prevedere quest'ultimo utilizzando la fisica classica. Un oggetto che si comporti da particella possiede una posizione ben definita (ovvero sappiamo con precisione dove si trovi), una ben precisa velocità (ovvero sappiamo quanto rapidamente si stia muovendo e in che direzione) e, infine, una ben precisa massa (in soldoni, sappiamo quanto è grande). È possibile moltiplicare fra loro la massa e la velocità per ottenere il momento. Giusto per intenderci, un grosso Labrador possiede un momento molto maggiore rispetto a un minuscolo chiwawa che si

stia muovendo alla medesima velocità, mentre un rapidissimo pastore tedesco ha molto più momento di un paffuto bassotto che abbia esattamente la stessa massa. Il momento determina cosa accadrà quando due particelle collidono fra loro. Quando un oggetto in movimento colpisce uno stazionario, il primo rallenterà, perdendo parte del proprio momento, mentre il secondo verrà accelerato, guadagnando momento. L'altra caratteristica, da sottolineare, delle particelle è un qualcosa che sembra quasi fin troppo ovvio da menzionare: le particelle possono essere contate. Infatti, quando abbiamo un insieme di oggetti, è sempre possibile osservarlo e stabilire esattamente quanti

sono: un giocattolo, due ossa, tre scoiattoli sotto ad un albero. Le onde, d'altro canto, sono molto più evasive. Un'onda non è altro che un disturbo in movimento all'interno di un qualcosa, come ad esempio i profili di creste e code che si formano a seguito di un tonfo dentro l'acqua placida di uno stagno. Le onde, per loro natura, si estendono in una qualche regione di spazio, formando un profilo che cambia e si muove nel tempo. Nella realtà dei fatti, nessun oggetto fisico si muove da alcuna parte - infatti l'acqua rimane all'interno dello stagno - , ma il profilo del disturbo cambia e noi lo percepiamo come se fosse il moto di un'onda. Se si vuole

comprendere veramente cosa sia un'onda, esistono due modi di guardarla che ci fornirebbero immediatamente informazioni utili. Il primo è quello di immaginare di star catturando un'istantanea di un'intera onda e di osservare il profilo del disturbo, così ottenuto, nello spazio. Per una singola, semplice onda potremo osservare un profilo di picchi e valli. Qualcosa del genere, per intenderci:



Muovendosi lungo il profilo, osserveremo il mezzo muoversi su e giù di un ammontare definito “ampiezza” dell’onda. Misurando la distanza fra due creste vicine dell’onda (oppure due

code), avremo determinato la cosiddetta “lunghezza d’onda”, che è uno dei numeri utilizzati per descrivere un’onda. L’altra cosa che si può fare è concentrarsi soltanto su una piccola porzione del profilo d’onda e fissarla intensamente, per lungo tempo. È un po’ come se stessimo guardando una paperella sobbalzare, su e giù, dentro un laghetto. Guardando accuratamente, noteremo come il disturbo diventa più grande e in seguito più piccolo, in una maniera molto regolare – per intenderci, la paperella talvolta va su e qualche altra volta va giù. E tutto ciò costruisce un profilo nel tempo molto simile a quello nello spazio visto in precedenza.

È possibile misurare quanto spesso l'onda si ripeta, esattamente uguale a se stessa, in una data frazione di tempo – ovvero quante volte la paperella raggiunge, ad esempio, la sua altezza massima, diciamo in un minuto -, e ciò fornisce la “frequenza” dell'onda, la quale è un altro numero critico utilizzato per descrivere un'onda. Ebbene, lunghezza d'onda e frequenza sono legate l'una all'altra: lunghezze d'onda maggiori significano minori frequenze, e viceversa. Quindi, a questo punto, è già possibile vedere in che modo le onde differiscano dalle particelle. Le onde non possiedono una posizione. La lunghezza d'onda e la frequenza ne descrivono il profilo nella sua interezza,

tuttavia non esiste un singolo posto verso cui si possa puntare e che possa essere identificato come la posizione dell'onda. Un'onda, per sua intima natura, è un disturbo diffuso nello spazio e non un qualcosa di fisico con una sua ben definita posizione e velocità. È vero, è possibile assegnare una velocità al profilo d'onda valutando quanto impieghi una singola cresta d'onda a muoversi da una posizione ad un'altra. Ma, ancora una volta, si tratta di una proprietà del profilo nella sua interezza. In aggiunta a ciò, non è possibile contare le onde, allo stesso modo in cui è invece possibile fare per le particelle. È vero, possiamo affermare quante creste o

quante code ci siano in una particolare area, ma queste farebbero tutte quante parte soltanto di un singolo profilo d'onda. Le onde sono continue mentre le particelle sono discrete. Infatti, mentre è possibile dire che abbiamo una, due oppure tre particelle, la stessa cosa non vale per le onde. Le onde le abbiamo oppure no. Punto. Non esistono altre alternative. Le onde possono avere un'ampiezza più o meno grande ma non possiamo ritrovarcele a pezzi, come invece accade per le particelle. Inoltre, le onde non si sommano fra loro allo stesso modo delle particelle. A volte, sommando due onde assieme, finiremo per avere un'onda risultante più grande. Tuttavia, altre volte, potremmo

incappare in nessuna onda risultante. Immaginiamo di avere due sorgenti differenti di onde: ad esempio due sassi gettati nell'acqua limpida e placida di uno stagno, nello stesso istante. Il risultato che otterremo sommando le due onde, dipenderà da come le due stesse onde si saranno allineate. Infatti, sommando le due onde in modo che le creste di una si sovrappongano a quelle dell'altra (tali due onde sono dette essere "in fase") otterremo un'onda risultante più grande di ciascuna delle due di partenza. D'altro canto, sommando due onde in modo che le creste di una corrispondano esattamente alle code dell'altra e viceversa (ovvero onde

“fuori fase”), il risultato sarà che le due onde si cancelleranno vicendevolmente e alla fine non ne rimarrà alcuna. Tale fenomeno viene definito interferenza e si tratta, probabilmente, della più profonda differenza fra onde e particelle.

Le onde nella vita di tutti i giorni: luce e suono.

Nella vita di tutti i giorni abbiamo a che fare con due tipi molto comuni di onde: la luce e il suono. Nonostante siano entrambi ottimi esempi di fenomeni ondulatori, essi si comportano in maniera estremamente differente. Le onde sonore sono onde di pressione nell'aria che tutto circonda. Quando un cane abbaia, ad esempio, esso costringe l'aria a venire fuori dalla sua bocca dando vita ad una vibrazione che viaggia

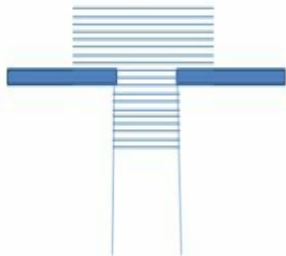
attraverso l'etere in tutte le direzioni. Quando raggiunge un secondo cane, l'onda sonora causa delle vibrazioni all'interno del timpano di quest'ultimo, le quali vengono trasformate in segnali, all'interno del cervello, che vengono processati come suono. Ciò, ovviamente, porterà al fatto che anche il secondo cane si mette ad abbaiare, producendo ulteriori onde, e il tutto andrà avanti finchè sussista la sopportazione umana, ovviamente! La luce, invece, è un tipo differente di onda. Si tratta di un campo elettrico e magnetico oscillante che viaggia attraverso lo spazio, persino nei vuoti di quello più profondo e lontano, il che giustifica il fatto che riusciamo a

scorgere persino le stelle e le galassie più distanti. Quando le onde luminose colpiscono il fondo dei nostri occhi, esse vengono trasformate in segnali all'interno del cervello i quali vengono processati al fine di formare un'immagine del mondo che ci circonda. La differenza più lampante fra luce e suono nella vita di tutti i giorni, ha a che fare con ciò che accade quando esse incontrano un ostacolo. Le onde luminose viaggiano soltanto in linea retta, mentre quelle sonore sembra siano in grado di aggirare gli ostacoli. Questa è la ragione per cui mio figlio, pur trovandosi in salotto, è in grado di sentire una pallina che rimbalza sul

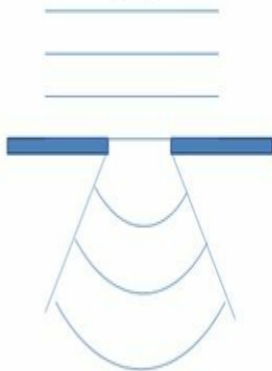
pavimento della cucina, anche se, in realtà, non riesce a scorgere alcunchè. L'evidente curvatura delle onde sonore attorno agli angoli è un tipico esempio di diffrazione, la quale è un comportamento tipico delle onde nell'incontrare un ostacolo. Quando un'onda raggiunge una barriera dotata di un'apertura al suo interno (ad esempio potrebbe essere il caso di un muro contenente una porta aperta che dalla nostra cucina dà sul salotto), le onde passano attraverso l'apertura non soltanto proseguendo lungo la direzione rettilinea, ma aprendosi letteralmente a ventaglio lungo una varietà di direzioni differenti. Quanto velocemente si diffondono, dipende dalla lunghezza

d'onda dell'onda e dalle dimensioni dell'apertura attraverso cui viaggiano. Se l'apertura è di gran lunga più grande della lunghezza d'onda, si avrà una curvatura molto lieve, mentre se l'apertura è comparabile alla lunghezza d'onda, le onde si apriranno a ventaglio lungo l'intero intervallo disponibile. Similmente, qualora le onde sonore incontrassero un ostacolo, come una sedia o un albero ad esempio, esse diffrangerebbero attorno ad esso, ammesso che l'oggetto in questione non sia troppo grande rispetto alla lunghezza d'onda.

LUNGHEZZE D'ONDA
CORTE



LUNGHEZZE D'ONDA
LUNGHE



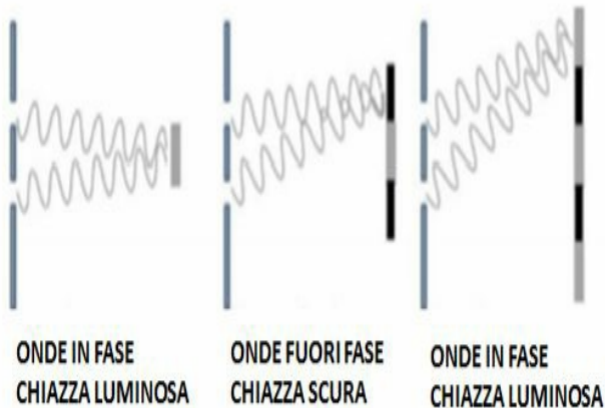
Questo è il semplice motivo per cui è necessaria una parete di una certa dimensione per attutire il suono di un cane che stia abbaiando. Le onde sonore, infatti, sono in grado di aggirare i piccoli ostacoli e di raggiungere le persone oppure ogni altro essere udente che si trovi dietro a quest'ultimi. Esse, nell'aria, hanno una lunghezza d'onda di un metro all'incirca, molto vicina alle dimensioni di un tipico ostacolo: porte, finestre, parti di mobilio. Di conseguenza, le onde diffrangono, e lo fanno in maniera consistente, e ciò è il motivo per cui riusciamo a sentire i suoni, persino ad angoli molto stretti. Le onde luminose, d'altro canto,

possiedono una lunghezza d'onda molto corta, meno di un millesimo di millimetro. Giusto per intenderci, se prendessimo la lunghezza d'onda della luce visibile e la moltiplicassimo per cento, otterremmo una dimensione simile allo spessore di un capello! Quando le onde luminose incontrano un ostacolo della vita di tutti i giorni, esse difficilmente riusciranno a diffrangere, perciò gli oggetti solidi getteranno delle ombre scure lungo il loro tragitto. A dire il vero, una minuscola diffrazione si verifica giusto ai bordi dell'oggetto, e questo è il motivo per il quale i confini delle ombre risultano sempre essere indistinti, sfocati. Tuttavia, per la maggior parte, la luce viaggia lunga una

linea retta, senza alcun fenomeno di diffrazione visibile. A questo punto bisogna porsi una domanda: se non è possibile osservare la diffrazione della luce, come accade per qualsiasi altra onda, in che modo sappiamo che in realtà si tratta di un'onda? La risposta è semplice e immediata. Non vediamo la diffrazione attorno agli oggetti della vita di tutti i giorni perché essi sono troppo grandi, se paragonati alla lunghezza d'onda della luce. Qualora ci soffermassimo su ostacoli sufficientemente piccoli, allora sì che riusciremmo ad assistere, senza alcuna ombra di dubbio, all'evidenza del suo comportamento ondulatorio. Nel 1799,

un fisico inglese di nome Thomas Young condusse l'esperimento definitivo per dimostrare la natura ondulatoria della luce. Young prese un fascio di luce e inserì nell'apparato sperimentale un cartoncino con due strette fessure ricavate sulla sua superficie. Quando osservò il risultato di luce, dal lato opposto del cartoncino, distante da esso, non vide la proiezione dell'immagine delle due fenditure, ma piuttosto un esteso disegno di chiazze chiare e scure che si alternavano fra loro. Il famoso esperimento della doppia fenditura di Young è una chiara dimostrazione dell'interferenza e diffrazione delle onde luminose. La luce che passa attraverso ciascuna delle due fenditure

diffrange lungo un intervallo di differenti direzioni, e le onde provenienti dalle due fenditure si sovrappongono. In ogni dato punto, le onde provenienti dalle due fenditure hanno percorso distanze differenti e sono passate attraverso differenti numeri di oscillazioni. Nei punti luminosi dello schermo finale di rilevazione, le due onde si saranno trovate in fase fra loro e quindi si saranno sommate vicendevolmente avendo dato come risultato una luce più luminosa di quella proveniente da ciascuna delle due fenditure. Nei punti scuri, invece, le onde saranno state fuori fase, e si saranno cancellate, alla fine, vicendevolmente.



Prima dell'esperimento di Young, il dibattito riguardo alla natura della luce fu decisamente acceso e vivo, con alcuni fisici che sostenevano che la luce fosse un'onda, mentre altri (Newton incluso) che difendevano l'immagine della luce come un flusso di minuscole particelle.

Interferenza e diffrazione sono fenomeni che si verificano soltanto in presenza di onde, per cui, dopo l'esperimento di Young (e successivi esperimenti condotti dal fisico francese Augustin Fresnel), tutti quanti si convinsero che la luce fosse, in realtà, un'onda. Le cose rimasero in questa maniera per circa un secolo, e la verità riguardo alla reale natura della luce sembrò ormai essere stata tracciata in maniera definitiva.

La nascita del quanto: la luce come particella.

Il primo suggerimento di problemi legati al modello ondulatorio della luce venne da un fisico tedesco di nome Max Planck, nel 1900. Planck stava studiando la radiazione termica emessa dagli oggetti. L'emissione di luce da parte di oggetti roventi è un fenomeno molto comune (un ottimo esempio è rappresentato dalla lucentezza rossastra di un pezzo di metallo decisamente "hot"), e chiaramente qualcosa di così comune sembra sempre debba essere spiegato in maniera estremamente

semplice. Tuttavia, a partire dal 1900, il problema di spiegare quanta luce di differenti colori venisse emessa (il cosiddetto “spettro” della luce) frustrò notevolmente i migliori fisici del diciannovesimo secolo. Planck sapeva che lo spettro aveva una forma molto particolare, con un sacco di luce emessa alle basse frequenze e molto poca alle alte, e che il picco dello spettro – ovvero la frequenza in corrispondenza della quale la luce emessa è la più luminosa – dipende soltanto dalla temperatura dell’oggetto. Aveva anche scoperto una formula per descrivere la caratteristica forma dello spettro, ma si trovò in estrema difficoltà quando dovette cercare di fornire una

spiegazione teorica per tale formula. Ogni metodo che provò, alla fine prediceva molta più luce alle alte frequenze rispetto a quella osservata. Nella disperazione più totale, egli ricorse a un trucchetto matematico per ottenere la risposta corretta. Il trucchetto di Planck fu quello di immaginare che tutti gli oggetti contenessero degli “oscillatori” che emettessero luce soltanto in corrispondenza di certe frequenze. In seguito egli affermò che l’ammontare di energia, E , associato ad ogni oscillatore, fosse legato alla frequenza dell’oscillazione, f , tramite la semplice seguente formula:

$$E = hf$$

dove h è una costante. Quando Planck fece questa bizzarra assunzione, la sua idea iniziale era basata sul fatto che l'avrebbe utilizzata soltanto per impostare il problema e che in un secondo tempo avrebbe utilizzato una comune tecnica matematica per sbarazzarsi, in un sol colpo, di tali oscillatori immaginari e della costante h , considerata essere un inutile extra. Tuttavia, con sua immensa sorpresa, egli trovò che i suoi risultati avrebbero avuto un senso soltanto nel caso in cui avesse mantenuto in vita i suoi tanto scomodi oscillatori (ovvero se la costante h

in cui le onde possano essere alte soltanto 1,2 oppure 3 centimetri, ad esempio, ma non 1 e mezzo oppure 2 e un quarto. Le onde del nostro quotidiano non funzionano in questa maniera, tuttavia questo è quanto richiede il modello matematico di Planck. Tali “oscillatori” sono anche ciò che introdusse il “quanto” nella “fisica quantistica”. Planck si riferiva agli specifici livelli di energia dei suoi oscillatori come “quanta”(che è il plurale di “quantum”, parola latina che significa appunto “quanto”). Perciò, un oscillatore a una data frequenza poteva contenere soltanto un quanto(ovvero un’unità di energia, hf), oppure due quanti, tre quanti, e così via, ma mai uno

e mezzo oppure due e tre quarti. Il nome per i singoli piccoli passi mossi da Planck resistette nel tempo e, alla fine, venne anche applicato all'intera teoria che crebbe sulle spalle di quel disperato trucchetto introdotto dal fisico tedesco. Sebbene gli venga spesso accreditata l'invenzione dell'idea dei quanti di luce, Planck non credette mai realmente che la luce potesse trascinarsi in quanti discreti, anzi, vi dirò di più, egli sperò sempre, fino alla fine, che qualcuno avrebbe trovato un modo intelligente per derivare la sua formula senza dover ricorrere a trucchetti da strapazzo! La prima persona a parlare seriamente di luce come una particella quantistica fu

Albert Einstein, nel 1905, il quale utilizzò tale concetto per spiegare l'**effetto fotoelettrico**. L'effetto fotoelettrico è uno di quei fenomeni fisici che sembra debba risultare semplice da descrivere: quando si illumina un pezzo di metallo con della luce, vengon fuori degli elettroni. Giusto per intenderci, tale effetto è alla base del funzionamento di semplici sensori di luce e di rilevatori di movimento: la luce che incide sulla superficie di un sensore, sbatte fuori dal metallo gli elettroni, che alla fine fluiranno all'interno di un circuito. Quando cambia la quantità di luce che colpisce il sensore, il circuito reagisce in una certa maniera, come ad esempio

accendere delle luci quando tutto intorno è diventato buio oppure aprire delle porte quando un cagnolino passi di fronte a un sensore. L'effetto fotoelettrico sembrava dovesse essere prontamente spiegato pensando alla luce come un'onda in grado di scuotere gli atomi avanti e indietro finchè gli elettroni non fossero venuti fuori. Sfortunatamente, tale modello ondulatorio risultò essere totalmente errato. Esso infatti prediceva che l'energia degli elettroni che abbandonavano gli atomi dovesse dipendere dall'intensità della luce: quindi più intensa era la luce, più forte sarebbe stato lo scuotimento, e più

velocemente avrebbero dovuto muoversi i singoli pezzetti che volavano via. Durante gli esperimenti, tuttavia, l'energia degli elettroni non dipendeva affatto dall'intensità della luce incidente. Tutt'altro. L'energia dipendeva dalla frequenza, che il modello ondulatorio affermava non dovesse c'entrare alcunchè. Alle basse frequenze non si otterrà mai alcun elettrone, indipendentemente da quanto vigorosamente si scuota; alle alte frequenze, invece, persino uno scuotimento fiavole riesce a produrre elettroni, fra l'altro con una buona quantità di energia. Einstein spiegò l'effetto fotoelettrico applicando la formula di Planck alla stessa luce. Egli

descrisse un fascio di luce come un flusso di piccole particelle, ciascuna con un'energia pari alla costante di Planck moltiplicata per la frequenza dell'onda di luce(esattamente la stessa legge utilizzata per gli "oscillatori" di Planck). Ciascun fotone (il nome oggi dato a tali particelle di luce) possiede una quantità fissa di energia che possa fornire, ammontare che dipende dalla frequenza. Ed un minimo ammontare di energia è richiesto per far espellere un elettrone e renderlo libero. Qualora l'energia fornita da un singolo fotone fosse maggiore rispetto a tale minimo richiesto, l'elettrone verrebbe espulso e porterebbe con sé il resto dell'energia

del fotone. Maggiore sarà la frequenza, maggiore sarà l'energia del singolo fotone e quindi più energia avranno gli elettroni al momento del loro rilascio. Questo è esattamente ciò che mostravano gli esperimenti. Se l'energia del singolo fotone è minore della minima richiesta per liberare un elettrone, non accadrà un bel niente, giustificando l'assenza di elettroni alle basse frequenze. C'è da sottolineare che, descrivere la luce alla stessa stregua di una particella, nel 1905, fu un'idea estremamente controversa e dibattuta, dal momento che capovolveva centinaia di anni di valori e meriti fisici e richiese una visione della luce molto ma molto differente. Piuttosto che un'onda continua, come l'acqua

versata nella ciotola di un gattino, ad esempio, la luce deve essere pensata come un flusso di particelle discrete, come un sacchetto di fragranti crocchette versate sempre nella stessa ciotola. Inoltre, ciascuna di tali particelle possiede una frequenza associata ad essa e, in qualche strana maniera, si sommano fra loro dando vita ad un profilo di interferenza, proprio come fa un'onda. Molti fisici, nel 1905, trovarono tale idea estremamente problematica, e ci volle non poco perché il modello di Einstein venisse alla fine accettato. Il fisico americano Robert Millikan odiava letteralmente l'idea di Einstein, e condusse una serie

di esperimenti sull'effetto fotoelettrico estremamente precisi, nel 1916, nella speranza di provare che Einstein avesse torto. Di fatto, però, tutti i risultati da lui ottenuti confermarono le predizioni di Einstein, ma anche ciò non fu abbastanza per rendere ben accetta l'idea del fotone. Una vasta accettazione dell'idea del fotone arrivò soltanto nel 1923, anno in cui Arthur Holly Compton condusse una serie di famosi esperimenti con i raggi X, che dimostrarono, senza alcuna ombra di dubbio, il comportamento particellare della luce. Egli, essenzialmente, mostrò come i fotoni recassero un momento, e come tale momento venisse trasferito alle altre particelle durante le collisioni.

Qualora si prendesse la formula di Planck per l'energia di un singolo fotone e la si combinasse con le equazioni della relatività speciale di Einstein, si troverebbe che un singolo fotone di luce deve trasportare un piccolo ammontare di momento, dato dalla formula:

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

dove p è il simbolo utilizzato per indicare il momento e λ è la lunghezza d'onda della luce. Quindi, un fotone con una corta lunghezza d'onda possiede un enorme momento, mentre uno con una grande lunghezza d'onda ne possiede molto di meno. Ciò significa che l'interazione fra un fotone di luce e un

oggetto stazionario dovrà apparire esattamente come una collisione fra due particelle: l'oggetto stazionario guadagna un po' di energia e momento, e il fotone in movimento perde una parte di energia e momento. Noi non riusciamo ad accorgerci di ciò perché il momento coinvolto è davvero minuscolo – la costante di Planck è un numero molto ma molto piccolo - tuttavia, osservando un oggetto con una massa molto piccola, come un elettrone ad esempio, e fotoni con lunghezza d'onda molto corta (e quindi con un momento relativamente elevato) è possibile rilevare un cambiamento nel momento. Nel 1923 Compton fece rimbalzare dei raggi X con una lunghezza d'onda

iniziale pari a 0.0709 nanometri(1 nanometro è pari a 10^{-9} m , ovvero un miliardesimo di metro) all'interno di un target solido. Tali raggi X sono semplicemente luce con una lunghezza d'onda eccezionalmente corta, se comparata a quella di 500nm circa della luce visibile. Quando Compton osservò i raggi X essere deviati dall'obiettivo, egli trovò che essi possedevano lunghezze d'onda maggiori, il che indicava una perdita di momento da parte loro. Ad esempio, raggi X che rimbalzavano a 90° rispetto alla loro direzione originaria, possedevano una lunghezza d'onda di 0.0733nm. Tale perdita di momento è esattamente ciò

che dovrebbe accadere se la luce fosse una particella. Quando un fotone raggio X arriva e colpisce un elettrone più o meno stazionario all'interno di un obiettivo, esso cede parte del suo momento all'elettrone, il quale inizia a muoversi. Dopo la collisione, il fotone possiede meno momento rispetto a prima, e quindi una lunghezza d'onda maggiore, esattamente come osservato da Compton. La quantità di momento persa, dipende anche dall'angolo con il quale il fotone rimbalza. Per intenderci, un fotone che sfiora soltanto un elettrone non perde molto momento, mentre uno che rimbalza quasi indietro ne perde davvero un sacco. Compton misurò la lunghezza d'onda in corrispondenza di

molti differenti angoli, e i suoi risultati combaciavano perfettamente con quanto previsto teoricamente, confermando che tale variazione provenisse dalle collisioni con gli elettroni, e non da qualche altro effetto. Einstein, Millikan e Compton, tutti quanti, vinsero il premio Nobel per aver dimostrato la natura particellare della luce. Presi assieme, gli esperimenti sull'effetto fotoelettrico di Millikan e quelli di Compton sullo "scattering", furono abbastanza per indurre la maggioranza dei fisici ad accettare l'idea della luce come se fosse composta da un flusso di particelle. Tuttavia, se l'idea della luce come particella risultò essere totalmente

strana, parimenti, se non ancor più
bizzarro, fu tutto ciò che arrivò dopo di
essa!

Elettroni che interferiscono: le particelle come onde.

Sempre nel 1923, un dottorando francese di nome Louis Victor Pierre Raymond de Broglie avanzò un'ipotesi radicale. Egli affermò che dovesse esistere una simmetria fra luce e materia, e che quindi una particella materiale, come un elettrone, dovesse possedere una lunghezza d'onda. Dopo tutto, se le onde luminose si comportavano come particelle, perché mai le particelle non avrebbero dovuto comportarsi come onde? De Broglie suggerì che,

esattamente così come un fotone possiede un momento determinato dalla sua lunghezza d'onda, un oggetto materiale come un elettrone dovrebbe possedere una lunghezza d'onda determinata dal suo momento:

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

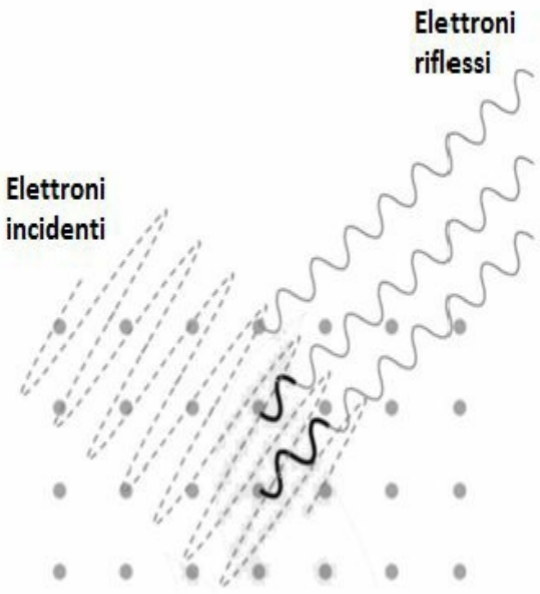
Che è esattamente la formula per determinare il momento di un fotone, vista in precedenza, soltanto riarrangiata per ottenere la lunghezza d'onda. Tale idea possiede una certa eleganza matematica, la quale risultò, già nel 1923, molto affascinante agli occhi dei fisici teorici, ma al contempo sembra un evidente nonsenso, dato che gli oggetti

solidi non danno evidenza alcuna di comportarsi come delle onde. Quando de Broglie presentò la sua idea come parte della sua tesi di dottorato, nessuno sapeva cosa farsene di essa. I suoi professori erano persino incerti se dargli o meno il dottorato, perciò alla fine ricorsero allo strategemma di mostrare la sua tesi ad Einstein. Quest'ultimo la definì assolutamente brillante, e così de Broglie ottenne il suo dottorato. Tuttavia, la sua idea degli elettroni come onde ricevette un minuscolo supporto fino a che due esperimenti, condotti nei tardi anni venti del 1900, mostrarono in maniera incontrovertibile che gli elettroni si comportano come onde. Nel 1927, due

fisici americani, Clinton Davisson e Lester Germer, stavano facendo rimbalzare degli elettroni su una superficie di nichel, registrando quanti di essi volavano via ad angoli differenti. Essi rimasero sorpresi quando il loro rilevatore colse un gran numero di elettroni che rimbalzavano via con un ben determinato angolo. Tale risultato misterioso venne, alla fine, spiegato come diffrazione, alla maniera ondulatoria, degli elettroni che rimbalzavano lungo differenti file di atomi all'interno dei propri bersagli di nichel. Il fascio di elettroni penetrava entro una certa distanza, all'interno del nichel, e parte di esso rimbalzava lungo

la prima fila di atomi del cristallo, mentre le altre lungo la seconda fila, e poi la terza, e così via. Gli elettroni riflessi da ciascuna di tali differenti righe di atomi, si comportavano come onde. Le onde che rimbalzavano lungo atomi che si trovavano più in profondità nel cristallo viaggiavano più distanti dalla via d'uscita rispetto a quelle che venivano riflesse da atomi più vicini alla superficie. Tali onde, interferivano l'una con l'altra, proprio come le onde luminose che passavano attraverso fenditure differenti durante l'esperimento di Young (in questo caso però con molte fenditure e non soltanto due). La maggior parte delle volte, le onde riflesse erano fuori fase,

cancellandosi vicendevolmente. A certi angoli, tuttavia, la distanza extra percorsa era quella giusta perché le onde riuscissero a sommarsi in fase e produrre dei punti luminosi, i quali furono rilevati da Davisson e Germer come un notevole aumento nel numero degli elettroni riflessi in corrispondenza di quel determinato angolo. La formula di de Broglie che associava una lunghezza d'onda agli elettroni, prediceva perfettamente il risultato ottenuto dai due fisici americani.



Circa nello stesso periodo, George Paget Thomson, presso l'università di Aberdeen, condusse una serie di

esperimenti in cui sparò dei fasci di elettroni su sottili film di metallo e osservò dei profili di diffrazione negli elettroni trasmessi (tali profili venivano prodotti essenzialmente nello stesso modo di quelli ottenuti nell'esperimento di Davisson e Germer). E i profili di diffrazione come quelli osservati da Davisson, Germer e Thomson, sono testimonianze inconfutabili di comportamento ondulatorio, proprio come mostrato da Thomas Young nel 1799. Per cui i loro esperimenti fornirono una prova che de Broglie aveva ragione, e che quindi gli elettroni avessero una natura ondulatoria. De Broglie vinse il premio Nobel per la fisica nel 1929 per le sue previsioni, e

Davisson e Thomson condivisero un Nobel, nel 1937, per aver dimostrato la natura ondulatoria dell'elettrone. Seguendo le orme degli esperimenti di Davisson, Germer e Thomson, gli scienziati mostrarono come tutte quante le particelle subatomiche si comportino come onde: fasci di protoni e neutroni diffrangono attraverso campioni di atomi esattamente nello stesso modo in cui fanno gli elettroni. Infatti, la diffrazione neutronica è oggi uno strumento standard utilizzato per determinare la struttura di materiali a livello atomico: ovvero gli scienziati riescono a dedurre come sono sistemati gli atomi, osservando i profili di interferenza che risultano quando un

fascio di neutroni viene fatto rimbalzare attraverso dei loro campioni. Conoscere la struttura dei materiali a livello atomico, permette agli scienziati di progettare materiali più leggeri e più robusti, da utilizzare per automobili, aerei, sonde spaziali. La diffrazione neutronica può anche essere utilizzata per determinare la struttura di materiali biologici, come proteine ed enzimi, fornendo quindi informazioni critiche agli scienziati per la ricerca di nuovi trattamenti medici e farmacologici.

Ogni cosa è fatta di onde: l'interferenza delle molecole.

Sinora abbiamo visto come tutti gli oggetti materiali siano composti da particelle, le quali esibiscono proprietà ondulatorie. Ma allora, perché non riusciamo a vedere un cane diffrangere attorno ad un albero? Se un fascio di elettroni può diffrangere attraverso un paio di file di atomi, perché un cane non può sfrecciare, da ambo i lati di un albero, per intrappolare, ad esempio, un inerme coniglietto che si trovi dall'altra parte? La risposta risiede nella

lunghezza d'onda. Come accade per le onde luminose e sonore, discusse in precedenza, l'abissale differenza nel comportamento di elettroni e cani che incontrano degli ostacoli, si riesce a spiegare tramite la differenza esistente fra le rispettive lunghezze d'onda. La lunghezza d'onda è determinata dal momento, e un cane possiede molto più momento rispetto a un elettrone. La lunghezza d'onda di un oggetto materiale è data dalla costante di Planck divisa per il momento, il quale è la massa moltiplicata per la velocità. La costante di Planck è un numero estremamente piccolo, e tale è anche la massa di un elettrone (circa 10^{-30} kg , ovvero

ambo i lati contemporaneamente. Vi è un netto divario fra un fascio di elettroni e un cane , perciò, qual è il più grande oggetto materiale che abbia mai palesato una natura ondulatoria osservabile? Nel 1999, un gruppo di ricerca dell'università di Vienna, guidato dal dottor Anton Zeilinger, osservò diffrazione e interferenza con molecole consistenti di 60 atomi di carbonio legati assieme in una forma simile a un minuscolo pallone da calcio, ciascuna con una massa circa un milione di volte quella di un elettrone. Essi spararono tali molecole, dalla caratteristica forma a pallone da calcio, contro un rivelatore, e quando osservarono la distribuzione di molecole a valle, essi videro un singolo

stretto fascio risultante. Successivamente, essi inviarono il fascio stesso attraverso un wafer di silicio con una serie di fenditure ricavate su di esso, e osservarono la distribuzione delle molecole sul lato opposto delle fenditure. Con le fenditure al loro posto, lo stretto picco iniziale andava ampliandosi, con dei picchi minori che si sviluppavano lungo i suoi due lati. Tali picchi secondari, così come le chiazze luminose e scure osservate da Thomas Young che illuminava con della luce una coppia di fenditure, oppure come i picchi di diffrazione elettronica osservati da Davisson e Germer, sono una prova

inconfutabile di comportamento ondulatorio. Le molecole che passano attraverso le fenditure si diffondono e interferiscono fra loro, proprio come le onde luminose. In successivi esperimenti, il team di Zeilinger dimostrò la diffrazione di molecole persino più grandi, aggiungendo 48 atomi di fluoro a ciascuna delle originarie molecole da 60 atomi di carbonio. Tali molecole possiedono una massa circa 3 milioni di volte quella di un elettrone e , ad oggi, detengono il record di oggetto più grande (più massivo) la cui natura ondulatoria sia stata osservata direttamente. Al crescere della massa di una particella, la sua lunghezza d'onda diventa sempre più

corta, e diventa sempre più difficile osservarne direttamente gli effetti ondulatori. Questo è il motivo per cui nessuno ha mai visto un cane diffrangere attorno ad un albero; e non sarà probabile vederlo nemmeno a breve. In termini fisici, tuttavia, un cane non è nient'altro che un insieme di molecole biologiche, per le quali il gruppo di Zeilinger ha mostrato l'esistenza di proprietà ondulatorie. Per tale motivo, possiamo affermare, con una certa confidenza, che un cane possiede una natura ondulatoria, esattamente come ogni altra cosa esista al mondo! Punto e basta.