

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FILOSOFIA, SOCIOLOGIA, PEDAGOGIA E PSICOLOGIA APPLICATA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

CORSO DI LAUREA IN FILOSOFIA

**La crisi del determinismo con l'avvento della
meccanica quantistica**

LAUREANDO

Vanessa Boscolo

Matricola 2009802

RELATORE

Ch.mo Prof. Antonio Masiero

ANNO ACCADEMICO
2022/2023

*Those who are not shocked when
they first come across quantum
mechanics cannot possibly have
understood it.*

Niels Bohr

Alla mia cara nonnina

Sommario

INTRODUZIONE	1
1. L' AUGE DEL DETERMINISMO	4
1.1 <i>Le origini del determinismo e la sua evoluzione</i>	4
1.2 <i>Argomentazioni matematiche a sostegno del determinismo: le leggi di Isaac Newton</i>	5
1.3 <i>Il “Demone” di Laplace e il meccanicismo</i>	7
1.4 <i>Conseguenze metafisico-religiose del determinismo</i>	10
2. LE ORIGINI DELLA FISICA QUANTISTICA: CAMBIAMENTO DI UN PARADIGMA SCIENTIFICO	13
2.1 <i>Il problema del corpo nero e la soluzione di Planck</i>	13
2.2 <i>Albert Einstein e il principio euristico</i>	16
2.3 <i>L'effetto fotoelettrico</i>	17
2.4 <i>Onde o particelle? La doppia natura della luce</i>	19
2.5 <i>Il modello atomico: da Thomson a De Broglie</i>	21
2.6 <i>Approccio ondulatorio alla meccanica quantistica: l'equazione di Schrödinger</i>	23
3. HEISENBERG E L' INDETERMINISMO DELLA TEORIA QUANTISTICA	26
3.1 <i>Approccio matriciale alla meccanica quantistica</i>	26
3.2 <i>Prima relazione di indeterminazione</i>	27
3.3 <i>Seconda relazione di indeterminazione ed Effetto Tunnel</i>	28
3.4 <i>Interpretazione di Copenaghen</i>	30
3.5 <i>Critiche all'interpretazione di Copenaghen</i>	32
4. CONCLUSIONI E IMPLICAZIONI FILOSOFICHE.....	36
4.1 <i>La parabola del gatto di Schrödinger</i>	36
4.2 <i>Realismo o antirealismo?</i>	38
4.3 <i>Dualismo quantistico e Renè Descartes</i>	39
4.4 <i>Il mondo non è più deterministico?</i>	41
CONCLUSIONE.....	44
BIBLIOGRAFIA.....	47
SITOGRAFIA	48
RINGRAZIAMENTI.....	49

Introduzione

Il mondo è deterministico? È possibile stabilire l'evoluzione di un sistema fisico? Questi sono i principali interrogativi sorti a seguito dell'avvento della meccanica quantistica. Secondo la fisica classica e grazie alle leggi del moto proposte dal "*filosofo della natura*" Isaac Newton si giunse alla conclusione che il mondo fosse determinabile e totalmente prevedibile. Nonostante le notevoli difficoltà morali, che un rigido determinismo veniva ad implicare, tale prospettiva deterministica della fisica classica venne accettata e condivisa dalla comunità scientifica. Durante i primi anni del XX secolo queste convinzioni iniziarono a vacillare, il principio di indeterminazione di Heisenberg scardinò totalmente la possibilità di determinare l'evoluzione di un sistema fisico: le condizioni iniziali indispensabili per la sua risoluzione vennero ritenute impossibili da determinare con esattezza e contemporaneamente. Pertanto, era ancora corretto definire l'universo come risultato di forze cieche, di urti e di rimbalzi? Oppure si doveva affermare l'esistenza di un indeterminismo ontologico? Sarebbe possibile per una Intelligenza Divina come quella postulata dal filosofo Pierre Simone De Laplace prevedere il futuro e conoscere il passato?

L'obiettivo di questo saggio è rispondere a queste domande e trarre alcune considerazioni filosofiche sorte a partire dalla meccanica quantistica. In particolare, nel primo capitolo verrà esposta brevemente la storia del determinismo, la sue origine e il suo sviluppo storico-matematico. Nel secondo capitolo verranno enunciate le principali problematiche che portarono a un distacco graduale dalla fisica classica: il corpo nero e il dilemma dello spettro di luce, l'effetto fotoelettrico e la determinazione della natura della luce e il modello atomico e il problema del collasso dell'elettrone sul nucleo. Successivamente verrà presentata l'equazione che sostituì la dinamica newtoniana, ovvero l'equazione di Schrödinger con tutte le implicazioni fisiche che ne derivano. Nel terzo capitolo si entrerà nella parte centrale della questione deterministica, si analizzeranno nel dettaglio le relazioni di indeterminazione di Heisenberg e la principale esplicazione della meccanica quantistica ovvero l'Interpretazione di Copenaghen con annesse varie critiche che le vennero mosse. Il quarto capitolo avrà come scopo esaminare quattro tematiche filosofiche fondamentali: il rapporto microcosmo-macrocosmo, la questione realismo-antirealismo, il dualismo quantico e più nel dettaglio il determinismo, o meglio indeterminismo dell'universo.

Questo elaborato si concluderà affermando come il determinismo sia entrato in crisi a causa dell'avvento della meccanica quantistica e come essa stessa postulasse un indeterminismo di tipo ontologico, ovvero intrinseco ai dettami del mondo e alle leggi della natura.

1. L'auge del determinismo

1.1 Le origini del determinismo e la sua evoluzione

Il determinismo è una teoria scientifica che afferma il condizionamento di tutti gli atti e di tutte le azioni umane prima di essere effettuate; dunque, possiamo sostenere che tutto il nostro operato sia basato su una nozione di causa-effetto e che quindi sia prevedibile? È corretto ritenere un qualsiasi prodotto frutto di una causa che lo motiva e non risultato del caso? Queste domande sono state il perno focale di discussioni durate secoli e secoli e che si susseguono anche al giorno d'oggi in varie discipline, tra cui la teologia, la psicologia, la sociologia, la filosofia e l'economia.

Il pensiero deterministico si divide principalmente in due rami ben distinti: il determinismo forte, ovvero la corrente che non accetta alcun grado di probabilità e ritiene che qualsiasi azione sia totalmente determinata da fatti o da eventi precedenti e il determinismo debole, una posizione che crede nella probabilità, ossia sostiene che i fatti siano determinati in anticipo, ma, a differenza del precedente, accetta anche la possibilità del caso. Pertanto, possiamo considerarla come una via di mezzo tra determinismo e indeterminismo. Naturalmente dalla nozione di determinismo si trae anche il concetto opposto ovvero l'indeterminismo, l'atteggiamento filosofico che nega totalmente la coerenza assoluta della necessità e che considera le azioni umane come risultanti di cause non lineari e consequenzialmente non prevedibili.

Nonostante tale questione sia particolarmente rilevante nella fisica del secolo XIX, essa ha una storia interessante e molto ampia. La prima formulazione di determinismo si deve agli atomisti greci, i quali erano fermamente convinti della sua rilevanza e imponenza nel mondo fenomenico, in particolare la incontriamo nell'unico frammento rimasto del fondatore della scuola atomista, Leucippo:

“Nulla accade dal nulla, ma tutto da una base e da una necessità¹“

Nel Medioevo, invece, prevalse l'indeterminismo, poiché ritenere le azioni umane dettate da cause predeterminate era considerato una forma di ateismo pericoloso e pagano; nonostante ciò, una direzione verso quest'ultimo fu intrapresa da Agostino di Ippona e dalla filosofia stoica, pur sapendo che percorrere questa strada sarebbe stato rischioso e

¹ (DK fr. 67-A/B).

possibilmente fraindendibile. Infatti, la maggior parte dei filosofi, degli scienziati e dei teologi erano consapevoli delle ampie difficoltà che il determinismo portava con sé nella filosofia e nel destino dell'uomo, erano coscienti anche della difficoltà di conciliare il libero arbitrio, la colpa, la responsabilità, il merito con le implicazioni derivate dal determinismo. Proprio per tentare di relazionarli si inventarono gli espedienti più incredibili: Descartes ipotizzò una evoluzione deterministica parallela delle entità mente e materia, in modo tale da produrre l'illusione di un'interazione significativa; Leibniz teorizzò un numero di entità infinite con la proprietà di evolversi in concomitanza, tanto da generare l'illusione di corrispondenza e i teologi sia cristiani che musulmani, dopo essersi impegnati molto su come poter relazionare la connessione ineludibile di causa-effetto con il libero arbitrio e le ricompense divine, conclusero che la libertà è deterministica e tende sempre al bene, mentre ciò che è slegato da qualsiasi necessità è il libero arbitrio.

Successivamente, a partire dal XVIII secolo, con l'avvento della meccanica galileiana e newtoniana, la nozione di determinismo assunse un aspetto nuovo che potremmo denominare scientifico, poiché a sostegno della tesi deterministica ritroviamo proprietà matematiche. In questo secolo il supporto al determinismo scientifico venne accentuato da un elemento molto importante, ovvero la potenza simboleggiata dalla macchina a vapore e venne rinforzato dalla concezione per cui la scienza stessa fosse la massima espressione di tale potere.

Concludiamo questa esposizione storica con l'avvento della meccanica quantistica, la quale mise in crisi il determinismo, tanto da ipotizzarne l'impossibilità ontologica.

1.2 Argomentazioni matematiche a sostegno del determinismo: le leggi di Isaac Newton

Come è stato accennato in precedenza, durante il XVII secolo il determinismo iniziò ad essere supportato da basi scientifiche, infatti per “determinismo” si intende: *“la concezione fisica che permette di giustificare il fatto che quando un evento fisico si manifesta sempre nelle stesse identiche condizioni vuol dire che il sistema evolve verso stati meccanici individuati sempre e in maniera prevedibile dalle stesse proprietà fisiche*

*precedentemente utilizzate*²“, in altre parole un sistema si dice deterministico quando, date le condizioni iniziali, la sua evoluzione è totalmente determinata e perfettamente riproducibile.

Il termine determinismo assunse un'importanza fondamentale nella fisica classica in particolare nella branca della meccanica, ovvero il ramo della fisica che descrive il movimento dei corpi materiali, poiché porsi domande come “Gli eventi fisici accadono secondo un ordine causale?”, oppure “Si ripetono sempre nelle medesime condizioni?”, o ancora “Le cause e le conseguenze determinate dagli eventi hanno dei nessi?” sono fondamentali nel momento in cui si tenta di analizzare il moto di un oggetto, o per meglio dire, per determinare lo stato di un sistema. Dunque, quando i fisici, in particolare Newton, fu in grado di rispondere positivamente a questi quesiti, si rese conto di aver appena dimostrato il determinismo dei corpi materiali. Più precisamente, la dinamica ovvero l'evoluzione di un sistema fisico, si basa su tre principi universalmente conosciuti come Leggi di Newton, teorizzate dal fisico inglese Isaac Newton nel XVII secolo ed inserite nel suo volume “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*”; i tre enunciati forniscono una descrizione accurata delle leggi che regolano il moto e l'equilibrio dei corpi.

La legge più importante per il determinismo è la Seconda:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

dove “ \vec{F} ” indica la risultante delle forze che agiscono sul corpo, “ m ” identifica la massa del corpo stesso e “ \vec{a} ” identifica l'accelerazione cui è soggetto³.

L'aspetto centrale di questa equazione è il fatto che essa contiene una variazione di una variazione, poiché sia l'accelerazione, sia la velocità sono delle medie calcolate sull'intervallo di tempo Δt .

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad \vec{v} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}$$

dove “ $\Delta\vec{v}$ ” e “ $\Delta\vec{x}$ ” denotano rispettivamente la differenza della posizione spaziale e della velocità nell'intervallo di tempo Δt . Più Δt è piccolo, più la media è rapportata ad un

² (Pomian, 1991).

³ Per precisare, la freccetta sopra F e a viene chiamata *vettore* e sta ad indicare che esse sono delle quantità vettoriali che dipendono oltre che dal valore della densità anche dalla direzione e dal verso.

intervallo di tempo breve per tentare di avvicinarsi al concetto di accelerazione e velocità istantaneo, senza tuttavia poterlo mai raggiungere essendo esso asintotico. In termini matematici, per determinare la velocità e l'accelerazione istantanea bisogna considerare il concetto di limite inventato da Leibniz e da Newton contemporaneamente, dunque dobbiamo prendere il limite per $\Delta t \rightarrow 0$ dei due rapporti sopra esposti. Questa operazione di limite della matematica differenziale o calcolo infinitesimale viene chiamata operazione di derivata. Il concetto di derivata è molto importante poiché a seconda dell'ordine delle derivate si necessitano un ugual numero di condizioni iniziali per poter risolvere il sistema e in questo caso essendo una derivata seconda⁴, sarà imprescindibile conoscere due condizioni iniziali: la posizione e la velocità⁵.

Grazie a queste spiegazioni matematiche, si giunge alla conclusione per cui per determinare l'evoluzione di un sistema fisico, ovvero per determinare in maniera assoluta, senza incertezza, lo sviluppo del passato o del futuro, bisogna risolvere il sistema di equazioni del tipo $\vec{F} = m\vec{a}$, conoscendo per ogni suo punto il valore esatto di posizione e velocità nel momento iniziale. Da qui nasce il determinismo sostenuto da necessità matematiche.

1.3 Il “Demone” di Laplace e il meccanicismo

Uno tra i più importanti pensatori che visse a cavallo tra il XVIII e XIX secolo e che comprese al meglio la meccanica newtoniana fu Pierre Simone de Laplace, il cui contributo più importante fu di carattere filosofico. Il fisico francese descrisse l'universo come simile ad un computer: se gli si fornisce un input (lo stato dell'universo in quel momento), svolge un calcolo (le leggi della fisica) e fornisce un output (lo stato dell'universo in un qualsiasi istante successivo o antecedente). Siccome i computer non erano ancora stati inventati, Laplace utilizzò l'immagine di una Intelligenza divina che conoscesse le velocità e le posizioni di tutte le particelle dell'universo in un tempo iniziale t_0 , considerasse tutte le forze a cui erano soggette e avesse una potenza di calcolo

⁴ È una derivata seconda in quanto l'accelerazione è la derivata prima della velocità rispetto al tempo, ma a sua volta la velocità è la derivata prima dello spazio rispetto al tempo. Quindi, in ultima analisi, l'accelerazione risulta la derivata seconda dello spazio rispetto al tempo.

⁵ Velocità, o altresì quantità di moto (o momento): $\vec{p} = m\vec{v}$, dove la massa è una proprietà intrinseca non variabile; dunque, la variazione del momento Δp è direttamente proporzionale alla variazione della velocità Δv .

sufficiente per risolvere le equazioni di moto per ciascuna particella componente l'universo. In questa circostanza “nulla sarebbe incerto per questa Intelligenza e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi⁶”.

Questa intelligenza diventò uno degli esperimenti mentali più celebri della storia della scienza in quanto teorizzò il mondo come totalmente determinista, infatti:

“Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come l'effetto del suo passato e la causa del suo futuro⁷”.

Questa Intelligenza venne battezzata dai suoi contemporanei come il “Demone” di Laplace e fu molto importante anche per il fatto che interpretò in modo del tutto differente la frase: “se il mondo è deterministico, allora, il mondo è predicibile⁸”, poiché abitualmente si riteneva che l'universo fosse indeterminista semplicemente per l'incapacità dell'uomo di predire gli eventi futuri. Tuttavia, Laplace supponendo l'esistenza di questa super Intelligenza, spiegò che gli eventi ritenuti dagli esseri umani come casuali e quindi imprevedibili in realtà sono totalmente prevedibili, è solo una questione di finitezza umana. Difatti se esistesse questo “Demone” illimitato sia nell'abilità di calcolo, che nella capacità conoscitiva dello stato di ogni singola particella dell'universo, allora sarebbe pienamente in grado, analizzando le condizioni iniziali di ogni sistema fisico, di predire gli eventi futuri e di analizzare quelli passati. Pertanto, secondo il filosofo francese era incorretto postulare l'indeterminatezza del mondo basandosi sull'incapacità dell'essere umano di predirlo, in quanto sempre potrebbe esistere un'Intelligenza in grado di farlo. Laplace era cosciente che ciò che stava ipotizzando era un essere fantascientifico, invero, egli non credeva in Dio. Famosa fu la sua risposta a Napoleone quando egli gli chiese che ruolo avesse Dio nella sua costruzione dell'Universo. Laplace rispose: “*Dio è un'ipotesi di cui non ho bisogno*”. Nonostante ciò, questo esperimento mentale e conseguentemente la super Intelligenza furono fondamentali nel XVIII secolo per comprendere appieno l'ipotesi del mondo deterministico e per rendersi conto che ritenere gli eventi come casuali, imprevedibili e

⁶ (Laplace, 1820).

⁷ (Laplace, 1820).

⁸ Quest'ultima frase in base alla proprietà contronominale della proposizione ipotetica, in simboli ($A \rightarrow B$) \equiv ($\neg B \rightarrow \neg A$), è equivalente a: “Se il mondo è imprevedibile, allora il mondo è indeterminista”.

conseguentemente considerare il mondo retto dall'indeterminismo è semplicemente questione di antropocentrismo⁹.

Il mondo valutato come sistema deterministico fu supportato anche dal meccanicismo, uno sfondo teorico e metafisico che giunse a una nuova conoscenza della natura, basandosi su dati sperimentali. Più precisamente, il meccanicismo fu una corrente filosofica che considerò la natura unicamente corporea di tutti gli enti, assimilati ad un assemblaggio di più parti componibili tra loro, il cui comportamento motorio fu ritenuto esclusivamente di tipo meccanico, ovvero privo di un fine che non sia quello delle cause quantitative. La prospettiva meccanicista ritenne che ogni fenomeno naturale debba essere pensato come l'esito dell'interazione delle parti di materia. Di particolare interesse furono le qualità secondarie¹⁰ degli enti, le quali sono causate solamente dal moto di piccole particelle invisibili che interagiscono per contatto con i nostri sensi determinando in noi la sensazione, motivo per il quale la causalità diventa il nuovo quadro concettuale entro il quale comprendere tutti i fenomeni naturali; ne consegue che il determinismo diventò la dottrina filosofica maggiormente utilizzata per spiegare l'universo e le sue consequenzialità. Il meccanicismo diventò la base anche per spiegare le funzionalità del cervello; infatti, emersero vari studi sul determinismo delle azioni umane, tanto da metterne in dubbio l'autonomia e la libertà.

Tutto questo ebbe delle importanti ricadute in ambito morale e creò il cruciale problema di riuscire a riconciliare il libero arbitrio umano con la tesi che il corso della natura sia totalmente determinato a partire dalle leggi, costituzione materiale e assetto iniziale: che spazio rimaneva per la libera volontà, la salvezza e la dannazione, per amore e odio, quando anche la più insignificante decisione che un essere umano poteva prendere era già pienamente determinata? Per non parlare delle progressive conseguenze in ambito teologico, per le quali Dio divenne una sorta di ingegnere coinvolto nella creazione e avvio della macchina del mondo e poi appartato e sostituito dalla autonomia della macchina stessa e dalle regole causali che la sostenevano.

⁹ Con questo termine mi riferisco al fatto che gli esseri umani si mettono al centro dell'universo e che ritengono che il mondo non sia deterministico solamente riferendosi alla loro incapacità di predire degli eventi, senza considerare la loro limitatezza ontologica ed epistemologica.

¹⁰ Per la distinzione tra qualità primarie e secondarie fare riferimento a (Locke, 1690).

1.4 Conseguenze metafisico-religiose del determinismo

Ritorniamo per un momento alla figura cruciale di Isaac Newton. Egli oltre ad essere un grandissimo fisico, fu anche un uomo di fede, invero per la seconda edizione dei Principia¹¹ preparò uno Scolio generale, il quale enunciò in modo diretto le sue concezioni metafisico-teologiche. Egli era convinto che le spiegazioni meccanicistiche non potessero dar conto dell'intera realtà, che l'ordine non potesse essere il risultato di forze cieche, di urti e di rimbalzi, riteneva che *“l'intera diversità delle cose, ordinata secondo i luoghi e i tempi, potesse nascere solamente dalle idee e dalla volontà di un ente necessariamente esistente”*¹². L'ordine è un carattere esterno alla materia, e appartiene a Dio, al dominio di un ente intelligente e potente. Tuttavia, ciò che ha contribuito maggiormente al senso di smarrimento che provò Newton furono le conseguenze ontologiche delle sue leggi del moto: il determinismo estremo rappresentato dal “Demone” di Laplace; Newton stesso si vide intrappolato in un sistema da lui creato e sul quale non poteva più intervenire, la fisica newtoniana divenne un modello a cui tutta la scienza umana doveva aspirare. Nonostante ciò, Newton cercò di trovare possibili vie d'uscita al rigido determinismo analizzando il cosiddetto *problema dei tre corpi*. La sua origine può essere fatta coincidere con quella della astronomia dinamica moderna, risalente all'introduzione della teoria della gravitazione da parte di Newton. Sin dalla pubblicazione dei Principia, divenne importante verificare se la legge di Newton e la sua teoria gravitazionale potessero rendere conto in modo completo del moto dei corpi celesti nello spazio; in altre parole, se il determinismo potesse essere applicato anche all'universo. Venne appurato che era possibile predire il moto dei pianeti considerando due sfere in movimento sottoposte all'attrazione gravitazionale reciproca, ma ponendo l'esistenza di un terzo corpo tutto si complicò. Newton provò a risolvere geometricamente il problema applicando la teoria delle perturbazioni allo studio del moto lunare, ma i calcoli gli crearono notevoli difficoltà e per di più ottenne il valore del moto degli apsi lunari che era la metà di quello osservato. La risposta che si dette fu che non esiste una semplice ed esatta soluzione matematica per il moto di più di due oggetti che interagiscono reciprocamente. Il fisico britannico giudicò questo problema rassicurante

¹¹ (Newton, 1713).

¹² Principia, 1972, vol. II, p. 763.

più che allarmante, poiché così facendo poté continuare a credere che la stabilità del sistema solare dipendesse da Dio e non da delle leggi e interazioni fisiche.

Per di più il problema dei tre corpi diede origine alla moderna teoria del caos, i cui contenuti si riferiscono al fatto che in fisica spesso ci si aspetta una cosiddetta “risposta lineare”, ovvero a piccole e grandi perturbazioni dello stato di un sistema fisico corrispondono come conseguenze, rispettivamente piccole e grandi variazioni. Tuttavia, ci sono vari casi in cui a piccole perturbazioni corrisponde un effetto molto più grande di ciò che ci si aspetterebbe e per esplicitare più facilmente questo concetto si utilizza la metafora del battito d’ali di una farfalla, il cui movimento in una posizione determinata potrebbe determinare la formazione di un tornado a migliaia di miglia di distanza e settimane più tardi. Newton, dunque, utilizzò il problema dei tre corpi come argomento per confutare il determinismo scientifico da egli stesso argomentato, anche se si potrebbe confutargli che, anche in questo caso, il problema è semplicemente metodologico e che se esistesse la super Intelligenza di Laplace potrebbe analizzare le conseguenze della perturbazione e calcolarne la dinamica del sistema.

2. Le origini della fisica quantistica: cambiamento di un paradigma scientifico

2.1 Il problema del corpo nero e la soluzione di Planck

Alla soglia del 900, in barba a chi pensava che la fisica fosse un sapere ormai compiuto, con solamente alcune sottigliezze da limare, la scienza di punto in bianco si ritrovò costretta a rivedere le sue stesse fondamenta. Le leggi di Galileo e Newton rimasero sugli altari all'incirca per 300 anni, erano l'incarnazione della finezza, della signorilità e della solidità logica della fisica classica, “*un monumento all'età d'oro delle leggi ordinate del moto*¹³ “. La dinamica newtoniana, la gravitazione universale e insieme a loro il determinismo sembravano progredire in modo ordinato e senza nessun intoppo, quando all'improvviso tutto cambiò. La fisica quantistica, il nuovo edificio che sostituì quello classico ci presenta un mondo sbalorditivo totalmente differente da quello in cui eravamo abituati a vivere; un mondo fatto da particelle che sembrano cambiare natura quando le osserviamo per poi tornare ad essere come prima appena distogliamo lo sguardo e addirittura un mondo fatto da corpi i quali giacciono in una sovrapposizione di stati per poi collassare in uno stato preciso solo dopo l'osservazione... In questo capitolo incapperemo in fenomeni molto strani e ambigui che scioccarono i fisici e i filosofi del XX secolo a partire dal problema del *corpo nero*.

Il corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica dall'ambiente senza mai rifletterla. I fisici inventarono vari modi per misurare la radiazione emessa a varie temperature, la sua intensità e la composizione cromatica; il risultato di tutte queste determinazioni è chiamato spettro di corpo nero.

¹³ (Lederman, 2011)

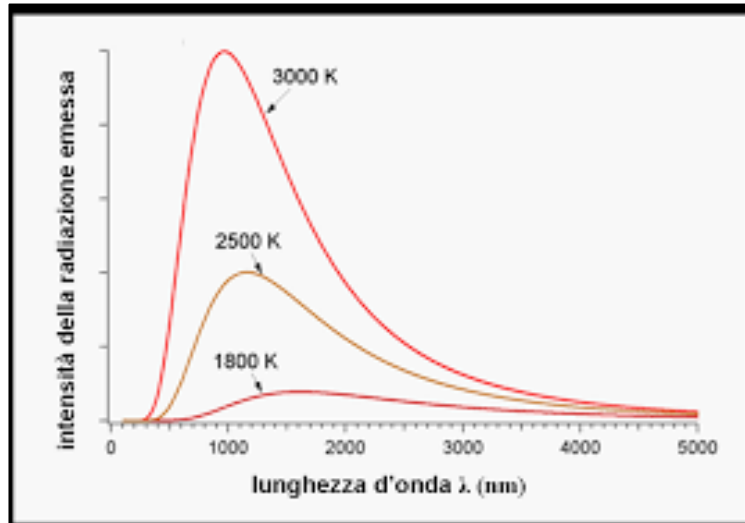


Figura 1

Le differenti lunghezze d'onda nello spettro della luce visibile vengono interpretate dal cervello come colori, che vanno dal rosso delle lunghezze d'onda più ampie, al violetto delle lunghezze d'onda più brevi.

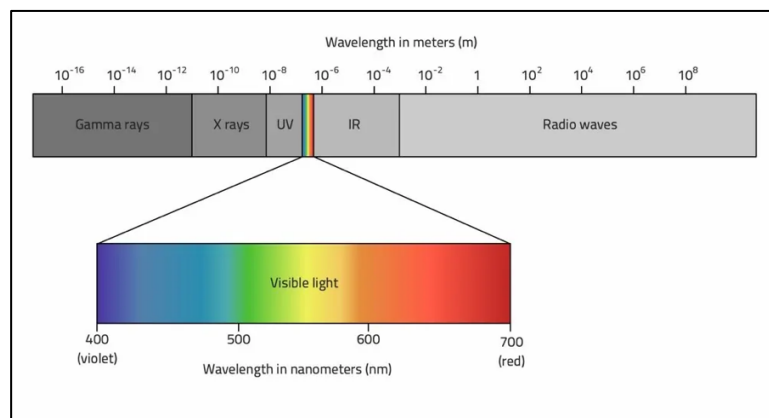


Figura 2

Come si può ben vedere dalla *figura 1*, all'aumentare della temperatura corrisponde un picco dell'intensità luminosa che si sposta verso sinistra, verso lunghezze d'onda più corte e quindi verso il colore blu, violetto. Molti fisici tentarono di elaborare una teoria che permettesse di predire lo spettro della radiazione di un corpo nero, ma ci fu un problema: man mano che si accumulavano i dati, le curve che rappresentavano il comportamento dell'oggetto quando veniva riscaldato a diverse temperature, erano

totalmente sbagliate, incomprensibili, indecifrabili, almeno seguendo pedissequamente le, allora note e inconfutabili, relazioni di Maxwell della termodinamica. Per le lunghezze d'onda lunghe i conti tornavano: le curve risultavano essere proprio come quelle trovate sperimentalmente, ma per le lunghezze d'onda corte tutto fu diverso: secondo i calcoli teorici le curve dovevano procedere all'infinito, vale a dire dovevano essere presenti frequenze grandi a piacere. Questa differenza tra i dati sperimentali e i dati teorici sconvolse la comunità scientifica tanto da essere chiamata da alcuni giornalisti come la "catastrofe ultravioletta"¹⁴. Essa era una delle prime spaccature nell'edificio della fisica classica, che fino a quegli anni sembrava inarrestabile.

A Berlino, epicentro della catastrofe ultravioletta, insegnava nell'Università Humboldt un fisico brillante chiamato Max Karl Ernst Ludwig Planck, il quale nel 1900 inventò la *teoria dei quanti* partendo da dati sperimentali e riuscì a ottenere una formula, ricavata dalla teoria classica, che si attenesse perfettamente a questi ultimi. L'idea di Planck permetteva alle onde lunghe di mostrarsi a tutte le temperature, ma tagliava le onde corte ipotizzando un "pedaggio". Questo, faceva sì che le frequenze più alte richiedessero più energie rispetto a quelle basse; pertanto, a basse temperature l'energia non era sufficiente a "pagare il pedaggio" ed ecco la spiegazione del fenomeno del taglio di onde corte. Sembra una soluzione banale e molto semplice, ma la fisica classica non lo contemplava affatto: secondo la teoria di Maxwell l'energia di un'onda dipendeva solo dalla intensità di quest'ultima, non dalla frequenza o dal colore. Per concludere la straordinaria scoperta di Planck, bisogna chiarire quale sia il soggetto che ha maggiore energia all'aumentare della frequenza. Il fisico tedesco ipotizzò che il trasferimento dell'energia (da calore a radiazione) potesse avvenire solamente mediante "pacchetti di energia", detto altrimenti, egli trovò un modo per dividere la luce emessa in quanti, ognuno di essi dotato di una quantità di energia correlata alla frequenza. Ecco la chiarificatrice formula di Planck:

$$E = h\nu$$

Dove E è l'energia del quanto, h è la costante di Planck e ν rappresenta la frequenza. Espressa a parole questa formula indica che "l'energia di un quanto di luce è direttamente

¹⁴ Venne chiamata "catastrofe ultravioletta" poiché secondo la termodinamica classica dovevano essere presenti frequenze d'onda grandi all'infinito (di colore ultravioletto), mentre nei risultati sperimentali, a seconda della temperatura erano presenti frequenze d'onda solamente fino a una certa frequenza massima.

*proporzionale alla sua frequenza*¹⁵“. Per concludere, dobbiamo sottolineare che Planck non intendeva postulare un cambiamento nella natura della luce, bensì solamente nel modo in cui gli atomi si muovevano, ovvero ciò che era quantizzato non era l'essenza della radiazione elettromagnetica, ipotesi formulata da Einstein qualche anno più tardi, ma solamente il modo di trasferire l'energia. Conseguentemente, non ritenne di aver enunciato una teoria in contrasto con la meccanica classica, anche se la sua formulazione comportava due deviazioni molto importanti da quest'ultima: in primo luogo, la relazione tra il contenuto energetico e la frequenza erano del tutto assenti nella teoria di Maxwell e, oltre a ciò, per Maxwell l'energia era continua, in grado di assumere qualsivoglia valore, mentre Planck teorizzò la discretizzazione di quest'ultima; quindi, l'introduzione di queste particelle chiamate quanti. Infine, è molto importante affermare che, sebbene il fisico tedesco non se ne fosse reso conto, la costante che porta il suo nome, fu l'inizio di un'era di cambiamento radicale e l'apertura di un nuovo mondo: quello quantistico.

2.2 Albert Einstein e il principio euristico

Le fenomenali portate dell'introduzione di questi “pacchetti di energia” vennero comprese e analizzate profondamente da un fisico allora sconosciuto, che divenne uno delle personalità più importanti del secolo XX: Albert Einstein. Egli si vide stravolto e sconcertato da questa nuova scoperta e si rese conto che la nuova teoria comportava l'esistenza di un'entità ben definita, di natura particellare e discreta. Tant'è che gli *Annalen der Physik*, la più importante rivista fisica dell'epoca, nel 1905 pubblicò uno dei più notevoli articoli che siano mai stati scritti “*Su un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce*”. In quelle pagine Einstein teorizzò la celebre ipotesi sul quanto di luce:

*“Una radiazione monocromatica di densità ridotta si comporta, nell'ambito della termodinamica, come se fosse composta di quanti di energia indipendenti tra loro*¹⁶“.

Qualche riga dopo, compì un passo fondamentale, ovvero enunciò il suo *principio euristico*:

¹⁵ (Lederman, 2011).

¹⁶ (Einstein, 1992).

“Se ora una radiazione monocromatica (di densità abbastanza piccola) si comporta [...] come mezzo discontinuo consistente in quanti di energia, allora è naturale chiedersi se anche le leggi della generazione e della trasformazione della luce siano le stesse che si avrebbero se la luce consistesse in quanti di energia del genere¹⁷.”

La portata delle sue affermazioni fu immensa, Einstein, con l'ipotesi e conseguentemente il principio euristico volle esplicitare che era possibile affermare non solo che la radiazione fosse emessa e assorbita in quanti di energia, ma anche che l'ipotesi del quanto di luce fosse una proprietà caratterizzante la radiazione elettromagnetica; perciò, non solo la trasmissione dell'energia dal calore alla luce è quantizzata, ma anche la luce stessa. Così facendo, riappare l'ipotesi, ormai scardinata da anni, della natura corpuscolare della luce. Per rendere ragione di queste sue ipotesi Einstein si dedicò a prendere in esame alcuni fatti sperimentali che la teoria ondulatoria non era in grado di spiegare uno tra questi: *l'effetto fotoelettrico*.

2.3 L'effetto fotoelettrico

Insieme al corpo nero, anche l'effetto fotoelettrico sconvolse i fisici del secolo XX, ma cerchiamo di comprendere cosa sia realmente questo fenomeno e come mai permesse a Einstein di vincere il Premio Nobel per la fisica nel 1921.

L'effetto fotoelettrico fu osservato in prima istanza dal fisico tedesco Heinrich Hertz nel 1887 come scoperta secondaria dei suoi esperimenti sulle onde radio. Egli notò che una superficie levigata di metallo su cui si proiettava un fascio di luce emetteva particelle elettricamente cariche, che ad oggi possiamo chiamare elettroni. Il problema nasceva per il fatto che questo fenomeno non si presentava con tutti i tipi di luce, ma solo con quelle ad alta frequenza, ovvero provenienti dalla parte blu/violetta dello spettro. Seguendo le equazioni di Maxwell, gli elettroni avrebbero dovuto essere emessi con un andamento proporzionale all'intensità luminosa della luce, ma all'effettuare queste prove sperimentali Philippe Lenard, un allievo di Hertz, scoprì che l'intensità luminosa non era l'elemento chiave. Il rilascio di questi elettroni dipendeva dal cambiamento della frequenza della luce. A questo punto subentrò la genialità e il coraggio di Einstein

¹⁷ Ibid.

nell'affermare che l'effetto fotoelettrico evidenziava la natura quantistica della luce: nella radiazione elettromagnetica, l'energia non è distribuita in modo uniforme, ma è concentrata in singoli quanti, chiamati fotoni. Un solo fotone alla volta e non l'intera onda interagisce singolarmente con l'elettrone, al quale cede la sua energia e per fare in modo che ciò si verifichi è necessario che esso possieda una potenza sufficiente a rompere il legame elettrico che unisce l'elettrone all'atomo. Per spiegarlo più semplicemente, per estrarre dal metallo un elettrone, deve essere pagato un "pedaggio" fisso di energia, ma come abbiamo detto in precedenza l'energia del singolo quanto si determina mediante la formula $E = hf$, ecco spiegato perché esiste questa frequenza di soglia al di sotto del quale il rilascio degli elettroni non avviene. A conseguenza di ciò possiamo comprendere come mai solamente le luci provenienti dall'estremità blu/violetta dello spettro davano origine all'estrazione degli elettroni; il motivo è semplice: con le luci ad alta frequenza, l'energia era tale da poter superare la soglia minima di energia chiamata *funzione di lavoro* (\mathcal{W}), necessaria affinché l'elettrone potesse essere liberato.

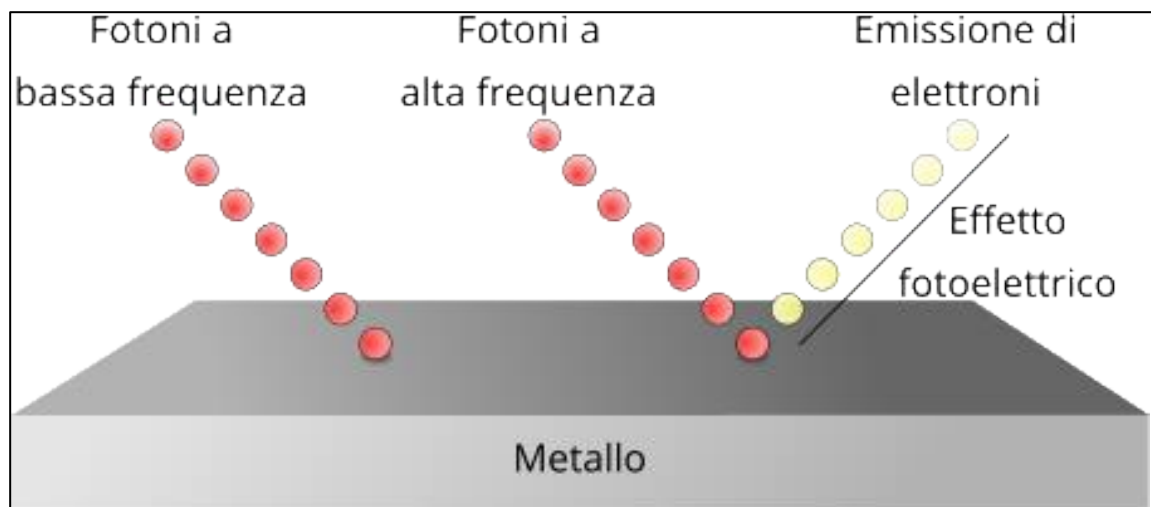


Figura 3

Ecco cosa sconvolse i fisici del XX secolo: una ulteriore prova a discapito dei dettami maxwelliani per i quali il contenuto energetico di un fascio luminoso dipendeva solamente dall'intensità di quest'ultimo e non dalla frequenza dello stesso.

2.4 Onde o particelle? La doppia natura della luce

Le ricerche di Albert Einstein riaprirono il dibattito circa la natura della luce, dimostrando la sua natura corpuscolare. Le origini di tale disputa risalarono al XVII secolo in seguito al contrasto tra la natura ondulatoria sostenuta dal fisico olandese Christiaan Huygens e la natura corpuscolare proposta da Isaac Newton.

Nel 1801 l'inglese Thomas Young effettuò l'esperimento della doppia fenditura per avvalorare la tesi della natura ondulatoria della luce: esso consiste nell'illuminare con una sorgente monocromatica una parete in cui sono collocate due piccole fenditure, al fine di dare origine a un'immagine luminosa su un secondo schermo precedentemente disposto. Per scoprire la natura della luce si fecero delle previsioni, totalmente differenti nel caso in cui la luce fosse stata un flusso di particelle o un'onda: ci si aspettava un'area luminosa al centro dello schermo nella prima ipotesi e una banda nera a cui seguono altre bande verticali alternate più o meno luminose nel caso della seconda. Lo si può comprendere in maniera più chiara mediante l'immagine seguente:

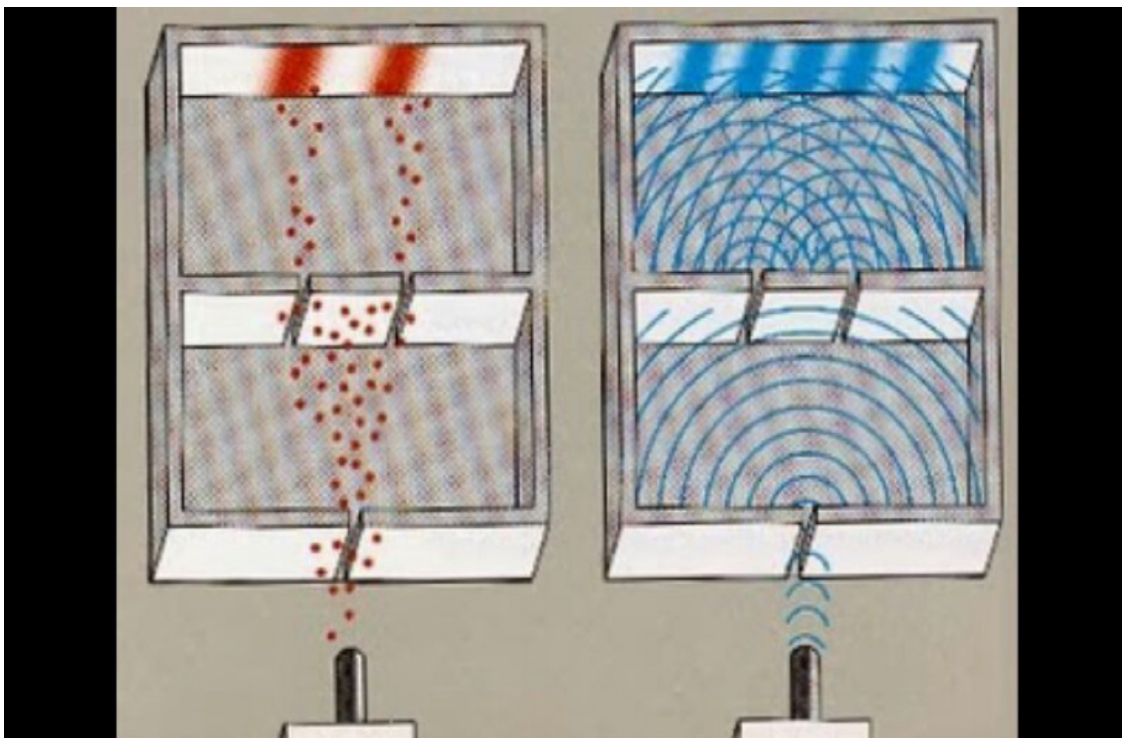


Figura 4

A sinistra possiamo osservare il comportamento della luce nell'ipotesi in cui fosse un fascio di particelle e a destra nell'ipotesi in cui fosse un'onda.

A seguito della fase sperimentale si ottennero le differenti zone luminose come previste dal modello ondulatorio, ma come interpretarle? La comparsa di frange chiare e scure è dovuta al fenomeno dell'interferenza costruttiva e distruttiva¹⁸ che avviene tra le due onde che si generano a partire dalle due fenditure, dunque: “la luce è un'onda” affermò Young. Successivamente, nel 1864 venne confermata in maniera definitiva l'ipotesi ondulatoria della luce grazie alle equazioni di Maxwell, per le quali si comprese che la luce visibile era solamente una parte dello spettro della radiazione elettromagnetica.

Come già accennato all'inizio di questo capitolo, nel 1921 venne riaperto il dibattito sulla natura della luce a seguito dell'effetto fotoelettrico postulato da Einstein. Difatti, nel 1923 emerse un ulteriore esperimento a supporto della natura particellare della luce: l'effetto Compton. Il fisico americano Arthur Compton dimostrò che, quando i raggi x collidono con gli elettroni, essi rimbalzano riportando una modificazione della loro energia esattamente come accade per una particella in un urto elastico. Perciò vi erano due posizioni del tutto avallate da esperimenti: il fenomeno ondulatorio sostenuto dall'esperimento di Young e l'effetto fotoelettrico e di Compton a sostegno della natura particellare. Come è possibile che la luce sia un fascio di particelle, ma che si generi allo stesso tempo il fenomeno delle interferenze, tipico delle onde? La luce non può essere un'onda e una particella allo stesso tempo. Proprio per rispondere a questi interrogativi si effettuarono diversi esperimenti alla stregua dell'esperimento di Young, aventi come protagonisti non un fascio di particelle, ma un solo fotone. Così facendo si riteneva di “mettere alle strette il fotone”, esso doveva passare o per una fenditura o per l'altra, dunque depositarsi o nella zona dello schermo corrispondente alla fenditura A o nella B. Il risultato fu strabiliante, i fotoni, pur passando uno alla volta, si disposero lungo le differenti bande di interferenza ottenute dall'esperimento di Young, era come se il fotone sapesse in qualche modo il comportamento dei fotoni prima e dopo di lui. Ciò che si ottenne da questo esperimento fu molto controverso, dunque provarono a effettuare altre misurazioni, in particolare misero due rilevatori: uno in corrispondenza della fenditura A e uno nella B. Il risultato fu, anche in questa occasione, impressionante: accendendo i rilevatori, i fotoni si comportavano come delle particelle; dunque, si depositavano a due bande di luce; mentre spegnendo i rilevatori, i fotoni si disponevano a frange di

¹⁸ Per una spiegazione chiara circa il fenomeno dell'interferenza, sia costruttiva che distruttiva, rimando al cap. 3 pag. 61-62-63 di (Lederman, 2011).

interferenza, a sostegno del loro comportamento ondulatorio. A questo punto, i fisici non sapevano più come interpretare questi risultati, sembrava che l'osservazione determinasse completamente il comportamento del fotone. Tuttora, la natura della luce non è totalmente chiara, ma vedremo più avanti come la meccanica quantistica riuscirà a esporre una teoria che, almeno in parte, riuscirà a spiegarne il bizzarro comportamento.

2.5 Il modello atomico: da Thomson a De Broglie

Nei primi anni 20, il problema che sconvolgeva maggiormente i fisici non era la quantizzazione della luce, bensì la conformazione dell'atomo. Nel XX secolo era molto importante definire la struttura dell'atomo, difatti il modello atomico planetario che conosciamo oggi, all'epoca non poteva essere nemmeno concepibile, dato che seguendo le equazioni di Maxwell, l'elettrone perdendo energia avrebbe rimpicciolito sempre maggiormente la propria orbita fino a collassare sul nucleo. Si era scoperto inoltre che l'orbita non impiegava più di un milionesimo di secondo per restringersi fino ad una piccola frazione del suo diametro originario; perciò, la materia sarebbe stata totalmente instabile. Grazie a Bohr e successivamente all'idea rivoluzionaria di De Broglie giungeremo a teorizzare nuovamente la discretizzazione dell'energia. Ma iniziamo dal principio. Il 30 aprile 1897 il fisico inglese J.J. Thomson scoprì sperimentalmente l'elettrone e teorizzò il "plum pudding model", in italiano modello a panettone, chiamato così poiché immaginò che gli elettroni a carica negativa fossero dispersi come gli acini di uvetta nel panettone in una massa elettricamente positiva. Questa teoria rimase la più attendibile fino all'entrata in scena del Premio Nobel Ernest Rutherford, il quale decise di utilizzare le particelle alfa¹⁹ per testare il suddetto modello atomico. Marsden e Geiger, due aiutanti di Rutherford, effettuarono vari esperimenti in cui puntarono un fascio di particelle alfa verso una sottile lamina di metallo e misurarono lo scattering²⁰ usando uno schermo fluorescente. Si osservò che le particelle alfa venivano deviate dalla lamina in tutte le direzioni e addirittura alcune di loro venivano respinte. Tutto ciò, dovrebbe essere

¹⁹ Le particelle alfa, dette anche raggi alfa, sono una forma di radiazione corpuscolare ad alto potere ionizzante e con una bassa capacità di penetrazione dovuta alla elevata sezione d'urto. Consistono di due protoni e due neutroni legati insieme dalla forza forte.

²⁰ Il termine "scattering" si usa nella fisica particellare per indicare l'interazione tra due particelle in moto un rispetto all'altra, provocando la deviazione della loro linea di volo, ovvero l'angolo formato dalla direzione della particella uscente rispetto alla direzione iniziale.

impossibile secondo il modello atomico di Thomson, poiché secondo quest'ultimo, le particelle alpha avrebbero dovuto attraversare la lamina e giungere allo schermo imperturbabili. Dunque, Rutherford fu portato a credere che la carica positiva dell'atomo fosse concentrata in un volume molto minore rispetto a quello teorizzato da Thomson e conseguentemente che l'atomo fosse costituito in maggioranza da spazio vuoto, con la carica positiva concentrata nel suo centro in un volume molto piccolo e circondato da elettroni.

A questo punto, intervenne un altro fisico molto importante Niels Bohr, il quale nel 1913 teorizzò l'esistenza di orbite con valori discreti di energia per l'elettrone, rinunciando totalmente alla continuità con la fisica classica e riprendendo la teoria già formulata in precedenza per la luce. Più precisamente affermò che un elettrone può occupare solamente determinate orbite dipendendo dall'energia che possiede e che per ogni atomo esiste un'orbita interna, con minor energia possibile, chiamata *stato fondamentale* sotto cui esso non può andare. Ecco spiegato il motivo che per il quale l'elettrone non collassa sul nucleo. Se si eccita uno di questi elettroni, vale a dire gli si fornisce energia, allora quest'ultimo passa da avere l'energia corrispondente al suo stato fondamentale ad averne una maggiore passando all'orbita successiva. Bohr non seppe spiegare quando avvenisse questo salto quantico, ma era certo della sua esistenza. Infine, il passaggio fondamentale fu effettuato da Louis-Victor de Broglie, un fisico francese che apportò un'idea geniale: se la luce poteva essere una particella, perché l'elettrone non poteva essere un'onda? Alla stregua di questa ipotesi, teorizzò che le orbite di Bohr fossero onde stazionarie e che gli stati fondamentali ed eccitati fossero *armoniche fondamentali* e *ipertoni* dell'atomo. Nonostante ciò, considerare un elettrone come un'onda non fu tanto facile come trattare la luce come una particella: un elettrone non viaggia sempre alla stessa velocità come un fotone, indi per cui ha bisogno di regole differenti per determinare la lunghezza d'onda e la frequenza. Per riuscire nel suo intento di determinare queste proprietà, De Broglie, scrisse nel 1924 una tesi di dottorato tra le più controverse in assoluto, ove, ragionando per analogia giunse a relazione la lunghezza d'onda al momento:

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

dove mv indica il momento, h la costante di Planck e λ la lunghezza d'onda. In parole più semplice, il fisico francese collegava il momento di un elettrone alla lunghezza d'onda

“pilota” associata in un modo misterioso all’elettrone stesso. De Broglie, successivamente sperimentò la sua ipotesi sulle orbite di Bohr e ne ottenne che se un elettrone è associato a un’onda, la cui lunghezza è determinata dal momento dell’elettrone, allora le configurazioni di onde stazionarie permesse intorno al nucleo sono proprio i percorsi circolari delle orbite lecite secondo Bohr.

Questa ipotesi ebbe più credito rispetto ai salti quantici inspiegabili ed immediati di Bohr, poiché vi è un passaggio graduale tra l’onda fondamentale e le onde con lunghezza d’onda superiore.

Nonostante ciò, vi erano ancora dei passaggi bui, come possiamo notare dalle affermazioni dello stesso De Broglie: *“Questa teoria è uno schema formale il cui contenuto fisico non è stato ancora determinato [...] può sembrare folle, ma è realmente valida”*. Infatti, se l’elettrone è un’onda, dove si trova l’elettrone particella? Quale è la sua orbita? E come possiamo trovare l’equazione di quest’onda associata all’elettrone?

2.6 Approccio ondulatorio alla meccanica quantistica: l’equazione di Schrödinger

Per trovare una risposta a queste domande dobbiamo aspettare il 1926, anno in cui entrò in scena Schrödinger, uno dei fisici di maggiore spicco del secolo XX. Le sue contribuzioni furono di enorme importanza per lo sviluppo della meccanica quantistica, ma come giunse a fornire alcune risposte a queste problematiche che parevano insormontabili? Il fisico austriaco era in un periodo buio della sua vita, era un quarantenne che ormai aveva perso le speranze di essere ricordato e preso sul serio dai suoi colleghi, un *“intelligente vagabondo”* come lo definiva Einstein, un buon conoscitore di argomenti, ma esperto in nessuno. Quando analizzò la tesi di De Broglie, per un seminario gli si illuminarono gli occhi e la vedette come un’opportunità che doveva cogliere: l’elettrone di De Broglie gli offrì nuove prospettive di vita che lo portarono a vincere il Premio Nobel per la fisica nel 1933. Dopo quattro mesi di enorme creatività tracciò il nuovo paradigma della *“meccanica ondulatoria”* un sistema autoconsistente dal punto di vista logico alla pari della meccanica classica di Newton e alla relatività di Einstein. Ciò che egli produsse fu una singola equazione le cui soluzioni descrivevano la dinamica dell’onda di De Broglie, esattamente come l’equazione $F = ma$ di Newton descriveva il moto dei corpi:

$$\left(-\frac{\hbar}{2m} \nabla^2 + V\right) \psi = i\hbar \frac{\delta\psi}{\delta t}$$

Analizzando i termini dell'uguaglianza, comprendiamo che siamo di fronte ad un'equazione differenziale che descrive l'andamento di una funzione facendo uso delle sue derivate e che la funzione che costituisce l'incognita di questa equazione è la funzione d'onda Ψ ovvero la rappresentazione matematica dell'onda di De Broglie.

Ove \hbar è la costante di Planck, ovvero il legame tra energia e momento di una particella e fra la frequenza e il momento di un'onda; ∇^2 è la derivata seconda rispetto allo spazio \vec{x} ; ed i è il numero immaginario che fa parte dei numeri complessi²¹. In questo modo Schrödinger apparve come un salvatore: l'indescrivibile salto quantico era sostituito da una rappresentazione d'onda che passava soavemente da uno stato ad un altro. Tuttavia, rimaneva un grosso problema: l'equazione non chiarì il rapporto onda-corpuscolo, anzi, se possibile, lo peggiorò. Con l'introduzione dei numeri complessi, possiamo già comprendere che la funzione d'onda di una particella non è direttamente misurabile, ma nella visione del fisico austriaco l'elettrone è un'onda a tutti gli effetti, ma questo come è possibile? La particella è rappresentata come un *pacchetto d'onda*, un insieme di onde confinate in una piccola regione dello spazio, tuttavia, un'onda non è una particella e si estende molto velocemente, se inizialmente era limitata ad uno spazio di piccole dimensioni, in una frazione di secondi si diffonderà sino a raggiungere dimensioni molto ampie, per questo motivo: "Dove è esattamente l'elettrone? Il problema ancora non trovò soluzione e fu la più grande controversia del XX secolo.

²¹ L'unità immaginaria i , equivale alla $\sqrt{-1}$ e permette di estendere il campo dei numeri reali \mathbb{R} al campo dei numeri complessi \mathbb{C} . Nasce dal fatto che non è possibile calcolare la radice quadrata di un numero negativo, e più in generale che non tutte le equazioni polinomiali $f(x) = 0$ hanno una soluzione.

3. Heisenberg e l'indeterminismo della teoria quantistica

3.1 Approccio matriciale alla meccanica quantistica

Nel 1925 Werner Heisenberg, un fisico tedesco impegnato in un post-dottorato a Göttingen, sviluppò un approccio totalmente innovativo alla meccanica quantistica. Egli si rese conto che tutte le difficoltà che si stavano sviluppando in quegli anni dipendevano dall'ostinatezza di volere ad ogni costo trasportare il linguaggio e le proprietà del mondo macroscopico a livello microscopico. Bisognava abbandonare completamente il linguaggio della fisica classica: orbite, corpuscolo, onda sono tutti termini che dovevano essere eliminati dalle trattazioni fisiche. Ciò che venne stabilito fu che le uniche quantità con un significato vero e proprio fossero solamente quelle osservabili e misurabili. Dunque, Heisenberg abolì totalmente le proprietà della fisica classica, rimpiazzandole con concetti innovativi come "stato di un sistema" e "operatori" ovvero quantità matematiche che estraevano informazioni relative al suddetto sistema. Il linguaggio di Heisenberg è molto astratto ed è evidente il cambio radicale confrontato con la fisica precedente; paragonandolo a un concetto artistico, si passò da un quadro impressionista di Claude Monet a un quadro astratto di Vasily Kandinski. Studiando la corrispondenza tra il macroscopico e il microscopico, Heisenberg scoprì che questi operatori non potevano essere scritti come funzioni numeriche poiché non godevano della proprietà commutativa²² e gli unici oggetti matematici per cui questa proprietà non valeva erano le *matrici*. In conseguenza di ciò, la formulazione della meccanica quantistica elaborata da Heisenberg fu la *meccanica delle matrici*. È fondamentale chiarire le conseguenze di questo approccio matriciale: non godere della proprietà commutativa significa che ogni quantità fisica possiede inevitabilmente un'incertezza non riducibile a 0, in quanto la precisione infinita di una delle due misure renderebbe valida la proprietà commutativa. Questo fu la base di uno dei principi più importanti della storia, un principio che mise totalmente in crisi il determinismo: *il principio di indeterminazione*.

²² Nella proprietà commutativa cambiando l'ordine dei fattori il risultato non cambia. Nel caso degli operatori se si applica a uno stato fisico l'operatore quantità e poi l'operatore posizione, non si otterrà lo stesso risultato rispetto a se si facesse l'operazione inversa. In formule matematiche: $AB|x\rangle \neq BA|x\rangle$.

3.2 Prima relazione di indeterminazione

Il fisico tedesco, spinto dalle scoperte di Bohr e dall'equazione di Schrödinger, ridefinì totalmente il linguaggio della “nuova” fisica, partendo dalla posizione e dalla velocità di un elettrone in modo tale che ci fosse una corrispondenza con le equivalenti newtoniane. Tuttavia, ciò che scoprì fu straordinario, si rese conto che tutti gli sforzi di riconciliazione tra vecchio e nuovo mondo portavano ad una mancanza di determinazione, ben presto scoperta e regolata da Heisenberg stesso. Difatti la conseguenza più importante del suo operato fu la presa di coscienza dei limiti che la nostra capacità di conoscere possiede, limiti legati alle proprietà stesse del mondo microscopico e non determinati dalla manchevolezza umana.

Le particolari regole che Heisenberg utilizzò per analizzare e spiegare queste incertezze vennero chiamate *relazioni di indeterminazione*. Esse asseriscono che vi sono alcune coppie di quantità fisiche chiamate “variabili coniugate” che non possono essere determinate simultaneamente e con estrema esattezza. Un esempio di tali coppie è formato da posizione e quantità di moto, legate da una formula ben precisa che esplica l'impossibilità per il prodotto delle incertezze delle due variabili di essere inferiore ad un valore minimo che risulta essere $\frac{1}{2}\hbar$. Più precisamente, ecco la relazione che lega le due proprietà e che costituisce il principio di indeterminazione in tutta la sua imponenza:

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

dove Δx indica l'incertezza sulla posizione, Δp l'incertezza sulla quantità di moto e \hbar si ricava da $\frac{h}{2\pi}$. Detto a parole: “il prodotto delle incertezze relative alla posizione e alla quantità di moto di una particella è sempre maggiore o uguale di un numero pari alla costante di Planck diviso per quattro volte pi greco²³“. Questo implica che misurando con grande precisione la posizione, renderemo più piccola possibile l'incertezza di tale proprietà e automaticamente aumenteremo in modo inversamente proporzionale l'incertezza sulla quantità di moto e viceversa. Pertanto, Heisenberg eliminò qualsiasi possibilità di determinismo, affermando che le condizioni iniziali postulate dalla seconda Legge di Newton sono impossibili da determinare. Ma come giunse Werner Heisenberg

²³ (Lederman, 2011)

a scoprire queste relazioni? Lo fece servendosi di *Gedankenexperiments*²⁴. Durante uno di questi, il fisico tedesco comprese che per determinare la posizione di un elettrone è necessario almeno un fotone in grado di rilevarlo, tuttavia una piccola lunghezza d'onda corrisponde a una frequenza molto elevata e quindi un più intenso effetto Compton. Ciò significa che il fotone dovrà inevitabilmente cedere una gran quantità di energia all'elettrone modificando la sua quantità di moto e rendendo così impossibile la determinazione di questa seconda grandezza. In questo modo, Heisenberg spiegò che possiamo inventare gli strumenti più precisi e tecnicamente più perfetti possibile, eppure, nonostante ciò l'Universo fa sì che ciò che conosciamo da un lato limiti ciò che possiamo conoscere dall'altro. È fondamentale notare come il principio di incertezza non si applichi solamente a oggetti microscopici, ma anche a quelli macroscopici. Tuttavia, h è una quantità estremamente piccola che si rapporta ad oggetti di massa molto grande, pertanto, le deviazioni dalla descrizione classica sono del tutto trascurabili. Un'altra conseguenza di questo principio è stata riuscire a dedurre la stabilità dell'atomo di Bohr ovvero spiegare l'esistenza dell'orbita più bassa sotto la quale l'elettrone non può andare, evitando così il collasso dell'elettrone sul nucleo. Se l'elettrone si avvicinasse sempre più al nucleo fino a toccarlo allora l'indeterminazione sulla sua posizione sarebbe sempre minore, tenderebbe a zero e conseguentemente l'indeterminazione sulla quantità di moto tenderebbe a infinito e la sua energia aumenterebbe. Con ciò si dimostra che è possibile uno stato di equilibrio in cui l'elettrone è sufficientemente ben localizzato ($\Delta x \neq 0$) in cui l'energia è la minima possibile, dato il corrispondente valore di Δp .

3.3 Seconda relazione di indeterminazione ed Effetto Tunnel

Posizione e quantità di moto è stata definita come una coppia di variabili coniugate, tuttavia essa non è l'unica esistente. Heisenberg trovò una seconda relazione di indeterminazione nella quale il tempo e l'energia si comportano esattamente come posizione e quantità di moto. Ecco la loro relazione:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

²⁴ In italiano "esperimenti mentali", ossia esperimenti che non si intendono realizzare nella pratica, ma che vengono solo immaginati e le cui conclusioni sono tratte applicando le leggi della fisica.

ove ΔE indica l'incertezza sull'energia e Δt l'incertezza sull'intervallo di tempo durante il quale avviene il fenomeno fisico studiato. Ciò significa che vi è un'impossibilità ontologica di determinare con esattezza e simultaneamente l'energia e il tempo di un corpo; se l'incertezza sul tempo si riduce a zero, allora l'incertezza sull'energia assumerà valori tendenti all'infinito. Heisenberg interpretò le sue relazioni di indeterminazione nel contesto delle teorie sulla misura; tuttavia, le conseguenze che ne derivano sono ben più estese: viene mostrato che vi sono limiti anche alla possibilità di definire le grandezze stesse, misurate o no che siano. Uno degli esempi di ciò è l'*Effetto Tunnel*, il quale permette una transizione ad uno stato impedito dalla meccanica classica.

Per descrivere l'effetto tunnel solitamente si utilizza una situazione legata alla vita di tutti i giorni. Si immagina un'automobile che risale una collina con il motore spento, secondo la fisica newtoniana la macchina supera la cima solamente se possiede un quantitativo energetico tale da poterglielo permettere, ovvero se la sua energia cinetica risulta maggiore dell'energia potenziale; se invece è minore allora diventa impossibile che essa possa superare l'ostacolo. Nella meccanica quantistica, invece, ciò non accade. Secondo la nuova teoria dei quanti la macchina²⁵ nonostante non abbia l'energia sufficiente, può accadere che riesca ugualmente a superare la collina. Non è impossibile, è solo improbabile. Questo è dovuto a una incertezza dell'energia della macchina in un dato periodo di tempo; infatti, come afferma la seconda relazione di indeterminazione se Δt tende a 0 allora ΔE tende a infinito. In questo esempio è come se venisse violato il principio di conservazione dell'energia, in realtà ciò avviene solo per una brevissima frazione di tempo. Infatti, la lacuna energetica viene colmata in un istante immediatamente successivo, in modo tale da ristabilire il quantitativo energetico precedente. Di conseguenza la fisica quantistica ammette eventi impossibili per la fisica newtoniana e tali eccezioni sono basilari per processi vitali come la fusione degli atomi di idrogeno che permette la generazione di energia nel Sole, dunque la vita sulla terra. In particolare, la fusione è la reazione nucleare che avviene nel sole e nelle altre stelle con

²⁵ Si è soliti usare una situazione comune come la macchina e la montagna per facilitare la comprensione; tuttavia, è meglio precisare che come per la prima relazione di indeterminazione negli oggetti con una massa molto grande, l'incertezza diventa irrilevante.

la produzione di un'enorme quantità di energia, più precisamente due nuclei di elementi leggeri a temperature e pressioni elevate, fondono formando nuclei più pesanti. L'eccezionalità di questo processo deriva dalla fisica stessa che regge le reazioni nucleari: i nuclei devono possedere un'energia abbastanza elevata da vincere la repulsione elettromagnetica che si instaura tra due cariche positive. Questo quantitativo energetico non è posseduto dai due nuclei, nonostante ciò, la reazione può comunque avvenire; esattamente come nella situazione precedente la macchina in determinate situazioni riesce a superare la cima della montagna pur non avendo l'energia necessaria; difatti ciò è improbabile, non impossibile come avverrebbe nella fisica classica.

3.4 Interpretazione di Copenaghen

L'origine dell'interpretazione di Copenaghen viene individuata in un discorso che tenne Bohr al Congresso internazionale di fisica, tenutosi a Como il 16 settembre 1927. Il fisico tedesco presentò un'idea innovativa che divenne la più diffusa esplicitazione della meccanica quantistica. Per comprenderla al massimo ed esplicitare i suoi punti principali dobbiamo chiarire due concetti fondamentali della fisica quantistica: la *probabilità* e la *realtà*. Il primo punto riconduce a una nuova interpretazione dell'equazione d'onda di Schrödinger, mentre il secondo si riferisce ad una straordinaria ed innovativa esplicitazione della realtà fornita da Niels Bohr. Nel dettaglio, per quanto riguarda la probabilità, Max Born scoprì che l'onda associata all'elettrone non era una vera e propria onda materiale come sosteneva Schrödinger stesso, bensì un'*onda di probabilità*. Ciò che aveva un corrispettivo fisico era il quadrato della funzione Ψ il cui corrispettivo numerico era sempre complesso, ma positivo e reale e rappresentava la probabilità di incontrare una particella entro una certa unità di volume. Riesaminando l'esperimento della doppia fenditura di Young si chiarificò che le frange più chiare rappresentavano le zone in cui giungevano più elettroni, al contrario le frange più scure descrivevano le bande in cui vi era meno concentrazione di particelle. Tutto ciò è molto utile per spiegare il comportamento della luce, ma ben poco ci dice sul comportamento del singolo fotone in quanto non è possibile determinarne la posizione precisa un momento dopo essere entrato in contatto con la superficie. Anche in questo caso, come nelle relazioni di indeterminazione, il limite conoscitivo non è metodologico, ma ontologico, è un limite della meccanica quantistica stessa. Dunque, non ci sarà mai la possibilità di conoscere la

posizione futura di una particella, ciò che si può fare è semplicemente una stima statistica più accurata possibile.

Il secondo punto, la realtà, è un concetto fondamentale dell'interpretazione di Copenaghen. Niels Bohr, un fisico danese affermò:

“Tutto ciò che chiamiamo reale è fatto di cose che non possiamo considerare reali”

Cosa significa questa frase? Come è possibile che la realtà non sia costituita da qualcosa di reale? Per comprendere l'enunciato di Bohr dobbiamo effettuare un breve confronto con la fisica classica. Mentre in essa la realtà oggettiva esiste indipendentemente dall'osservatore, nella teoria dei quanti, o meglio nell'interpretazione di Copenaghen, il modo in cui decidiamo di misurare l'oggetto condiziona l'immagine stessa che otterremo da quella misurazione. Per spiegare questo concetto analizziamo in che modo è trattata l'onda in espansione che descrive una particella libera. La dimensione del pacchetto di onde iniziale rappresenta l'indeterminazione della nostra conoscenza relativa alla posizione della particella e il suo sparpagliamento col passare del tempo indica l'indeterminazione sulla velocità. In questo modo, per misurare la posizione di un elettrone bisogna ridurre il più possibile il pacchetto di onde fino a individuare una zona precisa in cui è presente l'elettrone, ma nel momento stesso in cui avviene ciò, l'elettrone avrà già variato la sua velocità aumentando nuovamente la nostra incertezza circa la sua posizione e determinando lo sparpagliamento del pacchetto di onde. Queste due fasi avverranno di continuo, è un circolo vizioso; infatti, ogni qual volta si effettua una misura il pacchetto di onde si restringe per poi allargarsi nuovamente e ridursi ancora con la misura successiva. Perciò quello che Bohr vuole far comprendere è che la posizione dell'elettrone non è stabilita fino a che non interviene l'osservatore, il quale, mediante la misura, converte le possibilità rappresentate dall'onda nella realtà delle letture dello strumento, ovvero forza il sistema a scegliere tra tutte le posizioni che l'elettrone potrebbe occupare. Nella meccanica quantistica svanisce il concetto di osservatore passivo, poiché per poter misurare una caratteristica di un oggetto fisico, occorre interagire con esso e questa interazione è inevitabilmente “invasiva” e perturba lo stato originario “obbligando” l'oggetto a manifestarsi. Ecco perché la realtà oggettiva, secondo Bohr, non ha più esistenza autonoma: nell'atto di misurare, lo scienziato spinge la natura a fornirci una risposta o l'altra. Un altro aspetto fondamentale, oggetto dell'interpretazione di

Copenaghen, è il *principio di complementarità* introdotto da Niels Bohr nel 1927 cui obiettivo fu spiegare la dualità onda-corpuscolo e il principio di indeterminazione. Esso consiste nell'affermare che le coppie di proprietà incompatibili enunciate da Heisenberg e i comportamenti ondulatori e particellari caratteristici della meccanica quantistica sono aspetti complementari della stessa realtà. Difatti, uno degli aspetti più problematici della meccanica quantistica era la sua dualità; tutti gli esperimenti che i fisici eseguirono in quegli anni risultavano chiari solamente se analizzati da una certa prospettiva che si rivelava inesatta se applicata a un'altra serie di fenomeni. L'esempio più chiaro di ciò lo ritroviamo nella natura della luce: l'effetto fotoelettrico di Einstein si spiegava solamente ritenendo la luce composta da fotoni, mentre l'esperimento di Young aveva un senso solamente se la luce era considerata un'onda. Secondo Bohr questa necessità di cambiare punto di vista non era una contraddizione bensì era il principio fondamentale della teoria dei quanti: le due variabili coniugate di Heisenberg e il modello ondulatorio e corpuscolare sono aspetti complementari della stessa realtà anche se mutuamente esclusivi. Secondo l'interpretazione di Copenaghen, questi due aspetti della realtà smettono di essere incompatibili proprio perché dipendono dal tipo di esperimento e dallo strumento utilizzato per le misurazioni. Per questo, attraverso la teoria quantistica possiamo affermare che la scienza rappresenta solamente ciò che noi possiamo conoscere della natura e non la natura stessa, più precisamente la scienza ci dona delle risposte che noi stessi, mediante le osservazioni abbiamo obbligato la natura a fornirci.

3.5 Critiche all'interpretazione di Copenaghen

Gli effetti sconvolgenti ed innovativi che apportò l'interpretazione di Copenaghen non passarono inosservati, anzi, vennero molto criticati da personalità influenti della fisica dell'epoca, tra cui Planck, Schrödinger ed Einstein stesso. Planck dichiarò: "L'interpretazione probabilistica deve essere condannata senza fallo, per alto tradimento nei confronti dell'amata fisica"²⁶ e affermò anche che se avesse conosciuto la portata della costante che introdusse non l'avrebbe mai resa pubblica. Schrödinger anch'egli inizialmente ostile a queste idee, si dispiacque di aver inventato l'equazione che diede

²⁶ (Lederman, Hill, 2013).

inizio a tutto²⁷ e necessità vari anni per sostenerle. Fu uno sconvolgimento talmente grande che ci vollero alcuni anni prima che i fisici si mostrassero d'accordo con queste "aberrazioni" ed addirittura per citare il filosofo della scienza Thomas Kuhn che analizzò i cambi di paradigma nella scienza: «alcuni non lo fecero mai²⁸». Tra questi ci fu Albert Einstein che non si convinse della correttezza e della completezza della meccanica quantistica, tant'è che la attaccò mediante l'esperimento mentale conosciuto come *paradosso di Einstein-Podolski-Rosen*. La sua ideologia venne espressa molto chiaramente mediante questa famosa frase pronunciata da Einstein stesso:

“Credi davvero che la luna non sia lì se non la guardi?”²⁹“

Il fisico tedesco e i suoi collaboratori cercarono di dimostrare l'esistenza di alcune variabili nascoste onde evitare che le famose “spooky actions at a distance”³⁰ contraddicessero il principio di località considerato inviolabile alla pari di quello di realtà. A proposito Einstein disse:

“La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Grande Vecchio”³¹“

Oltre a queste critiche vi furono numerosi tentativi orientati ad una sostituzione dell'interpretazione di Copenaghen in favore di teorie inclini ai concetti della fisica classica. Essi possono essere divisi in due gruppi fondamentali: il primo criticò la scuola danese circa il linguaggio poco affine a quello classico; tuttavia, la supportava circa le previsioni dei risultati sperimentali; ed il secondo accettò la teoria di Copenaghen ove i risultati sperimentali concordassero con le previsioni, pertanto, gli autori cercarono di modificare la teoria dei quanti in alcuni punti critici.

²⁷ Più precisamente affermò: “Non mi piace, e mi spiace di averci avuto a che fare”.

²⁸ (Kuhn, 2009).

²⁹ Con questa frase Einstein voleva affermare la sua contrarietà rispetto alla interpretazione di Copenaghen, in particolare al fatto che le proprietà di un corpo vengono determinate solamente con la misurazione. Pertanto, in maniera molto esplicita, dichiarò che la luna esiste indipendentemente dalla sua osservazione e quindi che le affermazioni della scuola di Copenaghen brancolavano nel buio.

³⁰ In italiano azioni immaginarie a distanza. Einstein usò questa espressione riferendosi al caso specifico dell'entanglement, ovvero un fenomeno quantistico in cui uno o più sistemi fisici formano un sistema più ampio il cui stato quantico è rappresentato da una combinazione dei loro singoli stati. Fondamentale è il fatto che la misurazione di uno stato determina simultaneamente il valore dell'altro.

³¹ Lettera di Albert Einstein a Max Born, 1926.

Nonostante le loro differenze tutti gli oppositori dell'interpretazione della scuola danese concordavano in un punto fondamentale:

“Sarebbe desiderabile [...] ritornare al concetto di realtà della fisica classica [...], ritornare all'idea d'un mondo reale oggettivo le cui particelle minime esistono oggettivamente nello stesso senso in cui esistono pietre e alberi, indipendentemente dal fatto che noi le osserviamo o no³²“.

Pertanto, possiamo concludere che la meccanica quantistica è un argomento che al giorno d'oggi smuove molto gli animi e non è ancora giunta ad avere una spiegazione e una interpretazione univoca, esatta e completa.

³² (Heisenberg, 1958).

4. Conclusioni e implicazioni filosofiche

4.1 La parabola del gatto di Schrödinger

Durante i primi decenni del secolo XX le critiche all'interpretazione di Copenaghen si concretizzarono mediante l'esame di alcuni paradossi filosofici portati dalla teoria dei quanti. Tra questi il più importante fu il caso del gatto di Schrödinger. L'offensiva del fisico austriaco alla meccanica quantistica assunse l'aspetto di ciò che egli stesso affermò essere "una situazione abbastanza comica". Infatti, in origine, questo paradosso era inteso solamente per deridere una visione della realtà per lui indifendibile ed il suo scopo era rendere manifesti gli effetti quantistici anche nel mondo macroscopico. Si tratta di un *Gedankenexperiment*, quindi una situazione immaginaria con conseguenze predicibili solamente mediante l'applicazione di leggi fisiche teoriche. L'esperimento mentale può essere descritto come segue:

Un gatto è posto in una scatola sigillata. All'interno della scatola si trovano un contatore Geiger, che contiene un campione di materiale radioattivo, e un diabolico dispositivo che, quando il contatore Geiger rileva il decadimento di un atomo radioattivo, è strutturato in modo da liberare un gas tossico in grado di uccidere il gatto. C'è una probabilità del 50% che il meccanismo si azioni in qualunque ora. Dopo un'ora, si apre la scatola e si scopre se il gatto è vivo o morto³³.

Come interpreterebbe questa situazione la moderna fisica quantistica? Finché non viene osservato, il sistema si trova in una sovrapposizione di stati, da questo deriva che anche l'animale dovrebbe trovarsi in una condizione simile. Infatti, descrivendo questo sistema mediante una funzione d'onda, otterremo uno "stato misto", ovvero una situazione in cui il gatto è sia morto che vivo; quindi, è diviso in parti uguali tra la morte e la vita.

³³ (March, 1994).

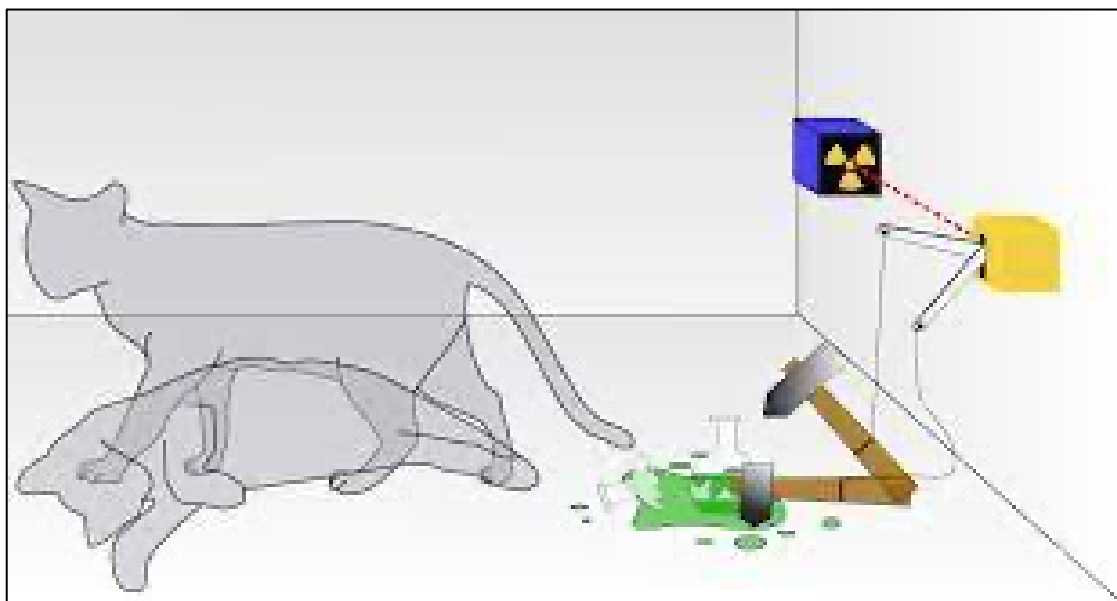


Figura 1

In simboli potremmo rappresentarlo come:

$$\psi_{\text{gatto morto}} + \psi_{\text{gatto vivo}}$$

Secondo la teoria probabilistica di Max Born, l'unica cosa che possiamo calcolare è la probabilità di trovare il gatto morto: $(\psi_{\text{gatto morto}})^2$ e la probabilità di trovare il gatto vivo: $(\psi_{\text{gatto vivo}})^2$. Saremo in grado di conoscere lo stato del gatto, o meglio, definiremo la sorte di quest'ultimo solamente mediante l'osservazione; aprendo la scatola determineremo il collasso della funzione d'onda in un punto, quindi il gatto vivo, o nell'altro, quindi il gatto morto. Secondo la meccanica quantistica non c'è altro modo per conoscere la condizione del gatto se non effettuando una misura ed intervenendo sullo stato del sistema, "obbligandolo" a manifestarsi in un modo o nell'altro.

La situazione paradossale è evidente: come può un gatto essere sia vivo che morto? Questa era la critica che Schrödinger volgeva alla meccanica quantistica, non era possibile che un oggetto vivente fosse in vita e allo stesso tempo non lo fosse. Nonostante ciò, questo esperimento si convertì in un esempio e una prova della nuova fisica e più precisamente del fatto che il semplice atto di misurare intervenga sullo stato del sistema. Ai fini di tale saggio, questo paradosso è utile per delineare il rapporto tra microcosmo e macrocosmo. Schrödinger credeva di essersi burlato della meccanica quantistica, in realtà non fu assolutamente così. Infatti, è molto importante distinguere gli effetti della teoria

dei quanti negli oggetti aventi una massa molto grande e altri con una massa molto piccola.

Come già accennato in precedenza, il grado in cui la relazione di indeterminazione diminuisce la nostra possibilità di predire la posizione futura di un oggetto dipende dalla massa.

Ordine di grandezza, in metri	Tipo di oggetto e relativa massa, kg	Indeterminazione nella velocità, m/s	Limite di predizione temporale, in secondi.
Subatomico 10^{-11}	Elettrone 10^{-30}	10^7	10^{-18}
Atomico 10^{-10}	Atomo 10^{-25}	10	10^{-11}
Biochimico 10^{-8}	Grossa molecola 10^{-21}	10^{-5}	10^{-3}
Microscopico 10^{-6}	Polline 10^{-15}	10^{-13}	10^7
Macroscopico 10^{-5}	Pisello 10^{-4}	10^{-25}	10^{20}

Tabella 1. Mostra fino a che scala temporale le nostre predizioni future possono essere attendibili, operando a varie scale di grandezza.

Pertanto, più l'oggetto ha una massa considerevolmente grande, più l'indeterminazione diventa irrilevante e trascurabile; quindi, il gatto appartenendo al macrocosmo non è un oggetto quantistico, l'incertezza circa il suo stato è del tutto ininfluenza e non costituisce una prova del malfunzionamento della meccanica quantistica. Il paradosso del gatto di Schrödinger è la prova del fatto che il mondo microscopico è realmente distinto dal macroscopico, anche se capire come la nostra realtà macroscopica basata sul determinismo si fondi su un mondo subatomico probabilistico e aleatorio resta uno dei misteri della scienza odierna.

4.2 Realismo o antirealismo?

È ormai ben chiaro come la meccanica quantistica apporti un numero consistente di innovazioni tutt'altro che facili da digerire per gli scienziati abituati ai dettami della fisica classica. Essa, inoltre, apportò vari contributi a tematiche di natura filosofica; una tra queste è il realismo o antirealismo dell'universo. Nel contesto della filosofia della scienza, tale realismo viene chiamato realismo scientifico e consiste in una posizione metafisica per cui il mondo descritto da quest'ultima è reale e vero. Secondo questo pensiero la realtà esiste a prescindere dalla mente dell'essere umano e grazie a tale effettiva realtà dell'universo, unita a potenza di calcolo infinita, gli scienziati sarebbero in grado di

predire gli avvenimenti futuri e di conoscere quelli passati. Come ben possiamo comprendere, l'interpretazione di Copenaghen è un'accanita sostenitrice della corrente opposta: l'antirealismo. Difatti, secondo quest'ultima alcune proprietà del mondo quantistico si determinano e si concretizzano solamente mediante l'intervento umano ovvero per mezzo della misurazione; è come se l'osservazione plasmasse il mondo nella sua vera essenza. In effetti, secondo Niels Bohr non esiste un'immagine oggettiva della realtà, ma semplicemente una tela sovrastante che descrive ciò che possiamo misurare ed osservare. Non possiamo conoscere la posizione reale di una particella nel momento antecedente il nostro intervento sul sistema fisico, non ci è nemmeno dato sapere se effettivamente quella particella possieda una reale e determinata posizione e a detta di Heisenberg ciò non è né importante né necessario. Secondo il fisico tedesco è degno di significato solamente ciò che è osservabile e misurabile quindi interrogarsi sulla reale possibilità del mondo di possedere una proprietà al di fuori della misura è un'azione svantaggiosa e sterile.

Contrariamente a ciò, un accanito sostenitore della teoria realista fu Albert Einstein, il quale si batté a lungo contro l'antirealismo della scuola di Copenaghen tanto da affermare: "più la teoria dei quanti ha successo, più sembra una sciocchezza". Il fisico tedesco insieme ai suoi collaboratori Podolsky e Rosen stabilirono che se il valore di ogni quantità fisica è predicibile, allora significa che tale quantità esprime un elemento fisico di realtà; dunque, le proprietà sono reali ed esistono indipendentemente dall'intervento degli scienziati su di esse. La questione realismo-antirealismo parve giungere a una soluzione solamente nel 1964 grazie all'intervento del famoso fisico irlandese John Bell, il quale propose il *teorema di Bell*. Egli postulò una disuguaglianza che doveva obbligatoriamente essere rispettata nel caso in cui le ipotesi di Einstein fossero corrette; tuttavia, i risultati sperimentali ottenuti da Alain Aspect nel 1982 violarono la suddetta disuguaglianza. Pertanto, una teoria realista locale come quella proposta da Einstein non era sostenibile alla luce dei dati sperimentali. Nonostante l'apparente vittoria dell'antirealismo, la disputa resta aperta ancora oggi.

4.3 Dualismo quantistico e Renè Descartes

Oltre alla tematica filosofica circa il realismo del mondo, la meccanica quantistica tratta un'altra questione molto importante, ovvero il dualismo. Nel campo di indagine della

filosofia esso è sempre stato al centro di un dibattito molto acceso, principalmente incentrato sulla separazione tra mente e corpo. Famosa è la postura del filosofo francese René Descartes ossia la separazione tra *res cogitans* e *res extensa*. L'idea di Descartes prevedeva la presenza di una sostanza pensante (*res cogitans*) libera, consapevole ed indipendente, con la quale è possibile designare l'io ed accanto ad essa, una sostanza corporea (*res extensa*), materiale e divisibile. Dunque, la realtà dell'essere umano è scissa in due aspetti totalmente diversi e separati tra loro. Tuttavia, per molto tempo il filosofo francese si interrogò su come poter giustificare l'apparente relazione ed interferenza di un aspetto sull'altro, fino ad introdurre la teoria della ghiandola pineale, ovvero l'idea che esista una zona del cervello con il compito di unire le due parti e le due sensazioni. Ma si possono trovare delle somiglianze tra il pensiero di Descartes e la meccanica quantistica? Come può essa contribuire ad alimentare questo dibattito circa il dualismo? Grazie al principio di complementarità introdotto da Niels Bohr. Come già esplicito nel capitolo precedente, si tratta di una teoria per la quale due aspetti opposti si completano a vicenda pur escludendosi. In particolare, l'aspetto corpuscolare e ondulatorio di un fenomeno fisico, non si manifestano mai contemporaneamente, ma allo stesso tempo sono entrambi necessari per fornire una descrizione completa del fenomeno. L'insorgenza di uno rispetto all'altro dipende semplicemente dal tipo di interazione a cui il fenomeno è sottoposto, un esperimento che permette di osservare la natura corpuscolare di un sistema fisico impedisce la manifestazione della natura ondulatoria. Per questo, si potrebbe affermare che la misurazione, l'atto di osservare trasformano il sistema quantico in un sistema classico poiché osservando il sistema obblighiamo la funzione d'onda a collassare in una proprietà o nell'altra; quindi, ciò che vedremo sarà o l'aspetto corpuscolare o quello ondulatorio. Pertanto, la meccanica quantistica potrebbe essere vista come un esempio del pensiero di René Descartes. Come già detto, osservare un sistema quantistico è come trasformarlo in un sistema tipico della fisica classica e da ciò ne derivano due proprietà, due aspetti di un sistema totalmente diversi e separati tra loro, esattamente come teorizzò il filosofo francese per quanto riguarda la *res cogitans* e la *res extensa*. Relativamente alla parte tipica della meccanica quantistica ovvero il dualismo quantico si potrebbe paragonare al momento in cui Descartes propose la teoria della ghiandola pineale ovvero l'unione delle due parti. L'aspetto corpuscolare e ondulatorio del sistema fisico non sono più separati e totalmente indipendenti tra loro, smettono di essere incompatibili seppur

escludenti, poiché come afferma Niels Bohr sono complementari ed entrambi costituenti della stessa realtà. In conclusione, la meccanica quantistica, può aiutare la filosofia a comprendere che due aspetti a prima vista totalmente opposti tra di loro, potrebbero, invece, avere una realtà in comune o comunque essere legati in maniera impensabile come le proprietà particellari e ondulatorie di un sistema fisico.

4.4 Il mondo non è più deterministico?

La conseguenza filosofica più importante introdotta dai dettami della fisica dei quanti è la crisi del determinismo. Se con la meccanica classica il mondo si poteva immaginare come un sistema univoco, sequenziale e prevedibile, con l'introduzione della meccanica quantistica non è più possibile darlo per scontato. Come è possibile giungere ad affermare determinate asserzioni? Per darsi una risposta è importante riconsiderare la definizione fisica di indeterminismo e alcune teorie cardine della meccanica quantistica, in particolare il principio di indeterminazione di Heisenberg e la nuova interpretazione probabilistica dell'equazione di Schrödinger.

In fisica il termine "indeterminismo" ha una definizione specifica:

“Lo stato presente del sistema fisico non è completamente definibile oppure a un medesimo stato presente completamente definito possono corrispondere molti stati futuri possibili, uno solo dei quali si realizzerà³⁴”.

In altre parole, un sistema si dice indeterministico quando date le condizioni iniziali la sua evoluzione non è determinata né riproducibile. Abbiamo già chiarito come grazie alla seconda legge di Newton $\vec{F} = m\vec{a}$, si possa affermare con certezza che il mondo è determinista. In effetti, secondo Newton, era possibile determinare l'evoluzione di un sistema fisico semplicemente risolvendo il sistema di equazioni $\vec{F} = m\vec{a}$, conoscendo per ogni suo punto il valore esatto di velocità e posizione. Tuttavia, con l'avvento della meccanica quantistica tutto questo cambiò: il mondo divenne indeterminista. Con il principio di indeterminazione di Heisenberg la natura sfugge a una fissazione precisa dei nostri concetti intuitivi a causa della perturbazione arrecata dai nostri mezzi di osservazione. Difatti non è possibile determinare con estrema esattezza e

³⁴ (Dorato, 2009)

simultaneamente il valore di due variabili coniugate che definiscono lo stato di una particella; misurando con esattezza la posizione di quest'ultima, si ottiene la massima incertezza per quanto riguarda la velocità. La conclusione più sconvolgente che possiamo trarre dalle relazioni di indeterminazione di Heisenberg è il fatto che non solamente vi è una incertezza circa la conoscenza precisa di una proprietà, ma che questa incertezza è ontologica e non metodologica. Ciò significa che anche se si utilizzasse il più potente dei microscopi non si riuscirebbe a determinare contemporaneamente il valore esatto di posizione e velocità, poiché l'incertezza è una caratteristica dell'essere delle cose, del nostro mondo. Non entra più in gioco la limitatezza dell'essere umano, non è più l'uomo ad essere la causa dell'impossibilità di predire gli eventi futuri, bensì è proprio la caratteristica stessa del cosmo ad impedirlo. Nemmeno il "Demone" di Laplace potrebbe conoscere gli avvenimenti futuri, per lui tutto sarebbe oscuro ed impossibile da prevedere. Nonostante le conoscenze illimitate e l'enorme potenza di calcolo descritte dal fisico francese, quest'*Intelligenza Divina* non giungerebbe mai alla conoscenza effettiva delle condizioni iniziali poste dalla Seconda Legge di Newton e conseguentemente il futuro le sarebbe totalmente oscuro.

Per concludere tale trattazione sull'indeterminismo potremmo citare una frase emblematica che Werner Heisenberg utilizzò nell'articolo "*Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica*" inviato il 22 marzo 1927 alla rivista *Zeitschrift für Physik*:

"Se si accetta che l'interpretazione della meccanica quantistica qui proposta sia corretta in alcuni punti essenziali, allora dovrebbe essere permesso affrontare in poche parole le conseguenze di [tale] principio [...] nella formulazione netta della causalità: "se conosciamo in modo preciso il presente, possiamo prevedere il futuro", non è falsa la conclusione, bensì la premessa. In linea di principio noi non possiamo conoscere il presente in tutti i suoi dettagli. [...] Dunque, mediante la meccanica quantistica viene stabilita definitivamente la non validità della causalità [determinismo]³⁵".

³⁵ Le relazioni di indeterminazione implicano la non validità del determinismo, non della causalità. Tuttavia, Heisenberg utilizzò il termine *causalità* poiché negli anni '20 la distinzione tra questo concetto e il determinismo non era precisa. Fece chiarezza il fisico Max Born affermando: "Nella meccanica quantistica non è la causalità propriamente detta ad essere eliminata, ma soltanto una sua interpretazione tradizionale che la identifica con il determinismo".

Conclusione

Questo studio si è posto l'obiettivo di comprendere la possibilità di descrivere il mondo come sistema fisico sorretto da relazioni deterministiche; ovvero, stabilire se è corretto credere all'esistenza di un cosmo sorretto da relazioni deterministiche o ritenere l'evoluzione di un sistema fisico un evento imprevedibile. Gli esperimenti per determinare la natura particellare o ondulatoria della luce insieme all'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica e soprattutto alle relazioni di indeterminazione di Heisenberg minarono e sconfissero il rigore del determinismo, ritenuto totalmente valido nel XVIII e XIX secolo grazie alla seconda Legge di Newton. È ragionevole, dunque, affermare che nel microcosmo vige l'indeterminismo, non è possibile predire l'evoluzione di un sistema fisico, non solamente in quanto non ci è dato conoscere con esattezza e simultaneamente due variabili coniugate, ma anche perché non sappiamo neppure se tali proprietà appartengano all'oggetto indipendentemente dall'intervento dell'osservatore. Questo elaborato ha cercato, inoltre, di stabilire la natura di tale determinismo che abbiamo visto essere ontologica e non metodologica; nessun essere, nemmeno con gli strumenti più potenti e precisi possibile sarebbe in grado di predire eventi futuri e conoscere quelli passati, poiché il determinismo è una caratteristica intrinseca del mondo in cui viviamo e non è relazionato ai limiti della natura umana.

La visione indeterministica non è stata accettata unilateralmente dalla comunità scientifica e filosofica; troviamo importanti esponenti del mondo intellettuale ampiamente contrari ai risultati qui proposti a favore di una visione deterministica del reale. Tra i principali è doveroso citare la figura di Albert Einstein, il quale pronunciò in merito la famosa frase:

“Dio non gioca a dadi³⁶”

Naturalmente per trattare la tematica del saggio in modo completo si necessiterebbe di un lavoro di indagine più lungo ed approfondito, ciò al fine di analizzare anche aspetti di natura più tecnica che evidenzerebbero ulteriormente la crisi della teoria deterministica. Tra gli argomenti di particolare interesse si sottolinea la teoria dei cammini proposta dal fisico Richard Feynman, la quale suggerisce che per calcolare la probabilità del verificarsi

³⁶ Lettera di Albert Einstein a Max Born, 1926.

di un fenomeno occorre considerare non solamente ciò che è accaduto, ma anche sommare tutte le possibilità teoriche di quell'evento. Un'altra tematica interessante da approfondire è la teoria del multiverso ovvero un'idea che postula l'esistenza di universi coesistenti fuori dal nostro spaziotempo. Potremmo ancora parlare molto della questione determinismo-indeterminismo ma si considera che gli spunti sopra dati siano di per sé rilevanti per facilitare il lettore in una futura ricerca e per fornire ulteriori campi di indagine.

Per concludere, si ritiene fondamentale ricordare che la meccanica quantistica consiste in una serie di postulati scientifici che costituiscono il cosiddetto *formalismo quantistico*. In queste formule matematiche non vi sono riferimenti alcuni a termini come *determinismo* e *realtà*; pertanto, è imprescindibile distinguere tra teorie filosofiche basate sull'interpretazione di dati fisico-matematici e speculazioni che si allontanano totalmente dal rigore quantistico. Si considera necessario evitare interpretazioni che richiamano la meccanica quantistica semplicemente per validare presupposti religiosi e filosofici onde evitare di incorrere in dettami "pseudoscientifici" appartenenti al misticismo quantistico non sempre rispettabili dal punto di vista intellettuale e che poco o nulla hanno a che vedere con la teoria dei quanti.

Bibliografia

1. Bell, J. S. (1991). *Lo decibile y lo indecible en mecánica cuántica*. Madrid, Alianza.
2. Becker, A. (2018) *What is Real?: The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics*. New York, Basic Books.
3. Cambiano, G., Fomesu, L., & Mori, M. (2018). *La filosofia moderna. Il Seicento e il Settecento*. Il Mulino.
4. Carroll, Sean. (2021). *Sulle origini della vita, del significato e dell'universo. Il quadro d'insieme*. Giulio Einaudi.
5. Cereda, C. (2006). *Corso di fisica generale*, cap. 4.
6. Cosmelli, C. (2021). *Fisica per filosofi*. Carocci.
7. Da Re, A. (2018). *Filosofia morale*. Ediz. mylab. Pearson.
8. Dorato, M. (n.d.). *Determinismo, libertà e la biblioteca di Babele*. Prometeo - Rivista trimestrale di scienze e storia.
9. Einstein, A. (1992). *Teoria dei quanti di luce*. Newton&Compton Editori. Roma.
10. Einstein, A. (1995). *Corrispondenza con Michele Besso (1903-1955)*. Guida editori. Napoli.
11. Heisenberg, W. (1976). *La imagen de la naturaleza en la física actual*. Barcelona, Ariel.
12. Heisenberg, W., & Gnoli, G. (2015). *Fisica e filosofia*. Il Saggiatore.
13. Kuhn, T. S., & Carugo, A. (2009). *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Einaudi.
14. Lederman, L. M., Hill, C. T., (2013). *Fisica quantistica per poeti*. Bollati Boringieri.
15. Mamiani, M. (1990). *Introduzione a Newton*. Laterza.
16. March, R. H., & Joli, E. (1994). *Fisica per poeti. Lo scienziato come uomo e artista: storia della fisica da Galileo ai nostri giorni*. Dedalo.
17. Pomian Krzysztof (1991). *La filosofia della scienza oggi*. Milano, Il Saggiatore.
18. Romagnino, C., & Loy, L. (1993, giugno 18). *La Teoria corpuscolare della radiazione di Einstein: "Una audace ipotesi", utile a superare la contrapposizione tra continuità e discontinuità nella descrizione della realtà fisica*. Storia della fisica.

Sitografia

1. Determinismo - Che cos'è, definizione e concetto. (2021). Economy-Wiki.com. <https://it.economy-pedia.com/11040537-determinism>.
2. Philosophical Issues in Quantum Theory (Stanford Encyclopedia of Philosophy). (2022b, marzo 23). <https://plato.stanford.edu/entries/qt-issues/>.
3. Quantum Mechanics (Stanford Encyclopedia of Philosophy). (2020, 10 settembre). <https://plato.stanford.edu/entries/qm/>.
4. Zappalà, V. (2022, luglio 26). L'effetto tunnel. L'Infinito Teatro del Cosmo. <http://www.infinitoteatrodelcosmo.it/2014/11/17/10-leffetto-tunnel/>.
5. L'Ottocento: astronomia. Il problema dei tre corpi e la stabilità del Sistema solare. (n.d.). Treccani.it. [https://www.treccani.it/enciclopedia/l-ottocento-astronomia-il-problema-dei-tre-corpi-e-la-stabilita-del-sistema-solare_\(Storia-della-Scienza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/l-ottocento-astronomia-il-problema-dei-tre-corpi-e-la-stabilita-del-sistema-solare_(Storia-della-Scienza)/).

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo spazio a chi, con pazienza e dedizione, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore, Professor Antonio Masiero che mi ha seguito con infinita disponibilità in ogni tappa della realizzazione di questa tesi, aiutandomi particolarmente nelle tematiche fisiche lontane dal mio usuale campo di studi.

Ringrazio immensamente il Professore Valeriano Iranzo, docente dell'Universidad de Valencia il quale durante il mio anno all'estero mi ha insegnato "Filosofía y ciencia contemporánea" facendomi appassionare a questi temi e facendomi capire quale potesse essere il mio campo di ricerca futuro.

Grazie alla mia famiglia che mi ha supportato e sopportato durante tutta la stesura dell'elaborato. Vi ringrazio perché senza di voi non sarei mai riuscita ad arrivare fin qui.

Un sentito grazie ai miei nonni i quali mi hanno trasmesso l'amore per lo studio e che sento vicini tutt'oggi nonostante non ci siano più.

Un ringraziamento speciale ai miei amici di corso Giuseppe e Alessandro per essere sempre stati presenti, per aver ascoltato i miei sfoghi e per avermi fatto compagnia durante la stesura di questa tesi. Non dimenticherò mai tutte le pause ad "Astronomia" e le risate in mensa.

Ringrazio anche la mia migliore amica Valentina che seppur a distanza ha sempre saputo come aiutarmi e starmi vicino in tutti i momenti, anche i più difficili.

Grazie alla mia più cara amica di infanzia Michela che nonostante viva lontano riuscirà ad essere presente alla mia laurea. Grazie per aver trovato il tempo e la possibilità di esserci.

Un ringraziamento speciale a mi "mejor amiga española" Giorgia con la quale ho passato e passerò moltissimi momenti assieme, condividendo sogni e passioni.