

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITY OF BOLOGNA

School of Science
Department of Physics and Astronomy
Master Degree in Physics

**La visualizzabilità dei processi fisici: dalla
Meccanica Quantistica non relativistica alla
gravità quantistica**

Supervisor:
Prof. Vincenzo Fano

Submitted by:
Andrea Leonardi

Academic Year 2020/2021

Sommario

Abstract.....	3
Introduzione.....	4
1 La visualizzabilità della Meccanica Quantistica	7
1.1 La visualizzabilità della Meccanica Quantistica prima del 1927	10
1.2 Schrödinger.....	14
1.3 Pauli e lo spin elettronico	19
1.4 Heisenberg.....	25
1.5 Il contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica	27
1.5.1 La ridefinizione dei concetti di posizione e velocità	27
1.5.2 Il significato epistemologico dell'Anschaulichkeit.....	30
1.5.3 Le conclusioni.....	35
1.6 Visualizzabilità, osservabilità e operazionismo: Heisenberg ed Einstein	37
1.6.1 La simultaneità di Einstein	38
1.6.2 Il confronto con l'indeterminazione	40
1.7 Complementarità e indeterminazione: Heisenberg e Bohr	42
1.7.1 Lo scontro con Bohr.....	43
1.7.2 Interpretazione e statuto epistemologico del principio.....	47
2 La visualizzabilità nella fisica moderna: dell'elettrodinamica quantistica alla Loop Quantum Gravity	49
2.1 I due formalismi della teoria dei campi	52
2.2 L'uso e la diffusione dei diagrammi di Feynman.....	54
2.3 L'approccio alla fisica di Feynman.....	60
2.4 Schwinger e Feynman	63
2.5 Le obiezioni alla visualizzabilità dei diagrammi di Feynman.....	66
2.5.1 Visualizzare l'inosservabile	66
2.5.2 Rappresentare l'incertezza.....	68
2.6 Costruzione e uso della visualizzabilità in QED di Feynman	70

2.7	La visualizzabilità del fine '900.....	74
2.8	Loop Quantum Gravity	77
2.9	Background Independence Theory	79
2.10	La quantizzazione dello spazio	79
2.10.1	Gli spettri di area e volume	80
2.11	Problema del tempo in Meccanica Quantistica	82
2.12	Rappresentazione spazio-temporale.....	84
2.12.1	La simmetria dello spazio-tempo è solo formale	85
2.13	La rappresentazione in LQG	86
2.14	La rappresentazione dei buchi neri e dell'infinito	88
2.14.1	La costruzione di un diagramma di Penrose.....	90
3	Lo sviluppo filosofico della visualizzabilità.....	93
3.1	La costruzione delle immagini in Meccanica Quantistica	94
3.2	La visualizzabilità matematico-fisica	97
3.2.1	Le descrizioni matematiche dello spazio-tempo in fisica classica.....	98
3.2.2	Spazio delle configurazioni e spazio dei momenti	99
3.2.3	La descrizione quantistica dello spazio di Hilbert	101
3.2.4	La visualizzabilità dello spazio di Hilbert	102
3.2.5	Un tentativo di visualizzare il principio di indeterminazione nello spazio di Hilbert	103
3.2.6	Commento al tentativo	105
	Conclusioni	106
	Bibliografia.....	110
	Sitografia	111
	Indice delle figure	112

Abstract

Per la fisica classica, la visualizzabilità era un aspetto implicito e scontato della teoria, un approccio intuitivo e naturale allo studio dei fenomeni.

Nei primi del '900, l'esplicitazione della visualizzabilità entrava in contrasto con i nuovi risultati teorici e sperimentali portando Heisenberg a proporre una rivoluzione epistemologica: la fisica microscopica non può e non deve essere visualizzabile.

A partire dal termine della Seconda guerra mondiale, le redini della fisica teorica passavano ai fisici statunitensi e il loro approccio epistemologicamente più morbido ripropone la visualizzabilità dei fenomeni fisici come una caratteristica soggettiva e intersoggettiva degli stessi fisici, riscontrabile nel successo dei diagrammi di Feynman.

Il ventesimo secolo si chiude con l'impressione che la visualizzabilità stia invece scomparendo a favore di una visione del mondo priva di quei filtri mentali che, fin dall'antichità, furono ritenuti necessari per far sì che la nostra mente possa comprendere la realtà che ci circonda.

Introduzione

Secondo la tradizione filosofica kantiana, la visualizzabilità (*visualizability*) è una condizione necessaria per la comprensione scientifica. Il filosofo Immanuel Kant fu tra i primi a formalizzare la necessità e l'esistenza di forme *a priori* di meccanismi con cui la nostra mente interagisce con il mondo reale che la circonda. Le scienze cognitive moderne ci suggeriscono, e sembrano dimostrare, come la visualizzabilità sia un concetto che appartiene all'uomo in maniera innata¹.

La visualizzabilità non è quindi solo un aspetto metodologico o epistemologico della scienza, ma una caratteristica umana che ne ha influenzato lo sviluppo scientifico e che ancora oggi gioca un ruolo fondamentale nella ricerca, nello studio, nell'insegnamento e nella divulgazione scientifica.

La fisica dell'Ottocento e dei primi del Novecento si è sviluppata con l'idea che la comprensione di un fenomeno fisico avvenisse in un contesto spazio temporale in cui fosse possibile visualizzare il fenomeno stesso. Ciò è osservabile nei modelli della termodinamica ottocentesca, così come nella Teoria della Relatività.

In questo elaborato, l'analisi della visualizzabilità dei fenomeni quantistici e della sua evoluzione viene investigato a partire proprio dal momento di crisi che questa caratteristica affronta nei primi anni del ventesimo secolo. È possibile affermare che le problematiche ad essa legate siano nate dal fatto che la visualizzabilità veniva considerata fino ad allora intrinseca alla fisica e, quindi, veniva data per scontata la sua presenza e utilità. Tuttavia, con l'avvento della moderna Meccanica Quantistica, il panorama scientifico vedeva sorgere una teoria che non includeva una controparte visiva che non fosse inevitabilmente parziale, distorta o inconsistente. Questi aspetti frantumarono la comunità scientifica, impreparata a mettere in discussione le sicurezze che la fisica classica aveva consolidato negli ultimi anni. I maggiori scontri si ebbero soprattutto sul piano epistemologico e su ciò che potesse essere ritenuto accettabile o meno all'interno di una teoria. Per chiunque si sia esclusivamente limitato allo studio nozionistico della Meccanica Quantistica, può risultare sicuramente curioso osservare le grandi figure dell'epoca, come Bohr, Pauli, Schrödinger e Heisenberg, discutere con particolare interesse sui

¹ Gingerenzer 2007, 58-64

criteri fondamentali da avere per ottenere una teoria solida. I risultati sperimentali, le scoperte di nuove particelle fondamentali della materia o i nuovi formalismi matematici erano certamente interessanti, ma era il senso e significato fisico che più interessava a padri della Meccanica Quantistica.

In questo scontro, le due principali epistemologie venivano sostenute da Schrödinger e da Heisenberg. Il primo riteneva che la visualizzabilità della nuova teoria quantistica dovesse nascere e rispettare i vincoli spazio-temporali in continuità con la fisica classica e che ciò si traducesse in un'intuitività intrinseca e necessaria, l'*anschaulich*. Secondo Schrödinger, lo spazio e il tempo in cui viviamo, essendo per noi reali, devono esserlo anche per qualsiasi entità fisica. D'altra parte, Heisenberg riteneva che le nostre percezioni e abitudini microscopiche mal si adeguavano a un mondo così estraneo da quello microscopico: la nuova teoria nasce dai risultati sperimentali e teorici interni a sé stessa, e deve rendere conto solo di essi. Essendo quest'ultimi principalmente gli spettri atomici, e non le traiettorie spazio-temporali, i termini come posizione e velocità perdevano il loro ruolo privilegiato per le descrizioni dei fenomeni. L'intuitività della visualizzabilità non era più legata all'aspetto spaziale, ma alle relazioni di causalità e alla possibilità di "immaginare ogni possibile conseguenza logica della teoria".

Lo scontro proseguì acceso fino ai primi anni '30, sgonfiandosi poi con l'entrata in scena nel panorama europeo e mondiale di questioni storicamente più urgenti.

L'egemonia economica degli Stati Uniti nell'immediato secondo dopo guerra influenzò irrimediabilmente anche la fisica teorica diffondendo uno spirito diverso nell'indagine dei fenomeni fisici. Il pragmatismo di personaggi come Schwinger e Feynman divenne il nuovo paradigma epistemologico dominante, e la visualizzabilità assunse il ruolo di importantissimo strumento necessario per la comprensione di nuovi strumenti teorici come i diagrammi di Feynman.

Tuttavia, essa si ritrovò a vestire i panni di una metodologia estremamente soggettiva. L'idea fondante, ancora oggi la più diffusa, prevede che ogni persona costruisca un'immagine nella propria mente, spesso sufficiente per la comprensione, ma che questa deve poi essere tradotta in un linguaggio oggettivo e comprensibile dagli altri; ciò porta dunque alla formulazione di precise regole di interpretazione per le immagini. Si potrebbe dire che condividiamo l'atto di immaginare, ma non l'immagine. In questo contesto, il fisico viene e veniva addestrato in maniera naturale a combinare le proprie

immagini mentali agli strumenti d'indagine fisica grazie agli insegnamenti dei professori e dei colleghi più esperti.

Messo di lato il ruolo epistemologico della visualizzabilità, essa tornò di nuovo a essere un elemento intrinseco e naturale dei fenomeni quantistici. Un elettrone non ruota su sé stesso, eppure la più veloce spiegazione per lo *spin* è ancora oggi l'immagine di una piccola sfera rotante, con tanto di vettore di rotazione con le due direzioni *up* e *down*. Nell'analisi di moderne teorie, come la gravità quantistica, le immagini spazio-temporali "completamente errate" sono l'unico modo per rappresentare fenomeni e idee talmente astratte che, senza supporto grafico, risulterebbe quasi incomprensibili. Lo spazio è come un grafo di punti e linee, ma come fanno questi stessi elementi a non estendersi nello stesso spazio?

La visualizzabilità viene oggi sottovalutata, insieme a numerose altre caratteristiche epistemologiche della scienza, soprattutto quando si arriva allo studio di teorie più astratte come la Meccanica Quantistica. La storia si ripete: le difficoltà dei protagonisti nel ricercare l'"intuitività" dei fenomeni fisici al momento della loro scoperta sono le stesse che oggi incontra chiunque si imbatte nella Meccanica Quantistica, siano essi studenti, il pubblico di una conferenza o gli stessi ricercatori che cercano di capirsi e comunicare. La costruzione dell'immagini è un atto oggettivamente condiviso che produce un effetto estremamente soggettivo. Tuttavia, come insegnato da Feynman e dal successo dei suoi diagrammi per l'elettrodinamica quantistica, potrebbe essere possibile "addestrare" l'intuitività con cui si costruiscono tali immagini per migliorare la comunicazione dei fenomeni fisici.

Questo elaborato non intende offrire una soluzione universale al problema della visualizzabilità, ma piuttosto presentare un resoconto dell'evoluzione della visualizzabilità, in senso ampio, riguardante i fenomeni fisici della Meccanica Quantistica, a partire dalla nascita della teoria stessa fino ai giorni nostri. L'esplicitazione del ruolo che tale caratteristica ha assunto nello sviluppo della fisica moderna potrà evolversi in un primo passo verso un riconoscimento dell'importanza epistemologica che la visualizzabilità assume per l'insegnamento, la comunicazione e la ricerca scientifica.

1 La visualizzabilità della Meccanica Quantistica

Nella prima metà dell'estate del 1925, Werner Heisenberg formalizzò l'idea di rappresentare le quantità fisiche tramite un set di numeri complessi dipendenti dal tempo; Max Born riconobbe presto la base matematica della concezione di Heisenberg nella teoria delle matrici sviluppata da Cayley nel secolo precedente. In pochi mesi, Heisenberg, Born e Jordan svilupparono il formalismo matriciale della Meccanica Quantistica.

Qualche mese dopo, a partire dal 1926, e in maniera indipendente, Erwin Schrödinger dimostrò come le regole di quantizzazione equivalevano alla richiesta di *soluzioni* precise per alcune funzioni spaziali che, sviluppate, furono formalizzate nella nota equazione ondulatoria di Schrödinger. Egli stesso scoprì l'equivalenza matematica fra il suo formalismo ondulatorio e quello matriciale di Heisenberg. Tale equivalenza venne poi chiarita con il lavoro di John von Neumann che dimostrò l'isomorfismo tra lo spazio l^2 delle matrici e L^2 delle funzioni ^{2,3}. Le interpretazioni delle tue teorie, o formalismi, presentava però diversi punti discordanti.

Da un lato, la meccanica ondulatoria di Schrödinger permetteva di discutere la nuova teoria quantistica con una matematica nota, quella ondulatoria, così come con un'immagine non troppo disturbante, quella delle onde, a cui i fisici erano abituati. Essa era visualizzabile, e quindi intellegibile alla maggioranza della comunità scientifica dell'epoca. Va precisato che tale visualizzazione non si riferisce all'esistenza di una vera e propria "onda" nello spazio tridimensionale, ma un'onda nello spazio delle configurazioni. In questo caso, la presenza di anche solo due particelle richiede l'utilizzo di sei dimensioni, una per ogni grado di libertà posseduta dalla particella, e tale spazio non è più fisico né osservabile in senso classico. Ciò porterà Schrödinger a proporre la sua famosa equazione ondulatoria in termini puramente matematici, relegando l'aspetto visualizzabile a un ruolo di caratteristica implicita o sottintesa.

Opposta a questa visione, la formulazione di Heisenberg basata sulle matrici non solo non permetteva di visualizzare i fenomeni descritti dalla teoria, ma rifiutava questa stessa visualizzabilità come necessaria per la comprensione e la validità della stessa. Proprio in quest'ultimo punto si può osservare il ruolo di un concetto spesso dato per

² Vedi (Jammer, 1974, p. 22)

³ Hanson sostiene che di fatto non sono equivalenti.

scontato come la visualizzabilità; essa, infatti, è associabile a due funzioni che vanno distinte in ambito epistemologico: comprensione e validità.

Determinare i criteri per cui è possibile sancire la validità di una teoria è ancora oggi argomento di un dibattito filosofico all'interno del quale la visualizzabilità ha giocato, e gioca tutt'ora, un ruolo di primo piano. Le teorie moderne contengono sempre più elementi non visualizzabili in senso classico, come il potenziale vettore dell'elettromagnetismo, ed è lecito chiedersi se la descrizione matematica efficace corrisponde alla reale esistenza di determinate entità, per noi inosservabili e, spesso, non visualizzabili. Nel corso di uno dei loro numerosi incontri, Einstein disse allo stesso Schrödinger: "Certo, ogni teoria è vera [*true*], provvisto che tu abbia opportunamente associato i suoi simboli con le quantità osservate." Nel legame fra validità e visualizzabilità di una teoria, sostenere che una teoria *debba* essere visualizzabile per essere *vera* richiede una giustificazione forte che ancora nessuno è riuscito a fornire. Tuttavia, il vero scontro tra Schrödinger e Heisenberg avvenne anche su questo campo.

Comprensione e visualizzabilità, invece, si articolano e intrecciano in maniera più complessa. Secondo lo stesso Schrödinger, la Scienza si basa sul presupposto che la natura sia *comprensibile*, e l'unico modo per ottenere una comprensione della natura è quello di costruire teorie *visualizzabili* nello spazio e nel tempo:

non possiamo modificare di molto la nostra maniera di pensare lo spazio e il tempo, e ciò che non possiamo comprendere (*verstehen*) in essa non possiamo capire (*verstehen*) affatto. Esistono cose simili – ma io non credo che la struttura atomica sia una di esse. (Schrödinger, 1928, p. 27)⁴

Storicamente, però, fu la teoria di Heisenberg, non visualizzabile, ad ottenere un maggiore successo pratico. Ciò portò anche al successo epistemologico in ambito scientifico della nuova concettualizzazione del termine *Anschaulichkeit*⁵, in cui la visualizzabilità non era più necessaria per la comprensione di una teoria.

⁴ Citato in (De Regt, 2020). La versione originale comprende due volte il termine *verstehen*, qui tradotto rispettivamente *comprendere* e *capire*. In questo caso, il primo termine si riferisce all'atto di "afferrare il senso" di fenomeno in studio all'intero del nostro modo di immaginare tempo e spazio.

⁵ In tedesco, il termine per visualizzabilità è *Anschaulichkeit*. Esso può venire tradotto in diversi modi dai vocabolari attuali, ma è lo stesso termine con cui i protagonisti della nascita della Meccanica Quantistica discussero gli aspetti epistemologici della teoria, e per questo motivo verrà riportato nella sua forma

Cosa sia la vera comprensione di una teoria è difficile da definire, ma anche in una versione più debole di tale concetto, l'importanza della visualizzabilità nel processo di comprensione è condivisa e riconosciuta. Visualizzare un fenomeno fisico permette di capirlo tramite la costruzione di modelli e di spiegazioni di specifici fenomeni fisici, come sarà esposto nel caso storico della teorizzazione dello spin elettronico e dello sviluppo dei diagrammi di Feynman. Questi due casi dimostrano inoltre come la visualizzabilità, pur non essendo necessaria per l'efficacia della proposta di Heisenberg, non ha mai abbandonato la mente anche di quei fisici della scuola di Copenaghen che sostennero e appoggiarono la formulazione matriciale della teoria quantistica.

originale, non tradotto. La scelta delle parole è strettamente connessa con i significati anche fisici che vengono attribuiti alle argomentazioni.

1.1 La visualizzabilità della Meccanica Quantistica prima del 1927

La diffusione della *non visualizzabilità* della Meccanica Quantistica è avvenuta con un processo graduale iniziato nella proposta del modello atomico di Niels Bohr del 1913. Per quasi tredici anni, lo scontro epistemologico è rimasto centrale al pari dello sviluppo matematico dei formalismi. La stessa evoluzione di quest'ultimo non poteva avvenire in un vuoto filosofico interpretativo. Secondo Jammer, ciò che è accaduto prima del 1926 può essere inteso come un processo di decifrazione matematica di un codice numerico in cui alcuni simboli furono interpretati in accordo con le regole di corrispondenza della fisica classica (Jammer, 1974, p. 23). Come risultato, questa corrispondenza concettuale ha condotto a modelli di *transizione* poiché presentavano aspetti e concetti classici che l'opposizione alla nuova teoria quantistica non voleva abbandonare.

Il modello di Bohr semiclassico si basava sul modello atomico planetario di Rutherford, completamente classico. Nella sua formulazione *ibrida*, veniva conservata la visualizzabilità della teoria tramite i concetti di stati stazionari intesi come quelle orbite elettroniche di stampo planetario occupate dagli elettroni; nello spostarsi fra due orbite, però, gli elettroni compivano *salti* non osservabili. È chiaro come tale modello sia costruito in una cornice concettuale spazio-temporale classica necessaria per la visualizzabilità dei fenomeni.

A partire dal 1922, negli scritti di Bohr appare l'idea che la formulazione quantistica possa includere aspetti non visualizzabili, e ciò lo porterà a proporre il concetto di *complementarità*⁶. Tuttavia, l'analisi del principio di *corrispondenza*, già precedentemente enunciato dallo stesso Bohr, sembra suggerire come questa idea fosse già implicitamente nascosta tra le idee del fisico danese. Quest'ultimo principio descrive la relazione tra meccanica classica e Meccanica Quantistica, ovvero come entrambe le teorie avrebbero dovuto restituire gli stessi risultati al crescere dei valori dei numeri quantici.

⁶ “In meccanica quantistica, il principio di complementarità afferma che il duplice aspetto di alcune rappresentazioni fisiche dei fenomeni a livello atomico e subatomico non può essere osservato contemporaneamente durante lo stesso esperimento. In altre parole: o descriviamo i fenomeni nello spazio-tempo, tenendo però conto delle limitazioni date dal principio di indeterminazione di Heisenberg; o usiamo relazioni causali espresse da leggi matematiche, e allora la descrizione nello spazio-tempo diventa impossibile” (Enciclopedia Treccani online).

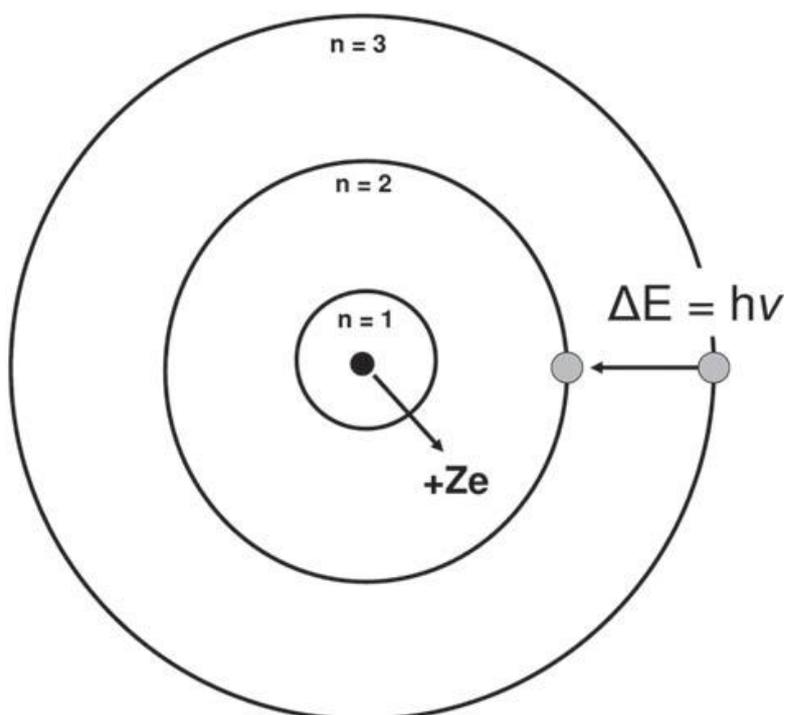


Figura 1.1. Il modello atomico di Bohr come mostrato in diversi libri scolastici.
(Weinberg, 2014)

Nel 1916, infatti, la *corrispondenza concettuale* si tradusse nell'idea che la Meccanica Quantistica fosse una “generalizzazione razionale” della meccanica classica e che ciò potesse a sua volta aprire la strada ad analogie per la costruzione di modelli semiclassici della radiazione. Questa strada, però, non raggiunse i risultati desiderati e tra il 1923 e il 1925 la corrispondenza fra le due teorie si trasformò da concettuale a numerica e formale.

Nel 1922, Bohr scriveva in una lettera al filosofo Harald Høffding:

Uno deve in generale e specialmente nei nuovi campi di lavoro essere sempre attento della apparente o possibile inadeguatezza delle immagini, [...]

Il mio personale punto di vista è che queste difficoltà siano del tipo che difficilmente lascino spazio per la speranza di raggiungere una descrizione spaziale e temporale di esse che corrisponda alle nostre solite impressioni sensoriale.⁷

⁷ (De Regt, 2020, p. 233), tradotto dall'inglese. Lettere di Bohr a Høffding, September 22, 1992, citato in Favrholt (1992, 24-25).

Il fallimento della teoria BKS⁸ segnò il punto di partenza per una nuova fase della Meccanica Quantistica in cui Bohr iniziò a considerare i limiti delle rappresentazioni spazio-temporali, giungendo infine al concetto di complementarità. Nel dicembre del 1925, dopo una discussione con Einstein, Bohr disse:

Secondo me la possibilità di ottenere un'immagine spazio-temporale basata sui nostri concetti usuali diviene sempre più senza speranza.⁹

La principale opposizione al mantenimento della visualizzabilità classica nella nuova teoria quantistica avvenne ad opera di due studenti dello stesso Bohr: Wolfgang Pauli e Werner Heisenberg.

In una nota della lettera a Bohr del 12 dicembre 1924, Pauli utilizza per la prima volta il termine *Anschaulichkeit*:

Anche se la richiesta di questi bambini¹⁰ per *Anschaulichkeit* è parzialmente legittima e salutare, riassume che tale richiesta non dovrebbe mai contare nella fisica come una motivazione per la conservazione di sistemi fisici fissati. Una volta che il nuovo sistema concettuale si sarà stabilito, allora esso sarà anche *anschaulich*.^{11,12}

L'idea di Pauli è quindi quella di rigettare il senso classico di visualizzabilità tipica dei modelli meccanici che, in quegli anni, limitavano le nuove ipotesi quantistiche. In una lettera successiva, datata 24 dicembre 1924 e destinata sempre a Bohr, Pauli scrisse:

⁸ La teoria BKS (Bohr, Kramer, Slater) fu una proposta alternativa per la radiazione che mirava all'eliminazione dell'idea del fotone come quanto di luce al prezzo di rinunciare a una conservazione assoluta dell'energia. L'idea centrale della teoria consisteva nell'esistenza di un campo *virtuale* (non osservabile sperimentalmente), associato agli stati stazionari atomici; il campo può trasmettere probabilità di transizione fra stati ma non momento o energia. Questa teoria permetteva di rinunciare al quanto di luce e forniva una descrizione spazio-temporale di carattere ondulatorio che favoriva la proposta di Schrödinger, ma rinunciava alla causalità e richiedeva in ottica antirealista di postulare entità virtuali non osservabili.

⁹ Lettera di Bohr a Slater datata 28 gennaio 1926, in Bohr (Bohr, 1976)

¹⁰ Pauli si riferisce sarcasticamente a Kramer.

¹¹ Originale in (Pauli, 1979, p. 188), citato in (De Regt, 2020).

¹² Aggettivo di visualizzabilità, *visualizzabili*.

Tuttavia, non dovremmo volere intrappolare l'atomo con le catene delle nostre preconcezioni (alle quali secondo me appartiene l'assunto dell'esistenza delle orbite elettroniche nel senso della cinematica usuale) ma dobbiamo al contrario adeguare le nostre idee all'esperienza.¹³

Le idee di Pauli influenzarono l'epistemologia di Heisenberg e dei diversi fisici e filosofi degli anni seguenti. Inizialmente, però, il formalismo matriciale nato dal lavoro di Heisenberg del 1925 non accolse sufficienti consensi a causa di un linguaggio matematico non familiare alla maggioranza dei fisici dell'epoca e alla sua natura astratta e non visualizzabile. Inoltre, i primi anni non registrarono particolari successi scientifici se non per la risoluzione dei casi più semplici.

Rimane indubbio che, almeno per le prime fasi del formalismo matriciale, la rinuncia alla visualizzabilità aveva aperto le porte per una rivoluzione concettuale al costo di una capacità di risoluzione dei problemi che la teoria quantistica stava affrontando. Non tutti i fisici dell'epoca furono disposti a pagare tale costo, preferendo l'alternativo formalismo di Schrödinger.

¹³ Vedi nota 9.

1.2 Schrödinger

Nel 1926, Schrödinger propone la sua teoria della meccanica ondulatoria per la spiegazione dei fenomeni atomici che risultavano quindi visualizzabili, almeno in parte. Schrödinger era molto convinto della necessità per una teoria di possedere l'*Anschaulichkeit*, tradotto spesso come intellegibilità o essere intelligibile, ma invece inteso dallo stesso autore come visualizzabile nello spazio e nel tempo secondo le sue parole già citate: “non possiamo modificare di molto la nostra maniera di pensare lo spazio e il tempo, e ciò che non possiamo comprendere in essa non possiamo capire affatto” (Schrödinger, 1928, p. 27)

Tuttavia, anche in questo caso la visualizzabilità non era immediata. Inoltre, la difficoltà riscontrata nella descrizione di sistemi sempre più complessi, come n -particelle in $3n$ -dimensioni, portò Schrödinger a formulare la sua famosa equazione in termini puramente matematici e indipendenti da una possibile immagine dell'onda.

Inizialmente intendevo trovare le nuove condizioni quantistiche in questa maniera più *anschaulich* (più visualizzabile), ma ho in fine dato loro la suddetta forma matematica neutrale, poiché essa mette in luce più chiaramente ciò che è davvero essenziale. (Schrödinger, 1928, p. 9)

Alla fine dello stesso articolo, l'autore suggerisce una possibile interpretazione visiva della funzione d'onda Ψ come un moto vibrazionale dell'atomo, che sarebbe più realistica di un'interpretazione in termini di orbitali atomici. A supporto di questa immagine, aggiunge:

Non è necessario enfatizzare come sarebbe più connaturale immaginare che in una transizione quantistica l'energia cambi da un tipo di vibrazione a un altro, rispetto che pensare a un elettrone che salta. Il cambio di tipo di vibrazione può avvenire in maniera continua nello spazio e nel tempo. (Schrödinger, 1928, p. 10-11)

Schrödinger manifesta apertamente la sua preferenza per un processo più naturale da immaginare, come un cambio di moto vibrazionale dell'atomo, rispetto al fenomeno

del salto elettronico. Come visto, questa preferenza non è giustificabile con argomentazioni matematiche o fisiche consolidate: non vi è una vera ragione per rifiutare un'interpretazione rispetto a un'altra. Le scelte di Schrödinger sono dettate a tutti gli effetti da una epistemologia basata sulla visualizzabilità; essa è talmente centrale nella sua idea che, nel confronto con la visione dell'interpretazione matriciale, egli definisce l'atto di rinunciare ai concetti di spazio e tempo "come equivalente ad una resa totale". (Schrödinger, 1928, p. 30)

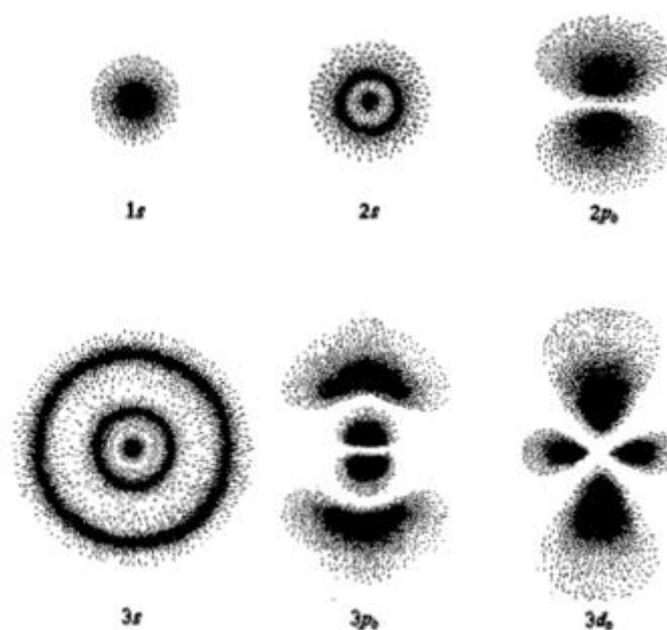


Figure 6-12. Probability density plots of some hydrogen atomic orbitals. The density of the dots represents the probability of finding the electron in that region.
© 1983 University Science Books, "Quantum Chemistry" by Donald A. McQuarrie

Figura 1.2 Una delle immagini moderne più diffuse degli orbitali atomici dell'idrogeno.

Poche settimane dopo viene pubblicato l'articolo che riconosce l'equivalenza formale delle due teorie quantistiche, ondulatoria e matriciale, e che quindi procede a confrontare i contenuti fisici e interpretativi. Schrödinger discute la necessità di una *Anschaulichkeit* non come una componente epistemologica superflua, ma come strumento chiarificatore e fruitore di intelligibilità per una teoria. In altri termini, se più descrizioni matematiche, e diverse fra loro, possono essere equivalenti dal punto di vista matematico, esse non lo sono al livello interpretativo e predittivo: ciò che per qualcuno è una epistemologia superflua, per altri diventa una spinta euristica alla comprensione e all'avanzamento della teoria stessa.

In effetti, gli anni successivi registrarono una preferenza per la visione ondulatoria grazie alla sua formale familiarità, la matematica delle onde, e la sua visualizzabilità, che la rese *discutibile*, ovvero permise ad un gruppo più ampio di ricercatori di utilizzare la teoria e discuterne le basi e i risultati. Ad esempio, un seminario avvenuto a Monaco nel 1926 vide protagonista Schrödinger e la sua interpretazione ondulatoria della Meccanica Quantistica. La maggior parte dei partecipanti fu convinta dalle parole di Schrödinger, mentre le obiezioni di Heisenberg vennero respinte e ritenute pedanti (Jammer, 1974, p. 56). Wilhelm Wien, direttore dell'Istituto di Fisica Sperimentale di Berlino, accolse le parole di Schrödinger come una definitiva sconfitta dell'idea dei "salti quantici"; in realtà vi erano ancora numerosi fenomeni non spiegabili o addirittura non compatibili con il formalismo ondulatorio, ma la convinzione che esso fosse quello giusto portò a pensare che l'allineamento fra teoria, osservazione dei fenomeni e osservazioni sperimentali fosse solo una questione di tempo. Ancora una volta, è possibile osservare come non fosse una questione di successi pratici a determinare la superiorità di un formalismo rispetto a un altro, ma di predisposizioni epistemologiche del singolo o della comunità: poco importava se molti problemi rimanessero aperti e irrisolti, il formalismo ondulatorio doveva essere giusto e quindi avrebbe risposto adeguatamente.

"La competizione fra le due teorie quanto meccaniche", scrive De Regt (2020, p. 242), "portò a dibattiti accesi in cui la questione dell'*Anschaulichkeit* divenne il centro dell'attenzione." Riportando di nuovo le parole dei protagonisti, Schrödinger (Collected Papers on Wave Mechanics, 1928, p. 46n) si pronunciava così riguardo la teoria di Heisenberg:

Ovviamente sapevo della sua teoria, ma ero scoraggiato, se non respinto, da ciò che a me sembravano essere difficili metodi di algebra trascendentale, e dalla ricerca di *Anschaulichkeit*.

Fu proprio la capacità di quest'ultimo nel focalizzare l'attenzione della comunità fisica sulla presunta superiorità della meccanica ondulatoria che costrinse Heisenberg a difendere il formalismo matriciale nel campo della visualizzabilità.

De Regt (2020, p. 242-243, note) e Jammer (1974, p. 56-57) riportano un aneddoto interessante avvenuto subito dopo il seminario di Monaco precedentemente citato.

Nell'ottobre 1926, Schrödinger si recò a Copenaghen sotto invito di Bohr. Malgrado la sua preferenza per la teoria ondulatoria, Bohr rifiutò l'interpretazione fisica di Schrödinger poiché non riusciva a spiegare l'aspetto corpuscolare della materia. La dualità onda-corpuscolo era ritenuta fondamentale per la Meccanica Quantistica da Bohr. Schrödinger venne scoraggiato dal modo in cui Heisenberg e Bohr criticarono le sue idee, e in una lettera a Wien del 21 ottobre ammise la momentanea sconfitta della sua idea riguardo le “*anschaulich pictures*” sviluppata con De Broglie. Pochi giorni dopo, però, scrisse nuovamente a Bohr dicendo:

anche se centinaia di tentativi dovessero fallire, non dovremmo rinunciare alla speranza di raggiungere l'obiettivo della rappresentazione delle vere proprietà degli eventi spazio-temporali attraverso – non dico immagini classiche – ma attraverso rappresentazioni libere da contraddizioni logiche. È estremamente probabile che ciò sia possibile.¹⁴

È possibile comprendere l'intensità dello scontro teorico fra queste figure grazie alla testimonianza dello stesso Heisenberg sulla visita di Schrödinger del 1926, secondo la quale quest'ultimo, al termine di una discussione, esclamò:

Se tutti questi dannati salti quantistici [*verdammt Quantenspringerei*] dovessero rivelarsi reali, mi pentirei di essere stato coinvolto con la teoria quantistica!¹⁵

Schrödinger non ha mai abbandonato l'idea della visualizzabilità e, fino alla fine della sua vita, mantenne una posizione di critica rispetto la ormai accettata interpretazione di Copenhagen¹⁶.

¹⁴ Citazione originale da MacKinnon (1982, 249)

¹⁵ Citato da Jammer (1974, p. 57), originale scritto da Heisenberg in Pauli (1979, p. 12-29), traduzione in italiano dell'autore.

¹⁶ Schrödinger, 1952.



Figura 1.3 Schrödinger (sinistra) e Heisenberg (destra) ricevono il premio Nobel dal Re di Svezia (centro) nel 1933. Dall'archivio AIP E. Segré.

1.3 Pauli e lo spin elettronico

Pauli si oppose in maniera più articolata all'*Anschaulichkeit* di Schrödinger. Già durante i dibattiti sui modelli atomici meccanici, egli non assegnava alla visualizzabilità di una teoria quel ruolo di necessità per la comprensione che invece le riconosceva Bohr.

Secondo Pauli, l'idea dell'*Anschaulichkeit* si sarebbe evoluta una volta abbandonati i vecchi concetti appartenenti alla fisica classica. Proprio a causa delle nuove sfide e dei problemi sollevati dalla Meccanica Quantistica, quei concetti classici costruiti su descrizioni spazio-temporali non erano più adeguati, e quindi anche la visualizzabilità intesa in senso classico. Una nuova forma di visualizzabilità, vicina al concetto di intelligibilità, si sarebbe sviluppata una volta che i nuovi schemi di pensieri della Meccanica Quantistica si fossero sedimentati nelle menti dei fisici.

Una volta che i nuovi sistemi concettuali saranno radicati, allora ci sarà *Anschaulichkeit*. (Pauli 1979, 188)

Ciò che intendeva Pauli può intendersi riferito alle abitudini di pensiero della comunità scientifica, stabilendo un implicito collegamento fra visualizzabilità e familiarità dei concetti.

Tuttavia, in quegli anni, il formalismo matriciale doveva ancora mostrare la sua superiorità nel costruire spiegazioni convincenti per i fenomeni quantistici dal punto di vista della comprensione fisica. Nel corso dell'evoluzione della Meccanica Quantistica e pre-quantistica, l'abilità di visualizzare i fenomeni giocò un ruolo cruciale e divenne uno degli strumenti fondamentali del fisico medio. È chiaro, dunque, che questa capacità non poteva sparire improvvisamente di scena e continuò a restituire risultati importanti, ne è un esempio la scoperta dello spin elettronico.

Il formalismo matriciale di Heisenberg pubblicato nell'estate del 1925 non era ancora sufficiente a spiegare il fenomeno magnetico osservato negli atomi e noto come effetto Zeeman. Pauli propose, come cause dell'effetto, l'esistenza di una proprietà dell'elettrone non osservabile e non classicamente definibile, in quanto definita da soli due possibili valori discreti e quindi chiamata *Zweideutigkeit* (bi-valorità), a sua volta spiegata da una *unmechanischer Zwang*, ovvero da una forza non meccanica.

L'idea alternativa dell'elettrone rotante venne avanzata da Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck nell'autunno del 1925. Essa presentava quelle caratteristiche classiche coerenti con la mentalità della cosiddetta *old quantum physics* di Bohr. L'idea di un elettrone come particella rotante può essere tradotta nella formula del momento di dipolo magnetico $2\mu_B m_S$, dove proprio il fattore 2 deriva dal supporre che l'elettrone abbia una superficie sferica, e il momento angolare m_S restituiva una spiegazione meccanica della *Zweideutigkeit*.



Figura 1.4 Lo spin viene solitamente rappresentato nei testi di fisica e chimica come una sfera rotante. Fonte: <https://chemistrygod.com/spin-quantum-number>

De Regt (2020, 247), riporta un altro episodio interessante. Sembra che Ralph Kronig fosse stato il primo a proporre l'idea dello spin nel gennaio 1925 proprio durante una visita a Pauli. Lo stesso Pauli, però, e successivamente anche Heisenberg e Kramer, rifiutarono l'idea. Nel frattempo, i calcoli teorici non si accordavano di un fattore 2 con i risultati sperimentali ottenuti nello studio dell'effetto di sdoppiamento dei livelli elettronici eseguita con atomi di idrogeno, ovvero proprio l'effetto Zeeman. Sconfortato dal fallimento teorico e pratico, Kronig non pubblicò mai la sua proposta.

Qualche mese dopo, nell'ottobre dello stesso anno, Goudsmit e Uhlenbeck riavanzarono l'idea dello spin sostenendo di essere stati ispirati dall'articolo di Pauli sul principio di esclusione. Gli stessi autori affermarono che il tentativo di visualizzare l'elettrone di Pauli, descritto avente quattro gradi di libertà ognuno dei quali corrispondente ad un numero quantico, fu proprio quello che li portò a immaginarlo come una particella rotante. È possibile che Goudsmit e Uhlenbeck non sapessero del fattore 2 di disaccordo sperimentale trovato da Kronig, mentre è certo che, secondo i loro calcoli, la velocità di rotazione sulla superficie dell'elettrone avrebbe dovuto superare la velocità della luce.

Paul Ehrenfes, loro supervisore, decise di pubblicare lo stesso l'articolo che venne subito accolto dalla rivista *Naturwissenschaften*.

Coerentemente, Bohr accolse la proposta dello spin elettronico grazie al suo carattere visualizzabile. L'assurdità della velocità di rotazione non rappresentava un vero problema poiché il risultato principale consisteva nella rappresentazione soddisfacente e intuitiva di un fenomeno quantistico ottenuta in termini classici e meccanici, così com'era richiesto per la comprensione della nuova fisica.

Bohr raccontò in che modo finì per accettare l'idea dello spin ad Abraham Pais¹⁷ (1986). Inizialmente, l'idea dello spin l'elettronico non riusciva a spiegare lo sdoppiamento osservato simile all'effetto Zeeman, in quanto proprio questo avviene solo se l'atomo viene sottoposto all'azione di un campo magnetico, mentre l'atomo è sorgente solo di un campo elettrico. Nel dicembre del 1925, Bohr viaggiò fino a Leida in occasione di alcuni festeggiamenti in onore di Lorentz. Durante il viaggio, incontrò Pauli ad Amburgo che gli chiese cosa ne pensasse dello spin; lui espresse i suoi dubbi a riguardo. A Leida, incontrò Einstein ed Ehrenfest che subito gli chiesero cosa pensasse dello spin, ma Bohr si mostrò ancora dubbioso. Quindi Einstein gli disse che, secondo la teoria della relatività, nel sistema di riferimento dell'elettrone il nucleo risultava essere una carica positiva in movimento, e quindi generava un campo magnetico, il quale è parallelo al momento angolare dell'orbita. L'effetto risultante è quindi un accoppiamento spin-orbita che origina la separazione dei livelli energetici. Ciò convinse Bohr, speranzoso che il disaccordo sperimentale si sarebbe presto risolto con piccoli accorgimenti e correzioni.

Lungo il viaggio di ritorno, Bohr incontrò Heisenberg e Jordan a Gottinga dove discussero nuovamente dello spin e dove Bohr espresse il suo convincimento a favore della nuova idea. Successivamente, a Berlino, avvenne l'incontro con Pauli, che era giunto alla stazione da Amburgo solo per poter parlare con Bohr dello spin e che commentò ironicamente "eine neue Kopenhagener Irrlehre", ovvero "una nuova eresia di Copenhagen.

Il successivo articolo di Goudsmit e Uhlenbeck, sempre del dicembre 1925, conteneva una nota di Bohr.

¹⁷ Citato da De Regt (2020).

[lo spin] apre ad una prospettiva molto piena di speranza per la nostra capacità di rendere conto in maniera più ampia delle proprietà degli elementi attraverso modelli meccanici, almeno in un modo qualitativo caratteristico delle applicazioni del principio di corrispondenza. (Unhlenbeck e Goudsmit 1926, 265)

Heisenberg era convinto che il vero problema dello spin fosse quel fattore due di disaccordo con i risultati sperimentali, mentre la visualizzabilità dell'elettrone come una sfera rotante gli era indifferente. Tuttavia, arrivò ad accettare l'idea dello spin grazie all'influenza di Bohr.

Pauli, invece, continuò a rifiutare l'idea di una rotazione effettiva e visualizzabile dell'elettrone. In una lettera a Bohr scrisse chiaramente "Non mi piace!"¹⁸. Anche quando L. Thomas risolse il problema del fattore 2, e Bohr lo comunicò subito a Pauli, egli rimase della sua opinione ritenendo che non fosse solo un problema di calcolo. Qualche mese dopo, a marzo, Pauli fornì le motivazioni per il suo essere così contrario a quell'idea di spin che aveva ormai convinto quasi ogni altro protagonista della nuova teoria. Era convinto che fosse necessario risolvere, in maniera coerente con la teorica matriciale, un maggiore numero di problemi più fondamentali e generali che riguardavano lo spin prima di potere essere accettato come una spiegazione valida per lo spettro dell'idrogeno e per l'effetto Zeeman.

Bohr intervenne a difendere i calcoli e la soluzione di Thomas e riuscì a convincere Pauli che le sue obiezioni erano piuttosto infondate. L'accordo fra predizione teorica e risultati sperimentali non poteva più essere negato, e Pauli, dopo essersi scusato, concluse dicendo "ora non mi resta altro che arrendermi completamente!".

In una lettera indirizzata a Gregor Wentzel del 1926, però, Pauli espresse la sua sofferenza nell'aver dovuto accettare l'idea di spin. È probabile che egli si riferisse al problema, ancora irrisolto, della velocità di rotazione dell'elettrone, che sulla sua superficie doveva superare la velocità della luce. Le parole di Pauli manifestano la sua persistente idea per cui un'interpretazione meccanica e visualizzabile dello spin fosse per lui fuorviante.

¹⁸ Pauli a Bohr, lettera del 30 dicembre 1925, in Pauli (1979, 275).

L'opposizione terminò quando, nel 1927, Pauli riuscì a integrare il concetto di spin nel formalismo matriciale, che non richiedeva la presenza della visualizzazione intesa in senso classico per ottenere un'interpretazione fisica. La teoria risultante è ancora oggi utilizzata e conosciuta come le "matrici di Pauli per lo spin". Come detto dallo stesso Pauli (1964, 1239), l'accordo fra le varie proposte venne raggiunto semplicemente tramite la sostituzione di simboli matematici astratti con immagini concrete del fenomeno: la rotazione dell'elettrone venne infatti descritta da matrici aventi le caratteristiche matematiche del gruppo delle matrici di rotazione in tre dimensioni. Questa soluzione, tuttavia, è puramente formale e ancora oggi l'immagine dell'elettrone come una sfera rotante viene usata almeno nell'insegnamento e nella divulgazione, dimostrando come sia indubbiamente utile per la comprensione di cosa sia lo spin elettronico e di fenomeni più complessi ad esso legati.

Ad esempio, una particella carica in una buca di potenziale e sottoposta all'azione di un campo magnetico vede la direzione dello spin modificarsi secondo un fenomeno noto come di precessione dello spin. Pauli non sarebbe d'accordo, e in linea di principio avrebbe ragione, con l'idea di associare un'effettiva immagine di precessione al comportamento elettronico. È tuttavia innegabile come questo atto di visualizzazione aiuti la comprensione dei fenomeni, e se storicamente la ricerca dell'*Anschaulichkeit* produsse casi di confusione e scontri, in numeri altri casi storici la costruzione di immagini utilizzate con diversi gradi di analogia ha permesso la scoperta e la comprensione di numerosi fenomeni fisici.

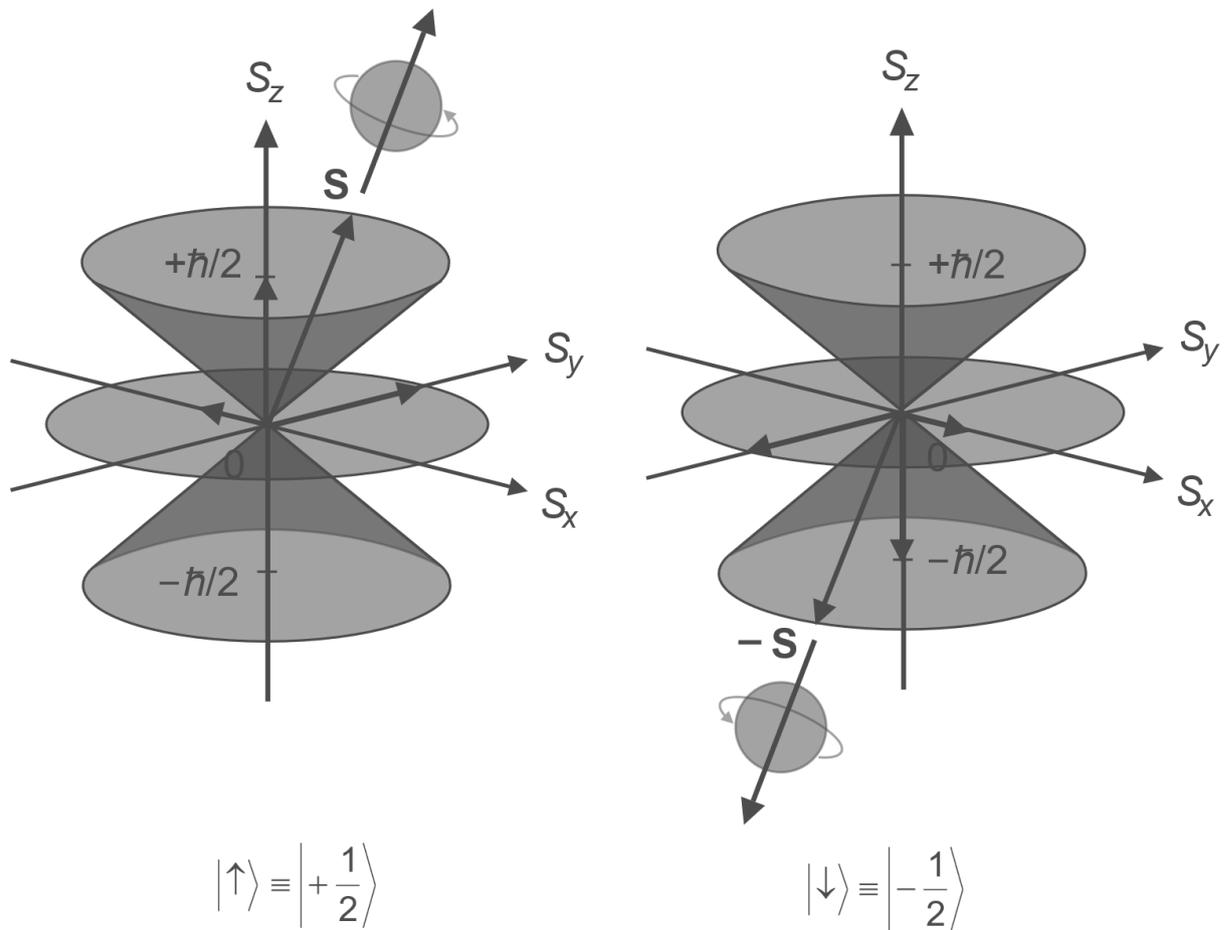


Figura 1.5 Rappresentazione euristica del “cono di momento angolare” per una particella con spin $\frac{1}{2}$. Maschen - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17763199>

1.4 Heisenberg

In una lettera a Pauli del 1926, successiva alla visita di Schrödinger a Copenaghen, Heisenberg scrisse:

Più penso all'aspetto fisico della teoria di Schrödinger, più abominevole la trovo. Ciò che Schrödinger scrive riguardo l'*Anschaulichkeit* non ha alcun senso, in altre parole penso che sia spazzatura.¹⁹

Insieme a Pauli, Heisenberg criticò aspramente l'influenza della visualizzabilità nell'evoluzione della teoria quantistica; tuttavia, non si può dire che egli ne rifiutasse completamente l'idea. Ciò che più differenzia i sostenitori della teoria quantistica matriciale dai sostenitori della formulazione ondulatoria riguarda *chi* si adatta a *cosa*. Secondo quest'ultimi, i sostenitori di Schrödinger, le interpretazioni della nuova teoria avvenivano secondo schemi di pensiero semiclassicali inseriti in cornici spaziotemporali irrinunciabili intesi come punti di partenza: questa teoria adattava l'osservazione dei fenomeni al pensiero classico, anche guidata dall'idea di visualizzabilità.

Dall'altra parte, Heisenberg e il resto dei fisici di Copenaghen agirono in maniera diametralmente opposta. Essi analizzarono i nuovi fenomeni quantistici per quello che erano, sforzandosi di applicare ad essi un minor numero di preconcezioni che, in ogni caso, era chiaro non si adattassero a quei nuovi problemi di natura quantistica. In questo senso, fu il pensiero a doversi adattare all'osservazione dei fenomeni, sviluppando quindi una teoria priva di strumenti *superflui*, come la visualizzazione spazio-temporale classica.

Dopo la partenza di Schrödinger, Heisenberg e Bohr iniziarono a lavorare sul miglioramento del formalismo matriciale in maniera tale che fosse possibile spiegare i risultati sperimentali dell'epoca. L'indagine iniziò dall'osservazione di un fenomeno ritenuto piuttosto semplice: il cammino di un elettrone osservato in una camera a nebbia di Wilson. L'obiettivo consisteva nel riuscire a spiegare ciò che risultava essere davvero visibile e misurabile con la spiegazione offerta dal formalismo delle matrici, che non includeva una definizione certa dei concetti di cammino o di orbita di un elettrone. Il problema,

¹⁹ Pauli (1979, 328)

tuttavia, non risultò banale poiché la camera a nebbia permette effettivamente di osservare una traiettoria macroscopica del moto dell'elettrone.

Nel febbraio del 1927, approfittando dell'assenza di Bohr, Heisenberg si convinse del fatto che il problema andava riformulato alla base. In una conversazione con Einstein della primavera del 1926²⁰, il padre della teoria della relatività gli disse:

È la teoria che decide cosa possiamo osservare.²¹

Heisenberg interpretò queste parole considerando ciò che davvero era possibile osservare nella camera a nebbia, ovvero singoli aggregati di goccioline poste in una sequenza discreta di posizioni non precise. Gli aspetti di non continuità e di imprecisione che risaltavano osservativamente erano collegabili al formalismo matriciale. La questione del definire il significato di posizione e velocità nella Meccanica Quantistica divenne quindi il punto di partenza del famoso articolo del 1927 “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”²², il suo articolo fondamentale per quanto riguarda la trattazione della visualizzabilità. Lo stesso articolo divenne famoso per le relazioni di indeterminazione, ma già dal titolo è possibile capire come fosse intenzione dell'autore discutere l'aspetto di intuitività della teoria quantistica, ovvero quegli elementi immediatamente riconoscibili e comprensibili perché congruenti ai nostri schemi di pensiero mentali, e in questo senso visualizzabili.

Come se volesse direttamente rispondere a Schrödinger, Heisenberg vuole dimostrare come la sua teoria matriciale non sia del tutto *unanschaulich* attraverso i due contenuti principali dell'articolo: la ridefinizione di cosa sia l'*Anschaulichkeit* e la derivazione delle relazioni di indeterminazione.

Nel paragrafo 1.5 vengono citati frammenti dell'articolo appartenenti alla traduzione di Sigfrido Boffi del 1990, mentre in parentesi viene indicata la posizione nell'articolo originale. In parentesi quadre vengono riportati i termini in tedesco originali riferiti ai concetti di visualizzabilità e comprensione.

²⁰ Heisenberg (1969, 90-100)

²¹ “Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann” (Heisenberg 1969, 92)

²² “Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica”, tradotto da Sigfrido Boffi (1990). Originale pubblicato su *Zeitschrift für Physik* 43 (1927) 172-198.

1.5 Il contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica

La frase d'apertura dell'articolo presenta già diversi indizi del pensiero dell'autore riguardo la visualizzabilità e la comprensione di una teoria fisica.

Crediamo di comprendere intuitivamente [*anschaulich zu verstehen*] una teoria fisica quando riusciamo a pensare in modo qualitativo alle conseguenze sperimentali di tale teoria in tutti i casi semplici e quando allo stesso tempo abbiamo riconosciuto che l'applicazione della teoria non contiene mai contraddizioni interne.²³ (Heisenberg 1927, 1)

Heisenberg porta subito l'esempio della rappresentazione di Einstein dello spazio-tempo: sebbene l'idea delle quattro dimensioni sfugga alle nostre intuizioni classiche e naturali, in realtà riusciamo a pensare a conseguenze sperimentali prive di contraddizioni interne alla teoria. La Meccanica Quantistica, invece, è ancora soggetta a un'interpretazione intuitiva ricca di contraddizioni, e ciò è dovuto al fatto che i concetti classici cinematici e meccanici, quali posizione e velocità, non appartengono ai dati forniti dall'esperienza pratica con i fenomeni del micromondo.

1.5.1 La ridefinizione dei concetti di posizione e velocità

Tuttavia, ridefinendo operativamente i concetti di cui sopra, è possibile mantenere la loro validità nel contesto della Meccanica Quantistica. Per quanto riguarda il concetto di posizione, egli scrive:

Affinché sia chiaro che cosa si debba intendere con l'espressione “posizione dell'oggetto”, per esempio dell'elettrone (rispetto a un dato sistema di riferimento), occorre presentare determinati esperimenti con l'aiuto dei quali si pensa di misurare la “posizione dell'elettrone”; altrimenti tale espressione non ha alcun senso. (Heisenberg 1927, 3)

²³ La traduzione è quella di Sigfrido Boffi (1990), in parentesi quadre vengono riportati i termini originali dove necessario.

Chiarisce quindi subito che il concetto di posizione di un elettrone non ha senso se non è riferita ad un dato sistema di riferimento e non avvenga nel contesto di un esperimento che permetta la misurazione della posizione. In questo senso, nello studio di uno spettro atomico non ha senso parlare di posizione dell'elettrone dell'atomo. Heisenberg porta l'esempio di un telescopio a raggi γ che misura la posizione di un elettrone e con cui deriva la relazione fondamentale che avviene fra variabili coniugate, che nel caso di posizione e impulso diventa $\Delta p \Delta q \approx \hbar^2$, dove il simbolo Δ indica la precisazione con cui la grandezza viene misurata, e quindi ha una natura prettamente sperimentale. Tale relazione indica un limite per la descrizione spazio-temporale per la fisica microscopica. Questo limite, però, non rappresenta il carattere non visualizzabile della Meccanica Quantistica poiché permette di giungere a predizioni qualitative di fenomeni sperimentali, e ciò concorda esattamente con la sua ridefinizione dell'*Anschaulichkeit*: concepire qualitativamente le conseguenze sperimentali della teoria in tutti i casi semplici.

Chiarito il discorso sul concetto posizione, Heisenberg affronta brevemente l'argomento della dimensione dell'elettrone, trovando il limite superiore di 10^{-12} cm, e si sofferma invece sul concetto di "orbita dell'elettrone". Combinando il significato classico di orbita e di "posizione ad un certo istante", giunge alla conclusione che:

L'espressione spesso usata "l'orbitale 1S dell'elettrone nell'atomo di idrogeno" dal nostro punto di vista non ha alcun senso. (Heisenberg 1927, 4)

Tale affermazione viene giustificata in termini operativi: per misurare un orbitale sarebbe necessario utilizzare fotoni con lunghezze d'onda inferiori a 10^{-8} cm con cui illuminare l'elettrone in diversi istanti e ricostruirne quindi la traiettoria; tuttavia, un solo

²⁴ Secondo Heisenberg, il fotone interagisce con l'elettrone per effetto Compton, che produce automaticamente un cambio discontinuo di velocità nell'elettrone. In questo passaggio arriva la prima critica di Bohr all'articolo, che lo stesso Heisenberg inserisce in un ultimo paragrafo. Bohr sottolinea come "l'incertezza dell'osservazione non si basa unicamente sulla presenza di discontinuità, ma è piuttosto indirettamente collegata con l'esigenza di rendere conto simultaneamente delle diverse esperienze che trovano espressione da un lato nella teoria corpuscolare e dall'altro nella teoria ondulatoria." (trad. di Boffi 1990, 73). Bohr si riferisce al fatto che la teoria dell'effetto Compton può essere applicata rigorosamente solo ad elettroni liberi e che inoltre la direzione di rinculo non è nota con precisione.

fotone a tali energie è sufficiente per sbalzare via l'elettrone dall'orbitale 1S così che "la parola orbitale non ha alcun significato ragionevole".²⁵ (Boffi 1990, 50)

L'analisi del concetto di velocità richiede nuovamente l'utilizzo di fotoni incidenti sull'elettrone e la misura dell'effetto Doppler della luce diffusa. In questo caso, la precisione della misura sarà maggiore per fotoni dalla lunghezza d'onda più grande, in quanto imporranno una diversa variazione di velocità agli elettroni sempre a causa dell'effetto Compton. La maggiore precisione sulla velocità viene quindi pagata con un'incertezza sulla posizione dell'elettrone, in accordo alla relazione di indeterminazione.

Heisenberg generalizza i risultati delle sue analisi in questo modo:

Tutti i concetti, che nella teoria classica sono utilizzati per descrivere un sistema meccanico, si possono definire esattamente anche per processi atomici in analogia con i concetti classici. Gli esperimenti che servono a definirli comportano però un'indeterminazione intrinseca, puramente sulla base dell'esperienza, allorquando richiediamo loro la simultanea specificazione di due grandezze canonicamente coniugate. (Heisenberg 1927, 8)

È possibile riscontrare un parallelismo tra le ridefinizioni dei concetti classici e la ridefinizione del concetto di *Anschaulich*. I primi, entrando nell'ambito della Meccanica Quantistica, ricevono una "indeterminazione intrinseca" che non appartiene al mondo classico. Allo stesso modo, l'*Anschaulichkeit* si evolve assumendo caratteristiche che non appartengono al concetto classico di visualizzabilità spazio-temporale: la comprensione della teoria avviene attraverso la predizione coerente delle conseguenze sperimentali, ma proprio queste conseguenze sono gli elementi *visualizzabili*, come dimostrano gli esperimenti concettuali. In altre parole, non è importante riuscire a immaginare l'elettrone in orbita attorno il nucleo, ma le conseguenze sperimentali nel caso di una

²⁵ Da qui, Heisenberg prosegue discutendo la possibilità di misurare concettualmente la posizione di molti elettroni su atomi nello stato 1S come una funzione di probabilità che corrisponde al valor medio sulle fasi della traiettoria classica. Tale analisi mira a discutere gli aspetti deterministici della teoria quantistica e non affronta direttamente l'argomento in analisi, la visualizzabilità

possibile misura e, dato che non esistono misure sperimentali della posizione, non ha senso discutere la posizione dell'elettrone e sforzarsi di renderla visualizzabile.²⁶

Heisenberg sottolinea come sia proprio la mancanza di definizioni operative “precise” dei concetti di posizione e velocità a far sì che essi non siano più visualizzabili, e quindi necessari per la comprensione. Paragonando la teoria quantistica con la relatività di Einstein, egli nota come anche il concetto di “simultaneità” non si lascia definire diversamente se non in maniera operativa in cui la velocità della luce è fondamentale.

Se ci fosse una definizione di simultaneità più “netta”, come per esempio segnali che si propagano con velocità infinita, la teoria della relatività non sarebbe possibile. Siccome però questi segnali non esistono, perché piuttosto già nella definizione di simultaneità interviene la velocità della luce, si fa posto per il postulato della costanza della velocità della luce, e quindi questo postulato non è in contraddizione con l'uso corretto dei termini “posizione”, “velocità”, “tempo”. (Heisenberg 1927, 8)

La simultaneità di Einstein, quindi, non ha sofferto di una perdita di visualizzabilità poiché la sua definizione operativa non entra in contrasto con i concetti di posizione, velocità e tempo. In Meccanica Quantistica, invece, la definizione e la misurazione non possono prescindere da un'imprecisione intrinseca data dalla relazione di indeterminazione.

1.5.2 Il significato epistemologico dell'*Anschaulichkeit*

Fino a ora, si è visto come Heisenberg modifica il concetto di visualizzabilità di una teoria fisica tramite la ridefinizione dei concetti spazio-temporali come posizione e velocità. In questo modo, egli rifiuta il significato di *Anschaulichkeit* che Schrödinger ricerca nella teoria quantistica, mostrando come esso non abbia senso a causa della relazione di indeterminazione, e ne propone una riformulazione basata sulla predizione sperimentale che la teoria è capace di produrre, posto che la stessa teoria sia priva di contraddizioni interne.

²⁶ Ciò è proprio il contrario dell'*Anschaulichkeit* definita da Schrödinger, ovvero lo sforzo intellettuale di creare un'immagine di un fenomeno capace di favorirne in maniera adeguata la comprensione.

Ciò è stato definito da alcuni filosofi successivi come un “trucco di retorica” (Beller 1999, 70). Osservandolo solo come una ridefinizione del concetto di visualizzabilità, queste critiche non risultano del tutto infondate, ma l'intenzione di Heisenberg andava sicuramente oltre. Il suo obiettivo principale era separare la visibilità intesa in senso classico, quindi spazio-temporale, dalla possibilità per una teoria di essere visualizzabile, intelligibile e comprensibile. Camilleri (2009, 49-52) ritiene che tale obiettivo appartenga ad una tradizione di critica empirista all'epistemologia Kantiana. In questo senso, la ridefinizione di Heisenberg non è solo un tentativo di salvare l'aspetto interpretativo della formulazione matriciale, ma una discussione più ampia su cosa significhi comprendere una teoria (De Regt 2020, 245).

Quest'ultimo aspetto è osservabile il modo in cui viene affrontata la comprensione intuitiva delle matrici.

La possibilità di una tale descrizione²⁷ appare chiara se si immaginano intuitivamente le matrici come tensori (per esempio momenti d'inerzia) in spazi multidimensionali, tra i quali esistono relazioni matematiche. (Heisenberg 1927, 10)

Qui, Heisenberg propone un'immagine sufficientemente nitida che discute apertamente la possibilità di immaginare, e quindi visualizzare, le grandezze fisiche e l'interazione fra esse come matrici.

Se vogliamo ricavare risultati fisici da quello schema matematico, dobbiamo assegnare dei numeri alle grandezze quantistiche, cioè alle matrici (o “tensori” in spazi multidimensionali²⁸). Ciò va inteso in modo che in quello spazio multidimensionale si assegni una data direzione ad arbitrio (cioè la si fissi sulla base del tipo di esperimento che si vuole compiere) e venga richiesto

²⁷ Heisenberg si riferisce alla descrizione della teoria Dirac-Jordan, in cui le relazioni fra posizione, impulso ed energia possono essere scritti matematicamente come espressioni generali fra matrici; ciò fa sì che ogni altra grandezza quantistica appaia come una matrice diagonale. (Heisenberg 1927, 56). Questa descrizione, puramente matematica, necessita di un'interpretazione fisica. Egli definisce questa descrizione come “l'autentica formulazione ‘invariante’ della Meccanica Quantistica, indipendente da ogni sistema di riferimento.”

²⁸ In termini della fisica teorica insegnata oggi, i numeri e le matrici di cui parla Heisenberg non sono altre che gli operatori, mentre lo spazio multidimensionale è lo spazio di Hilbert.

quale sia il “valore” della matrice in questa direzione assegnata²⁹ (per esempio in quel modello il valore del momento d’inerzia). Questa richiesta ha significato univoco solo se la direzione assegnata viene a coincidere con la direzione di uno degli assi principali di quella matrice; in tal caso esiste una risposta esatta alla domanda posta.³⁰ Però anche quando l’assegnata direzione devia di poco da quella di uno degli assi principali della matrice, si può parlare ancora del “valore” della matrice nella direzione assegnata con una certa imprecisione determinata dall’inclinazione relativa, con un certo errore probabile. Si può anche dire: a ogni grandezza quantistica o matrice si può assegnare un numero, che ne fornisce il “valore”, con un certo errore probabile; l’errore probabile dipende dal sistema di coordinate; per ogni grandezza quantistica c’è un sistema di coordinate in cui l’errore probabile per questa grandezza si annulla.³¹ Perciò un certo esperimento non può mai fornire un’informazione precisa su tutte le grandezze quantistiche, ma piuttosto divide in modo caratteristico le grandezze fisiche in “note” e “ignote” (ossia, grandezze conosciute con maggiore o minore precisione)³². I risultati di due esperimenti si possono dedurre esattamente gli uni dagli altri solo se entrambi gli esperimenti suddividono le grandezze fisiche in “note” e “ignote” allo stesso modo (ciò se i tensori in quello spazio multidimensionale utilizzato per la rappresentazione sono “visti” in entrambi gli esperimenti dalla stessa direzione). Se due esperimenti provocano diverse suddivisioni in grandezze “note” e “ignote”, allora il legame tra i risultati di quegli esperimenti può essere convenientemente descritto in termini statistici. (Heisenberg 1927, 10-11)

²⁹ Con direzione si intende una componente della base dell’operatore associato alla grandezza fisica scelta da misurare. Nella formulazione matriciale, ogni colonna di una matrice corrisponde ad una componente. Il valore della matrice nella direzione assegnata non è altro che i valori numerici di quella componente, ovvero i numeri che appaiono in colonna.

³⁰ Il significato univoco si ha quindi solo quando la matrice che descrive l’operatore è diagonalizzata in quella base. In questo caso, la colonna contiene un solo “numero”, ovvero un solo valore certo su quella componente.

³¹ Questa affermazione equivale a dire che ogni grandezza quantistica espressa sottoforma di matrice è diagonalizzabile.

³² La divisione fra grandezze “note” e “ignote” equivale alla possibilità di definire una base simultanea per più grandezze.

Nelle parole di Heisenberg si può riconoscere un tentativo di rappresentare e visualizzare, in quello che poi sarà denominato Spazio di Hilbert, gli operatori tensoriali associati agli osservabili. L'immagine che ne viene fuori, efficace o meno, si avvicina a quella di un vettore tridimensionale che viene confrontato con la base dello spazio. Tale vettore può traslare e ruotare, in modo da porsi parallelo o diagonale rispetto agli assi, e funge quindi come analogia per mostrare il comportamento di matrici in spazi multidimensionali.

Dopo una descrizione matematica dell'immagine che ha fornito, Heisenberg si propone di analizzare la transizione dalla micro alla macromeccanica.

Con l'analisi condotta nelle sezioni precedenti sulle parole "posizione dell'elettrone", "velocità", "energia", ecc. mi sembra che i concetti della cinematica e della meccanica in teoria quantistica siano stati sufficientemente chiariti, così che deve essere divenuta possibile una comprensione intuitiva [*anschauliches Verständnis*] anche dei processi macroscopici dal punto di vista della Meccanica Quantistica. (Heisenberg 1927, 13)

Quest'argomentazione è sicuramente connessa con il principio di corrispondenza affrontato da Bohr³³.

Nell'articolo, Heisenberg critica l'idea di Schrödinger riguardo la costruzione dei moti periodici classici dell'elettrone tramite la somma di oscillazioni di stati eccitati³⁴ in quello che può essere un tipico caso limite per il principio di corrispondenza. In realtà, l'argomentazione fisica di Heisenberg non è allo stesso modo corretta, ma l'inversione degli elementi proposta da quest'ultimo mostra un cambio concettuale epistemologico strettamente connesso con il significato di *Anschaulichkeit* e con il dibattito a riguardo.

Nella visione di Heisenberg, il passaggio che avviene dal micro al macro-mondo dovrebbe significare che gli elementi del primo siano sufficienti per passare al secondo; in questo senso, la visualizzabilità classica, estranea al mondo microscopico secondo Heisenberg, non è necessaria né utile per il passaggio al macro, ovvero dalla Meccanica Quantistica alla meccanica classica. Seguendo questa linea epistemologica, anche se a

³³ Bohr, N. *Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau*. *Z. Physik* **13**, 117–165 (1923).

³⁴ E. Schrödinger, *Naturwiss.* **14**, 664, 1926.

partire dalla Meccanica Quantistica non si dovessero trovare risultati corrispondenti al limite classico, l'errore non è assegnabile ai costrutti della teoria del micromondo che si basa solo su quegli elementi osservabili (tramite esperimenti) e che appartengono al micromondo stesso. Nell'analisi della corrispondenza, quindi, va studiata e corretta solo la sovrapposizione fra micro e macro-mondo, e non le due teorie. Usando una metafora *visualizzabile*, le due teorie possono essere rappresentate da due pezzi di un puzzle distanti un pezzo l'uno dall'altro. Il principio di complementarità ci dice che deve esistere un terzo pezzo da inserire in mezzo che si agganci coerentemente ad entrambi. Tale pezzo non è una seconda teoria, ma una zona in cui forma e colore passino con continuità e *corrispondenza* dal primo al secondo.

In contrapposizione a ciò, lo stesso tentativo di passaggio, dal micro al macro-mondo, compiuto da Schrödinger comporta inevitabilmente una contraddizione epistemologica interna. Essa sta nel fatto di voler passare dalla Meccanica Quantistica alla meccanica classica attraverso uno strumento costruito sui fondamenti della seconda, ovvero l'idea di *Anschaulichkeit* classica di Schrödinger. Se questo passaggio riesce, allora la visualizzabilità classica può appartenere anche al primo mondo. In continuità con la metafora del puzzle di cui sopra, il tentativo di Schrödinger sembra come il volere inserire un terzo pezzo da un lato coerente con quello rappresentante la meccanica classica, dall'altro incongruente per forma e colore con il pezzo della Meccanica Quantistica, pensando che sia quest'ultimo pezzo a doversi adattare alle richieste degli altri.

L'idea di Heisenberg e l'opposizione con Schrödinger si può apprezzare anche nella seguente frase.

Io credo che l'origine dell'"orbita" classica si possa formulare concisamente così: *l'"orbita" nasce solo in quanto la si osserva.* (Heisenberg 1927, 15)

Per Heisenberg, l'orbita classica "nasce" solo nel momento della misurazione, prima essa non ha un significato fisico, non ha una posizione, e quindi non è visualizzabile in questi termini. Ciò è sicuramente legato anche al dibattito riguardo l'indeterminismo della teoria quantistica.

1.5.3 Le conclusioni

Le parole con cui Heisenberg sceglie di concludere l'articolo non sono banali, ma esplicitano una differenza fra teoria quantistica e teoria classica che va oltre il formalismo.

La cinematica e la meccanica della teoria quantistica sono ampiamente diverse da quelle usuali [*gewöhnlichen*]. L'applicabilità dei concetti classici [*klassischen*] di cinematica e meccanica non può essere però dedotta né dalla nostra logica né dall'esperienza. (Heisenberg 1927, 25)

L'utilizzo del termine *gewöhnlichen* invece di *klassischen* non è casuale. La teoria quantistica descrive fenomeni diversi da quelli a cui siamo abituati, ovvero quelli *usuali*. Ciò significa che concetti classici sviluppati per tali fenomeni non sono obbligatoriamente adatti alla descrizione dei fenomeni non usuali. Fenomeni diversi richiedono descrizioni diverse, anche quando per abitudine e semplicità utilizziamo le stesse parole come cinematica e meccanica.

I concetti di posizione, impulso ed energia di un elettrone possono essere ridefiniti con precisione nell'ambito della teoria quantistica, e la ridefinizione segna una separazione, anche se non netta, con i corrispettivi classici. Fatto ciò, egli afferma:

Dato che inoltre possiamo pensare in modo qualitativo alle conseguenze sperimentali della teoria in tutti i casi semplici, non si deve più considerare la Meccanica Quantistica come una teoria non intuitiva (*un-anschaulich*³⁵) e astratta. (Heisenberg 1927, 25)

La visualizzabilità della formulazione matriciale della teoria quantistica conduce a una forma di *Anschaulichkeit* del tutto coerente con la natura degli stessi fenomeni della Meccanica Quantistica, così come ogni altra teoria che viene concepita efficace, anche

³⁵ Nel testo originale vi è scritto, erroneamente, *anschaulich* privo della negazione *un-*. La fonte consultata contiene una correzione con l'aggiunta a matita della particella negativa, accettabile anche alla luce della ricostruzione logica della frase.

classicamente, risulta essere priva di contraddizioni interne e capace di prevedere qualitativamente le conseguenze degli esperimenti.

La dichiarazione che per esempio la velocità nella direzione x “in realtà” non sia un numero, ma un elemento diagonale di una matrice, non è forse più astratta e meno intuitiva dell’affermazione che l’intensità del campo elettrico “in realtà” sia la parte temporale di un tensore antisimmetrico dello spazio-tempo. Qui l’espressione “in realtà” risulterà legittima, né più né meno che in una qualsiasi descrizione matematica dei processi naturali. (Heisenberg 1927, 25-26)

Il diretto paragone con un’altra teoria, l’elettromagnetismo nella sua formulazione covariante, mostra come lo stesso linguaggio a prima vista non visualizzabile non si è mostrato altrettanto problematico nella trattazione di fenomeni diversi. In entrambi i casi, lo strumento permette di descrivere, trattare e predire i risultati sperimentali. Heisenberg continua:

Non appena si ammette che tutte le grandezze della teoria quantistica siano “in realtà” delle matrici, le leggi quantitative seguono senza difficoltà. (Heisenberg 1927, 26)

Heisenberg sembra suggerire che il vero problema che porta a non accettare la formulazione matriciale, e quindi la sua capacità di *Anschaulichkeit*, sia in realtà un problema di accettazione riguardo la vera natura delle grandezze quantistiche. Ancora una volta, però, va specificato che tale natura *inusuale* derivi dalla mera analisi dei veri fenomeni quantistici eseguita senza l’influenza di filtri osservativi della fisica classica. La metodologia d’indagine di Heisenberg, ovvero il basare l’intera discussione solo su quegli aspetti osservabili sperimentalmente come gli spettri atomici, e non la posizione dell’elettrone, risulta un necessario punto di partenza per la piena comprensione di ciò che il fisico vuole dire.

1.6 Visualizzabilità, osservabilità e operazionismo: Heisenberg ed Einstein

L'approccio di Heisenberg può risultare essere di stampo puramente operazionista, ispirato dalle parole di Einstein e dall'intenzione di volere definire grandezze come posizione e impulso in base alle pratiche di misura delle stesse. Heisenberg cita esplicitamente l'articolo del 1905 che diede inizio alla relatività speciale³⁶. L'analogia riguarda l'argomentazione di Einstein su come non avesse senso parlare di simultaneità di due eventi senza aver prima introdotto una sincronizzazione fra gli orologi, e in questo senso Heisenberg sperava di riuscire ad ottenere una simile reinterpretazione dei concetti di posizione e velocità che fossero accettati dai suoi colleghi contemporanei. Una lettura positivista di questo tipo di argomentazione collega la mancanza di senso fisico di una grandezza all'impossibilità di avere una procedura di misura valida anche solo in un esperimento concettuale (Wolff, 2014), e quindi ignorando i limiti tecnici.

La definizione attraverso la misura, che sembra essere centrale, giustificherebbe l'etichettatura di "operazionisti" assegnata ad entrambi. Negli anni successivi, Heisenberg ed Einstein vennero più volte accostati e confrontati attraverso questo filtro. Nel 1954, durante la conferenza per l'assegnazione del premio Nobel, Max Born analizzò tale legame dicendo:

Il principio stabilisce che i concetti e le rappresentazioni che non corrispondono a fatti fisicamente osservabili non debbano essere usati nelle descrizioni teoriche. Einstein utilizzò lo stesso principio quando, nella costruzione della sua teoria della relatività, egli eliminò i concetti di velocità assoluta di un corpo e di simultaneità assoluta di due eventi in luoghi differenti. Heisenberg eliminò l'immagine delle orbite elettroniche con raggi e periodi di rotazione definiti perché queste quantità non sono osservabili.

Il principio a cui si riferisce Born è ciò che Johanna Wolff chiama il Principio di Osservabilità. Esso si riferisce alla questione fisica, epistemologica e ontologica riguardo l'esistenza o meno di quelle grandezze discutibili teoricamente ma non osservabili. L'identificazione positivista di ciò che è osservabile con ciò che è misurabile è di

³⁶ A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, in *Annalen der Physik* 17 (1905), pp. 891-921

carattere strettamente operazionista. Mehra e Reichenberg (1982, 303-304) elencano una serie di similitudini fra l'articolo di Einstein del 1905 e quello di Heisenberg del 1925: entrambi giungono a una riformulazione della cinematica partendo da pochi principi di base e ottenendo una relazione matematica fondamentale. La differenza epistemologica fra i due è però l'aspetto rilevante.

1.6.1 La simultaneità di Einstein

Per Einstein, la ridefinizione della meccanica riguarda una nuova descrizione matematica del moto, come funzione della posizione in funzione del tempo, che acquista un senso fisico quando la stessa definizione di tempo acquista un senso fisico (Einstein 1905, 892) (Wolff, 2014). Il suo primo paragrafo, dedicato alla definizione di simultaneità, inizia proprio con un'analisi sulle difficoltà nel definire l'entità "tempo".

Potrebbe sembrare che tutte le difficoltà che riguardano la definizione del "tempo" si potrebbero superare se sostituissi al posto di "tempo" l'espressione "posizione della lancetta piccola del mio orologio".

Per Einstein, quindi, si tratta di restituire un significato fisico ad una descrizione matematica. Seguendo però l'argomentazione di DiSalle (2008)³⁷, il problema non riguardava una mancanza di misurabilità per la simultaneità e il bisogno di una definizione empirica e operazionista, in quanto essa già esisteva. Che la velocità della luce non fosse infinita, e che quindi non esistessero segnali capaci di propagarsi istantaneamente per sincronizzare gli eventuali orologi, era una certezza fisica già confermata dall'elettromagnetismo. Le leggi di Newton sulle composizioni delle velocità non erano quindi applicabili alla luce. La ridefinizione cinematica di Einstein nasce dunque da un bisogno empirico di correggere una definizione dimostratasi errata, ma anche come conseguenza teorica dei principi della relatività; nello specifico, essa dipende dal principio di velocità limite della velocità della luce in quanto se fosse possibile inviare segnali a velocità arbitrariamente grande, anche se non infinita, sarebbe allora possibile ottenere una sincronizzazione arbitrariamente precisa indipendentemente dalla distanza, ottenendo una simultaneità "quasi assoluta". È possibile affermare che la simultaneità non

³⁷ In Wolff, 2014.

viene ridefinita in termini operazionisti, ma teorici, grazie alla costanza della velocità della luce e del suo ruolo di velocità limite come fatti fisici, non epistemologici.

Fano (Fano, 2004) sottolinea come tale fraintendimento non sia stato solo comunemente ripetuto, come la citazione di Born sopra riportata, ma anche favorito da una non sufficiente enfasi da parte dello stesso Einstein riguardo gli aspetti fisici di base della sua opera. Nell'articolo del 1905, in realtà, Einstein pone subito come base dell'analisi i due principi della relatività ristretta che rimangono tali e impliciti in tutte le dimostrazioni successive. La sincronizzazione di orologi distanti avviene tramite segnali che non possono essere più veloci della velocità della luce; successivamente, posto uno dei due orologi in movimento, in qualunque sistema si osserva la sorgente e il segnale luminoso raggiungere il secondo orologio, la velocità del segnale sarà sempre costante. Questa spiegazione rende centrali i principi della relatività ristretta.

Nell'opera divulgativa del 1917, invece, l'autore propone il famoso esempio di due fulmini che cadono su un binario ad una certa distanza l'uno dall'altro. L'analisi avviene prima nel sistema di riferimento solidale ai binari e successivamente nel sistema di un treno in moto lungo essi. Qui, la definizione di simultaneità sembra risultare dipendente dallo stato di moto del sistema e, seppure la costanza della velocità della luce fosse stata citata poche pagine prima, l'effetto finale è quello di una definizione operazionista della simultaneità, basata sulle misure dipendenti dallo stato di moto relativo dei due sistemi e non, come dovrebbe essere, dai principi fisici della teoria.

La differenza fra questa presentazione della nozione di simultaneità e quella precedente è netta: là [opera divulgativa del 1927] sembrava quasi che la relatività della simultaneità fosse una conseguenza di una adeguata critica delle procedure di misurazione della simultaneità, senza che venisse modificata la fisica, cioè mantenendo la meccanica classica; qui [articolo 1905] invece si vede chiaramente che la relatività della simultaneità dipende dal postulato della costanza della velocità della luce. (Fano, 2004)

Va precisato che la spiegazione della relatività della simultaneità nell'opera divulgativa del 1927 non è errata o incompleta, in quanto l'autore aveva menzionato la costanza della velocità della luce nella stessa e quindi essa doveva essere tenuta in conto. Ciò che

ha invece determinato il fraintendimento epistemologico è la mancata o insufficiente enfasi del ruolo dei principi della teoria.

Infine, la relatività descritta da Einstein, per quanto estranea al senso comune, non risulta avere problemi con il concetto di visualizzabilità. Proprio l'uso degli esperimenti concettuali, invece, sostiene l'idea che per migliorare la comprensione di un fenomeno fisico sia estremamente utile, se non necessario, riuscire ad avere un'immagine mentale. Come poi affermato dallo stesso autore, gli esperimenti concettuali, che sembrano appartenere ad una logica operazionista, non erano altro che semplici trucchi per l'autore stesso con cui giungere ai risultati.

1.6.2 Il confronto con l'indeterminazione

È lecito pensare che il fraintendimento riguardo l'operazionismo di Einstein abbia influito sulla formulazione del principio di indeterminazione di Heisenberg creando una serie di analogie non sempre corrette. Il fisico tedesco riporta una propria ricostruzione e interpretazione dell'articolo del 1905 sulla relatività secondo la quale, a partire dal secondo principio e quindi dall'impossibilità per un segnale di viaggiare a velocità infinita, si ottiene un'impossibilità di definire operativamente la simultaneità per due orologi distanti. Da ciò, è possibile introdurre il postulato dell'invarianza della luce. In quest'ottica, la simultaneità a distanza non sarebbe definibile per cause empiriche, e quindi la definizione di relatività della simultaneità acquisterebbe un carattere operazionista.

In realtà, essa deriva dai postulati teorici ed è quindi un fatto fisico indipendentemente dalle possibilità di misurazione. L'analogia che compie Heisenberg, dunque, non è corretta.

Egli sembra sostenere che, così come non esistono segnali causali che viaggino a velocità infinita, così non esistono esperimenti che rendono possibile la misurazione simultanea di p e q con una precisione inferiore a $\hbar/2$. (Fano, 2004)³⁸

³⁸ Fano (data) riporta anche: Cassidy, 1996, p. 261 riferisce di un incontro fra Einstein e Heisenberg dell'aprile del 1926, durante il quale quest'ultimo mostra entusiasmo per l'operazionismo dell'articolo del primo del 1905. Per contro, Einstein esprime il suo scetticismo - lo stesso trucco non può funzionare due

Un'altra somiglianza individuata fra i due articoli riguarda la ridefinizione di concetti e le interpretazioni a loro associati, ma una prima differenza sostanziale entra presto in gioco: mentre Einstein assegna un ruolo fondamentale al tempo, per Heisenberg, e in generale nella Meccanica Quantistica, il tempo è solo un parametro di evoluzione. Il concetto di posizione in un determinato tempo non dipende quindi da cosa si intenda con il termine "tempo", ma incontra le sue problematiche nell'idea che tale posizione non sia fisicamente osservabile, o altrimenti definibile in base ad altre quantità comunque osservabili. La necessità di una nuova definizione di posizione non è richiesta da una definizione empirica non più valida o dimostratasi incompleta, ma da una vera e propria mancanza di connessione fra il concetto e le quantità osservabili e misurabili.

Nel suo articolo del 1925, Heisenberg offre solo una riformulazione matematica del concetto di posizione, che risulta però essere insoddisfacente. Nel 1927, invece, propone l'esperimento concettuale del microscopio a raggi gamma, capace di osservare la posizione dell'elettrone al prezzo di perdere l'informazione sulla quantità di moto dello stesso. Come è noto, questo esperimento concettuale serve a restituire un'immagine del principio di indeterminazione, conseguenza diretta del formalismo matematico utilizzato.

Fano (Fano, 2004) sottolinea le intenzioni di Heisenberg che emergono dal primo paragrafo, dedicato all'analisi dei concetti cinematici, dell'articolo del 1927. Le ridefinizioni risultano essere indipendenti dalla Meccanica Quantistica, secondo anche le parole dello stesso fisico tedesco.

Ciò può essere ricavato senza conoscere la nuova teoria, ma semplicemente sulla base delle possibilità sperimentali.

Questa affermazione sembra riferirsi ad un tipo di conoscenza intuitiva che potrebbe generare delle ridefinizioni concettuali dal carattere sintetico a priori basato sulle possibilità sperimentali: l'analisi e le definizioni operative permettono di riconoscere

volte - e conclude che è la teoria che decide ciò che è possibile osservare. Heisenberg ricorda l'opinione di Einstein quando formula il principio di indeterminazione, ma nella sostanza non abbandona il suo operazionismo.

aspetti nuovi della fisica, tale conoscenza permetterebbe poi di comprendere e dare significato all'espressioni matematiche astratte.

Entrambi i fisici non possono essere chiamati operazionisti puri, in quanto concordano sul fatto che ciò che può o non può essere osservato è determinato dalla teoria, come visto dalle parole di Einstein nel paragrafo 1.4³⁹. Tuttavia, come afferma Jammer, l'articolo può essere interpretato erroneamente "come un tentativo di porre le basi della Meccanica Quantistica sulle limitazioni operazionali della misurabilità" (Jammer 1974, 58).

1.7 Complementarità e indeterminazione: Heisenberg e Bohr

Il risultato principale dell'articolo di Heisenberg del 1927 risiede sicuramente nella proposta delle relazioni di indeterminazione fra variabili coniugate. Il problema affrontato da Heisenberg viene riassunto da Max Jammer in due domande principali: (1) Il formalismo permette di determinare posizione e velocità di una particella in un dato momento solamente con un grado di precisione limitato? (2) Tale imprecisione, se ammessa dalla teoria, potrebbe essere compatibile con il massimo dell'accuratezza ottenibile tramite le misurazioni sperimentali?

Queste domande, estraibili dall'articolo, vengono formulate tramite l'utilizzo predominante di termini specifici come *Ungenauigkeit*, che significa inesattezza o imprecisione, o *Genauigkeit*, precisione o grado di precisione. I termini tedeschi *Unbestimmtheit* e *Unsicherheit*, traducibili rispettivamente come "indeterminazione" e "incertezza"⁴⁰, appaiono solamente due volte il primo, e tre volte il secondo. Jammer esprime una differenza logica fra termini sintetizzabile come segue: se il concetto si riferisce a un'assenza di conoscenza soggettiva, allora il termine da utilizzare è *incertezza* (*uncertainty*); se il concetto presuppone una non esistenza oggettiva di un preciso valore per un osservabile, allora il termine da utilizzare è *indeterminatezza* (*indeterminateness*). Infine, se nessuno dei due aspetti è predominante, si può usare il termine *indeterminazione* (*indeterminacy*).

³⁹ Cfr. Nota 20

⁴⁰ In inglese, "*principle of uncertainty*" è il termine con cui viene chiamato il principio di indeterminazione.

Per rispondere alla prima domanda di Heisenberg è sufficiente seguire i passaggi matematici che conducono alla relazione di indeterminazione nel caso di posizione e impulso: l'imprecisione è intrinseca al formalismo. La seconda domanda porta l'autore a proporre l'esperimento concettuale del microscopio a raggi gamma con il fine di misurare con la massima precisione la posizione di un elettrone, poiché proprio per discutere tale concetto è necessario utilizzare un esperimento che ne permetta la determinazione. In tutti gli altri casi⁴¹, il concetto di posizione non ha senso. L'evoluzione dell'esperimento vede il suo punto più importante nell'impossibilità di ottenere un preciso angolo di scattering per il fotone incidente sull'elettrone, che si traduce in un'imprecisione intrinseca del momento dell'elettrone. Combinando questo risultato all'imprecisione della misurazione della posizione, si ottiene la relazione di indeterminazione proprio fra queste due grandezze e quindi l'impossibilità di predire l'esatta traiettoria dell'elettrone.

1.7.1 Lo scontro con Bohr

Jammer (1974, p. 65) riporta una testimonianza di Heisenberg⁴² in cui il dibattito con Bohr viene descritto come amaro e pieno di scontri e che metteva sotto pressione il giovane fisico non tanto per le conclusioni e la validità del principio di indeterminazione, ma piuttosto per i fondamenti concettuali ed epistemologici su cui erano costruiti. Heisenberg interpretò queste conclusioni come conseguenza del carattere discontinuo della materia.

Bohr accettava le conclusioni e le relazioni di indeterminazione, tuttavia non si trovava d'accordo con il carattere del ragionamento: l'indeterminazione nasceva nell'interazione fra fotone e particella e dall'impossibilità di prevedere l'angolo di scattering del fotone, era quindi legata al dualismo onda-corpuscolo e all'equazione di Einstein e de Broglie, non alla discontinuità della materia (Fano, 2004). Secondo la visione di Bohr, le relazioni non erano una prova a favore della non applicabilità dei concetti classici ai fenomeni quantistici, ma una dimostrazione che non fosse possibile utilizzare il linguaggio della fisica ondulatoria e della fisica particellare contemporaneamente.

⁴¹ Inteso come in esperienze in cui non è sperimentalmente possibile misurare una posizione.

⁴² Intervista del 25 febbraio 1963, *Archive for the History of Quantum Physics*.

Quest'ultimo è in realtà solo una possibile interpretazione delle relazioni di indeterminazioni, le quali sono indipendenti dal principio di complementarità dal punto di vista matematico e formale. Ma per Bohr il risultato matematico non poteva esistere autonomamente, e una spiegazione fisica completa dovrebbe sempre precedere la formulazione matematica. Qualsiasi tentativo di ricavare le relazioni di indeterminazioni, che fosse formale tramite passaggi matematici o operazionista tramite esperimenti concettuali, finiva per utilizzare l'equazione di Einstein e de Broglie che collegava la natura particellare a quella ondulatoria. Assumendo come punto di partenza tale equazione, o comunque come uno dei fondamenti della teoria, il collegamento fra i due tipi di entità mutualmente esclusive assumeva un ruolo fisico permanente e non solo epistemologico per la teoria.

Heisenberg, d'altra parte, non riteneva la complementarità come un presupposto necessario alla teoria. Nel 1927 e 1928 due articoli, pubblicati da Jordan e Klein e Jordan e Wigner, provarono l'equivalenza fra le descrizioni tramite il formalismo di Schrödinger di un sistema di n particelle e la descrizione dell'operatore di seconda quantizzazione per particelle che seguono la statistica di Fermi. La conseguenza epistemologica consisteva nel poter utilizzare a piacere i due differenti linguaggi, sostenendo l'idea di Heisenberg secondo la quale le idee di onda o di particella non erano altro che due differenti immagini della stessa entità fisica.

In un'intervista del 1971⁴³, Jordan raccontò come la mediazione di Pauli risultò essere fondamentale nel prevenire serie conseguenze per lo scontro tra Bohr e Heisenberg, mostrando loro come la discussione ruotasse attorno una diversa precedenza concettuale che i due fisici assegnavano agli elementi del discorso. Il punto di partenza di Heisenberg era l'idea che ogni concetto appartenente alla fisica classica potesse essere definito per i processi atomici, intendendo con il termine "definizione" una procedura di misurazione della grandezza assegnata al concetto. Le relazioni di indeterminazione, in questo senso, non costituivano un limite alla "definibilità" in quanto si riferivano alla misura contemporanea di due variabili coniugate. Secondo questa posizione, era possibile quindi definire una singola variabile misurandola con precisione arbitraria.

⁴³ M. Jammer, intervista con Jordan in Amburgo, 28 giugno 1971.

Il punto di partenza di Bohr, invece, consisteva nel dualismo onda particella che trovava la sua massima espressione nei fenomeni atomici. Riconoscendo il valore del principio di indeterminazione, la misurabilità delle grandezze atomiche rimaneva limitata, ma non era questo il motivo per cui la possibilità di definizione tramite i concetti classici non tornava. La stessa formulazione del principio di indeterminazione, e quindi l'idea di Heisenberg di limitazione della misurabilità, derivava dall'equazione di Einstein e de Broglie e quindi era a livello logico successiva alla complementarità.

Le famose ultime note aggiunte durante la correzione delle bozze, in cui Heisenberg ringrazia il suo maestro Bohr, derivano proprio dalla comprensione del punto di vista di quest'ultimo da parte dell'autore.

Soprattutto, l'incertezza dell'osservazione non si basa unicamente sulla presenza di discontinuità, ma è piuttosto direttamente collegata con l'esigenza di rendere conto simultaneamente delle diverse esperienze nella teoria ondulatoria. che trovano espressione da un lato nella teoria corpuscolare e dall'altro nella teoria ondulatoria. [...] Perciò, per il fatto che ho potuto conoscere e discutere nel loro sviluppo le nuove succitate ricerche di Bohr, che presto appariranno in un lavoro sull'assetto concettuale della teoria quantistica, mi sento obbligato a un cordiale ringraziamento al prof. Bohr. (Heisenberg 1927)

Questa conclusione non mostra per nulla l'intensità dello scontro epistemologico avvenuto tra Heisenberg e Bohr, un conflitto che raramente viene riportato nei testi di fisica e che permetterebbe di comprendere le difficoltà cognitive che la nascita della Meccanica Quantistica ha posto ai suoi ideatori.

Inoltre, le parole finali di Heisenberg vengono spesso interpretate erroneamente come indizio che Bohr abbia derivato l'idea di complementarità durante la discussione dell'articolo e dalle relazioni di indeterminazioni. Ciò risulta essere errato per motivi sia storici che concettuali. È possibile osservare come Bohr avesse già iniziato a pensare alla complementarità nel 1925, inoltre, come detto precedentemente, le relazioni di indeterminazione sono una conseguenza matematica del formalismo di Dirac-Jordan e risultano essere indipendenti dal principio di complementarità. Quest'ultimo ricopre invece

un ruolo interpretativo dei fenomeni atomici e quantistici ed è logicamente precedente alle relazioni di Heisenberg, almeno secondo il pensiero di Bohr.

Nell'abstract dell'articolo, le relazioni di indeterminazione per variabili canonicamente coniugate vengono definite come le ragioni essenziali che causano il verificarsi di relazioni statistiche⁴⁴. Tuttavia, lo stesso Heisenberg, nel 1929, scriverà:

Invece, come Bohr ha mostrato, è il simultaneo ricorso all'immagine particellare e all'immagine ondulatoria che è necessaria e sufficiente a determinare in ogni caso i limiti con cui i concetti classico sono applicabili.⁴⁵

A livello epistemologico, quindi, Heisenberg riconosce il valore fondamentale del principio di complementarità di Bohr rispetto alle relazioni di indeterminazioni, le quali permettono di discutere solamente l'aspetto particellare. Proprio ignorando l'epistemologia che risiede dietro le parole di Heisenberg, è allora possibile interpretare erroneamente il suo lavoro come una Meccanica Quantistica fondata sulle relazioni di indeterminazione di stampo operazionista⁴⁶.

⁴⁴ "Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in der Quantenmechanik." (Heisenberg, 1927, p. 1). "Questa imprecisione è l'autentico motivo della comparsa del contesto statistico in Meccanica Quantistica." (Boffi, 1990, p. 45)

⁴⁵ "Vielmehr zeigte Bohr, dass eben die gleichzeitige Benützung des Partikelbildes und des Wellenbildes notwendig und hinreichend ist, um in allen Fällen die Grenzen abzustecken, bis zu denen die klassischen Begriffe anwendbar sind." Citato in H. Kennard, "Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen," *Zeitschrift für Physik* 44,326-352 (1927), pag. 337.

⁴⁶ Cfr. paragrafo 1.6.



Figura 1.6 Heisenberg e Bohr. Fermilab, U.S. Department of Energy, Public domain, via Wikimedia Commons

1.7.2 Interpretazione e statuto epistemologico del principio

Jammer (1974, 58) sostiene che questa interpretazione delle relazioni di indeterminazione ebbe come risultato l'utilizzo in letteratura delle stesse come uno dei principi di base della teoria. Pauli presentò le relazioni di Heisenberg come primo elemento della voce enciclopedica⁴⁷ sulla Meccanica Quantistica, e per questo motivo anche Hermann Weyl inserì le relazioni tra gli elementi fondamentali del suo libro⁴⁸ sulla teoria dei gruppi e la Meccanica Quantistica. Numerosi altri autori assegnarono un ruolo centrale alle relazioni di indeterminazione di Heisenberg: March (1931), Kramers (1937), Dushman (1938), Landau e Lifshitz (1947), Schiff (1949) e Bohm (1951).

Karl Popper, nel 1934, contestò la posizione centrale per la Meccanica Quantistica delle relazioni di indeterminazione, così come l'idea che i risultati statistici fossero conseguenza diretta della stessa. L'opposizione di Popper si basava principalmente sul fatto

⁴⁷ W. Pauli (1933), "Die Allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik", *Handbuch der Physik*, (Geiger and K. Scheel), 2^a edizione, Vol. 24, Springer, Berlino.

⁴⁸ H. Weyl (1928), *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, Hirzel, Lipsia. Ristampato come *The Theory of Groups and Quantum mechanics* (Methuen, Londra, 1931; Dover, New York, 1950)

che le relazioni fossero derivabili dall'equazione d'onda di Schrödinger interpretata statisticamente, e quindi non potevano assumere un ruolo logicamente fondante. Ancora una volta, ciò comportava una rilettura epistemologica delle relazioni. Questa confusione interpretativa portò negli anni successivi ad un uso errato delle relazioni di indeterminazione come sinonimo del principio di complementarità⁴⁹ di Bohr.

Tuttavia, la distinzione tra i due principi di complementarità e di indeterminazione risulta essere piuttosto netta. Come già detto: le relazioni di indeterminazione sono dirette conseguenze del formalismo matematico di Dirac-Jordan per la Meccanica Quantistica; la complementarità, invece, riveste un ruolo interpretativo ed epistemologico.

L'interpretazione attuale del principio di indeterminazione riconosce come migliore spiegazione dei dati sperimentali riguardanti la materia e la radiazione la dipendenza dal dualismo onda-corpuscolo (Fano, 2004) e quindi la priorità, in senso fisico, del principio di complementarità.

⁴⁹ Utilizzi errati dei due principi come sinonimi sono osservabili in V. A. Fock (1951), "Kritika vzgliadov Bora na kvantovuiu mekhaniku", ("Critica della visione di Bohr della Meccanica Quantistica"), *Uspekhi Fisičeskich Nauk* 45, 3-14; A. Serber e C. H. Townes (1960), "Limits on electromagnetic amplification due to complementarity", *Quantum Electronics-A Symposium*, Columbia University Press, New York.

2 La visualizzabilità nella fisica moderna: dell'elettrodinamica quantistica alla Loop Quantum Gravity

Erwin Schrödinger non ha mai abbandonato l'idea della visualizzabilità come strumento necessario per la comprensione dei fenomeni scientifici, in continuità con la tradizione Kantiana della visualizzazione spazio-temporale sostenuta da numerosi fisici sia del diciannovesimo che del ventesimo secolo. Il formalismo ondulatorio risultava essere più accettabile e comprensibile dalla maggioranza dei contemporanei di Schrödinger e Heisenberg, ma la teoria che ne emergeva dalla combinazione dei due diversi approcci non restituiva che un'immagine spazio-temporale ambigua. Ogni descrizione della Meccanica Quantistica proposta nei primi anni di sviluppo della teoria risultava essere incompleta, distorta o inconsistente (De Regt, 2020, p. 252) e quindi insoddisfacente per la maggior parte della comunità. Quando nel 1927 Heisenberg derivò le relazioni di indeterminazione, la mancanza di immagini chiare e affidabili, capaci di descrivere i fenomeni microscopici, divenne una realtà riconosciuta ufficialmente.

Negli anni successivi, la ricerca si focalizzò nel trovare una descrizione della teoria elettromagnetica in termini della Meccanica Quantistica, giungendo infine alla formulazione della teoria quantistica dei campi e, nello specifico, dell'elettrodinamica quantistica. Essa rendeva conto e combinava insieme relatività speciale e Meccanica Quantistica, e risultava quindi molto più complessa sia dal punto di vista matematico che fisico descrittivo. La visualizzabilità non era contemplata, o comunque prioritaria, nella prima formulazione teorica dell'elettrodinamica quantistica proposta da Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga tra il 1947 e il 1948.

Nel 1949, appena un anno dopo, Feynman presentò alla comunità scientifica la sua rivoluzionaria idea dei famosi diagrammi di Feynman con un articolo dal titolo epistemologicamente significativo: "Approccio spazio-temporale all'elettrodinamica quantistica"⁵⁰. Dal punto di vista pratico, i diagrammi permisero uno studio molto più diretto ed intuitivo ai fenomeni quantistici come i decadimenti e le interazioni fra particelle, come dimostrato dal successo con cui si diffusero pochi anni dopo. L'importanza dal

⁵⁰ Feynman Richard P. (1949), "Space-time approach to quantum electrodynamics". *Physical Review* 76: 769-789

punto di vista epistemologico è abbastanza chiara: essi si basano in parte sul concetto di visualizzabilità spazio-temporale e proprio il successo e la diffusione che uno strumento di questo tipo è riuscito a raggiungere sottolineano il ruolo che visualizzabilità assume nei vari aspetti dell'indagine fisica, dalla comprensione alla descrizione dei fenomeni.

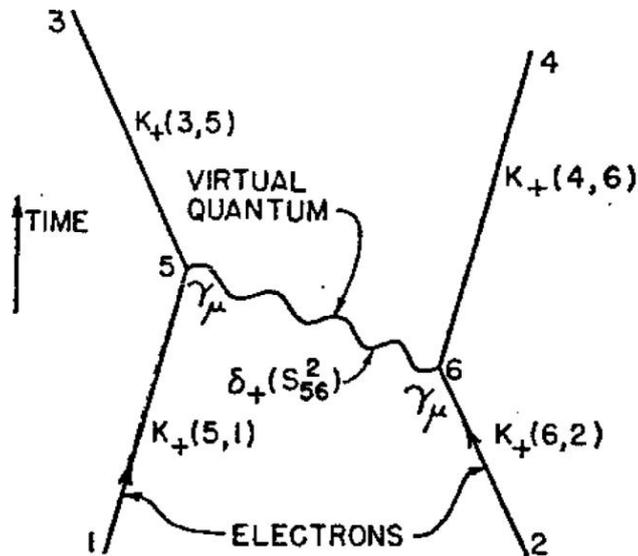


Figura 2.1 Uno dei diagrammi di Feynman originali. *Physical Review* 76, 772, 1949. Copyright 1949 by the American Physical Society

Oggi, qualsiasi analisi che riguardi un'interazione elettromagnetica, di forze forte o di forza debole, può essere affrontata tramite un diagramma di Feynman. Ciò permette l'esecuzione rapida di calcoli di ampiezze di probabilità. Fin dalla prima proposta dei diagrammi, fu chiaro come essi non erano pensati per essere letti come una fedele rappresentazione dei fenomeni descritti, e ancora oggi due possibili interpretazioni permangono e vengono discusse. Letitia Meynell (Meynell, 2008, p. 41) presenta le due alternative: la prima vede i diagrammi come meri strumenti di calcolo, al pari di una vera e propria notazione equivalente a espressioni matematiche; la seconda riconosce invece un ruolo rappresentativo dell'immagine. La prima interpretazione si basa su una concezione riconosciuta da tutti – nessuno nega il potenziale di calcolo – e quindi la domanda filosofica riguarda la possibilità che i diagrammi siano *solo* strumenti di calcolo o che essi possano *anche* rappresentare in qualche modo i fenomeni fisici (Meynell, 2008).

Nel 1949, all'esordio dei diagrammi di Feynman, essi vennero accolti come un'immagine intuitiva e astratta, segno quindi di visualizzabilità ma priva di quella sicurezza matematica necessaria per un'immediata fiducia nello strumento da parte dei

contemporanei. La formulazione di Schwinger e Tomonaga, per quanto complessa, poteva contare su fondamenta matematiche sicure e il suo formalismo, che poteva richiedere anche diverse pagine per essere eseguito, rimaneva preferibile. In quegli anni, però, Freeman Dyson iniziò a dimostrare e proporre l'uso dei diagrammi del giovane Feynman nei suoi lavori e nelle sue lezioni come descrizione equivalente a quella di Schwinger. Tale lavoro di diffusione risultò essere fondamentale, ma i diagrammi vennero utilizzati da Dyson solo nel loro ruolo di strumento matematico, come esposto da Kaiser.

Sin dall'inizio, Feynman e Dyson avevano idee differenti su come i diagrammi dovessero venire disegnati, interpretati e usati. Per Feynman, scarabocchiare semplici immagini spazio-temporali precedeva qualsiasi tentativo di derivare o giustificare il suo nuovo schema di calcolo. Per Dyson, i diagrammi avrebbero potuto risultare utili solo se fossero stati prima derivati rigorosamente dalle basi di una specifica teoria di campo. Per Feynman, i suoi nuovi diagrammi fornivano un'immagine dei veri processi fisici, e quindi aggiungevano una dimensione intuitiva oltre che fornire un semplice e mnemonico strumento di calcolo. Per Dyson, le linee disegnate non erano altro che "grafici su carta", utili per maneggiare lunghe file di equazioni ma non dovevano essere confuse con gli oggetti del mondo reale.⁵¹ (Kaiser, 2005, p. 175-176)

I due approcci distinti si diffusero creando una varietà di applicazioni inizialmente non previste per i diagrammi. Meno del 20% degli articoli pubblicati nella rivista *Physical Review* tra il 1949 e il 1954 presentava i diagrammi utilizzati come originariamente pensato sia da Feynman che da Dyson, ovvero nell'analisi di approcci perturbativi (Meynell, 2008, p. 44). Una volta riconosciuta l'equivalenza dei diagrammi con la formulazione di Schwinger e Tomonaga, i diagrammi assunsero il ruolo di immagine più facilmente comprensibile di quella descrizione complessa, ma valida, del formalismo matematico dell'elettrodinamica quantistica.

⁵¹ Citato anche in (Meynell, 2008, p. 44-45)

De Regt (2020, 252) nota una “somiglianza sorprendente” con la competizione del 1926 tra formalismo matriciale e ondulatorio e la dimostrazione della loro equivalenza con la storia dei diagrammi di Feynman. In entrambi i casi, una formulazione matematicamente più complessa e astratta viene accostata a un'altra più visualizzabile e dimostrata essere equivalente, che quindi svolge il ruolo di strumento concettuale per favorirne la comprensione. Il confronto fra i due caratteri non è banale ma, a differenza di ciò che accadde fra Schrödinger e Heisenberg, la visualizzabilità dell'elettrodinamica quantistica non produsse scontri epistemologici accesi.

2.1 I due formalismi della teoria dei campi

L'elettrodinamica quantistica (*Quantum Electro Dynamics*, QED) è una particolareggiata della teoria quantistica dei campi (QFT, *Quantum Field Theory*) in cui le uniche identità considerate sono il campo elettromagnetico, l'elettrone, inteso come quanto del campo, e il fotone, che occupa il ruolo di bosone mediatore fra elettroni. In senso ampio, la QED è inclusa nella QFT, che a sua volta contiene altre teorie di campo che tengono in considerazione diversi tipi di particelle e interazioni. La QED è comunque stata la prima teoria di campo sviluppata e ha costituito un modello per la formulazione delle successive.

Come precedentemente detto, esistono oggi due formalismi equivalenti per l'elettrodinamica quantistica: il formalismo canonico iniziato da Paul Dirac nel 1927 e ultimato da Schwinger e Tomonaga, e il formalismo noto come quello degli integrali sui cammini (*path integral*) sviluppato da Feynman nel 1948. Il primo si basa sull'idea di quantizzare i sistemi classici, mentre il secondo parte dalla quantizzazione del concetto di minima azione. Questi due approcci vengono oggi spesso usati contemporaneamente senza specificare le caratteristiche epistemologiche e i significati fisici che li sostengono. Questo porta a generare inevitabilmente una confusione nell'interpretazione e nelle descrizioni dei fenomeni, anche se i due formalismi sono equivalenti.

Note le espressioni per la Lagrangiana e l'Hamiltoniana e le regole di commutazione di Heisenberg, la derivata della posizione e dell'impulso generalizzati può essere espressa come la relazione di commutazione fra tali grandezze e l'Hamiltoniana del

sistema, moltiplicati per il fattore i/\hbar secondo le regole di derivazione di Heisenberg⁵².

Per un operatore A generico si ha:

$$\dot{A}(t) = \frac{i}{\hbar} [H, A(t)] + \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_H$$

L'operatore $A(t)$ identificato come una combinazione lineare di posizione e impulso, chiamato $a(t)$, permette di giungere all'Hamiltoniana di un oscillatore armonico semplice:

$$H = w \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right)$$

dove a^\dagger è l'operatore autoaggiunto di a , mentre w è la frequenza di oscillazione. L'estensione a più dimensione avviene tramite la somma di diversi operatori ortogonali fra loro, ognuno dei quali rappresenta le oscillazioni quantizzate lungo direzioni differenti. Nell'espressione tridimensionale per un oscillatore armonico quantistico, ogni direzione è indipendente dall'altra e ciò restituisce una semplice somma di Hamiltoniane.

Infine, per ottenere una teoria di campo, la posizione e l'impulso generalizzati vengono sostituiti con la posizione canonica e la densità di impulso. In sintesi, la quantizzazione canonica inizia dai concetti classici di posizione e impulso generalizzati, li amplia in più dimensioni e quindi li estende nel continuo a creare un campo. Nella stessa maniera si ottengono la Lagrangiana, l'Hamiltoniana e gli altri operatori. (Helhoski, 2020). Il libro *Quantum Field Theory for the Gifted Amateur* (Lancaster & Blundell, 2014, p. 98) propone una spiegazione simile in maniera semi-divulgativa, con un approccio a prima vista e a parole poco rigoroso, ma senza violare la solidità matematica.

La formulazione dell'integrale sui cammini nasce da un'interpretazione concettuale dell'esperimento della doppia fenditura. Indicati con S la sorgente, A_1 e A_2 le fenditure e O lo schermo, esistono due possibili percorsi: $(S \rightarrow A_1 \rightarrow O)$ e $(S \rightarrow A_2 \rightarrow O)$. Aggiungendo più fenditure, l'ampiezza di probabilità per una misura su O sarà la somma di tutti i possibili cammini. Aggiungendo più schermi, l'ampiezza di probabilità per una misura su O sarà la somma di tutti i possibili cammini considerando ogni possibile fenditura in

⁵² In Meccanica Quantistica, la notazione conosciuta come rappresentazione di Heisenberg vede l'evoluzione temporale riferirsi agli operatori invece che agli stati, i quali rimangono fissi nel tempo. Le due rappresentazioni sono equivalenti e differiscono solo nella dipendenza temporale. Alcuni sostengono che la rappresentazione di Heisenberg sia più *naturale* in quanto l'evoluzione dell'osservabile ha più significato fisico che l'evoluzione di una base.

ogni schermo⁵³. Tenendo in mente queste relazioni, è possibile immaginare lo spazio vuoto con un'infinita sequenza di schermi, ognuno dei quali aventi infinite fenditure. Una particella che viaggia da S a O in un tempo T incontrerà in questa interpretazione un nuovo operatore di evoluzione temporale ad ogni istante.

Lo sviluppo matematico di questa descrizione trasforma la somma dei possibili cammini in un integrale. L'interpretazione è quindi quella secondo la quale il cammino di una particella è composto da sovrapposizione di tutti i cammini possibili.

2.2 L'uso e la diffusione dei diagrammi di Feynman

Un'analisi semplicistica dei diagrammi di Feynman enfatizza l'aspetto matematico-strumentale dei diagrammi. In questa visione, essi si avvicinano concettualmente all'idea di un algoritmo che, in accordo a determinate regole, riceve un input da elaborare per ottenere una risposta numerica, un calcolo delle probabilità. In questo senso, il successo dei diagrammi non avrebbe nulla a che fare con la visualizzabilità, ma si baserebbe sui risultati pratici in termini di velocità e facilità di calcolo.

Che i diagrammi siano degli ottimi strumenti di calcolo non può essere negato. Meynell (Meynell, 2008) offre una spiegazione ridotta all'essenziale sul funzionamento dei diagrammi, utile per comprendere meglio gli aspetti in discussione. Quando si analizza l'interazione fra due elettroni, si deve considerare tutti i possibili cammini che il fotone virtuale di interazione può percorrere. Ognuna di queste alternative ha una propria ampiezza di probabilità e l'integrale calcolato su ognuna di queste strade restituisce l'ampiezza di probabilità per l'interazione. Il diagramma può essere complicato con l'aggiunta di numerosi eventi che potrebbero intercorrere prima o dopo l'interazione fra i due elettroni. Solitamente, questi eventi riguardano l'emissione o l'assorbimento di un fotone, la produzione da parte di un fotone di una coppia elettrone-positrone o, viceversa, la produzione di un fotone a seguito di un processo di annichilazione. Più complesso risulta essere il diagramma, ovvero ricco di eventi, più complessa è l'espressione matematica che descrive. Considerando anche solo l'interazione fra i due elettroni, vi è un numero infinito di possibili cammini che, in teoria, il fotone virtuale può percorrere

⁵³ Fissati la sorgente S e lo schermo O , ogni passaggio intermedio verrà effettuato tramite una serie di schermi A_i, B_i, C_i, \dots , e quindi tutte le possibili combinazioni, ad esempio $S \rightarrow A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow C_3 \rightarrow \dots \rightarrow O$.

e questo significherebbe un integrale di lunghezza infinita. Tuttavia, le probabilità associate a certi cammini è talmente piccola che il contributo al risultato finale può essere trascurato e ciò permette di eliminare dall'integrale ogni termine più piccolo di un certo ordine d'approssimazione. Come dimostrato da Feynman (Feynman, 1985, p. 7), sono sufficienti pochi livelli di complessità dei diagrammi per ottenere risultati estremamente precisi e in accordo con le misurazioni.

In sintesi [...] Quando traduciamo [dal diagramma] la probabilità di trovare due particelle in un certo punto del tempo data la loro posizione in un momento precedente, creiamo un'espressione matematica che integra tutte le ampiezze di probabilità del fotone su ognuno di questi cammini. Per tenere in conto ogni espressione dell'integrale, è utile disegnare il cammino a cui ogni elemento corrisponde. [...] Per quanto questo processo risulti complicato, il successo dell'approccio alla Feynman si basa sulla sua semplicità di comparazione rispetto all'approccio alternativo di calcolo sviluppato da Schwinger e Tomonaga. (Meynell, 2008, p. 42)

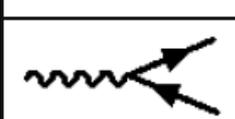
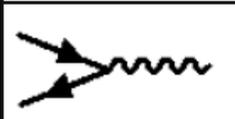
	An electron emits a photon
	An electron absorbs a photon
	A positron emits a photon
	A positron absorbs a photon
	A photon produces an electron and a positron (an electron-positron pair)
	An electron and a positron meet and annihilate (disappear), producing a photon

Figura 2.2 Possibili eventi descrivibili con un diagramma di Feynman. (Meynell, 2008, p. 43)

Uno degli aspetti fondamentali dei diagrammi risulta essere la corrispondenza fra il simbolo e ciò che esso rappresenta. Feynman (Feynman, 1949) discusse principalmente questo aspetto rappresentativo nel suo articolo, ovvero l'associazione di simboli e immagini a particelle e interazioni, invece che il collegamento fra i diagrammi e le espressioni matematiche.

Osservando oggi la definizione che l'Oxford Dictionary of Physics:

“Elettrodinamica quantistica (QED) Lo studio delle proprietà elettromagnetiche della radiazione e il modo in cui essa interagisce con la materia carica nei termini della Meccanica Quantistica. La collisione di un elettrone in movimento con un protone, in questa teoria, può essere visualizzata tramite un diagramma spazio-temporale (*diagrammi di Feynman*) in cui i fotoni vengono scambiati (vedi illustrazione).” (Isaac 2000)

Meynell sottolinea l'utilizzo dei termini “visualizzare” e “illustrazione”, ritenendolo esplicativo nell'individuare il potenziale rappresentativo che attualmente viene

riconosciuto ai diagrammi. È quindi possibile affermare che oggi l'utilizzo dei diagrammi non si fermi alla sola computazione di calcoli complessi.

Secondo De Regt, i diagrammi di Feynman sono strumenti atti soprattutto alla risoluzione dei problemi e all'esecuzione di calcoli piuttosto che alla rappresentazione realistica di fenomeni fisici (De Regt 2020, 252). David Kaiser (Kaiser, 2005) presenta una dettagliata analisi del ruolo di strumento dei diagrammi e, in quanto tali, seppur intuitivi e visualizzabili, essi hanno bisogno di essere accompagnati da abilità pratiche particolari per un loro corretto utilizzo e interpretazione. Queste abilità possono essere acquisite con lo studio, ma è soprattutto con l'insegnamento da parte di un maestro che si riesce a capire davvero il potenziale e il significato dei diagrammi di Feynman. Questa dipendenza pedagogica nasce dal carattere tipico della rappresentazione: essa va compresa intuitivamente per essere utilizzata.⁵⁴

Secondo Kaiser, la diffusione e il successo dei diagrammi di Feynman è dovuta alla infrastruttura con cui l'insegnamento della fisica teorica veniva gestito dalla comunità nel secondo dopoguerra e all'apertura delle frontiere occidentali, che permise un grande scambio di insegnanti e studenti post dottorato fra i vari istituti. Ognuno di questi studiosi aveva fatto suo uno, o al più qualcuno, degli aspetti non solo della Meccanica Quantistica, ma delle varie rappresentazioni collegabili ad essa, e quindi anche dei diagrammi di Feynman. Riguardo quest'ultimi, l'inteso scambio di idee e il loro confronto allargò esponenzialmente il numero di utilizzatori e di utilizzi "improvvisati" ma efficaci dei diagrammi, soprattutto fra le nuove generazioni di fisici teorici.

Oggi, i diagrammi di Feynman sono utilizzati per descrivere diversi fenomeni anche in contesti in cui non erano stati originariamente pensati. Ciò è stato possibile proprio grazie al loro ruolo di strumenti e non di rappresentazioni fedeli dei fenomeni: uno strumento, in quanto tale, può essere modificato e adatto secondo le esigenze. Tuttavia, pur separando i diagrammi dall'idea di rappresentare fedelmente i fenomeni, il potere descrittivo non ne subisce grosse conseguenze. L'aspetto chiave della visualizzabilità si traduce non solo in una descrizione non sempre fedele del fenomeno, ma nella possibilità di associare un'immagine specifica a ciò che le formule descrivono per aiutarne la

⁵⁴ Cfr anche (Meynell, 2008, p. 45) e (De Regt, 2020, p. 253).

comprensione, anche se tale immagine risulta poi essere un'approssimazione visiva. Richard Mattuck, riguardo al problema dei multi-corpi, scrisse:

In via di principio è possibile fare una teoria perturbativa per più corpi senza diagrammi [di Feynman], così com'è possibile attraversare la giungla amazzonica senza una mappa. Tuttavia, la probabilità di sopravvivere è di molto maggiore se li usiamo. (Mattuch 1976, 120)

De Regt (2020, 253) commenta questo passaggio dicendo come una mappa abbia un vantaggio pragmatico superiore rispetto a delle semplici descrizioni linguistiche. Il paragone è chiaro: il fenomeno fisico è il luogo da esplorare, i diagrammi di Feynman rappresentano la mappa seppur approssimata, mentre le formule sono descrizioni linguistiche e precise per muoversi nel luogo. Ovviamente, utilizzare una mappa richiede delle abilità di base, ma specifiche, collegate alle caratteristiche e agli aspetti visivi delle stesse mappe. Un lettore competente è colui che possiede le *skills* necessarie al corretto ed efficace utilizzo di uno strumento visivo come i diagrammi di Feynman. Per una persona con queste capacità, basta uno sguardo per comprendere più aspetti del fenomeno descritto, come ad esempio il tipo di particelle coinvolte o la natura dell'interazione e quindi di quale fenomeno si tratta.

Come sottolinea Kaiser (2005, 366-370), il successo dei diagrammi di Feynman non può essere dovuto esclusivamente alla visualizzabilità e alla flessibilità come strumento di calcolo, in quanto altri strumenti proposti e aventi queste stesse caratteristiche non ottennero lo stesso risultato.

Uno dei possibili aspetti che ha determinato il successo dei diagrammi di Feynman è l'analogia con altre tecniche di visualizzazione che nel passato si erano dimostrate efficaci, come i diagrammi di Minkowski. Ciò sottolinea un'altra caratteristica non banale della visualizzabilità come mezzo per la comprensione. Essa viene aiutata dalla costruzione di analogie fra ciò è già noto e ciò che si vuole capire, la costruzione di un'immagine associa quindi a un fenomeno nuovo una rappresentazione naturalmente composta da elementi invece noti e familiari al costruttore. A sua volta, l'immagine-analogia viene confrontata con una simile costruzione precedentemente utilizzata e dimostratasi efficace, anche se in un contesto diverso. L'esempio pratico consiste proprio nell'idea che i

diagrammi di Minkowski si erano già rivelati efficaci strumenti matematici per la comprensione e il calcolo dei fenomeni di relatività. Essi non consistevano in rappresentazioni affidabili della realtà di tali fenomeni, ma risultavano estremamente utili per visualizzare, ovvero immaginare, cosa stesse accadendo e quindi anche per discuterne in maniera più immediata con altri. Il fisico del secondo dopoguerra, dunque, era abituato all'idea che uno strumento di calcolo fornisse anche un qualche tipo di rappresentazione e questa familiarità con l'utilizzo dello strumento permise in relativamente poco tempo di ottenere lo stesso risultato con i diagrammi di Feynman.

Kaiser propone inoltre, come possibile motivazione per il successo dei diagrammi, la somiglianza con altre immagini definibili "reali" dei fenomeni quantistici, come le lastre fotografiche ottenute nelle camere a nebbia e le ricostruzioni delle stesse tramite disegni. Questa analogia visiva indica l'abitudine di suggerire l'interpretazione fisica di un fenomeno tramite un'immagine, rendendola qualcosa di già implicitamente presente nei modi di indagare la fisica e quindi non estranea all'attività degli studiosi.

L'associazione tra "realismo" e i diagrammi di Feynman negli anni '50 e '60, basata sulla somiglianza tra "vere" fotografie e "vere" particelle, favorì l'utilizzo dei diagrammi di Feynman per molti fisici. Diversamente dai diagrammi duali [una tecnica diagrammatica alternativa che non prese mai piede, nonostante la sua efficacia], i diagrammi di Feynman potevano essere letti come più immediatamente collegati a reali particelle e processi, e quindi meno legati a un particolare formalismo astratto. [...] Nessuno dovette dichiarare che i diagrammi di Feynman erano "la stessa cosa" delle emulsioni nucleari, delle fotografie delle camere a bolle, o delle proprie ricostruzioni stilizzate affinché avvenisse una connessione visuale. (Kaiser, 2005, p. 372-373)

Tra rappresentazioni astratte, come i diagrammi di Minkowski, e le immagini "vere" dei processi nucleari e particellari, come le camere a bolle o a nebbia, la fisica di quegli anni era ormai abituata all'associazioni di immagini ed eventi fisici con diversi gradi di realismo. L'effettivo grado di rappresentazione non veniva spesso specificato o discusso, ma ciò non arrestò l'utilizzo delle immagini sia come strumenti che come modo di

immaginare e visualizzare euristicamente i processi fisici. La comunità scientifica dell'epoca, guidata dal pragmatismo statunitense, risultava esser più interessata ai risultati e alla potenziale utilità dell'immaginazione.

2.3 L'approccio alla fisica di Feynman

Per Feynman la visualizzabilità era essenziale. Tra le varie fonti che sostengono questa affermazione, il lavoro di Schweber del 1994 raccoglie un'analisi della filosofia di Feynman, e diversi altri fisici, per quanto riguarda la storia dell'elettrodinamica quantistica, accompagnata da numerose interviste ai protagonisti. Schweber definisce il genio di Feynman come una combinazione di grandi capacità analitiche, un affinato spirito di visualizzazione, un'intuizione fisica notevole e un'energia fisica instancabile che gli permetteva di concentrarsi intensamente su qualsiasi domanda. Un'altra caratteristica tipica della figura di Feynman riguarda il suo approccio personale che impiegava nell'affrontare i problemi, che a sua volta determinava un particolare rapporto con la lettura degli articoli scientifici. In ciò è possibile notare il ruolo fondamentale assegnato alla visualizzazione e alla visualizzabilità nell'atto di approcciare e comprendere un problema fisico. Per Feynman, la visualizzabilità di un fenomeno è un qualcosa di personale, intuitivo e spesso anche sufficiente per trovare la soluzione. Tuttavia, nel momento di dover *spiegare* e quindi comunicare tale soluzione ad altri, la matematica risulta essere il linguaggio più efficace.

L'intervista riportata e trascritta da Schweber (Schweber, 1994, p. 455-466)⁵⁵ permette una prima analisi delle dirette parole di Feynman.

Ho molte difficoltà nel leggere gli articoli. Ho difficoltà a capirli. Non ho difficoltà a lavorarci su da solo.⁵⁶

In termini di visualizzabilità, è probabile che Feynman sentisse il bisogno di costruire una propria immagine del fenomeno da cui poi iniziare l'analisi. Questa necessità si

⁵⁵ Non sorprende che l'autore abbia assegnato il titolo "Richard Feynman e la visualizzazione dei processi spazio-temporale" al capitolo.

⁵⁶ Citato in (Schweber, 1994), originale in Richard P. Feynman, CW. *Transcription of a taped oral interview of Feynman by Charls Weiner*, March 1966, for the Center of History and Philosophy of Physics.

scontra con la carenza di immagini del linguaggio matematico, e soprattutto con l'idea che l'articolo da leggere, prima di essere formalizzato, è stato influenzato da un'immagine mentale personale dello stesso autore. È comprensibile quindi che Feynman, una volta noto il problema, preferisse trovarne la soluzione tramite un'analisi personale che partisse proprio dalla costruzione mentale di un'immagine del fenomeno. A proposito di ciò, egli disse in un'intervista:

Non posso spiegare chiaramente cosa accade nella mia mente [...] Ma la visualizzazione in una forma o in un'altra è una parte vitale del mio pensare e non è necessario che io faccia un diagramma come quello. Il diagramma è più, in un certo senso, l'immagine che viene fuori quando cerco di chiarire la visualizzazione, che è in un certo senso vaga, mescolato ai simboli. È molto difficile da spiegare, perché non è chiaro. Il mio atomo, per esempio, quando penso allo spin di un elettrone in un atomo, vedo un atomo e vedo un vettore e una Ψ scritta da qualche parte [...] È impossibile discernere i simboli dall'oggetto; ma è qualcosa di molto visivo. [...] Perciò io vedo continuamente oggetti visivi associati a quello che sto cercando di fare.⁵⁷ (Schweber, 1994, p. 465)

In poche e confuse parole, Feynman riporta una definizione di visualizzabilità che mostra due fondamentali elementi: l'associazione mentale del fenomeno studiato a un'immagine visualizzabile, anche se ricca di termini matematici, è un atto spontaneo e diffuso, utile a portare chiarezza nell'analisi; d'altra parte, non solo l'immagine ma anche l'approccio alla costruzione della stessa è un qualcosa di personale, per quanto condiviso. Se è vero che molti di noi non possono evitare di costruire un'immagine mentale, lo è altrettanto che queste immagini sono personali. Condividiamo l'atto di visualizzare, ma non la visualizzazione o l'immagine visualizzata.

Feynman continua riconoscendo come l'analisi matematica dei fenomeni sia comunque fondamentale, se non più efficiente, nel lavoro di indagine scientifica.

⁵⁷ Il carattere a prima vista confuso e ripetitivo appartiene alla natura dell'intervista orale.

È sempre stata la visualizzazione. Vi era parecchia visualizzazione e parecchia analisi. L'analisi è molto più efficiente quando sai usarla, specialmente quando vuoi pubblicare o spiegare qualcosa; o quando vuoi essere sicuro che quello che hai pensato sia chiaro e corretto. [...] Io vedo il carattere della risposta davanti a me – ecco cos'è la rappresentazione⁵⁸. Solitamente cerco di rendere più chiare le immagini ma alla fine la matematica prende il sopravvento e può essere più efficiente dell'immagine nel comunicare l'idea. (Schweber, 1994, p. 466)

Visualizzazione e analisi ricoprono ruoli diversi nell'attività mentale. La prima è un punto di partenza intuitivo e personale su cosa sia o meno il fenomeno, un'immagine costruita internamente e spesso caratterizzata da contorni sfumati. La matematica ricopre un ruolo non solo chiarificatore, ma soprattutto comunicatore che permette di condividere la spiegazione del fenomeno con un linguaggio universale e univoco nei suoi significati.

Ciò che più risalta, a differenza del dibattito avvenuto anni prima fra Heisenberg e Schrödinger, è che i due ruoli non sono in competizione. L'epistemologia di Feynman non riguarda l'essenza di una teoria, ma l'approccio che l'indagatore dei fenomeni fisici può assumere nella sua indagine. Un approccio naturale, intuitivo, che si fonda sulle caratteristiche mentali innate dell'uomo e che, successivamente si concretizza grazie al linguaggio formale della matematica. Inoltre, è presto detto che non esiste un esatto punto di confine fra i due momenti, e Feynman ne porta un esempio nella stessa intervista riferendosi a come riuscì a risolvere il problema dell'elio liquido tramite la visualizzazione.

In alcuni particolari problemi che ho affrontato fu necessario continuare lo sviluppo dell'immagine come metodo prima che la matematica potesse essere davvero trovata. [...] Non avevo idea di come poter scrivere qualcosa e non riuscivo a fare niente se non continuare a costruire l'immagine [...] e non

⁵⁸ Il termine originale usato da Feynman è "picturing", ma dato la natura della citazione, un'intervista, e la mancanza di intenzioni filosofiche dell'intervistato, è lecito pensare che vi sia una vicinanza concettuale con la visualizzabilità.

riuscivo a buttare giù qualcosa di matematico [...] Perciò l'intera questione era stata risolta, in realtà, pubblicata inizialmente come un qualcosa di descrittivo [...] che non è molto significativo, ma per me era la vera risposta. Io avevo davvero capito il problema e stavo cercando di spiegarlo. È molto difficile spiegare un'immagine. [...] Avevo la risposta giusta in qualcosa di visuale. (Schweber, 1994, p. 466)

Analizzando lo stesso passaggio, De Regt (2020) nota come Feynman traccia una netta distinzione fra la comprensione di un fenomeno e la sua spiegazione. Ancora una volta, il focus epistemologico riguarda il rapporto con la teoria e non la natura della teoria. La visualizzazione fornisce la comprensione del fenomeno in maniera intuitiva, interna e personale all'indagatore; essa è soggettiva. La spiegazione rigorosa del fenomeno avviene tramite l'analisi matematica e l'utilizzo di un linguaggio universale leggibile e comprensibile da tutti.^{59 60}

2.4 Schwinger e Feynman

Nel confronto fra l'aspetto storico-epistemologico dell'elettrodinamica quantistica, Feynman e i suoi diagrammi rappresentano Schrödinger e il formalismo ondulatorio, mentre Schwinger e l'approccio canonico sono la controparte di Heisenberg e il formalismo matriciale. Il secondo caso storico non è però stato caratterizzato da uno scontro di epistemologie sui necessari caratteri per una teoria.

Nell'intervista a Schweber (Schweber, 1994, p. 365), Schwinger afferma:

Io non sono fondamentalmente un formalista – anche se tutti quanti pensano che lo sia. Il formalismo è solamente il linguaggio con cui esprimo le idee fisiche che sono già state pensate. Non so neanche se ci siano vere immagini

⁵⁹ De Regt sostiene che la visualizzabilità è connessa all'intelligibilità di una teoria o di una spiegazione scientifica. "Prima di tutto è necessaria l'intelligibilità (la comprensione di una teoria), che può essere ottenuta tramite la visualizzabilità, e successivamente è possibile costruire una spiegazione". Cfr (De Regt, 2020, p. 255)

⁶⁰ Il linguaggio matematico è quello necessario e corretto per la spiegazione di un contenuto. L'aspetto intuitivo e personale della visualizzabilità porta colui che riceve la spiegazione e costruire inevitabilmente una propria immagine del fenomeno. Dal punto di vista didattico e comunicativo, tale costruzione andrebbe almeno guidata e non sottovalutata per una corretta comprensione.

mentale. Immagino che non possa evitare di avere immagini mentali. Se qualcuno parla di un elettrone io non penso di vedere l'equazione di Schrödinger. Ognuno immagina qualcosa; è un punto in movimento. Deve esserci una qualche specie di immagine.

Tutto questo lavoro [sulla QED dal 1947 al 1950] fu motivato, penso, da idee fisiche e in qualche senso filosofiche su come una teoria debba essere costruita. Ma da quel l'impeto fisico iniziale – che in un certo senso è visuale, ma certamente non nel modo elaborato di Feynman – è tradotto in matematica, in cui la matematica tenta di simulare le idee fisiche.

A prima vista, sembra che il l'approccio di Schwinger sia simile a quello di Feynman. Entrambi ritengono che la matematica sia un linguaggio universale con cui esprimere e spiegare idee già esplorate nella propria mente. Egli rifiuta l'etichetta del formalista, benché chi lo circonda lo vede come tale. Ciò significa che la differenza con Feynman si esplicita proprio nell'atto di comunicazione esterna delle idee, mentre i processi interni di visualizzazione sono per lo meno simili.

Nella seconda parte dell'intervista, Schwinger accenna un'epistemologia riguardo la costruzione di una teoria, ma non sembra avere lo stesso approccio filosofico che caratterizzò lo scontro fra i due formalismo protagonisti della fisica degli anni '20.

In ogni caso, come osserva De Witt (Schweber, 1994, p. 368), Schwinger non citò mai Feynman o Dyson nel corso delle sue lezioni.



Figura 2.3 Tomonaga, Schwinger e Feynman. Foto dall'archivio della Fondazione Nobel.

2.5 Le obiezioni alla visualizzabilità dei diagrammi di Feynman

L'indagine epistemologica che coinvolge i diagrammi di Feynman arriva al quesito se essi possano essere anche delle immagini ad un certo livello rappresentative dei reali fenomeni fisici, ovvero se essi permettono di visualizzare cosa stia effettivamente accadendo. Meynell (Meynell, 2008) sostiene che sì, i diagrammi posseggono queste capacità di rappresentazione e argomenta le motivazioni a sostegno di ciò; l'esposizione dell'autrice si articola su due livelli che si riferiscono a due particolari obiezioni. La prima di esse afferma che i diagrammi di Feynman non possano essere delle rappresentazioni realistiche poiché non è possibile rappresentare qualcosa che non è visibile. La seconda obiezione tira le fila a partire dal Principio di Indeterminazione di Heisenberg, sostenendo come non sia possibile rappresentare con una linea il percorso di una particella.

2.5.1 Visualizzare l'inosservabile

La prima obiezione emerge da una considerazione di stampo realista riguardo i fenomeni descrivibili tramite i diagrammi di Feynman. Una rappresentazione può essere definita come un'immagine illusoria che faccia credere di stare osservando il vero oggetto. In ambito microscopico è però impossibile osservare elettroni o fotoni. Questa interpretazione ingenua viene facilmente superata dal fatto che sia possibile creare, o semplicemente osservare, immagini di qualsiasi tipo nonostante ciò che venga rappresentato sia falso o inesistente. Dal leggendario unicorno all'immagine delle superfici di altri pianeti, la rappresentazione di qualcosa di sconosciuto è sempre possibile proprio perché si tratta di rappresentare qualcosa tramite *altro*, come immagini complete o semplici simboli.

Questa obiezione, a prima vista banale, viene talvolta utilizzata e discuterla è utile per fornire una spiegazione di come gli oggetti che sfuggono alle nostre percezioni possano essere immaginati, ricordando sempre che le rappresentazioni scientifiche e gli effettivi fenomeni non debbano essere confusi.

Secondo Meynell, una risposta completa a questa obiezione nasce dal chiedersi prima di tutto cosa renda tale un'immagine. I diagrammi di Feynman sono a malapena dei segni e delle linee su un foglio, eppure acquisiscono un potere rappresentativo notevole da ricercare nella teoria di riferimento, l'elettrodinamica quantistica, e nella mente e

nelle capacità di chi osserva. Secondo Walton⁶¹, le rappresentazioni agiscono come suggerimenti per l'immaginazione all'interno di un sistema di regole, chiamate "principi di generazione" dall'autore, da intendersi in senso ampio e come una combinazione di aspetti psicologici, percettivi, abitudinali e convenzionali. Tale sistema di regole nasce inoltre dal grado di analogia fra rappresentazione e oggetto rappresentato. Nel caso dei diagrammi di Feynman, è possibile ottenere una descrizione visualizzabile e parziale dei fenomeni quantistici nel momento in cui il funzionamento di tale immagine si avvicina al modo in cui effettivamente è possibile "osservare" dei fenomeni quantistici reali. Le lastre fotografiche delle camere a nebbia e le loro ricostruzioni forniscono l'analogia sufficiente per la costruzione di rappresentazioni secondo determinate regole condivise. Queste immagini così costruite sono capaci di stimolare suggerimenti visuali efficaci per la mente di chi osserva i diagrammi di Feynman.

Meynell individua nelle parole di Feynman l'idea che il potere rappresentativo dei suoi diagrammi sia quelli di stimolare la creazione di immagini nel lettore. Riferito alla seguente immagine, Feynman disse:

Nell'approssimazione della teoria relativistica classica la creazione di una coppia elettronica (elettrone A, positrone B) può essere rappresentata dall'inizio di due linee di universo dal punto di creazione 1. La linea di universo del positrone continuerà finché non annichilerà un elettrone, C, nel punto 2. Tra i tempi t_1 e t_2 vi sono dunque tre linee di universo, prima e dopo solo una. Tuttavia, le linee di universo di C, B e A insieme formano una linea continua anche se la parte del positrone B è diretta in direzione inversa nel tempo. Seguire la carica invece che le particelle corrisponde a considerare questa linea di universo continua come un intero invece che divisa in parti. È come se un bombardiere volando basso sopra una strada improvvisamente veda tre strade ed è solo quando due di esse si uniscono e scompaiono di nuovo che capisce che stava semplicemente sorvolando un lungo torna indietro in una singola strada. (Feynman, 1949, p. 749)

⁶¹ Walton, K. 1990. *Mimesis as make-believe: On the foundations of the representational arts*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

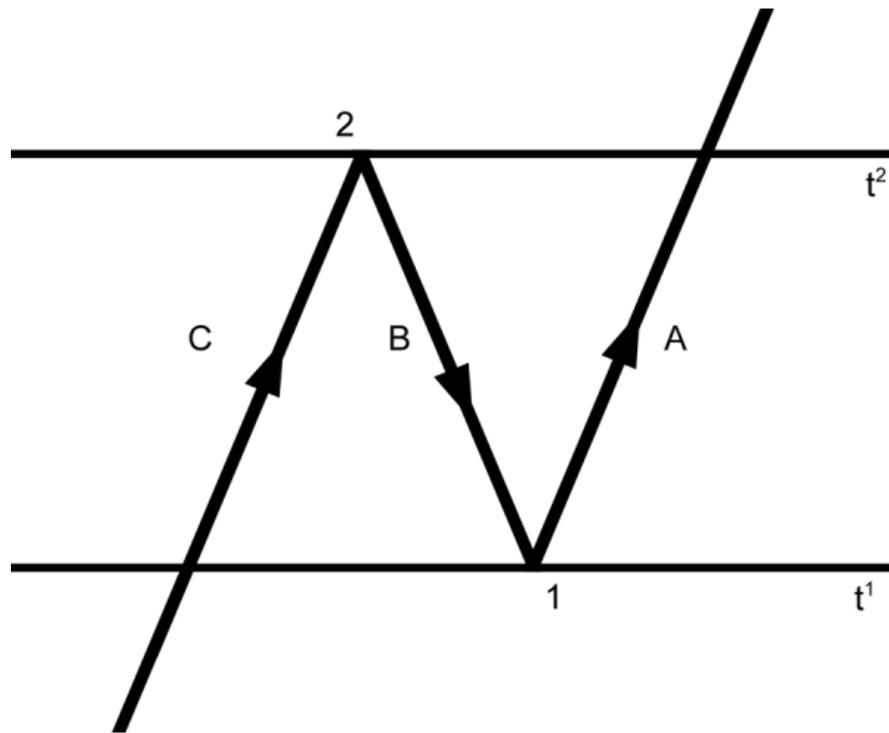


Figura 2.4.

Per comprendere l'analogia del bombardiere, l'immagine va osservata seguendo la direzione di avanzamento verticale del tempo (come indicato dalla disposizione dei simboli t_1 e t_2). Feynman chiaramente immaginava il mondo dell'elettrodinamica quantistica e cercava di trasmettere tali immagini, o suggerimenti, per far sì che chi l'ascoltasse fosse capace di costruire un'immagine dei fenomeni. Meynell individua, inoltre, l'utilizzo di una tecnica di rappresentazione e un linguaggio simile a quello dei diagrammi di Minkowski. In questo modo, Feynman si affida a principi generatori già consolidati nella costruzione e nella lettura di immagini schematiche, ma reinventandoli in un suo personale stile per la descrizione dell'elettrodinamica quantistica.

2.5.2 Rappresentare l'incertezza

Questa obiezione si focalizza sull'incompatibilità tra i diagrammi di Feynman e il principio di indeterminazione di Heisenberg. In particolare, critica la possibilità che i diagrammi rappresentino particelle con posizione e quantità di moto definiti, e quindi precise traiettorie spazio-temporali.

Come già detto, i diagrammi di Feynman non corrispondono a definizioni o a rappresentazioni *esatta* del fenomeno. Inoltre, sebbene Feynman sembri rappresentare i fotoni come particelle, non è implicito nell'utilizzo dei diagrammi una visione

corpuscolare dei fenomeni fisici che possa violare il principio di incertezza. Le caratteristiche linee derivano dall'analogia con i mezzi di indagine effettivi, come le camere a nebbia, e le rappresentazioni abituali, come i diagrammi di Minkowski. Somiglianza necessaria per la costruzione di una chiave di lettura implicita, intuitiva e flessibile.

Nell'articolo *The Theory of Positrons*, Feynman presenta una coppia di immagini che illustrano lo stesso fenomeno di scattering di un elettrone dal punto di vista sia corpuscolare che ondulatorio (Meynell, 2008, p. 53).

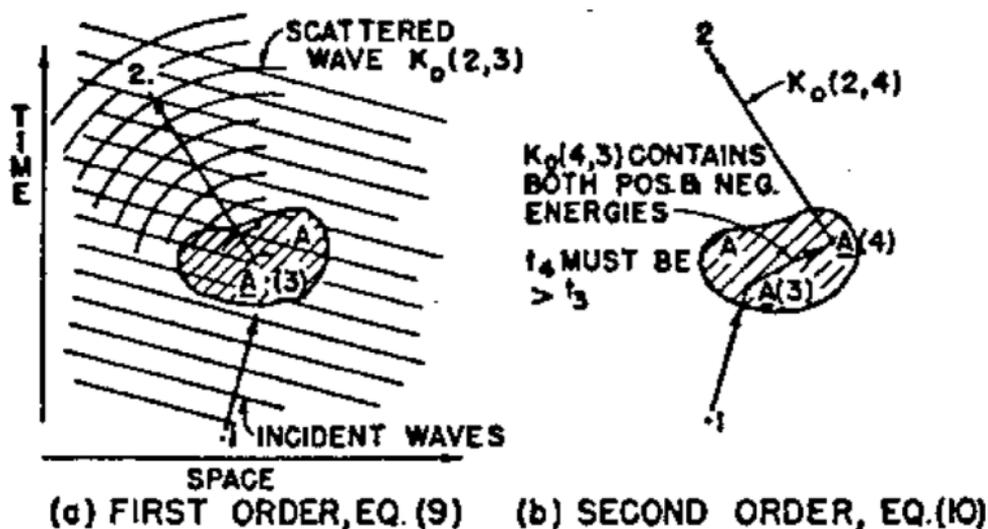


Figura 2.5 Due diverse spiegazioni, ondulatoria e corpuscolare per lo stesso fenomeno fisico.

Ciò è sufficiente per escludere un presunto intento ontologico riguardo la verità fisica del fenomeno. Inoltre, ciò dimostra la flessibilità con cui i metodi utilizzati dai diagrammi possono mirare a suggerire immagini al lettore. Il fatto che le rappresentazioni possano favorire diverse descrizioni rafforza inoltre l'idea che tali diagrammi non nascano con l'intento di riprodurre perfettamente i fenomeni fisici, ma solo, appunto, di rappresentare. Il principio di indeterminazione era sicuramente già compreso e assimilato dai fisici contemporanei di Feynman, non vi è quindi motivo di pensare che la rappresentazione di una traiettoria fosse intesa come un'esplicita violazione del principio. Una volta note le regole di creazione e lettura delle immagini, esiste un ampio spettro di possibili rappresentazioni del mondo microscopico.

La flessibilità dei diagrammi di Feynman appartiene tanto alla creazione quanto alla lettura. È possibile notare questi aspetti dall'analisi dello sviluppo storico dei diagrammi e dal fatto che gli studiosi sovietici, privi di quel confronto costruttivo con i colleghi

occidentali, furono capaci di padroneggiare il formalismo di Dyson ma non i diagrammi di Feynman. Come visto prima, infatti, entrambi i processi richiedono un particolare “addestramento”, o un’acquisizione di abilità specifiche, che includono le analogie necessarie tra simboli e significato fisico dei fenomeni. Risulta notevole come, malgrado la grande flessibilità e i diversi usi, i diagrammi di Feynman siano rimasti fondamentalmente gli stessi, immediatamente riconoscibili come strumenti di indagine e comunicazione scientifica.

2.6 Costruzione e uso della visualizzabilità in QED di Feynman

La celebre opera conosciuta come QED raccoglie una serie di quattro seminari divulgativi tenuti da Richard Feynman e registrati e trascritti da Ralph Leighton. Nella terza giornata, l’argomento esposto è la teoria quantistica riguardante gli elettroni. In maniera chiara e semplice e riferendosi a un pubblico di non fisici, molti dei quali avevano perso le lezioni precedenti, Feynman discute le proprietà microscopiche più avanzate che erano state scoperte fino ad allora.

Nella sua esposizione delle regole quantistiche, come il principio di sovrapposizione e il significato di ampiezza di probabilità per un evento rappresentato da un vettore, Feynman insiste molto sulla sua visione filosofica per cui sia impossibile capire davvero il funzionamento della Natura. Finché la teoria e i risultati degli esperimenti concordano, ciò significa che la nostra descrizione di cosa stia accadendo funziona, senza però avere una spiegazione del perché sia così e non diversamente. In questo modo, il pubblico non si ferma al primo blocco cognitivo con cui naturalmente si scontra nel momento di cercare di capire quale sia il nesso fra la lunghezza di un vettore, una probabilità per un evento e l’effettiva realizzazione di un fenomeno fisico.

Ribadito lo spirito epistemologico necessario per la partecipazione alle sue lezioni, Feynman espone il classico esperimento della doppia fenditura attraversata da un fascio di fotoni monocromatici e la seguente figura di interferenza che si osserva. La visualizzabilità di questo esperimento mentale non incontra alcuna difficoltà con la teoria esplicativa del fenomeno, una volta nota questa. L’interpretazione della luce come onda non è estranea ai più, può essere verificata e può portare alla costruzione delle immagini mentali in maniera intuitiva. Nel momento in cui si incontra il “paradosso” della

differenza di risultati tra l'aver posto o meno dei rivelatori di particelle, in questo caso di fotoni, nelle fenditure, Feynman insiste sulla rappresentazione rigorosa delle probabilità per eventi fisici tramite un insieme di “freccette” necessaria per “definire con chiarezza l'evento completo” (Feynman, 1985, p. 105). I nuovi casi possibili sono quindi descritti da diversi sistemi di eventi iniziali, finali e intermedi, e quindi da percorsi e ampiezze di probabilità unici per ogni configurazione del sistema. In questo modo, l'immaginazione di chi segue viene spinta non a seguire con gli *occhi della mente* il percorso di un fotone che dalla sorgente attraversa la fenditura e colpisce lo schermo, ma a visualizzare un insieme di simboli matematici dal significato fisico specifico, simboli familiari ma visti secondo una nuova luce o interpretazione, che può comunque essere appresa. Secondo la filosofia di Feynman, quindi, si studia e si comprende la descrizione del fenomeno fisico, come si comportano gli oggetti, e non la realtà fisica fondamentale intesa come la natura quantistica del perché si comportano così.

Un qualsiasi insegnante avrebbe potuto fornire la descrizione dell'intero esperimento e dei fenomeni quantistici nei termini del formalismo della fisica teorica come integrali e funzioni d'onda. L'aspetto divulgativo dell'evento e l'abilità di Feynman hanno invece optato per una descrizione più intuitiva, che fosse facile da comprendere ma che nel frattempo non fornisse informazioni errate. Si ritrova qui una forma di visualizzabilità simile a quella matematica prima descritta, dove diventa necessario visualizzare il formalismo per capire cosa la teoria voglia dire. Il ricorso a questo tipo di descrizione, che porta lo spettatore lontano dal seguire il percorso classico dei fotoni durante l'esperimento, è necessario in quanto il fenomeno in questione, di tipo quantistico, verrebbe visualizzato secondo delle regole classiche le cui conseguenze non sarebbero poi concordi con il vero esperimento. La visualizzabilità in questo caso va quindi guidata a seguire determinate regole relative al tipo di problema da descrivere. È possibile notare una stretta somiglianza con l'utilizzo dei diagrammi di Feynman, in cui una serie di simboli devono essere filtrati attraverso una particolare chiave di lettura.

Subito dopo, Feynman introduce l'elettrone secondo una simmetria descrittiva rispetto al fotone basata su proprietà spazio-temporali: in entrambi i casi, questi elementi si comportano come particelle su grandi distanze, nelle quali si muovono in linea retta, mentre assumono un comportamento ondulatorio per spazi esigui. La differenza fra le due particelle sta nel definire cosa significhi *grandi distanza* e *spazi esigui*. Per i fotoni,

come è noto, sono necessarie fenditure di pochi millimetri per poter osservare i fenomeni di interferenza, mentre per gli elettroni Feynman tira in gioco le dimensioni atomiche: per descrivere un elettrone all'interno di un atomo è necessario il linguaggio delle probabilità come frecce, o vettori, da sommare fra loro.

Ecco, dunque, i tre eventi elementari di base costituenti tutti i fenomeni in cui intervengono luce ed elettroni.

1: un fotone si propaga da un punto a un altro.

2: un elettrone si propaga da un punto a un altro.

3: un elettrone emette o assorbe un fotone.

A ognuno di questi eventi elementari corrisponde un'ampiezza (una freccia) che può essere determinata in base a precise regole. Discuterò tra un istante queste leggi che permettono di costruire il mondo intero (esclusi, come al solito, i fenomeni nucleari e gravitazionali).

Debbo premettere che la scena su cui si svolgono i fatti non è solo lo spazio, ma è lo spazio e il tempo. [...] Sebbene lo spazio sia tridimensionale, nel disegnare i grafici⁶² considererò solo una dimensione: la collocazione spaziale di un oggetto verrà riportata sull'asse orizzontale e quella temporale sull'asse verticale. (Feynman, 1985, p. 110-111)⁶³

L'estratto mostra, in poche parole, quanto discusso fino a ora. Feynman cerca di semplificare la descrizione includendo pochi elementi fondamentali, solo tre eventi sono sufficienti per descrivere il mondo intero, così che sono tre tipologie di frecce saranno necessarie. Le regole per la loro somma sono già state chiarite al pubblico. Infine, lo scenario viene cambiato eliminando due dimensioni spaziali e aggiungendo quella temporale. Nelle descrizioni precedenti Feynman non aveva avuto bisogno di specificare di trovarsi in uno spazio tridimensionale, in quanto tale informazione viene ricevuta automaticamente se non viene precisato altrimenti. Questa volta, diventa necessario assegnare un significato specifico agli elementi del grafico, anticipando però l'idea che si tratti di solo una rappresentazione e che siamo coscienti di ciò. La frase "sebbene lo

⁶² Si riferisce proprio a quei grafici che diverranno noti come diagrammi di Feynman.

⁶³ Edizione Italiana Adelphi, trad. Francesco Nicodemi.

spazio sia tridimensionale” mette subito in chiaro la differenza fra descrizione e realtà e permette a chi ascolta di accettare un’immagine a prima vista errata poiché artificiale.

Definito il palcoscenico spazio-temporale, Feynman parte dall’analizzare l’evento più semplice del moto di un fotone, o di un elettrone, da un punto a un altro e costruisce casi via via più complessi includendo anche la possibilità di interazione fra le particelle, ovvero emissione o assorbimento di un fotone da parte di un elettrone raggruppati nel termine “scambio di un fotone”. In questo modo, dal semplice al complesso, lo scenario e le caratteristiche descrittive non cambiano.

All’aumentare del numero di possibili cammini e interazioni, Feynman si concentra su un valore j che descrive l’ampiezza di probabilità per una specifica interazione. Essa diventa sempre più piccola al crescere del numero di interazioni presenti in un insieme di eventi. Questo elemento j , una probabilità, è l’unico aspetto non visualizzabile della descrizione: quell’elemento che deve essere accettato così come è a cui il pubblico di Feynman è stato preparato. Esso viene definito dallo stesso Feynman “solo un numero”. L’autore continua poi a fornire esempi di descrizioni spazio-temporali per fenomeni microscopici come l’assorbimento e l’emissione di un fotone da parte di un elettrone appartenente ad un atomo di idrogeno. Questo esempio, semplice ma più concreto, non comporta più alcuna difficoltà nel poter immaginare un elettrone diffuso attorno al nucleo. Allo stesso modo viene quindi affrontato il problema dell’interazione della luce con la materia come interazione tra fotoni ed elettroni e il momento magnetico dell’elettrone.

Nell’affrontare gli ultimi due problemi, Feynman non discute più di spazio e tempo specificando i significati delle rappresentazioni. È qui possibile vedere il loro ruolo di *cornici* delle descrizioni: una volta fissati i concetti, i simboli e le immagini, essi formano il supporto entro cui visualizzare l’evento fisico e, come un palcoscenico, rimangono di base e di sfondo, senza bisogno di doverli attenzionare. La visualizzabilità spazio-temporale permane una volta chiarito il *dove* e il *quando*.

Con una sfumatura diversa, invece, Feynman continua ad accennare le interpretazioni delle frecce e dei vettori come ampiezze di probabilità e le loro caratteristiche, come la proprietà della somma. La visualizzabilità matematica richiede un continuo collegamento fra significato e significante che richiede di essere appreso e assimilato per poter diventare intuitivo. Si potrebbe parlare in questo caso di visualizzabilità

stimolata o aiutata da un sistema di concetti e regole creati appositamente per ottenere l'immagine visualizzabile. Questo aspetto non ne sminuisce comunque l'importanza.

La visualizzabilità classica risulta essere intuitiva perché fondata sullo spazio tridimensionale e sullo scorrere del tempo, ovvero su ciò che la nostra mente percepisce in ogni istante della nostra vita. Essa è sempre capace di fornire immagini mentali, che però possono risultare errate o incomplete. La visualizzabilità matematica, invece, è quella visualizzabilità addestrata appositamente per costruire immagini mentali e astratte intenzionalmente parziali con l'obiettivo di rappresentare i fenomeni fisici tramite un insieme di simboli e regole.

In QED, un'opera divulgativa, Feynman usa abilmente entrambi i tipi di visualizzabilità. Tuttavia, è possibile trovare in essa le caratteristiche che portarono, anni prima, alla creazione dei diagrammi di Feynman: la cornice spazio-temporale, il significato fisico di simboli e termini matematici e la necessità di acquisire la competenza per il corretto utilizzo dello strumento. Proprio per il loro carattere intuitivo e immediato, questo approccio si è mostrato efficace tanto nella divulgazione quanto nelle realizzazioni di strumenti teorici per lo sviluppo dell'elettrodinamica quantistica.

2.7 La visualizzabilità del fine '900

Il panorama teorico attuale prevede che tre delle quattro forze fondamentali possano essere descritte da teorie di campo o, in generale, dalla Meccanica Quantistica. La quarta forza, la gravità, trova invece la sua migliore descrizione nella Relatività Generale di Einstein e quindi su una struttura teorica più vicina alla meccanica classica. Non sorprende che sia ragionevole aspettarsi una teoria quantistica di campo anche per la gravità, considerando inoltre che la teoria di Einstein incontra dei limiti descritti in particolari contesti fisici estremi, come le vicinanze e l'interno di un buco nero.

Le attuali candidate per una possibile teoria di gravità quantistica sono la teoria delle stringhe e la *loop quantum gravity* (LQG). Gli aspetti di quantizzazione dello spazio dovrebbero apparire a grandezze estremamente ridotte, dell'ordine della lunghezza di Planck, ovvero 10^{-35} metri. Queste dimensioni e l'energia necessaria a raggiungerle sono impossibili da ottenere con la tecnologia attuale e ciò comporta che il dibattito e lo

scontro fra teorie rivali avviene soprattutto sul piano formale, filosofico ed epistemologico.

A questo proposito, non è banale individuare una delle differenze fondamentali fra la teoria delle stringhe e la LQG nell'indipendenza di quest'ultima da uno sfondo descrittivo spazio-temporale. La LQG, infatti, nasce come tentativo di combinare la Relatività Generale e la Meccanica Quantistica, dove la prima viene definita come la descrizione teorica e fisica dello spazio-tempo stesso, e non come un qualcosa che avviene all'interno dello spazio-tempo. Sfruttando questa differenza, la gravità quantistica della LQG intende essere la descrizione del comportamento quantistico dello spazio-tempo.

Carlo Rovelli, uno dei massimi esponenti per quanto riguarda la LQG, discute il pensiero che sta alla base della teoria nelle sue opere divulgative. Usando il semplice esempio di una corda, discute il problema del concetto di continuità dello spazio che viene messo in discussione da una possibile quantizzazione:

Esistono davvero cordicelle arbitrariamente piccole? Possiamo davvero tagliare una corda un numero *arbitrariamente grande* di volte? Esistono davvero tempi infinitamente piccoli? È questo il problema con cui dovrà fare i conti la gravità quantistica. (Rovelli, 2014, p. 27)

Proprio queste opere, di carattere meno accademico e ideate per essere intrinsecamente più intuitive, disegnano spesso un percorso di esempi che dal macroscopico, come una corda, giungono a discutere l'epistemologia di base dei problemi di teorie complesse. Una matematica corretta è sicuramente necessaria nella costruzione di una teoria efficace, ma non è mai stato l'aspetto più importante, in quanto è noto come sia possibile descrivere realtà prive di significato fisico con essa.

Secondo Carlo Rovelli, la LQG, in quanto erede della Relatività Generale, perpetua un particolare cammino fisico che vede l'intuitività fisica come un elemento fondamentale per il progresso della conoscenza umana. Storicamente, com'è noto, vi furono diversi fisici e matematici contemporanei di Einstein che proposero delle equazioni per la Relatività Generale prima di quella corretta. Tra questi, Hilbert fu il rivale più ostico per il padre della relatività ma, nonostante la sua maestria matematica, perse la gara. Rovelli sostiene che la differenza fondamentale fra le due figure, che portò Einstein a "vincere",

va a trovarsi nella capacità di immaginare, e quindi visualizzare, il significato fisico della teoria.

[...] Einstein aveva una capacità unica di *immaginare* come il mondo potesse essere fatto, di “vederlo” nella sua mente. Le equazioni per lui venivano dopo; erano il linguaggio per rendere concreta la sua capacità di immaginare la realtà. La teoria della relatività generale, per Einstein, non è un insieme di equazioni: è un’immagine mentale del mondo, poi faticosamente tradotta in equazioni. L’idea della teoria è semplicemente che lo spaziotempo si curva. Se lo spaziotempo fisico avesse solo due dimensioni, e noi vivessimo su un piano, sarebbe facile immaginare che cosa vuol dire “lo spazio fisico si curva”. [...] Immaginare uno spazio a quattro dimensioni che si incurva è più complicato, perché nella nostra intuizione comune non abbiamo l’intuizione di uno “spazio più grande” al cui interno si possa incurvare lo spaziotempo fisico. (Rovelli, *La realtà non è come ci appare*, 2014)

La visualizzabilità appartiene dunque a entrambi i pilastri delle moderne teorie scientifiche, è quindi probabile, ma non sicuro, che tale carattere sia stato ereditato, seppur in maniera diversa. Nello specifico, dalla Meccanica Quantistica e dai diagrammi di Feynman viene ereditata la visualizzabilità di una descrizione spazio-temporale probabilistica per i fenomeni microscopici. La stessa descrizione si evolve poi grazie alla Relatività Generale intesa come studio *dello* spazio-tempo, sposta il focus sulla visualizzabilità ad un livello di astrazione maggiore che riguarda il palcoscenico stesso in cui avviene il fenomeno. Sarà ora lo spazio-tempo a evolversi in maniera probabilistica.

Risulta quindi fondamentale l’analisi della visualizzabilità di una moderna teoria quantistica per comprendere l’attuale statuto epistemologico di questa caratteristica, che sembra oggi invece scomparire a favore di una visione del mondo priva di quei filtri mentali che, fin dall’antichità, furono ritenuti necessari per far sì che la nostra mente possa comprendere la realtà che ci circonda.

2.8 Loop Quantum Gravity

La LQG nasce dal lavoro di riscrittura della Relatività Generale da parte di Ashtekar nel 1986 secondo un formalismo più vicino alla fisica classica. Secondo questi risultati, una riscrittura dell'equazione di Wheeler-DeWitt, che già tentava di quantizzare il campo gravitazionale combinando Meccanica Quantistica e Relatività Generale, può ammettere soluzioni di tipo *loop*. Questo nuovo risultato portò Rovelli e Smolin a definire un'intera teoria non perturbativa⁶⁴ e indipendente da uno spazio-tempo avente una propria geometria definita a priori.

Ancora una volta, ciò è possibile poiché la Relatività Generale permette di studiare ciò che accade allo spazio-tempo, e non “sullo” spazio-tempo. Questa differenza viene esplicitata matematicamente dal fatto che le trasformazioni di simmetria della Relatività Generale sono diffeomorfismi; questa invarianza viene spesso fraintesa come l'invarianza delle predizioni fisiche di una teoria per trasformazioni di coordinate arbitrarie. Ciò è errato poiché questa semplice definizione è vera per ogni teoria fisica oggi riconosciuta come tale. Il diffeomorfismo è una funzione fra due varietà differenziabili⁶⁵ che può essere intuitivamente visualizzata come l'atto di trascinare o trasportare tutti i campi fisici da una varietà differenziabile a un'altra che mantiene lo stesso sistema di coordinate. Questa trasformazione di simmetria si basa quindi sulla forma dello spazio-tempo, e non sulla geometria dello stesso che determina e influenza quindi gli altri fenomeni fisici. Inoltre, in queste trasformazioni vengono preservate le “coincidenze” fra i valori che il campo gravitazionale assume in una determinata posizione e il valore che il campo di materia assume nello stesso posto. Da ciò si forma la nozione di materia posizionata rispetto al campo gravitazionale intesa, così come lo stesso Einstein la formulò, come l'idea che ogni massa sia posizionata rispetto a qualcos'altro e non rispetto alla varietà spazio-temporale. Intuitivamente, ciò significa che un singolo oggetto massivo può essere spostato lungo la varietà differenziabile che costituisce il campo gravitazionale

⁶⁴ Una teoria perturbativa può essere intesa come insieme di approssimazioni che cerca di studiare sistemi di cui non si conosce la soluzione tramite l'aggiunta di perturbazioni sufficientemente piccole a partire da un problema di cui si conosca già la soluzione. L'importanza di una teoria non perturbativa per le moderne teorie di gravità quantistica sta nell'indipendenza dal “già noto” del problema di partenza da perturbare, che richiederebbe forzatamente uno sfondo spazio-temporale.

⁶⁵ Una varietà differenziabile è una generalizzazione del concetto di curva e superficie differenziabile in dimensione arbitraria.

senza sostanzialmente modificare la descrizione del sistema. Il posizionamento di un secondo oggetto viene quindi descritto in termini di modifica che il campo gravitazione subisce per la presenza di due oggetti e per la loro posizione reciproca, e tale modifica determina l'idea di posizionamento di un corpo rispetto a un altro.

In termini più semplici, Carlo Rovelli scrive nel suo libro del 2014, *La realtà non è come ci appare*⁶⁶:

Einstein raccoglie dunque non uno, ma due problemi. Primo: come descrivere il campo gravitazionale? Secondo: che cos'è lo spazio di Newton? Ed ecco lo straordinario colpo di genio di Einstein, uno dei più grandi colpi d'ala nel pensiero dell'umanità: se il campo gravitazionale fosse proprio lo spazio di Newton, che ci appare così misterioso? Se lo spazio di Newton non fosse altro che il campo gravitazionale? Questa idea, semplice, bellissima, folgorante, è la teoria della relatività generale.

Uno dei primi passi per la LQG è quindi quello di identificare lo spazio-tempo come quel campo gravitazione da quantizzare e questa operazione si traduce nell'individuazione del quanto di spazio. In questa visione, la teoria descrive la gravità non più come una forza ma come una proprietà geometrica dello spazio-tempo: non esistono quindi due corpi che si attraggono secondo la legge dell'inverso del quadrato, ma una particolare modifica della struttura spazio-temporale dovuta alla presenza di massa. Tale modifica influenza eventuali altri corpi poiché anch'essi si ritrovano "sopra" un palcoscenico dinamico. Matematicamente, spazio e tempo vengono quantizzati nella stessa maniera in vengono quantizzati energia e impulso come in meccanica classica.

La struttura dello spazio-tempo viene descritta come una fitta maglia di *loop*, anelli, che si intersecano alla scala della lunghezza di Plank, ovvero circa 10^{-35} metri. Scale minori perdono di significato e ciò può essere interpretato come una preferenza dello stesso spazio-tempo a mantenere una dimensione minima.

⁶⁶ Vedi Bibliografia.

2.9 Background Independence Theory

La *background independence*, traducibile come indipendenza dallo sfondo, è una condizione in fisica teorica che richiede l'esplicita indipendenza da parte delle equazioni della teoria dalla forma che lo spazio-tempo assume all'interno della teoria stessa, e dal valore che a loro volta i campi assumono sullo spazio-tempo. In particolare, ciò significa che la teoria può essere priva di un particolare e specifico sistema di coordinate.

La visualizzabilità di un fenomeno fisico è strettamente collegata alla descrizione del fenomeno stesso. Lo spazio-tempo non è solo un palcoscenico in cui l'evento avviene, ma anche l'insieme di criteri con cui descrivere entità ed eventi. Gli scontri epistemologici sulla visualizzabilità di una teoria si riconducevano alla possibilità di ottenere l'immagine, almeno mentale, di un oggetto collocato in un dato spazio che si possa inoltre evolvere secondo il normale fluire del tempo. La Meccanica Quantistica, definita non visualizzabile da Heisenberg, manteneva lo stato di dipendenza da uno sfondo a sua volta riconducibile ai criteri di spazio e tempo.

In prima approssimazione, una teoria indipendente dallo sfondo non è automaticamente non visualizzabile. Come visto, la visualizzabilità non è una caratteristica *dura*, che specifichi esattamente i limiti e le potenzialità di una teoria. Se quindi una teoria risulta indipendente dal sistema di coordinate utilizzate, ciò non significa che non sia possibile utilizzare un particolare sistema per ottenere un'immagine particolare della teoria. Tale immagine sarà sicuramente parziale e incompleta, mostrando solo un aspetto della teoria così come Heisenberg riteneva accadesse per la sua Meccanica Quantistica descritta in termini spazio-temporali. Ciò che conta è però l'idea che possa esistere un sistema di coordinate, intesa come una possibile descrizione, un palcoscenico che faccia da sfondo agli eventi fisici, con cui si ottenga un risultato che renda intuitivamente comprensibile la teoria.

2.10 La quantizzazione dello spazio

È stato detto che le equazioni della QLG ammettono soluzioni di tipo *loop* e che lo spazio può essere rappresentato dal concatenamento di tali strutture ad anelli. Una lettura più approfondita delle interpretazioni della teoria permette di specificare che lo

spazio non è composto dai *loop*, ma esso deriva dalle zone di sovrapposizione e intersezione degli anelli chiamate *nodi*⁶⁷.

Rovelli (pag 141) offre un ottimo paragone per iniziare a chiarire il concetto. In elettrodinamica classica, le linee di Faraday sono le linee di campo immaginarie che riempiono lo spazio e che veicolano le forze elettromagnetiche. Esse sono soluzioni delle equazioni della teoria, possono essere immaginate come una ragnatela di linee chiuse e possono essere *viste* con il classico esperimento che include un foglio, un magnete e della limatura di ferro. Matematicamente parlando, le soluzioni di tipo *loop* descrivono linee chiuse dello stesso tipo delle linee di Faraday. Le linee di forza dei campi elettromagnetici sono continue e infinite, ma se si implementano il concetto di quantizzazione per ottenere un campo quantistico si ottiene una vera e propria ragnatela di soluzioni finite.

Il campo gravitazionale risulta essere la fitta maglia di singoli anelli di numero e dimensione finita. La stessa struttura può essere descritta come un insieme di *nodi* e *link*, dove quest'ultimi sono i filamenti che collegano i diversi nodi, e l'insieme di entrambi questi elementi forma un *grafo*.

Dai risultati matematici risulta che lo spazio non possiede volume a meno che non ci siano dei nodi e ciò porta all'interpretazione secondo la quale siano gli stessi nodi i quanti di spazio ricercati, ovvero lo spazio fuoriesce, o deriva, dall'intersezione dei *loop*.

La descrizione separa qui i concetti di spazio e campo gravitazionale: il campo gravitazione è composto dalle soluzioni di tipo *loop*, dagli anelli; lo spazio deriva dall'unità quantizzata del *nodo* e da esso è poi possibile derivare aree e volumi. Campo gravitazionale e spazio non sono più esattamente la stessa cosa, ma sono strettamente collegati e non esiste il secondo senza il primo, ha quindi ancora senso sostenere che lo studio del campo gravitazione sia lo studio dello spazio.

2.10.1 Gli spettri di area e volume

In una teoria quantistica, ottenuta una quantizzazione, è possibile definire una funzione d'onda e uno spettro di soluzioni per la grandezza quantizzata. In effetti, la teoria

⁶⁷ Nei primi periodi la ricerca si concentrò sullo studio dei singoli *loop* per capire come da essi potesse generarsi lo spazio. I giovani Jorge Pullin e Jurek Lewandoski riuscirono a dimostrare che la risposta va ricercata nei nodi, ovvero dove gli anelli si "toccano". Secondo Carlo Rovelli, fu l'approccio intuitivo guidato da una matematica "libera" e da menti giovani a portare la ricerca verso la direzione giusta.

fornisce gli spettri di area e volume una volta che si riconosce lo spazio, o il campo gravitazionale, come variabile o quantità fisica⁶⁸.

Per visualizzare un'area o il volume risulta comodo avere in mente l'immagine del grafo come insieme di nodi e link. Due nodi adiacenti possono essere visti come due regioni separate da superfici che restituiscono il concetto di area⁶⁹, ognuna di queste superfici è attraversata da quel link che unisce i due nodi. Più link indicano che il nodo in analisi possiede più superfici di contatto con altri nodi, una per ogni link.

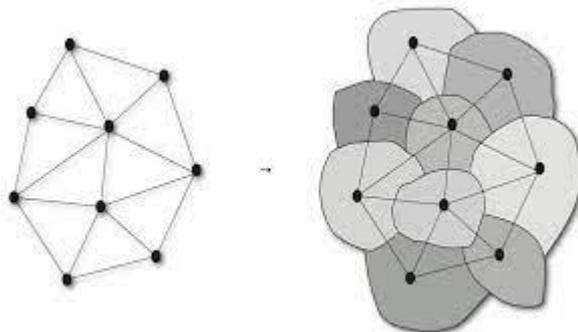


Figura 2.6 Grafo per una rete di spin e l'immagine "intuitiva" del quanto di spazio che rappresenta. (Rovelli, 2020)

Gli stati quantistici sono quindi rappresentati da due numeri, j_l e v_n , ovvero l' l -esimo link e l' n -esimo nodo. Il numero j entra nella formula per il calcolo dell'area:

$$A = 8\pi L_P^2 \sqrt{j(j+1)}$$

Dove L_P è la lunghezza di Planck e L_P^2 l'area di un quadrato che ha un lato lungo quanto la lunghezza di Planck. Il quanto di area è invece la moltiplicazione del fattore L_P^2 per i coefficienti precedenti che fuoriescono dalla derivazione matematica e vale circa 10^{-66} cm^2 . La quantizzazione risiede nella radice, in perfetta analogia formulare alle altre grandezze come il momento angolare. Il valore di j è semi-intero e per questo viene chiamato *spin*, sebbene non rappresenti alcuna proprietà riconducibile allo spin solitamente trattato in fisica o al momento angolare. Per chi ha già familiarità con le grandezze quantistiche, è facile riconoscere tutti gli aspetti di quantizzazione in una formula del genere.

⁶⁸ Il calcolo degli spettri di volume e area non è stato semplice e ha richiesto diversi anni per essere impostato e risolto. Il risultato fondamentale risiede nella solidità della dimostrazione, in quanto le ipotesi di partenza, le regole di quantizzazione e calcoli degli spettri di Dirac, risultavano già consolidate, mentre il risultato, la quantizzazione dello spazio e gli spettri di volume, erano già interpretate.

⁶⁹ Servono quindi almeno due nodi per ottenere un'area, è immediato il collegamento con l'idea delle due dimensioni ordinarie.

Il volume di uno spazio è strettamente collegato con il numero di nodi. Aggiungendo il numero di link, si ottiene il grafo che viene chiamato *spin network*, rete di spin. Questa struttura rappresenta uno stato quantistico dello spazio gravitazionale e quindi dello spazio composto da elementi discreti. Questa descrizione viene già usata per approssimazioni matematiche e si è dimostrata efficace, con la differenza che per la QLG essa va interpretata come una corretta descrizione dello spazio.

L'immagine di un grafo è decisamente spaziale e ritrae i nodi aventi posizioni particolari sia reciproche che assolute, ma secondo la teoria essi non *stanno* in nessun luogo ma *sono* essi stessi il luogo. La visualizzabilità del grafo deve essere accompagnata all'interpretazione dei simboli e delle immagini secondo le specifiche intenzioni della teoria: due nodi "vicini" sono collegati da un link e la vicinanza è espressa solo dalla connessione diretta dei due nodi. Un *loop*, un anello, è un insieme di link che collega più nodi e ritorna a quello di partenza.

2.11 Problema del tempo in Meccanica Quantistica

Nei primi anni del '900, Albert Einstein rivoluzionava i concetti di tempo e spazio con le sue teorie della Relatività Ristretta e con la Relatività Generale, per cui le due grandezze si fondevano in un'unica entità, lo spazio-tempo. Famose è la frase con cui Hermann Minkowski descrisse il cambiamento di paradigma.

«D'ora in poi lo spazio di per sé stesso o il tempo di per sé stesso sono condannati a svanire in pure ombre, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.» (Hermann Minkowski, 1908)

Per quanto riguarda il tempo, la rivoluzione riguardò soprattutto il cambiamento dell'idea di tempo come entità astratta che fluiva in maniera costante, ovvero il concetto di tempo assoluto che aveva regnato fin dai tempi di Newton.

La Meccanica Quantistica, invece, tornò indietro ad una concezione di tempo come puro parametro di evoluzione per un fenomeno fisico: il tempo t non è altro che un'etichetta da assegnare a un determinato momento, per differenzialo tra momenti adiacenti o lontani disposti comunque in un ordine regolare e fisso e per poter quindi ipotizzare e definire connessioni causali fra eventi.

Risulta quindi immediato notare un ulteriore campo di conflitto fra le due teorie principali non solo del Novecento, ma dei nostri tempi. La differenza concettuale fra le due concezioni di tempo è tanto fondamentale quanto ignorata dalla maggior parte di coloro che giornalmente studiano o lavorano con la fisica. Gli stessi studenti si ritrovano spesso a saltare da una teoria all'altra senza rendersi conto che l'intera struttura teorica, lo stesso palcoscenico su cui si costruiscono poi tutte le conseguenze della teoria, varia in maniera così profonda.

Il tempo in fisica classica, così come in Meccanica Quantistica, viene trattato come un parametro di sfondo, un componente dal quale dipendono i fenomeni fisici in studio ma esterno ai fenomeni stessi. Persino nell'interpretazione di Copenaghen, che ha visto modificare la concezione di spazio e quindi di posizione secondo le idee di Heisenberg, i possibili valori probabilistici di una qualsiasi misura sono dati in funzione del tempo t in cui la misura è stata effettuata; inoltre, secondo l'equazione di Schrödinger, la loro eventuale evoluzione avviene in maniera lineare in funzione del tempo. Entrambe le visioni, dunque, non sollevano il problema del tempo.

Sembra quasi che l'intero dibattito riguardo l'*Anschaulichkeit* sia stato alimentato più dalla possibilità o meno di immaginare nel solo spazio l'entità e gli eventi fisici, mentre l'evoluzione temporale lungo un "asse" omogeneo del tempo sia rimasto ai margini della discussione.

Come già detto, la Relatività Generale si presenta come una descrizione di ciò che avviene *allo* spazio-tempo, che diventa quindi un'entità dinamica di per sé e per cui la gravità rappresenta un fenomeno geometrico che descrive "i movimenti" dell'entità in studio individuando e definendo la dinamica.

In Meccanica Quantistica, invece, non esiste una vera e propria "dinamica" intesa come leggi del moto. Pensando agli elementi della teoria, essi sono le funzioni d'onda e gli osservabili associate a grandezze misurate. Le prime non hanno una dinamica evolutiva in quanto vengono annichilite dai vincoli dell'Hamiltoniana, mentre gli osservabili commutano con i vincoli stessi e sono quindi costanti.

La LQG risolve il problema del tempo modificando la dipendenza funzionale delle generiche funzioni ed equazioni appartenenti alla teoria. Il primo passo sta nel sostenere che il tempo *non esiste*, nel senso che la variabile t e il concetto di tempo a cui siamo abituati non sono altro che un utile strumento matematico, un'assunzione

riguardo un'entità fisica in realtà non misurabile né osservabile. Ciò che intendiamo e abbiamo sempre inteso come misura di tempo non è altro che il succedersi di uno o più eventi rispetto al succedersi di altri eventi, solitamente regolari. Un qualsiasi insieme di leggi del tipo $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$... diventa quindi un insieme di relazioni fra le stesse: $A(C)$, $B(A)$, $C(B)$... La realtà è composta da entità ed eventi fisici i quali, interagendo fra essi, creano l'illusione del tempo. In questo modo, si ottiene un "tempo" quantistico che emerge esso stesso dalla fisica dei fenomeni e non un parametro esterno con cui etichettare i fenomeni.

Ancora una volta, la grandezza *tempo* risulta essere un ottimo e utile strumento per la trattazione di fenomeni macroscopici, o in generale non problematici. Non è quindi un concetto da eliminare per la vita di tutti i giorni o nelle teorie precedenti.

2.12 Rappresentazione spazio-temporale

La caratteristica principale di una descrizione nello spazio-tempo consiste nel poter rappresentare il moto o il cambiamento di un sistema. Un pendolo che oscilla, un solido che ruota, ma anche un fiore che sboccia o un aeroplano in volo.

L'uso dei diagrammi di Minkowski nella teoria della Relatività ha già allenato le nostre menti a individuare nel tempo rappresentabile come una dimensione spaziale. Il risultato grafico di tale operazione richiede il sacrificio di una dimensione delle altre tre, e ciò rappresenta un ostacolo intrinseco imm modificabile. Nella versione più semplice di un diagramma di Minkowski, con l'asse x delle posizioni orizzontale e l'asse t del tempo verticale, lo scorrere del tempo è costituito da tutte le linee parallele all'asse x che rappresentano dunque gli istanti successivi (o precedenti). Ogni retta di questo tipo, orizzontale, ha una t fissa e include ogni x , e quindi descrive l'intero *universo*, o sistema, in un determinato istante. Allo stesso modo, ogni linea parallela all'asse temporale rappresenta un determinato punto fisso dello spazio in ogni tempo. Il piano descritto dall'insieme di tutti i punti è lo spazio-tempo.

Un qualsiasi movimento, l'unico cambiamento possibile per un sistema così semplice viene descritto da linee diagonali che vedono modificare fino a entrambe le variabili. La descrizione è simmetrica ed è possibile scambiare x e t senza perdere senso fisico, anche

se una specifica descrizione fisica potrebbe vedere modificata la forma della rappresentazione.

Aggiungendo una seconda dimensione spaziale si ottiene uno spazio-tempo tridimensionale. L'asse t del tempo può essere immaginato come un asse verticale uscente da un piano e, sopra quest'ultimo, è possibile rappresentare la posizione di uno o più oggetti ad ogni dato istante.

Il più semplice e abusato degli esempi ritrae due sfere, due palle, su un qualsiasi tipo di piano, come un campo di calcio o un tavolo da biliardo. Così come la sovrapposizione di infiniti piani restituisce un solido, il movimento delle due sfere viene descritto da un susseguirsi di istanti in cui la posizione bidimensionale degli oggetti vari va a formare uno spazio-tempo tridimensionale, uno "scatolone" di spazio-tempo.

Lo step successivo consisterebbe nella successione di un infinito numero di descrizioni tridimensionali della posizione, poste l'una dopo l'altra nella quarta dimensione spaziale. Tale immagine non è visualizzabile, ma può essere intuitivamente compresa con l'ausilio degli step precedenti a minor numero di dimensioni.

2.12.1 La simmetria dello spazio-tempo è solo formale

Per quanto la descrizione formale dello spazio-tempo relativistico sia in realtà simmetrica, la discussione al riguardo mostra subito le abitudini della visualizzabilità umana quando l'intenzione è quella di *comunicare* l'aspetto intuitivo del fenomeno. La quasi totalità degli esempi e delle descrizioni di questo modo di immaginare pone sempre l'una dopo l'altra un insieme di descrizioni spaziale a determinati istanti in modo da ottenere l'immagine spazio-temporale: per una dimensione spaziale, un insieme di immagini dello stesso punto su rette a t successive forma il percorso del corpo; per due dimensioni, un insieme di piani per ogni tempo t ci restituisce lo "scatolone" di spazio-tempo. Tutte queste non sono altro che la dichiarazione della *posizione a istanti successivi*, ovvero delle leggi $x(t)$ a cui siamo abituati fin dalla meccanica classica e a cui è possibile associare la visualizzabilità intuitiva nello spazio-tempo. Ma non dovrebbe sorprendere l'esistenza della legge opposta $t(x)$ che va intesa come la descrizione di quali tempi vedranno quella posizione occupata, ovvero la descrizione dei *tempi per posizioni successive*. Questa descrizione, del tutto non intuitiva, equivale a scegliere un particolare punto dello spazio e "segnare" lungo la retta parallela all'asse t ogni istante

nel quale tale posizione sarà occupata dal corpo, quindi passare alla posizione successiva e cercare in essa il tempo t in cui il corpo si troverà in quella posizione.

Tale descrizione è a prima vista complessa, difficile e superflua. In realtà, essa è solamente lontana dalle nostre abitudini e dalle nostre capacità intuitive che nascono dal nostro vissuto: è molto più semplice immaginare l'infinità dello spazio che avanza nel costante fluire del tempo che il contrario. Immaginare l'infinità del tempo per un singolo punto dello spazio e poi per il successivo punto non ha alcun senso per noi.

Ciò significa che, almeno per quanto riguarda la descrizione che viene ereditata dalla Relatività Generale, la LQG si appoggia ancora pienamente alla visualizzabilità che distingue spazio e tempo.

2.13 La rappresentazione in LQG

Riprendendo l'esempio di due corpi in due dimensioni che si muovono, lo spazio-tempo risultante è una "scatola" tridimensionale in cui, ad esempio, l'altezza è la dimensione verticale mentre i diversi piani orizzontali sono lo spazio. Due oggetti che, partendo da due proprie posizioni, vadano a incontrarsi, urtare e poi separarsi ancora possono essere visti come due "linee d'universo" all'interno della scatola.

È possibile subito notare una cosa: l'intera scatola non è un fenomeno che avviene nello spazio-tempo, ma una rappresentazione dello spazio-tempo stesso, mentre le linee di universo, che rappresentano l'evento fisico, costituiscono un unico fenomeno che avviene all'interno di esso. Se il campo gravitazionale è lo spazio-tempo, la gravità quantistica studia e indaga quindi la scatola stessa e non il singolo fenomeno che avviene all'interno.

Tuttavia, per permettere al carattere quantistico di fuoriuscire, si prenda in analisi il fenomeno dell'urto fra due corpi. L'immagine macroscopica è elementare, mentre per aggiungere alla rappresentazione un carattere microscopico bisogna implementare le basi della Meccanica Quantistica riducendo i due corpi a entità quantistiche che partono da una sorgente, urtano e vengono infine localizzate in una certa posizione. In questo caso, secondo l'intuizione di Heisenberg, la teoria non descrive cosa accade "durante" il fenomeno ma solo la probabilità che lega i diversi stati iniziali e i possibili stati finali. Va specificato che, ancora una volta, essendo tornati nel campo della Meccanica

Quantistica, il tempo assume un ruolo di parametro, o etichetta, per diversi istanti successivi. Allora, chiamati $t=0$ e $t=t_1$, gli istanti iniziale e finale del processo, essi sono rappresentati dai bordi della scatola di spaziotempo prima individuata.

Il calcolo delle probabilità, così come per la tecnica della somma su tutti i possibili cammini di Feynman, non è altro che tutti i possibili stati intermedi fra i due “bordi”. La solita *nuvola di possibilità* quantistica questa volta includerà al suo interno anche lo spazio-tempo insieme a tutti i possibili cammini dei due corpi.

Come visto, lo spazio quantistico è rappresentabile in due dimensioni come una rete costituita da nodi e linee. In questa descrizione lo spazio-tempo non è fisso e anch'esso evolve quantisticamente da uno stato iniziale a uno finale, passando per un certo numero di stati intermedi. È possibile visualizzare ciò come una rete che, muovendosi nel tempo, farà sì che i nodi disegnino delle rette mentre le linee disegneranno delle superfici; si tratta di aggiungere una dimensione a ogni elemento della rete prima descritta. Un singolo nodo, però, può dividersi in due lungo il suo percorso, generando ulteriori linee e superfici: lo spazio si evolve e modifica nel tempo. Un esempio molto attuale potrebbe essere quello di una stampante 3D che costruisce un solido il cui interno è costituito da una rete plastica di supporto. Questa immagine è chiamata “schiuma di spin” in quanto un insieme di superfici che si incontrano, come la schiuma del sapone, mentre i nodi della rete vengono chiamati spin.

Per calcolare quindi le probabilità che uno stato dello spazio-tempo evolva in un altro, è necessario considerare tutte le possibili “schiume di spin” che potrebbero stare nella scatola.

Rappresentativamente, c'è ben poco di nuovo. Queste immagini si avvicinano molto ai diagrammi di Feynman secondo gli stessi autori che le hanno proposte. Esse è nata combinando i criteri rappresentativi di tali diagrammi, efficaci soprattutto nell'elettrodinamica quantistica, con una tecnica di calcolo nota come “teoria sul reticolo” efficace nella cromodinamica quantistica. La “teoria sul reticolo” utilizza uno spazio quantizzato reticolare regolare per studiare, con successo le interazioni di forza forte fra le particelle. In questa tecnica di calcolo il reticolo è solo un'approssimazione, mentre per la gravità quantistica assume una vera concezione di come sia lo spazio. In termini pratici, cambia poco. La LQG si appoggia dunque su due tecniche di calcolo efficaci per la Meccanica Quantistica, diagrammi di Feynman e reticoli, cambiando la concezione epistemologica

di entrambi e rendendoli, di fatto, la stessa cosa. Una schiuma di spin è costituita tanto da reticoli quanto da diagrammi e può essere interpretata come essere sia l'uno che l'altro strumento di calcolo. Ciò fa sì che, nel caso la LQG venisse confermata, sia la QED che la QCD risulterebbero essere casi particolari della prima.

2.14 La rappresentazione dei buchi neri e dell'infinito

Alcune entità fisiche si ritrovano in uno stato ibrido per cui, pur essendo ritenute reali e avere un'effettiva esistenza fisica, risulta impossibile poterle osservare. A differenza di un potenziale elettrico, un buco nero è un'entità del tipo prima descritto.

Immaginati matematicamente da Karl Schwarzschild nel 1916, l'esistenza dei buchi neri è oggi accettata e diffusa grazie alle osservazioni indirette che un corpo così massivo produce per effetto gravitazionale, come la distribuzione di massa nelle galassie o le lenti gravitazionali per la luce. Per sua stessa natura, un buco nero non è direttamente osservabile nel senso più letterale, ovvero tramite la radiazione, visibile e non. L'immagine che quindi viene costruita, favorita anche dal nome, deriva esclusivamente da come la teoria descrive la fisica dell'oggetto stesso: un corpo nero e sferico a causa della sua enorme gravità, che non permette neanche alla luce di fuoriuscire.

Tuttavia, tale immagine, seppur evocativa, non presenta particolari convenienze per lo studio dell'oggetto. Nei casi più semplici e introduttivi, elementi come l'orizzonte degli eventi e la curvatura dello spazio-tempo all'intero del buco possono essere anche rappresentati in termini classici come delimitazioni di zone o "imbuti" spazio-temporali.

Una rappresentazione più moderna e complessa dei buchi neri utilizza i diagrammi di Penrose, strutture che, a partire dai diagrammi di Minkowski, arrivano a discutere e rappresentare gli infiniti spaziali. Va specificato che le proprietà dell'oggetto fisico del buco nero appartengono oggi tanto alla Relatività Generale quanto alla Meccanica Quantistica, come la maggior parte delle situazioni fisiche più estreme.

mentre le lunghezze distanti vengono ristrette. Anche i bordi del *quadrilatero* che si forma in figura, a volte chiamato il *diamante di Penrose*, corrispondono a un punto di infinito dello spazio-tempo.

La struttura causale di un buco nero può essere rappresentata tramite un diagramma di Penrose. Dal punto di vista della rappresentazione e della visualizzabilità, la novità consiste nella differente interpretazione del limite spaziale; nei bordi di un buco nero, infatti, entrambi lo spazio e il tempo sono unidirezionali e rivolti verso il centro della singolarità.

2.14.1 La costruzione di un diagramma di Penrose

Una caratteristica dei diagrammi di Penrose consiste nella possibilità di “vedere” l’infinito. John D. Norton, docente del dipartimento di Storia e Filosofia della Scienza all’università di Pittsburgh, costruisce una spiegazione a partire dal disegno prospettico che vede incontrarsi all’infinito due o più linee parallele per illustrare una trasformazione conforme.

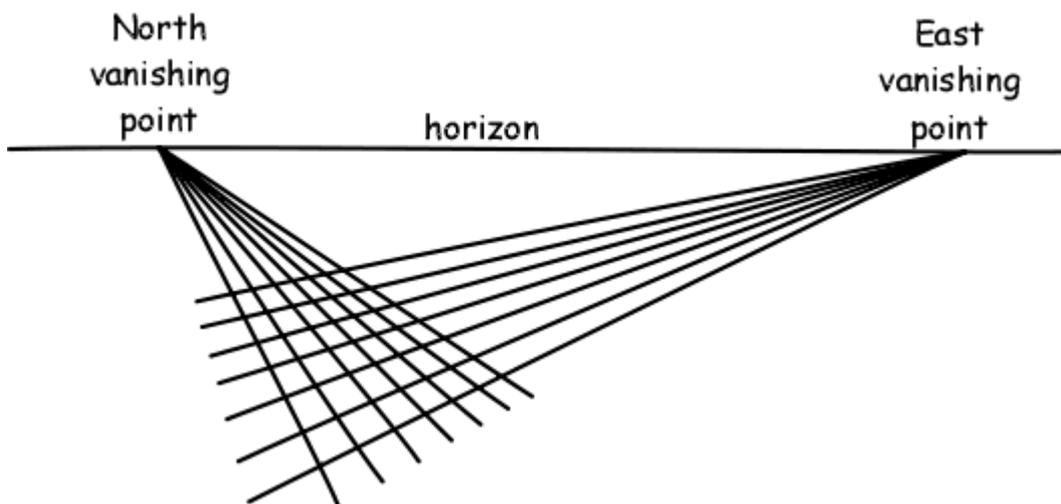


Figura 2.8 Disegno prospettico, da J.D. Norton (sitografia).

Come specifica l’autore, l’osservatore sa che in realtà le linee non si incontrano in alcun punto e che non si sta effettivamente osservando un infinito che, tuttavia, viene rappresentato in questo modo. Espandendo ora questa tecnica prospettica tutto intorno all’osservatore, a 360° , si ottiene un’immagine simile a quella che una macchina fotografica dotata di una lente *fisheye* produrrebbe. Similmente ai diagrammi di Penrose, in questa immagine è possibile notare come le effettive lunghezze più distanti vengono

accorciate nella rappresentazione proprio in funzione della propria distanza. Allo stesso modo, gli oggetti vengono incurvati secondo linee iperboliche.

La trasformazione deve ora essere applicata a un diagramma di Minkowski dell'intero spaziotempo. Considerando uno spazio unidimensionale, è possibile riconoscere due infiniti posti agli estremi delle due direzioni dell'asse spaziale. Allo stesso modo, l'asse temporale perpendicolare includerà due estremi, questa volta riconoscibili come il futuro infinito e il passato infinito⁷⁰. Questi due assi individuano dunque quattro punti rappresentabili come i vertici di un quadrato; i lati che uniscono tali punti, essendo a 45° , possono solo essere linee di universo di raggi luminosi. Norton individua, dunque, tre categorie di infinito: l'infinito di tipo spazio (i due punti estremi dell'asse spaziale), gli infiniti di tipo tempo (i due punti estremi dell'asse temporale), e gli infiniti di tipo luce.⁷¹

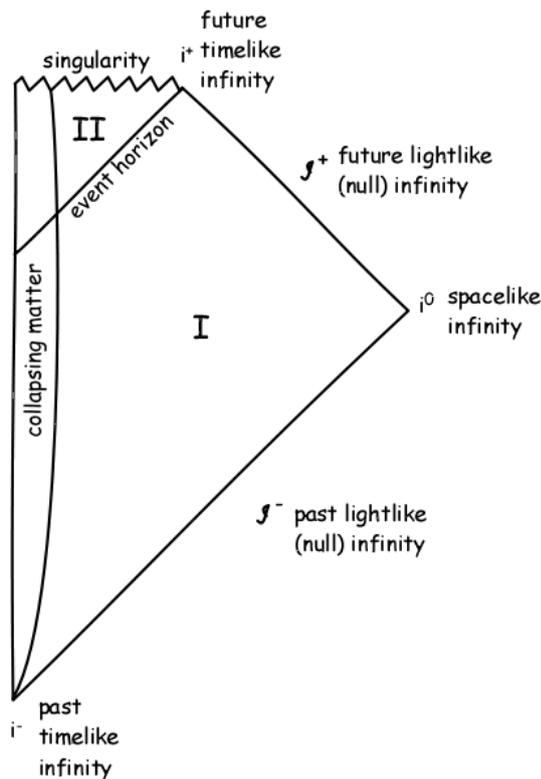
Gli infiniti di tipo spazio sono i punti prospettici in cui convergono le linee spaziali di un ordinario diagramma di Minkowski, su cui si potrebbe rappresentare solo una porzione finita di spazio-tempo. Lo stesso discorso vale per i punti noti come infiniti di tipo tempo. Gli infiniti di tipo luce, invece, vengono rappresentati da linee continue inclinate di 45° , parallele ad una coppia di lati del quadrato, che congiungono gli altri due lati.

L'articolo di Norton si estende poi nella costruzione del diagramma di Penrose per il più semplice buco nero di Schwarzschild, ovvero non rotante e privo di carica. Da esso, è possibile arricchire la descrizione per aggiungere ogni grandezza prima ignorata. Si invita a consultare l'articolo posto in sitografia per la spiegazione completa.

Nel caso più semplice, il seguente grafico atteso può essere spiegato iniziando a leggere dalla parte più bassa (il tempo è rappresentato verticalmente):

⁷⁰ Futuro e passato sono in realtà solo due etichette. Se il tempo non possiede una particolare direzione privilegiata di scorrimento, allora si hanno nuovamente le due generiche direzioni di un asse.

⁷¹ Questa notazione richiama quella utilizzata per le distanze di tipo spazio, tempo e luce comunemente utilizzate in Relatività Speciale.



- della materia inizia a collassare in un determinato momento, la sua linea di universo è una linea verticale;
- la nascita del buco nero è rappresentata dalla nascita dell'orizzonte degli eventi come una linea a 45° ;
- la singolarità, limitata nello spazio del buco nero, si trova infinitamente lontana nel tempo;
- lo spazio-tempo ora è diviso in due zone, la I, lo spaziotempo ordinario, e la II, l'intero del buco nero.

Ad esso è inoltre possibile aggiungere elementi esterni, come un viaggiatore spaziale con diverse velocità v , per studiarne l'intera linea di universo.

È chiaro come tali diagrammi nascano dai diagrammi di Minkowski, ed è inoltre possibile riconoscere somiglianze con i diagrammi di Feynman, come la possibilità di arricchire la descrizione tramite l'inserimento di ulteriori elementi, la necessità di possedere una chiave di lettura specialistica per l'utilizzo degli stessi, e il carattere che tende a privilegiare la visualizzabilità dei nessi causali a discapito della rappresentazione spazio-temporale. Questo anche perché le equazioni tendono a essere costruite a partire da essi.

3 Lo sviluppo filosofico della visualizzabilità

I concetti di spazio e tempo hanno da sempre ricoperto un ruolo centrale nel dibattito fisico e filosofico. Già nell'antichità, essi venivano discussi e sottoposti ad analisi pratiche e teoriche che coinvolgevano tanto la fisica del mondo esterno quanto le percezioni umane. I paradossi di Zenone, conosciuti oggi come Achille e la tartaruga o il paradosso dello stadio, sono esempi dell'importanza filosofica del movimento, quindi il rapporto fra spazio e tempo. Nella storia filosofica e fisica più recente, l'interesse di Newton nell'affermare l'esistenza di uno spazio e tempo assoluto supporta l'idea di come essi fossero ancora tra le basi concettuali della fisica.

Dal punto di vista della visualizzabilità intesa come possibilità umana di concepire un'immagine spazio-temporale di un fenomeno fisico⁷², risulta interessante l'idea kantiana secondo la quale spazio e tempo sono categorie *sintetiche a priori*. Con *sintetiche* si intende che aggiungono una conoscenza al soggetto: l'individuazione nello spazio e nel tempo di un fenomeno rende quindi più chiara la comprensione del fenomeno stesso e ciò non è altro che il ruolo, o lo scopo, che la visualizzabilità assume nello sviluppo anche della Meccanica Quantistica. Se i fenomeni quantistici sono costituiti da eventi e informazioni non spazio-temporali, l'aggiunta di questi aspetti *sintetici* fornisce una conoscenza ulteriore che può risultare determinante per la comprensione e l'assimilazione del fenomeno in studio.

Con *a priori* si intende invece che la validità delle categorie spazio-temporali è indipendente dall'esperienza. Nella *Critica della ragion pura*, Kant definisce le categorie *a priori* come modi di funzionamento della nostra mente che oggi verrebbero chiamate *strutture cognitive*. Esse rappresentano le modalità con cui la nostra mente filtra ed elabora tutte le informazioni esterne e che quindi sono indipendenti da esse, ovvero dall'esperienza. L'unione delle forme *a priori* con tali dati dell'esperienza, intesi anche come gli stimoli fisici quali quelli visivi o olfattivi, ad esempio, forniscono poi i nostri pensieri elaborati *a posteriori*. In questo schema, risulta particolare il fatto che la classificazione spazio-temporale sia quindi una sorta di *istinto sensoriale* che non può non filtrare ogni nostra sensazione e che influenza anche ogni nostra immagine mentale.

⁷² Più vicina, dunque, all'idea di Anschaulich di Schrödinger rispetto a quella di Heisenberg.

Da un punto di vista semplicistico, ma non del tutto errato, la scienza cognitiva moderna collega questa necessità delle categorie spazio-temporali con il dato di fatto che la nostra mente appartiene a tutti gli effetti a un mondo spaziale in cui il flusso del tempo, sebbene inarrestabile, viene percepito. Profondità, larghezza e lunghezza vengono costantemente elaborati dalla nostra mente grazie ai nostri sensi, primi fra i quali la vista e il tatto⁷³. Senza immergersi in argomentazioni ontologiche riguardo l'effettiva esistenza dello spazio (o della realtà), ciò che qui è necessario riconoscere riguarda come la mente umana costruisca quasi automaticamente e autonomamente le categorie spaziotemporali con cui filtrare l'insieme di stimoli sensoriali che l'esperienza, reale, virtuale o illusoria che sia, ci fornisce.

L'essere umano risulta quindi essere dipendente proprio da questa cornice nel quale collocare la realtà che percepisce.

3.1 La costruzione delle immagini in Meccanica Quantistica

La breve analisi di stampo kantiano sostiene l'idea che la visualizzabilità sia contemporaneamente naturale e necessaria per il pensiero umano e ciò include anche la comprensione di una teoria moderna come la Meccanica Quantistica. È naturale in quanto la nostra mente ragiona per categorie cognitive spazio-temporali, ed è necessaria poiché non è possibile pensare un fenomeno che sfugga a tali categorie senza ricollocarlo in una cornice spazio-temporale, non di rado anche tramite analogie e immagini inesatte.

Lo scontro epistemologico tra Heisenberg e Schrödinger si ricollega a questa necessità, o capacità, di creare immagini astratte e all'importanza che queste immagini assumono nella comprensione di un fenomeno fisico e nella teorizzazione di un modello esplicativo. Quando Schrödinger, sostenuto da Bohr, affermava che una teoria avrebbe dovuto essere visualizzabile in senso classico, si ricollegava all'idea che un fenomeno fisico deve esistere, almeno in parte, nello spazio-tempo in cui noi stessi viviamo e dalla quale la mente riceve i suoi stimoli sensoriali. Ciò significa che l'immagine spazio-

⁷³ Si potrebbe affermare che una persona non vedente non possiede le categorie spaziali, o che esse siano per lo meno più deboli. La discussione a riguardo va sicuramente affrontata in altra sede e con le competenze necessarie. Tuttavia, vale la pena notare che con un po' di fantasia è possibile trovare situazioni in cui altri sensi giocano il ruolo di percettori degli stimoli spaziali. Ad esempio, la sensazione del movimento in uno spazio tridimensionale può avvenire anche tramite il senso del tatto (muovendo una parte del corpo su e giù), o con l'udito (ascoltando suoni da diverse direzioni e in movimento).

temporale del fenomeno, che si forma spontaneamente in conseguenza di una corretta comprensione del modello teorico, deve corrispondere almeno in parte all'effettiva realtà fisica. Una teoria, quindi, dovendo descrivere la realtà, non può farlo senza includere nelle sue basi i concetti di spazio e tempo.

L'approccio di Schrödinger trovava la sua origine da caratteristiche definibili *a priori* fondanti come la concezione spazio-temporale. La costruzione di un modello teorico deve avvenire all'interno di tale struttura non solo familiare, ma anche naturale per i fenomeni di qualsiasi tipo. La visualizzabilità qui non è minacciata o esclusa, ma anzi permette di verificare che una descrizione sia o meno accettabile per le condizioni di base. Questo approccio fa sì che il formalismo ottenuto risulti essere più fedele alle concezioni di partenza e al linguaggio utilizzati dall'indagatore, inteso anche il linguaggio quello matematico, invece che nascere, il formalismo, dal fenomeno effettivamente studiato. Eventuali discrepanze risultano così essere problemi di interpretazione.

Heisenberg, d'altra parte, riteneva che la descrizione del mondo quantistico dovesse essere costruita tramite grandezze che avessero senso nello stesso mondo quantistico, e non nel mondo macroscopico a cui noi apparteniamo ma che è estraneo ai fenomeni atomici. Esiste un'immagine che si forma spontaneamente, ma essa deriva dall'utilizzo di un linguaggio non adatto alla descrizione dei fenomeni quantistici.

“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste riguardano oggetti di grandi dimensioni. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali; e anche questa è una capacità che ci viene dall'esperienza quotidiana. Per fortuna la matematica non ha queste limitazioni ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l'immagine ondulatoria e quella corpuscolare.” [Heisenberg]

La prima frase collega il linguaggio, anche scientifico, con il suo ruolo di descrittore dell'esperienza quotidiana. Così come la visualizzabilità, il linguaggio nasce influenzato *a priori* dalle categorie spazio-temporali in cui viviamo e potrebbe ritrovarsi inadatto a descrizioni precise di fenomeni potenzialmente estranei allo spazio della nostra realtà. Quando, ad esempio, il linguaggio descrive spazi a dimensioni multiple⁷⁴ e capaci di viaggiare nel tempo, lo fa comunque nei termini nati dall'esperienza tridimensionale che viviamo quotidianamente. Questi limiti linguistici appartengono anche alla possibilità d'immaginazione e visualizzabilità, e quindi non ha senso affidarsi ad essa per descrivere fenomeni fisici che non appartengono a questa struttura spazio-temporale, come i fenomeni quantistici.

L'idea di Heisenberg per cui la teoria, anche nella sua forma, deve descrivere in maniera fedele il fenomeno che tratta, fa sì che il principale rapporto di sovrapposizione avvenga proprio fra modello teorico e fenomeno fisico e non fra strutture di comprensione e familiarità della mente. In questo senso, la teoria risultante non deve e non può includere elementi esterni al fenomeno fisico, e se quindi i concetti di posizione e traiettoria non hanno senso nel mondo microscopico, allora la teoria non deve includere tali concetti.

La costruzione di immagini mentali, però, non può prescindere da una struttura spazio-temporale, e per questo motivo Heisenberg rifiuta la necessaria visualizzabilità per una teoria. In altri termini, secondo il fisico, la costruzione del modello teorico parte esclusivamente dalle basi dei fenomeni da studiare, che nel caso della Meccanica Quantistica erano principalmente gli spettri atomici. Se queste basi non possono essere visualizzate è solo un problema dell'abitudine di pensiero e del linguaggio utilizzato, entrambi adatti al mondo macroscopico diverso da quello microscopico.

L'unico linguaggio che permette la costruzione di una realtà diversa è la matematica, in quanto nulla impedisce di descrivere, tramite pure formule matematiche, spazi a dimensioni arbitrarie e movimenti temporali di qualsiasi genere. Nel momento però in cui dobbiamo leggere e tradurre il linguaggio matematico in pensieri e immagini comprensibili, che ci permettano di avere una teoria quantistica intelligibile ma anche più

⁷⁴ Si intende qui la sola descrizione "a parole" di tali elementi, mentre il linguaggio matematico viene visto come possibile soluzione nelle argomentazioni successive.

esatta possibile nella sua descrizione, è necessario accontentarsi che le immagini che emergono siano incomplete.

Se si intende la visualizzabilità come la naturale propensione di un modello teorico ad essere descritto tramite immagini mentali coerenti ed esplicative del modello stesso, i due approcci visti precedentemente sono diametralmente opposti dal punto di vista epistemologico, ovvero di costruzione della teoria, del suo significato e del rapporto con i fenomeni studiati. Non sorprende dunque che, in quegli anni in cui la nuova teoria quantistica stava affacciandosi al mondo, gli approcci a essa fossero uno dei temi più importanti e delicati discussi dai protagonisti della vicenda. La più che comprensibile natura umana di quest'ultimi ha dovuto scontrarsi con la necessità di studiare e descrivere una gamma di nuovi fenomeni di cui il grado di estraneità non era affatto chiaro. Un approccio che partisse da solide basi note risultava più convincente e sicuro alla maggioranza ma, come notò Heisenberg, rischiava di contaminare lo studio di ciò che era nuovo e diverso nella nuova fisica.

Ancora una volta, la principale causa di scontro di Heisenberg con Schrödinger e altri suoi contemporanei risiede nell'accettare che una teoria fisica possa essere corretta e contemporaneamente restituire tali immagini distorte o parziali della realtà. Per Heisenberg, una teoria corretta è una formulazione coerente con sé stessa e in accordo con i risultati sperimentali, ma non è necessario che il senso fisico espresso dalla teoria sia visualizzabile in termini spazio-temporali classici poiché essi non fanno parte delle basi concettuali della teoria.

Tuttavia, a partire dal secondo dopo guerra, la visualizzabilità ha giocato un ruolo fondamentale e, soprattutto, silenzioso nello sviluppo della Meccanica Quantistica. La nuova partecipazione americana all'indagine teorica, di cui sarà discusso l'esempio di Feynman, portò una nuova filosofia più pragmatica e a prima vista meno interessata ai dettagli epistemologici.

3.2 La visualizzabilità matematico-fisica

La tradizione fisica classica assegna un ruolo preciso alla visualizzabilità dei fenomeni fisici. La discussione di questo particolare aspetto non presenta particolari problemi epistemologici prima dell'incontro con la Meccanica Quantistica in quanto è possibile

ritenere naturale e corretta ogni immagine ricreata da una descrizione classica. Anche nei casi più complessi da immaginare, come i gas nelle trattazioni termodinamiche, posseggono particolari immagini descrittive che, a partire da situazioni semplici, permettono di ritrovare gli stessi aspetti intuitivi al crescere della complessità. Ad esempio, una particella di un gas viene rappresentata come una sferetta che può muoversi e urtare le altre particelle. Grandezze come pressione e temperatura posseggono una descrizione precisa e coerente con l'immagine della sferetta. Un insieme di particelle viene descritto alla stessa maniera e con le stesse immagini. Nonostante sia impossibile includere in una sola immagine un gran numero di particelle, risulta facile trasmettere le proprietà del singolo all'intero sistema tramite l'idea che ogni possibile fenomeno fisico che accade può essere isolato, descritto e immaginato secondo una particolare trattazione matematica visualizzabile.

Il palcoscenico della visualizzabilità classica è sicuramente l'insieme di spazio e tempo. Ogni fenomeno è descritto tramite un sistema di equazioni dipendenti da grandezze dinamiche. A partire da questo, è possibile rintracciare il ruolo e le caratteristiche della visualizzabilità da ricercare poi nella descrizione moderna della Meccanica Quantistica. La domanda che viene posta è la seguente: è possibile per la Meccanica Quantistica ereditare dalla fisica classica lo stesso significato, utilizzo e scopo della visualizzabilità?

3.2.1 Le descrizioni matematiche dello spazio-tempo in fisica classica

La fisica classica utilizza un linguaggio geometrico e algebrico come rappresentazione, spesso modellizzata e astratta, dei fenomeni fisici. Un oggetto viene descritto tramite un sistema di equazioni e variabili, una per ogni coordinata spaziale più una che rappresenta l'evoluzione temporale⁷⁵. Per ogni coordinata spaziale si aggiunge un'equazione che descrive il moto lungo quella coordinata. In termini di posizione e tempo, è possibile descrivere quindi traslazioni e rotazioni dei corpi, ovvero il movimento. Un corpo può ruotare senza traslare, o viceversa. La semplice immagine di un corpo fermo

⁷⁵ Il tempo non è a tutti gli effetti una variabile, ma è più un'etichetta che permette di discutere la causalità degli eventi. Matematicamente, ad esempio, si studia la variazione di una grandezza e della variabile associata nel tempo, ma non si studia la variazione del tempo rispetto a un'altra generica grandezza. Il tempo scorre in maniera *assoluta*.

può essere intesa come l'evoluzione della traslazione nulla e della rotazione nulla, non è quindi esterna all'idea di descrizione del movimento.

Il moto di un corpo viene analizzato come una combinazione di posizione e quantità di moto. Quest'ultimo termine, come è noto, rappresenta il prodotto fra velocità e massa del corpo e include quindi il concetto di spostamento come variazione della posizione in un dato tempo e per unità di tempo. L'intera struttura teorica si basa quindi sui due concetti di spazio e tempo e sulla descrizione di un'immagine variabile secondo i criteri di tali concetti.

Nel caso di un singolo oggetto in uno spazio tridimensionale, la descrizione corrisponde alla semplice immagine che potremmo avere di quell'oggetto, eventualmente in moto, pur avendo una descrizione matematica di sei grandezze variabili dipendenti da una settimana, il tempo, che però può anche essere trattato come un parametro o un'etichetta che caratterizza istanti diversi. Quando vi sono due corpi il modello prevede due sistemi di equazioni e quindi il doppio delle variabili di posizioni e di moto. Anche se la descrizione matematica risulta essere più complicata, è comunque possibile visualizzare l'immagine di due corpi in movimento in uno spazio tridimensionale. L'interpretazione dei fenomeni della meccanica classica non si scontra quindi con particolari difficoltà.

Dal punto di vista formale, però, la teoria prevede l'utilizzo di spazi differenti da quello tridimensionale della visualizzabilità: lo spazio delle configurazioni, lo spazio dei momenti e lo spazio delle fasi. Quest'ultimo è il prodotto cartesiano dei primi due. Dal punto di vista intuitivo e visualizzabile, l'utilizzo di questi spazi sembra un'inutile complicazione. Essi vengono però sviluppati come semplificatori dell'aspetto analitico dei problemi da trattare.

3.2.2 Spazio delle configurazioni e spazio dei momenti.

Considerando le variabili posizione di un oggetto in uno spazio tridimensionale, esse possono essere descritte da un vettore. L'insieme di tutti i vettori che posseggono come componenti le variabili posizioni forma lo spazio delle configurazioni. Questo spazio non costituisce in realtà un oggetto nuovo ed eccessivamente astratto rispetto allo spazio tridimensionale: nel caso di un singolo oggetto, esso è la descrizione delle possibili posizioni e corrisponde quindi all'immagine *reale* nella posizione corrispondente al vettore o alle sue componenti. Nel caso di più oggetti, le difficoltà analitiche emergono

come un aumento del numero di equazioni, mentre la visualizzabilità dello spazio delle configurazioni risente del numero di gradi di libertà, possibili posizioni, del sistema, corrispondente alle tre dimensioni spaziali moltiplicate il numero di corpi in analisi. Come già detto, tuttavia, l'immagine da visualizzare è semplice e immediata e non trova difficoltà di lettura e traduzione a partire dal formalismo utilizzato, posto che esso sia noto.

L'insieme dei vettori aventi come componenti i momenti di un corpo forma invece lo spazio dei momenti. Dal punto di vista visivo, se esso descrive il movimento in tre dimensioni, l'immagine rappresentativa dei vettori può risultare simile, se non uguale, all'immagine di un comune spazio tridimensionale delle posizioni. In questo caso, l'interpretazione tramite una lettura consapevole è fondamentale: i tre valori di un vettore, o il modulo dello stesso, rappresentano la quantità di moto dell'oggetto lungo le tre dimensioni e non la posizione. Di conseguenza, l'immagine *reale* non è quella dell'oggetto fermo in corrispondenza del vettore, ma dell'oggetto in movimento con una precisa quantità di moto a partire da un qualsiasi punto dello spazio⁷⁶.

L'utilizzo dello spazio dei momenti non è intuitivo e immediato nel senso più semplice. Per diventare visualizzabile è necessario associare un significato fisico e quindi interpretare le informazioni secondo delle precise regole di lettura. Si può quindi dire che l'intuitività emerge dalla combinazione di un'immagine visualizzabile con la conoscenza della particolare chiave interpretativa dell'immagine stessa. Questo esempio mostra chiaramente un aumento di difficoltà e complessità del significato di visualizzabilità, in cui la costruzione dell'immagine non è sufficiente se non accompagnata dal senso fisico del fenomeno.

Lo spazio delle fasi è costituito dal prodotto cartesiano tra lo spazio delle configurazioni e lo spazio dei momenti. In quanto tale, esso descrive l'intero sistema in termini posizione e quantità di moto, quindi l'intero movimento di uno o più corpi. Dal punto di vista analitico, questa descrizione costituisce una notevole semplificazione. In termini di visualizzabilità, però, risulta difficile tradurre concetti semplici e intuitivi come la posizione di un corpo da un'immagine a più dimensioni dello spazio delle fasi. Nel

⁷⁶ Lo spazio dei momenti non contiene infatti informazioni sulla posizione, ma sulla variazione di essa a partire da una posizione generica.

più semplice dei casi che non si riduca a uno dei precedenti insieme già visti, come un corpo fermo in una data posizione, la descrizione richiede comunque la combinazione visuale di informazioni di posizione e di moto. Prendendo come esempio una particella in una dimensione, la descrizione nello spazio delle fasi avrà quindi due gradi di libertà: posizione e moto lungo l'unico asse disponibile. L'immagine del fenomeno non è complessa, ma lo spazio delle fasi in questo caso è costituito da uno spazio bidimensionale, due assi cartesiani su un piano, in cui le proiezioni lungo l'asse x e y hanno significati fisici diversi.

Come specificato prima, lo spazio delle fasi non ha come compito la semplificazione delle immagini per i fenomeni fisici, ma riguarda la descrizione matematica e analitica dei problemi: è possibile estrarre informazioni utili alla costruzione di un'immagine, ma è un lavoro non immediato⁷⁷ che richiede passaggi intermedi dalla lettura alla visualizzazione.

3.2.3 La descrizione quantistica dello spazio di Hilbert

Nella formulazione matematica ordinaria della Meccanica Quantistica uno stato fisico viene descritto da un vettore, o da una combinazione lineare di vettori, appartenente a uno spazio a infinite dimensioni chiamato spazio di Hilbert. Questi spazi posseggono numerose qualità matematiche, fra cui la definizione di un prodotto scalare che permette dunque di definire basi ortogonali di dimensioni finite all'interno di esso. Per ogni osservabile fisico misurabile può esistere una base ortogonale e la misura di tale grandezza consiste nell'esplicitare il vettore di stato in termini della grandezza da misurare. Questo processo viene anche chiamato proiezione dello stato su uno o più autostati dell'osservabile, dove gli autostati possono essere identificati con le componenti della base.

L'utilizzo di questa struttura matematica nell'ambito della Meccanica Quantistica è dovuto a John von Neumann nel suo lavoro del 1929⁷⁸.

Tra le varie caratteristiche, è interessante notare come, da un rigoroso punto di vista matematico, lo spazio delle posizioni e lo spazi dei momenti non costituiscano in realtà

⁷⁷ Con immediatezza non si intende un atto veloce nel tempo, ma un'azione che sia conseguenza naturale.

⁷⁸ von Neumann J. *Allgemeine Eigenwerttheorie Hermitescher Funktionaloperatoren*.

delle basi all'interno dello spazio di Hilbert. In un certo senso, come se fosse a sostegno dell'epistemologia di Heisenberg, la formulazione matematica della Meccanica Quantistica non prevede l'utilizzo di tali grandezze e, quando utilizzate, deve chiudere un occhio sulla violazione delle regole matematiche. Ciò significa che sarebbe quindi possibile una completa descrizione quantomeccanica di fenomeni microscopici senza tenere in considerazione spazio e quantità di moto. D'altra parte, forse per abitudine o forse per necessità, non è stato possibile mettere da parte tali grandezze e ancora oggi esse vengono utilizzate giustificando l'incorrettezza matematica con l'assegnazione di un senso fisico alla posizione e alla quantità di moto.

3.2.4 La visualizzabilità dello spazio di Hilbert

È noto che per estrarre informazione da un vettore di stato è necessario scrivere matematicamente l'espressione dello stato in funzione della grandezza in analisi, processo che viene anche detto di scomposizione spettrale del vettore sulla base dell'osservabile.

Questo processo non sembra avere un senso fisico, tuttavia l'analogia con una descrizione classica è quasi immediata. È infatti possibile visualizzare questo fenomeno astratto come la scomposizione di un classico vettore nelle sue componenti lungo la terna di vettori dello spazio tridimensionale. Durante questo processo è necessario sottolineare il ruolo di analogia dell'immagine e ciò significa che la visualizzabilità del fenomeno di proiezione non ha alcun significato fisico, ma ciò non impedisce di effettuare il paragone. Riprendendo ancora una volta le parole di Heisenberg, il linguaggio gioca qui un ruolo fondamentale. I termini seppur tecnici utilizzati nella trattazione dello spazio di Hilbert e delle sue grandezze, per quanto siano tutti elementi astratti, richiamano come analogie dei processi macroscopici perfettamente visualizzabili. Fisicamente, invece, l'associazione tra fenomeni astratti e immagini spazio-temporale è in principio errata, come la misura dello spin e la direzione di un vettore in uno spazio bidimensionale in cui si identifica un "sopra" e un "sotto". Tuttavia, è innegabile che proprio queste analogie inesatte siano state utilizzate con successo per lo sviluppo della teoria quantistica, e che molte di esse vengano ancora oggi usate senza porsi il problema che l'immagine sia incompleta, parziale o addirittura errata. Ma fino a che punto è accettabile tutto ciò?

Per quanto possa essere errato il senso fisico, la denominazione vincente per lo spin è stata proprio la suddivisione “up” e “down” e ciò non è separabile dalla visualizzazione di un vettore bidimensionale nello spazio della nostra realtà così come non è separabile dall’immagine di una piccola sfera rotante.

In sintesi, lo spazio di Hilbert è uno spazio matematico astratto contenente elementi come i vettori di stato, o le sue proiezioni su determinate basi a formare le cosiddette funzioni d’onda. Qui dentro, i concetti di posizione, tempo e movimento non hanno alcun senso. Tuttavia, esiste l’immagine di questo spazio e dei suoi sottospazi come basi ortogonali in cui vettori aventi una specifica posizione vengono scomposti in componenti con determinate lunghezze. Vettori, basi e componenti possono ruotare, allungarsi e comporsi secondo regole matematiche a cui è possibile associare immagini in cui variazioni di posizioni nel tempo descrivono movimenti familiari.

Così come per lo spazio dei momenti prima visto, piuttosto che rifiutare l’analogia finora descritta, potrebbe risultare più semplice e fruttuoso utilizzare l’aspetto visualizzabile e intuitivo di certe immagini per costruire chiavi di lettura che, a partire da una data descrizione matematica, possano restituire un significato fisico altrimenti sfuggente e astratto.

3.2.5 Un tentativo di visualizzare il principio di indeterminazione nello spazio di Hilbert

Il seguente tentativo di visualizzazione muove per analogia alla visualizzabilità degli spazi classici prima descritti con l’obiettivo di verificare se lo stesso processo di lettura e costruzione dell’immagine possa essere utilizzato nell’analogo quantistico.

In meccanica classica è possibile avere uno spazio tridimensionale e dividerlo in due basi, una contenente il piano xy e l’altra la direzione z . La proiezione di un vettore tridimensionale nel piano xy esclude la componente z facendo sì che nella nuova descrizione sul piano non esista alcuna informazione sulla componente persa. Ciò avviene perché le tre direzioni spaziali sono sempre ortogonali. Nello spazio di Hilbert di dimensioni infinite, le “direzioni” delle basi per diverse grandezze possono risultare parzialmente sovrapposte facendo sì che una proiezione in una nuova base sia ancora parzialmente possibile e che l’informazione sulle grandezze non appartenenti alla base

utilizzata non siano del tutto escluse. La quantità di informazione persa dipende quindi dalla reciproca relazione fra basi.

Un vettore di stato viene solitamente indicato con la lettera greca Ψ . Se nessuna variabile viene esplicitata, si può intendere che lo stato sia libero e appartenente all'intero spazio di Hilbert. Per estrarre informazioni da Ψ è necessario proiettarlo in una base, e ciò modifica la forma matematica dello stato solitamente espressa come $\Psi(x_i)$, dove x_i rappresenta le diverse dimensioni della grandezza da misurare. Questa operazione crea un nuovo elemento del nuovo spazio visualizzabile come un vettore scomposto lungo le sue componenti di una determinata base. Per semplicità, si può immaginare la nuova base come tridimensionale e come un classico sistema di assi ortogonali galleggiante in uno spazio "vuoto" (ovvero senza altri elementi) in cui tuttavia è noto che esistono altre basi simili ad essa ma diverse. È quindi possibile che la nuova $\Psi(x_i)$ scomposta nella base possieda qualche informazione in meno riguardo ad altre grandezze, ovvero altre basi, che hanno poco o nulla a che fare dall'osservabile analizzato.

Questo è proprio la relazione fra le basi di posizione e impulso (o quantità di moto) che ha portato Heisenberg all'introduzione del principio di indeterminazione e che è conseguenza naturale del formalismo usato. Limitandosi a posizione e quantità di moto, è possibile immaginare le basi tridimensionali delle posizioni e degli impulsi come due *oggetti* distinti dello spazio di Hilbert, e quando si proietta una funzione d'onda in una delle due basi e si modifica la sua forma, si perde una parte di quella compatibilità con l'altra base che avrebbe invece restituito la misura per quella grandezza. Questa perdita potrebbe essere visualizzata come una relazione spaziale fra le basi all'interno dello spazio di Hilbert ed è quindi indipendente dal particolare vettore in analisi. La compatibilità *naturale* fra le basi, immaginabili come oggetti indipendenti ma sovrapponibili almeno in parte, restituisce le relazioni di indeterminazioni fra variabile coniugate. La quantità di informazione perduta può essere facilmente calcolata all'interno della teoria, e non rappresenta un vero problema in quanto è una semplice conseguenza logica della teoria stessa; il vero *problema* sta nel fatto che tale perdita non può essere evitata se non rinunciando al tentativo di sovrapposizione di due basi e quindi alla proiezione e scomposizione del vettore.

3.2.6 Commento al tentativo

La visualizzabilità matematica del principio di indeterminazione non è definitivamente errata, ma risulta probabilmente insufficiente alla maggioranza. Essa lascia non poche domande aperte: cosa rappresenta la lunghezza di un vettore? E la lunghezza di un autostato inteso come componente di una base? La descrizione matematica, relativamente semplice, necessita di un'immagine in senso classico per essere compresa? Quale informazione aggiuntiva viene fornita dalla visualizzabilità?

Soprattutto, l'immagine creata non costruisce un senso fisico particolare che prima sfuggiva, ma può al limite mostrare una relazione spaziale tra elementi matematici della teoria. L'analogia utilizzata, infatti, non è fra elemento astratto e fenomeno fisico, ma fra due elementi astratti: elementi dello spazio delle fasi ed elementi dello spazio di Hilbert.

Per quanto riguarda un aspetto didattico, non è banale riconoscere alla visualizzabilità così trattata un potere esplicativo per quelle relazioni formali che spesso sfuggono a chi sta iniziando ad affrontare la Meccanica Quantistica. In questo senso, la visualizzabilità matematica può essere utile ed efficace.

Epistemologicamente, però, questo tentativo non produce alcun frutto. La visualizzabilità in Meccanica Quantistica ha giocato un ruolo fondamentale anche dopo lo scontro fra Heisenberg e Schrödinger, un ruolo basato sull'intuitività delle immagini e sulla necessità delle stesse per la comprensione della nuova teoria da parte della maggioranza dei nuovi fisici. Può essere obiettato che non tutti gli studiosi hanno tratto vantaggio dall'utilizzo delle immagini incomplete della descrizione visuale della Meccanica Quantistica. Ciò è sicuramente vero, come potrebbe anche essere vero che, alla lunga, ogni accademico avrebbe compreso appieno la nuova teoria anche senza l'uso forzato di immagini spesso errate. Tuttavia, come testimonia la storia di Feynman e dei suoi diagrammi, fu proprio il carattere intuitivo e immediato di certi approcci che permise una rapida diffusione delle nuove conoscenze, così come un più facile e proficuo dialogo fra studiosi. È innegabile come questa combinazione di diffusione e velocità permise uno sviluppo decisamente più rapido delle nuove conoscenze quantistiche.

Conclusioni

Come anticipato nell'introduzione, l'obiettivo dell'elaborato è presentare un resoconto dell'evoluzione della visualizzabilità, in senso ampio, riguardante i fenomeni fisici della Meccanica Quantistica, a partire dalla nascita della teoria stessa fino ai giorni nostri. Tramite esso, è possibile rivalutare il ruolo che la visualizzabilità può oggi ricoprire nell'atto di indagine scientifica che studenti, insegnanti e ricercatori sono compiuti a effettuare.

Il primo risultato ottenuto riguarda il cambio di veste epistemologica che la visualizzabilità assume nei diversi contesti e, parallelamente, l'eventuale cambio di definizione. La prima forma di visualizzabilità che si incontra nella fisica classica è la stessa che Kant formalizza nella sua filosofia, ovvero quell'istinto naturale e guidato dall'intuito che ci porta a collocare ogni immagine mentale su un palcoscenico spazio-temporale simile a quello in cui facciamo esperienza della nostra quotidianità. Nel momento in cui l'indagine fisica giunge allo studio delle entità microscopiche, tale immagine viene minata dalla perdita di significato dei termini come posizione e velocità.

La perdita di impatto esplicativo delle immagini classiche per i fenomeni quantistici, o meglio, il cambiamento di significato di tali immagini, non è estraneo a ciò che oggi accade a chiunque si imbatte nelle teorie più moderne. Le difficoltà epistemologiche di allora legate alla visualizzabilità sono parallele, se non sovrapposte, alle difficoltà di oggi per due semplici motivi. Innanzi tutto, il modo di visualizzare naturale e istintivo a cui la mente umana è abituato è lo stesso, ovvero le immagini classiche nate dalla nostra condizione di esseri appartenenti a uno spazio macroscopico e immersi in un tempo che fluisce regolarmente. Secondariamente, questo modo di visualizzare si scontra con la stessa tipologia di oggetti inadatta alla visualizzazione classica, ovvero quei fenomeni microscopici della Meccanica Quantistica. La storia, come già detto, si ripete.

Il primo risultato può quindi riassumersi come il riconoscimento di una difficoltà immaginativa intrinseca che emerge nel passaggio tra due modelli di fisica differenti che può rallentare non poco la comprensione della Meccanica Quantistica e delle altre teorie moderne. D'altra parte, è vero che oggi si ha almeno un motivo in più per ignorare e mettere di lato, almeno temporalmente e in maniera superficiale, queste difficoltà immaginative, ovvero la sicurezza che ormai la Meccanica Quantistica è una teoria

affermata e confermata. L'analisi dello scontro che ha visto come maggiori protagonisti Schrödinger e Heisenberg mostra invece i tentativi epistemologici di costruire una teoria accettabile per la comunità scientifica, che tuttavia continuava a presentare fenomeni assurdi e incoerenti come gli spettri atomici e l'effetto Zeeman. Se quindi la ricerca dell'*Anschaulichkeit* non fornisce una risposta al problema della visualizzabilità, essa sottolinea l'importanza del problema stesso che coinvolge soprattutto coloro che intendono capire davvero il senso fisico della ricerca scientifica.

Vale qui la pena soffermarsi sulla ridefinizione della visualizzabilità proposta da Heisenberg.

Dato che inoltre possiamo pensare in modo qualitativo alle conseguenze sperimentali della teoria in tutti i casi semplici, non si deve più considerare la Meccanica Quantistica come una teoria non intuitiva e astratta. (Heisenberg 1927, 25)

Dal punto di vista accademico, una forma del genere potrebbe anche essere accettata in quanto fornisce un metodo di verifica della stessa visualizzabilità. Tuttavia, essa sfugge proprio a quell'istinto di costruzione dell'immagine che si trova in difficoltà nel momento in cui si incontra la descrizione di un fenomeno fisico. La vera visualizzabilità si riferisce proprio a questo carattere istintivo e viene messa in crisi quando l'immagine evocata da una teoria scientifica si ritrova essere essa stessa priva di significato fisico.

La visualizzabilità del secondo dopoguerra sembra proprio affrontare questo problema. Riprendendo le parole di Schwinger, non lontane dalla filosofia di Feynman:

Immagino che non possa evitare di avere immagini mentali. Se qualcuno parla di un elettrone io non penso di vedere l'equazione di Schrödinger. Ognuno immagina qualcosa; è un punto in movimento. Deve esserci una qualche specie di immagine. (Schweber, 1994, p. 365)

In un contesto storico completamente differente, i maggiori fisici del panorama teorico internazionale continuavano a discutere della costruzione di immagini mentali a partire da una teoria fisica. L'approccio, tuttavia, era diventato radicalmente opposto.

Non vi era più alcun dubbio che le immagini fossero errate e incomplete, ma esse divennero qualcosa di più: soggettive. Quest'ultimo aspetto rese quindi necessaria la condivisione di regole di interpretazione per far sì che ogni personale immagine potesse tradursi in una rappresentazione intersoggettiva⁷⁹, giungendo a strumenti come i diagrammi di Feynman, oggettivi strumenti di calcolo ma interpretabili rappresentazioni dei fenomeni fisici.

Il ruolo della visualizzabilità nella fisica e nella filosofia dei protagonisti di quegli anni dimostra il potenziale di utilità della stessa caratteristica. Essa ha favorito la diffusione e lo sviluppo della teoria, così come dei suoi metodi poi applicati a ulteriori campi d'indagine. Proprio il caso dell'elettrodinamica quantistica ci indica, quindi, che un'esplicitazione del ruolo della visualizzabilità può risultare proficuo. Feynman, in maniera più diretta, riconosceva la stessa caratteristica come fondante e necessaria al proprio metodo di fare fisica.

Non sorprende, dunque, che con le successive teorie siano riapparso l'utilizzo di descrizioni spazio-temporale completamente inesatte, ma allo stesso tempo utili alla comprensione di fenomeni che, con l'aumento dell'astrazione, rischiano di perdere il contatto con la realtà. L'epistemologia attuale non richiede che le immagini evocate e le descrizioni del mondo che una teoria propone siano perfettamente solide dal punto di vista del significato fisico. La *loop quantum gravity* viene molto criticata come teoria proprio per quest'ultimo aspetto; essa, come altre teorie, potrebbe infatti rivelarsi completamente errata e non è, ad oggi, sostenuta da effettive prove sperimentali. Tuttavia, l'immagine della *schiuma di spin*, dei grafi e dei *loop* concatenati che generano lo spazio nei punti di sovrapposizione non rappresentano un problema nel loro essere immagini.

Questo modo di visualizzare i processi e i fenomeni fisici si avvicina molto alla realizzazione di una mappa concettuale esplicativa degli stessi, una scuola di pensiero ereditata dalla filosofia di Dirac e in cui è possibile collocare i diagrammi di Feynman. La funzione esplicativa delle immagini avviene tramite la lettura delle informazioni filtrate da precise regole interpretative. La posizione dei vari elementi e le connessioni fra gli stessi fanno parte delle informazioni necessarie.

⁷⁹ Non è oggettiva poiché non rappresenta in maniera univoca un particolare fenomeno, ma è necessario conoscere una chiave di lettura condivisa che regola l'interpretazione.

D'altra parte, un'altra visualizzabilità, che combina la filosofia che lo stesso Feynman espone nel suo modo di approcciare lo studio di un fenomeno fisico, nasce oggi dalla combinazione di quella spazio-temporale di Schrödinger e quella causale di Heisenberg.

Riprendendo in analisi la LQG, è possibile immaginare un giovane Schrödinger commentare la teoria chiedendo come può qualcosa di esteso nello spazio generare esso stesso lo spazio. E se non è esteso nello spazio, allora dove si trova? Sembra logico supporre che se due anelli si sovrappongono in un punto, significa che gli altri punti si trovino *altrove*.

La forma della mappa concettuale si allontana e non sostituisce l'atto immaginativo, istintivo e intuitivo della vera visualizzabilità, non è quindi soddisfacente. Il numero sempre crescente di teorie *background independent*, invece, mostra come la fisica teorica stia facendo sua una voglia di indipendenza dalle immagini spazio-temporali. Per quanto tale desiderio non può eliminare del tutto la costruzione di immagini su uno sfondo di questo tipo, esso indebolisce la forza epistemologica del palcoscenico ritenuto essenziale da Schrödinger.

Heisenberg, d'altra parte, si soffermerebbe a chiedere se una particolare tale descrizione si basi solo ed esclusivamente sui fenomeni osservati, purtroppo ad oggi impossibili da ottenere per le teorie più avanzate, e quali sarebbero le conseguenze dei principi di base della teoria. Certo, forse è possibile "pensare in modo qualitativo alle conseguenze sperimentali della teoria in tutti i casi semplici", ma ciò renderebbe la teoria solo visualizzabile e non per forza vera. La mancanza di senso fisico dei presupposti teorici è ovviamente un problema per una teoria del genere, tuttavia, la porta rimane leggermente aperte per queste immagini completamente astratte che forse un giorno troveranno una spiegazione differente.

Bibliografia

- Boffi, S. (1990). *Quaderni di fisica teorica: il principio di indeterminazione*. Pavia: Università degli Studi di Pavia.
- Bohr, N. (1976). *Collected Works*. Amsterdam: Cambridge University Press.
- De Regt, H. W. (2020). *Understanding Scientific Understanding*. Oxford: Oxford University Press.
- Fano, V. (2004). Simultaneità e indeterminazione: istanze fisiche o epistemologiche? *Quanti Copenhagen? Bohr, Heisenberg e le interpretazioni della Meccanica Quantistica* (p. 21-35). Cesena: Il Ponte Vecchio.
- Favrholdt, D. (1992). *Niels Bohr's Philosophical Background*. Copenhagen: Springer.
- Feynman, R. P. (1949). Space-time approach to quantum electrodynamics. *Physical Review*, 76: 769-789.
- Feynman, R. P. (1985). *QED: The strange theory of light and matter*. Princeton, NJ: Princeton University.
- Gigerenzer, G. (2007). *Gut feelings: The intelligence of the Unconscious*. London: Penguin Books.
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschauliche Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43: 172-198.
- Heisenberg, W. (1969). Erinnerungen an die Zeit der Entwicklung der Quantenmechanik. In *Der Teil und das Ganze*. Monaco: Piper.
- Helhoski, S. J. (2020). *Canonical quantization & path integral formulation: a brief comparison*.
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Lancaster, T., & Blundell, S. J. (2014). *Quantum Field Theory for the Gifted Amateur*. Oxford: Oxford University Press.
- Meynell, L. (2008). Why Feynman Diagrams Represent. *International Studies in the Philosophy of Science*, 22:1, 39-59.

- Pais, A. (1986). *Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World*. New York: Oxford University Press.
- Pauli, W. (1979). *Wissenschaftlicher Briefwechsel, Vol. 1 1919-1929*. New York: Springer-Verlag.
- Reichenbach, H. (1944). *Philosophic foundation of Quantum Mechanics*. Los Angeles: Dover.
- Rovelli, C. (2008). A dialog on quantum gravity.
- Rovelli, C. (2009). *Che cos'è la scienza*. Milano: Mondadori.
- Rovelli, C. (2014). *La realtà non è come ci appare*. Milano: Raffaello Cortina Editore.
- Schrödinger, E. (1928). *Collected Papers on Wave Mechanics*. London: Blakckie & Sons.
- Schweber, S. (1994). *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger and Tomonaga*. Princetown, New Jersey: Princeton University Press.
- Unhlenbeck, G., & Goudsmit, S. (1925). Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons. *Naturwissenschaften*, 953-954.
- Weinberg, P. (2014). Niels Bohr and the Dawn of Quantum Theory. *Philosophical Magazine*.
- Wolff, J. (2014). Heisenberg's observability principle. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 45, 19-26.

Sitografia

- <https://www.ias.edu/ideas/2009/arkani-hamed-oconnell-feynman-diagrams>
- <https://www.wikipedia.com/> (voci varie)
- <https://www.treccani.it/> (enciclopedia e vocabolario, voci varie)
- https://sites.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/black_holes_picture/index.html

Indice delle figure

Figura 1.1. Il modello atomico di Bohr come mostrato in diversi libri scolastici. (Weinberg, 2014).....	11
Figura 1.2 Una delle immagini moderne più diffuse degli orbitali atomici dell'idrogeno.....	15
Figura 1.3 Schrödinger (sinistra) e Heisenberg (destra) ricevono il premio Nobel dal Re di Svezia (centro) nel 1933. Dall'archivio AIP E. Segré.....	18
Figura 1.4 Lo spin viene solitamente rappresentato nei testi di fisica e chimica come una sfera rotante. Fonte: https://chemistrygod.com/spin-quantum-number	20
Figura 1.5 Rappresentazione euristica del “cono di momento angolare” per una particella con spin $\frac{1}{2}$. Maschen - Own work, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17763199	24
Figura 1.6 Heisenberg e Bohr. Fermilab, U.S. Department of Energy, Public domain, via Wikimedia Commons	47
Figura 2.1 Uno dei diagrammi di Feynman originali. Physical Review 76, 772, 1949. Copyright 1949 by the American Physical Society	50
Figura 2.2 Possibili eventi descrivibili con un diagramma di Feynman. (Meynell, 2008, p. 43)	56
Figura 2.3 Tomonaga, Schwinger e Feynman. Foto dall'archivio della Fondazione Nobel.	65
Figura 2.4.	68
Figura 2.5 Due diverse spiegazioni, ondulatoria e corpuscolare per lo stesso fenomeno fisico.....	69
Figura 2.6 Grafo per una rete di spin e l'immagine “intuitiva” del quanto di spazio che rappresenta. (Rovelli, 2020).....	81
Figura 2.7 Diagramma di Penrose per l'intero universo.	89
Figura 2.8 Disegno prospettico, da J.D. Norton (sitografia).....	90

“If you expected science to give all the answers to the wonderful questions about what we are, where are we going, what the meaning of the universe is, and so on -- then I think you can easily become disillusioned and look for some mystic answer to these problems. How a scientist can take a mystic answer I don't know because the whole spirit is to understand... Well never mind that, I don't understand that. But anyhow, the way I think of what we are doing is; we are exploring, we are trying to find as much as we can about the world.” – Richard Feynman