



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FILOSOFIA, SOCIOLOGIA, PEDAGOGIA E PSICOLOGIA APPLICATA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

CORSO DI LAUREA IN FILOSOFIA

AVVENTURARSI IN UN MONDO SCONCERTANTE
La visione di Heisenberg della realtà quantistica

Relatore:

Ch.mo Prof. *Antonio Masiero*

Laureando:

Andrea Tomasi

Matricola n. 1199187

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Well, we are objects in a wind that stopped, is my view.

(Anne Carson, *Plainwater*)

We did not mean by "interpretation" to produce a picture of what nature really is. We doubted whether nature is really anything.

(Heisenberg, *AIP 1963: Session VII*)

Ringrazio di cuore il professor Marchetti per il suo prezioso e insostituibile contributo: gliene sono profondamente grato. Ringrazio il professor Masiero per la sua gentilissima disponibilità. Ringrazio i miei genitori per avermi sempre voluto bene, per essersi presi cura di me e per avermi sempre sostenuto nelle mie scelte. Ringrazio Vittoria per essere stata al mio fianco e per aver vivificato le mie giornate. Ringrazio Diego, Giovanni e Stefano per i loro attenti consigli. Ringrazio, infine, tutti i miei amici per avermi aiutato a migliorare come persona.

Indice

1. Introduzione	1
2. I concetti fondamentali per la descrizione di un sistema fisico quantistico	3
2.1 Le osservabili	3
2.1.1 Le osservabili in meccanica classica	3
2.1.2 Le osservabili in meccanica quantistica	4
2.2 Gli stati	6
2.2.1 Gli stati in meccanica classica	6
2.2.2 Gli stati in meccanica quantistica.....	7
2.3 Il principio di complementarità	9
2.4 La probabilità quantistica	12
3. Lo sviluppo del pensiero di Heisenberg circa la meccanica quantistica	17
3.1 Prima fase: positivismo logico, principio di osservabilità e comprensione di una teoria.....	18
3.2 Seconda fase: il dualismo onda-particella, il principio di complementarità, la limitata applicabilità dei concetti classici e il principio di indeterminazione.....	22
3.3 Terza fase: influenze kantiane, costitutività del linguaggio e un mondo di potenzialità.....	27
4. I concetti fondamentali della meccanica quantistica interpretati à la Heisenberg.....	35
4.1 Le osservabili à la Heisenberg	36
4.2 Gli stati quantistici à la Heisenberg	40
4.3 La probabilità quantistica à la Heisenberg	43
5. Conclusione.....	47
Bibliografia primaria.....	51
Bibliografia secondaria	52

1. INTRODUZIONE

Qualsiasi persona che si addentri nel mondo quantistico non può che rimanere sbigottita: entità che sfidano il senso comune, eventi che decostruiscono i concetti quotidiani, fenomeni che confutano la logica classica. Questo $\phi\alpha\tilde{\upsilon}\mu\alpha$ (angosciante stupore) che il mondo quantistico provoca non è prerogativa dei non esperti del settore: lo stesso Heisenberg confidò a Pauli che “one no longer knows what the words «wave» and «particle» mean” (Camilleri 2009: 68) e lo stesso Einstein borbottò “[j]edenfalls bin ich überzeugt, dass *der* nicht würfelt”.¹ Più ci si inoltra nella lettura dei testi sulla meccanica quantistica, più si rimane stupiti per la straordinarietà dei suoi fenomeni: entità il cui comportamento muta radicalmente appena le si misura, entità che misteriosamente agiscono in maniera simultanea a distanze astrali, entità che non hanno un corrispettivo nella fisica classica. Altro fattore di meraviglia è l’ordine di grandezza abitato per lo più da questo mondo avvincente: tra i $10^{-9} m$ e i $10^{-15} m$. Com’è riuscito l’umano a studiare questa regione della realtà? Come sono state formulate le teorie fisiche che le si riferiscono? Come bisogna interpretarle? Inoltre, la nostra comprensione quotidiana può catturare adeguatamente gli eventi del mondo quantistico? Oppure siamo approdati a una regione ontologica che mette in crisi i nostri concetti, modelli e logica classici?

Questa tesi nasce dallo $\phi\alpha\tilde{\upsilon}\mu\alpha$ che ho provato nell’affacciarmi sulla meccanica quantistica e dalle difficoltà di comprendere i fenomeni così bizzarri da essa descritti. Più nello specifico, questa tesi nasce dalla curiosità scaturita in me da Heisenberg, il quale inizialmente rifiutò in toto l’adozione di modelli classici per tentare di comprendere il mondo quantistico: visualizzare non significa comprendere, anzi, in ambito quantistico decreta l’incapacità di comprendere adeguatamente. Solo il formalismo matematico della meccanica quantistica avrebbe potuto fornire un certo grado di comprensione, ed egli propose un formalismo alquanto astruso, un formalismo imperniato sulle matrici infinito-dimensionali con numeri complessi. Questa tesi è, prima di tutto, un tentativo di comprendere ciò che mi era totalmente estraneo perché, in fondo, “l’esperienza è sempre anzitutto esperienza della negazione” (Gadamer 1960: 410). Se l’esperienza non mette sotto assedio i nostri pregiudizi, essa non è (qualitativamente) una vera esperienza.

¹ “Ad ogni modo, sono convinto che Egli non gioca a dadi” (trad. mia)

Nel primo capitolo sono esposti i concetti fondamentali per la descrizione matematica di un sistema fisico quantistico e, quando ritenuto utile, a questi sono contrapposti le rispettive accezioni per un sistema fisico classico. Questa contrapposizione è fatta con l'intento di porre enfasi sulle differenze tra i due formalismi e le rispettive conseguenze. Nel secondo capitolo, invece, riferendosi soprattutto al testo *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics* di Camilleri (Camilleri 2009), è proposta una ricostruzione storica del pensiero di Heisenberg circa la meccanica quantistica dagli anni '20 agli anni '50. Essa culmina con le nozioni di “a priori heisenberghiano”, di “costitutività del linguaggio”, di “quasi-trascendentalità del linguaggio” e di “potentia”. Durante questo capitolo si noterà la centralità della riflessione linguistico-epistemologica di Heisenberg, la quale determinerà crucialmente la sua posizione che è categorizzabile come “realismo strutturale epistemico”. Nel terzo e ultimo capitolo, adottando la nozione di “potentia” come filtro interpretativo è fornita un'interpretazione à la Heisenberg dei concetti principali per un sistema fisico quantistico, in precedenza esposti nel primo capitolo solamente in maniera formale. Infine, nella conclusione, basandosi su *Physics and Philosophy* del 1958 di Heisenberg (Heisenberg 2000) sono avanzate delle perplessità circa la reificazione della nozione di “potentia” in Heisenberg per come è stata delineata da Camilleri (Camilleri 2009).

2. I CONCETTI FONDAMENTALI PER LA DESCRIZIONE DI UN SISTEMA FISICO QUANTISTICO

2.1 Le osservabili

In fisica (classica e quantistica) si definisce “osservabile” una qualsiasi quantità fisica O che, in linea di principio, sia possibile misurare idealmente a un certo istante t_0 . Esempi di quantità osservabili sono la posizione, la quantità di moto, la forza, l’energia, lo spin.²

In un determinato sistema fisico A , per ogni quantità fisica osservabile O , si denomina “spettro $\sigma(O)$ dell’osservabile O ” l’insieme dei valori che possono risultare da una misura di O . Poiché le misure, effettuate in ambito sperimentale, sono numeri reali, $\sigma(O) \subseteq \mathbf{R}$.

2.1.1 Le osservabili in meccanica classica

Le osservabili fondamentali della meccanica classica sono la posizione x e la quantità di moto p . Esse possono essere considerate come fondamentali poiché, a partire da esse, è possibile derivare ogni altra osservabile di un sistema fisico classico come $f(x, p)$.

Per un sistema fisico in evoluzione le osservabili variano nel tempo con n gradi di libertà $x = (x_1, \dots, x_n)$ e $p = (p_1, \dots, p_n)$ e l’insieme dei valori che $f(x, p)$ può assumere è definito come $\sigma(f(x, p))$.

In meccanica classica le osservabili si contraddistinguono per avere certe proprietà, tra cui essere funzioni reali, avere uno spettro coincidente con il codominio delle funzioni a esse associate e formare un’algebra abeliana su \mathbf{R} , proprietà che prima dell’avvento della meccanica quantistica venivano considerate ovvie. In particolare, se un

² Si noti che, in filosofia, la nozione di “osservabile” ha un altro contenuto semantico. Mentre in fisica questo termine designa un’entità che può essere misurata, anche indirettamente, in filosofia designa un’entità che può essere percepita dall’essere umano senza un aiuto strumentale. Come esempio, si consideri come la carica elettrica di un elettrone sia “fisicamente” osservabile ma “filosoficamente” non osservabile. Al fine di evitare un’ambiguità terminologica, in questo lavoro il significato del termine verrà determinato in base al contesto di utilizzo.

sistema evolve nel tempo, tale evoluzione è descritta da una funzione reale che, nel formalismo hamiltoniano, è la funzione hamiltoniana H . Grazie a tale funzione si possono scrivere delle equazioni che permettono di determinare x_i e p_i per ogni istante t , ossia l'evoluzione dinamica del sistema fisico di riferimento. Avendo, infatti, le condizioni iniziali x_i^0 e p_i^0 , mediante $\dot{x}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}$ e $\dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial x_i}$ posso determinare il valore delle osservabili x_i e p_i del sistema fisico per ogni suo istante t . Poiché, date certe condizioni iniziali del sistema, x_i e p_i sono determinati precisamente dalle equazioni di Hamilton per ogni istante t , si intuisce come la meccanica classica fornisca una rappresentazione deterministica del mondo fisico: date certe condizioni iniziali di un sistema fisico, in base a certe leggi fisiche esso non può evolversi altrimenti.

Un'altra proprietà di un'osservabile classica O è la coincidenza tra $\sigma(O)$ e il codominio di f associata a O . Ciò significa che i valori dell'osservabile O ottenibili mediante misura sono gli stessi valori che la funzione f può assumere. Nel caso dell'osservabile posizione x , se $\sigma(x) = \text{Cod}(x)$, allora i valori misurabili di x coincidono con l'insieme dei valori che x può assumere.

Ultima principale proprietà delle osservabili classiche è la loro rappresentazione mediante un'algebra abeliana su \mathbf{R} , ossia a un'algebra commutativa su \mathbf{R} che permette di misurare il valore di più osservabili simultaneamente con precisione arbitraria senza che l'ordine di misurazione delle osservabili sia rilevante per il valore delle osservabili stesse. Ad esempio, nel caso di una palla in moto, se si volessero misurare le sue osservabili x e p su un campo graduato, osservandolo si riuscirebbe a ricavare il valore della sua posizione x e, conoscendo la massa m della palla, anche il valore della sua quantità di moto p allo stesso istante t_0 . Come è ovvio e banale nel nostro mondo quotidiano, l'atto osservativo per misurare x non modifica il valore di p . Formalmente si potrebbe affermare che $xp - px = 0$.

2.1.2 Le osservabili in meccanica quantistica

In meccanica quantistica non esistono osservabili fondamentali come nello scenario classico. Mentre un sistema fisico classico richiede solo la conoscenza dei valori delle due osservabili di posizione x e di quantità di moto p per poter essere

sufficientemente descritto dato che i valori delle altre osservabili possono venire derivati da queste, ciò non accade per un sistema fisico quantistico a causa della struttura assiomatica della meccanica quantistica stessa, la quale include relazioni di indeterminazione e una struttura probabilistica.

Inoltre, le osservabili quantistiche sono concettualizzate in maniera così diversa dalle osservabili classiche che le proprietà delle prime violano le “ovvie e banali” proprietà delle seconde. Le osservabili quantistiche, innanzitutto, non vengono rappresentate mediante funzioni reali bensì mediante operatori lineari che agiscono sui vettori stato di uno spazio vettoriale sul campo dei numeri complessi \mathbb{C} .

Lo spettro di un'osservabile quantistica $\sigma(O)$ coincide con gli autovalori degli operatori e, differentemente dalla meccanica classica, esistono numerose osservabili con spettro discreto, come ad esempio lo spin.

Secondo Heisenberg le osservabili – e, quindi, gli operatori lineari – sono descrivibili mediante matrici infinito-dimensionali con termini complessi. Una prima conseguenza rilevante di questa descrizione matematica è che, se non osservate, le osservabili quantistiche non assumono un valore determinato perché, non essendo delle funzioni, non assumono alcun valore.

Essendo il prodotto tra le osservabili un prodotto matriciale, esse non possono venire rappresentate mediante un'algebra abeliana. Da ciò segue che l'ordine di misurazione di un'osservabile quantistica è talvolta rilevante per il valore delle osservabili stesse. In ambito quantistico, infatti, esistono osservabili compatibili e osservabili incompatibili. Nel primo caso, supponendo che vogliamo misurare i valori dell'osservabile a e dell'osservabile b di uno stesso sistema fisico, l'ordine con cui si eseguono le misure è irrilevante perché la misura di a non comporta una modifica dello stato tale per cui il valore di b viene modificato simultaneamente. Nel secondo caso, invece, una misura di a comporta simultaneamente una modifica del valore di b . Ciò fu formalmente enunciato nel 1927 da Werner Heisenberg mediante il cosiddetto “principio di indeterminazione”. Tale principio afferma che, per le osservabili x e p appartenenti alla stessa dimensione,

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

Quest'equazione mostra che, nel caso della coppia di osservabili incompatibili posizione $a = x$ e quantità di moto $b = p$, tanto maggiore sarà la precisione della misura di a , tanto minore sarà la precisione della misura di b (e viceversa).³

2.2 Gli stati

Con “stato Σ ” di un sistema fisico A si definisce la caratterizzazione delle informazioni ottenibili sul sistema fisico A a un certo istante t_0 .

In base alla completezza dell'informazione fornita da uno stato si distinguono due tipi di stati. Si definisce “stato puro” uno stato con informazione massimale, ossia uno stato che fornisce tutte le informazioni ottenibili su un sistema fisico A a un istante t_0 . Si definisce “stato misto” uno stato con informazione non massimale su un sistema fisico A , ossia uno stato informativamente lacunoso.

2.2.1 Gli stati in meccanica classica

Come spiegato precedentemente, in meccanica classica le operazioni si effettuano sullo spazio delle fasi Ω , uno spazio $6n$ -dimensionale per n particelle dato dal prodotto cartesiano tra lo spazio di configurazione e lo spazio dei momenti.

Uno stato puro è descritto come un punto su Ω tale che $\Sigma = (x, p)$ perché, in principio, mediante le equazioni di Hamilton è possibile conoscere con certezza i valori delle osservabili di un sistema fisico A per ogni istante t . Definire lo stato Σ di un sistema fisico classico A come $\Sigma^A = (x^A, p^A)$ implica affermare che i valori delle osservabili classiche di posizione x e di quantità di moto p sono sufficienti per determinare lo stato di A . Conseguentemente, per determinare lo stato Σ di A in un qualunque istante t , fissate le condizioni iniziali x_0^A e p_0^A è sufficiente risolvere le sopraccitate equazioni di Hamilton in funzione di t .

A partire da queste condizioni iniziali – gli stati puri di riferimento –, è possibile determinare con certezza la traiettoria di A su Ω , ossia l'evoluzione passata e futura di A .

³ Per una più completa descrizione e spiegazione del principio di indeterminazione e per le sue conseguenze circa la struttura logica della teoria quantistica si veda il paragrafo “2.4 La probabilità quantistica”.

Poiché è possibile determinare uno stato operando su un altro e poiché ogni stato di un sistema fisico (classico) è interconnesso agli altri mediante leggi deterministiche, conoscendo almeno uno stato puro a un certo istante t_0 è possibile determinare con certezza ogni altro stato puro del sistema fisico di riferimento.

Uno stato misto, invece, essendo con informazione non massimale, viene descritto come distribuzione di probabilità $\rho(x, p) \geq 0$ su Ω tale che $\int_{\Omega} \rho(x, p) dx dp = 1$. Questa lacuna informativa viene classicamente interpretata come misura della nostra ignoranza.

2.2.2 *Gli stati in meccanica quantistica*

Uno stato puro è descritto dalla funzione d'onda Ψ . Essendo una funzione complessa, uno stato puro è rappresentato mediante un vettore di stato in uno spazio di Hilbert H . Essendo un vettore di stato, poiché si può applicare il principio di sovrapposizione, ogni vettore di stato può venire rappresentato come combinazione lineare di altri vettori di stato che appartengono allo stesso spazio vettoriale e, viceversa, due vettori di stato distinti appartenenti allo stesso spazio vettoriale possono essere sovrapposti formando così un altro vettore di stato. Come esemplificazione di ciò si ha che, tra due misure di un'osservabile con valori misurati a e b , un sistema fisico quantistico A può trovarsi in una sovrapposizione di stati Ψ_a^A e Ψ_b^A tale che $\Psi^A = \Psi_a^A + \Psi_b^A$.

L'inadeguatezza dello spazio delle fasi per rappresentare gli stati dei fenomeni quantistici venne compresa già a partire dalla soluzione di Planck del problema del corpo nero poiché egli dovette pesare statisticamente non i punti di Ω bensì delle celle di dimensione h , la costante peculiare del mondo quantistico. Inoltre, un altro motivo per rifiutare lo spazio delle fasi Ω come spazio di stato dove rappresentare uno stato quantistico consiste nella validità del principio di indeterminazione di Heisenberg $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$, il quale non permette una rappresentazione puntale di $f(x, p)$ a un istante t_0 . Infine, l'adozione dello spazio di Hilbert H piuttosto che dello spazio delle fasi Ω segue dalla descrizione di uno stato puro mediante la funzione d'onda Ψ .

È vero che, se il sistema non viene osservato, l'evoluzione di Ψ è deterministica poiché assume un determinato valore per ogni istante t ; tuttavia, tale evoluzione deterministica non permette l'assegnazione di determinati valori alle osservabili quantistiche.⁴ Proprio qui giace una profonda differenza con la meccanica classica: mentre in quest'ultima, in linea di principio, dato uno stato puro Σ di un sistema fisico A , si può determinare con certezza il valore risultante da ogni possibile misura di tutte le osservabili O^A , in meccanica quantistica questo non è possibile, nemmeno idealmente. Dato uno stato puro quantistico $\Sigma^A = \Psi^A$ di un sistema A , la conoscenza massimale sull'esito di una (possibile) misura di un'osservabile O^A con risultato della misura o è direttamente proporzionale a $|\Psi(o)|^2$, la quale fornisce, nel caso di osservabili con spettro discreto, la probabilità e, nel caso di osservabili con spettro continuo, la densità di probabilità di misurare il valore o di O^A nello stato descritto da Ψ^A .⁵ Eccetto che per rari casi in cui $|\Psi(o)|^2 = 1$, poiché nella maggioranza dei casi $0 \leq |\Psi(o)|^2 < 1$, la meccanica quantistica permette per lo più predizioni probabilistiche.⁶

Uno stato misto, invece, essendo informativamente lacunoso, è descritto da una mistura statistica di probabilità sulle funzioni d'onda Ψ . Si tratta di una profonda condizione di ignoranza perché, in aggiunta alla caratterizzazione probabilistica dello stato puro quantistico, lo stato misto quantistico aggiunge ulteriore incertezza probabilistica (epistemica) data dall'ignoranza di valori necessari per calcolare l'evoluzione del sistema fisico di riferimento A mediante Ψ .

⁴ Essendo infatti le osservabili quantistiche descritte da operatori lineari, esse non assumono alcun valore determinato (se non misurate).

⁵ Riconosciuta questa distinzione, d'ora in poi, rispetto al tipo di valori forniti da $|\Psi|^2$ ci si riferirà intercambiabilmente a "probabilità" e a "densità di probabilità" (eccetto per casi in cui tale distinzione è rilevante).

⁶ L'eccezione cui ci si riferisce è il caso in cui un'osservabile permanga nel suo autostato $|\alpha'\rangle$ nonostante delle misure vengano eseguite. Tuttavia, generalmente ogni misura di A comporta uno cambio dello stato tale che $|\alpha\rangle \rightarrow |\alpha'\rangle$.

2.3 Il principio di complementarità⁷

Verso la fine degli anni '30 gli studiosi disponevano di una serie di esperimenti che mostrano la miscelanea natura del mondo subatomico. Ad esempio, l'esperimento di Davisson-Germer mostrava la natura ondulatoria dell'elettrone e, al contrario, lo *scattering* Compton considerava l'interazione tra un fotone e un elettrone come un urto elastico tra due particelle la cui energia dipende dalle loro proprietà ondulatorie. Sulla scia di queste osservazioni sperimentali qualche scienziato iniziava a riferirsi all'elettrone come a una "wavicle" (Lederman, Hill 2013: 125).⁸

Un altro decisivo esperimento che mostrava tale dualismo fu l'esperimento della doppia fenditura eseguito in ambito quantistico. In successione da sinistra a destra, si considerino una sorgente di particelle quantistiche emesse singolarmente (ed esempio, degli elettroni), una lastra con due fenditure e uno schermo. Si osserva che, a patto che non si interferisca nell'esperimento, con entrambe le fenditure aperte gli elettroni si dispongono singolarmente sullo schermo secondo delle frange di interferenza, un tipico pattern conseguente a un fenomeno ondulatorio. Se si chiude una delle due fenditure, si osserva una disposizione degli elettroni in corrispondenza della fenditura aperta. Se ambedue sono aperte e se, presso una delle due fenditure, per localizzare il passaggio degli elettroni, si posiziona un apparato strumentale atto a misurare la loro posizione, essi si posizionano solo in corrispondenza della fenditura dentro cui sono passati, facendo così scomparire le frange d'interferenza.

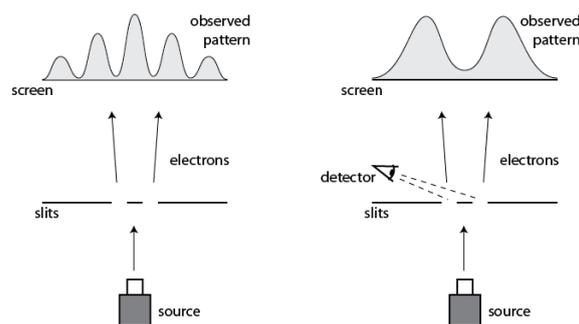


Figura 1

⁷ Poiché non rilevante per questo lavoro, non considererò lo sviluppo dell'interpretazione di Bohr del principio e proporrò, invece, la canonica narrazione di come putativamente Bohr intese questo principio. Per una descrizione della genesi e dello sviluppo di tale principio, cfr. *4. Complementarity* in Faye J., *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics* e "4.4 Heisenberg and Bohr: divergent views of wave-particle duality" in Camilleri K., *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics*.

⁸ Neologismo sincretico tra le parole *wave* e *particle*.

Come interpretare queste osservazioni? Sembra che gli elettroni, la cui natura fu già messa in crisi dall'ipotesi di de Broglie e dai precedenti esperimenti, assumano comportamenti diversi a seconda che vengano osservati o meno.⁹ Nel caso dell'esperimento appena esposto, se non vengono osservati, il loro comportamento è rappresentabile mediante il modello ondulatorio; al contrario, se osservati, il loro comportamento è rappresentabile mediante il modello particellare.

Una questione che si pone, quindi, è la seguente: perché due modelli teorici incompatibili descrivono adeguatamente i comportamenti di una stessa entità quantistica? Inoltre, anche supponendo che ambedue i modelli siano solo euristicamente utili, perché sono così predittivi? Questo potere predittivo è un argomento valido per l'adeguatezza empirica di tali modelli? Se sì, come è possibile che, ad esempio, un elettrone sia al contempo un'onda e una particella e che si comporti conseguentemente?

Sulle orme di de Broglie, nel 1927 Bohr rispose a questi problemi formulando il "principio di complementarità", il quale afferma che una stessa entità quantistica manifesta esclusivamente comportamenti ascrivibili a modelli teorici classici inconciliabili e che, tuttavia, tali modelli sono necessari per una completa descrizione di tale entità. In particolare, secondo Bohr il fulcro del problema consisteva nell'adozione di concetti della fisica classica, i quali sono delle specificazioni in ambito fisico di concetti quotidiani formati sulla base delle nostre categorie epistemiche, quali posizione, durata e causalità. Nel corso dei secoli, a partire da questi concetti prescientifici i fisici hanno formato dei concetti scientifici che hanno determinato un preciso framework interpretativo sul mondo fisico. Tale framework non è per niente innocuo e indifferente perché ha influenzato (e tuttora influenza) le modalità con cui sono stati ideati e costruiti gli apparati di misurazione. In altre parole, poiché ciò che riteniamo essere un fenomeno scientifico è influenzato dalle nostre modalità conoscitive, piuttosto che essere una descrizione vera del mondo naturale in quanto mondo naturale, la scienza è una modalità

⁹ Nel 1924 de Broglie ebbe questa intuizione: un elettrone può essere concettualizzato sia come una particella sia come un'onda. Poiché ormai la comunità scientifica aveva accettato che la luce presentava un dualismo ondulatorio-particellare, perché non avrebbe dovuto presentarlo anche l'elettrone? La constatazione di "un misterioso fenomeno con caratteri di periodicità" (Lederman, Hill 2013: 127) all'interno dell'atomo portò de Broglie a proporre la legge $\lambda = \frac{h}{p}$, mettendo così in relazione il modello ondulatorio e il modello particellare.

di come l'umano in quanto umano può esperire e studiare tale mondo. Anche se in riferimento al “principio di corrispondenza”, nel 1929 Bohr affermò che

[t]he necessity of making an extensive use ... of the classical concepts, upon which depends ultimately the interpretation of all experience, gave rise to the formulation of the so-called correspondence principle which expresses our endeavours to utilize all the classical concepts by giving them a suitable quantum-theoretical re-interpretation (Bohr 1961: 8)

Consapevole che i concetti classici non erano fisicamente adeguati al mondo quantistico e che, quindi, necessitavano di una reinterpretazione, ammetteva al contempo che non potevano essere totalmente eliminati dalla teoria quantistica in quanto condizioni di possibilità per la conoscenza (umana) di tali fenomeni. Non adottare i concetti classici reinterpretati, quindi, sarebbe equivalso a non comprendere la teoria. I concetti della fisica classica, infatti, possono essere considerati “oggettivi” non nel senso che forniscono una descrizione fisicamente adeguata del mondo bensì nel senso che sono

necessary in any description of physical experience in order to understand what we are doing and to be able to communicate our results to others, in particular in the description of quantum phenomena as they present themselves in experiments (Faye 2019)

L'adozione di concetti classici per descrivere e spiegare le entità subatomiche è uno stratagemma euristico utile a noi in quanto umani per poter conoscere (umanamente) tali entità e, conseguentemente, le proprietà che ascriviamo loro non sono intrinseche. Al contrario, oltre che dalle nostre modalità conoscitive, le loro proprietà sono determinate anche dall'interazione tra strumento di osservazione ed entità osservabile, i quali, secondo Bohr, sono da considerare come un unico sistema fisico. Di conseguenza, sperimentalmente si osserva che certe entità quantistiche hanno proprietà (apparentemente) contrastanti in base all'apparato di misurazione utilizzato perché è proprio l'unità costituita dallo strumento di misurazione e l'entità misurabile che determina la nostra conoscenza di certi fenomeni: l'osservazione fisica è sempre dipendente dal contesto. In generale, secondo Bohr tutte le osservazioni fisiche sono determinate da una dipendenza contestuale, tanto che la stessa “theory of relativity reminds us of the subjective character of all physical phenomena” (Bohr 1961: 116).

Conseguentemente, affinché venga fornita una descrizione completa e sensata dell'elettrone, esso è esclusivamente modellizzabile sia come onda sia come particella in

quanto noi lo esperiamo come tale, senza che ciò comporti che sia realmente così. Noi conosciamo come l'elettrone appare a noi in quanto umani e non come l'elettrone è in quanto elettrone.

2.4 La probabilità quantistica

Differentemente dalla fisica classica, in fisica quantistica la probabilità svolge un ruolo nevralgico, tanto che la cosiddetta “interpretazione di Copenhagen”¹⁰ la considera un elemento intrinseco del mondo quantistico, ossia tale probabilità non è conseguente a una nostra lacuna epistemica quanto piuttosto una proprietà costitutiva del mondo quantistico.

Secondo la fisica classica, la quale interpreta meccanicisticamente la dinamica dei sistemi fisici, il mondo fisico è deterministico poiché, come visto precedentemente, a partire da certe condizioni iniziali e da certe leggi fisiche, un sistema fisico non può comportarsi altrimenti. In altre parole, date certe condizioni iniziali, un sistema fisico classico non può evolversi diversamente da come si evolve e, nel caso dobbiamo affidarci a un metodo statistico (come, ad esempio, nel caso dello studio della dinamica di un gas), la distribuzione di probabilità $\rho(x, p) \geq 0$ su Ω attribuita allo stato misto Σ è specchio di una nostra lacuna conoscitiva. Il valore medio di un'osservabile $\langle O \rangle$ in uno stato misto $\Sigma = \rho(x, p)$ è, infatti, un valore che rispecchia solo una nostra conoscenza incompleta e imprecisa del sistema, mentre realmente l'osservabile O assume un determinato valore.

Al contrario, secondo la meccanica quantistica il mondo quantistico è probabilistico. Innanzitutto, secondo le relazioni di indeterminazione di Heisenberg, non essendo possibile conoscere con precisione arbitraria i valori di tutte le osservabili di un sistema fisico quantistico A in un istante t_0 , non è nemmeno possibile determinare l'evoluzione di A con certezza arbitraria perché uno stato puro quantistico contiene sempre un certo grado d'incertezza non appena eseguiamo una misura. Queste relazioni, anche se inizialmente formulate in ambito della teoria della misura, hanno un valore reale

¹⁰ Sebbene la sua esistenza storica come teoria unificata e consistente possa venire messa in discussione, nel racconto della storia della meccanica quantistica gli studiosi hanno raggruppato un insieme di giudizi, tesi e asserzioni sotto la nozione di “interpretazione di Copenhagen” come se fosse un'interpretazione comune, unificata e consistente tra certi fisici dell'epoca. Poiché una critica a questa nozione non è pertinente a questo lavoro e poiché ormai tale nozione appartiene tradizionalmente alla storia della fisica, mi sono riferito e mi riferirò a questa interpretazione collettiva come se fosse esistita realmente come tale.

nel mondo quantistico, come nel caso del quantum tunnelling.¹¹ Inoltre, per il principio di sovrapposizione dei vettori di stato, potendo uno stato quantistico essere sempre il risultato di una somma vettoriale di altri vettori di stato, le osservabili di A non hanno un determinato valore se non nel momento in cui vengono misurate. Inoltre, il valore misurato di un'osservabile quantistica O può essere predetto solo statisticamente mediante la probabilità data da $|\Psi|^2$.

Nel primo caso, l'impossibilità di una conoscenza simultanea e precisa dei valori di osservabili incompatibili in un sistema fisico quantistico fu esposta nel 1927 da Werner Heisenberg, il quale fu il primo a proporre una “*generalized probabilistic interpretation of quantum mechanics*” (Camilleri 2009: 69). Si consideri una particella quantistica. Se si accetta il principio di complementarità di Bohr, se si vuole localizzare una particella quantistica, essa può essere concettualizzata anche come “wave packet” (Heisenberg 1949: 13). Tale pacchetto d'onda, poiché limitato spazialmente, può essere localizzato in un intervallo spaziale Δx a un certo istante t_0 . Se una particella quantistica può essere paragonata a un ente ondulatorio, per costruire tale pacchetto d'onda serviranno diverse lunghezze d'onda e , secondo la teoria ondulatoria classica, più stretto è il pacchetto, più lunghezze d'onda occorrono per riprodurlo. Considerando le leggi dell'ottica e l'ipotesi di de Broglie $\lambda = \frac{h}{p}$, Heisenberg ne concluse la prima relazione di indeterminazione:

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

Tale relazione afferma che la posizione e la quantità di moto di una particella quantistica non possono venire misurati simultaneamente con precisione arbitraria. A differenza dello scenario classico in cui un osservatore può misurare la posizione e la quantità di moto di una particella simultaneamente e con la massima precisione possibile, nello scenario quantistico ciò non è possibile perché, minore sarà l'incertezza della posizione Δx , maggiore sarà quella relativa alla quantità di moto Δp (e viceversa). Ciò

¹¹ Il quantum tunnelling è un fenomeno impossibile per la meccanica classica, ma solo improbabile per la meccanica quantistica. Fenomeno presente nel nucleo del Sole ed essenziale per la costruzione di microscopi ad effetto tunnel e le giunzioni Josephson, consiste nella possibilità per un'entità quantistica di attraversare una barriera di potenziale.

¹² Heisenberg propose anche una seconda relazione di indeterminazione $\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$, la quale pone in relazione di indeterminazione il tempo di una particella quantistica e la sua energia.

comporta che, per un sistema quantistico, è impossibile conoscere con precisione arbitraria i valori di tutte le sue osservabili in un qualsiasi istante t .

Questa indeterminazione è tradizionalmente spiegata come conseguenza dell'atto di misura: per poter misurare una certa osservabile, l'atto stesso di misurarla perturba il sistema quantistico modificandone un'altra ad essa incompatibile. La perturbazione non è dovuta a un nostro limite strumentale bensì “è un effetto intrinseco alla misura, che deriva dalla natura ondulatoria della materia” (Mazzoli 2021: 718). Oltre alla tradizionale interpretazione fondata sulla teoria della misura, è rilevante sottolineare che, se queste relazioni di indeterminazione non descrivessero uno stato di cose indipendente dall'atto di misura, certi fenomeni, come l'effetto tunnelling, non avverrebbero. Conseguentemente, poiché sono le entità quantistiche stesse a essere indeterminate, i loro comportamenti presentano un carattere probabilistico.

Ad ogni modo, è interessante precisare che, mentre inizialmente Heisenberg optò per la classica interpretazione del disturbo della misura, dal 1930 si apprestò a sottolineare che

[t]his uncertainty relation specifies the limits within which the particle picture can be applied. Any use of the words “position” and “velocity” with an accuracy exceeding that given by equation is just as meaningless as the use of words whose sense is not defined (Heisenberg 1949: 15)

Nel secondo caso, un altro motivo dell'impossibilità di determinare con certezza l'evoluzione del sistema è stata esposta nel 1926 da Max Born, il quale propose un'interpretazione probabilistica della funzione d'onda di Schrödinger per risolvere il problema della diffusione dell'elettrone dopo una collisione con un atomo. Come egli sostenne più generalmente negli articoli successivi, dato un certo stato Ψ di un sistema A , fornendo Ψ solo informazioni statistiche, è impossibile dedurre con certezza il valore delle osservabili di A . A partire da Ψ è possibile avere solo una conoscenza probabilistica delle sue osservabili, più precisamente il modulo quadro della funzione d'onda $|\Psi(o)|^2$ fornisce la probabilità relativa al valore o di un'osservabile O^A in un istante t_0 .¹³ Ciò rappresentò un'importante rottura con la teoria fisica classica perché incluse la probabilità

¹³ Si noti che, inizialmente, Born riteneva che una particella quantistica avesse posizione e quantità di moto definite per ogni istante. Il carattere probabilistico della teoria, quindi, veniva da lui descritto come conseguenza del nostro operare sugli stati puri, i quali forniscono solo informazioni probabilistiche.

come “componente essenziale di una teoria fisica” (Lederman, Hill 2013: 140). Appariva, quindi, che la natura giocasse a dadi.

Tuttavia, tale interpretazione non era esplicativa rispetto a una serie di esperimenti, tra cui il sopraccitato esperimento della doppia fenditura, il quale con entrambe le fenditure aperte mostra un misterioso fenomeno di interferenza, fenomeno non spiegabile classicamente. Per risolvere questo problema venne proposta una soluzione che diventerà “la dottrina centrale dell’interpretazione di Copenhagen” (van Fraassen 1985: 219): il modulo quadro della funzione d’onda $|\Psi(o)|^2$ fornisce la probabilità (o la densità di probabilità) relativa al valore misurato o di O^A a un istante t_0 . Secondo questa interpretazione, un’osservabile quantistica O non assume alcun valore eccetto che nel momento in cui viene misurata.

A tal riguardo, Bohr propose una successiva interpretazione sconcertante: possiamo calcolare solamente la probabilità (o la densità di probabilità) dei valori delle osservabili di una particella quantistica perché, essendo questi determinati dall’unità strumento-particella, prima e dopo della misura le osservabili non hanno alcun valore di realtà. È l’apparato di misura stesso che, mediante il cosiddetto “collasso d’onda”, durante l’osservazione determina un certo valore per l’osservabile misurata, la quale prima dell’osservazione è in una sovrapposizione di stati. Per quanto controintuitivo possa apparire, secondo Bohr il mondo quantistico stesso è intrinsecamente probabilistico, ossia esso stesso non ha un valore di realtà. Tale interpretazione diventerà un altro caposaldo dell’interpretazione di Copenhagen.

3. LO SVILUPPO DEL PENSIERO DI HEISENBERG CIRCA LA MECCANICA QUANTISTICA

In questa sezione, basandomi in particolar modo sull'interpretazione proposta da Camilleri in *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics* (2009), esporrò una ricostruzione storica del suo pensiero filosofico in ambito quantistico dalla metà degli anni '20 fino agli anni '50. Gli anni successivi non verranno presi in considerazione perché durante questi Heisenberg si dedicò alla costruzione della teoria del campo unificato, teoria che esorbita dagli interessi di questa tesi.

Prima di descrivere lo sviluppo del suo pensiero, onde evitare un'eventuale critica per una supposta ricostruzione a macchia di leopardo non consistente, è importante ricordare che Heisenberg non adottò un'unica posizione filosofica vita natural durante e che la sua attenzione teoretica venne fortemente influenzata dagli ambienti scientifico e filosofico a lui coevi e dalle loro tendenze. Inoltre, benché tale tema non verrà trattato poiché esorbita dai propositi della tesi, è rilevante accennare al carattere dialogico del pensiero di Heisenberg, il quale spesso mutò opinione a seguito di incontri o esperienze epistolari con rilevanti personalità dell'epoca, quali Bohr, Born, Einstein, Pauli, Schrödinger, Schlick e Weizsäcker.

Il pensiero di Heisenberg può essere, per sommi capi, suddiviso in tre fasi. Nella prima fase (1925-1927), maggiormente influenzato dal positivismo logico e dai suoi principali crucci, affrontò temi come il principio di osservabilità e la comprensione di una teoria scientifica. Nella seconda fase (1927-1930) approdò all'opinione che fosse impossibile interpretare adeguatamente il mondo quantistico mediante i concetti classici della fisica e che fosse inadeguato, anche se necessario per la nostra conoscenza fisica in quanto conoscenza umana, il proposito espresso da Bohr nel 1929, ossia “to utilize all the classical concepts by giving them a suitable quantum-theoretical re-interpretation” (Bohr 1961: 8). Durante questa fase, proprio per la consapevolezza della nostra chiusura empirico-cognitiva rispetto ai fenomeni quantistici, si soffermò sulle nozioni di “dualità particella-onda”, “indeterminazione” e “limitata applicabilità” e consolidò la sua interpretazione della meccanica quantistica, la quale è riconducibile a un realismo strutturale epistemico. Nella terza fase (dagli anni '30 e agli anni '50), confrontandosi con l'epistemologia kantiana, fornì una reinterpretazione personale della nozione di “a priori”

fondata su una sua pragmatizzazione e storicizzazione. Sempre durante lo stesso periodo avanzò l'ipotesi della costitutività del linguaggio per la conoscenza umana. A seguito di queste riflessioni, secondo l'interpretazione di Camilleri, Heisenberg giunse alla conclusione che il mondo quantistico non osservato non è oggettivamente reale bensì che, al contrario, è una regione ontologica costituita da potenzialità in cui il nostro concetto di esistenza, tratto dal mondo quotidiano, non è fisicamente adeguato.

3.1 Prima fase: positivismo logico, principio di osservabilità e comprensione di una teoria

Nel 1925 Heisenberg pubblicò un articolo scientifico intitolato “Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen” il cui scopo era “Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist” (Heisenberg 1925: 879).¹⁴ All'inizio di questo propose ciò che verrà successivamente coniato come “principio di osservabilità”, il quale è canonicamente espresso con il bicondizionale “se e solo se una quantità fisica α può essere osservata in principio, allora può venire inclusa in una teoria”.¹⁵ Di conseguenza, l'inclusione di sole quantità misurabili in principio diverrebbe condizione sufficiente e necessaria per una spiegazione scientifica tale che possa essere ritenuta epistemicamente soddisfacente. Tradizionalmente venne interpretato come un principio metodologico di stampo empirista sfruttato da Heisenberg per giungere all'eliminazione dell'orbita degli elettroni e, quindi, come un evidente indizio dell'appartenenza di Heisenberg al positivismo logico, essendo quest'ultimo una corrente filosofica di stampo empirista.

Tuttavia, una più attenta lettura degli scritti di Heisenberg rivela una sua diversa natura. Dalla ricostruzione storica proposta da Camilleri (Camilleri 2009: 17-26) si evince che tale putativo principio venne aggiunto all'articolo solo dopo aver dedotto formalmente l'eliminazione dell'orbita dell'elettrone dalla teoria della meccanica

¹⁴ “acquire delle basi per una meccanica quantistica, la quale si basa esclusivamente su relazioni tra grandezze osservabili in principio” (trad. mia)

¹⁵ In questa sezione si utilizzerà la nozione scientifica di “osservabile”. Si legga, quindi, “osservata” come sinonimo di “misurata”.

matriciale. Il cosiddetto “principio di osservabilità”, quindi, sarebbe stato aggiunto ex post facto come ulteriore giustificazione. Inoltre, piuttosto che essere un principio metodologico, dovrebbe essere interpretato come una *rule of thumb*, come una regola euristica dettata dall’esperienza. Essendo la teoria della meccanica quantistica allora in uno stadio germinale, l’intenzione di Heisenberg era di diminuire il rischio di includere entità e proprietà scientifiche fittizie, magari originate da pregiudizi e aspettative teorici, perché avrebbero reso più problematica la formulazione della nuova teoria. Come egli stesso e Born affermarono nel congresso Solvay del 1927 a Bruxelles

[...] when a system of concepts is itself still unknown, quite naturally one is interested only in the observations themselves without drawing conclusions, because otherwise false ideas and prejudices would thwart the understanding of physical relations. (Ibidem: 33)

Tale approccio pragmatico alla nozione di “osservabilità” fu corroborato anche da una conversazione che ebbe con Einstein nel 1926 a Berlino. Poiché Einstein convinse Heisenberg che “it is the theory which decides what we can observe” (*Ibidem*: 32), sarebbe stato irragionevole determinare le osservabili in principio quando la teoria era ancora incompleta. L’osservabilità, infatti, è una nozione il cui dominio semantico viene determinato dai concetti impiegati da una teoria completa. Ad esempio, benché inizialmente non misurabile, successivamente la carica elettrica di un elettrone fu considerata una quantità in principio osservabile perché poteva essere calcolata indirettamente mediante la misurazione della curvatura della traiettoria di un elettrone nella camera a nebbia di Wilson e mediante l’utilizzo di regole dell’elettromagnetismo classico. Conseguentemente, la nozione di “osservabilità” non dovrebbe svolgere un ruolo epistemico egemone durante il lavoro di costruzione di una teoria.

A seguito dell’incompletezza della nuova teoria dei quanti e del suo approccio pragmatico-empirista, Heisenberg depotenziò la nozione di “comprensione di una teoria scientifica” quando questa è ancora in uno stadio iniziale. A differenza di un approccio classico come quello adottato da Schrödinger, secondo cui “comprendere una teoria” significa visualizzare il fenomeno mediante una descrizione spaziale e temporale, Heisenberg sostenne che, allo stadio iniziale di una teoria, si potesse pretendere solo una “conoscenza intuitiva” che consiste semplicemente nel “predicting experiments” (AIP 1963: Session VII) e nell’assicurarsi che la teoria sia consistente. Durante questo periodo

Heisenberg opinava che la visualizzazione dei fenomeni quantistici non fosse rilevante nella costruzione della teoria perché solo dopo il suo completamento si sarebbe potuto giungere a una sua comprensione non intuitiva dato che sarebbe stata la teoria completa stessa a fornire il suo dominio di osservabilità e i suoi modelli. Come affermato anche da Pauli nel 1924, “[w]hen the system of concepts is once clarified, then there will be a new visualization” (Camilleri: 52).¹⁶

Bisognerebbe, quindi, considerare il primo Heisenberg uno strumentalista? Una lettura parziale ci convincerebbe di ciò. Tuttavia, bisogna sottolineare che le riflessioni formulate da Heisenberg circa il principio di osservabilità e la nozione di “comprensione di una teoria” riguardavano una teoria scientifica in fieri, ossia una teoria scientifica che non presenta ancora una struttura assiomatica completa. Al contrario, l’impegno ontologico, semantico ed epistemico di Heisenberg mutava carattere nel momento in cui si riferiva a una teoria completa (o, come denominata da lui, una “abgeschlossene Theorie”). Una teoria fisica chiusa è una teoria fisica che, valida per una certa regione ontologica, presenta un semplice e “internally consistent set of axioms and definitions expressed in mathematical equations representing the relations existing between the theory’s concepts” (*Ibidem*: 122).

Negli anni successivi Heisenberg propose quattro esempi di teorie fisiche chiuse: la meccanica newtoniana, la termodinamica statistica, l’elettrodinamica relativistica e la meccanica quantistica. Nei loro confronti Heisenberg ritenne che i loro enunciati si riferissero a entità e a relazioni esistenti nel mondo e che, tuttavia, il loro significato non cogliesse totalmente le entità di riferimento (se non in maniera formale). Mediante una teoria fisica, infatti, possiamo riferirci a entità ontologicamente indipendenti e formulare degli enunciati matematici su di loro senza concettualizzare la loro natura secondo verità. La domanda sulla natura di un’entità è una domanda scientificamente priva di senso. In effetti, lo scopo della fisica non è scoprire la natura delle sue entità quanto piuttosto cogliere la struttura (matematicamente interpretabile) che le relaziona, la quale “reveal a genuine feature of nature” (*Ibidem*: 56). Con le parole di Heisenberg, “[d]ie Physik soll

¹⁶ È rilevante ricordare che, tuttavia, negli anni successivi, quando Heisenberg considerò la meccanica quantistica come una teoria completa, giunse alla conclusione che la visualizzazione dei fenomeni quantistici costituisse una fase epistemica in un certo senso necessaria e, al contempo, vana. A tal proposito si faccia riferimento alla sezione 3.2 *Seconda fase: il dualismo onda-particella, il principio di complementarità, la limitata applicabilità dei concetti classici e le relazioni di indeterminazione*.

nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben” (Heisenberg 1927: 197).¹⁷

Nel momento in cui interpretiamo una teoria fisica come vera, secondo Heisenberg, il nostro impegno ontologico deve essere limitato solo ai referenti dei concetti fisici adottati dal formalismo matematico della teoria e alla struttura, descritta formalmente dalla teoria, che li include. Inoltre, i nostri impegni semantico ed epistemico si devono limitare alla struttura matematica della teoria, che è specchio veridico delle relazioni tra i referenti. È vero che le entità cui la teoria si riferisce esistono indipendentemente dal mentale, ma è altresì vero che la teoria non può fornire una conoscenza vera per come esse sono *sub specie aeternitatis*.¹⁸

Sulla base di quanto affermato finora la posizione di Heisenberg può essere categorizzata come “realismo strutturale”. Infatti, date le nostre migliori teorie scientifiche, il realismo strutturale considera come oggettivamente esistenti le relazioni da loro catturate (la struttura invariante) e le rispettive *relatae* (le entità scientifiche). In altri termini,

il successo della scienza non dev'essere ascritto alle sue affermazioni in merito all'esistenza di specifiche entità teoriche e a loro particolari caratteristiche, ma alla capacità di isolare ed esprimere in termini matematici relazioni oggettive tra fenomeni. (Galavotti, Campaner 2018: 134)

Più specificatamente, l'interpretazione di Heisenberg è caratterizzabile come “realismo strutturale epistemico”. Di matrice neokantiana, i sostenitori di tale realismo sostengono che, benché le relazioni siano relazioni tra entità, poiché l'umano non può avere un accesso epistemico diretto e adeguato alle entità, la loro natura non è umanamente conoscibile. In altre parole, nella sua versione più soft, nonostante le entità postulate dalle teorie scientifiche esistano oggettivamente, “[w]e cannot know the individuals that instantiate the structure of the world but we can know their properties and relations” (Ladyman 2020: 3).

¹⁷ “La fisica dovrebbe solo descrivere formalmente la connessione tra le percezioni fenomenologiche” (trad. mia).

¹⁸ Una più dettagliata motivazione di questa chiusura linguistico-epistemica rispetto alla regione quantistica verrà fornita nel paragrafo 3.3 *Terza fase: influenze kantiane, costitutività del linguaggio e un mondo di possibilità*.

Solo alla luce di questo realismo strutturale epistemico si possono interpretare correttamente le seguenti affermazioni di Heisenberg

Die Aussage, dass etwa die Geschwindigkeit in der X-Richtung „in Wirklichkeit“ keine Zahl, sondern Diagonalglied einer Matrix sei, ist vielleicht nicht abstrakter und unanschaulicher, als die Feststellung, dass die elektrische Feldstärke „in Wirklichkeit“ der Zeitanteil eines antisymmetrischen Tensors der Raumzeitwelt sei. Das Wort „in Wirklichkeit“ wird hier ebenso sehr und ebenso wenig berechtigt sein, wie bei irgend einer mathematischen Beschreibung natürlicher Vorgänge. (Heisenberg 1927: 196)¹⁹

3.2 Seconda fase: il dualismo onda-particella, il principio di complementarità, la limitata applicabilità dei concetti classici e il principio di indeterminazione

Gli anni tra il 1926 e il 1929 furono cruciali per lo sviluppo dell'interpretazione di Heisenberg della meccanica quantistica. Proprio in quegli anni, infatti, soprattutto l'esperienza dialogica con Bohr lo spronò, per analogia e per contrasto, a formulare coerentemente e a delineare con maggiore chiarezza la sua posizione. I temi maggiormente dibattuti furono il dualismo onda-particella, il principio di complementarità, il principio di indeterminazione e la limitata applicabilità dei concetti classici.

La differenza principale tra Heisenberg e Bohr era la metodologia di ricerca in ambito quantistico. Bohr preferiva inferire nuovi concetti e leggi a partire dalle evidenze sperimentali, mentre Heisenberg a partire dalle conseguenze formali degli assiomi matematici della teoria dei quanti. Si noti, infatti, che questo suo interesse verso il formalismo logico-matematico della teoria quantistica era già presente negli anni precedenti, quando ad esempio dedusse l'eliminazione dell'orbita degli elettroni dagli assiomi della meccanica matriciale.

¹⁹ “Forse l'affermazione che la velocità [dell'elettrone] nella direzione X ‘realmente’ non è alcun numero bensì la componente diagonale di una matrice non è più astratta e meno immaginabile rispetto alla constatazione che il campo elettrico ‘realmente’ è la parte temporale di un tensore antisimmetrico del mondo spaziotemporale. L'utilizzo della parola ‘realmente’ viene qui giustificato come in una qualsiasi descrizione matematica dei fenomeni naturali.” (trad. mia)

Tale differenza metodologica sarebbe stata determinante per fornire una spiegazione degli strani e miscelanei comportamenti delle entità quantistiche, le quali in contesti sperimentali assumevano in maniera esclusiva comportamenti ascrivibili a modelli teorici differenti (e, quindi, anche a osservabili differenti): in certi casi erano rappresentabili mediante il modello corpuscolare e in altri mediante il modello ondulatorio. Tale ambiguità rese gli scienziati dell'epoca molto confusi e inquieti, tanto che Heisenberg confidò a Pauli che “one no longer knows what the words «wave» and «particle» mean” (Camilleri 2009: 68). Inoltre, nel 1926 essa venne esacerbata dalla formulazione della meccanica ondulatoria di Schrödinger, la quale interpretava l'elettrone come un'onda stazionaria intorno al nucleo, in contrasto con il modello particellare (non classico) fornito dalla meccanica matriciale di Heisenberg. La questione, in poche parole, era questa: come concettualizzare in maniera completa e fisicamente adeguata l'elettrone e, più in generale, le entità della nuova teoria dei quanti, le quali mostravano un certo inspiegabile “degree of reality” (*Ibidem*: 66)?

Inizialmente Heisenberg riteneva l'elettrone una particella il cui comportamento era determinato da leggi di una cinematica non classica e considerava il modello particellare come il modello più fondamentale. Tale opinione si fondava sulla presupposizione che la materia non potesse essere rappresentata da una teoria ondulatoria perché quest'ultima non sarebbe stata in grado di spiegare la transizione dalla micro-meccanica alla macro-meccanica. Inoltre, nel 1926 la sua opinione venne corroborata dall'ipotesi di Born che la funzione d'onda Ψ all'istante t_0 fosse solo uno strumento matematico utile il cui modulo quadro $|\Psi(x_0)|^2$ fornisce la probabilità di trovare un elettrone in una posizione x_0 all'istante t_0 nello spazio configurazionale. Heisenberg si avvalse di tale interpretazione probabilistica di Ψ come prova ulteriore per la tesi che il pacchetto d'onda, invece di avere un valore di verità come rappresentazione veritiera dell'elettrone, avesse solo un valore strumentale.

Heisenberg dovette però mutare opinione perché nel 1926 Schrödinger dimostrò l'equivalenza matematica tra meccanica matriciale e meccanica ondulatoria, il che minava il primato dell'interpretazione particellare degli assiomi della teoria quantistica. Inoltre, in ambito della teoria quantistica dei campi, tra il 1927 e il 1928, sulla scia della nozione di “onda quantizzata” introdotta da Dirac, una serie di articoli scientifici pubblicati da Jordan, Klein e Wigner dimostrò che “the mathematical scheme [of quantum

theory] can be interpreted not only as a quantization of particle motion but also as a quantization of three-dimensional matter waves” (Heisenberg 2000: 87). Secondo Heisenberg questi articoli minavano la credenza che il modello particellare fosse il modello fondamentale della materia. Heisenberg si convinse, quindi, che fosse possibile concettualizzare l’elettrone sia come particella (non classica) sia come onda (non classica) e che, piuttosto che ritenere tale ambiguità del mondo quantistico come un dualismo, sarebbe stato preferibile ritenerla un’equivalenza perché “there is no reason to consider these matter waves as less real than the particles” (*Ibidem*: 87).

Questo significa, quindi, ammettere che l’elettrone è sia una particella (non classica) sia un’onda (non classica)? Sulla base di quanto esposto nel paragrafo precedente circa l’impegno filosofico di Heisenberg verso la teoria quantistica, la risposta è negativa. Infatti, affermare che v’è una “complete equivalence of wave and particle pictures in quantum mechanics” (Camilleri: 78) per la descrizione e spiegazione dei comportamenti di un elettrone non equivale, secondo Heisenberg, a impegnarsi ontologicamente per un’entità “elettrone” intesa come reale ibridazione dei due modelli bensì a impegnarsi semanticamente ed epistemicamente che le relazioni matematiche catturate grazie a questi modelli (non classici) rispecchiano secondo verità le relazioni presenti nel mondo quantistico. Questa equivalenza è da intendersi solo in maniera strutturale, senza quindi un impegno ontologico circa una determinata caratterizzazione della natura dell’elettrone. In definitiva, se si vuole caratterizzare correttamente la posizione di Heisenberg, parlare di dualismo onda-particella sarebbe inesatto e impreciso perché, piuttosto che una complementare dualità ontologica, Heisenberg propose un’equivalenza struttural-interpretativa: da una parte, dai due modelli opportunamente modificati possono essere dedotte equazioni vere e matematicamente equivalenti; dall’altra parte, e come conseguenza, è possibile interpretare gli assiomi fondamentali della meccanica quantistica mediante ambedue i modelli perché, se opportunamente modificati, permettono una (pur sempre limitata) comprensione più intellegibile per l’umano di ciò che è stato formulato.²⁰

²⁰ Con “propriamente modificati” mi riferisco alle modifiche quantistiche applicate ai due modelli classici. Ad esempio, il modello classico della particella venne modificato da Heisenberg perché il moto di una particella quantistica non possiede una traiettoria ben definita dato che anche la sua posizione e la sua quantità di moto non lo sono per il principio di indeterminazione. Similmente, il modello classico dell’onda venne modificato da Jordan e Klein perché un’onda quantistica non possiede un’ampiezza ben definita.

È ovvio che, tuttavia, l'essere sensato non implica l'essere fisicamente adeguato. Secondo Heisenberg, in ambito della meccanica matriciale un elettrone può essere sensatamente modellizzato come una particella la cui posizione e quantità di moto non sono ben definite se non misurate. Al contempo, secondo il formalismo della teoria quantistica dei campi, un elettrone può essere sensatamente modellizzato come un'onda di materia quantizzata.²¹ Lo scopo di tale modellizzazione – l'interpretazione empirica del formalismo matematico della teoria – non è di descrivere adeguatamente la natura dell'elettrone bensì di rendere agli umani maggiormente comprensibile quello che accade in una regione ontologica empiricamente non raggiungibile da loro e che, forse, non può essere adeguatamente conosciuta in quanto le forme a priori dell'intelletto umano e, conseguentemente, il linguaggio umano si sono evolutivamente formati per interagire con il quotidiano mondo macroscopico. Infatti, in un saggio del 1930 Heisenberg afferma che

it is obvious that a thing cannot be a form of wave motion and composed of particles at the same time. [...] The solution of this difficulty is that the two mental pictures which experiments lead us to form – the one of particles, the other of waves – are both incomplete and have only the validity of analogies which are accurate only in limiting cases. [...] yet they may be justifiably used to describe things for which our language has no words. Light and matter are both single entities, and the apparent duality arises in the limitations of our language. (Heisenberg 1949: 10)

Di conseguenza, si può già intuire che, quando Heisenberg affermava di credere nella validità del principio di complementarità, egli non si riferiva al principio esposto da Bohr durante la conferenza di Como del 1927. Quest'ultimo, infatti, inizialmente espose il principio di complementarità come una modalità per caratterizzare in maniera completa una stessa entità quantistica. In contesti mutualmente esclusivi, un elettrone può essere modellizzato o come onda o come particella e, quindi, il significato delle osservabili adottate – quali posizione x , quantità di moto p , frequenza ν , ampiezza A – viene determinato in base al contesto sperimentale. Al contrario, come affermato precedentemente, secondo Heisenberg modellizzare un'entità quantistica in tal modo è inadeguato perché ci è impossibile modellizzarla per come è e, conseguentemente, il significato delle osservabili classiche in meccanica quantistica rimane oscuro e ambiguo.

²¹ In questa tesi non si discuterà della teoria quantistica dei campi perché è un argomento eccessivamente specialistico per questo lavoro.

L'interpretazione "heisenberghiana" del principio di complementarità, infatti, non riguarda la complementarità dei sopraccitati concetti classici bensì le modalità descrittive in meccanica quantistica. In meccanica classica esistono due modalità descrittive che sono sovrapponibili: il principio di causalità, ossia "the idea that natural phenomena obey exact laws" (Heisenberg 1949: 62), e il principio di oggettività, ossia l'idea che tutti i fenomeni naturali sono descrivibili "as relations between objects existing in space and time" (*Ibidem*: 63). I fenomeni fisici classici sono infatti descritti e spiegati mediante relazioni causali in termini di spazio e tempo. In meccanica quantistica, invece, queste due modalità descrittive non sono equivalenti perché "[t]hey represent complementary and mutually exclusive aspects of atomic phenomena" (*Ibidem*: 64). I fenomeni fisici quantistici sono descritti e spiegati o in termini di spazio e tempo ma non causalmente o mediante leggi causali (ossia, mediante Ψ) ma senza dei riferimenti spaziali e temporali. Più precisamente, un sistema fisico quantistico evolve in maniera deterministica in accordo con l'evoluzione di Ψ e, nel momento in cui s'interagisce con esso per misurare una sua osservabile, s'interrompe l'evoluzione deterministica di Ψ introducendo elementi di incertezza nello stato del sistema in accordo con le relazioni di indeterminazione. Complementarmente, è possibile lasciare che il sistema evolva causalmente secondo Ψ , abbandonando però l'intenzione di descriverlo in termini di spazio e di tempo poiché Ψ evolve in uno spazio di Hilbert spesso di dimensionalità infinite, il che è impossibile da interpretare come spazio reale. Heisenberg suggerisce che tale complementarità, essendo conseguente all' "indeterminateness of the concept 'observation'" (*Ibidem*: 64), ci suggerisce di "review the fundamental discussions, so important for epistemology, of the difficulty of separating the subjective and the objective aspects of the world" (*Ibidem*: 65).

Sulla base di quanto esposto finora è possibile fornire un'interpretazione fedele alle intenzioni di Heisenberg sul suo principio di indeterminazione $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$. Questa relazione afferma che, se un'entità quantistica viene interpretata mediante il modello classico della particella (e, quindi, mediante le relative osservabili x e p), la nostra conoscenza circa le osservabili e lo stato del sistema è limitata e incerta: non è possibile conoscere simultaneamente con precisione arbitraria queste due osservabili. Questa complementare indeterminazione delle osservabili è conseguente all'inadeguatezza del modello adottato per interpretare i fenomeni quantistici. Come affermato da Heisenberg

nel 1958, adottare i concetti classici “would lead to contradictions if used simultaneously” (Heisenberg 2000: 123). Quindi, secondo Heisenberg, accettare il principio di indeterminazione (e le altre relazioni di indeterminazione) tra le proprietà fondamentali comporta credere che la complementarità sia una caratteristica cruciale della meccanica quantistica. È proprio per la limitata applicabilità dei concetti classici che “the knowledge of the position of a particle is complementary to the knowledge of its velocity or momentum” (Camilleri 2009: 119). Inoltre, affermare che la teoria quantistica include il principio di indeterminazione (e le altre relazioni di indeterminazione) nel suo formalismo comporta anche affermare che i fenomeni e le entità cui la teoria si riferisce sono, in ultima analisi, non adeguatamente e chiaramente comprensibili per l’umano per i motivi sopraccitati e che, tuttavia, l’adozione dei concetti classici è indispensabile perché condizione di possibilità del conoscere fisico per l’umano.

3.3 Terza fase: influenze kantiane, costitutività del linguaggio e un mondo di potenzialità

Conscio delle questioni epistemologiche sollevate dalla teoria della relatività e dalla teoria quantistica, e in un ambiente germanico attento alle riflessioni di Kant, Heisenberg si avvicinò alla filosofia kantiana, anche grazie ai dialoghi intrattenuti con Carl Friedrich von Weizsäcker e Grete Hermann. Egli, infatti, ammirava la filosofia critica kantiana e la riteneva utile per comprendere e spiegare il cambio di paradigma conseguente alla teoria della relatività e alla meccanica quantistica, ma riservava qualche dubbio circa certe nozioni kantiane, come le nozioni di “a priori”, di “soggetto trascendentale” e del rapporto tra soggetto conoscente e oggetto conosciuto.

Dopo aver riflettuto sull’equivalenza tra il modello ondulatorio e il modello particellare e sul principio di complementarità, Heisenberg ammise che la conoscenza fisica umana si fonda necessariamente sui concetti classici della fisica, i quali sono “a consequence of the general human way of thinking” (Heisenberg 2000: 27). Per quanto ci si sforzi, attualmente non è possibile descrivere e comprendere i risultati sperimentali della regione quantistica se non mediante i concetti della fisica classica. Tuttavia, essi non sono fisicamente adeguati, ossia non permettono una conoscenza vera degli oggetti e delle proprietà cui si riferiscono, perché la loro genesi è influenzata anche dalle modalità

conoscitive dello scienziato in quanto umano e dal suo milieu storico-culturale. Heisenberg si riferirà a questo conflitto tra l'epistemica necessità dei concetti classici e la loro limitata applicabilità come al “fundamental paradox of quantum theory” (*Ibidem*).

Tali concetti classici – quali spazio, tempo, causa, onda, particella, posizione, quantità di moto, frequenza, osservazione ... – sono determinati dalle kantiane forme a priori. Tuttavia, Heisenberg si discosta dalla nozione kantiana di “a priori” per due aspetti. Innanzitutto, benché spazio, tempo e causa rimangano le condizioni di possibilità della nostra (attuale) conoscenza empirica e, conseguentemente, della formulazione di una qualsiasi (attuale) teoria fisica umana, esse non sono universalmente applicabili perché “these a priori concepts can be the conditions for science and at the same time can have only a limited range of applicability” (Heisenberg 2000: 51). L'inadeguatezza fisica dei concetti classici segue principalmente da due motivi: l'impossibilità empirica per l'umano di osservare direttamente la regione quantistica e il carattere quasi-trascendentale del linguaggio.²² Il secondo spostamento semantico riguarda il carattere della necessità dell'a priori. Secondo Heisenberg, “[m]odern physics has changed Kant's statement about the possibility of synthetic judgments a priori from a metaphysical one into a practical one” (*Ibidem*: 51), ossia che la possibilità di formulare i giudizi sintetici a priori è conseguenza di motivi pratici, e non metafisici. In particolare, l'a priori kantiano perde il suo carattere apodittico e la sua conseguente necessità logica. Le forme aprioristiche dell'intuizione, secondo Heisenberg, non sono necessarie in linea di principio perché non esiste un soggetto trascendentale sradicato dal piano storico. Al contrario, esse sono “practically a priori” perché rappresentano “the final result of the development of human thought in the past, even in a very remote past” (*Ibidem*: 53). I principi ordinatori e interpretativi stessi, mediante i quali l'umano filtra, struttura e interpreta le informazioni empiriche, si sono formati mediante l'interazione storica e biologica con il mondo. È importante sottolineare che questa evoluzione del pensiero umano ha una componente storica, data dalle modalità d'interazione storica con il mondo quotidiano su scala umana, e una componente biologica, data dalle modalità con cui l'umano si è biologicamente evoluto. Conseguentemente, i concetti classici della fisica non sono caratterizzati da una necessità logica bensì da una pratica, la quale potrebbe essere altrimenti. Intervistato da Kuhn nel 1963, Heisenberg accenna che in un remoto futuro “[i]t may be that there the language

²² La spiegazione di quest'ultima nozione sarà esposta successivamente in questo paragrafo.

and the concepts have changed so much that they would not use the Newtonian concepts at all anymore” (AIP 1963: Session IX).

Oltre a determinare l’epistemologia della fisica, tale struttura del pensiero umano ha sicuramente anche un risvolto pragmatico perché influenza le modalità con cui gli apparati strumentali della fisica vengono costruiti. A tal proposito, Heisenberg affermò che “the measuring device has been constructed by the observer, and we have to remember that what we observe is not nature in itself but nature exposed to our method of questioning” (Heisenberg 2000: 26). Benché sembri che i dispositivi strumentali descrivano una realtà oggettiva, bisogna ricordare che sono stati costruiti da umani, i quali hanno determinate forme aprioristiche, e che i valori rilevati vengono descritti mediante un linguaggio umano.

È proprio il linguaggio, secondo Heisenberg, a essere elemento costitutivo del pensiero e della conoscenza. Heisenberg adotta quella che Camilleri definisce “quasi-transcendental conception of language” (Camilleri 2009: 152). Il linguaggio secondo Heisenberg è quasi-trascendentale per tre motivi: è condizione di possibilità della conoscenza umana; ha un carattere biologico e storico per il quale sottostà alle relative evoluzioni e ai relativi sviluppi; presenta un’indeterminazione semantica e una limitata applicabilità. Per quanto riguarda il primo motivo, in più occasioni Heisenberg afferma il carattere costitutivo e necessario del linguaggio, come quando nel 1942 asserisce che “every formulation of reality in language, not only grasps it, but also puts it into form and idealizes it” (*Ibidem*: 145) e quando in delle interviste sostiene che “language is [...] a net in which our thoughts and knowledge are inextricably enmeshed” e che “we are hanging in the language” (*Ibidem*: 154). Il linguaggio è il mezzo imprescindibile mediante il quale doniamo significato a tutte informazioni che riceviamo, un mezzo affatto indifferente poiché in qualsiasi contesto ogni termine linguistico ha sempre un carico teorico che presuppone un insieme di pregiudizi e conoscenze che determinano il suo significato. Per quanto riguarda l’ultimo motivo, invece, discostandosi dal positivismo logico, Heisenberg sottolinea che il significato di una parola viene forgiato durante la nostra esperienza quotidiana, empirica e storica, che una stessa parola assume diversi significati in base al contesto di enunciazione e che il linguaggio è caratterizzato da una chiusura semantica, ossia che il significato delle parole “can be given only with the help of other concepts, and so one will finally have to rely on some concepts that are taken as

they are, unanalyzed and undefined” (Heisenberg 2000: 115). Conseguentemente, perseguire un’analisi logica che possa determinare univocamente il significato di una proposizione senza riferimento al contesto e alla rete di proposizioni a essere correlata è un’opera vana. E, se anche riuscissimo a determinare il significato di una parola con precisione mediante un procedimento formal-assiomatico come accade in matematica e in fisica, siamo impossibilitati a verificare la sua adeguatezza fisica perché, come affermato da Heisenberg, “we can never know how well these words fit reality” (Camilleri 2009: 156). In *Physics and Philosophy* Heisenberg affermerà che

[t]he words “position” and “velocity” of an electron, for instance, seemed perfectly well defined as to both their meaning and their possible connections, and in fact they were clearly defined concepts within the mathematical framework of Newtonian mechanics. But actually they were not well defined, as is seen from the relations of uncertainty. One may say that regarding their position in Newtonian mechanics they were well defined, but in their relation to nature they were not. This shows that we can never know beforehand which limitations will be put on the applicability of certain concepts by the extension of our knowledge into the remote parts of nature, into which we can only penetrate with the most elaborate tools. (Heisenberg 2000: 47)

La necessità pratica di adottare un linguaggio contenente termini classici per descrivere il mondo e la sua inadeguatezza fisica comportano una situazione paradossale dove, nonostante si sia consapevoli delle limitazioni del nostro linguaggio, si è costretti a utilizzarlo. Queste limitazioni sono rese lampanti quando si tenta di descrivere regioni ontologiche remote dalla nostra quotidianità, come il mondo macroscopico descritto dalla teoria della relatività e il mondo atomico descritto dalla teoria quantistica. Inoltre, queste limitazioni mostrano che non è possibile considerare l’immagine del mondo quantistico fornita dalla teoria quantistica come un’immagine oggettiva. Oltre ad essere una realtà empiricamente non percepibile dall’umano, secondo Heisenberg, il carattere di oggettività consiste in un’idealizzazione concettual-linguistica del mondo ordinario, conseguente al carattere quasi-trascendentale del linguaggio e mediante la quale si attribuisce all’oggetto di riferimento un’esistenza spaziale e temporale indipendente dal soggetto conoscente. La nostra descrizione fisica della natura, infatti, si basa sulla “assumption that it is possible to speak of objective events in space and time” (Camilleri: 141) mediante interazioni causali governate dai principi di conservazione classici. Heisenberg affermò che

[i]n classical physics science started from the belief — or should one say from the illusion? — that we could describe the world or at least parts of the world without any reference to ourselves. This is actually possible to a large extent. We know that the city of London exists whether we see it or not. It may be said that classical physics is just that idealization in which we can speak about parts of the world without any reference to ourselves. Its success has led to the general ideal of an objective description of the world. Objectivity has become the first criterion for the value of any scientific result. (Heisenberg 2000: 23-24)

La meccanica quantistica, quindi, può essere concettualizzata come un'opera di idealizzazione di secondo grado (o modellizzazione approssimativa di secondo grado) di fenomeni su scala subatomica mediante concetti classici, i quali a loro volta sono idealizzazioni derivanti dalla nostra esperienza del mondo quotidiano.

Per l'umano un'entità esiste oggettivamente se e solo se la sua esistenza è indipendente dal mentale e può essere descritta spazialmente e temporalmente. In altre parole, un sistema fisico oggettivo è una porzione di realtà fisica indipendente dall'umano cui si ascrivono definite proprietà spaziali e temporali come proprietà intrinseche. In questo senso, considerati i limiti della nostra conoscenza empirica determinati dalla quasi-trascendentalità del linguaggio e resi manifesti dal principio di complementarità, sarebbe scorretto considerare qualsiasi modellizzazione del formalismo quantistico come oggettivamente reale perché il suo stesso formalismo non ne fornisce una rappresentazione (materiale) oggettiva dato che si fonda sui concetti classici, i quali si sono dimostrati inadatti per comprendere adeguatamente la regione quantistica. È vero che, mediante la misurazione, è possibile parzialmente oggettivare un sistema fisico quantistico fornendogli una descrizione spaziale e temporale, ma mediante riflessione ci si accorge che la descrizione fornita non è riferita al sistema quantistico in sé bensì alla nostra conoscenza di esso. In questa prospettiva si è in grado di cogliere con maggiore chiarezza l'affermazione di Heisenberg del 1927 secondo cui “[d]ie Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben” (Heisenberg 1927: 197)²³ e che, conseguentemente, la posizione più plausibile nei confronti dell'impresa scientifica è uno strutturalismo epistemico in cui “the transparent clarity of mathematics” permette di cogliere formalmente “only our knowledge [of the behavior of elementary particles]” (Camilleri 2009: 159).

²³ “La fisica dovrebbe solo descrivere formalmente la connessione tra le percezioni fenomenologiche” (trad. mia).

La questione che ne consegue è questa: posto che la nozione di “esistenza”, essendo un concetto classico, implica le nozioni di “spazio” e di “tempo”, poiché un’entità quantistica non osservata non occupa una posizione definita x_0 a un certo istante t_0 , insomma, poiché le nozioni classiche di “spazio” e di “tempo” non possono adeguatamente rappresentare il mondo quantistico, in che senso un’entità quantistica “esiste”? D’altronde, dato che le equazioni quantistiche hanno una certa efficacia pratica, benché una loro modellizzazione non sia possibile per l’indeterminatezza e l’inadeguatezza del significato stesso dei termini classici adottati, esse si dovranno pur riferire a “qualcosa”. Quindi, come bisogna caratterizzare ontologicamente questo “qualcosa”?²⁴

Heisenberg ammette che “[i]t is of course tempting to say that the electron must have been somewhere between the two observations” (Heisenberg 2000: 18). Tuttavia, come dimostrato precedentemente, oltre a non aver evidenze dell’esistenza classica dell’elettrone tra due osservazioni, sarebbe scorretto attribuire al reame quantistico nozioni classiche, come quelle di “spazio” e di “tempo” e quella che da loro deducibili. Infatti, sostenere di poter descrivere cosa accade all’elettrone interferfenomenico è una “contradiction in adjecto” (Camilleri 2009: 165) perché, da una parte, l’unica modalità descrittiva che disponiamo per il mondo fisico è quella classica e, dall’altra parte, l’elettrone non può essere descritto classicamente. Il limite dell’utilizzo dei concetti classici è il momento dell’osservazione, momento che comunque mostra la loro limitata applicabilità e che, tuttavia, richiede almeno l’adozione di concetti spaziali e temporali per poter essere intellegibilmente compreso e descritto dagli umani. Ma quale caratterizzazione ontologica attribuire all’elettrone interferfenomenico?

Secondo Camilleri, ispirandosi alla nozione aristotelica di *δύναμις*, Heisenberg introduce la nozione di “potentia” (o “potenzialità”) per descrivere lo statuto ontologico della regione quantistica sostenendo che “the atoms or the elementary particles themselves are not as real [as the atomic events in experiments]; they form a world of potentialities or possibilities rather than one of things or facts” (Heisenberg 2000: 128). Di conseguenza, il reame ontologico si suddividerebbe idealmente in almeno due regioni: una “res extensa” e una “res potentia” (Kastner *et al.* 2017: 1). La prima è

²⁴ Scrivo il termine “qualcosa” virgolettato per sottolineare il limite raggiunto dal linguaggio umano. Poiché questa stessa nozione, essendo classica, presuppone un’esistenza spaziale e temporale, sarebbe scorretto riferirsi, ad esempio, a un elettrone come a un qualcosa.

un'idealizzazione dell'umano del mondo quotidiano che mediante il suo linguaggio quasi-trascendentale lo esperisce e lo caratterizza grazie alle nozioni di "spazio" e di "tempo". Per l'umano in quanto essere biologicamente e storicamente determinato il reale è l'attuale, ossia ciò che è descrivibile spazialmente e temporalmente in maniera definita. La seconda regione, invece, è un mondo popolato da entità potenziali, ossia da entità non ancora (classicamente) reali e che presentano solo una "tendency for something" (Heisenberg 2000: 12). Heisenberg caratterizza la nozione di "potentia" affermando che

it [the probability wave of Bohr, Kramers, Slater] was a quantitative version of the old concept of "potentia" in Aristotelian philosophy. It introduced something standing in the middle between the idea of an event and the actual event, a strange kind of physical reality just in the middle between possibility and reality. (Ibidem: 12)

In questa regione, siccome non vale il principio del terzo escluso, diviene plausibile la nozione proposta da Weizsäcker di "coexistent potentialities" (Ibidem: 128), ossia l'esistenza di potenzialità che si sovrappongono.²⁵

Se la potenzialità può essere definita anche come ciò che può essere attualizzato, come avviene il passaggio tra il potenziale e l'attuale? Secondo Heisenberg

the transition from the "possible" to the "actual" takes place during the act of observation. If we want to describe what happens in an atomic event, we have to realize that the word "happens" can apply only to the observation, not to the state of affairs between two observations. It applies to the physical, not the psychological act of observation, and we may say that the transition from the "possible" to the "actual" takes place as soon as the interaction of the object with the measuring device, and thereby with the rest of the world, has come into play; it is not connected with the act of registration of the result by the mind of the observer. (Ibidem: 23)

Il passaggio tra il potenziale e l'attuale avviene durante l'atto di osservazione e Heisenberg specifica che deve essere interpretato fisicamente come risultato dell'interazione fra lo strumento di misura (ossia, la parte di mondo attuale) e l'oggetto quantistico (ossia, la parte del mondo potenziale). Un'interpretazione soggettivista, come ad esempio proposta da von Neumann, deve essere quindi rifiutata.²⁶ Al contrario,

²⁵ Per una più dettagliata descrizione si legga il paragrafo 4.3 *La probabilità quantistica à la Heisenberg*

²⁶ Secondo von Neumann la coscienza dell'osservatore copre un ruolo privilegiato per la transizione tra il possibile e l'attuale. L'atto di osservazione è il momento in cui l'osservatore prende coscienza del risultato dell'osservazione, rendendo così l'entità quantistica reale, ossia descrivibile mediante le nozioni di "spazio" e di "tempo" (e le loro nozioni derivate).

si tratta di un fenomeno fisico d'interazione tra due regioni ontologiche e in tutto ciò la consapevolezza dell'osservatore non ha un ruolo privilegiato.

4. I CONCETTI FONDAMENTALI DELLA MECCANICA QUANTISTICA INTERPRETATI À LA HEISENBERG

Prima di presentare, mediante la prospettiva di Camilleri, una plausibile interpretazione di Heisenberg delle nozioni di “osservabile”, “stato” e “probabilità”, è utile rispondere a un dubbio che può essere sorto a seguito della lettura del paragrafo precedente: se il linguaggio è quasi-trascendentale ed è caratterizzato da una chiusura semantica, perché non interpretare la posizione di Heisenberg come uno strutturalismo puramente fenomenologico anziché come uno strutturalismo epistemico? D'altronde, se “[d]ie Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben” (Heisenberg 1927: 197) ²⁷, il “Zusammenhang der Wahrnehmungen” ²⁸ coglie adeguatamente la connessione tra le entità del mondo? Posto che Heisenberg considera il contenuto materiale delle “Wahrnehmungen” come fisicamente inadeguato (ossia, incapace di cogliere le cose del mondo per come sono realmente), come argomenta per l'adeguatezza strutturale del mondo fenomenico rispetto al mondo fisico?

Heisenberg non fornì un'argomentazione a riguardo, quasi dando per scontato che la struttura fenomenologica fosse uno specchio veridico della struttura del mondo (ossia, che le relazioni tra gli eventi fenomenologici corrispondessero alle relazioni tra eventi reali). Ad ogni modo, benché si sia rilevata una mancanza argomentativa non indifferente, in questo lavoro si considererà l'interpretazione di Heisenberg come se fosse vera affinché le sopraccitate nozioni possano essere interpretate rispettando le intenzioni di Heisenberg.

A proposito del dubbio dianzi esposto, il quale potrebbe trasformare il realismo strutturale epistemico in un antirealismo strutturale puramente fenomenologico, è possibile non tanto dissiparlo quanto piuttosto chiarire la posizione di Heisenberg introducendo una distinzione, carsica ma fondamentale, presente nella filosofia del linguaggio di Heisenberg. Benché egli non l'abbia mai esplicitata, *Physics and Philosophy* del 1958 è pervaso dalla distinzione freghiana tra “riferimento” e “significato”. Mentre, per le motivazioni precedentemente esposte, il significato di un termine scientifico non è ben definito e non può essere fisicamente adeguato, il suo

²⁷ “La fisica dovrebbe solo descrivere formalmente la connessione tra le percezioni fenomenologiche” (trad. mia).

²⁸ “Connessione tra le percezioni fenomenologiche” (trad. mia)

riferimento ha come oggetto non tanto un contenuto fenomenologico quanto piuttosto un elemento reale del mondo naturale. A supporto di tale distinzione semantica presente in Heisenberg si noti che, nonostante avesse sostenuto che “we can never know how well these words *fit* reality” (Camilleri 2009: 156; sottolineatura mia), egli affermò anche che “[...] the two theories, quantum theory and the theory of relativity, *refer* to such different aspects of nature” (Heisenberg 2000: 109; sottolineatura mia). Più precisamente sostenne che “[t]he theory of special relativity *had revealed a structure of space and time* somewhat different from the structure that was generally assumed since Newtonian mechanics” (*Ibidem*: 109; sottolineatura mia) e che “in quantum theory the uncertainty relations put a definite limit on the accuracy with which positions and momenta, or time and energy, *can be measured* simultaneously” (*Ibidem*: 110; sottolineatura mia).

4.1 Le osservabili quantistiche à la Heisenberg

Fino ad adesso è stato appurato come, secondo Heisenberg, una scienza fisica non può attualmente conoscere, descrivere e spiegare la realtà se non mediante i concetti classici, i quali sono le forme realizzate di come la quasi-trascendentalità del linguaggio si manifesta. I concetti classici sono le idealizzazioni aprioristiche (in senso “heisenberghiano”) mediante le quali si forma la conoscenza fisica umana. Inoltre, è stato posto l’accento anche sul ruolo cruciale della misura in ambito quantistico perché permette una trasformazione ontologica dal potenziale all’attuale (da *res potentia* a *res extensa*). Solo quando si misura un’osservabile quantistica si può affermare che essa “esiste” (classicamente), mentre tra le misure non si può affermare che esiste (classicamente).²⁹ Conseguentemente, bisogna concettualizzare un’osservabile quantistica diversamente mediante il discrimine fondamentale della misura, introducendo così una distinzione tra osservabile quantistica osservata e osservabile quantistica non osservata.

²⁹ Si noti che, come affermato nel capitolo precedente, l’esistenza classica è un’esistenza oggettiva, ossia un’esistenza declinata come indipendente dal soggetto e descrivibile mediante i concetti classici di “spazio”, di “tempo” e i loro derivati. La meccanica quantistica mostra come l’ultimo requisito per un’esistenza oggettiva sia inadeguato per la regione quantistica.

Un'osservabile quantistica osservata è una quantità fisica (limitatamente) descrivibile mediante i concetti classici, ad esempio mediante i concetti di “spazio” e di “tempo” e i loro concetti derivati (quali “onda” e “particella”). In questo senso appartiene alla *res extensa*, ossia a una regione ontologica di entità e proprietà attuali che possono essere descritte mediante i concetti classici. Benché, come dimostrato dalla teoria della relatività e dalla teoria quantistica, tali concetti non siano semanticamente determinati, essi sono le uniche modalità mediante le quali l'umano può descrivere sensatamente il mondo, almeno *prima facie*.³⁰ La putativa oggettività che attribuiamo alle osservabili osservate, quindi, è anch'essa una proiezione interpretativa dell'umano su ciò che ha osservato. Più precisamente, l'oggettività di un'osservabile quantistica consiste nella sua descrivibilità mediante i concetti classici, la quale è possibile solo durante un'osservazione. Solo durante una misura vi è “the transition from the ‘possible’ to the ‘actual’ ” (Heisenberg 2000: 23) che, permettendo un'interazione a livello “umanoscopico”, permette anche l'applicabilità (assai limitata) dei concetti classici.³¹ Ad ogni modo, benché ci si debba astenere dal giudicare l'adeguatezza fisica del suo significato, il termine “posizione x_0 dell'elettrone osservato α ” si riferisce a una traccia “umanoscopica” risultante dall'interazione tra α e lo strumento di misura. In quanto traccia “umanoscopica”, poiché essa viene esperita dall'umano come qualcosa di attuale e definito, per noi essa esiste nel mondo come tale e, secondo Heisenberg, ciò implica anche che l'entità la cui osservabile si vuole misurare si sia attualizzata nella *res extensa* a seguito dell'osservazione. D'altronde, l'atto osservativo è considerato da Heisenberg come “[a] physical, not [a] psychical act of observation” che, mediante l'interazione tra strumento di misura ed entità quantistica misurata, “[...] selects of all possible events the actual one that has taken place” (*Ibidem*: 23).

Possiamo, quindi, affermare di conoscere la posizione x_0 di un elettrone osservato α ? Questa domanda è insidiosa perché “conoscere” è un termine ambiguo: in un certo

³⁰ In un'intervista a Kuhn Heisenberg affermò che “to describe nature means, finally, to describe it in terms of mathematics. Everything else is not precise, and you never know whether you have contradictions or not. [...] *One can never hope to understand nature just by the mathematical tools if one has not gone into the real difficulties of the subject.* After having gone through the difficulties and having a general notion of how things are connected, then you have a chance to do it by mathematical tools.” (AIP 1963: Session III; sottolineatura mia)

³¹ Con “umanoscopico” mi riferisco a un oggetto o evento del mondo che può essere esperito dall'umano come contenuto esperienziale della percezione visiva. Esso può emergere nella sfera esperienziale con o senza aiuto strumentale.

senso possiamo conoscerla, in un altro senso no. In un certo senso possiamo conoscere la posizione x_0 di α nel senso che possiamo strumentalmente rilevare un'interazione "umano-scopica" tra, ad esempio, un elettrone e le particelle di acqua nella camera a nebbia di Wilson. Questa è, comunque, una conoscenza parziale e prospettica perché "[...] we have to remember that what we observe is not nature in itself but nature exposed to our method of questioning" (Heisenberg 2000: 26). Una conoscenza materiale oggettiva della posizione x_0 di α è impossibile perché gli stessi dispositivi strumentali sono stati costruiti per fornire dei risultati in accordo con i nostri concetti classici. Conseguentemente, possiamo conoscere un'osservabile quantistica osservata nella misura in cui possiamo (limitatamente) descrivere la sua interazione "umanoscopica" con un dispositivo strumentale mediante i concetti classici e nella misura in cui possiamo formalmente relazionarla con le altre osservabili della teoria.

In un altro senso non possiamo conoscere la posizione x_0 di α perché non possiamo esperirla direttamente occupare un certo spazio, come accade invece in meccanica classica, perché ciò che ci rimane è solo la traccia della sua "posizione", qualsiasi cosa questo termine possa ormai significare. In fin dei conti, come affermò Heisenberg in un manoscritto inedito del 1942, "the reality of which we can speak is never reality 'an sich', but is a reality of which we can have knowledge, in many cases a reality to which we ourselves have given form" (Camilleri 2009: 145). In questo senso la meccanica quantistica ha richiesto una revisione dell'epistemologia scientifica perché la visualizzabilità e la modellizzazione, nozioni centrali nell'epistemologia della fisica classica, non sono condizioni necessarie per il conoscere quantistico.³²

Un'osservabile non osservata, invece, non è descrivibile mediante i concetti classici di "spazio" e di "tempo" (e i loro derivati). Essa appartiene a una regione ontologica totalmente altra rispetto alla nostra regione ontologica quotidiana, ossia la *res potentia*, una regione dove l'esistere si manifesta come potenzialità, come indeterminazione. Se con "esistenza" ci si riferisce a uno stato di cose tale per cui esso abita in uno spazio determinato e con delle proprietà numericamente determinate, allora un'entità quantistica propriamente non esiste e, di conseguenza, nemmeno le sue osservabili. Secondo Heisenberg, dato che il formalismo della teoria quantistica è vero,

³² A tal proposito sarebbe interessante avanzare una riflessione sull'evoluzione storica della funzione dell'esperimento mentale nella scienza fisica. Purtroppo tale problematica può essere qui solo accennata perché non rientra negli scopi del lavoro.

poiché un'osservabile è descrivibile mediante una matrice infinito-dimensionale con numeri complessi, la quale non attribuisce all'osservabile un valore determinato se non durante l'osservazione, realmente le osservabili quantistiche non osservate non hanno un valore di realtà determinato (in senso classico).

Si noti che un valore di realtà è determinato rispetto alle proprietà deducibili dai concetti classici perché solo adottando questi ultimi ha senso parlare di valore di un'osservabile. Se i concetti classici sono totalmente inadeguati rispetto alla regione quantistica, lo saranno anche le relative osservabili che, di conseguenza, risulteranno con dei valori indeterminati. Detto altrimenti, la potenzialità della regione quantistica è tale soprattutto perché si adotta una prospettiva classica, la quale è l'unica attualmente adottabile. Se così fosse, un'osservabile quantistica sarebbe indeterminata e, quindi, probabilistica solo in maniera epistemica perché sarebbe la conoscenza umana a renderla indeterminata.

Tuttavia, secondo Camilleri, Heisenberg sostenne che realmente la regione quantistica fosse probabilistica perché esistono fenomeni come “the so-called interference of probabilities, which is the most characteristic phenomenon of quantum theory” (Heisenberg 2000: 94) che sono formalmente descrivibili come sovrapposizione di alternative contraddittorie nella *res extensa*.³³ In questo caso, mentre possiamo dubitare del significato dei simboli matematici, non possiamo dubitare del loro riferimento, il quale è corroborato dagli esperimenti e dalla successiva formulazione di relazioni formali fra simboli matematici. Da ciò segue che un'osservabile quantistica non osservata è realmente indeterminata perché deve ancora attualizzarsi.

Adottando il lessico della logica classica, si può affermare che essa è contraddittoria perché assume un insieme di valori di realtà (indeterminati) sono tra di loro contraddittori. Considerando l'esempio dell'esperimento della doppia fenditura, dato un elettrone non osservato β , se ci si riferisce allo stato dell'elettrone β potenzialmente osservato nella fenditura 1 con Ψ_1^β e allo stato dell'elettrone β potenzialmente osservato nella fenditura 2 con Ψ_2^β , allora realmente β può essere in uno stato Ψ^β per cui $\Psi^\beta = \Psi_1^\beta + \Psi_2^\beta$. Essendo in uno scenario classico Ψ_1^β e Ψ_2^β scenari mutualmente esclusivi,

³³ Con “contraddizione” mi rifaccio alla definizione fornita da Aristotele nel libro IV della *Metafisica*, ossia che “[i] più fermo di tutti i principi è che è impossibile per lo stesso attributo appartenere e non appartenere allo stesso oggetto dallo stesso punto di vista” (Odifreddi 2003: 62).

realmente l'osservabile posizione x^β esiste con una struttura non rappresentabile mediante la logica classica. Poiché formalmente i concetti classici si fondano sul principio di contraddizione e sul principio del terzo escluso, per descrivere le osservabili quantistiche è necessario modificare la logica che relaziona le nozioni classiche tra di loro.³⁴

La verità è che per fronteggiare la regione quantistica siamo provvisti di una cassetta degli attrezzi concettuali molto esigua, tanto che Heisenberg asserì che “we have no simple guide for correlating the mathematical symbols [used by the quantum theory] with concepts of ordinary language” (Heisenberg 2000: 122). Di conseguenza, utilizziamo simboli logico-matematici per riferirci a osservabili che non possiamo concettualizzare se non formalmente mediante il linguaggio matematico. In ultima analisi, l'unica modalità conoscitiva che ci fornisce una (parziale, limitata) conoscenza delle osservabili quantistiche è l'astrazione matematica perché grazie a essa è possibile correlare i simboli matematici sulla base dei risultati sperimentali, fornendo così delle leggi predittive.

4.2 *Gli stati quantistici à la Heisenberg*

Anche nel caso dell'interpretazione della nozione di “stato quantistico” il ruolo della misura è cruciale. Infatti, l'unica modalità che ci permette di accedere alla regione quantistica è la misura, la quale è definita da Heisenberg come “[...] partly undefinable and irreversible interactions of the system with the measuring apparatus and the rest of the world” (Heisenberg 2000: 94). È proprio durante la misurazione che gli eventi quantistici vengono rilevati e che, al contempo, il loro stato di cose viene attualizzato in maniera imprevedibile, talvolta mutando radicalmente il loro comportamento (come nel caso della cessazione dell'interferenza della probabilità nel momento della misurazione). Inoltre, poiché ogni osservazione quantistica avviene necessariamente mediante un dispositivo strumentale, il quale interagisce irreversibilmente con il fenomeno quantistico, “[...] the interaction of a system with the measuring apparatus is treated as a whole according to quantum mechanics” (*Ibidem*: 90).

³⁴ Un tentativo di formulare una logica che rispettasse il formalismo quantistico fu la “logica quantistica”, proposta da G. Birkhoff e J. von Neumann negli anni '30.

Da ciò segue che uno stato quantistico, descritto dalla funzione d'onda Ψ , si riferisce sempre a un sistema fisico come a un'unità inscindibile costituita dall'oggetto misurato e dallo strumento di misura? Heisenberg risponderebbe negativamente perché è possibile stabilire una “division of the world into the ‘object’ and the rest of the world” (*Ibidem*: 24) che permetterebbe di studiare il comportamento dell'oggetto quantistico idealmente come un sistema fisico isolato (eccetto che durante l'atto di misura).³⁵ Tale divisione richiede due diverse modalità descrittive: mediante i concetti classici si può (limitatamente) descrivere il resto del mondo, tra cui l'apparato di misura; mediante la funzione d'onda Ψ si può descrivere matematicamente l'entità quantistica di riferimento. Tale divisione, ammette Heisenberg, “is arbitrary and historically a direct consequence of our scientific method” (*Ibidem*: 24). Tuttavia, l'inclusione o meno dell'apparato strumentale nel sistema fisico osservato non è rilevante a livello pratico perché “[i]t can be shown that such an alteration of the theoretical treatment would not alter the predictions concerning a given experiment” (*Ibidem*: 25). Di conseguenza, il “taglio di Heisenberg” dovrebbe essere interpretato solo epistemicamente (e non ontologicamente) perché Heisenberg non argomenta per una distinzione ontologica tra sistema fisico classico e sistema fisico quantistico. In altre parole, questa divisione è una condizione di possibilità della conoscenza empirica perché, senza di essa, non potrebbe esserci propriamente conoscenza empirica. L'ideale cui la scienza aspira è, infatti, di descrivere e spiegare il mondo per come è e, senza questa divisione, questo ideale sarebbe abbandonato.³⁶

Si noti che, tuttavia, secondo Heisenberg Ψ non ha alcun significato fisico perché la descrizione cui si riferisce è puramente matematica: Ψ fornisce dei valori che, con un certo grado di probabilità dato da $|\Psi|^2$, potrebbero essere attribuiti alle osservabili del sistema fisico A a un istante t_0 qualora venisse misurato. Il motivo per utilizzare Ψ non consiste tanto nell'avere una reale rappresentazione di uno stato di cose quanto piuttosto nell'avere un utile strumento che, essendo stato formulato relazionando in maniera quantitativa delle osservabili ed essendo questa strutturazione formale isomorfa rispetto

³⁵ Mi riferisco all'*Heisenberg-Schnitt* (o “taglio di Heisenberg”).

³⁶ Il dubbio che sorge è il seguente: se non v'è alcuna differenza a livello predittivo e se l'oggetto quantistico osservato e l'apparato di misura appartengono alla stessa totalità ontologica, considerata la crucialità dell'atto di misura in ambito quantistico, perché l'apparato di misura non può essere sempre considerato come parte integrante del sistema fisico quantistico misurato?

ai dati fenomenologico-sperimentali, fornisce certi probabili valori risultanti da una possibile misura. Come affermato da egli stesso intervistato da Kuhn,

my disappointment about Schrödinger's first paper came from this very point that he thought he could give an interpretation in the old sense. I thought that such an interpretation in the old sense does not exist. [...] But I felt that if a man tries to make such a direct interpretation – that he says that an electron is a wave, and so on – then he must certainly be wrong (AIP 1963: Session VII)

Oltre all'argomento dell'inappropriatezza della visualizzazione nello studio della regione quantistica, secondo Heisenberg Ψ non ha alcun significato fisico anche per un altro motivo: considerato un sistema fisico quantistico A , nello spazio di Hilbert delle funzioni d'onda Ψ^A è in uno spazio potenzialmente con infinite dimensioni.³⁷ Come potrebbe lo spazio in cui Ψ è definita rappresentare uno spazio reale? Heisenberg, infatti, scrive che “it does not refer to real space or to a real property; it thus, so to speak, contains no physics at all” (Camilleri 2009: 126).

Giunti a questo punto, bisognerebbe accettare l'adagio wittgensteiniano secondo cui “wovon man nicht sprechen kann, darüber muss man schweigen”?³⁸ Dall'atteggiamento di Heisenberg circa gli eventi quantistici interferenziali non sarebbe un'opzione da escludere: sarebbe una plausibile conseguenza della quasi-trascendentalità del linguaggio, dell'impossibilità di conoscere la cosa in sé e del ruolo dell'osservazione. Tuttavia, secondo Camilleri, spesso assumendo posizioni contrastanti, “[...] by the mid-1950, Heisenberg attempted to interpret this concept of ‘state’ in quantum mechanics in ontological terms” (*Ibidem*: 166). Heisenberg, quindi, non tacque e, al contrario, fornì un'interpretazione ontologica della regione quantistica fondata sulla nozione di “potentia”. Tralasciando eventuali dubbi e controargomentazioni, come affrontò Heisenberg questa tensione?³⁹

Conscio di questa difficoltà nel distinguere tra gli elementi soggettivi e gli elementi oggettivi presenti nella teoria quantistica, Heisenberg affermò che “[...] in quantum theory [...] we meet a special situation (the so-called ‘pure case’) in which the

³⁷ Per motivi di sintesi non ci si è riferiti ad altre complicazioni (come il fenomeno dell'entanglement e il problema dell'identità delle entità quantistiche) che rendono un'interpretazione fisica di Ψ ancora più dubbiosa.

³⁸ “Su ciò di cui non si può parlare si deve tacere” (trad. mia)

³⁹ Si legga 5. *Conclusione* per dei dubbi circa la prospettiva di Camilleri (2009).

description can be called objective in some sense and in which the element of incomplete knowledge does not occur immediately” (Heisenberg: 91). Nel caso di uno stato puro, Ψ fornisce una (formale) descrizione reale della struttura cui si riferisce. Più precisamente, Ψ “[...] contains statements about possibilities or better tendencies (‘potentia’ in Aristotelian philosophy), and these statements are completely objective, they do not depend on any observer” (*Ibidem*: 22). Date certe osservabili, le quali sono definite da una teoria chiusa, e dati certi risultati sperimentali che registrano dei valori da attribuire alle osservabili, s’inferisce quale sia la migliore equazione matematica che permette di descrivere formalmente le relazioni tra le osservabili.⁴⁰

Nel caso di stato misto, invece, essendo descritto da una mistura statistica di probabilità sulle funzioni d’onda Ψ , le Ψ considerate non forniscono una (formale) descrizione reale perché uno stato misto include anche elementi di probabilità epistemica.

4.3 La probabilità quantistica à la Heisenberg

Benché non vi sia alcuna esplicitazione di tale differenza semantica, in *Physics and Philosophy* (Heisenberg 2000) Heisenberg utilizza il termine “probabilità” con due accezioni diverse. Entrambe contraddistinguono la meccanica quantistica come probabilistica, ma in maniera diversa. Senza un’opportuna ed esplicita distinzione difficilmente si potrebbe avere una comprensione chiara delle tesi di Heisenberg.⁴¹

In un primo senso la meccanica statistica è probabilistica perché le previsioni sperimentali della teoria sono statistiche come conseguenza di una nostra lacuna epistemica. Nel caso di uno stato misto, bisogna considerare che “the system which is treated by the methods of quantum mechanics is in fact a part of a much bigger system (eventually the whole world) [...] and one must add that the microscopic properties of the bigger system are (at least to a large extent) unknown” (*Ibidem*: 122-123). Questa

⁴⁰ Si noti che nell’inferenza alla miglior spiegazione rientrano anche criteri non-epistemici, come la semplicità e l’eleganza. Ciò renderebbe l’equazione falsa? No! Una stessa relazione oggettiva tra osservabili può essere formalmente descritta da più linguaggi matematici, i quali mediante le loro rispettive “prospettive” possono catturare adeguatamente la relazione oggettiva. Non è la matematica a essere reale bensì le relazioni che cattura! Il vantaggio del linguaggio matematico riposa nella formalizzazione quantitativa di tali relazioni.

⁴¹ Questa distinzione è stata fornita considerando anche la prospettiva di Camilleri (2009). Come già accennato, l’impressione è che Heisenberg non abbia mai avanzato la credenza in una caratterizzazione ontologica probabilistica della entità quantistiche. A tal proposito si legga 5. *Conclusion*.

interazione tra micro- e macroscopico non permette una formulazione deterministica delle leggi fisiche perché non si conosce esattamente come le sopraccitate interazioni si realizzano. Inoltre, la misura introduce un ulteriore elemento d'incertezza nella descrizione quantistica perché, essendo questa il risultato dell'interazione tra oggetto misurato e strumento di misura, tale “description contains all the uncertainties concerning the microscopic structure of the device which we know from thermodynamics” (*Ibidem*: 22). In questo primo senso la probabilità della meccanica quantistica è da interpretare come probabilità epistemica poiché, se idealmente conoscessimo con precisione i fenomeni coinvolti negli scenari sopraccitati, potremmo formulare delle leggi fisiche dove questi elementi d'ignoranza non sono più presenti. Idealmente si potrebbero eliminare queste incertezze, permettendo così una previsione più accurata dei risultati delle misure. Tale accezione della probabilità in meccanica quantistica è analoga all'interpretazione della probabilità in meccanica classica perché è da intendersi come una misura dell'ignoranza umana.

Quest'ideale diminuzione della nostra ignoranza, tuttavia, non permetterebbe comunque una descrizione deterministica della regione quantistica perché questa è ontologicamente probabilistica (probabilità reale). Come descritto precedentemente, il formalismo matematico della meccanica quantistica rappresenta una regione ontologica in cui, secondo l'Heisenberg à la Camilleri, l'essere si manifesta come potenzialità. Affermare che un'entità quantistica è ontologicamente potenziale significa affermare che realmente si trova in uno stato di cose classicamente non definito. Poiché l'umano conosce aprioristicamente mediante il principio di bivalenza, per l'umano non è possibile immaginare uno stato di cose s a un istante (presente o passato) t_0 per cui un enunciato p riferito a s realmente ha un valore di verità non binario, ossia che realmente può darsi il caso che $0 < p < 1$. Inoltre, poiché l'umano ragiona aprioristicamente anche adottando il principio di non contraddizione e il principio del terzo escluso, dati due scenari contraddittori B e $\sim B$, non è possibile immaginare uno scenario in cui sia B sia $\sim B$ siano compresenti, ossia uno scenario in cui gli enunciati $p(B)$ e $p(\sim B)$ siano entrambi veri o falsi. In meccanica quantistica, invece, gli enunciati circa le entità quantistiche assumono un valore di verità con un “degree of truth” (*Ibidem*: 126) tale che $0 \leq p \leq 1$, permettendo così la coaffermazione di enunciati classicamente contraddittori.

Consideriamo l'esperimento della doppia fenditura e supponiamo che $p = \text{il fotone passa per la fenditura 1}$ e che $k = \sim p = \text{il fotone passa per la fenditura 2}$. In uno scenario classico dove la logica classica è valida, essendo p e k enunciati contraddittori, per il principio di non contraddizione e per il principio del terzo escluso si enuncia che $(\sim (p \wedge k)) \wedge (p \vee k)$. In altre parole, poiché non si dà alcun caso per cui il fotone passa per 1 e passa per 2 e si dà il caso che passa per 1 o per 2, il fotone passa o per 1 o per 2. Al contrario, in uno scenario quantistico, l'enunciato logico sopraccitato è falso rispetto al comportamento del fotone perché, se non osservato, non si può correttamente affermare che:

- il fotone passa o per 1 o per 2
- il fotone passa sia per 1 e sia per 2
- il fotone non passa né per 1 né per 2

Conseguentemente, “[i]n quantum theory this law ‘tertium non datur’ is to be modified” (Heisenberg: 125) perché esistono scenari in cui si dà il caso che un'entità quantistica presenti uno stato di cose s per cui s non è attualmente definito, ossia che s realmente sia una tendenza o potenzialità rispetto a dei valori classicamente definiti. Secondo Heisenberg, in questo senso la regione quantistica è realmente costituita da eventi o fenomeni potenziali che solo durante l'osservazione si attualizzano perché “[the observation] selects of all possible events the actual one that has taken place” (*Ibidem*: 23). Essa sarebbe “a strange kind of physical reality just in the middle between possibility and reality” (*Ibidem*: 12).⁴²

⁴² A tal proposito si potrebbe fornire questa similitudine: come una statua è potenzialmente in un blocco di marmo di una cava, un elettrone non osservato è realmente situato in una posizione potenziale x_0 .

5. CONCLUSIONE

Dopo aver esposto i concetti fondamentali per la descrizione matematica di un sistema fisico quantistico, è stato delineato lo sviluppo storico del pensiero di Heisenberg circa la teoria quantistica dagli anni '20 agli anni '50. Si è posta particolare attenzione alle problematiche relative alla filosofia del linguaggio e all'epistemologia, problematiche che si sarebbero poi rivelate nevralgiche per la cosiddetta "linguistic turn" (Camilleri 2009: 152). A tal riguardo, sono state chiarite le nozioni di "quasi-transcendental conception of language" (*Ibidem*: 152), "practically a priori" (Heisenberg 2000: 53), di "potentia" (*Ibidem*: 12) e di "misura". Infine, in seguito a questa chiarificazione concettuale basata sulla lettura di *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics* (Camilleri 2009) e di *Physics and Philosophy* (Heisenberg 2000), appoggiandosi soprattutto sull'interpretazione di Camilleri è stata fornita una possibile interpretazione dei concetti, precedentemente esposti solo in maniera formale, di "osservabile", "stato" e "possibilità".

Giunti a questo punto, come già anticipato, saranno esposti dei brevi dubbi sull'interpretazione proposta da Camilleri circa la nozione di "potentia". Come egli stesso afferma, in Heisenberg sono presenti due tensioni "resulting from the disjunction between the classical *meaning* we attach to the concept 'objective reality' and the fact that the Ψ -function must *refer* to something" (Camilleri 2009: 171). Tuttavia, Camilleri afferma che "[...] by the mid-1950, Heisenberg attempted to interpret this concept of 'state' in quantum mechanics in ontological terms" (*Ibidem*: 166). A favore di questa tesi presenta questa citazione tratta da *Physics and Philosophy* di Heisenberg del 1958

This concept of "state" would then form a first definition concerning the ontology of quantum theory. One sees at once that this use of the word "state", especially the term "coexistent state", is so different from the usual materialistic ontology that one may doubt whether one is using a convenient terminology. On the other hand, if one considers the word "state" as describing some potentiality rather than a reality — one may even simply replace the term "state" by the term "potentiality" — then the concept of "coexistent potentialities" is quite plausible, since one potentiality may involve or overlap other potentialities. (Camilleri 2009: 167)

Il primo dubbio sorge nel momento in cui si contestualizza tale passaggio. Esso, infatti, è posto verso la fine del capitolo intitolato *Language and Reality in Modern*

Physics (Heisenberg 2000: 114). Nello specifico, questo capitolo tratta una questione fondamentale per Heisenberg, ossia che “[t]he improved experimental technique of our time brings into the scope of science new aspects of nature which cannot be described in terms of the common concepts. But in what language, then, should they be described?” (*Ibidem*: 114). Dopo una breve riflessione sul linguaggio naturale, sulla sua origine e sull’ “intrinsic uncertainty of the meaning of words” (*Ibidem*: 115), Heisenberg sostiene che, poiché il linguaggio scientifico è un’estensione del linguaggio naturale, il quale è impreciso, indeterminato e, quindi, contraddittorio, nel corso dei secoli gli scienziati hanno ridotto il linguaggio scientifico a simboli matematici il cui significato è determinato dalle relazioni formulate con gli altri simboli adottati dalla teoria. L’avvento della teoria quantistica ha provocato una spaccatura nella relazione tra i simboli matematici e i relativi concetti (tra riferimenti e significati) perché ci si accorse che i concetti erano totalmente inadeguati a descrivere il mondo quantistico. Detto altrimenti, con i concetti classici non è possibile descrivere adeguatamente la regione quantistica. Di conseguenza, quale linguaggio adottare?

Secondo Heisenberg possono essere adottati due linguaggi per descrivere e comprendere (parzialmente) gli eventi quantistici: “one must either use the mathematical scheme as the only supplement to natural language or one must combine it with a language that makes use of a modified logic or of no well-defined logic at all” (*Ibidem*: 129). La citazione di Camilleri si situa proprio in questo momento, più precisamente quando Heisenberg, sulla scia di Weizsäcker, propone una modifica della logica sottostante al linguaggio naturale affinché il principio del terzo escluso non sia più valido.⁴³ Secondo Heisenberg è proprio l’adozione dei concetti classici e delle rispettive osservabili (classiche) per descrivere gli esiti sperimentali a comportare una contraddizione nel momento in cui si vogliono descrivere i comportamenti delle entità quantistiche. In più momenti sottolinea che, poiché “these concepts [such as electronic orbits, [...] matter waves and charge density, [...] energy and momentum, etc.] have only a very limited range of applicability” (*Ibidem*: 124), “they acquire in their relation to ‘reality’ only the same statistical significance as the concepts of classical thermodynamics in its statistical interpretation” (*Ibidem*: 124). Aggiunge inoltre che “[...] as in classical

⁴³ L’esclusione di tale principio è conseguente ai risultati sperimentali descritti mediante dei concetti classici, come, ad esempio, “onda” e “particella”.

thermodynamics, it is difficult to call the expectation objective” (*Ibidem*: 124-125) e che, tuttavia, “[...] I believe that the language actually used by physicists when they speak about atomic events produces in their minds similar notions as the concept ‘potentia’” (*Ibidem*: 125). Heisenberg si riferisce quindi alla nozione di “potentia” non come a una nozione per cui si impegnerebbe ontologicamente bensì, più cautamente, come a un dato di fatto circa un’interpretazione comune tra certi scienziati. Infine, quando riferendosi a Weizsäcker propone una logica non-classica da integrare nel linguaggio naturale, similmente introduce la nozione di “potentia” come conseguenza risultante dall’adozione della logica modificata, senza avanzare un impegno ontologico. Conseguentemente, poiché la potenzialità delle entità quantistiche deriva dall’applicazione sul mondo quantistico di concetti classici tratti da un’ontologia quotidiana, Heisenberg non sembra sostenere che le entità quantistiche sono realmente potenziali bensì che sono descrivibili come potenziali qualora si adottino i concetti classici. In altre parole, per l’umano la potenzialità sarebbe solo una modalità descrittiva complementare all’attualità.

Un altro dubbio sorge durante la lettura di altri capitoli perché spesso Heisenberg insiste che “[...] there is no description of what happens to the system between the initial observation and the next measurement” (Heisenberg 2000: 17), che “[...] the concept of the probability function does not allow a description of what happens between two observations” (*Ibidem*: 21) e persino che “[...] one would get into homeless difficulties if one tried to describe what happens between two consecutive observations” (*Ibidem*: 20). Oltre ad aver ha rimarcato più volte che mediante il formalismo matematico della meccanica quantistica non si può avere una descrizione ontologica di quello che accade tra due misure, secondo Heisenberg il linguaggio adottato dai fisici teorici per descrivere formalmente i fenomeni naturali “is [...] a mathematical language, the mathematical scheme, which allows one to predict the results of experiments” (*Ibidem*:114; sottolineatura mia). Di conseguenza, perché avrebbe dovuto proporre un’interpretazione ontologica della nozione di “potentia”?

D’altra parte, a supporto della tesi di Camilleri (Camilleri 2009), è vero che Heisenberg afferma che

The probability function combines objective and subjective elements. It contains statements about possibilities or better tendencies (‘potentia’ in

Aristotelian philosophy), and these statements are completely objective, they do not depend on any observer; and it contains statements about our knowledge of the system, which of course are subjective in so far as they may be different for different observers. In ideal cases the subjective element in the probability function may be practically negligible as compared with the objective one. (Ibidem: 22)

In questo passaggio Heisenberg sostiene che, nel caso di uno stato puro, possiamo considerare i suoi enunciati matematici contenenti potenzialità come oggettivi, ossia come specchio veridico di un reale stato di cose.

La questione che ne segue è: come coniugare queste due contrastanti posizioni di Heisenberg? “Potentia” è solo una modalità descrittiva conseguente all’adozione di una prospettiva classica oppure è un concetto con una valenza ontologica? Sarebbe opportuna un’ulteriore analisi dei suoi lavori successivi al 1958 con l’intento di dirimere la questione perché è plausibile che, durante questo periodo, l’opinione di Heisenberg fosse ancora *in fieri*.

Bibliografia primaria

- Bohr N., 1961 *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, Guildford
- Camilleri K., 2009 *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics. The physicist as Philosopher*, Cambridge University Press, Cambridge
- Carson A., 2000 *Plainwater. Essays and Poetry*, Vintage Books, New York
- Faye J., 2019 *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), <<https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qm-copenhagen/>>
- Gadamer H., Vattimo G. (a cura di), 1960 *Verità e Metodo*, Bompiani
- Galavotti M. C., Campaner R., 2018 *Filosofia della scienza*, Egea Editore, Milano
- Heisenberg W., 1925 *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, Zeitschrift für Physik **33**, 879–893, Göttingen
- Heisenberg W., 1927 *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, Zeitschrift für Physik **43**, 172-198, Kopenhagen
- Heisenberg W., Eckart C. e Hoyt C. F. (traduzione), 1949 *The Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover Publications, New York
- Heisenberg W., 2000 *Physics and Philosophy*, Penguin Books, Wiltshire
- Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 27, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics (AIP), College Park, MD USA, <www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-9>
- Lederman L. M., Hill C. T., Civalieri L. (traduzione), 2013 *Fisica quantistica per poeti*, Bollati Boringhieri, Milano
- Ladyman J., 2020 *Structural Realism*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/win2020/entries/structural-realism/>
- Mazzoli P., Nigro M., Voci C., 2021 *Fisica. Volume II*, EdiSES, Perugia
- Odifreddi P., 2003 *Il diavolo in cattedra. La logica da Aristotele a Gödel*, Einaudi Editore, Torino
- Kastner R. E., Kauffman S., Epperson M., 2017 *Taking Heisenberg's Potentia Seriously*, International Journal of Quantum Foundations, **4**, pp. 158–172
- van Fraassen B. C., Festa R. (trad.), 1985 *L'immagine scientifica*, CLUEB, Bologna

Bibliografia secondaria

Ariew R., 2017 *Pierre Duhem*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/duhem/>>

Chakravartty A., 2017 *Scientific Realism*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/scientific-realism/>

Einstein A., Infeld L., Graziadei A. (traduzione), 2007 *L'evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino

Myrvold W., 2022 *Philosophical Issues in Quantum Theory*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2022/entries/qt-issues/>>

Varzi A. C., 2005 *Ontologia*, Editori Laterza, Bari

Worrall J., 1989 *Structural Realism: The Best of Both Worlds?*, *Dialectica*, Vol. 43, No. 1/2, pp. 99-124