

Lo strano mondo della meccanica quantistica

Silvano Tagliagambe

1. Alice nel paese della meccanica quantistica

Alice, nell'inseguire un gatto un po' strano, che parlotta tra sé, il protagonista involontario dell'esperimento ideale di Schrödinger di cui avremo modo di parlare diffusamente più avanti, viene condotta a una tana che fa da ingresso a un mondo fantastico, il paese della conoscenza, quello dei suoi contenuti e dei suoi prodotti, dei sistemi teorici e delle situazioni problematiche.¹

Questo paese è uno spazio intermedio tra esterno e interno, in cui il sapere non è là fuori, in qualche laboratorio o nei libri che lo trattano e ne danno conto, ma entra a far parte del cervello e della mente del soggetto che lo assimila e lo fa proprio, un *luogo di confine* quindi, da intendersi come *limes*, un punto di fine, la conclusione di ogni singola tappa del percorso, che però rappresenta contemporaneamente anche un *limen*, una soglia, l'inizio di una nuova fase, come si evince dalla duplice accezione del confine che ho cercato di approfondire in un mio testo di diversi anni fa.²

Alice, seguendo il gatto di Schrödinger, ha varcato questa linea di confine e si trova in luogo in cui le cose non sono come sembrano perché, come sostiene il titolo di un libro in cui si era imbattuta tempo prima e che l'aveva incuriosita, "la realtà non è come ci appare".³

Seguendo il gatto che l'aveva fatta piombare in questa dimensione apprende da lui che la ragione per la quale egli, facendosi seguire, l'ha volta introdurre nel mondo della conoscenza e delle sue manifestazioni è che tra i tanti libri che si trovano all'interno di

¹ Si tratta di un paese per molti versi analogo al Mondo 3 di cui parla K.R. Popper in *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*, Clarendon Press, Oxford 1972, tr. it. *Conoscenza oggettiva. Un punto di vista evoluzionistico* Armando, Roma, 1975 con una differenza sostanziale però. Per Popper questo mondo si occupa di "libri in sé", di "teorie in sé", di "problemi in sé" ecc. non riferiti a nessun soggetto specifico, individuale o collettivo, ma considerati invece come qualcosa di astratto da assumere e interpretare, semplicemente, nella loro *possibilità* o *potenzialità* di essere letti, interpretati, capiti, e che devono, di conseguenza, venire studiati in maniera oggettiva, indipendentemente dalla questione se queste potenzialità vengano o meno mai realizzate da qualche organismo vivente. Per Alice, nel viaggio che viene qui raccontato, la realizzazione di queste potenzialità è invece un'esigenza imprescindibile, in quanto l'itinerario da lei seguito si articola in una serie di tappe, ciascuna delle quali costituisce la fase di un processo di mediazione e di incorporazione in virtù del quale l'esterno, in tutte le sue accezioni, viene assimilato e fatto proprio, dando così il senso di come si possa approdare a un equilibrio metastabile e dinamico tra la realtà che si trova al di là e al di fuori e l'universo interiore.

² S. Tagliagambe, *Epistemologia del confine*, Il Saggiatore, Milano 1997.

³ C. Rovelli, *La realtà non è come ci appare*. La struttura elementare delle cose, Raffaello Cortina, Milano 2014.

esso ve n'è uno, particolarmente gustoso, scritto da Robert Gilmore,⁴ che vede come protagonisti proprio loro due. Di fronte allo stupore e all'incredulità di Alice egli la invita a entrare nelle pagine di questa opera avvertendola che si troverà immersa in un ambiente del tutto nuovo e sconcertante, nel quale si ha una profonda divaricazione tra il processo di descrizione e il processo di misurazione, in quanto il primo prescinde dalla dimensione temporale, mentre il secondo implica un'azione irreversibile che auspicabilmente porta a un'informazione – un'informazione intesa quale esito di un'azione che dà forma. In esso troverà conferma dell'importanza prioritaria e imprescindibile dell'*azione*, in quanto qui essa diventa un concetto fondamentale, misurato in unità di una nuova costante, quella di Planck:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Questo riferimento all'azione ci dice che per passare da una descrizione impartecipe a una misura attiva occorre rimuovere la stazionarietà ed entrare nella *dimensione tempo*. L'esistenza di una simile dualità era già stata chiaramente sottolineata fin dal 1932 da von Neumann, che aveva individuato una precisa distinzione tra "misurazioni ed esperimenti discontinui, non causali e agenti istantaneamente" che definì come "*willkürliche Veränderungen durch Messungen*" (cioè cambiamenti arbitrari attraverso la misurazione) e "cambiamenti continui e causali nel corso del tempo" che chiamò "*automatische Veränderungen*", cioè cambiamenti automatici.⁵ La teoria quantistica senza osservazione non determina più i fenomeni stessi, ma la loro *possibilità*, la probabilità che succeda qualche cosa.

Quando si entra nel mondo di cui ci parla questa teoria occorre assumere come proprio livello fondamentale di riferimento non il *fenomeno*, definito, sulla scia dell'impostazione kantiana, come un qualcosa collocato in modo preciso nella trama dello spazio e del tempo e soggetto all'azione ordinatrice e strutturante del tessuto delle categorie, in particolare della causalità, bensì l'*interfenomeno*, come lo ha chiamato Hans Reichenbach, cioè un qualcosa di intermedio tra il reale e il possibile allo stato puro. Questo specifico oggetto della conoscenza si trova dunque «tra» la realtà come viene intesa dalla fisica classica e un dominio, quello del possibile appunto, al quale la fisica classica riconosceva diritto di cittadinanza solo nel mondo del pensiero, considerandolo una *presenza* che possiede un'indeterminazione intrinseca rispetto alle possibili osservazioni che si possono compiere su di esso. Un dominio che coincide, per le sue caratteristiche, con la sfera della *Realität*, categoria della qualità, che secondo Kant designa la *totalità della determinazione possibile* di una determinata cosa, e che si può assumere in qualità di oggetto della conoscenza solo una volta che si

⁴ R. Gilmore, *Alice in Quantumland,; An Allegory of Quantum Physics*, Copernicus Books, Nürnberg, 1995, tr. It. *Alice nel paese dei quanti. Le avventure della fisica*, Raffaello Cortina, Milano, 1996.

⁵ J. Von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* Springer, Berlin 1932, tr. it. a cura di G. Boniolo, *I fondamenti matematici della meccanica quantistica*, Il Poligrafo, Padova, 1998.

sia passati dal concetto di confine tra mondo fenomenico e sistema delle idee come rigida linea di demarcazione a quello di interfaccia e zona cuscinetto di collegamento tra ambiti distinti, nel caso specifico tra la *Realität* medesima e l' *Existenz* o effettualità. Ecco, spiega il gatto ad Alice, tu finora sei vissuta nell'universo della precisione, di cui Koiré⁶ ci ha fornito una rappresentazione approfondita ed efficace. Un mondo ordinato, nel quale le teorie si riferiscono a *universi del discorso*, costituiti da *oggetti* (o individui) che godono di *proprietà* e *relazioni*. Queste teorie si valgono di un linguaggio che usa le informazioni, particolarmente quelle della realtà circostante, per elaborarle secondo procedure collaudate, concepite al fine di conseguire, secondo una successione di argomentazioni riproducibili e logicamente analizzabili, risultati non contenuti già nelle informazioni di partenza. Si tratta di un linguaggio formale, simbolico, che, usando regole di manipolazione logica autoconsistente di un repertorio di simboli condivisi (per significato e per uso) rende manifesta una conclusione verificabile degli assunti di partenza: non è difficile verificare che il suo contenuto dominante è soprattutto equivalente alla proposizione inespressa "se...allora", di cui riempi i puntini. All'interno di esso le regole semantiche si comportano in modo *composizionale*, seguendo il principio di Frege, secondo il quale «il significato di un'espressione composta è determinato dalla struttura dell'espressione e dai significati delle espressioni componenti»,⁷ per cui i significati delle parti determinano il significato del tutto. Ogni ambiguità è bandita, in quanto i significati delle espressioni del linguaggio medesimo sono precisi e in linea di principio non sono ammesse situazioni semantiche sfumate o indeterminate. A maggior ragione sono escluse le contraddizioni, in un duplice senso. Per il principio semantico di non contraddizione, una proposizione *A* e la sua negazione *non - A* non possono essere entrambe vere. E per il principio logico di non contraddizione, ogni proposizione contraddittoria che abbia la forma *A* e *non - A* è sempre falsa: Infine, ogni problema formulato nel linguaggio di una teoria è *semanticamente deciso*, in quanto vale il principio semantico del terzo escluso, secondo cui ogni proposizione è *vera* oppure *falsa*. E anche se a stabilire questa rigorosa linea di demarcazione tra ciò che è vero e ciò che è falso non può essere, in tutti i casi possibili, la mente umana, la quale non è in grado di risolvere in modo esaustivo i problemi che si pone, può comunque essere invocata e fatta valere l'"istanza superiore" messa in gioco da Galileo, una "*mente onnisciente*" in grado di fornire una risposta positiva o negativa a ogni questione formulata in maniera sensata.⁸

⁶ A. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, Presses universitaires de France, Paris, 1962, tr. it. *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, Torino, 1967.

⁷ G. Frege, *Grundgesetze*, paragrafo 32. Tr. it. G. Frege, *Leggi fondamentali dell'aritmetica*, a cura di C. Cellucci, Traduzione di N. Rolla, Teknos, Roma, 1995, p. 106.

⁸ G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Edizioni Studio Tesi, Pordenone, 1988 p. 130: «ma pigliando l'intendere *intensive*, in quanto cotal termine importa intensivamente, cioè perfettamente, alcuna proposizione, di che l'intelletto umano ne intende alcune così perfettamente, e ne ha così assoluta certezza, quanto se n'abbia l'istessa natura; e tali sono le scienze matematiche pure, cioè la geometria e l'aritmetica, delle quali *l'intelletto divino ne sa bene infinite proposizioni di più, perché le sa tutte*, ma di quelle poche intese dall'intelletto umano credo che la cognizione agguagli la divina nella

Seguendo me - continua il gatto - ti sei trovata nel mondo della conoscenza, in cui hai fatto i tuoi primi incontri istruttivi, e qui ora, sognando di aprire una scatola d'acciaio nella quale mi trovavo io, ti sei imbattuta nuovamente in me e sei caduta in una dimensione del tutto diversa, fatta di paradossi, assurdità e nonsensi. Alle domande di Alice, incuriosita dal riferimento a queste situazioni non solo inusuali, ma addirittura contrarie al senso comune e all'esperienza quale usualmente viene concepita, il gatto le spiega che la scatola da lei provvidenzialmente aperta l'ha liberato. Essa era infatti collegata a un meccanismo infernale che ne avrebbe provocato la morte per avvelenamento, o assicurato la sopravvivenza, a seconda del decadimento o meno (eventi con identica probabilità di realizzarsi) di un atomo di una sostanza radioattiva, messo in un contatore Geiger. In caso di decadimento il contatore avrebbe azionato un relais di un martelletto che avrebbe rotto una fiala con del cianuro. Prima dell'apertura della scatola l'intero sistema, le spiega ancora il gatto, era descritto da un'equazione, quella di Schrödinger appunto, in grado di determinare come evolvono spontaneamente, in assenza di osservatori che guardano e misurano, gli stati degli oggetti di quel mondo (e dunque anche la sua specifica situazione, in quanto animale macroscopico, la cui sorte risulta però inscindibilmente intrecciata con il mondo microscopico dell'atomo della sostanza radioattiva, dalla quale dipende la sua vita). L'evoluzione temporale descritta da questa equazione è *continua* e *lineare*: le sue soluzioni matematicamente possibili non sono soltanto quelle per le quali lo stato dell'oggetto (in questo caso, lo stato di vita o lo stato di morte del gatto medesimo) è determinato in modo esatto e preciso, ma anche quelle nelle quali il gatto si trova in una condizione di *sovrapposizione* degli stati di vita e di morte. L'apertura della scatola da parte di Alice e il suo atto di guardare dentro di essa hanno determinato il *precipitare* della situazione dell'animale nello stato di vita, eliminando le altre possibilità.

Di fronte all'incredulità di Alice il gatto le spiega pazientemente che mentre nel suo universo di provenienza, quello della precisione, è del tutto ovvio ammettere che il gatto si trovi, a ogni istante, in uno stato determinato (o di vita o di morte), ed è del tutto irragionevole pensare a un meccanismo in seguito al quale sia il fatto di guardare a produrre il verificarsi dell'una o dell'altra condizione, il mondo nel quale è capitata è invece descritto da una teoria nell'ambito della quale è impossibile limitarsi alle soluzioni dell'equazione di Schrödinger di una classe speciale K^0 che presenta le seguenti proprietà:

1. Se $\varphi_1(x)$ e $\varphi_2(x)$ fanno entrambe parte di K^0 , ma a posizioni medie molto diverse, la loro sovrapposizione $C_1\varphi_1(x) + C_2\varphi_2(x) = \varphi(x)$ (A) non fa più parte di K^0 ;
2. Se $\varphi_1(x t_0)$ fa parte di K^0 a un certo istante t_0 , $\varphi_1(x t)$ non fa più parte di K^0 quando l'intervallo di tempo trascorso $[t - t_0]$ è sufficientemente grande.

certezza obiettiva, poiché arriva a comprenderne la necessità, sopra la quale non par che possa esser sicurezza maggiore». Dunque se *intensive* la conoscenza umana pareggia quella divina nella dimensione matematica, *extensive*, come si rileva dal passaggio da noi posto in corsivo, si trova in una situazione di evidente disparità.

Ciò significa, detto più semplicemente, che in questo mondo non si può fare a meno di tenere presente anche le sovrapposizioni di tipo A, che non fanno parte della classe speciale K^0 . L'esigenza di tener conto anche di questo tipo di soluzioni dipende dal fatto che quella che porta il nome di Schrödinger è un'equazione d'onda e contiene la possibilità di descrivere fenomeni d'interferenza tipici del comportamento ondulatorio. Essa, inoltre, una volta che sia stato definito e preparato il sistema da studiare all'istante iniziale, fornisce, *in modo perfettamente deterministico*, le *previsioni* sul comportamento del sistema medesimo attraverso il calcolo della probabilità di trovarlo in un certo posto. Se abbiamo, ad esempio, un fascio di particelle che hanno attraversato la fenditura di uno schermo, è possibile prevedere le posizioni delle frange di diffrazione da esse provocate su una parete che si trovi al di là dello schermo, ma non il preciso punto della parete colpito da una specifica particella. La meccanica quantistica, dunque, è essenzialmente una teoria statistica: essa descrive i processi fisici attraverso il *calcolo del valore medio* che una quantità fisica può assumere, quando viene misurata su un insieme di sistemi fisici identici, rinunciando alla previsione del valore preciso che questa quantità assume in un sistema particolare. Con la sua descrizione in termini di *funzione d'onda* ψ , questa teoria ha pertanto a che fare con una serie di casi possibili. Ciò vale anche, continua a spiegare pazientemente il gatto ad Alice, per la sua specifica situazione di oggetto macroscopico finito nel mondo dei quanti e legato in modo inestricabile a essi.

In più in questo mondo vige un principio, quello "di sovrapposizione", in virtù del quale viene violato uno dei presupposti di fondo dell'universo della precisione, cioè la convinzione di poter, almeno in linea di principio, pervenire, nell'ambito del linguaggio della teoria, a una *conoscenza non contraddittoria massimale*, che non può essere estesa in modo coerente a una informazione più precisa, e che *decide semanticamente* tutte le proprietà fisiche rilevanti di cui può godere un oggetto qualsiasi studiato. Informazioni di questo tipo, tali che anche l'ipotetica *mente onnisciente* di Galileo non potrebbe saperne di più, vengono chiamate *stati puri*. Stati che rappresentano conoscenze non massimali sono invece chiamati *miscele* (o anche *stati misti*).

Nel formalismo matematico della teoria, che descrive il mondo nel quale si trovano attualmente, sia gli stati puri sia quelli misti vengono identificati con tipi speciali di oggetti astratti: essi *vivono* in uno spazio astratto che rappresenta *l'ambiente matematico* per gli oggetti fisici studiati (tecnicamente, questi spazi sono chiamati *spazi di Hilbert*). Diversamente da quello che accade nel caso degli stati puri dell'universo della precisione, tutti gli stati di questo mondo alternativo sono *logicamente incompleti*. Questo significa che uno stato puro non può *decidere semanticamente* tutte le proprietà fisiche rilevanti di cui può godere l'oggetto descritto da quello stato. La ragione di ciò sta nel fatto che in questo mondo vige un *principio*, chiamato *di indeterminazione*, e associato al nome di Heisenberg, che lo ha formulato nel 1927, in seguito al quale molte proprietà sono necessariamente *indeterminate*. Il suddetto principio stabilisce infatti che, in ciò che chiamiamo "realtà fisica" c'è un grado di incertezza intrinseco, che non dipende dai limiti della nostra conoscenza, ma è oggettivo e invalicabile anche per

la mente onnisciente di Galileo, per cui, nel caso di una qualsiasi coppia di variabili canonicamente coniugate, ad esempio la posizione e la velocità di una particella, non si può misurare contemporaneamente l'una e l'altra con accuratezza arbitraria. Migliore è la misura della velocità e peggiore diventa quella della posizione, e viceversa. Heisenberg quantificò questa relazione, stabilendo esattamente l'imprecisione della misura dell'una nel caso che l'altra sia invece misurata nel modo più preciso possibile. Proprio a causa della presenza di questo principio e del fatto, che ne consegue, che uno stato puro ψ non decide semanticamente tutte le proprietà di cui può godere l'oggetto da esso descritto, per cui alcune proprietà, come già evidenziato, restano indeterminate, *stati puri quantistici* (cioè gli stati che, giova ripeterlo, rappresentano un massimo d'informazione sul sistema studiato, un'informazione che non può essere estesa in modo coerente a una più ricca) possono essere *sommati*, determinando nuovi stati puri. Se prendiamo dunque due informazioni massimali ψ_1 e ψ_2 , è possibile sommarle ottenendo un nuovo stato puro ψ :

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$$

dove c_1 e c_2 sono due opportuni coefficienti numerici (complessi).

Questo nuovo stato di informazione massimale, dato dalla somma di ψ_1 e ψ_2 determina una *nuvola di proprietà potenziali* di cui, in un certo senso, il sistema sembra godere nello stesso tempo. È come se si dicesse: le cose *stanno così*, tuttavia *potrebbero stare anche* come asseriscono descrizioni alternative che non possiamo fare a meno di tener presenti. "Per questo nella situazione in cui io mi trovavo prima del tuo intervento", dice il gatto a un'Alice sempre più sorpresa e perplessa, "bisognava tener conto contemporaneamente degli stati di vita, di morte e anche di sovrapposizione tra la vita e la morte. Nell'universo dal quale tu provieni *gli oggetti attuali*, quelli che esistono in uno spazio e in un tempo ben determinati e precisi, e *quelli possibili* sono distinti in modo netto, per cui l'insieme degli oggetti attuali è considerato un *sottoinsieme proprio* (senza contorni sfumati) della classe degli oggetti possibili. Nel mondo in cui ci troviamo, invece, non si può fare a meno di ammettere che *l'esistenza attuale possa, in generale, dipendere da esistenze virtuali*, per cui il concetto tradizionale di *oggetto fisico* tende a evaporare e *la realtà risulta, appunto, strettamente intrecciata con la possibilità*". "D'accordo", concede un'Alice non del tutto convinta. "Non capisco però in che modo tutto questo abbia a che fare con il fatto che ti avrei salvato la vita aprendo la scatola e guardandoci dentro".

"L'osservazione che tu hai compiuto una volta aperta quella scatola ha impedito che il sistema complessivo, costituito da me e da tutto il marchingegno in cui ero stato intrappolato, evolvesse spontaneamente, secondo quanto previsto dall'equazione di Schrödinger che lo descriveva, in modo *continuo* e *lineare*, conservando, quindi, la forma delle sovrapposizioni di cui abbiamo parlato. Prima del tuo intervento la funzione d'onda ψ dell'intero sistema di cui facevo parte conduceva ad affermare che in essa la mia condizione di vita e la mia condizione di morte *non erano stati puri, bensì*

*stati miscelati con uguale peso, cioè con identità probabilità di realizzarsi.*⁹ Per il principio di sovrapposizione, potendo essere in questi due stati distinti, potevo trovarmi anche in una qualsiasi loro combinazione lineare. Ero Infatti in uno stato intricato (*entangled*) con quello dell'atomo della sostanza radioattiva, cosicché il sistema composto da me e da quest'ultima (trascurando gli altri elementi, quali scatola e marchingegno) risultava essere in una sovrapposizione dello stato in cui l'atomo non era decaduto e io, di conseguenza, era ancora vivo, e di quello in cui l'atomo era invece decaduto ed io ero morto.

Ciò che tu hai fatto ha provocato una trasformazione di stato *discontinua, stocastica* e non *prevedibile* dal punto di vista della teoria: mentre in base all'equazione suddetta il mio stato era delocalizzato rispetto alle condizioni di vita, di morte e di sovrapposizione tra di esse, e tale era destinato a rimanere anche nei tempi successivi, aprendo la scatola e guardandoci dentro tu hai osservato che ero in vita e in questo modo hai localizzato e reso attuale questo mio specifico stato, spazzando via anche dall'orizzonte delle semplici possibilità tutti gli altri". "Se non ho capito male", osserva a questo punto Alice, "ciò significa che ci troviamo in un mondo diviso, intrinsecamente conflittuale, nel quale coesistono due modalità di evoluzione della stessa situazione profondamente diverse e reciprocamente incompatibili, una continua, lineare e perfettamente prevedibile, l'altra discontinua, stocastica e non prevedibile. determinata da un osservatore che interviene e guarda o esegue una misura, come ho fatto io" "Proprio così", risponde il gatto, "vedo che cominci a capire dove sei capitata e quali siano le conseguenze del fatto che qui *quel che si calcola*, con la funzione d'onda (l'equazione di Schrödinger), *non è quel che si misura* e del tipo di interazione che, proprio in seguito a questa discrepanza, si viene a creare quando un *soggetto osservatore* agisce su un *oggetto osservato*, eseguendo una misura su di esso. Mentre nel tuo universo di provenienza ogni operazione di misura costituisce una "scoperta epistemica" di qualcosa che preesisteva alla misura stessa, in questo mondo è la scelta dell'osservatore, il quale decide di misurare la posizione piuttosto che la grandezza di una particella qualunque, a rendere determinato ciò che prima era *oggettivamente* del tutto indeterminato e a rendere attuali proprietà che in precedenza erano soltanto potenziali. Diciamolo in termini più rigorosi e precisi. Quando si fa una misura, quest'ultima provoca il collasso (o riduzione) del pacchetto d'onda, per cui lo stato ψ , rispetto a cui una data proprietà (ad esempio la posizione A) era indeterminata, si trasforma nello stato ψ_1 , che *decide* quella proprietà. A questo punto si può effettuare una seconda misurazione, che provoca una diversa riduzione del pacchetto d'onda, in seguito alla quale lo stato ψ , rispetto al quale era indeterminato anche il momento (B) della particella, si trasforma, per esempio, nello stato ψ_2 che decide questa seconda proprietà, lasciando ovviamente indeterminata la posizione. A e B non commutano, cioè $AB \neq BA$, e quindi la conoscenza precisa dell'una preclude questa stessa

⁹ E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik* (La situazione attuale della meccanica quantistica), 'Die Naturwissenschaften' 23 (1935) 807-812, 823-828, 844-849. L'esperimento mentale di cui stiamo parlando è descritto a pag. 812.

conoscenza per l'altra. La disuguaglianza $AB \neq BA$ andrebbe letta, per correttezza, come 'disuguaglianza condizionata', dal momento che l'esistenza del prodotto $A \cdot B$ e $B \cdot A$ non sempre è garantita. Non essendoci una particella che viaggia con le sue proprietà e stati *già dati* e che, al più, si disturba con la misura, ed essendo quest'ultima decisiva al fine di determinare la posizione o il momento, che non possono avere simultaneamente la specificazione e il grado di precisione voluti, i valori ottenuti *dipendono dall'ordine* in cui vengono fatte le misure.

La teoria, di conseguenza, ci pone di fronte a stati che sono la sovrapposizione di due o più altri.

Riassumendo, nella semantica, suggerita dalla teoria quantistica e dal tipo di computazione che vige all'interno di essa, risultano soddisfatte le condizioni seguenti:

- I. i *significati globali* (che possono corrispondere a una *Gestalt*) sono intrinsecamente *vaghi*, in quanto lasciano semanticamente indecise molte proprietà rilevanti degli oggetti studiati;
- II. ogni significato determina alcuni *significati parziali*, che sono di solito più vaghi del significato globale;
- III. i significati (*Gestalten*) possono essere rappresentati come *sovrapposizioni* di altri significati, eventualmente associati a valori di probabilità;
- IV. l'osservazione e l'esecuzione di una misurazione fanno sparire questa sovrapposizione di significati, riducendo a uno solo, quello riscontrato con questi atti, il precedente spettro di possibilità alternative.

Spero che a questo punto ti sia chiaro quello che mi è capitato e quale sia il mio destino. Pur provenendo, come te, dall'universo della precisione, il meccanismo infernale ideato da quel diavolo di Schrödinger mi ha fatto acquisire i tratti distintivi di questo mondo bizzarro e delle entità presenti all'interno di esso: in particolare quelli di non poter rivendicare una mia specifica *individualità* e di non essere mai ripetibile in modo identico. In quanto *inghiottito nel paese dei quanti*, anch'io sono soggetto a un'*interferenza irreversibile* con le condizioni nelle quali si sviluppa un processo di osservazione e di misurazione. In seguito a ciò, questo processo diventa parte del mio stesso essere e costitutivo di esso, cioè l'osservazione e la misurazione danno la specificazione a ciò che sono, per cui l'interazione con chi mi ha osservato, in questo caso con te, forma una parte inseparabile del mio essere e lascia tracce irreversibili sul corso della mia vita. Insomma, aprendo quella scatola e osservandomi, tu hai condizionato la mia esistenza e ne sei diventata, in modo irreversibile, una parte dalla quale non potrei più prescindere".

"Ho capito", rispose Alice, "e proprio per questo ho un'ultima domanda da farti. Se questo mondo è così eccentrico, rispetto al nostro universo di provenienza, e se il nostro linguaggio è stato forgiato per parlare di quest'ultimo, come possiamo descrivere situazioni così strane e tanto diverse dalla nostra esperienza abituale?"

“Questa sì che è una domanda sensata e profonda”, osservò il gatto. Prima di risponderti deve però parlarti di un ulteriore elemento di stranezza e di paradossalità di questo mondo eccentrico, come giustamente lo chiami tu, oltre a quelli già visti.

2. La critica di Einstein alla MQ: il paradosso EPR

Qui il gatto racconta in modo dettagliato ad Alice un aspetto messo in rilievo da un articolo del 1935 di Einstein, scritto in collaborazione con i fisici Nathan Rosen e Boris Podolsky, nel quale veniva esposto il paradosso che porta il nome dei tre autori (il paradosso EPR).¹⁰ In meccanica quantistica, argomentavano i tre fisici, secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg, è impossibile, come si è visto, misurare con arbitraria precisione, a un dato istante, *sia* la posizione *sia* la velocità di una particella. Ma immaginiamo una particella che si disintegri in due particelle, che schizzino via in direzioni opposte a uguale velocità: semplificando molto ma cercando di rispettare la sostanza dell’argomento, possiamo dire che se misuriamo la posizione di una delle due particelle e la velocità dell’altra, riusciremo, unendo le informazioni raccolte, a conoscere sia la velocità sia la posizione di ogni singola particella. Insomma, due particelle opportunamente predisposte – particelle *entangled*, o *intricate* come le abbiamo chiamate – rimangono soggette a una *correlazione* a distanza che agisce in maniera istantanea. L’esperimento mentale di Einstein-Podolsky-Rosen lasciava pertanto aperte solo due possibilità: o esistono proprietà fisiche nascoste che eludono la descrizione della realtà fornita dalla meccanica quantistica (e allora questa teoria è incompleta) o si verificano *effetti non locali* che ci obbligano a rivedere radicalmente la nostra concezione dello spazio e del tempo.

In effetti il paradosso EPR coglieva un tratto distintivo fondamentale della MQ. L’informazione sul sistema composto dalle due particelle dopo la loro separazione determina due informazioni parziali sulle loro componenti. Tuttavia queste informazioni parziali (chiamate anche *stati ridotti*) non sono rappresentabili da stati puri. Pertanto, prima delle misure effettuate su di esse, le due particelle *si comportano come due oggetti interscambiabili e indiscernibili fra loro*. Dall’equazione di Schrödinger si deduce pertanto che se due sistemi hanno interagito a un istante $t = 0$ e risultano poi separati, senza più alcuna interazione fra loro all’istante $T > 0$, si può, misurando solo uno di essi, conoscere con certezza il valore di una stessa misura sull’altro, all’istante T . Due particelle “intricate”, si dirà poi, permettono una conoscenza istantanea del valore di una misura fatta sull’una grazie alla misura fatta sull’altra. Se la prima ha lo spin “up”, per dire, si è certi, che lo spin dell’altra è “down”, *se misurato*. Iterando lo stesso identico processo, si può ottenere spin “down” per la prima: allora la seconda avrà spin “up”. Questa situazione può essere illustrata in forma semplificata, ma tale comunque da non alterarne gli aspetti essenziali, nel modo seguente. Supponiamo di avere una particella subatomica priva di rotazione, un pione neutro che, disintegrandosi, emette, oltre a un raggio γ , un elettrone e un positrone e immaginiamo che essi si allontanino

¹⁰ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, ‘Physical Review’, vol. 47, (1935), pp. 778-780.

fino a una distanza tale da escludere ogni possibile interazione reciproca. Queste due particelle figlie del pione ruotano e, in virtù della legge di conservazione del momento di rotazione, devono farlo in verso opposto l'una rispetto all'altra dal momento che la rotazione complessiva deve essere zero, essendo la particella madre a rotazione nulla. Prima di qualsiasi misurazione le loro rispettive rotazioni sono sintetizzate in due funzioni d'onda in cui coesistono entrambe le possibilità, rotazione in senso orario e rotazione in senso antiorario. Se però eseguiamo sull'elettrone una misura che dà come risultato una rotazione in senso orario, ne dobbiamo concludere necessariamente, senza effettuare alcuna osservazione diretta, che il positrone ruota in senso antiorario. Ovviamente vale anche l'inverso: possiamo effettuare la misura sul positrone e stabilire simultaneamente, senza alcuna osservazione, il tipo di rotazione dell'elettrone. Essendo, per ipotesi, la distanza tra le due particelle al di fuori della portata di un segnale luminoso, e quindi di qualsiasi possibile scambio d'informazione e di azione, dobbiamo escludere in questo caso qualsiasi intervento del principio di causalità e postulare, di conseguenza, la presenza di una relazione acausale dovuta al fatto che le due particelle e l'intero apparato sperimentale usato per misurare le loro rotazioni, per quanto lontani possano essere, costituiscono un sistema unico, ed è dunque come se fossero in costante contatto diretto. Ci troviamo pertanto di fronte a una situazione di non località, nella quale il concetto di distanza spaziale non ha alcuna incidenza, e quindi è privo di significato, che è in qualche modo da mettere in relazione con l'impossibilità di applicare la causalità. Questa impossibilità è ulteriormente ribadita dal fatto che, come si è detto, il risultato di questa situazione sperimentale immaginata non dipende dall'ordine delle misure ipotizzate. Si tratta di un'osservazione che, per quanto banale possa sembrare a prima vista, è invece importante, perché costituisce un ulteriore argomento a sostegno dell'insussistenza di una relazione di causalità, nella quale l'ordine di successione degli eventi e delle osservazioni costituisce ovviamente un aspetto imprescindibile.

Così, il formalismo della meccanica quantistica permette di calcolare l'evoluzione di un sistema di particelle intricate e fornisce dei valori "correlati" di probabilità, per eventuali misure. Questa situazione è ovviamente paradossale e del tutto inspiegabile dal punto di vista della fisica precedente a questa rivoluzione: infatti, se si lanciano due monete *classiche* in aria e queste interagiscono (si toccano, per dire) per poi separarsi definitivamente, le analisi probabilistiche dei valori testa-croce assunti dalle due monete sono del tutto indipendenti. Ecco perché Einstein-Podolsky-Rosen ritenevano che tra le due possibilità che il loro esperimento mentale lasciava aperte (l'esistenza di proprietà fisiche nascoste che eludono la descrizione della realtà fornita dalla meccanica quantistica, con conseguente incompletezza della teoria, o il verificarsi di *effetti non locali* tali da costringerci a una radicale revisione della usuale concezione dello spazio e del tempo) si dovesse optare, senza incertezza e in modo esplicito, per la prima. La seconda era infatti presso che inammissibile, dal punto di vista della concezione della *realtà fisica* alla quale gli autori aderivano dichiaratamente.

In effetti i tre autori individuavano correttamente i tre possibili “colpevoli” della situazione paradossale che si veniva a determinare in seguito al loro esperimento ideale. Si tratta delle seguenti tre ipotesi di carattere generale:

- Il principio di realtà;
- Il principio di località;
- Il principio di completezza fisica.

Ritenendo intangibili il principio di realtà e quello di località, la conclusione che traevano dal quadro generale che si veniva così a profilare era che il capo d'imputazione doveva necessariamente venire attribuito al principio di completezza fisica, negando, di conseguenza, che la teoria quantistica potesse fregiarsi di questa caratteristica.

Oggi, al contrario, i fisici aderiscono per lo più a soluzioni fondate sul rifiuto del principio di località: l'azione eseguita operando una misurazione su una delle due particelle nell'intervallo $[t_1, t_2]$ ha una vera “influenza” sull'altra particella, anche se questa è spazialmente separata sia dalla particella che ha subito la misura, sia dall'osservatore che l'ha effettuata. Questo non significa però ammettere la possibilità di inviare nell'intervallo $[t_1, t_2]$ un segnale qualunque da questo primo osservatore a un secondo il quale voglia controllare l'esattezza delle previsioni statistiche fatte sui parametri in gioco dell'altra particella misurandoli. Infatti, quest'altro osservatore non può in alcun modo accorgersi che le proprietà determinate di questa seconda particella dipendono dalle azioni realizzate dal primo osservatore lontano da lui. Qualora decidesse di eseguire effettivamente una misura sulla particella che è nei dintorni riscontrerebbe un risultato in accordo con le previsioni statistiche dello stato di essa che egli conosceva già prima di procedere a questa sua misura. Non si crea quindi alcuna situazione di incompatibilità logica con la relatività speciale, come paventava Einstein: la non località quantistica non consente di inviare messaggi che viaggino a una velocità superiore rispetto a quella della luce. Quello che emerge, però, è un'idea dello spazio che, non essendo più aderente al principio di località, appare profondamente diversa sia da come usualmente ce lo rappresentiamo, sia da come ce lo descrive la fisica classica.

“Ora”, conclude il gatto, “di fronte a tutti questi aspetti paradossali e così problematici per il nostro universo della precisione, piuttosto che cercare legami con la nostra comune esperienza pregressa dobbiamo usare metodi più astratti e concettuali. Come dice nel suo manuale dedicato al mondo nel quale ci troviamo Richard Feynman, che ne è uno studioso profondo, «non possiamo eliminare il mistero “spiegando” come avviene. Ci limiteremo a *descrivere* come avviene: e nel far questo avremo descritto le principali caratteristiche»¹¹ di un ambiente che tu giustamente definisci eccentrico.

¹¹ R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La Fisica di Feynman – The Feynman Lectures on Physics*, vol. III, Addison-Wesley Publishing Company, London -. Reading, Massachusetts – Menlo Park, California, Don Mills, Ontario, 1970, § 1-2.

3. Feynman: descrizione versus spiegazione

A questo punto il gatto illustra ad Alice come Feynman cerca di capire e di far capire le situazioni che si verificano nel mondo quantistico e il comportamento dei fenomeni di cui ha diffusamente parlato ricorrendo alle parole dello stesso Feynman, cioè:

“mettendoli a confronto, in una particolare situazione sperimentale, con particelle a noi più familiari, come ad esempio dei piccoli proiettili, e poi anche delle onde, per esempio del tipo di quelle che si formano nell’acqua”.¹² Prendendo cioè il linguaggio di cui ci serviamo per descrivere il nostro universo della precisione e usandolo come metafora, attraverso un processo di *trasferimento analogico* di un vocabolario in un altro, al fine di poter parlare di ciò per cui non è disponibile un linguaggio osservativo e sperimentale. Naturalmente questo trasferimento analogico, in virtù del quale adottiamo i nostri abituali strumenti linguistici e il linguaggio per noi familiare della fisica classica come metafore per parlare di ciò che altrimenti sarebbe muto e indescrivibile, non deve e non può cancellare le differenze tra la realtà e gli oggetti del nostro universo e quelli di questo mondo, dove, come ti ho detto, è come se gli oggetti tendessero a “evaporare” e la realtà è profondamente intrecciata con la possibilità. Infatti, Feynman si affretta a chiarire, ad esempio, che “dobbiamo immaginare un’esperienza leggermente più idealizzata, in cui i proiettili non siano delle pallottole reali, ma siano *indistruttibili* – che non possano cioè spezzarsi in due”.¹³ Vedere e pensare la pallottola come un blocco indivisibile, che si comporta sempre come una pallottola intera, cioè come qualcosa di sensibilmente diverso da ciò che usualmente chiamiamo con quel nome, è il prezzo che dobbiamo pagare per riuscire a dar voce al mondo in cui siamo capitati. Il linguaggio che ne scaturisce non è, pertanto, né quello del nostro universo della precisione, né quello di quest’ultimo mondo: è piuttosto il linguaggio della loro ideale convergenza, di una sorta di «terra di mezzo» astratta e ibrida nella quale questi due ambienti così diversi s’incontrano e dialogano”.

Il gatto spiega così ad Alice perché, e come, dobbiamo fare i conti con l’idea di un linguaggio denotativo, cioè descrittivo ed esplicativo, modellato e “calibrato” sulle caratteristiche di un determinato contesto, quello del mondo della fisica classica, da utilizzarsi come metafora per evocare gli aspetti di un ambito completamente diverso, per il quale non disponiamo di risorse linguistiche denotative che ci mettano in condizione di coglierne le specificità.

Per capire il riferimento a Feynman e alla sua “esperienza idealizzata” che il gatto fa per spiegare il processo di trasferimento analogico ad Alice dobbiamo prendere in considerazione la situazione sperimentale che viene proposta.

Si tratta di un esperimento articolato in tre stadi diversi: il primo si occupa del comportamento delle particelle classiche (fig. 1), il secondo delle onde (fig. 2), il terzo degli elettroni (fig. 3), studiati in situazioni sperimentali pensate e presentate in modo da essere raffrontabili sulla base di analogie costruite mediante l’introduzione di appositi elementi arbitrari.

¹² Ibidem.

¹³ Ivi, § 1-3.

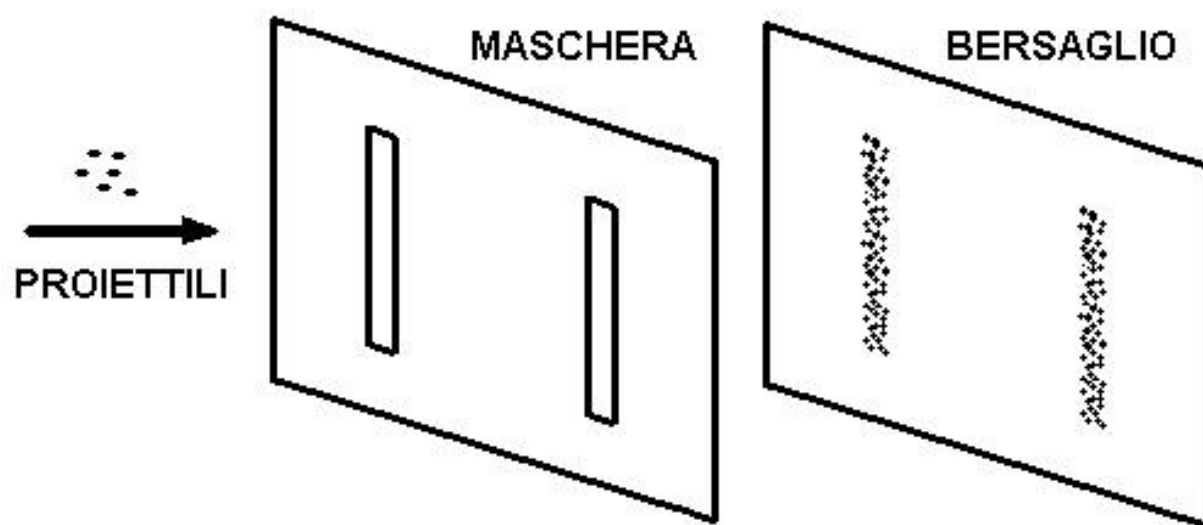


Fig. 1

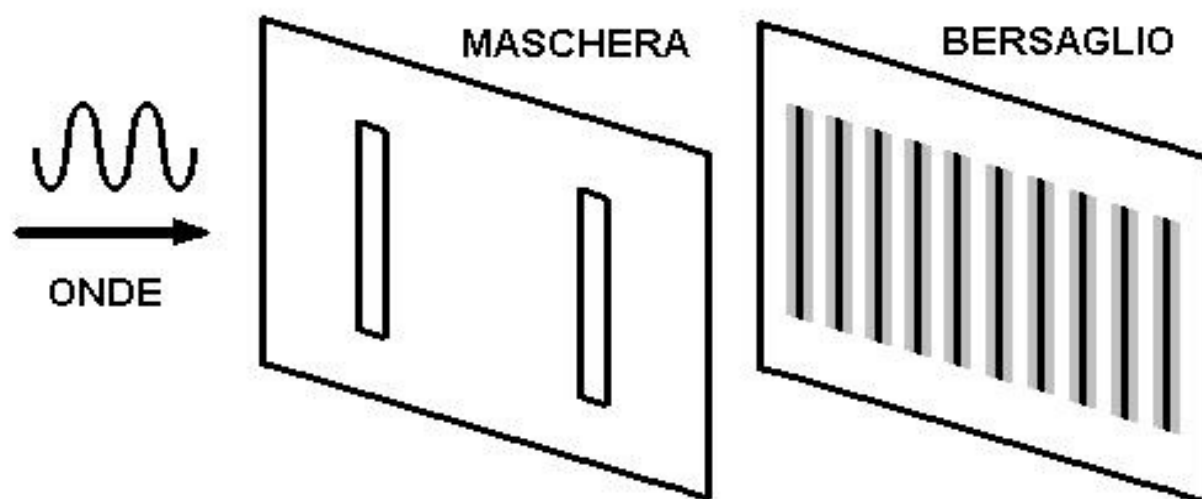


Fig. 2

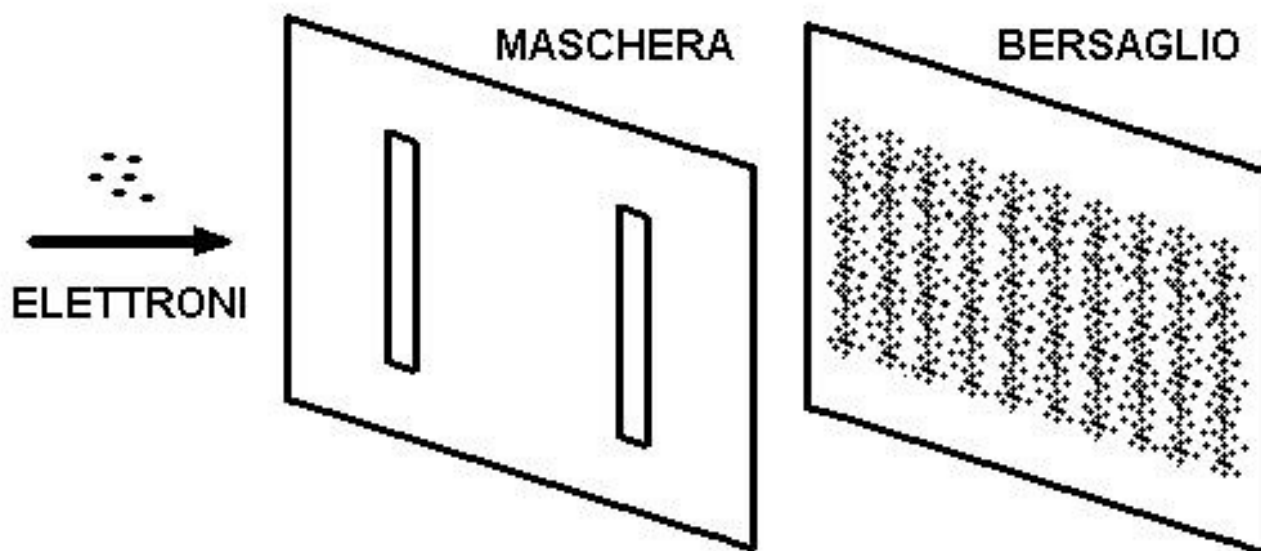


Fig. 3

In tutte e tre le situazioni c'è un dispositivo che emette gli oggetti di studio, uno schermo o maschera con due fenditure che possono essere aperte alternativamente o insieme o restare chiuse, e una parete *bersaglio* adatta a raccogliere gli oggetti medesimi al termine del loro percorso. Ma è sugli *oggetti* sui quali vertono gli esperimenti che si esercita l'attività di *manipolazione* di Feynman, che sembra seguire alla lettera la concezione del trasferimento analogico e della metafora proposta da Max Black.¹⁴

Questo approccio alla figura retorica in questione parte dalla constatazione che, quando si usa una metafora, si attivano contemporaneamente *due pensieri* di cose differenti sostenuti da *una sola parola* o frase, il cui significato è la risultante della loro interazione, appunto. In questo modo si produce un significato nuovo, diverso da quello letterale: si ha, cioè, un'estensione o una variazione di significato determinata dal fatto che la parola viene attivata in un contesto nuovo. Abbiamo, quindi, un primo elemento di cui tener conto: la metafora è sempre il risultato dell'interazione tra una parola (o un intero enunciato) e il contesto in cui si inserisce: essa è, dunque, sempre un pezzetto, per quanto piccolo, di testo. Una parola qualsiasi può venire usata isolatamente: ma, utilizzata in questo modo, non può mai dar luogo a effetti metaforici.

¹⁴ M. Black, *Models and metaphors: Studies in language and philosophy*, Cornell University Press, Ithaca 1962, tr. it. *Modelli, archetipi, metafore*, Pratiche Editrice, Parma, 1983.

La parola e il contesto costituiscono insieme, in un'unità indissolubile, la metafora. Ma quale tipo di combinazione tra testo e contesto produce gli effetti metaforici?

Per rispondere a questa domanda occorre in primo luogo tener presente che il significato di una parola consiste, essenzialmente, in una certa aspettativa di determinazione. Questa attesa è guidata, per così dire, e condizionata dalle leggi semantiche e sintattiche che governano l'uso letterale della parola, e la cui violazione produce assurdità e contraddizione. In aggiunta a ciò, va sottolineato che gli usi letterali di una parola normalmente richiedono al parlante l'accettazione di un pacchetto di credenze standard che sono possesso comune di una data comunità di parlanti. La metafora agisce proprio su questo sistema di idee normalmente associato a una parola: essa, in particolare, comporta il trasferimento dei luoghi comuni usualmente implicati dall'uso letterale di un termine e la sua utilizzazione per costruire un corrispondente sistema di implicazioni da riferirsi a un secondo termine, per il quale, nell'uso letterale, queste implicazioni non valgono.

“Proviamo, ad esempio, a pensare alla metafora come a un *filtro*. Si consideri l'affermazione: «L'uomo è un lupo». Qui, possiamo dire, vi sono *due* soggetti: il soggetto principale, l'uomo (o gli uomini) e un soggetto secondario, il lupo (o i lupi). Ora la frase metaforica in questione non sarebbe in grado di trasmettere il suo significato *intenzionale* a un lettore piuttosto ignorante in materia di lupi. Ciò che si richiede non è tanto che il lettore conosca il significato standard di «lupo» fornito da un dizionario, o che sappia usare la parola in senso letterale, quanto piuttosto che sia a conoscenza di quello che chiamerò un *sistema di luoghi comuni associati* [...] L'effetto, dunque, di chiamare un uomo «lupo» è di evocare il sistema «lupo» di luoghi comuni correlati. Se l'uomo è un lupo, egli è feroce, affamato, impegnato in una continua lotta, e così via. Ciascuna di queste asserzioni implicite deve essere ora condotta ad adattarsi al soggetto principale (l'uomo) sia nei sensi normali che in quelli inconsueti [...] Ogni tratto umano di cui si può senza inopportune distorsioni parlare in «linguaggio lupo» sarà messo in rilievo, e ogni tratto che non ha queste caratteristiche sarà respinto sullo sfondo. La metafora-lupo sopprime particolari, ne sottolinea altri: in breve *organizza* la nostra visione dell'uomo.¹⁵

Ciò ci autorizza ad affermare che “la metafora crea una similarità, piuttosto che esprimere una qualche similarità precedentemente esistente”.¹⁶ Il soggetto principale viene infatti “visto attraverso” l'espressione metaforica o, per meglio dire, proiettato sul campo dei soggetti secondari. Un sistema di implicazioni (o di *luoghi comuni*) impiegato all'interno di un certo campo viene usato come strumento per selezionare, evidenziare, costruire relazioni, in una parola per strutturare, organizzare anche percettivamente, un campo differente. Questa operazione, che ha dunque una vera e propria natura *percettiva*, oltre che *conoscitiva*, in quanto attraverso il soggetto secondario conduce a mettere in luce e a vedere caratteristiche e proprietà fino a quel momento del tutto

¹⁵ Ibidem.

¹⁶ Ivi, p. 37.

inedite del soggetto principale, può riuscire soltanto a due condizioni: 1) che entrambi i termini o soggetti siano presenti contemporaneamente nell'operazione medesima e interagiscano tra di loro; 2) che le implicazioni che vengono trasferite da un soggetto all'altro rimangano, almeno in una certa misura, *implicite*. Se infatti la metafora "l'uomo è un lupo" venisse sostituita da una parafrasi letterale, che *espliciti* le relazioni rilevanti tra i due soggetti, essa perderebbe gran parte della sua efficacia, cioè del suo valore di "illuminazione". L'insieme di proposizioni letterali così ottenuto finirebbe inevitabilmente col dire troppo e col mettere in evidenza cose diverse dalla metafora, con il risultato di vanificare il contenuto conoscitivo di essa. Va infine tenuto presente che, attraverso la sovrapposizione creata, la produzione della relazione metaforica modifica anche il sistema di implicazioni associato al soggetto secondario, e non solo quello legato al soggetto principale. Se infatti chiamare "lupo" un uomo è metterlo in una luce particolare, non va dimenticato che la metafora fa sembrare anche il lupo più umano di quanto non sarebbe altrimenti.

Trasferiamo il processo, così efficacemente descritto da Black, all'operazione compiuta da Feynman. Egli non assume le caratteristiche delle *particelle* e delle *onde* così come usualmente le vediamo e le pensiamo, o così come ce le presenta la meccanica classica, ma le usa come *filtri* per organizzare la visione delle particelle subatomiche secondo la meccanica quantistica. Sia *l'esperimento con le pallottole* sia quello con le *onde* sono quindi presentati in modo da far diventare le une e le altre un *analogo* degli elettroni e per far così emergere le proprietà dei fenomeni quantistici sui quali si vuole attirare l'attenzione. È importante sottolineare che questa sua scelta non è un puro artificio retorico, ma il risultato del tipo particolare di relazione che si viene a instaurare tra le due teorie in gioco e che Landau e Lifchitz hanno così riassunto: «La meccanica quantistica occupa una posizione originale nell'insieme delle teorie fisiche – essa contiene la meccanica classica come caso limite e, nello stesso tempo, essa ha bisogno di questo caso limite per poter essere fondata».¹⁷ Proprio per questo il suo linguaggio ha bisogno di essere costruito passando attraverso il riferimento a quello della fisica classica, opportunamente riformulato però in modo da poter rendere espliciti e *visibili* la natura e il significato di questo *passaggio al limite*, nel quale è racchiuso il senso profondo del nesso tra le due teorie.

Vediamo questo aspetto nella lucida e rigorosa ricostruzione che ne fa Guzzardi:

"Le particelle del primo esperimento sono pallottole sparate da una mitragliatrice: ma sia quest'ultima che i suoi proiettili sono di tipo particolare. Feynman ammette, infatti, «che quella che bisogna impiegare 'non è una mitragliatrice molto buona, perché sparge le pallottole (casualmente) su una regione angolare piuttosto grande'». L'avverbio *casualmente* è assai più importante di quanto le parentesi facciano sospettare. Infatti, se è vero che, nonostante gli sforzi dei migliori costruttori di armi, non esiste una mitragliatrice assolutamente precisa e che, dunque, i colpi a segno andranno contati sempre attraverso una distribuzione probabilistica, nel suo modello

¹⁷ L. Landau, E. Lifchitz, *Mécanique quantique. Théorie non relativiste*, Nauka, Moskva 1966, p. 10.

Feynman deve servirsi di una mitragliatrice tanto imprecisa da essere inverosimile, estendendo notevolmente il dominio del casuale per poter apprezzare l'applicazione del calcolo delle probabilità *come se* fosse davvero alle prese con particelle subatomiche.¹⁸

Dopo questa prima *analogia costruita* ne viene immediatamente proposta una seconda, questa volta riguardante i proiettili:

“Viene infatti immaginata una situazione in cui «i proiettili non siano delle pallottole reali, ma siano *indistruttibili* – che non possano cioè spezzarsi in due». Il che, evidentemente, consente di ‘quantizzare’ quell’esperienza. Sarà allora facile controllare per quale buco sia passata ogni pallottola che arriva; inoltre, quest’ultima sarà «un blocco indivisibile e [...] quando c’è qualcosa nel rivelatore, si tratta sempre di una pallottola intera». Con queste opportune idealizzazioni, si immagina poi di ridurre all’estremo il ritmo con cui la mitragliatrice spara: A ogni dato istante, al tabellone o non arriva nulla oppure arriva una pallottola, una soltanto ed esattamente una”.¹⁹

Quindi non si produce alcuna interferenza.

Lo stesso tipo di operazione si fa nel secondo esperimento:

“quello con le onde d’acqua, utilizzate in modo da evidenziare che, nel loro caso, l’intensità può avere *qualsiasi* valore, in modo che non si possa certo dire che l’intensità dell’onda abbia una struttura in qualche modo *a blocchi*. Le onde interferiscono e il loro comportamento è un importante punto di riferimento e di raffronto per il terzo esperimento, quello che utilizza un cannoncino elettronico (un filo di tungsteno riscaldato elettricamente e circondato da un involucro metallico dotato di un foro) e facendo in modo che questo spari un solo elettrone alla volta. Ciò che notiamo è che si sentono dei *clic* ben staccati nel rivelatore e che tutti i *clic* sono uguali. Non ci sono *mezzi clic*. Quel che arriva all’altoparlante che funge da rivelatore, qualunque cosa sia, arriva in granuli tutti interi e uno alla volta. Una situazione che parrebbe ricordare quella dei proiettili di mitragliatrice del primo esperimento: solo che la distribuzione delle probabilità che i granuli hanno di arrivare a varie distanze dal centro rivela una somiglianza inquietante con la curva che descrive il comportamento delle onde d’acqua del secondo esperimento. «Già!», esclama Feynman, «Gli elettroni fanno proprio così».²⁰

I tre esperimenti mentali vengono pertanto ideati e pensati nel loro svolgimento in modo non solo da essere reciprocamente ricordati, ma da far sì che i primi due siano utilizzati come *filtri*, nel senso di Black, per associare agli elettroni un sistema di luoghi

¹⁸ L. Guzzardi, *Lo sguardo muto delle cose. Oggettività e scienza nell’età della crisi*, Raffaello Cortina, Milano, 2010, pp. 132-133.

¹⁹ Ivi, p. 133.

²⁰ R.P. Feynman, *La fisica di Feynman*, Ed. it. bilingue, vol. III, Zanichelli, Bologna, 2001, 1-7.

comuni *ibrido*, i cui componenti sono tratti in parte dal riferimento al significato standard dei proiettili (idealizzati nella maniera che si è vista) e in parte dal riferimento al significato standard di onda: ne scaturisce l'immagine di granuli/elettroni che sono proiettili di mitragliatrice i quali però interferiscono comportandosi come onde. È in questo senso che si può dire che essi si comportano "talvolta come una particella e talvolta come un'onda".²¹ "Tale comportamento", sottolinea Feynman "non svela alcun meccanismo più profondo. Nessuno può «spiegare» niente più di quanto abbiamo «spiegato» noi. Nessuno vi saprà dare una rappresentazione più approfondita di un meccanismo più fondamentale da cui questi risultati possa venire dedotti".²²

L'esigenza del ricorso al linguaggio metaforico indica chiaramente che qui non abbiamo forme e immagini disponibili che possano consentirci di visualizzare ciò che è in atto. Del tutto pertinente e condivisibile è la conclusione che Guzzardi trae dall'analisi di questa situazione:

"Un modello [...] – un modello fisico – è *fatto* dei rapporti reciproci tra i suoi elementi (e forse, stando all'esempio tratto da Feynman, lo stesso si può dire degli esperimenti); non dà luogo a sequenze causali fra raffigurante e raffigurato, non spiega perché un fenomeno avviene. [...] Il modello *illustra* – e per questo è probabile che il concetto di modello abbia avuto origine in una pratica dimostrativo-sperimentale, – dove dimostrare significa portare davanti agli occhi alcune caratteristiche di un fenomeno. Non è un approccio discorsivo che discende "diacronicamente" da premesse a conclusioni; piuttosto, presenta gli elementi della realtà e le loro relazioni *tutti in una volta sola*, in maniera "sincronica", senza dire quale sia il primo pezzo".²³

Questa conclusione evidenzia il fatto che il cambiamento del modo di presentarsi dell'interfenomeno da onda a particella è il risultato dei mutamenti delle pratiche sperimentali con cui viene osservato, quindi del fare, dell'azione, delle differenti interazioni che si realizzano tra l'apparato scelto dall'osservatore e l'oggetto osservato, non già della sua visione o della rappresentazione.

La cosa interessante è che i risultati di questo esperimento mentale sono stati pienamente confermati nel 1976 da Pier Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli e Giulio Pozzi, utilizzando un microscopio elettronico opportunamente modificato e inviando un elettrone alla volta sulla lastra fotografica.

L'esperimento, effettivamente realizzato a Bologna, definito "il più bello di tutti i tempi" in base a un sondaggio della rivista *Physics World*, conferma la violazione delle aspettative del senso comune e della nostra usuale esperienza, che ci dicono che quando le cose entrano da un lato sotto forma di particelle, dovrebbero mantenere quella forma viaggiando lungo tutto l'esperimento, uscendo poi alla fine in quanto tali. Al contrario le prove dimostrano che in un dato momento, tra il punto di partenza e

²¹ Ivi, vol. III, § 1-

²² Ivi, vol. III, § 1-13.

²³ L. Guzzardi, *Lo sguardo muto delle cose*, cit., pp. 135-136.

quello di arrivo, alle particelle accade qualcosa di straordinario. Gli scienziati hanno riscontrato che allorché si cerca di osservare direttamente il percorso seguito dall'interfenomene o di mettersi comunque in condizione di poterlo inferire con certezza, ad esempio piazzando un rilevatore qualunque su una delle due fenditure aperte o mantenendo disponibile una sola apertura, in modo da costringerlo a passare di lì, esso si comporta esattamente secondo le attese: comincia e finisce il suo viaggio in quanto particella. Nel far questo, non presenta sorprese. Al contrario, quando vengono usate due aperture, senza alcun tentativo di controllo e di osservazione del percorso seguito, quello stesso elettrone fa qualcosa di apparentemente impossibile. Sebbene inizi il suo percorso come particella, passa attraverso le fessure simultaneamente, come soltanto un'onda di energia può fare. La variazione del significato e del modo di presentarsi dell'interfenomene è pertanto – giova ribadirlo ancora una volta – il risultato di un'azione, di una modifica dell'apparato sperimentale che fa sì che da una situazione nella quale non possiamo dire da dove passa effettivamente l'elettrone, ma *solo da dove è più probabile che passi*, ci si trovi invece di fronte a un'altra nella quale il suo percorso viene determinato in modo univoco, senza lasciare spazio ad alternative. Da uno spettro di molti comportamenti possibili, ciascuno con il suo specifico valore di probabilità (onda), si passa dunque a quell'unico comportamento che viene effettivamente osservato (particella localizzata). In gioco qui è dunque, ancora una volta, il passaggio dalla possibilità all'effettualità, cioè al "qui" e "ora". La meccanica quantistica ha a che fare con entità che acquistano un significato definito solo allorché entrano in relazione e inter-agiscono con qualcosa in grado di osservarlo e di misurarlo.

A conferma di questo "primato dell'azione" ad Alice viene ricordato, a proposito dell'entanglement e del paradosso EPR, che il premio Nobel della fisica 2022 è stato assegnato a fisici come Alain Aspect, John Clauser e Anton Zeilinger, i quali hanno avuto il merito di raccogliere la sfida teorica lanciata da Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen e di dimostrare sperimentalmente che, nel caso degli stati intrecciati, appunto, ciò che accade a una particella determina ciò che accade all'altra, anche se le due sono molto distanti tra loro, per cui si ha una sorta di "abbraccio a distanza" reciproco, in seguito al quale la prima può anche trasferire il suo stato alla seconda, diventando di fatto identica a essa, il suo gemello.

Questi sviluppi hanno dunque trasformato quello che appariva agli scienziati geniali che l'avevano ideato un paradosso teorico, mirante a evidenziare i limiti di una teoria scientifica e a sottolineare l'esigenza di un suo completamento, in soluzioni che, oltre a ribadire la "tenuta" di quella teoria e a contribuire a corroborarne la validità, sul piano pratico stanno portando ad applicazioni di grande rilievo, destinate ad avere un'incidenza e un impatto inimmaginabile sul nostro vissuto e di rivoluzionarlo, come ha giustamente osservato il premio Nobel della fisica del 2021 Giorgio Parisi, il quale non a caso ha subito parlato di applicazioni, come il computer quantistico, che cambierà le nostre vite.

4. Dalla fisica classica alla MQ

Quali sono stati gli eventi fondamentali in seguito ai quali si è determinata una cesura così netta da provocare il passaggio dal mondo a noi familiare della fisica classica a quello, in apparenza così bizzarro, della MQ?

Il punto d'avvio è stato il problema del cosiddetto *corpo nero*, termine con il quale si designa un corpo che assorbe integralmente le radiazioni ed il cui campo di forze, conseguentemente, è indipendente dal proprio colore: ciò permetteva, sul piano sperimentale e teorico, di non prendere in considerazione le interazioni puramente ottiche e, dunque, di poter studiare nella sua purezza la relazione tra materia e radiazione. Senza entrare nei particolari della questione è essenziale qui andare direttamente al suo momento decisivo, ossia alla scoperta, da parte di Planck, che *lo scambio di energia tra materia e radiazione*, quindi tra gli atomi di un certo elemento chimico e la luce, avviene *solo a tappe discrete*, non continue. Dunque secondo una scala di valori a intervalli dati: la costante h di Planck esprime, esattamente, il valore minimo, e universale, di questa scala, l'intervallo minimo, che non è infinitesimale, ma di una certa misura sempre uguale, della composizione dell'energia: *l'atomo energetico*, in qualche modo, quello che egli stesso chiamerà "quanto d'azione".

Questa scoperta, che sconvolse lo stesso Planck, il quale si rese subito conto di aver a che fare con qualcosa di completamente nuovo e rivoluzionario, ebbe una prima interpretazione generale da parte di Einstein, che si spinse sino a formulare chiaramente almeno uno delle dimensioni fondamentali della vera questione che stava alla base di tutti i problemi di cui si sta parlando: ossia la *dualità tra comportamento ondulatorio e corpuscolare della luce*. Questa dualità era già presente nell'elettrodinamica, ma lì vi rimaneva suo malgrado, ossia nonostante tutti i tentativi di risolverla in un'unità superiore, e quindi come aspetto ancora non chiarito, e che necessitava quindi di un approfondimento ulteriore, di là da venire, della teoria. Einstein, invece, la rese il nucleo della propria teoria dei *fotoni*, formulandone chiaramente la struttura matematica proprio grazie al quanto di azione di Planck. Egli assunse infatti che la luce può avere sia un comportamento ondulatorio, al quale ci riferiamo quando spieghiamo i fenomeni legati alla frequenza e alla lunghezza d'onda (come i fenomeni di interferenza), sia un comportamento corpuscolare, come nel caso dell'effetto fotoelettrico, che va descritto tramite i concetti tipici della meccanica. Un certo fascio di luce, dunque, sarà caratterizzato dalle sue frequenza e lunghezza d'onda, che però noi possiamo mettere in relazione a quantità meccaniche di particelle (i fotoni) come l'energia e il momento (coppia usuale nella scelta delle variabili canoniche nelle equazioni di tipo hamiltoniano) proprio tramite il quanto d'azione. E queste relazioni sono molto semplici:

$$e = hn$$

$$p = h/\lambda$$

(ove e è l'energia e p il momento)

Il quanto d'azione, quindi, risultava decisivo per passare dalla descrizione della luce come onda alla sua descrizione come pacchetto di fotoni, ossia di particelle dotate di un certo moto, etc... Dopo alcuni anni, queste stesse relazioni saranno alla base dell'interpretazione in qualche modo speculare della *materia come onda*, interpretazione che ha dato origine a quella branca della meccanica quantistica che è la *meccanica ondulatoria*, opera soprattutto di Erwin Schrödinger e Louis De Broglie.

Oltre a essere in qualche modo risolutivo per i problemi legati all'interpretazione della luce, però, il quanto d'azione inaugurava anche una concezione del tutto nuova dell'atomo. L'intuizione di Planck, infatti, fu quella di esprimere le caratteristiche della radiazione come comportamenti dell'atomo radiante, di cui aveva già parlato Lorenz. E, come nota Heisenberg, dai risultati matematici dei suoi studi sul corpo nero, Planck doveva dedurre chiaramente che *l'atomo può avere solo contenuti energetici discreti*. Questo strano fatto, del tutto in contrasto con le normali leggi cinetiche e tale, dunque, da non poter essere compiutamente rappresentato per il loro tramite, fu dotato di un contenuto fisico da Niels Bohr, che ipotizzò che questi *gradini energetici* dell'atomo corrispondessero ai suoi possibili *stati stazionari*, situazioni stabili nelle quali l'atomo non emette, né assorbe radiazioni, ossia di fatto *non interagisce con l'esterno*. Solo quando l'atomo passa da uno stato stazionario all'altro, con un *salto*, che peraltro non ha sempre una vera e propria causa definita, vi è l'emissione o l'assorbimento di una radiazione, e solo in questo momento l'atomo è per noi conoscibile, poiché possiamo averne notizia e sperimentare su di esso.

Nella meccanica quantistica, invece, le cose stanno molto diversamente. Vediamo, per esempio, cosa scrive Heisenberg nel suo saggio su *La scoperta di Planck e i problemi filosofici della teoria atomica* del 1958):

“La legge delle radiazioni di Planck si distingueva anche in un modo assai caratteristico dalle leggi naturali formulate in precedenza. Se le leggi naturali più antiche, per esempio quelle della meccanica di Newton, contenevano delle cosiddette costanti, queste designavano delle proprietà degli oggetti, per esempio la loro massa o l'intensità della forza agente tra due corpi, o cose simili; invece il quanto d'azione di Planck, che appare come la costante caratteristica nella sua legge delle radiazioni, non rappresenta una proprietà di oggetti, ma una proprietà della natura. Essa stabilisce una distinzione secondo secondo una scala di grandezze nella natura, e mostra perciò nello stesso tempo che, in ambienti in cui gli effetti risultano molto grandi di fronte al quanto d'azione di Planck (come in tutti i fenomeni della vita giornaliera), i fenomeni naturali hanno un decorso diverso da quelli in cui gli effetti sono dell'ordine di grandezza dell'atomo, dunque del quanto di Planck”.²⁴

²⁴ W. Heisenberg, *La scoperta di Planck e i problemi filosofici della fisica atomica*, in W. Heisenberg, M. Born, W. Schrödinger, P. Auger, *Discussione sulla fisica moderna*, Paolo Boringhieri, Torino 1960, p. 7.

Questo metro universale di misura comporta una profonda trasformazione dell'idea di legge di natura, in quanto "mostra per la prima volta che ci sono in natura distinzioni secondo scale di grandezza, che i fenomeni in regioni d'estensione diversa non hanno in nessun caso da essere dello stesso tipo."²⁵

Nella fisica precedente, *la misurazione* era un mezzo per accertare dei fatti oggettivi che erano *indipendenti da essa*. Questi fatti oggettivi potevano essere descritti matematicamente e con ciò la loro *relazione causale* era *rigorosamente determinata*. Nella teoria dei quanta, la misurazione è ancora un dato oggettivo, come nella fisica precedente, ma:

"i lavori di Bohr, Kramers e Slater contenevano tuttavia l'idea d'importanza decisiva che le leggi naturali non determinano il verificarsi d'un avvenimento, ma la probabilità che esso si verifichi; che inoltre questa probabilità deve essere messa in relazione con un campo d'onde che ubbidisca a un'equazione d'onde formulabile matematicamente. Con ciò si compiva un distacco decisivo dalla fisica classica e si ritornava in ultima analisi a una concezione che aveva già assunto una grande importanza nella filosofia di Aristotele. Le onde di probabilità di Bohr, Kramers, Slater possono essere interpretate come una formulazione quantitativa del concetto aristotelico di *dynamis* (δύναμις), di possibilità, chiamato anche più tardi col nome latino di *potentia*. L'idea che quanto succede non sia determinato in modo perentorio, ma che già la possibilità o 'tendenza' al verificarsi d'un fatto possieda una specie di verità, ha nella filosofia di Aristotele una parte decisiva. Si tratta d'una specie di strato intermedio di verità che sta in mezzo fra la verità massiccia della materia e la verità spirituale dell'idea o dell'immagine. Nella moderna teoria dei quanti questo concetto di possibilità assume una nuova veste: è formulato matematicamente come una probabilità e sottomesso a leggi naturali esprimibili matematicamente. Le leggi naturali formulate in termini matematici non determinano qui più i fenomeni stessi, ma la loro possibilità, la probabilità che succeda qualche cosa"-²⁶

Avremo modo di tornare diffusamente sulla questione della verità delle teorie scientifiche, della fisica in particolare, e del rovesciamento di prospettiva che la MQ provoca anche con riferimento a questo specifico problema.

Per concludere l'analisi di questo articolo di Heisenberg del 1958 occorre introdurre un ulteriore aspetto della rivoluzione quantistica, di notevole rilievo:

"Qui rimane ancora da aggiungere che nella scienza della natura *non si tratta della natura stessa, ma appunto di una scienza della natura, cioè della natura come un uomo la pensa e la descrive*. Non intendiamo dire che con ciò s'introduca un elemento di soggettività nella scienza della natura, non pretendiamo affatto che ciò che succede nell'universo dipenda dalla nostra osservazione, ma accenniamo al fatto che *la scienza sta tra la natura e l'uomo* e che noi non possiamo rinunciare all'uso delle

²⁵

²⁶ Ivi, p. 12.

rappresentazioni date dall'intuizione o innate nell'uomo. Già per questo carattere della teoria dei quanti è difficile poter seguire in tutto il programma della filosofia materialistica e considerare le minime particelle della materia, le particelle elementari, come il vero in senso assoluto. Giacché queste particelle, alla luce della teoria dei quanti, non sono più vere nello stesso senso che gli oggetti della vita d'ogni giorno, gli alberi, le pietre, ma esse appaiono piuttosto come *astrazioni derivate dal materiale d'osservazione*, vero quest'ultimo nel senso proprio²⁷.

La conclusione che Heisenberg trae da questa premessa è particolarmente significativa e merita di essere approfondita: "A somiglianza dei corpi regolari della filosofia platonica, le particelle elementari della fisica moderna sono determinate da condizioni matematiche di simmetria, non sono eterne e immutabili, e perciò sono a mala pena ciò che si potrebbe chiamare 'reale' nel vero senso della parola. Esse sono piuttosto semplici rappresentazioni di quelle strutture matematiche fondamentali che si ottengono nel tentativo di suddividere sempre più la materia che rappresentano appunto il contenuto delle leggi naturali fondamentali. Per la scienza moderna non c'è più all'origine l'oggetto materiale, ma la forma, la simmetria matematica. E siccome la struttura matematica rappresenta in ultima analisi un contenuto spirituale, si potrebbe dire anche con le parole del *Faus* di Goethe: 'All'origine era il logos'. Riconoscere in tutti i particolari e con piena chiarezza questo significato, per quanto concerne appunto la struttura fondamentale della materia, è il compito dell'attuale fisica atomica e delle sue attrezzature spesso, purtroppo, ben complicate."²⁸

Non sfugga qui il riferimento alle *attrezzature* di cui ci si deve valere, vale a dire ai mezzi sempre più potenti che sono a disposizione della tecnica moderna, perché proprio da qui aveva preso avvio la conclusione della celeberrima memoria scientifica con la quale Heisenberg aveva presentato nel 1927 il suo principio di indeterminazione, uno scritto di natura matematica molto complesso, intitolato *Über den anschauliche Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*²⁹.

In questo articolo Heisenberg sferri un formidabile schiaffo alla nostra intuizione: "Nell'affermazione netta della legge della causalità – 'Se conosciamo esattamente il presente, possiamo calcolare il futuro' – è falsa non la conclusione, ma la premessa. Noi non *possiamo* in linea di principio conoscere il presente in ogni elemento determinante. Perciò ogni percepire è una selezione da una quantità di possibilità e una limitazione delle possibilità future. Poiché il carattere probabilistico della teoria quantistica è così strettamente collegato all'imprecisione di ogni percezione, si potrebbe essere indotti erroneamente a supporre che al di là del mondo statistico

²⁷ Ivi, pp. 13-14. Evidenziazioni mie.

²⁸ Ivi, pp. 20-21.

²⁹ W. Heisenberg, "Über den anschauliche Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik" (Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica quantoteoriche), 'Zeitschrift für Physik 9, 43: 172-198, 1927, tr. it. in W. Heisenberg, *Indeterminazione e realtà*, a cura di G. Gembillo, Guida, Napoli 1991.

percepito si celi ancora un mondo 'reale', nel quale è valida la legge di causalità. Ma tali speculazioni ci sembrano, insistiamo su questo punto, infruttuose e insensate. La fisica deve descrivere formalmente solo la connessione delle percezioni. Si può caratterizzare molto meglio il vero stato delle cose in questo modo: poiché tutti gli esperimenti sono soggetti alle leggi della meccanica quantistica, mediante la meccanica quantistica viene stabilita definitivamente la non validità della legge di causalità³⁰.

Oltre a mettere così in discussione la nostra usuale concezione del tempo egli spiega per quale motivo il principio di indeterminazione sancisca l'impossibilità di stabilire al tempo stesso dove è una particella e a che velocità si muove ($\Delta q \Delta p \geq h$). Questa restrizione è dovuta al fatto che qualsiasi determinazione di una delle due variabili è tale da perturbare irrimediabilmente i valori dell'altra, e tanto più quanto più è precisa quest'ultima. Heisenberg fa l'esempio della misurazione della posizione di un elettrone: per poterla determinare con precisione bisogna sottoporlo a una radiazione di lunghezza d'onda minima: metaforicamente, abbiamo bisogno di un fascio di luce strettissimo, che colpisca l'elettrone nella sua esatta posizione. In virtù delle equazioni di Einstein la luce ha essa stessa una natura particellare e ogni fotone è portatore di almeno un quanto d'azione: conseguentemente per perseguire la finalità di stabilire con esattezza dove sia l'elettrone bisogna necessariamente perturbarne la velocità, poiché ne abbiamo di fatto modificata l'energia. Ciò significa che non vi è alcun modo di "vedere" la traiettoria di un elettrone, dal momento che è sufficiente un singolo quanto di luce per espellere l'elettrone da questa sua presunta traiettoria. È pertanto l'esistenza del quanto di azione, ossia di una soglia minima e intera oltre la quale l'energia non è ulteriormente divisibile e che costituisce una grandezza assolutamente significativa al livello delle interazioni atomiche, a comportare l'impossibilità in linea di principio di un'osservazione pura, che non modifichi ciò che viene osservato, determinandone le grandezze fisiche, che nello stato precedente a questo intervento dell'osservatore risultano ancora indeterminate.

Per questo Heisenberg rifiuta nettamente il ricorso all'idea di un *atomo in sé*, considerato nelle sue grandezze fisiche costitutive a prescindere dalla loro misurazione, che ci darebbe solo il fenomeno dell'atomo. Ritene di conseguenza impossibile salvare il principio di causalità grazie a questa metafisica dell'atomo in sé. L'atomo è reale nel modo in cui ci si manifesta e nel momento in cui interagisce con l'apparato della misurazione e la possibilità di descriverlo e parlarne è sottoposta ai vincoli, che non possono in alcun modo essere superati, del principio di indeterminazione, per cui posizione e moto delle particelle sono di per sé indeterminate, entro i limiti stabiliti dal principio. Questi limiti sono relativi al rapporto tra la massa della particella e il quanto d'azione: in particolare, quanto minore è la massa, tanto maggiore l'indeterminazione. Ciò spiega il fatto che, studiando corpi di massa nettamente superiore a quelle proprie del mondo atomico, le leggi della meccanica classica, con il loro determinismo, risultino pienamente

³⁰ Ivi, p. 66.

adeguate, poiché nel loro caso l'indeterminatezza dovuta al quanto d'azione è infinitesima. Nell'ambito dei fenomeni microscopici, al contrario, non si può fare a meno di tener conto di questa indeterminatezza, che è significativa e incide, con la conseguenza che si deve fare i conti con una formulazione non più deterministica, ma statistica delle leggi. E, dal momento che l'indeterminazione è qualcosa che riguarda la realtà in sé, e non la conoscenza che ne abbiamo, queste leggi statistiche non possono in alcun modo essere considerate solo approssimazioni incomplete a un'ideale conoscenza completa e precisa del sistema, che tornerebbe a essere deterministica, bensì il livello di conoscenza massimo al quale possiamo aspirare, relativa a una dinamica di possibilità, piuttosto che di necessità.

È su questa base che poggia la singolare struttura matematica della teoria dei quanta, articolata in due tipi di formulazione del tutto diverse: la funzione d'onda, che esprime le possibilità di un certo evento fisico, e i risultati della misurazione degli esperimenti effettuati, in seguito ai quali si perviene al collasso della funzione d'onda, cioè alla restrizione dello spettro di possibilità che precedono l'osservazione, che dopo di essa subisce una drastica limitazione in quanto, tra tutte le possibilità che quella funzione prevedeva, impone di fare riferimento solo a quella che si è effettivamente realizzata.

Non c'è alcun modo di porre rimedio a questa impossibilità dell'osservazione pura, assumendo che sia possibile tener conto della perturbazione e correggerla. Una soluzione del genere significherebbe ammettere, in linea con i presupposti che verranno successivamente assunti da Einstein, Podolsky e Rosen nel loro paradosso del 1935, che l'elettrone abbia effettivamente una posizione e velocità determinata in ogni istante. Heisenberg però esclude questa possibilità mettendo in evidenza come qualsiasi esperimento che si possa anche soltanto immaginare non può mai fornire un'informazione precisa su tutte le grandezze quantistiche, ma divide piuttosto in modo caratteristico le grandezze fisiche in "note" e "ignote", conosciute cioè con maggiore o minore precisione. I risultati di due esperimenti si possono abbinare e dedurre con esattezza gli uni dagli altri solo se entrambi propongono e realizzano la medesima suddivisione delle grandezze fisiche in "note" e "ignote". Nella MQ però questo non accade:

"Da un punto di vista puramente matematico è tipico della formulazione della meccanica quantistica di Dirac-Jordan che le relazioni tra p , q , E etc, possano essere scritte come equazioni tra matrici molto generali, in modo tale che una qualsiasi grandezza quantoteorica data appaia come una matrice diagonale. La possibilità di un tale modo di descrivere diventa chiara, se si concepiscono intuitivamente le matrici come tensori (per esempio momenti di inerzia) in spazi multidimensionali tra i quali sussistono relazioni matematiche. Si possono sempre porre gli assi del sistema di coordinate, in cui si esprimono queste relazioni matematiche, negli assi principali di uno di questi tensori. Infine, si può anche caratterizzare sempre la relazione matematica tra due tensori A e B mediante le formule di trasformazione che traspongono un sistema di coordinate orientato secondo gli assi principali di A in un

altro orientato secondo gli assi principali di B. Quest'ultima formulazione corrisponde alla teoria di Schrödinger. Si consideri invece come formulazione propriamente «invariante» della meccanica quantistica, indipendenti da tutti i sistemi di coordinate, quella di Dirac dei q -numeri. Se da quello schema matematico vogliamo dedurre risultati fisici, dobbiamo correlare le grandezze quantoteoriche, e quindi le matrici (o «tensori» nello spazio multidimensionale) con dei numeri. Questo deve intendersi nel senso che in quello spazio a più dimensioni una direzione determinata è arbitrariamente data (cioè viene stabilita mediante il tipo di esperimento impiegato) e si richiede quale sia il «valore» della matrice (per esempio in questo modello il valore del momento d'inerzia) in questa direzione data. Tale richiesta ha un significato univoco solo se la direzione data coincide con la direzione di uno degli assi principali di quella «matrice»: in questo caso esiste una risposta esatta per la domanda posta. Ma anche quando la direzione data devia di poco da quella degli assi principali della matrice, si può ancora parlare del «valore» della matrice nella direzione data con una certa imprecisione dovuta all'inclinazione relativa, con un certo errore probabile. Perciò si può affermare: ogni grandezza o matrice quantoteorica è associata con un numero che indica il suo «valore» con un determinato errore probabile; l'errore probabile dipende dal sistema di coordinate; per ogni grandezza quantoteorica c'è un sistema di coordinate in cui l'errore probabile per questa grandezza scompare. Perciò un esperimento determinato non può mai dare un'informazione precisa su tutte le grandezze quantoteoriche: piuttosto esso divide le grandezze fisiche in «conosciute» e «non conosciute» (oppure grandezze conosciute più o meno esattamente in un modo caratteristiche per l'esperimento in questione. I risultati di due esperimenti possono essere derivati esattamente l'uno dall'altro solo se i due esperimenti dividono le grandezze fisiche nel medesimo modo in «conosciute» e «non conosciute» (cioè se i tensori in quello spazio a più dimensioni frequentemente impiegato per la «visualizzazione» sono «osservati» in entrambi gli esperimenti dalla medesima direzione). Se due esperimenti danno luogo a differenti suddivisioni tra «conosciuto» e «non conosciuto», la connessione dei risultati di tali esperimenti può essere indicata convenientemente solo in modo statistico".³¹

La cinematica e la meccanica della teoria quantistica sono per questo nettamente diverse da quelle usuali (*gewöhnlichen*). L'applicabilità dei concetti classici (*klassischen*) di cinematica e meccanica non può essere però dedotta né dalla nostra logica né dall'esperienza.³² L'utilizzo del termine *gewöhnlichen* invece di *klassischen* non è casuale: fa riferimento al fatto che la teoria quantistica descrive fenomeni diversi da quelli a cui siamo abituati, ovvero quelli familiari. Anche quando, per abitudine e semplicità, utilizziamo le stesse parole, ad esempio cinematica e meccanica, dobbiamo necessariamente tener conto della variazione di significato che questi termini subiscono allorché non abbiamo più a che fare con i concetti classici, come posizione, impulso ed energia, a suo tempo messi a punto per descrivere questi fenomeni, ma

³¹ Ivi, p. 48.

³² Ivi, p. 25.

dobbiamo prendere in considerazione aspetti “non usuali”, appunto, che ci obbligano a ridefinire i concetti precedentemente compresi per tenere conto dello scarto, cioè del distacco, anche netto con il precedente ambito di applicazione.

Ciò non ci deve tuttavia indurre a considerare la Meccanica Quantistica una teoria non intuitiva (*un-anschaulich*) e astratta.

“Riteniamo, piuttosto, che per il momento le leggi quantitative possono essere comprese a partire dalle basi intuitive solo secondo il principio della massima semplicità possibile. Se, per esempio, la coordinata x dell’elettrone non è più un «numero», come può essere dedotto sperimentalmente da un’equazione, l’assunzione più semplice, che non contraddice l’equazione in questione, è che questa coordinata x sia un elemento diagonale di una matrice i cui elementi non diagonali si manifestano in una imprecisione, ovvero nel caso di trasformazioni, in altri modi. L’asserzione che per esempio la velocità nella direzione x non è «in realtà» un numero, ma un elemento diagonale di una matrice, non è forse più astratta né meno intuitiva della constatazione che l’intensità elettrica di campo sia «in realtà» la parte temporale di un tensore antisimmetrico del mondo spazio-temporale. L’espressione «in realtà» sarà qui altrettanto giustificata, che in una qualunque descrizione matematica di processi naturali. Se si ammette che tutte le grandezze quantoteoriche sono «in realtà» matrici, le leggi quantitative ne conseguono senza difficoltà”.³³

Questo paragone diretto con un’altra teoria, l’elettromagnetismo nella sua formulazione covariante, mostra come il linguaggio di quest’ultima, che è problematico e azzardato definire “visualizzabile”, non abbia dato luogo agli stessi problemi e alle medesime discussioni che hanno accompagnato l’introduzione e lo sviluppo del formalismo quantistico. Quello che è rilevante e merita di essere preso in considerazione è il fatto che, in entrambi i casi, siamo in presenza di un linguaggio che permette di descrivere, trattare e predire i risultati sperimentali.

Il confronto così istituito suggerisce che la vera questione in gioco quando si discute del grado di chiarezza della formulazione matriciale e della sua possibilità di essere tradotta in una descrizione visualizzabile, riguardi la capacità di accettare l’autentica natura delle grandezze quantistiche. Ancora una volta, però, va specificato che a provocare tutte le difficoltà che ne scaturiscono è l’analisi dei fenomeni quantistici eseguita senza fare riferimento ai “filtri osservativi” imposti dalla fisica classica, di cui è invece necessario fare a meno.

Per comprendere adeguatamente l’asserita duplicità del formalismo matematico della teoria dei quanta è opportuno prendere in esame un altro saggio di Heisenberg, contenuto in *Fisica e filosofia*, e precisamente quello intitolato *L’interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta. La rivoluzione nella scienza moderna*, in cui viene subito evidenziato l’aspetto fondamentale del rapporto tra linguaggio, teoria ed esperimento.

³³ Ivi, p. 65.

“L’interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta parte da un paradosso. Qualsiasi esperimento fisico, sia che si riferisca ai fenomeni della vita quotidiana o ad eventi atomici, deve essere descritto nei termini della fisica classica. I concetti della fisica classica formano il linguaggio per mezzo del quale descriviamo la preparazione dei nostri esperimenti e ne esprimiamo i risultati. Non possiamo né dobbiamo sostituire questi concetti con altri. Tuttavia l’applicazione di questi concetti risulta limitata dalle relazioni d’incertezza. Dobbiamo tener presente questa limitata area di applicabilità dei concetti classici mentre li applichiamo, ma non possiamo e non dovremmo sforzarci per migliorarli”³⁴.

A supporto di questa tesi si sottolinea che la teoria dei quanta “parte dalla divisione del mondo in «oggetto» e «resto del mondo», e dal fatto che almeno per il resto del mondo ci serviamo dei concetti classici per la nostra descrizione”³⁵. Subito dopo aggiunge però che essa “è una divisione arbitraria e storicamente una diretta conseguenza del nostro metodo scientifico; l’uso dei concetti classici è infine una conseguenza del modo generale di pensare degli uomini. Ma ciò implica un riferimento a noi stessi e quindi la nostra descrizione non è completamente obbiettiva”³⁶.

Per interpretare correttamente quest’ultima affermazione è opportuno riferirsi a quelle che Pauri chiama le *condizioni galileiane*, e cioè:

i) *ripetibilità temporale indefinita* dell’intero insieme di relazioni fra l’oggetto e il resto del mondo;

ii) *irrilevanza delle relazioni spaziali* fra una conveniente regione, definita dall’oggetto stesso e il suo ambiente locale, e il resto del mondo.

Tutte queste condizioni, che stabiliscono la distinzione fra discipline puramente empiriche e scienze sperimentali, implicano in particolare l’*omogeneità spaziale* e -soprattutto- l’*omogeneità temporale*, insieme alla possibilità di ripetere a piacere la richiesta separazione del mondo”³⁷.

Queste approssimazioni, per poter essere formulate e attivate, presuppongono, a loro volta, una sorta d’*idealizzazione primaria*, più profonda e fondamentale di esse, quella che sta alla base della definizione del *tempo fisico*. L’omogeneità temporale e l’individuazione della ricorrenza di stati fisici identici esigono, infatti, che siano soddisfatte due specifiche condizioni. “Innanzitutto la costituzione di un’opportuna *procedura di approssimazione*; in secondo luogo, una condizione cosmologica sul ‘resto del mondo’ che garantisca l’esistenza di subtotalità autonome, fisicamente quasi-

³⁴ W. Heisenberg, *L’interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta*, cit., p. 57.

³⁵ Ivi, p. 70.

³⁶ *Ibidem*,

³⁷ M. Pauri, *I rivelatori del tempo*, ‘Nuova civiltà delle macchine’, 1999, n. 1, p. 42. Le medesime argomentazioni sono sviluppate da Pauri, in forma più articolata e dettagliata, nel capitolo 3 “La descrizione fisica del mondo e la questione del divenire temporale” del volume *Filosofia della fisica*, a cura di G. Boniolo, Bruno Mondadori, Milano, 1997, pp. 245-333.

isolate, tali da consentire – nei limiti dell'approssimazione costituita – il riconoscimento di una stabilità di ricorrenza temporale. Tali richieste, che sono anche pre-condizioni per la realizzabilità – almeno locale e sempre nei limiti dell'approssimazione – delle *condizioni galileiane*, identificano per *definizione* un orologio fisico standard, cosicché non ha poi senso empirico chiedersi se successivi intervalli temporali contengono o meno la stessa 'quantità di tempo': il tempo fisico è *relazionale* per costituzione³⁸.

In virtù di queste idealizzazioni possiamo asserire che "un oggetto fisico non sia mai definito da una singola individuazione oggettuale. Esso corrisponde a una classe di *equivalenza* di determinazioni singole, individuata precisamente dall'astrazione delle relazioni con il resto del mondo che, nel caso specifico, sono considerate irrilevanti. Inoltre, la rete di relazioni attraverso cui l'oggetto fisico è definito costituisce un *reticolo ideale* in cui sono stati soppressi tutti i *particolari* fenomenici, *in quanto fenomenici e particolari*, cosicché il soggetto esperiente non vi appare più. Ogni classe (un oggetto fisico) costituisce un 'modello' che, *letteralmente*, rimpiazza la cosa fenomenica intenzionalmente esperita con la sua molteplicità di prospettive. Così, lo *status* della descrizione fisica implica che possiamo avere scienza di 'tipi' ma mai scienza di 'particolari' e, soprattutto, che la transienza temporale della soggettività è radicalmente rimossa dal quadro".³⁹

Nel momento in cui porta a concludere che il fenomeno con il quale ha a che fare non è mai ripetibile in modo identico ed è fondamentalmente irreversibile, la teoria quantistica capovolge in modo plateale la definizione classica di "oggetto fisico". Entra così in crisi l'idea che, con opportune modifiche e integrazioni, sia possibile e lecito estendere senza limiti le potenzialità espressive del linguaggio della fisica classica.

Nel penultimo articolo della raccolta *Fisica e filosofia*, intitolato *Linguaggio e realtà nella fisica moderna*,⁴⁰ trascrizione, abbondantemente modificata, di una conferenza del 1960, Heisenberg compie un passo estremamente significativo, introducendo nella relazione tra linguaggio e matematica il riferimento a un terzo elemento; la tecnica. Questa integrazione è certamente il frutto dei suoi dialoghi a distanza con Martin Heidegger sul rapporto tra scienza, metafisica e linguaggio e sulla crescente incidenza della tecnica, appunto, in questa relazione.

Egli comincia col sottolineare il fatto che:

"il linguaggio che generalmente emerge dal processo di chiarificazione scientifica nella fisica teoretica è usualmente un linguaggio matematico, lo schema matematico, che ci permette di *prevedere* i risultati degli esperimenti. Il fisico può dirsi soddisfatto quando ha a disposizione lo schema matematico e sa come usarlo per l'interpretazione degli esperimenti"⁴¹.

Più avanti questa riflessione viene ulteriormente approfondita e chiarita:

³⁸ *Ibidem*, p. 43.

³⁹ *Ibidem*, p. 42.

⁴⁰ W. Heisenberg, *Linguaggio e realtà nella fisica moderna*, in ID., *Fisica e filosofia*, cit., pp. 195-216.

⁴¹ *Ivi*, p. 196.

“Nella fisica teoretica noi cerchiamo di intendere gruppi di fenomeni introducendo simboli matematici che possono essere messi in correlazione con i fatti, vale a dire con i risultati delle misurazioni. Per i simboli noi usiamo nomi che raffigurino la loro correlazione con la misurazione. I simboli sono così legati al linguaggio. I simboli vengono poi collegati fra loro da un rigoroso sistema di definizioni e assiomi, ed infine le leggi naturali vengono espresse come equazioni tra i simboli. L’infinita varietà di soluzioni di queste equazioni corrisponde allora all’infinita varietà di fenomeni particolari possibili in quel settore della natura. In tal modo lo schema matematico rappresenta il gruppo di fenomeni finché è valida la correlazione fra simboli e misurazioni. È questa correlazione che permette di dare espressione alle leggi naturali nei termini del linguaggio comune, giacché i nostri esperimenti consistenti di azioni e di osservazioni possono sempre venir descritti col linguaggio ordinario. Tuttavia, con l’evolversi della conoscenza scientifica, anche il linguaggio si evolve; vengono introdotti nuovi termini e quelli vecchi vengono applicati a un campo più vasto oppure in un modo diverso da quello del linguaggio ordinario”⁴².

Con la meccanica quantistica questa incidenza della tecnica sul linguaggio si accentua ulteriormente e in modo irreversibile, in quanto:

“negli esperimenti sugli eventi atomici noi abbiamo a che fare con cose e fatti, con fenomeni che sono esattamente altrettanto reali quanto i fenomeni della vita quotidiana, Ma gli atomi e le stesse particelle elementari non sono altrettanto reali: formano un mondo di possibilità e di potenzialità piuttosto che un mondo di cose o di fatti”.⁴³

Queste parole, con le quali si conclude la conferenza del 1960, sono inequivocabili: ci dicono che la fisica non parla ormai più direttamente della natura e dei diversi livelli in cui si articola, ma degli esperimenti e dei loro risultati, dunque di apparati tecnici, di un mondo artificiale che si sovrappone sempre più a quello naturale. Questa conclusione viene ribadita in modo ancora più esplicito in un articolo dal titolo *L’immagine della natura nella fisica moderna*, contenuto nella raccolta *Das Naturbild der heutigen Physik*,⁴⁴ pubblicata nel 1976. In esso Heisenberg sottolinea che:

“Nella tecnica atomica, infine, si ha a che fare con lo sfruttamento di forze alle quali manca assolutamente ogni accesso dall’esperienza quotidiana. Anche questa tecnica ci diverrà forse, alla fine, altrettanto familiare quanto lo è, per un uomo moderno, l’elettrotecnica, che non si può più pensare assente dal nostro mondo abituale. Ma anche le cose che ogni giorno ci circondano non divengono per questo parte della

⁴² Ivi, pp. 201-202.

⁴³ Ivi, p. 216.

⁴⁴ W. Heisenberg, *Das Naturbild der heutigen Physik*, Rowohlt, Hamburg 1976, tr. it. di E. Casari, *Natura e fisica moderna*, Garzanti, Milano 1985.

natura nel senso originario della parola. Forse i molti apparecchi tecnici finiranno in seguito con l'appartenere all'uomo in modo altrettanto ineliminabile quanto il guscio alla lumaca o la tela al ragno, ma anche in tal caso questi apparecchi sarebbero piuttosto parti dell'organismo umano che non della natura circostante".⁴⁵

La riflessione che comincia in tal modo a emergere va al di là dei limiti di una semplice riflessione sulla tecnica sperimentale o sulla struttura epistemologica della conoscenza scientifica: ciò che è in questione, riguarda, letteralmente, la «cosa» [*Das Ding*], della quale si dice che la sua definizione, così come viene formulata dalla scienza, non può prescindere dalla manipolazione tecnica del mondo. Questa tecnicità del naturale, già presente nel processo di oggettivazione della natura con cui la scienza moderna inaugura la propria impresa, si fa del tutto esplicita con la meccanica quantistica.

Nella MQ la matematica, dato che non disponiamo di alcuna guida per mettere in relazione i simboli matematici con i concetti del linguaggio ordinario e non abbiamo, di conseguenza, la possibilità di conoscere fenomeni che in essi occorrono non descrivibili nei termini della scienza classica, crea concetti e forme autonome e a sé stanti, distaccandosi dagli aspetti rispetto ai quali era stata chiamata in causa dalla tradizione della fisica galileiana e newtoniana. Essa non ha più alcun rapporto diretto con la realtà, avendo raggiunto un grado di "estrema astrattezza" e formalismo: interpretare i fenomeni non descrivibili nei termini della fisica classica significa pertanto ridurli alla loro misurabilità e prevedibilità sperimentale. Il fisico è soddisfatto se possiede lo schema matematico e sa usarlo per interpretare gli esperimenti. D'altro canto, quello schema matematico può essere considerato valido non solo se in base a esso risulta possibile progettare ed eseguire un esperimento, ma se ci mette altresì in condizione di prevederne gli esiti. È questa concordanza che rassicura sulla "verità" di quello schema, anche se non si ha la più pallida idea di cosa esso realmente significhi, ossia di quale sia il suo contenuto fisico. "le affermazioni matematicamente formulate della fisica, non conoscendo noi la portata dei concetti che in esse occorrono, non sono altro che *pitture verbali*, con le quali cerchiamo di rendere comprensibili a noi e agli altri le nostre esperienze sulla natura", i nostri esperimenti. Assunto, però, ontologicamente, che la forma matematica ripeta la forma della realtà, e non sia meramente "isomorfa" al fenomeno, ovvero in grado di prevederlo, è stato metodologicamente possibile usare i nuovi formalismi, di per sé coerenti nell'ambito di una matematica pura, per interpretare – ovvero ridurre alla loro misurabilità e prevedibilità sperimentale – i fenomeni non descrivibili nei termini della scienza classica. E si dà il caso che ciò sia stato frequentemente coronato dal tipo di «successo» che gli compete, consolidando così indirettamente quell'assunzione.

Qual è questo successo? Quello della prevedibilità dei risultati degli esperimenti. Ricordate cosa diceva Heisenberg: il fisico è soddisfatto se possiede lo schema matematico e sa usarlo per interpretare gli esperimenti. Ora, ovviamente quello schema matematico è valido non solo se in base ad esso io so progettare ed eseguire

un esperimento, ma se posso anche prevederne gli esiti. È questa concordanza che mi rassicura sulla verità di quello schema, anche se non ho la più pallida idea di cosa esso realmente significhi, ossia anche se nonostante il successo non conosco il suo contenuto fisico.

Con la matematizzazione, dunque, non si è raggiunto solo un maggiore grado di precisione e di astrazione, come si credette inizialmente, *ma si è essenzialmente passati da un linguaggio teorico a un linguaggio tecnico*, dal linguaggio della «comprensione» a quello del «progetto sperimentale», rappresentato da una forma di linguaggio che richiama l'operazionismo.

Per capire di cosa si tratta occorre prendere avvio dalla proposta teorica di Percy Williams Bridgman, premio Nobel della fisica nel 1946 per i suoi studi sugli effetti delle alte pressioni sulla termodinamica di materiali vari, ma noto anche per la formulazione della teoria dell'*operazionismo*, da lui proposta nel 1927,⁴⁶ che ebbe una certa risonanza in ambito epistemologico.

In realtà il termine "operazionismo" con cui fu definita è un omaggio alla moda degli "ismi", dura a morire in ambito filosofico ma poco in sintonia con la concezione generale dell'autore, il quale preferiva di gran lunga usare espressioni come "operational viewpoint", "operational attitude", "operational approach", che riteneva più in linea con il suo tentativo di attribuire ai concetti scientifici un significato, sinonimo del corrispondente gruppo di operazioni con cui esso viene introdotto, in coerenza con l'idea di base da lui sostenuta, che l'atteggiamento del fisico deve essere ispirato al puro empirismo, per cui egli non deve ammettere alcun principio a priori che determini o limiti le possibilità di nuove esperienze.

Nel caso dei concetti della fisica, come per esempio quello di lunghezza, le operazioni di riferimento saranno appunto quelle di misura della lunghezza medesima, che devono tener conto del fatto che la lunghezza di qualsiasi cosa è determinata dalle operazioni fisiche necessarie per misurarla, che prevedono l'utilizzo di uno strumento, nel caso specifico un metro. Le stesse operazioni non sono però applicabili per misurare la distanza di un corpo dalla luna. Inoltre, ogni misurazione, anche la più semplice, è sempre accompagnata da un errore sperimentale. A distanze sempre maggiori, non solo l'accuratezza sperimentale diminuisce, ma la natura stessa delle operazioni con cui deve essere determinata la lunghezza diventa indefinita. Pertanto, l'analisi operativa rivela che la lunghezza non è un concetto omogeneo che si applica in maniera uguale a tutti gli intervalli in cui lo usiamo. Per quanto riguarda il suo uso non può esistere più una verità assoluta, ma solo verità relative. Alla luce di questo approccio un concetto come quello di "tempo assoluto", introdotto da Newton, va ritenuto privo di significato, non essendo correlabile a una serie definita di operazioni, che non abbia appunto carattere relativo. Questa regola è funzionale all'esigenza di ottenere un'assoluta univocità di significato dei termini utilizzati, evitando gli

⁴⁶ P.W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics*, Macmillan, New York 1927, tr. it. di V. Somenzi, Einaudi, Torino 1952.

inconvenienti ai quali avevano dato luogo, a giudizio dell'autore, le teorie fisiche tradizionali, sino alla relatività einsteiniana e alla meccanica quantistica. Per quanto riguarda la prima, la tesi di Bridgman è che Einstein non abbia riportato nella sua teoria della relatività generale la profondità e gli insegnamenti ch'egli stesso ci aveva dato con la sua teoria particolare. I suoi dubbi riguardano, in particolare, le operazioni che si devono compiere per applicare le equazioni a una qualsiasi situazione fisica concreta, l'identificazione del "punto", dato il carattere amorfo dello "spazio vuoto" e cosa possa intendersi per "orologio" dal momento che la sua specificazione ha presentato molte difficoltà, legate soprattutto al fatto che per definirlo sembra che si faccia implicitamente ricorso a un circolo vizioso, consistente nel dire che esso è un apparecchio fisico costruito in modo da funzionare così come prescrive la teoria della relatività. Gli eventi sarebbero inoltre trattati da Einstein "convenzionalmente", come "elementi primitivi non analizzati e non analizzabili", cosa che, a giudizio di Bridgman, è in contrasto con quello che egli ritiene un dato di fatto, e cioè che essi, una volta assunti alla stregua di qualcosa che può essere osservato contemporaneamente da due sistemi di riferimento, non possono più essere considerati tali. La conclusione che viene tratta è che Einstein, con la sua duplice convinzione che sia possibile liberarsi da qualsiasi sistema particolare di coordinate e che sia utile farlo, e col suo modo di trattare l'evento come qualcosa di primitivo e non analizzato, abbia introdotto nella teoria della relatività generale proprio quel punto di vista preinsteiniano, non critico, che, come egli stesso ci ha dimostrato in modo così convincente nella sua teoria particolare, corrisponde a una forma di realismo non dichiarato e di ontologia mascherata, viziata da un pregiudizio da cui è necessario liberarsi.

Einstein, rispondendo a queste critiche,⁴⁷ obietta che per poter considerare un sistema logico come una teoria fisica, non è necessario porre la condizione che tutte le sue affermazioni possano essere interpretate e "verificate" a una a una da un punto di vista operativo, perché "de facto" questo non è mai stato ottenuto da nessuna teoria prima d'ora, e non si può letteralmente ottenere. Egli esprime, al contrario, la sua convinzione che per poter considerare adeguata dal punto di vista fisico una teoria è necessario soltanto che essa contenga affermazioni empiricamente verificabili in senso generale, e aggiunge che la "verificabilità" è una qualità che non si riferisce solamente all'affermazione stessa, ma anche alla coordinazione dei concetti in essa contenuti con l'esperienza. Dopo di che si affretta a chiudere il confronto con Bridgman affermando che non è necessario mettersi a discutere questo delicato problema, in quanto è probabile che non esista alcuna differenza sostanziale di opinione su questo punto. Non gli sfugge però che questa sua risposta può essere considerata

⁴⁷

A. Einstein, *Reply to Criticisms: Remarks Concerning the Essays Brought Together in this Co-operative Volume*, in P.A. Schilpp, editor, *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers* Tudor Publishing, Leicester, 1951, tr. it. Paolo Boringhieri, Torino 1958, pp. 610-631.

insoddisfacente dall'epistemologo sistematico, tanto che egli ritiene inevitabile essere considerato da quest'ultimo come una specie di opportunista senza scrupoli.

Nella sua *Introduzione* alla seconda edizione italiana dell'opera di Bridgman Vittorio Somenzi sottolinea che:

"la graduale estensione di questo tipo di analisi a campi diversi dalla fisica, come la matematica, la psicologia e la semantica, ha finito con l'autorizzare l'uso del termine "operazionismo" per l'insieme delle ricerche avviate da Bridgman, quantunque egli non aspirasse alla costruzione di un nuovo sistema filosofico e si limitasse a proporre l'adozione di un atteggiamento – o criterio – operativo nell'esame delle questioni di carattere epistemologico sollevate dallo sviluppo delle scienze moderne e dei rispettivi linguaggi.⁴⁸

Il suo intento dichiarato era quello di cercare di evitare il reiterarsi delle ipostatizzazioni, come quelle verificatesi nella storia della scienza, di concetti quali materia, movimento, forza, massa, spazio e tempo, attraverso l'affermazione della possibilità di far discendere dalla richiesta stessa di una definizione operativa una selezione decisiva tra i vari prodotti linguistici suscettibili di impiego scientifico, e quindi di ottenere per questa via una distinzione netta tra i termini che si possono introdurre o continuare a usare nelle scienze, e quelli la cui conservazione o introduzione costituirebbe un ostacolo al raggiungimento degli scopi tecnici particolari che differenziano il discorso scientifico da quello filosofico, religioso o d'altro genere.

Da questo approccio è scaturito un orientamento, che può essere definito come "fenomenotecnica", che considera l'esperimento e l'apparato tecnico che deve essere messo in campo per progettarlo e realizzarlo una sort di produzione strumentale del fenomeno, nel senso che quest'ultimo deve essere smistato, filtrato, purificato, colato nello stampo degli strumenti. Si può parlare in proposito di un "realismo tecnico" che non mostra il reale, ma lo dimostra, lo ricostruisce sui propri schemi.

Anche Heisenberg, come si è visto, fu molto esplicito riguardo alla connessione diretta tra matematizzazione, esperimento e tecnica nella scienza moderna, connessione della quale analizzò di frequente i diversi rapporti reciproci: il riconoscimento del carattere fondamentale della forma matematica, a suo avviso, può essere visto come l'inizio decisivo della scienza matematica della natura e perciò essere considerato come responsabile delle successive applicazioni tecniche che hanno modificato l'intera immagine del mondo". Ciò è dovuto, essenzialmente, alla riduzione, di cui si è parlato, dell'ideale classico di una conoscenza matematica oggettiva e del reale, a favore di una conoscenza fondata sugli esperimenti, che si limita alla concordanza con i particolari

⁴⁸ V. Somenzi, *Introduzione Sull'operazionismo di Bridgman* in P. W. Bridgman, *La logica della fisica moderna*, Boringhieri, II edizione, Torino 1965, pag. 7.

dedotti dall'esperienza. Il concetto di legge naturale perde, così, in universalità: la sua importanza non consiste più nella sua generalità, ma nelle sue conseguenze rispetto al particolare. La legge diventa una *direttiva per le applicazioni tecniche*. La caratteristica più importante della legge di natura consiste adesso nel rendere possibile una previsione sul risultato di un dato esperimento. L'esperimento, questa chiave di volta che rende possibile la tecnicizzazione, è al un tempo esso stesso tecnica, tecnica sperimentale, tecnica perfezionata dell'osservazione e pratica che necessita di un apparato strumentale tecnicamente sempre più evoluto.

È proprio contro questa concezione della scienza che si batteva Einstein, legato a un ideale di una conoscenza oggettiva i cui simboli «devono» corrispondere a qualcosa. Esempio è la definizione da cui prende avvio il paradosso EPR: "Se, senza turbare in alcun modo un sistema, si può prevedere con certezza il valore di una *quantità fisica*, allora esiste un elemento della *realtà fisica* che corrisponde a questa quantità fisica".

Proprio questa incrollabile convinzione di Einstein fu al centro del suo dibattito con Max Born protrattosi per quasi quarant'anni nello scambio epistolare dal 1916 al 1955 raccolto in un apposito volume.⁴⁹ Il nocciolo del confronto sta dunque nel concetto di realtà fisica separabile. Secondo Einstein il mondo di cui parla la scienza va concepito come un complesso di entità localizzabili nello spazio-tempo dotate di proprietà che costituiscono la loro realtà fisica (ontologia delle proprietà). Queste entità possono interagire localmente in senso relativistico, vale a dire attraverso interazioni che non si propagano con velocità superiore a quella della luce. Max Born, che era invece un convinto sostenitore delle posizioni della Scuola di Copenhagen, condivideva le idee di Niels Bohr il quale, pur considerandosi anch'egli un fisico realista, e rivendicando puntigliosamente questa sua convinzione, riteneva non più ammissibile l'idea di una realtà fisica indipendente (separata) dallo strumento di misurazione. Questa confutazione non soddisfece minimamente Einstein, che dichiarò di non riuscire neppure a capirla, come risulta da diverse lettere contenute in questo epistolario. L'impossibilità, da parte dei due interlocutori, non solo di trovare uno sfondo condiviso e un punto di accordo, ma addirittura di comprendersi reciprocamente, è testimoniata in modo tangibile dalla loro decisione di rivolgersi a un terzo fisico autorevole, Wolfgang Pauli, al quale venne affidato di comune accordo il compito di spiegare ad Einstein le argomentazioni di Born e viceversa, cosa che egli fece in maniera assai brillante con due lettere da Princeton datate 3. 3. 54 e 31. 3. 54, senza peraltro riuscire a far sì che i suoi due destinatari riuscissero a superare i loro fraintendimenti, nonostante un'onesta ammissione di Born nel suo successivo commento: "Le lettere di Pauli dimostrano chiaramente che il mio abbozzo di risposta al saggio di Einstein era del tutto inadeguato, non avevo afferrato ciò che più gli stava a cuore. Se ora ripenso, dodici anni dopo, a come ciò sia potuto accadere, riesco a trovare una sola spiegazione.

⁴⁹ Albert Einstein - Hedwig e Max Born, Briefwechsel 1916-1955, Nymphenburger Verlagshandlung GmbH., Munchen 1969, tr. it. *Scienza e vita*, Presentazione di B. Russell. Introduzione di W. Heisenberg. Commento di M. Born, Einaudi, Torino 1973.

Essendo stato a suo tempo un convinto seguace e divulgatore del giovane Einstein, pronto a giurare sulle sue teorie, non potevo immaginare che da vecchio egli pensasse diversamente”.⁵⁰

A farsi carico delle perplessità di Einstein e dei suoi colleghi fu, invece, David Bohm, al quale si deve l’elaborazione di una teoria delle *variabili nascoste* basata sulla condivisione che la meccanica quantistica, nella formulazione datane da Bohr, Heisenberg e Born, non fosse una teoria completa. Questa interpretazione alternativa assumeva e sviluppava il concetto dell’onda pilota di De Broglie e si basava sul presupposto, mutuato dalla concezione della realtà fisica di Einstein, che l’equazione di Schrödinger non descriva probabilità, ma traiettorie di particelle vere e proprie guidate, appunto, da un’onda pilota. L’immagine figurativa per rappresentare questa situazione può essere quella di una particella in qualche modo pilotata nel suo movimento da un mare mosso con onde che ne determinano la traiettoria. Essa è stata oggetto, negli anni Ottanta e Novanta, di studi che hanno permesso di dimostrare, nel 1996, la sua completa equivalenza con la meccanica quantistica, almeno nel caso non relativistico.

Il fatto è però che anche la meccanica di Bohm è esplicitamente e pesantemente *non locale*, proprio per la presenza insopprimibile delle proprietà di *entanglement*, e da questo punto di vista non poteva certamente soddisfare le aspettative e le esigenze teoriche di Einstein.

5. Il principio di corrispondenza di Bohr

Come abbiamo detto, nella controversia con Einstein sia Niels Bohr, sia Max Born, pur respingendo la definizione di “realtà fisica” fornita da Einstein, a loro avviso ricalcata su idee che non tenevano adeguatamente conto degli sviluppi della MQ, si definivano, a loro modo, “realisti”. Il loro realismo si basava però su una relazione tra il linguaggio della fisica e i fenomeni a cui la teoria scientifica si riferisce e di cui parla radicalmente diversa da quella ai quali gli scienziati aderivano abitualmente prima della rivoluzione quantistica, e che costituiva la base della loro “filosofia spontanea”. A mettere in evidenza questa discontinuità fu in particolare Bohr con la formulazione del suo «principio di complementarità», da lui enunciato nel corso del congresso internazionale di fisica, tenutosi a Como nel settembre del 1927 per celebrare il centesimo anniversario della morte di Alessandro Volta. “Da una parte”, osservava Bohr nella sua relazione su “The Quantum Postulate and the Development of Modern Physics”, la definizione dello stato di un sistema fisico, come viene inteso di solito, richiede l’eliminazione di ogni perturbazione esterna. Ma in questo caso, secondo il postulato dei quanti, ogni osservazione sarebbe impossibile e, soprattutto, i concetti di spazio e di tempo perderebbero il loro senso immediato. D’altra parte, se allo scopo di

⁵⁰ Ivi, p. 263.

rendere possibile l'osservazione noi ammettiamo certe interazioni con opportuni dispositivi di misurazione, non appartenenti al sistema, una definizione univoca dello stato del sistema diventa naturalmente impossibile e non si potrà parlare di causalità nel senso ordinario della parola"⁵¹.

A partire da queste considerazioni Bohr giunge così alla seguente formulazione del principio di complementarità: "La natura stessa della teoria quantistica ci costringe così a considerare la coordinazione spazio-temporale e l'esigenza della connessione causale, la cui unione caratterizza le teorie classiche, come aspetti complementari ma reciprocamente escludentisi della descrizione, i quali simbolizzano l'idealizzazione dei concetti di osservazione e di definizione rispettivamente"⁵².

Nell'articolo "Linguaggio e realtà nella fisica moderna" Heisenberg sostiene che per gli scienziati, come Einstein e tanti altri, che non accettano la riduzione della teoria fisica al suo formalismo matematico, né intendono aderire all'approccio dell'operazionismo a quella che abbiamo definito la "fenomenotecnica" l'unica strada possibile è imboccare la via indicata da Bohr con il principio di complementarità, rinunciando alla legge del "tertium non datur" e modificando la logica basata sul principio di non contraddizione aristotelico.

Va a questo proposito ricordato che l'idea che questo principio costituisse il fondamento della logica, il suo indiscutibile e imprescindibile punto di partenza, era stata in qualche modo indebolita dagli sviluppi dell'analisi matematica della logica.

Nel 1847, infatti, il matematico inglese George Boole pubblicò un opuscolo intitolato proprio *The Mathematical Analysis of Logic* che contiene la prima descrizione della logica come sistema algebrico astratto. Sette anni più tardi Boole estese il suo approccio simbolico alla teoria della probabilità nella sua opera maggiore, *An Investigation of the Laws of Thought (Indagine sulle leggi del pensiero)*. La visione algebrica che Boole ha della logica è radicata nella nuova concezione, fortemente sintattica, della matematica e specie dell'algebra, che si sviluppa nella scuola algebrica di Cambridge. Uno dei principali rinnovatori della matematica inglese, George Peacock elabora negli anni Trenta la distinzione tra "algebra aritmetica", le cui operazioni riguardano numeri reali positivi, e "algebra simbolica" che studia le proprietà formali delle operazioni algebriche indipendentemente dagli oggetti alle quali si applicano. La matematica è concepita più come una "scienza delle forme" che della quantità, emancipandosi dal compito di esprimere grandezze o rapporti fra grandezze. Piuttosto, la validità di un calcolo algebrico dipende dall'applicazione coerente delle leggi che governano l'uso dei suoi simboli: qualsiasi interpretazione che preservi la verità delle relazioni tra di essi è ugualmente ammissibile. Per esempio, la legge della commutatività $x + y = y + x$ può essere interpretata sia in termini aritmetici (x e y denotano numeri e il simbolo "+" l'addizione), sia in termini insiemistici (x e y denotano

⁵¹ N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Wiley, New York, 1958, pp. 83-93. Tr. it. *Il postulato dei quanti e il recente sviluppo della teoria atomica*, in Id., *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, Boringhieri, Torino, 1961, p. 325.

⁵² *Ibidem*.

classi e il simbolo "+" l'unione disgiunta), sia in termini proposizionali (x e y denotano proposizioni e il simbolo "+" denota la disgiunzione esclusiva).

Se l'essenza della matematica non sta nel suo contenuto, ma nella sua forma, allora la nuova logica di Boole, strutturata matematicamente, elegge gioco-forza a oggetto d'indagine la forma del pensiero piuttosto che il suo contenuto. È insomma possibile un'analisi *matematica* dei processi deduttivi riconducibili a trasformazioni algebriche eseguite in base a regole formali: le leggi logiche hanno una forma algebrica e i simboli su cui opera l'algebra sono rappresentabili come certe operazioni della mente, al riparo da ogni ipotesi e conclusione metafisica sulla sua natura. Questa visione si salda con una profonda analogia: il progetto di matematizzazione della logica permette di conoscere le leggi del pensiero così come la matematizzazione della fisica aveva consentito di conoscere le leggi della natura.

Alla base della logica, in particolare, c'è la capacità nella nostra mente di concepire una classe e di designare gli individui che le appartengono separandoli dal resto. L'atto mentale fondamentale è perciò l'*atto di elezione* mediante il quale costruiamo le classi. Nell'algebra della logica di Boole, i simboli X, Y, Z , ecc. denotano i membri generici di ciascuna classe; i simboli x, y, z – chiamati *elettivi* – operano su classi (per esempio, x , indica la scelta della classe degli X); 1 indica sia l'*universo del discorso* (comprendente ogni classe concepibile di oggetti, esistenti o no), sia il *vero*; 0 indica sia la classe *vuota* (il nulla), sia il *falso*; il simbolo d'identità "=" sta per la copula "è". Le operazioni sono le seguenti:

$x + y$ denota la classe degli elementi che appartengono alla classe x o alla classe y , ma non a entrambe;

$x \cdot y$ denota la classe degli elementi che appartengono sia alla classe x che alla classe y ;

$x - y$ denota la classe degli elementi X che non sono anche Y ;

$1 - x$ denota gli elementi dell'universo che non sono X .

La continuità tra l'algebra del pensiero e l'algebra ordinaria è garantita dal fatto che tutte le leggi dell'algebra continuano a valere (commutatività dell'addizione e del prodotto, distributività del prodotto rispetto all'addizione e alla sottrazione). Per esempio, se x, y, z indicano rispettivamente la classe degli uomini, delle donne e degli europei, l'equazione:

$$z(x + y) = zx + zy$$

esprime il fatto che la classe degli uomini e donne europei coincide con la classe degli uomini europei insieme alla classe delle donne europee. Specifica invece della logica è la legge dell'*idempotenza del prodotto*: $x^2 = x$. Da questa legge si ottiene l'equazione di secondo grado:

$$x(1 - x) = 0, \text{ ovvero il } \textit{principio di non contraddizione}.$$

Per esempio, se x è la classe dei cavalli e $(1-x)$ la classe dei non-cavalli, questo principio ci dice che la classe a cui appartengono i cavalli e i non cavalli è *vuota*. In questo modo, il *principio di non contraddizione* non risulta *primitivo*, come nella logica aristotelica, ma si può derivare da leggi matematiche. La conclusione che Boole trae in *Laws of Thought* è molto netta e precisa in proposito: quello che è stato comunemente ritenuto l'assioma fondamentale della metafisica non è altro che la conseguenza di una legge del pensiero, matematica quanto alla sua forma.

Non bisogna allora considerare inammissibile e oggetto di scandalo il fatto che un radicale cambiamento del formalismo matematico possa comportare anche una diversa valutazione dell'importanza del principio di non contraddizione.

Heisenberg, nel suo articolo, si appoggia a Carl Friedrich von Weizsäcker proprio per sostenere una posizione di questo genere. Secondo il fisico e astrofisico austriaco, componente del team di scienziati che sotto la guida dello stesso Heisenberg aveva fatto ricerche nucleari nella Germania nazista durante la seconda guerra mondiale, la MQ ci impone di tener conto dell'articolazione del linguaggio della fisica, distinguendo i suoi diversi livelli:

- Il primo si riferisce agli oggetti di cui esso parla, ad esempio gli atomi o gli elettroni;
- Il secondo si riferisce ad affermazioni su questi oggetti;
- Il terzo può affermazioni su affermazioni su oggetti, eccetera.

Risulta così possibile avere differenti modelli logici ai differenti livelli: e, da questo punto di vista, non c'è alcun motivo per considerare la logica classica, basata appunto sul principio di non contraddizione, come prioritaria rispetto alla logica quantica, così come non lo è la fisica classica rispetto alla MQ. A suo giudizio costituisce un errore imperdonabile attribuire un grado maggiore di importanza e un valore fondamentale a quella che è una semplice antecedenza cronologica.

La modificazione della logica classica deve riguardare proprio il ruolo del principio di non contraddizione e il livello concernente gli oggetti. L'esempio che Heisenberg propone è il seguente: "Consideriamo un atomo che si muova in una scatola chiusa divisa da una parete in due parti uguali. La parete è fornita di un buco piccolissimo attraverso cui l'atomo può passare. L'atomo può trovarsi allora, secondo la logica classica, o nella metà sinistra della scatola o nella destra. Non c'è una terza possibilità, «tertium non datur», appunto. Nella teoria dei quanta tuttavia noi dobbiamo ammettere – ammesso che ci si serva dei termini «atomo» o «scatola» – che ci sono altre possibilità che sono stranamente mescolate delle due prime possibilità. Ciò è necessario per spiegare i risultati dei nostri esperimenti",⁵³

Possiamo dare spiegazioni diverse di questa "anomalia". Non possiamo però rimuoverla e omettere di prenderla in considerazione, perché ce lo impediscono i

⁵³ W. Heisenberg, "Linguaggio e realtà nella fisica moderna", cit., pp. 212-213.

risultati degli esperimenti, vale a dire, lo ricordiamo, ciò che per Heisenberg costituisce l'autentica e unica "realtà fisica" di cui parla la MQ. Infatti, misurando l'intensità della luce che è stata diffusa dall'atomo. "se l'atomo fosse sempre o nella metà sinistra o nella metà destra della scatola, la distribuzione dell'intensità finale dovrebbe essere una mescolanza (a seconda delle frazioni di tempo passato dall'atomo in ciascuna delle due parti) delle due prime distribuzioni dell'intensità. Ma questo non è generalmente vero sperimentalmente. La distribuzione reale dell'intensità è modificata dalla «interferenza delle probabilità» di cui si è discusso in precedenza".⁵⁴

Per affrontare adeguatamente questa situazione del tutto inedita, secondo von Weizsäcker, bisogna riformulare la teoria della verità, introducendo in essa il concetto di «grado di verità», aggiungendo ai tradizionali valori 1, affermazione vera, e 0, affermazione falsa, altri valori. Ed è qui che entra in gioco il principio di complementarità di Bohr:

"Ogni affermazione che non è identica all'una o all'altra delle affermazioni alternative – nel nostro caso all'affermazione «l'atomo è nella metà sinistra» o «l'atomo è nella metà destra» della scatola – è chiamata complementare a queste affermazioni. Per ogni affermazione complementare la questione se l'atomo è a sinistra» o a destra non viene decisa. Ma il termine «non decisa» non equivale in alcun modo al termine «non conosciuta». «Non conosciuta» significherebbe che l'atomo è «realmente» a destra o a sinistra, solo che noi non sappiamo dov'è. Ma «non decisa» indica una situazione differente, esprimibile soltanto con una affermazione complementare".⁵⁵

Dal punto di vista dell'ontologia, dello studio dell'essere, cioè della realtà così com'è, tradizionalmente considerata il fondamento di ogni sistema "oggettivistico", come stanno le cose? La risposta conclusiva di Heisenberg è la seguente:

"Se la coppia di numeri complessi rappresenta una «affermazione» nel senso appunto descritto, dovrebbe esistere uno «stato» o una «situazione» in natura per cui l'affermazione fosse vera-. Useremo la parola «stato» secondo questo rapporto. Gli «stati» corrispondenti alle affermazioni complementari sono allora chiamati stati coesistenti» da von Weizsäcker. Questo termine «coesistente» esprime esattamente la situazione, sarebbe infatti difficile chiamarli «stati differenti», giacché ogni stato contiene in certa misura anche altri «stati coesistenti». Questo concetto di «stato» formerebbe allora una prima definizione concernente l'ontologia della teoria dei quanta. Si vede subito che quest'uso della parola «stato», specialmente il termine «stato coesistente», è così diverso da quello dell'usuale ontologia materialistica che si può dubitare che si faccia qui uso d'una terminologia conveniente. D'altra parte, se si

⁵⁴ Ivi, p. 213.

⁵⁵ Ivi, p. 214.

considera la parola «stato» come esprime una potenzialità piuttosto che una realtà – si può anche semplicemente sostituire il termine «stato» col termine «potenzialità» – allora il concetto di «potenzialità coesistenti» è del tutto plausibile, giacché una potenzialità può implicare altre potenzialità o sovrapporsi a esse”.⁵⁶

La posizione di Heisenberg rispetto alle questioni sollevate dalla MQ quantistica è a questo punto chiara e ben definita: se si vuole sfuggire alla presa a tenaglia della riduzione di una teoria fisica, quale la meccanica quantistica, che usualmente “denota”, cioè si riferisce a qualcosa di esterno al linguaggio e di cui parla, al suo formalismo matematico e alla riduzione della realtà fisica al realismo tecnico dell’operazionismo l’unica opzione realmente disponibile è rinunciare a due capisaldi dell’ontologia e dell’epistemologia tradizionalmente intese:

- L’abbattimento della linea di demarcazione tra «senso della realtà» e «senso della possibilità», con l’assunzione che una teoria fisica possa legittimamente parlare della seconda alternativa, anziché della prima;
- La rinuncia al principio di non contraddizione, ammettendo la coesistenza di poli opposti mantenuti costantemente in uno stato di tensione reciproca.

6. Le vicissitudini del concetto di «verità»

Il problema della verità, per molto tempo considerato il fattore discriminante tra il discorso scientifico e altri stili di pensiero, presenta allo stato attuale una complessità tale da indurre approcci e orientamenti pur assai differenti tra loro a un significativo ridimensionamento del suo significato e della sua importanza. Questo orientamento è determinato dalla crescenti difficoltà che si sono frapposte a ogni tentativo non solo di fornirne una definizione condivisa, ma anche e soprattutto di indicare criteri operativi efficaci di discriminazione tra ciò che può essere considerato «vero» e ciò che invece non lo è.

Se dovessimo fornire una prima indicazione approssimativa in grado di avvicinarci a un corretto inquadramento del problema in questione potremmo cominciare con il dire che la «verità» è il tratto distintivo di quelle proposizioni che concordano con la realtà, specificando che cos’è che di fatto avviene. Questo approccio consente di tracciare una linea di demarcazione significativa tra il *problema scientifico* e quello *filosofico* della verità. Mentre il fine di una scienza è infatti quello di scoprire quali proposizioni siano vere nel suo campo, cioè quali possiedano la proprietà della verità, la filosofia si pone l’obiettivo di individuare la natura della verità in quanto tale. Perciò il quesito filosofico non è “Cosa è vero?”, ma piuttosto “Cosa è la verità?”, “Cosa diciamo di una proposizione quando diciamo che è vera?”. L’importanza di un quesito così posto deriva dalla varietà e dalla profondità dei principi in cui si impiega il concetto di verità.

⁵⁶ Ivi, pp. 215-216.

Siamo tentati di pensare, p. esempio, che la verità è il fine proprio e il risultato naturale della ricerca scientifica, che le credenze vere sono utili, che il significato di un enunciato è dato dalle condizioni che lo renderebbero vero, e che il ragionamento valido conserva la verità. Perciò, nella misura in cui desideriamo non solo comprendere, ma affermare e affinare queste tesi epistemologiche, etiche, semantiche e logiche, abbiamo bisogno di una spiegazione della natura della verità.

È proprio di fronte all'esigenza di dare fornire questo tipo di spiegazione che si manifesta la natura elusiva della questione da affrontare.

La credenza, ad esempio, che la neve sia bianca deve la sua verità a una certa caratteristica del mondo esterno: il fatto che la neve è bianca. Analogamente, la credenza che i gatti miagolino è vera perché i gatti miagolano. Queste semplici osservazioni conducono a quella che è forse la concezione della verità più naturale e più ampiamente accettata, la *teoria della corrispondenza*, secondo cui una credenza (asserzione, enunciato, proposizione, ecc.) è vera purché esista un fatto a essa corrispondente. Questa tesi è stata proposta in modo compiuto e coerente da Aristotele, il quale nella *Metafisica* (IV (Γ), 7, 1011 b.) la esprime con le parole seguenti: «dire [...] che ciò che è non è e ciò che è non è, è falso, mentre dire che ciò che è è e ciò che non è non è, è vero; e così anche colui che dice che una cosa è o che una cosa non è dirà [a seconda dei casi] vero o falso».

Questa tesi aristotelica è in sé ineccepibile ed è stata più volte ripresa e riproposta nel corso dei secoli da diversi autori. Basta pensare all'*adaequatio intellectus et rei* di Tommaso d'Aquino, che ne costituisce una esplicita riformulazione. Tuttavia, se deve darci una teoria completa della verità - ed essere qualcosa di più che solo un modo fornirci una sorta di rassegna, pur degna di nota, di tutti gli esempi di "la credenza che *p* è vera se e solo se *p*" - deve essere integrata con la spiegazione di cosa sono i *fatti* e cos'è per una credenza *corrispondere* a un fatto; e sono appunto questi problemi sui quali la teoria corrispondentista si è incagliata.

Per questo parallelamente a quest'ultima prospettiva se ne è sviluppata un'altra, la quale identifica la verità con la verificabilità. Alcuni fanno risalire l'origine di questa alternativa a Platone, per il fatto che egli ipotizzò uno stretto legame tra verità e coerenza. Va tuttavia osservato che per il maestro di Aristotele «coerenza» significa non soltanto assenza puramente logico-formale di contraddizioni, ma anche e soprattutto unità e armonia logico-materiale che cresce a partire dalle cose e dai rapporti intellegibili tra esse. Non a caso egli, in uno dei suoi più noti dialoghi (*Cratilo*, 385 b.) a un certo punto afferma che il discorso vero è "quello che dice gli enti come sono", e che il discorso falso è "quello che dice gli enti come non sono"; analogamente, in un altro dialogo (*Sofista*, 263 b) possiamo ritrovare una formulazione pressoché coincidente: il discorso vero "dice le cose come sono", quello falso "cose diverse da quelle che sono". Come si evince da queste due citazioni, già con Platone era dunque matura l'idea secondo cui la verità riguarda il rapporto tra il linguaggio (o il pensiero) e la realtà, tra ciò che si dice o si pensa e ciò che esiste; ed era già abbastanza chiaro - sebbene ancora da spiegare in modo soddisfacente - che tale rapporto doveva essere espresso in termini di "corrispondenza", e cioè una congruenza delle parti di una teoria

che può essere effettivamente raggiunta solo quando questa congruenza può essere posta in relazione con l'ordine e la struttura che caratterizzano la realtà alla quale ci si sta riferendo.

L'identificazione delle verità con la coerenza logica e la verificabilità può assumere varie forme. Una prima versione implica l'ulteriore assunzione che la verifica è *olistica*, vale a dire che una credenza è verificata quando fa parte di un intero sistema di credenze "armonioso". Questa è la cosiddetta *teoria coerentista* della verità, sviluppata da Bradley e Brand Blanchard. Un'altra versione, dovuta a Dummett e Putnam, comporta l'assunzione che esista, per ogni proposizione, qualche procedura specifica per trovare se dovremmo crederla o no. Secondo questa tesi, dire che una proposizione è vera significa asserire che essa sarebbe verificata dalla procedura appropriata. In matematica ciò equivale all'identificazione della verità con la dimostrabilità — è quella che viene detta, a volte, *verità intuizionistica*. Queste teorie mirano a scartare nozioni oscuramente metafisiche e a spiegare la stretta relazione tra conoscibilità e verità.

È chiaro però che esse esagerano la forza di questo legame: infatti possiamo facilmente immaginare un enunciato vero ma che trascende il nostro potere di dimostrarlo tale.

Una terza importante concezione della verità è la *teoria pragmatica* di William James. Come abbiamo appena visto, il verificazionista sceglie una proprietà prominente della verità e l'identifica con la sua stessa essenza. Analogamente, il pragmatista mette in primo piano un'altra caratteristica importante — che la credenza vera è una buona base per l'azione — e la assume come la natura stessa della verità. Sono considerate, per definizione, assunzioni vere quelle che provocano azioni con risultati desiderabili. Di nuovo, abbiamo una tesi che fa ricorso a una singola — e attraente — caratteristica esplicativa. Ma, ancora una volta, l'obiezione di fondo è che la relazione postulata fra la verità e il suo presunto *analysans* — in questo caso l'utilità — è troppo stretta per essere plausibile. E' indubbio che le credenze vere tendano a favorire il successo. Il requisito però, pur necessario, non può essere legittimamente considerato sufficiente, come mostra il fatto che spesso azioni basate su credenze vere portano al disastro, mentre false credenze possono, per puro caso, produrre risultati estremamente positivi.

Uno dei pochi fatti pressoché indiscussi riguardo alla verità è che la proposizione «la neve è bianca» è vera se e solo se la neve è bianca, la proposizione «mentire è immorale» è vera se e solo se mentire è immorale, e così via. Le teorie tradizionali della verità riconoscono questo fatto ma lo considerano insufficiente e, proprio per questo, lo «supportano» con qualche altro principio della forma « X è vero se e solo se X possiede la proprietà P » (p. es., corrispondenza alla realtà, verificabilità, adeguatezza come base per l'azione), che si suppone specifichi cosa è la verità. Se si rifiuta la necessità di una simile specificazione ulteriore, si produce una collezione di alternative radicali alle teorie tradizionali. Ad esempio, potremmo supporre (con Ramsey, Ayer e Strawson) che la teoria fondamentale della verità non contenga nient'altro che equivalenze della forma «La proposizione che p è vera se e solo se p (escludendo casi come l'enunciato «Questa proposizione non è vera», che generano una contraddizione).

È utile far riferimento, sulla scia dell'approccio di W. V. Quine, anche alla cosiddetta *teoria deflazionistica*, in quanto da esso scaturisce una spiegazione peculiare della *raison d'être* del nostro concetto di verità, che consiste nell'asserire che la sua funzione non è quella di descrivere proposizioni, come si potrebbe inferire ingenuamente dalla sua forma sintattica, ma semmai quella di metterci in grado di costruire un certo tipo di generalizzazione. Ad esempio, la proposizione «Quel che ha detto Einstein è vero» è intuitivamente equivalente alla congiunzione infinita «Se Einstein ha detto che nulla va più veloce della luce, allora nulla va più veloce della luce; e se Einstein ha sostenuto che non si dovrebbero costruire armi nucleari, allora non si dovrebbero costruire armi nucleari; ... e così via». Ma senza un predicato di verità noi non possiamo catturare questo enunciato. Il deflazionista sostiene, inoltre, che tutti gli usi legittimi del predicato di verità - inclusi quelli della scienza, della logica, della semantica e della metafisica - sono semplicemente esibizioni di questa funzione generalizzante, e che lo schema di equivalenza è soltanto ciò di cui c'è bisogno per spiegare tale funzione.

Nel campo deflazionista ci sono varie proposte in competizione reciproca. Secondo la cosiddetta *teoria della ridondanza* di Frege, i casi corrispondenti di «È vero che p » e « p » hanno esattamente lo stesso significato, mentre la *teoria minimalista* assume solo che queste proposizioni siano necessariamente equivalenti. Altri deflazionisti non credono nell'esistenza delle proposizioni, per cui ritengono gli enunciati i portatori fondamentali della verità; e infatti la *teoria del devirgolettamento* suppone che la verità sia catturata dal principio di devirgolettamento « p » è vero se e solo se p . Tarski non considera il principio di devirgolettamento, noto anche come *schema di Tarski* o *schema T*, una teoria in sé adeguata, ma solo una specificazione di cosa dovrebbe comportare ogni definizione adeguata. Il suo sistema mostra come dare una definizione esplicita della verità per tutti gli enunciati di certi linguaggi formali a partire dai referenti dei loro nomi e predicati primitivi. Si tratta della cosiddetta *teoria semantica* della verità.

Per cercare di capire in che cosa consista la novità di questa impostazione e cogliere la sua specificità rispetto a quanto era stato anticamente affermato da Platone e Aristotele è necessario tener conto del fatto che Tarski propone di valutare la verità degli enunciati facendo ricorso ad un linguaggio esterno (*metalinguaggio*) a quello in cui sono espressi gli enunciati in oggetto (*linguaggio oggetto*). Questa «mossa» consente di venire a capo con successo di un celebre *insolubile* della storia della filosofia: il paradosso del mentitore, la cui formulazione si deve a Eubolide, il quale, nel IV secolo a. C., fu famoso in tutta l'antichità per i suoi «argomenti dialettici», nei quali faceva grande uso di una tecnica confutatoria diretta a mostrare le lacune degli dottrine trionfanti di Platone e Aristotele, e specialmente contro i loro presupposti che il linguaggio fosse sempre in grado di tradurre in enunciati scientifici la realtà e che di una proposizione ben formulata fosse sempre possibile stabilire se essa fosse vera o, al contrario, fosse falsa. A quest'ultimo presupposto, in particolare, Eubolide oppose la seguente antinomia: «Un uomo dice: "Io sto mentendo". Mente o dice il vero?» (*Eubulide, 330 a.C.*). Questa proposizione, palesemente, è vera se e solo se è falsa e falsa se e solo se è vera. Questo paradosso fu ripreso e riformulato in varie forme: valga per

tutti l'esempio di Cicerone che ne fornì la seguente versione: «*Se tu dici di mentire e dici che questo è vero, menti o dici il vero?*» (Cicerone, *Academica priora*, II, 20).

Nell'approccio di Tarski al problema della verità questo tipo di antinomia viene risolta in quanto si evita, con l'utilizzo di un linguaggio superiore, il meccanismo dell'autoriferimento causa del sorgere della difficoltà. Dislocare la proposizione in questione su due livelli, quello del linguaggio oggetto e quello del metalinguaggio, permette infatti di trasformarla in un'enunciazione del tutto innocua, depurata cioè della difficoltà precedente, e precisamente: "Io dico di me stesso che sto mentendo". Il germe della contraddizione esemplificata nella «antinomia del mentitore» viene così identificato nel fatto che il linguaggio ordinario è «semanticamente chiuso», con la conseguenza di dover contenere anche i nomi delle espressioni e i termini semantici riguardanti le espressioni del linguaggio stesso.

La riformulazione tarskiana della *verità* modifica pertanto la concezione adeguazionista nella forma secondo la quale «l'enunciato (detto) */p/* è vero sse *p*». Questo vuol dire che è possibile attribuire valori di verità soltanto se l'enunciare si svolge in una maniera che lo consenta. Così l'enunciato *p* sarà vero se, e solo se, si dà (nella realtà esterna) *p*, ossia se la realtà è come dice *p*. Resta, comunque, che la *verità* costituisce una relazione tra un rappresentante e un rappresentato o tra verificante e verificato che in tanto «adeguano» in quanto appartengono a piani diversi tra i quali non c'è interferenza né possibilità d'esser compresi in un unico livello. Il problema che va a questo punto affrontato e risolto è quello di stabilire come debbano esser fatti i due piani affinché la relazione di verità abbia senso e significato. Nelle teorie tarskiane e post tarskiane il linguaggio è definito come contenente non un semplice insieme ma una successione ordinata di nomi (termini denotanti cose). In questo modo, le cose si adeguano all'intelletto in quanto vengono disposte in ordine (in serie) mediante nomi che le denotano e per poterne parlare è necessario che siano disposte in serie. L'essere delle cose, in altri termini, non consiste solo nel loro essere percepite, ma anche nel «*modo* in cui le cose sono percepite. Così, la proposta, o la concezione, tarskiana della verità assume, appunto, il suo aspetto caratteristico in forza del quale un enunciato vero è quello che *dice* che lo stato di cose è questo-e-questo e lo stato di cose è proprio questo-e-questo», ad esempio l'enunciato *p* è vero se, e soltanto se, *p*; l'enunciato "la neve è bianca" è vero «sse la neve è bianca».

Dalle cose dette risulta evidente che il problema della verità in Tarski rimanda alla definizione aristotelica del «vero» e, in modo ancora più preciso, a quella della verità come adeguazione già stabilita da Tommaso, per il quale, come si è visto, la verità viene definita quale conformità [*adaequatio*] dell'intelletto e della cosa [*intellectus et rei*]. La problematicità di posizioni come questa, dal punto di vista logico ed epistemologico, va fatta risalire alla circostanza che esse si basano sulla definizione ma lasciano nel *definiendum* un senso residuo che non si trova nel *definiens*. Infatti, l'intelligibile è nell'intelletto, la cosa-stessa è nella realtà ma il *fatto della loro adeguazione non appartiene né all'uno né all'altra*.

6.1. Il tentativo di ridurre la verità alla «dimostrabilità»

La criticità di tale questione e la difficoltà di venirne a capo sono tra le ragioni che hanno spinto, soprattutto nella seconda metà dell'Ottocento, a cercare di sostituire la teoria *semantica* della verità con un approccio puramente *sintattico* a quest'ultima, sostituendola *in toto* con la nozione (sintattica, appunto), di *dimostrabilità*.

Punto di riferimento obbligato di questo approccio è la posizione di Hilbert, per il quale la questione della verità può essere posta e affrontata in modo rigoroso solo all'interno di un sistema formale relativo a un certo campo della matematica, che non solo è un "sistema chiuso", ma esso "*rappresenta in modo fedele e completo*

i nostri pensieri rispetto a quel campo. Queste determinazioni trovano un'esplicita e rigorosa espressione nell'affermazione, secondo la quale, in ogni dato sistema assiomatico, "i modi inferenziali del sistema sono orientati secondo l'immagine di una *realtà chiusa, totalmente determinata*, e danno espressione formale a questa immagine"⁵⁷. Questa affermazione, a sua volta, si basa su principi altrettanto chiaramente enunciati, come i seguenti:

1) quando si fissano gli assiomi per una data scienza, essi devono contenere "una precisa e completa descrizione delle relazioni che sussistono tra i concetti elementari di quella scienza. Gli assiomi fissati sono nello stesso tempo definizioni di quei concetti elementari"⁵⁸;

2) Una volta dati i principi della scienza assiomatica corrispondente a un certo campo conoscitivo, "il successivo sviluppo del singolo campo consiste poi nell'ulteriore sviluppo logico dell'intelaiatura di concetti già prodotta"⁵⁹;

3) Ogni proposizione, appartenente al dominio della scienza considerata, "vale per vera solo se essa può essere derivata dagli assiomi stabiliti mediante un numero finito di inferenze logiche"⁶⁰.

Per Hilbert, dunque, la questione fondamentale da affrontare è quella di garantirsi la possibilità, per una data classe di problemi, di arrivare comunque a una soluzione mediante una successione *finita* di istruzioni, la cui esecuzione non lasci alcun margine di dubbio o di ambiguità. La disponibilità di *procedure meccaniche* è pertanto finalizzata a dare una risposta concreta alla questione suddetta e a assicurare che, nel caso di una funzione, per esempio, esista un algoritmo per calcolare il valore della variabile dipendente a partire da quello della variabile indipendente (o delle variabili indipendenti, nel caso si tratti di una funzione a più argomenti). In questo caso possiamo dire che la funzione sia effettivamente *calcolabile* o *computabile*; e, d'altro

⁵⁷ D. Hilbert e P. Bernays, *Grundlagen der Mathematik II*, Springer, Berlin, 1939, p. 289.

⁵⁸ D. Hilbert, *Mathematische Probleme*, in D. Hilbert, *Gesammelte Abhandlungen. Dritter Band: Analysis, Grundlagen der Mathematik, Physik, Verschiedenes*, Springer, Berlin, 1935, p. 299 (tr. it. parziale in D. Hilbert, *Ricerche sui fondamenti della matematica*, a cura di V.M. Abrusci, Bibliopolis, Napoli, 1978, pp. 145-162).

⁵⁹ D. Hilbert, *Axiomatisches Denken*, in D. Hilbert, *Gesammelte Abhandlungen. Dritter Band: Analysis, Grundlagen der Mathematik, Physik, Verschiedenes*, cit., p. 147 (tr. it. in D. Hilbert, *Ricerche sui fondamenti della matematica*, cit., pp. 177-188).

⁶⁰ D. Hilbert, *Mathematische Probleme*, cit., p. 300.

lato, qualunque algoritmo definisce la funzione computabile che associa ai dati del problema la risposta data dall'algoritmo stesso. L'obiettivo che ci si pone, seguendo questa via, è quello di mostrare che ogni problema matematico è *decidibile* con un numero finito di operazioni e di considerare questa procedura generale di decisione la questione principale della logica matematica⁶¹. È proprio l'esigenza di dare una risposta concreta a questo *problema di decisione* (*Entscheidungsproblem*) che spinge Hilbert a assumere il metodo assiomatico come "il metodo generale di ricerca, che nella matematica moderna sembra valersi sempre di più"⁶² e come lo strumento indispensabile per ogni ricerca esatta in qualsiasi campo, proprio in quanto esso facilita la precisazione dell'impostazione del problema e aiuta a preparare la sua soluzione. Quest'ultima richiede infatti che i sistemi formali siano governati da regole le quali "costituiscono un sistema chiuso, che si lascia scoprire e formulare in modo definitivo"⁶³. Che esse costituiscano un sistema chiuso significa che il sistema è determinato da un insieme di regole che non può essere né esteso, né modificato successivamente.

L'importante, nella visione di Hilbert, non è quindi l'oggetto che si considera ma la *coerenza* del sistema formale che lo tratta, degli assiomi e delle norme di ragionamento che lo regolano, l'assenza di intrinseche contraddizioni e paradossi:

- a) Tutte le discipline matematiche sufficientemente sviluppate devono essere dotate di un proprio sistema di assiomi e regole di ragionamento, che permettano la formazione di sequenze finite di proposizioni – le dimostrazioni – delle quali i teoremi rappresentano gli ultimi passi;
- b) Il requisito fondamentale che ognuno di questi sistemi formali deve soddisfare è l'intrinseca coerenza. Infatti, visto che le teorie matematiche formalizzate non sono altro che collezioni di proposizioni di per sé prive di significato intuitivo, l'assenza di contraddizioni (e non il ricorso ad una presunta evidenza) costituisce l'unico criterio discriminante di accreditamento.

Secondo Hilbert, dunque, è essenziale che per ogni sistema formale vengano fissati, in modo appropriato e coerente, i fondamenti da cui partire (gli assiomi) e i metodi con cui ragionare (le regole di deduzione). Ciò che chiamiamo «Matematica» si riduce esclusivamente a quanto il sistema deduce meccanicamente al suo interno, come pura manipolazione di simboli.

⁶¹ È importante notare che "decidibile" non equivale a "risolvibile". Un problema matematico è decidibile quando esiste un algoritmo che, a ogni istanza del problema, fornisce sempre una risposta, sia essa positiva o negativa; si veda M. L. Dalla Chiara, R. Giuntini, F. Paoli, *Sperimentare la logica*, Liguori, Napoli, 2004.

⁶² D. Hilbert, *Axiomatisches Denken*, cit., p. 146.

⁶³

D. Hilbert, *Die Grundlagen der Mathematik*, 'Abhandlungen aus dem mathematischen Seminar der Hamburgischen Universität', 6, 1928, p. 79 (tr. it. in D. Hilbert, *Ricerche sui fondamenti della matematica*, cit., pp. 267-289).

Il sistema teorico che ne risulta è dunque incardinata su tre caratteri fondamentali che devono essere rispettati congiuntamente:

- **Coerenza:** partendo da degli assiomi ed eseguendo determinati passi logici, si può arrivare a contraddizioni?
- **Completezza:** nel nostro sistema assiomatico ogni *asserzione* è dimostrabile?
- **Decidibilità:** è possibile *determinare* in un numero finito di passi se una *asserzione* è vera oppure è falsa?

Una volta rispettati questi tre criteri, come viene detto chiaramente da Wittgenstein nel *Tractatus*, nessuna sorpresa dovrebbe essere possibile, dal momento che non soltanto non viene conferita alcuna attenzione al ragionamento di un agente che, in presenza di un'informazione incompleta, prende decisioni ragionevoli che possono essere scartate successivamente quando si ottenga nuova informazione (il cosiddetto ragionamento non monotono), ma l'obiettivo al quale si tende è quello di rimpiazzare la libera iniziativa del matematico con un procedimento meccanico, che consenta di controllare tutto e di eliminare ogni elemento di imprevedibilità. Per dirla con le parole (certamente polemiche) usate da Poincaré per commentare l'opera di Hilbert, "tutto vi è esplicitato in modo da permettere di fare Geometria anche ad un cieco"; "per dimostrare un teorema, non è più necessario e nemmeno utile sapere cosa vuol dire" e l'intera ricerca scientifica sembra ridursi ad una «macchina in cui si introducono gli assiomi da una parte e si raccolgono i teoremi dall'altra".

Nel 1933 però Kurt Gödel dimostrava un doppio risultato limitativo di enorme portata tecnica e filosofica. Il primo teorema di Gödel si può esprimere così: "Ogni teoria consistente che contenga l'aritmetica di Peano è incompleta, cioè non contiene tutti gli enunciati veri". Ci sono dunque enunciati aritmetici veri *G* che non possono essere dedotti da un sistema assiomatico contenente l'aritmetica di Peano e che sono, di conseguenza, indimostrabili. A questo risultato Gödel aggiunge un altro elemento, e cioè che per enunciati come *G*, non solo *G*, ma anche la negazione di *G* è indimostrabile. Quindi l'aritmetica è *incompleta* e anche *indecidibile* in quanto la verità o falsità di enunciati come *G* non può essere stabilita con i mezzi del sistema.

Il secondo sistema di Gödel, corollario del primo, consiste nel far vedere che se un sistema come l'aritmetica di Peano può dimostrare la formula che esprime la sua stessa consistenza, allora potrebbe dimostrare *G*. Ma poiché *G* non è dimostrabile, la formula che esprime la consistenza dell'aritmetica non è neppure dimostrabile entro l'aritmetica di Peano. Il programma di Hilbert, che aspirava a dimostrare la consistenza dell'aritmetica usando il frammento finitista della stessa, si rivelava quindi infondato. Questo doppio risultato sanciva quindi l'impossibilità di poter rispecchiare adeguatamente, a livello sintattico, il momento semantico. I teoremi di Gödel mostrano che vi è un nuovo protagonista nella riflessione teorica logico-matematica, la *complessità logica*. Infatti, la meccanizzazione della relazione di conseguenza logica funziona per i primi livelli, ma *non* funziona per livelli superiori e in particolare quando si voglia meccanizzare la nozione di verità aritmetica anche solo elementare, o nel caso

della logica del secondo ordine. Il punto è che il concetto di verità aritmetica elementare risulta radicalmente più complesso (in un senso rigorosamente precisabile) di quello di dimostrabilità.

6.2. Dalla «verità» alla «verisimilitudine»

Le difficoltà di inquadrare in modo soddisfacente il problema della verità e di darne una soluzione capace di resistere alle obiezioni di varie genere che potevano essere via via formulate ha indotto l'epistemologia contemporanea a un significativo arretramento di posizioni, abbandonando la prima linea, quella consistente appunto nella difesa a tutti i costi della postazione incardinata sulla questione dell'accertamento della verità, per attestarsi su una linea più facilmente difendibile, almeno a prima vista.

È questo il senso della posizione assunta da Popper, il quale, quando si trovò ad affrontare il problema della verità, sotto la spinta dell'opera di Tarski, cominciò a focalizzare la sua attenzione su un rapporto a *tre*: quello tra due teorie rivali e l'esperienza. Presupposto e punto di partenza di questa prospettiva è la convinzione che non esista alcun criterio per stabilire la verità di una teoria, che l'esperienza ci consente solo di confutare ipotesi. Dato per scontato questo orientamento di fondo, e quindi l'abbandono della difesa a oltranza della possibilità di venire a capo del problema della verità, ciò che emerge è una nuova questione: anche se, di fronte a due teorie rivali, l'esperienza non ci consentirà mai di dimostrare la verità né dell'una né dell'altra, possiamo tuttavia stabilire un criterio che ci consenta di affermare che l'una è preferibile all'altra perché «più vicina» (in un senso da precisare) alla verità? Se non esiste un criterio per riconoscere la verità, esiste almeno un criterio per riconoscere una maggiore o minore *vicinanza* alla verità? Il nodo centrale della problematica popperiana, negli scritti del dopoguerra, si sposta in questo modo dalla falsificazione di una congettura alla scelta tra due (o più) congetture rivali. La risposta di Popper all'interrogativo così posto è nettamente affermativa:

“La credenza nella verisimilitudine dei risultati ben corroborati della scienza (come le leggi della meccanica) è senz'altro razionale, e lo rimane anche dopo che questi risultati sono stati soppiantati. Si tratta, inoltre, di una credenza suscettibile di *gradi*. Noi dobbiamo distinguere fra due diverse dimensioni o scale di gradi: il grado di somiglianza al vero [*truthlikeness*] di una teoria, e quello della razionalità della nostra credenza nel fatto che una certa teoria ha ottenuto (un certo grado di) somiglianza al vero. Ho chiamato il primo di questi gradi “grado di verisimilitudine [*verisimilitude*]” e il secondo “grado di corroborazione”. Essi sono “comparativi” nel senso che due teorie possono essere confrontate rispetto alla verisimilitudine o alla corroborazione senza, tuttavia, che ciò porti in generale (cioè con la possibile eccezione delle teorie probabilistiche) a valutazioni numeriche. Se due teorie rivali sono state criticate e controllate nel modo più completo possibile, con il risultato che il grado di corroborazione di una è maggiore di quello dell'altra, avremo, in generale, *motivo di*

credere che la prima è una migliore approssimazione alla verità della seconda. (È anche possibile dire di una teoria non ancora corroborata che è *potenzialmente* migliore di un'altra; vale a dire, che sarebbe ragionevole accettarla come una migliore approssimazione alla verità, posto che superi certi controlli, Secondo questa tesi, la razionalità della scienza e dei suoi risultati – e perciò della “credenza” in essi – è essenzialmente legata al suo progresso, alla sempre rinnovata discussione dei meriti relativi delle nuove teorie; è legata al *progressivo rovesciamento* delle teorie, piuttosto che al loro presunto *progressivo consolidamento* (o crescente probabilità) risultante dall'accumulazione di osservazioni a sostegno, come credono gli induttivisti”.⁶⁴

La teoria della verisimilitudine (o verosimiglianza) è stata messa a punto da Popper per cercare di definire i criteri di preferenza delle teorie in modo da esplicitare e rendere rigorosa l'opinione «ingenua» secondo cui sono da preferirsi quelle teorie che sono più vicine alla verità oggettiva. Essa si basa, come si è visto, sul concetto di *contenuto* di una teoria (o di un asserto). Il contenuto di un asserto a è la classe di tutte le conseguenze logiche di a , cioè l'insieme di tutte le informazioni contenute in a in forma diretta o indiretta. Se a è vero, questa classe può consistere solo di asserti veri, perché la verità è sempre trasmessa da una premessa a tutte le sue conclusioni. Ma se a è falso, il suo contenuto consisterà sempre in conclusioni sia vere sia false (per esempio: "a Natale nevica sempre" è falsa, ma la conclusione che da essa si può trarre, secondo cui lo scorso Natale è nevicato, può essere, casualmente, vera). Poiché, per un falsificazionista, non si può essere certi della verità di una congettura scientifica (che è il tipo di asserto che interessa trattare), bisogna ammettere di aver sempre a che fare con asserti che possono essere falsi, dunque che hanno un contenuto in parte vero e in parte falso. Chiameremo «contenuto di verità» di a la classe delle conseguenze logiche vere di a , e «contenuto di falsità» di a la classe delle conseguenze false di a . Popper ha elaborato una teoria della misura dei contenuti degli asserti, cioè un metodo per stabilire dei rapporti di uguaglianza, maggioranza e minoranza tra di essi. Questa teoria è fondata sull'idea semplice e ovvia che il contenuto informativo della congiunzione ab di due asserti qualsiasi a e b sarà sempre maggiore, o perlomeno uguale, a quello di ciascuno dei suoi componenti. Per esempio, se a è l'asserto "venerdì pioverà", e b è l'asserto "sabato sarà bello", allora, l'asserto congiunzione ab ("venerdì pioverà e sabato sarà bello") avrà un contenuto informativo superiore a quello dei singoli asserti componenti a e b . Se indichiamo con $Ct(a)$ il «contenuto dell'asserto a », con $Ct(b)$ il «contenuto dell'asserto b » e con $Ct(ab)$ il «contenuto dell'asserto ab » avremo

$$Ct(ab) \geq Ct(a)$$

e, analogamente

$$Ct(ab) \geq Ct(b)$$

⁶⁴ K. R. Popper, *Poscritto alla Logica della scoperta scientifica. I, Il realismo e lo scopo della scienza*, Il Saggiatore, Milano, 1984, pp. 83-84.

Partendo da qui si può arrivare a definire la misura dei contenuti di verità e di falsità di un asserto a , che indicheremo con $Ctv(a)$ e $Ctf(a)$. Ciò consente di definire quel concetto di misura di verisimilitudine cui ci premeva giungere. Un asserto sarà da considerarsi tanto più verosimile, quanto maggiore sarà la misura del suo contenuto di verità rispetto a quella del suo contenuto di falsità. Detta $Vs(a)$ la misura di verisimilitudine di un asserto a , essa risulta data da:

$$Vs(a) = Ctv(a) - Ctf(a)$$

Impiegando questo concetto di misura di verisimilitudine Popper può enunciare un criterio di scelta tra teorie rivali che, in forma sintetica, consiste nel *preferire la teoria che ha un maggior grado di verosimilitudine*. In questo modo egli ha formulato una traduzione in termini assai sofisticati dell'idea intuitiva che sia preferibile scegliere una teoria più vicina alla verità oggettiva, piuttosto che una che si allontani da questa verità. Il confronto tra teorie rivali va fatto sul terreno del loro maggiore o minore approssimarsi alla verità assoluta.

È fondamentale comprendere che in tutta la teoria della verosimiglianza non si tratta mai di una misura della *differenza tra una teoria e la verità assoluta*, ma sempre di una misura di *differenza tra due teorie*. Essendo per Popper inconoscibile la verità assoluta, sarebbe privo di senso parlarne come se fosse nota e la sua distanza rispetto alle varie teorie in gioco fosse in qualche modo determinabile. L'idea di una verità assoluta ha un valore *regolativo*: la teoria della misura della verosimiglianza non la riguarda, anche se questa teoria, senza quell'idea regolativa, non avrebbe giustificazione. Popper ha elaborato la teoria della misura della verosimiglianza per dare una veste rigorosa all'idea intuitiva di verità assoluta, ma la teoria della verosimiglianza non parla della verità assoluta. Lo scarto esistente tra le teorie ipotetiche e la verità assoluta non sarà mai conoscibile, ma, considerando i rapporti che intercorrono tra le teorie e scegliendo in base alla misura della verosimiglianza, noi non facciamo altro che agire diretti dalla regola di preferire quelle teorie che hanno maggiori speranze di essere vere. La verità, *intesa come l'insieme di tutte le proposizioni vere*, si pone come un obiettivo che noi prendiamo di mira, ma che secondo Popper non possiamo mai raggiungere «consapevolmente»; al massimo, ci possiamo consapevolmente avvicinare sempre più a esso, ma in maniera *asintotica*, ossia senza il supporto della certezza. Di conseguenza, proposizioni e teorie non possono mai essere *dette* vere, ma solo 'verisimili'. Alcune delle nostre produzioni concettuali potrebbero pertanto essere vere sin da ora, ma mentre non possiamo mai avere argomenti sufficientemente buoni nelle scienze empiriche per pretendere che abbiamo effettivamente raggiunto la verità, possiamo avere argomenti forti e ragionevolmente buoni per pretendere che possiamo aver fatto un progresso verso la verità». E la nozione di verosimiglianza serve a Popper proprio per spiegare il progresso conoscitivo, misurato in base alla maggiore o minore distanza dalla verità di due o più teorie in competizione. La verità è dunque per lui un bersaglio rag-giungibile, e perciò la conoscenza è qualcosa che possiamo ottenere: diventa tuttavia un obiettivo irraggiungibile se considerata dal punto di vista della *certezza* conoscitiva.

Anche questo arretramento dalla verità alla verisimilitudine non è tuttavia esente da pecche tali da metterne in discussione la sostenibilità. Pavel Tichy, David Miller e John Harris hanno infatti dimostrato che le definizioni di Popper sono inconsistenti, in quanto se a una teoria la quale, non potendo essere mai una verità assoluta, e quindi del tutto vera, contiene necessariamente anche delle conseguenze false, aggiungiamo una proposizione p vera, allora possiamo estrarre da essa anche la congiunzione logica di questa nuova proposizione vera con un f falsa qualsiasi già presente nella teoria medesima. Questa congiunzione è falsa, e ciò vuol dire che se in una teoria falsificabile e con un contenuto ineliminabile di falsità aumentano le conseguenze vere, aumentano inevitabilmente anche le conseguenze false, risultato che nega la prima definizione di Popper.

Consideriamo il secondo caso: Popper dice che la verisimilitudine di una teoria falsa aumenta se diminuiscono le conseguenze false e non quelle vere; ma anche qui le cose non funzionano, giacché se si toglie dalla teoria in questione una proposizione p falsa, ci si proibisce di fare una implicazione tra questa p falsa e un'altra proposizione qualsiasi q . Indipendentemente dal valore di verità di quest'ultima la proposizione risultante $p \Rightarrow q$ sarà, appunto, sempre vera, trattandosi di un'implicazione con antecedente falso che è sempre vera indipendentemente dal valore di verità del conseguente. Questo risultato è quindi contrario alla seconda definizione prospettata da Popper.

In altri termini: tra due teorie che hanno un contenuto di falsità, una non può essere in alcun caso più vera dell'altra.

Popper riconobbe subito l'errore compiuto nel fornire una definizione formale di verisimilitudine, anche se cercò di circoscrivere il danno:

“accettai la critica della mia definizione pochi minuti dopo che mi fu presentata, chiedendomi come mai non avessi visto prima l'errore; ma nessuno ha mai dimostrato che la mia teoria della conoscenza, che ho sviluppato a partire almeno dal 1933, e che da allora è gagliardamente cresciuta ed è molto usata dagli scienziati d mestiere, sia minimamente scossa da questa definizione sfortunatamente errata. E non è mai stato dimostrato nemmeno per quale motivo l'idea di verisimilitudine (che non è una parte essenziale della mia teoria) non dovrebbe venire ancora usata nell'ambito della mia teoria come concetto non definito. L'affermazione che la mia *autorità* venga danneggiata da questo incidente è ovviamente vera; ma io non ho mai rivendicato né desiderato avere alcuna autorità. L'affermazione che *la mia teoria* venga danneggiata è stata fatta senza neppure tentare di motivarla, e mi sembra perciò soltanto frutto di incompetenza”.⁶⁵

7. Conclusione

8.

⁶⁵ Ivi, p. 25.

A questo punto Alice saluta il gatto che le aveva fatto da guida nello stano mondo della MQ e ritorna nel mondo della precisione e della macrofisica. Cercando di riordinare la sua mente e di fare un catalogo di ciò che aveva imparato durante questo suo viaggio rivolge gli occhi al cielo.

All'alba, verso Est, si può vedere in cielo la *Stella del Mattino*.

Al tramonto, verso Ovest, si può vedere in cielo la *Stella della Sera*.

Oggi – dice tra sé e sé – sappiamo che si tratta dello stesso pianeta: Venere. Come scrive Odifreddi in *C'è spazio per tutti* “dev'essere stato un grande momento, quando qualcuno si accorse che la Stella del Mattino e la Stella della Sera erano lo stesso corpo celeste!”.

Non è importante quando ciò si verificò: la scoperta che si tratta dello stesso oggetto sarebbe stata introdotta in occidente da Pitagora, ma sarebbe dovuta agli astronomi della Mesopotamia. Infatti nella Tavoleta di Venere di Ammi-Saduqa sono riportate osservazioni risalenti al 1550 a.C. o antecedenti, in cui non si fa distinzione fra l'astro del mattino e quello della sera.

Ma nonostante ciò, ancora per molto tempo gli uomini hanno continuato a tessere narrazioni, storie e miti al centro dei quali c'erano due stelle separate: Fosforo ed Espero per i Greci, Lucifero e Vespero per i Latini.

Questo esempio – pensa Alice – pone un problema filosofico e scientifico di primaria importanza che può considerarsi la sintesi dei problemi di fronte ai quali era stata posta dal gatto che l'aveva accompagnata nel mondo della MQ: la relazione tra la realtà esterna, vale a dire gli oggetti e le cose come sono, di cui si occupa l'*ontologia*, e ciò che gli uomini credono o ne sanno: l'*epistemologia*. Questa differenza può appunto essere spiegata con semplicità riferendosi all'esempio di Venere. La proposizione: “La Stella del Mattino e la Stella della Sera sono due corpi celesti distinti” dal punto di vista ontologico è, ed è sempre stata falsa, perché si tratta di due nomi dello stesso pianeta. Se però prendiamo in considerazione ciò che se ne sapeva in Occidente prima di Pitagora, allora la proposizione: “I Greci credevano che la Stella del Mattino e la Stella della Sera fossero due corpi celesti distinti” è, ovviamente, vera.

Si apre così una divaricazione tra il discorso ontologico e quello epistemologico, che assegnano valori di verità opposti, l'uno vero e l'altro falso, a enunciati che parlano dello stesso oggetto. Questo problema viene visto e valutato in maniera diversa a seconda del punto di vista filosofico che si assume. I realisti dicono che il mondo e gli oggetti e i processi di cui è fatto non sono costruzioni mentali, non sono cioè il prodotto del nostro pensiero, per cui quando si parla di verità occorre prendere in considerazione esclusivamente le cose in sé così come sono. Venere non solo esiste oggi, ma esiste da molto prima che gli uomini facessero la loro comparsa sulla Terra, ed esso continuerebbe a esistere anche se non ci fosse alcun pensiero che ne fa il proprio oggetto e alcun linguaggio che ne parla: per descriverlo e parlarne in modo veritiero bisogna quindi rispettare questa sua autonomia dal nostro pensiero e da ciò che, nel corso della nostra storia evolutiva, ne sappiamo, per prendere in considerazione esclusivamente ciò che è ed è sempre stato indipendentemente da noi. Già, ribattono i

fautori del punto di vista epistemologico, ma ciò che chiamiamo "verità" è comunque l'esito di un processo conoscitivo di cui gli uomini sono i protagonisti, e che non può essere non solo concepito, ma neppure immaginato senza fare riferimento ai soggetti che via via lo tessono, per cui ciò che assumiamo come "realtà" dipende sempre da ciò che questi soggetti sanno ed è la proiezione delle loro conoscenze e credenze.

La sostanza della questione viene colta e descritta in modo geniale da Luigi Pirandello in *Così è se vi pare*, incentrata su un tema molto caro all'autore: l'inconoscibilità del reale, di cui possono essere date versioni e interpretazioni differenti a seconda del punto di vista adottato.

In questo caso i due punti di vista in gioco sono quelli del signor Ponza, per il quale il personaggio attorno al quale ruota tutta la vicenda è la sua seconda moglie, sposata dopo la morte della prima, figlia della signora Frola; e quello di quest'ultima, la quale invece sostiene che la figlia è ancora viva ed è l'unica moglie del signor Ponza.

Alla fine la moglie del signor Ponza, condotta in scena con il viso coperto da un velo nero, per risolvere una volta per tutte la questione della sua identità, afferma di essere al contempo sia la figlia della signora Frola che la seconda moglie del signor Ponza, mentre di sé stessa sostiene di non essere nessuna: "*io sono colei che mi si crede*".

Interviene a questo punto un personaggio scettico, Lamberto Laudisi, il quale, dopo una risata, dice, con uno sguardo di sfida derisoria agli altri: "*Ed ecco, o signori, come parla la verità! Siete contenti?*"

Questa conclusione sintetizza al meglio quella problematicità del rapporto tra il linguaggio e la realtà alla quale esso si riferisce che la meccanica quantistica pone così esplicitamente in evidenza. Qualsiasi affermazione parte dalle parole che usiamo (il *significante*), per esprimere un concetto (il *significato*) che è interno al linguaggio, in quanto è parte costitutiva del *segno*, che altro non è se non la relazione tra il significante e il significato, appunto. La realtà può essere espressa e conosciuta soltanto attraverso il linguaggio, non c'è un accesso diretto a essa che prescinda da quest'ultimo. Il *referente*, ciò che costituisce l'oggetto del nostro discorso e al quale esso si riferisce, è però qualcosa che, per definizione, è esterno al linguaggio medesimo, non può essere incorporato all'interno della sua trama. C'è dunque uno scarto incolmabile tra il referente e il significato, attraverso il quale esso viene introdotto nel linguaggio e incorporato in esso.

La moglie del signor Ponza, in quanto oggetto del discorso del marito e della signora Frola, assume inevitabilmente il significato, e quindi l'identità, che ha all'interno dei loro rispettivi discorsi e, in sé stessa, come referente del discorso dell'uno e dell'altra, non può dare alcuna risposta, è muta, e, se interrogata, può rispondere soltanto: "*io sono colei che mi si crede*", proprio perché il referente può parlare soltanto se viene introdotto all'interno di un linguaggio, ma in tal caso perde i suoi connotati di realtà esterna e diventa inevitabilmente oggetto di un discorso, significato, appunto.

Ora, si dice Alice, immaginiamo che io voglia scrivere un romanzo filosofico che abbia come protagonista il pianeta Venere al quale un uomo curioso che crede ancora che la Stella del mattino e la Stella della Sera siano due corpi celesti distinti chiede se risponda al nome di Lucifero o di Vespero, se cioè la sua identità sia legata alla prima Stella o alla

seconda. Se avesse voce e si comportasse come una realtà a sé stante, del tutto indipendente dal linguaggio e dal pensiero degli uomini, che si colloca quindi completamente al di fuori di essi, non potrebbe rispondere in modo diverso dalla moglie del signor Ponza: "Io sono ciò che mi si crede".

La conclusione che Alice trae a questo punto come insegnamento profondo del viaggio che ha compiuto è molto chiara: se non si riesce a cogliere e a esprimere il nesso tra ontologia ed epistemologia, cioè tra la realtà in sé e la sua conoscenza, e non si perviene, in qualche modo, a pensare che ogni ontologia è sempre anche epistemologia e che ogni epistemologia è anche un'ontologia la questione della verità, comunque la si ponga, diventa un mistero che non può in alcun modo venire affrontato correttamente e con qualche speranza di successo. Il tentativo da fare non può che essere allora quello di pensare l'epistemologia nell'ontologia e l'ontologia nell'epistemologia, senza allo stesso tempo far deflagrare in alcun modo l'una nell'altra. Se stacciamo completamente la realtà esterna dal pensiero e riteniamo che il vero sia qualcosa che giace nella sostanza delle cose indipendentemente dal modo in cui questa sostanza è pensata tutti i prodotti della conoscenza risultano essere solo proiezioni, che vanno considerati equivalenti, dei punti di vista dei soggetti, senza che si possa disporre di alcun criterio di preferenza dell'uno rispetto all'altro. Il regno del "Così è se vi pare", appunto.

La scoperta di poter conciliare parti inizialmente e tradizionalmente considerate distinte in un'entità unica è sempre una sorpresa che desta stupore e meraviglia. Da questa sorpresa inizia sempre un nuovo viaggio della conoscenza. Così come si è scoperto che Espero è Fosforo, allo stesso modo si può sperare che un giorno l'epistemologia si approssimi sempre più all'ontologia. Questa è la sfida (e la bellezza) della ricerca scientifica in tutte le sue espressioni e articolazioni, senza alcuna antistorica distinzione tra scienze umane e scienze esatte.