

L'incidenza della “filosofia personale” dello scienziato nel lavoro di ricerca e la nascita della meccanica quantistica.

Alfio Briguglia

E-mail: alfiobriguglia@alice.it

Abstract. L'epistemologia della prima metà del secolo scorso ha avuto la pretesa di voler racchiudere in poche regole prescrittive il lavoro effettivo dello scienziato e il concetto di razionalità scientifica, spesso considerata come razionalità tout court. Le domande tipiche dell'inizio del Novecento: quali sono le condizioni perché un discorso abbia significato (criterio di significanza)?, cosa distingue la scienza dalla non scienza (criterio di demarcazione)?, quali sono le condizioni per accettare come vera una proposizione (criterio di accettabilità razionale)? sono state sostituite, nella seconda parte del secolo, dall'interesse a comprendere cosa fanno veramente gli scienziati. La lezione della storia, che ci racconta come hanno lavorato effettivamente, quale era il loro mondo vitale, quale filosofia personale ha influenzato la loro ricerca, ha costretto l'epistemologia a cambiare prospettiva [1].

Alla luce della storia l'opera del fisico appare oggi come opera di saggezza, intesa, in senso aristotelico, come capacità di decidere in modo ragionevole in condizioni di incertezza. Quest'ultima prospettiva può essere esemplificata, collocandosi in un preciso periodo storico e osservandone i protagonisti all'opera. Ad esempio, Heisenberg e Schrödinger tra il 1925 e il 1927. Attorno a loro si incontrano altre figure carismatiche come Pauli. Dietro di loro l'ombra di Einstein e Bohr. Il clima è quello della Mitteleuropa. Quasi come contraltare a questa cultura, qualche decennio dopo, R.Feynman rappresenta un atteggiamento molto diverso, che potremmo indicare con “fisica come gioco”. I Primi personaggi vivevano in maniera molto naturale una sintesi di fisica e filosofia. Feynman, invece, si vantava di non capire nulla di filosofia, con la riserva dichiarata di non credere che i filosofi avessero qualcosa di interessante da dire. R.Feynman apparteneva ad una cultura più prammatica e meno incline a speculazioni metafisiche. Schrödinger, Heisenberg e Feynman (anche lui, comunque) rappresentano tre modi diversi di intendere il dualismo onda corpuscolo, in qualche modo legati alla loro “filosofia personale”[2].

Un secolo di dibattiti e riflessioni ci consegna una visione del lavoro dello scienziato e della Natura della Scienza (NoS) ricca e complessa, più compromessa con altre espressioni della cultura di quanto non avrebbe voluto l'epistemologia standard della prima metà del Novecento.

1. La revisione dei confini dei saperi e la razionalità scientifica

Il secolo che abbiamo alle spalle, nel giro di pochi decenni, ha consumato l'utopia di una conoscenza capace di garantire in modo indubitabile la propria certezza, anche a costo di limitarne drasticamente le pretese. Il movimento neoempirista aveva messo insieme un codice di prescrizioni rigorose per giungere ad una conoscenza certa, a partire dalla base empirica e da regole logiche. I “giudizi sintetici” (le proposizioni riguardanti dati di fatto) e i “giudizi analitici” (inconfutabili perché non asseriscono alcunché intorno al mondo empirico, ma che strutturano i giudizi sintetici) dovevano costituire la base solida della scienza e, comunque, l'unica base possibile. Tutto il resto veniva abbandonato al regno dell'incerto o, addirittura, di ciò che non ha significato. Solo di ciò che è verificabile empiricamente si poteva dire che avesse significato. Il criterio di demarcazione tra scienza e non scienza era anche un criterio di “significanza”: solo le forme linguistiche che si riferiscono a fatti hanno significato; tutte le altre forme linguistiche e le proposizioni dell'etica o della metafisica non sono né vere né false, sono semplicemente senza senso [3]. Una dicotomia, diventata una “istituzione culturale” era quella tra fatti e valori: solo le proposizioni su fatti possono aspirare ad essere catalogate come descrittori oggettivi, le proposizioni dal contenuto etico esprimono approvazione o

disapprovazione soggettiva, tra essere e dover essere vi è un abisso invalicabile [4]. La funzione della filosofia, non avendo essa contenuto cognitivo, era solo quella di “chiarire le proposizioni della scienza evidenziandone le relazioni logiche ed elaborando definizioni dei simboli che vi figurano” [5]. La razionalità, di conseguenza, assumeva il volto della procedura rigorosa, del calcolo formale, di ciò che non può essere diversamente da come è. In questo modo veniva tracciata una invalicabile linea di separazione tra fatti e *lebenswelt*, tra criteri di accettabilità razionale e convinzioni valoriali, tra *contesto della ricerca* e *contesto della giustificazione*.

Per quanto il rigore del *Circolo di Vienna* sia stato successivamente mitigato in diversi modi, il divorzio tra conoscenza garantita e *mondo della vita* attraversa l’epistemologia del primo Novecento. In nome della possibilità di una conoscenza certa si ritiene di eliminare dal linguaggio scientifico ogni residuo metafisico e valoriale. Di fatto a questo furore eliminazionista, o eccesso di sobrietà epistemica, o “ardente desiderio di oggettività” [6], a seconda dei punti di vista, si associa spesso, come filosofia condivisa anche se incoerente con la visione neoempirista della conoscenza, il cosiddetto *realismo* metafisico e il riduzionismo ontologico. Quali oggetti esistono veramente? Solo le particelle elementari e le loro interazioni (secondo i cosiddetti “fisicalisti”)! Tutto il resto è fatto degli stessi mattoni e deve essere spiegato in linea di principio mediante gli *elementi base*; solo per comodità ci riferiamo ad oggetti complessi come se avessero una loro autonomia ontologica. Il già citato H.Putnam, che del movimento analitico è stato protagonista e critico, dirà: siamo di fronte ad una concezione alienata della conoscenza e della razionalità, se giunge ad affermare un mondo fatto solo di particelle e che non riesce a tener conto di tutto il resto [7]. Oltretutto è il soggetto responsabile che costruisce conoscenze; di conseguenza, lo scienziato che sperimenta nel suo laboratorio e che prende decisioni, ma crede che esistano solo particelle elementari, cade in una contraddizione performativa, perché deve togliere senso e valore a se stesso, nel momento in cui dichiara la illusorietà della propria esistenza sostanziale e della capacità di prendere decisioni libere [8].

L’idea che solo la scienza offra contenuti cognitivi certi e che il resto appartenga al mondo del soggetto è stata (e per molti lo è ancora!) una convinzione che non ammette repliche. Questa idea, di fatto, non ha giovato alla relazione tra la scienza e il comune cittadino. Probabilmente, ha contribuito ad una perdita di interesse nei confronti della scienza. Perché, se solo la scienza garantisce conoscenza e razionalità, allora tutto ciò che conta per un individuo e per la vita sociale rimane fuori dalla portata della scienza e della razionalità, la scienza esce dalla vita. Il primo Wittgenstein terminava il suo *Tractatus* con la celebre proposizione 7: “Su ciò, di cui non si può parlare, si deve tacere”. Ma qual è il costo di tale rinuncia? Lucidamente, cinque proposizioni prima, scriveva: “Noi sentiamo che, anche una volta che tutte le domande *possibili* hanno avuto risposta, i nostri problemi vitali non sono ancora neppure toccati. Certo allora non resta domanda alcuna; è appunto questa è la risposta” [9].

Nella seconda metà del Novecento la situazione è radicalmente cambiata, perché, progressivamente, è stata messa in evidenza la difficoltà, se non impossibilità, di tracciare una netta linea di demarcazione tra scienza e cultura altra.

Come sempre accade quando idee apparentemente immutabili vengono messe in discussione [10], la mutata consapevolezza della NoS ha prodotto derive scettiche e relativistiche [11], come risposta a posizioni eccessivamente ottimistiche o dogmatiche [12]. Questo, però, non è l’unico esito possibile di una più profonda conoscenza delle dinamiche di formazione dei concetti e delle teorie della scienza. E’ possibile mantenere l’idea della scienza come impresa razionale che vuole conoscere la realtà, sia nel momento della scoperta che in quello delle procedure di conferma, a patto che si allarghi il concetto di razionalità e si liberi la conoscenza dall’alternativa tra essere rispecchiamento della realtà o essere nulla, recuperando una prospettiva più adeguata dei modi con i quali entriamo in relazione col mondo [13].

2. Dall’arco della conoscenza ad una nuova consapevolezza della Nos

Qual era l’epistemologia standard alla fine del periodo di ascesa della scienza moderna?

Nel suo *Storia della filosofia della scienza* (titolo originale *The Arch of Knowledge. An Introductory Study of the History of the Philosophy and methodology of Science*) David Oldroyd [14] dichiara di volere seguire la storia di un ben determinato programma di metodo per acquisire conoscenza: *il metodo di analisi e*

sintesi. Partendo dai fatti osservabili si induttivamente risale alle leggi e da queste, tramite principi generali evidenti (arco di volta), si torna ai fatti osservabili i quali adesso possono essere *dedotti* dai principi. La “figura” che viene subito in mente è quella di un arco che parte verso l’alto e torna verso il basso, tenuto insieme dall’arco di volta dei principi matematici e logici indubitabili. L’A. fa risalire a Platone la figura dell’arco e ne segue la storia fino al suo consolidamento con I.Newton. La famosa *Query 31* dell’*Opticks* contiene la principale formulazione di Newton circa la metodologia scientifica. Essa è costituita da un momento analitico induttivo ascendente e da uno sintetico che discende dalle leggi generali verso la comprensione di fenomeni particolari [15].

In maniera più sintetica, nella Prefazione alla prima edizione dei *Principia*, I.Newton aveva esplicitato, l’esposizione del suo metodo, applicandolo all’indagine sulle forze in natura: “*Ogni difficoltà filosofica par consistere nel ricercare le forze che la natura impiega, deducendole dai fenomeni a noi noti e nel passare poi dalla conoscenza di tali forze alla previsione di nuovi fenomeni*” [16].

La storia successiva delle idee sul metodo scientifico, e, in generale, sulla acquisizione di conoscenza, fino alla prima metà del Novecento ha assistito ad una demolizione sistematica dell’arco, alla sua sostituzione con altre metafore. Il Neoempirismo ha privilegiato la parte ascendente induttiva dell’arco, tentando in vari modi di consolidarla. Ma l’induzione non ha mai avuto vita facile, anche perché già nel decidere cosa intendere per base dell’induzione sono possibili diverse alternative. La battaglia di K. Popper contro l’induttivismo prevedeva come parte *construens* la proposta di un metodo che salvasse, attraverso la *falsificazione*, la colonna discendente deduttiva, lasciando però il momento della formazione delle teorie fuori da considerazioni di tipo metodologico. La sommità dell’arco, che permette il passaggio dall’analisi alla sintesi, era già stata incrinata dalla crisi dei fondamenti della matematica, con la conseguente difficoltà di fare riferimento all’evidenza degli assiomi come criterio di verità [17].

D.Oldroyd, nell’opera citata, segue le trasformazioni della metafora dell’arco fino al Novecento e la sua finale inutilizzabilità dopo i lavori di Popper, Hanson, Kuhn, Lakatos, Feyerabend..., per citare solo i più famosi protagonisti del dibattito sulla NoS [18]. Alla fine viene rifiutata la logica formale come strumento primario dell’analisi della scienza, per dare, invece, spazio alla storia della scienza, a ciò che gli scienziati hanno veramente fatto. Questi autori hanno aperto una nuova fase della epistemologia, una *nuova filosofia della scienza* [19], la quale tenta di costruire della scienza una immagine legata a ciò che veramente è avvenuto e non a concezioni preconcepite di essa [20].

Nella seconda metà del Novecento vengono messe in discussione tutte le proposte prescrittive di metodo scientifico. E non solo! Anche i criteri di quella demarcazione tra scienza e non scienza, decisiva per i Neoempiristi e cara anche a Popper, vengono contestati in maniera sempre più radicale dagli autori citati [21]. Se non si vuole cadere nel relativismo culturale (= depotenziamento della scienza - ridotta a sapere tecnico - e metodo scientifico - ridotto a sociologia) occorre ripensare in profondità le stesse concezioni della conoscenza e della razionalità, comprese la conoscenza scientifica e la razionalità scientifica. Per quanto riguarda la prima posizione, ha fatto scuola il pragmatismo radicale di W.V.O.Quine, il quale in un articolo influente, metteva in mora due *dogmi* dell’empirismo: la distinzione analitico-sintetico e la convinzione che qualunque proposizione significativa fosse equivalente ad un costrutto logico fondato su termini riferentisi alla esperienza immediate [22]. Con ciò veniva liquidato il programma neoempirista di una connessione tra leggi e fatti: non era possibile né verificare, né falsificare una singola ipotesi scientifica confrontandola con i fatti, perché “*l’unità di significato empirico è la scienza nel suo insieme*” e “*qualsiasi proposizione può essere tenuta per vera qualunque cosa avvenga, se facciamo delle modifiche abbastanza drastiche in qualche luogo del sistema*” [23].

E’ possibile, però, battere altre strade e non ridurre la conoscenza ad un “*continuo flusso di stimoli sensoriali*” che il soggetto organizza pragmaticamente, mediante “*schemi concettuali*” in base al suo “*patrimonio scientifico*” [24]. Vi è anche la possibilità, come detto, di allargare la concezione di “*razionalità*”, di “*verità*”, di “*significato*”, riconciliando conoscenza scientifica e filosofia personale in un *sapere sapiente*. Oltretutto, se si riduce la conoscenza ad una prospettiva radicalmente internista, viene meno la passione che ha animato tutti coloro che si sono spesi, non per “*riorganizzare i loro stimoli sensoriali*”, ma per gettare ponti verso quella realtà esterna alla quale cerchiamo di adattarci, intenzionandola nei nostri processi cognitivi. Anche se

lo scienziato ha a che fare con modelli e ipotesi, se lavora all'interno di contesti culturali filosoficamente orientati, la sua intenzione è diretta verso una realtà altra dalla sua psicologia. Secondo M. Polanyi il momento veritativo è segnato da quell'impegno responsabile attraverso il quale, pur nella consapevolezza della fallibilità e della mediatezza di ogni affermazione, lo scienziato pensa di dire qualcosa della realtà. La verità di una affermazione non è interamente affidabile ad una procedura di controllo perché comporta anche rischio personale. Secondo Polanyi occorre uscire dalla dicotomia soggettivo-oggettivo. La conoscenza è *personale*! Questo significa che non è riducibile, né è formalizzabile il contenuto tacito che guida la passione euristica dello scienziato [25].

Uno studio più attento e meno ideologico della storia della scienza mette in evidenza che, di fronte a fatti nuovi, il comportamento e le strategie di adattamento cambiano da scienziato a scienziato, tanto che Feyerebend ha buon gioco a chiamare questi ultimi “opportunisti senza scrupoli” [26]. I criteri di accettabilità razionale che le comunità degli scienziati adottano cambiano nel tempo e la storia ci insegna che a volte non vengono accettati nelle riviste accreditate articoli di autori, i cui contributi faranno poi parte dei manuali di scuola.

Diverse proposte nel Novecento si sono ispirate ad una duplice consapevolezza: della fluidità del metodo scientifico [27], osservato in azione in vari scienziati, e della necessità di dare della razionalità in generale e della razionalità scientifica in particolare un'idea non riduttiva. Di questo il già citato M. Polanyi è stato un convinto assertore! È significativa, a questo proposito, anche la parabola di H. Putnam. Partito da posizioni funzionaliste e riduzioniste ha più volte cambiato idea verso atteggiamenti meno riduttivi e capaci di superare un'idea della razionalità che H. Putnam, adesso, come visto, ritiene alienata.

H. I. Brown, ha riproposto un'idea di pratica della scienza che riprende la dialettica platonica e l'idea di saggezza aristotelica [28] contenuta nel libro VI dell'*Etica a Nicomaco*.

A fronte di un modello di razionalità algoritmico, che ritiene razionali solo quelle conclusioni dedotte con un calcolo da premesse indubitabili, un modello di razionalità decisamente più a misura d'uomo è quello che riguarda chi (o il gruppo che) deve comunque prendere una decisione in condizioni di incertezza, sfruttando tutta l'evidenza e l'informazione condivisa in un dato contesto culturale e in un dato momento storico. Osserva H. I. Brown: è proprio quando una conclusione non può essere dedotta attraverso un calcolo che si richiede una valutazione razionale. Se bastasse una procedura “oggettiva”, come pensavano fosse possibile i primi appartenenti al Circolo di Vienna, una volta stabilita la base empirica ci si potrebbe affidare ad un calcolo, per dedurre proposizioni affidabili. In molte situazioni occorre prendere decisioni intelligenti, senza che un algoritmo ci possa guidare, sulla base di informazioni adeguate ma non complete e neanche assolutamente certe. Questo è, ad esempio, il caso delle scelte morali. In tali casi una decisione intelligente richiede esperienza. La conclusione non è infallibile, e non c'è nessuna garanzia che tutte le persone dotate di un'informazione adeguata, che deliberino su di un argomento, giungeranno alla medesima decisione. Ecco allora la proposta di un diverso modello di razionalità: *“Propongo allora di prendere l'uomo dotato di saggezza pratica come modello per colui che prende delle decisioni scientifiche cruciali, decisioni che non possono essere prese facendo appello ad un algoritmo; e presento il prendere queste decisioni come modello del pensiero razionale”* [29].

La razionalità non viene meno neanche nei momenti di invenzione e scoperta: *“L'idea secondo cui non ci sarebbe una base razionale per la scoperta è plausibile soltanto a patto di identificare la scoperta di una nuova ipotesi con la sua apparizione ex nihilo nella mente dello scienziato, ma abbiamo visto come ciò non sia corretto. Newton, Einstein, Bohr, Schrödinger si sforzavano tutti di risolvere dei problemi ben definiti entro un ben definito contesto intellettuale”* [30,31]

Possiamo sintetizzare quanto fin qui detto utilizzando come metafora della conoscenza scientifica uno “spazio vettoriale” a più dimensioni: immagini, modelli, formalismo matematico, pratiche efficaci di laboratorio, conoscenze condivise dalla comunità scientifica, tecnologia disponibile, reti di comunicazione, ... Tale spazio è immerso nel mondo vitale di una particolare cultura con le sue priorità, le sue credenze, i suoi valori ed è alimentato dalla filosofia personale dello scienziato che suggerisce, in qualche modo, ciò che deve essere e ciò che non deve essere, ciò che è possibile e ciò che non è possibile, ciò che è soddisfacente per l'intelligenza e ciò che è magari accettabile, ma solo provvisoriamente.

Alla luce di tale metafora il progresso della conoscenza scientifica è insieme un momento di continuità e di discontinuità, perché non tutto cambia contemporaneamente in una “rivoluzione scientifica”. Pratiche di laboratorio consolidate, formalismi matematici, criteri di accettabilità condivisi ... possono transitare nei nuovi modi di vedere. Attraverso tale complessa mediazione *ci adeguiamo* al nostro mondo, con la libertà di possibili descrizioni alternative, di sospensione del giudizio o di abbandono di teorie inadeguate, senza che questo rimetta sempre tutto in discussione. L’enfasi sulla “incommensurabilità” (*a la Kuhn*) non tiene conto del fatto che è proprio la pluridimensionalità e compromissione con tutto un insieme di valori (e non solo l’atteggiamento *reazionario* delle comunità scientifiche) che rende flessibile e resistente ai cambiamenti una conoscenza «adeguata». Il sistema tolemaico ha resistito per parecchi secoli prima di Copernico e Galilei perché Tolomeo non proponeva semplicemente un “modello” di sistema solare risultato poi *errato*. Il suo modello era pur sempre conoscenza perché stabiliva un rapporto col mondo, permetteva di fare osservazioni, “salvava” i fenomeni. Era, però, conoscenza risultata poi povera di prospettive e *inadeguata* rispetto alle nuove osservazioni di Galilei! [32]

In tutto questo c’è largo spazio per lo stile personale del singolo ricercatore. Erwin Schrödinger, in una conferenza del 1932, sottolineava come, in ogni stadio della ricerca occorre fare delle scelte: cosa indagare? quali esperimenti fare? quali fatti prendere in considerazione? a quali dare più importanza? “In ogni istante, esisterebbero senza dubbio molte, moltissime esperienze — ed esperienze molto opportune — alle quali non pensiamo affatto, perché il nostro interesse è vincolato ad altre cose. Perciò è innegabile che, *ogni volta che è stimolato in noi un interesse, la cui influenza sarà poi decisiva sull’indirizzo ulteriore del nostro lavoro, resta spalancata una larga porta alla soggettività, una porta che nemmeno in teoria può essere chiusa*” [33]. Questa soggettività è, per Schrödinger, quasi come “l’impronta artistica” personale dello scienziato [34].

3. La nascita della meccanica quantistica

Una delle possibili esemplificazioni storiche di quanto fin qui detto può essere esplorata analizzando le due proposte relative ad una nuova meccanica, fatte da W.Heisenberg (1925) e E.Schrödinger (1926). Si tratta di due personaggi molto diversi tra di loro, anche per età, le cui riflessioni sono guidate da filosofie diverse: da una parte il ventiquattrenne allievo di Bohr, che, partendo da una interpretazione sostanzialmente discontinua degli eventi microscopici, vuole liberarsi di tutte le grandezze fisiche non osservabili, rinunciando alla “visualizzazione”; dall’altra un quarantenne attratto, invece, da interpretazioni che concedano, anche se in modo ambiguo, la possibilità di “visualizzare” gli stessi eventi. L’intuizione di De Broglie e l’analogia formale con il principio di Fermat per l’ottica e con quello di Hamilton per la meccanica furono, per quest’ultimo, la guida per interpretare e rendere “comprensibili”, mediante il modello ondulatorio, le transizioni radiative dell’atomo di Bohr come battimenti tra frequenze di onde stazionarie.

Il tema della “visualizzabilità” accompagna la nascita della meccanica quantistica e costituirà, nei decenni a seguire, uno spartiacque tra filosofie della conoscenza diverse tra loro [35]. L’atomo di Bohr sembrava dare un notevole contributo alla possibilità di comprendere i processi atomici. Esso però ben presto si rivelò nient’altro che un utile e provvisoria metafora [36]. W.Heisenberg decise di fare a meno di orbite (in ciò era sostenuto da W.Pauli) e organizzare i dati sperimentali in matrici (senza riconoscerle come tali). Già Hendrik Kramers, altro allievo di Bohr a Copenaghen, aveva aperto la strada ad Heisenberg, sostituendo alle frequenze orbitali le frequenze di emissione e considerando ogni atomo come un insieme di oscillatori [37].

Le relazioni di indeterminazione sembrarono apporre il sigillo definitivo alla possibilità di considerare come cose reali traiettorie e posizioni di elettroni. Proposte da Heisenberg come conseguenza delle regole di commutazione tra impulso e posizione, furono la causa di una discussione accesa con Bohr, che considerava scorretta la sua interpretazione basata sul “disturbo” e non su un dualismo inaggirabile onda-corpuscolo. Questo, a parere di N.Bohr, era la diretta conseguenza del fatto che al mondo microscopico ci si può accostare solo con un linguaggio generato all’interno di una esperienza macroscopica del mondo [38]. Nasceva il *Copenaghener Geist*, oggetto di uno tra i più famosi e civili dibattiti (Bohr-Einstein) della storia della cultura, un dibattito filosofico su come avrebbero dovuto andare le cose, ma combattuto con le armi della fisica. Meno amichevoli furono i commenti che E. Schrödinger e W. Heisenberg si scambiarono circa le rispettive proposte della nuova meccanica [39].

La filosofia di Heisenberg tra il 1925 e il 1927 è tutta contenuta negli *incipit* dei due articoli con i quali proponeva il suo nuovo approccio per il recupero di una coerenza interna alla fisica, ritenuta in crisi.

Già nel lavoro del 1925 [40] è annunciata l'intenzione costruttrice della nuova teoria: “*reinterpretare*” *quantisticamente le grandezze classiche cinematiche e meccaniche*”, facendo a meno di riferimenti alla posizione e orbita dell'elettrone nell'atomo, perché grandezze inosservabili in linea di principio.

Nel lavoro del 1927 [41] Heisenberg proponeva una definizione di comprensione fisica assolutamente prammatica, inaccettabile per E.Schrödinger, e dichiarava irreversibile l'abbandono dei concetti classici di traiettoria e posizione, che considerava all'origine di contraddizioni interne: “*Crediamo di comprendere intuitivamente una teoria fisica quando riusciamo a pensare in modo qualitativo alle conseguenze sperimentali di tale teoria in tutti i casi semplici e quando allo stesso tempo abbiamo riconosciuto che l'applicazione della teoria non contiene mai contraddizioni interne. [...] L'interpretazione intuitiva della meccanica quantistica è tuttora piena di contraddizioni interne, che si riflettono nel contrasto di opinioni riguardo alla teoria del discreto e del continuo, onde e corpuscoli. Già da ciò si potrebbe dedurre che un'interpretazione della meccanica quantistica in termini di concetti cinematici e meccanici consueti non è in ogni caso possibile. La meccanica quantistica ebbe origine proprio dal tentativo di rottura con quei concetti cinematici usuali, sostituendoli con relazioni tra numeri concreti forniti dall'esperienza. Dato che ciò ora sembra riuscito, neppure lo schema matematico della meccanica quantistica avrà bisogno alcuno di revisione*” [42].

Dopo la seconda guerra mondiale, rievocando quegli anni, Heisenberg paragona la intuizione ispiratrice del suo lavoro ad una illuminazione simile a quella provata in una gita in montagna: persi nella nebbia, all'improvviso un costone roccioso illuminato dal sole ti rivela dove sei e ti permette di comprendere quale via ti riporterà a valle. La via è quella della rinuncia alle orbite elettroniche e alle grandezze non osservabili.

In una conversazione, ricostruita da Heisenberg quattro decenni dopo, A.Einstein gli avrebbe detto incredulo: “*Ma dice sul serio? Dunque, secondo lei, una teoria deve basarsi esclusivamente su grandezze osservabili?*”. Al che Heisenberg gli avrebbe ricordato che aveva fatto così anche lui con il tempo assoluto inosservabile, sostituito con il tempo misurato dagli orologi. “*Può essere che abbia detto una cosa del genere. Ma, comunque sia non ha senso*”, fu la risposta di Einstein” [43]. Nella discussione che segue Einstein sembra anticipare N.R.Hanson [44]: senza una teoria non esistono neanche i dati sperimentali, e la teoria non è organizzazione economica di dati sensoriali, ci parla della realtà (contro Mach!). Le argomentazioni di Einstein costringono Heisenberg a rinnegare quanto affermato nella stessa occasione circa la definizione di comprensione. Concede ad Einstein che comprendere non può significare solo prevedere. E allora? “*Non possiamo affermare che abbiamo veramente 'capito' la meccanica quantistica*” è la conclusione del colloquio [45].

Proprio il desiderio di “comprendere” orientava negli stessi anni in altra direzione il lavoro di E.Schrödinger. Nella introduzione alla raccolta *Onde di materia e onde di probabilità* [46] il curatore S.Boffi osserva: “Anche se la meccanica ondulatoria ha contribuito in modo determinante alla svolta del pensiero scientifico e al riorientamento di prospettiva dello scienziato di fronte ai fenomeni fisici, essa nasce dal desiderio di comprensione della realtà fisica oggettiva in quanto tale. E, come in ogni attività umana, i criteri di scelta che hanno innescato questa svolta hanno trovato ispirazione nella matrice culturale della singola persona, responsabile della scelta. Questa matrice culturale è quella europea, riconducibile a tre radici principali: la ricerca dell'intelligibilità del reale perseguita dai greci, il progetto imperiale della *pax romana* e la fede religiosa del popolo ebraico e della tradizione giudaicocristiana” [47]. Apprestandosi a presentare le memorie relative alla seconda proposta di una meccanica quantistica ad opera di E.Schrödinger, S.Boffi sente il bisogno di sottolineare il peso di tradizione culturale, in particolare filosofica, che sta dietro una teoria scientifica: “In questa libera attività creativa dell'intelletto, tuttavia, un ruolo essenziale, anche se spesso a livello inconscio, è giocato dall'insieme di nozioni, di idee, di concetti, di atteggiamenti che si trasmettono da una generazione all'altra: quel bagaglio culturale che costituisce l'insegnamento di base informale e che può a ragione essere definito come una *mitologia scientifica*. Tramandata senza più riferimento alle fonti, ma fatta propria nel profondo, questa mitologia scientifica è la forza motrice dell'immaginazione e rappresenta la cornice entro la quale lo spirito creativo si esprime. Il dualismo onda–corpuscolo rientra in questa mitologia scientifica e risale ai primissimi tentativi dei filosofi naturalisti ionici di organizzare la visione del mondo.

L'idea della struttura discontinua della materia secondo Democrito, contrapposta a quella dell'essere indivisibile e continuo di Parmenide, rinasce nelle dispute settecentesche sulla natura della luce tra i sostenitori della teoria corpuscolare di Newton e quelli della teoria ondulatoria di Huyghens” [48].

D'altra parte E.Schrödinger, come i già citati Einstein ed Heisenberg, aveva una formazione filosofica di prima mano e non considerava le discussioni sulla natura della conoscenza o sugli eterni problemi dell'uomo come una perdita di tempo. E' sua l'affermazione: “se eliminiamo la metafisica, arte e scienza si riducono a miseri oggetti senza anima, incapaci di ogni evoluzione ulteriore” [49]. Schrödinger conosceva molto bene il mondo classico e aveva lette quasi tutte le opere di Schopenhauer (la cui filosofia gli serviva anche a giustificare il suo lasciarsi soggiogare dal fascino femminile [50]). Nel suo percorso che nel 1926 lo portò a formulare una meccanica ondulatoria, non relativistica, per l'atomo di idrogeno è esplicito l'intento di voler costruire una teoria che non facesse a meno della continuità spatio-temporale delle orbite elettroniche e per la quale la parola “comprendere” non dovesse essere interpretata in un modo che eliminasse l'intuibilità.

Nel 1926 Schrödinger pubblicò quattro comunicazioni sulla “Quantizzazione come problema agli autovalori” [51]. La prima comunicazione fu ricevuta dagli Annalen der Physik il 27 gennaio 1926 [52], la quarta il 26 giugno dello stesso anno [53]. E' dichiarato l'intento di volersi affidare a strumenti matematici che suggerissero visioni comprensibili del comportamento microscopico della materia, di rendere l'apparizione di numeri interi naturale conseguenza di una teoria continua, come accade nel numero di nodi di una corda vibrante. La famosa equazione, che porta il suo nome, è l'equazione alle onde di D'Alembert, modificata con gli strumenti matematici della meccanica analitica. Schrödinger non rinuncia alla sua proposta, pur rendendosi perfettamente conto del costo in termini di problemi lasciati aperti: come collegare la frequenza di radiazione alle frequenze proprie di risonanza legate alle orbite? Si tratta di battimenti? qual è il senso delle assunzioni “arbitrarie” fatte per potere utilizzare il principio di Hamilton? cos'è esattamente lo “scalare di campo”, la funzione d'onda? perché deve essere una funzione complessa? che relazione c'è tra una particella e i pacchetti d'onda, che solo per un breve istante occupano una porzione ristretta di spazio? Inoltre la sua proposta vale solo nella approssimazione non relativistica. Ma a fronte di questi problemi c'è un vantaggio: i numeri quantici vengono fuori, naturalmente, dalla soluzione della equazione agli autovalori (compresi gli stati degeneri) [54] e, soprattutto, viene resa giustizia al desiderio di “comprensione” dello spirito umano. E' famosa la valutazione da parte di Schrödinger della proposta di Heisenberg: “...fui respinto (*abgestossen*) da quello che mi parve un metodo piuttosto difficile di algebra trascendente, che sfidava qualsiasi visualizzabilità”. D'altra parte quest'ultimo non sarà da meno: “Quanto più soppeso la parte fisica della teoria di Schrödinger tanto più orribile (o detestabile – *abscheulicher*) mi risulta” [55].

Il suggeritore di E.Schrödinger è Louis de Broglie, il quale aveva associato al moto di una particella un'onda. Schrödinger è interessato agli stati legati di un elettrone. Il punto di partenza è l'equazione di Hamilton Jacobi, nella quale l'hamiltoniana è espressa in funzione delle coordinate generalizzate e dell'azione. In un campo con potenziale indipendente dal tempo, come nel problema di Keplero, l'equazione di Hamilton Jacobi diventa una equazione nella sola ψ , precedentemente definita, ed r . Il metodo variazionale conduce da tale equazione ad una agli auto valori in coordinate polari. Per energie positive lo spettro degli autovalori è continuo, per energie negative lo spettro è discreto. Ricompaiono in modo naturale i numeri quantici interi. Come interpretare la funzione ψ ? “E' molto naturale riferire la funzione ψ a un processo vibratorio nell'atomo, cui spetta, in grado maggiore che non a loro, la realtà delle orbite elettroniche, oggi più volte messa in dubbio ... Il punto essenziale mi sembra il fatto che nella prescrizione quantistica non interviene più la misteriosa “condizione di numeri interi”, che invece è per così dire riagguantata un passo più avanti: essa ha la sua base nella finitezza e univocità di una certa funzione dello spazio” [56]. Conclude osservando che dall'equazione agli autovalori vengono fuori le frequenze di Bohr: “Le frequenze di emissione perciò appaiono come bassi “toni differenziali” delle vibrazioni proprie che si presentano con frequenza molto più alta. ... E' appena necessario mettere in evidenza quanto sarebbe simpatica la rappresentazione che durante una transizione quantica l'energia passa da una forma di vibrazione all'altra, come nella rappresentazione del salto elettronico. ... Per il resto, nella gioia per il fatto che l'uomo riesce a penetrare tutte queste cose, non si deve dimenticare che la rappresentazione dell'atomo che, quando non sta irraggiando, vibra di volta in volta nella forma di una vibrazione propria, questa rappresentazione, dico io, se deve essere mantenuta ferma, si allontana pur sempre ancora fortemente dal quadro naturale di un sistema in vibrazione” [57].

Nella seconda comunicazione (23 febbraio 1926) Schrödinger affronta l’analogia di Hamilton tra la meccanica e l’ottica [58]. Per l’ottica geometrica vale il principio di minimo di Fermat. Nel caso del moto di una particella vale il principio di Hamilton che minimizza l’azione. Si può trovare una analogia formale tra un fronte d’onda e i punti di azione minima relativi al moto di una particella. La traiettoria di una particella è perpendicolare al fronte d’onda dell’azione. Ma la particella non avanza con la velocità dell’onda che è una velocità di fase. Inoltre la minimizzazione dell’azione riguarda la fase non l’ampiezza dell’onda.

L’A. si rende conto che l’analogia è molto lasca, ma capace di indicare un percorso. “*E così allora nell’analogia non entrano in scena affatto importanti concetti della teoria delle onde, come ampiezza, lunghezza d’onda, frequenza, – o, detto in generale, la forma d’onda – dato che manca loro un parallelo meccanico; della funzione d’onda stessa non si parla affatto, W [azione] ha per le onde solo il significato – alquanto nebuloso, data la mancanza di definizione della forma d’onda – di fase.*” Oltretutto, se W è la fase dell’onda, l’onda cosa rappresenta? Ritiene, però, che bisogna percorrere questa via per giungere ad un chiarimento, perché già, con tutte le sue imperfezioni, essa riserva sorprese. Si può, ad esempio, vedere che la velocità della particella è la velocità di gruppo, infatti la frequenza dell’onda non è costante ma dipende dalla energia cinetica. La particella è allora collocata nel punto di concordanza di fase di molte onde tutte soluzioni della equazione di Hamilton Jacobi.

“*Ciò che ora credo con grande convinzione è quanto segue. L’evento meccanico reale viene appropriatamente compreso o rappresentato mediante i processi ondulatori nello spazio e non mediante il moto dei punti rappresentativi in questo spazio. Lo studio del moto del punto rappresentativo, che costituisce l’oggetto della meccanica classica, è solo un procedimento approssimato e come tale ha esattamente la stessa giustificazione dell’ottica geometrica o dei raggi rispetto ai processi ottici reali [59] [...]*”. Schrödinger giunge alle stesse conclusioni di Heisenberg: occorre rinunciare ai concetti di posizione e traiettoria delle particelle. A differenza di Heisenberg, però, non rinuncia alla possibilità di una visualizzazione spazio – temporale dei fenomeni, unica possibilità che abbiamo di comprensione, “*in quanto non possiamo davvero cambiare le forme del pensiero e ciò che non possiamo capire al loro interno, non possiamo capirlo del tutto.[...] In che modo si deve dunque procedere nello sviluppo ondulatorio della meccanica nei casi in cui esso si dimostra necessario? Si deve partire, invece che dalle equazioni fondamentali della meccanica, da un’equazione d’onda per lo spazio e considerare la varietà dei processi che essa rende possibili*” [60].

Se allora dalle onde dobbiamo partire si sostituisca nella equazione di D’Alembert alla velocità dell’onda l’espressione della velocità di fase del fronte di minima azione. Da essa si deduce la equazione di Schrödinger stazionaria.

Prima di passare alle applicazioni l’A. così conclude questa lunga giustificazione dell’approccio ondulatorio, tentando un confronto col metodo alternativo di Heisenberg: “*A questo punto non vorrei sorvolare in silenzio il fatto che attualmente da parte di Heisenberg, Born, Jordan e alcuni altri eminenti ricercatori è in corso il tentativo di rimuovere la difficoltà quantistica, con la dimostrazione di un così considerevole successo che diventa difficile avere dubbi sul fatto che esso contenga in ogni caso una parte di verità. Come linea di tendenza, il tentativo di Heisenberg è straordinariamente vicino a quello presente e di ciò abbiamo già detto sopra. Nel metodo è così toto genere diverso che non mi è riuscito finora trovare il legame. Nutro la ben precisa speranza che questi due tentativi non si contrastino, ma piuttosto, proprio a causa della straordinaria differenza dei punti di partenza e del metodo, si completeranno a vicenda nel senso che uno aiuterà a procedere dove l’altro fallisce. Il punto di forza del programma di Heisenberg sta nel fatto che si ripromette di dare le intensità di riga, una richiesta da cui finora qui ci siamo tenuti lontani. Il punto di forza del presente tentativo – se mi è concesso esprimere un giudizio – sta nel punto di vista fisico conduttore che getta un ponte tra l’evento meccanico macroscopico e quello microscopico e che rende comprensibile i modi di trattazione per altro diversi che essi richiedono. Personalmente trovo un fascino particolare nell’idea, menzionata alla fine della precedente comunicazione, che le frequenze emesse siano “battimenti”, per cui io credo anche che permetterà una comprensione intuitiva delle formule di intensità*” [61].

L’equazione delle onde data nella seconda comunicazione è in realtà un’equazione vibratoria. Occorre rimuovere il vincolo della stazionarietà e quello della costanza di E . E’ quello che fa l’A., nella IV comunica-

zione del 21 giugno 1926, dove per la prima volta viene proposta la sostituzione $E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$. Finalmente

Schrödinger. si pone il problema del significato fisico dello scalare di campo ψ . “ $\psi\bar{\psi}$ è una specie di funzione di peso nello spazio delle configurazioni del sistema” [62]. Non ci allontaniamo così sempre più dalla realtà fisica? Sì, ma rimane la realtà di una funzione che regola le fluttuazioni della densità reale di carica, se di elettrone in moto stiamo parlando. E il suo essere onda complessa? “Se fosse inevitabile in linea di principio e non una pura facilitazione di conto, vorrebbe dire che esisterebbero in linea di principio due funzioni d’onda che solo insieme spiegano lo stato del sistema”.

Così Schrödinger non attraversa il confine verso una interpretazione statistica della funzione d’onda, pur essendo giunto molto vicino.

Leggendo le memorie del 1926 si comprende chiaramente come la via di ricerca scelta da Schrödinger sia motivata da una convinzione filosofica su cosa debba significare comprendere in fisica e, in fondo, su come debba comportarsi la natura. Ancora in una conferenza del 1958 [63] E.Schrödinger contesta la pretesa del punto di vista di Copenaghen di ridurre il senso di una teoria alla pura prevedibilità statistica, attribuendo un ruolo forte al soggetto osservatore. “La mia idea è che allo stadio presente, e finché il vettore di stato rimane immutato nel suo significato, dobbiamo tener presente che esso descrive “il mondo reale nello spazio e nel tempo” e non può essere sublimato in una funzione probabilistica nell’intento di far previsioni”[64].

Accenno qui al fatto che è possibile presentare un altro diverso approccio alla spiegazione del duplice comportamento corpuscolare ed ondulatorio della materia, quello di R.Feynman, questa volta motivato più dal desiderio ricomprendere e di rifare sempre tutto daccapo che dalla filosofia. Giocare in modo “irriverente” con idee paradossali per comprendere lo strano comportamento quantistico da un nuovo punto di vista sembra, in R.Feynman, quasi un progetto di ricerca [65].

Un altro caso di influenza della cultura sulla ricerca è rappresentato dalla convinzione di W.Pauli di avere sempre pensato i concetti fisici sulla base di archetipi di tipo psichico facenti parte dell’inconscio collettivo. W.Pauli in *Psiche e natura* si augura l’avvento di una descrizione unitaria della natura che comprenda anche la *psiche* e che metta in luce il *fondamento archetipico dei concetti* che, di fatto, si usano nella fisica attuale. Il punto di vista definitivo deve far intravedere nella produzione della *Hintergrundphysik* [retroterra], tramite l’inconscio dell’uomo moderno, una linea di sviluppo verso una futura descrizione della natura che comprenda unitariamente *physis* e *psiche*, e che oggi sperimentiamo solo in una fase prescientifica. Per raggiungere una tale descrizione unitaria della natura sembra necessario in primo luogo *risalire al retroterra archetipico dei concetti scientifici*. Su questo rimando ai riferimenti bibliografici in nota [66].

References and notes

- [1] G.Holton individua otto aspetti di un evento che riguardi la storia della scienza: la comprensione del contenuto scientifico dell’evento; lo stato della conoscenza scientifica comune in un dato periodo; l’aspetto personale dell’attività dello scienziato; la traiettoria temporale privata; lo sviluppo psicobiografico: relazione tra stile di vita privata e opera scientifica; lo studio dell’ambiente sociale; lo sviluppo culturale esterno alla scienza; l’analisi logica del lavoro studiato. G.Holton, «Thematic Analysis in Science», in *L’immaginazione scientifica*, Einaudi, Torino, 1983. In questo articolo ho voluto, in particolare, esplorare l’influenza della “filosofia personale” (vedi nota seguente) sui programmi di ricerca del singolo scienziato.
- [2] Sul concetto di “filosofia personale” vedi G.Boniolo, *Metodo e rappresentazione del mondo. Per un’altra filosofia della scienza*, Bruno Mondadori, 1999, Milano. “Definisco come *Filosofia Personale* di un dato uomo quell’ampio e strutturato insieme di valori e di credenze metafisiche, epistemologiche, religiose, politiche, estetiche, etiche ecc., che egli possiede e che nel possedere lo caratterizza in maniera unica e informa in maniera unica il modo con cui egli interagisce con il mondo, con la vita e con gli altri uomini.” (ivi, pp72-73).

- [3] E' nota l'affermazione di R.Carnap sui metafisici come “musicisti senza talento musicale”. R.Carnap, *Il superamento della metafisica mediante l'analisi logica del linguaggio* (1932), in *Il Neoempirismo*, a cura di A.Pasquinelli, UTET
- [4] Superare tale dicotomia e mostrare che non vi sono fatti senza valori è diventato per H.Putnam una personale battaglia culturale negli ultimi trent'anni. In quasi tutte le sue opere recenti viene affrontata tale questione. Vedi ad esempio H.Putnam, *Fatto/Valore. Fine di una dicotomia*, Fazi Editore, Roma, 2004, trad. G.Pellegrino
- [5] A.J.Ayer, *Language, Truth and Logic*, prefazione alla prima edizione. In tale libro Ayer fornì, nel 1935, una chiara esposizione delle posizioni neoempiriste. In questo il movimento neoempirista si rifaceva anche al Wittgenstein del *Tractatus Logico-Philosophicus*, proposizioni 4.0031, 4.112, 6.53. Wittgenstein non volle mai partecipare alle riunioni del Circolo di Vienna, di cui non condivideva lo spirito (vedi R.Monk, Wittgenstein, Bompiani, Milano, 1991, trad. P.Arlorio).
- [6] H.Putnam, *L'ardente desiderio di oggettività* in AAVV (a cura di R.Egidi), *La svolta relativistica nell'epistemologia contemporanea*, Franco Angeli, Milano, 1988.
- [7] Vedi H.Putnam, *Ragione, verità e storia*, il Saggiatore, Milano 1985, p.5-6.
- [8] Circa la possibilità di conciliare atti liberi e chiusura causale della descrizione fisica vedi M.Pauri, *La descrizione fisica del mondo e il divenire temporale* in AAVV (a cura di G.Boniolo), *Filosofia della fisica*, Bruno Mondadori, Milano, 1997
- [9] L.Wittgenstein, *Tractatus*, cit., proposizione 6.52
- [10] Sul cambiamento di paradigma circa la NOS vedi M.Cini, *Un paradiso perduto. Dall'universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Feltrinelli, Milano, 1994.
- [11] ad es.P.Feyerabend, per il quale “tutto va bene” o R.Rorty , per il quale basta che non si usi la forza e si sia capaci di fare previsioni, per parlare di scienza. Vedi R.Rorty, *La scienza della natura è un genere naturale?*, in Egidi, cit.
- [12] Vedi le posizioni fiscaliste, impropriamente chiamate “realismo metafisico”.
- [13] Può essere utile un riferimento alla *adaequatio* medioevale, molto diversa dalla corrispondenza moderna tra proposizioni e fatti.
- [14] *Storia della filosofia della scienza*, Il Saggiatore, Milano, 2002, trad. L.Sosio.
- [15] I. Newton, *Scritti di Ottica*, a cura di A. Pala, UTET, Torino 1978, p.603-4. Sull'uso ambiguo di termini come “analisi” e “sintesi” nel Seicento vedi M.Mamiani, *Storia della scienza moderna*, Laterza, Roma-Bari, 2002, cap. X,15. Icasticamente così conclude M.mamiani.: “Tutti si convincono che la scienza dei moderni ha finalmente un metodo, che deve conservare: quello analitico. Peccato che nessuno sappia cosa sia”. Anche a parere di D.Oldroyd la terminologia di Newton è ambigua perché mette assieme tradizioni diverse nell'uso dei termini analisi e sintesi. Però, secondo Oldroyd, Newton usa la parola analisi come la userebbe un chimico: si tratta di analizzare un fenomeno naturale risolvendolo negli ingredienti (forze, cause, principi) da cui dipende e utilizzare poi tali principi per dedurre, mediante la sintesi, altri fenomeni.
- [16] I.Newton, *Principi matematici*, a cura di A. Pala, UTET, Torino 1965, p.57
- [17] Sulle vicende del metodo assiomatico v. G.Lolli, *Da Euclide a Gödel*, il Mulino, Bologna, 2004.
- [18] A.Rebaglia riprende la metafora di Oldroyd e ne commenta la dissoluzione attraverso brani antologici da P.Duhem a H.Putnam. A.Rebaglia, *Scienza verità*, Paravia, Torino, 1997.
- [19] E' il titolo del volume di H.I.Brown, *La nuova filosofia della scienza*, Laterza, Roma-bari, 1984, trad.E.Prodi.

- [20] Anche se i *paradigmi* di Kuhn o i *programmi di ricerca* di Lakatos vorrebbero essere un modo di guardare a tutte le fasi della storia della scienza, di fatto, finiscono per essere modi di suggerire alla storia come comportarsi!
- [21] Per un dibattito tra i protagonisti più influenti della contesa sulla natura del metodo scientifico agli inizi degli anni 70 vedi P.Feyerabend, T.Kuhn, I.Lakatos, M:masterman, K.Popepr, S.Toulmin, J.Watkins, L.Pearce Williams, *Critica e crescita della conoscenza*, Feltrinelli, Milano, 1976, trad. G.Giorello; vedi anche G.Boniolo, Vidali, *Filosofia della scienza*, Bruno Mondadori, cap.9.
- [22] Scrive Quine: "*Come empirista, io continuo a pensare che gli schemi concettuali della scienza non siano che uno strumento, in ultima analisi, per prevedere l'esperienza futura alla luce dell'esperienza passata. Gli oggetti fisici sono introdotti concettualmente nella situazione come intermediari convenienti: non per definizione in termini di esperienza, ma semplicemente come assunti irriducibili, paragonabili epistemologicamente agli dei di Omero*" W.V.O., *Due dogmi dell'empirismo*, in *Neoempirismo*, a cura di A.Pasquinelli, Utet, Torino, 1969, p.888
- [23] Ivi, p.886
- [24] D.Davidson ha proposto di superare la distinzione tra fatti empirici e schemi concettuali considerata come "terzo dogma dell'empirismo": vi sono solo le teorie e i linguaggi, gli unici fatti a disposizione sono fatti linguistici. v.D.Davidson, *On the very idea of a conceptual scheme*", proc. of the American Philosophical Association, 47, 1974.
- [25] "Giungiamo qui al punto decisivo della teoria della conoscenza. In tutto il libro mi sono impegnato insistentemente in uno sforzo unico. Ho cercato di dimostrare che in ogni atto di conoscenza è presente un contributo tacito e appassionato della persona che conosce ciò che è conosciuto, e che questo coefficiente non è un'imperfezione, ma è una componente necessaria di tutta la conoscenza. Tutto quello che ho cercato di provare diventa una dimostrazione della completa infondatezza di ogni pretesa conoscenza, se non sosteniamo con tutto il nostro animo le nostre convinzioni, anche quando sappiamo che possiamo ritirare il nostro assenso da esse". M.Polanyi, *La conoscenza personale*, Rusconi, 1990, Milano, trad.E.Riverso, p.490.
- [26] "Caro Imre [Lakatos], ...oggi a lezione ho difeso la posizione della Chiesa in favore di legge e ordine contro l'anarchico Galileo e ho convinto tutti che Galileo era un bastardo mentre Bellarmino era accorto, scientifico, umanitario. Alcuni sembravano abbastanza irritati... Paul [Feyerabend]" senza data (1972?) in I.Lakatos, P.K.Feyerabend, *Sull'orlo della scienza*, Raffaello Cortina Editore, 1995, Milano. Notiamo, però, per Feyerabend, dare del "bastardo" era un complimento.
- [27] Potremmo dire col secondo Wittgenstein che il metodo è *inafferrabile*, pur all'interno di "somiglianze di famiglia".
- [28] Anche G.Boniolo ha proposto la "phronesis" aristotelica come paradigma della razionalità scientifica. V. Boniolo, *Metodo rappresentazione del mondo*, cit.
- [29] Brown, cit., p.176.
- [30] Ivi, p.177. Il riferimento dell'A. è al capitolo VI dell'Etica Nicomachea. Aristotele distingue tra ragione (apodittica) e ragionevolezza (solo probabile, cioè *approvabile*). L'una fa uso della dimostrazione, l'altra dell'argomentazione. L'una parte da premesse certe, l'altra da premesse condivisibili. L'una è universale per principio, l'altra deve costruire il consenso faticosamente, attraverso la retorica. La crisi della ragione può diventare un rafforzamento della ragionevolezza. vedi M.Pera, *Scienza e retorica*, Laterza, Roma-Bari 1992; Boniolo, G., Vidali, P., *Introduzione alla filosofia della scienza*, B.Mondadori, Milano 2003.
- [31] La conoscenza scientifica, Per H.I.Brown, è ciò che una comunità scientifica, determinata storicamente, ritiene certo in un determinato periodo storico. Occorre, così, distinguere tra "verità₂" che è il contenuto (fallibile) della conoscenza scientifica in un determinato periodo e il concetto tradizionale di ve-

rità (verità₁). Questo autore propone di considerare primario il concetto di conoscenza scientifica e definire come verità il contenuto condiviso di conoscenza scientifica. Non condivido questa mossa perché il concetto di verità non può essere ridotto ai contenuti di conoscenza che una comunità condivide. Oltre tutto è proprio in nome della verità (verità₁) che posso decidere, ragionevolmente, di non condividere le convinzioni della comunità di appartenenza.

- [32] Considerazioni più estese su una concezione diversa della verità e del realismo si trovano in A. Briguglia, *Il mondo perduto e ritrovato*, in “Per la filosofia. Filosofia e insegnamento”, ed. Massimo, anno XI, n.32, sett.-dic. 1994.
- [33] E. Schrödinger, *L'immagine del mondo*, Bollati Boringhieri, 1987, Torino, trad. A. Verson, p.39.
- [34] E', credo, inutile sottolineare come venire a contatto con la storia della scienza può aiutare il docente a far sì che l'insegnamento della propria disciplina contribuisca al raggiungimento degli obiettivi formativi che la scuola si propone. Sulla formazione degli insegnanti l'epistemologia e la storia della scienza rimando a A.M. Briguglia, F.F.G. Calabrese and R.M. Sperandio-Mineo, *Developing Epistemologically Empowered Teachers: an Approach to Pre-Service Physics Teacher Education Focusing on History and Philosophy of Science*, In: *Teacher Education: Policy, Practice and Research* ISBN: 978-1-60692-506-5, Editors: Anthony Selkirk and Maria Tichenor, © 2009 Nova Science Publishers, Inc.
- [35] Sulla questione della visualizzabilità e delle rispettive filosofie di tutti i partecipanti al grande dibattito su cosa debba intendersi per teoria scientifica e comprensione della realtà vedi G.C. Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio. Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo*, il Saggiatore, Milano, 1997, cap. 5 e 6.
- [36] Vedi per un approfondimento S. Petruccioli, *Atomi metafore paradossi. Niels Bohr e la costruzione di una nuova fisica*, Theoria, Napoli, 1988.
- [37] Sulle premesse al lavoro di Heisenberg vedi A. Pais, *Un danese tranquillo. Niels Bohr un fisico e il suo tempo 1885-1962*, Bollati Boringhieri, Torino, 1993, trad. D. Canaruto, cap. 13 a,b.
- [38] Circa l'importanza del linguaggio nella proposta di un “principio di complementarità” vedi il capitolo «*Siamo sospesi nel linguaggio*» in Pais, cit. “Filosofare faceva parte della natura di Bohr”. A chi gli chiedeva quanto significative fossero per lui le considerazioni filosofiche giovanili rispose, poco prima della sua morte: «In un certo, senso era la mia vita», ivi p.422.
- [39] Amichevoli furono, però, le gentilezze che Schrödinger e Heisenberg si scambiarono durante una visita di Schrödinger a Bohr.
- [40] W. Heisenberg, *Reinterpretazione quantistica delle relazioni cinematiche e meccaniche*, Zeitschrift für Physik, 18 settembre 1925, commentato e tradotto da F. La Teana in Quaderno n.8, *Memorie storiche di fisica*, del Bollettino dell'AIF, ottobre-dicembre 1998. L'illuminazione decisiva la ebbe nell'isola rocciosa di Helgoland nel Mare del Nord, luogo senza vegetazione, nel quale si era rifugiato in seguito ad un attacco di febbre da fieno.
- [41] “*Il contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica*”, pubblicato in Zeitschrift für Physik il 23 marzo 1927, riportato in S. Boffi, *Il principio di indeterminazione*, Università degli Studi di Padova, Quaderni di Fisica teorica, reperibile all'indirizzo <http://www2.pv.infn.it/~boffi/quaderni.html>.
- [42] ivi, p.46.
- [43] W. Heisenberg, *Fisica e oltre. Incontro con i protagonisti 1920-1965*, Bollati Boringhieri, Torino, 1999, trad. Marco e Dida Poggi.
- [44] N.R. Hanson, *I modelli della scoperta scientifica*, Feltrinelli, Milano, 1978, tr.it. L. Sosio.
- [45] Ivi p.76.

- [46] S.Boffi, *Onde di materia e onde di probabilità*, Università degli Studi di Pavia, 1989 reperibile all'indirizzo <http://www2.pv.infn.it/~boffi/quaderni.html>
- [47] Ivi p.10
- [48] Ivi p.13
- [49] E.Schrödinger, *La mia visione del mondo*, Garzanti, Milano, 1987, p.19
- [50] S.Boffi, *La meccanica delle onde*, Università degli Studi di Pavia, Quaderni di Fisica Teorica, nota 27, reperibile all'indirizzo <http://www2.pv.infn.it/~boffi/quaderni.html>
- [51] La solitudine di Helgoland aveva ispirato il giovane Heisenberg. Sembra, a detta del suo biografo, che ad ispirarlo il più anziano Schrödinger non siano state le rocce delle Alpi ad Arosa, dove si era recato per le vacanze natalizie, ma un'amante misteriosa che aveva chiamato a sé (vedi Walter Moore, *Schrödinger. Life and thought*, Cambridge University Press, 1989).
- [52] Dieci giorni prima la stessa rivista aveva ricevuto da W:Pauli un articolo nel quale la nuova meccanica di Heisenberg veniva impiegata per ricavare la formula di Balmer.
- [53] Boffi, *La meccanica delle onde*, cit. , p.25.
- [54] Schrödinger, nelle note autobiografiche in occasione della pubblicazione del suo discorso Nobel del 1933, ricorda che tutto quello che gli occorreva circa i problemi agli autovalori della fisica del continuo, gli erano stati presentati nel dettaglio all'Università di Vienna, dove si era iscritto nel 1906, da Friedrich Hasenöhrl, successore di Boltzmann. Vedi Boffi, *La meccanica delle onde*, cit., p.10, nota 3.
- [55] Pais, cit., p.298.
- [56] Boffi, *La meccanica delle onde*, cit., pp.39-40.
- [57] Ivi pp.41-42
- [58] in considerazione nella edizione del trattato di H.Goldstein, *Meccanica classica*, Zanichelli, Bologna, 2001, ma non nella successiva edizione del 2004, ampliata a cura di Charles Poole e John Safko.
- [59] Ivi pp.60-61
- [60] Ivi pp.63-64. Vedi anche la sua *Nobel lecture*.
- [61] Ivi p.67-68
- [62] Ivi, p.92
- [63] *Potrebbe l'energia essere un concetto puramente statistico?* Conferenza tenuta in una riunione congiunta della Società di fisica e della Società di chimica-fisica, a Vienna il 26 marzo 1958. E.Schrödinger morirà il 4 gennaio 1961, fedelmente assistito dalla moglie, più volte tradita, Annamarie Bertel.
- [64] E.Schrödinger, *L'immagine del mondo*, Bollati Boringhieri, Torino, 2001, trad. A.Verson, p.378
- [65] R.Feynman, *Nobel Lecture*, The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics, 11 dicembre 1965, reperibile all'indirizzo http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html. E' commovente leggere la rievocazione di R.Feynman dei momenti di educazione ad osservare, scoprire, pensare vissuti col padre (in R.Feynman, *Il piacere di scoprire*, Adelphi, Milano, 2002, trad. Maria grazia Gilberti). "Mi insegnava a fare attenzione alle cose... Ecco, è così che mi ha insegnato mio padre, con esempi e discussioni: niente forzature, solo conversazioni divertenti e interessanti", p.24. Vedi anche Elena e Leandro Castellani, *Feynman. La vita di un fisico irriverente*, I grandi della scienza, Le Scienze, anno VI, n.35, novembre 2003
- [66] W.Pauli, *Psiche e natura*, Adelphi, Milano, 2006, trad. M.Bruno e L.Benzi (la citazione precedente è a p.39); A.I.Miller, *L'equazione dell'anima*, Rizzoli, Milano, 2009, trad.C.Capararo e S.Galli;

“Quaderni di Ricerca in Didattica (Science)”, n. 3, 2012
G.R.I.M. (Department of Mathematics, University of Palermo, Italy)

S.Tagliagambe, A.Malinconico, *Pauli e Jung. Un confronto su materia e psiche*, Raffaello Cortina, Milano, 2011.