



*Something is rotten
in the state of Denmark*¹
Søren Kierkegaard, Niels Bohr
e la nascita della fisica quantistica

di Enrico Giannetto

NIELS BOHR, KIERKEGAARD E LA FISICA QUANTISTICA

Niels Bohr (1885-1962), come è noto, svolse un ruolo fondamentale e unico all'interno della comunità scientifica per l'edificazione, l'interpretazione e l'accettazione della meccanica quantistica (Pais; Jammer). La sua interpretazione della meccanica quantistica è stata *tout court* identificata come "l'interpretazione di Copenhagen", nonostante le differenti posizioni degli afferenti alla 'scuola di Copenhagen', e come unica "ortodossa", rispetto alla quale le altre sono state considerate "eresie".

I suoi contributi più espliciti sono legati alla cosiddetta "antica teoria dei quanti", in particolare al modello dell'atomo e al "principio di corrispondenza", e poi al "principio di complementarità" come chiave interpretativa del teorema d'indeterminazione di Heisenberg del 1927: lo statuto epistemologico di questi principi di Bohr è ancora oggi oggetto di discussione e di controversie in relazione al fatto che siano da considerarsi principi fisici con un loro ruolo all'interno della stessa formalizzazione della meccanica quantistica, oppure principi metodologici o epistemologici che hanno svolto un certo ruolo storico nella costruzione e nello

¹ Queste parole famose sono dette da Marcello (atto I, scena 4, 90) nell'*Hamlet* (Shakespeare 20).



sviluppo della teoria, o che ancora oggi costituiscono quantomeno la base della sua interpretazione (Petruccioli).²

Così, Bohr è considerato di volta in volta il più grande fisico dell'epoca o invece una sorta di 'guida filosofica' dei fisici allora impegnati nelle varie problematiche della costruzione della meccanica quantistica.

Il rapporto di Bohr con la tradizione filosofica è stato analizzato sotto molti punti di vista, ma, a mio avviso, mai in profondità:³ probabilmente non si è osato rendere esplicite e rivelare le fonti del suo pensiero, che neanche lui stesso ha mai chiarito completamente. Catherine Chevalley ha delineato la prospettiva di Bohr come un superamento del kantismo (Chevalley; Gembillo, Fayrholdt; Petruccioli), ma senza poterne spiegare l'origine. E ancora, Plotnitsky aveva considerato 'rivoluzionaria' l'opera di Bohr, istituendo parallelismi puramente teoretici con filosofi come Nietzsche, Bataille e Derrida (Plotnitsky).⁴ Ma, per comprendere Bohr, bisogna contestualizzare storicamente e geograficamente la sua filosofia, studiandone le connessioni con la filosofia di Søren Kierkegaard (1813-1855), nonostante i pochi riferimenti diretti o gli altrettanto limitati riferimenti al kierkegaardiano Harald Høffding (1843-1931) (*Bohr Works Index* 89-90, 98). Ed è l'indagine di questo rapporto che ci può far comprendere quale idea di teoria fisica avesse maturato Bohr per la fisica quantistica, il superamento del kantismo ma anche dello hegelismo, e la nuova visione della realtà fisica.

La fisica atomica esplorava un campo di processi fisici di cui non vi era alcuna possibile intuizione diretta o esperienza diretta: da questo punto di vista, la fisica atomica non ricadeva più nell'ambito in cui era possibile kantianamente fondare una conoscenza oggettiva, trascendentalmente fondata come descritto nella *Critica della Ragione pura*, attraverso lo schematismo che permetteva l'applicazione delle categorie alle intuizioni pure o empiriche. Laddove non è possibile alcuna intuizione o esperienza diretta si ricadeva, invece, fa notare Chevalley, in quanto trattato da Kant nella *Critica del Giudizio*, a proposito della teologia e dell'arte o della scienza dei viventi, per le quali è possibile solo una presentazione indiretta dei concetti nell'intuizione attraverso l'analogia o il simbolismo, ovvero attraverso analogie simboliche.

Kant stesso, comunque, aveva notato che finché i caratteri specifici della natura rimangono accertabili solo empiricamente, non possono ricadere all'interno di una scienza trascendentalmente fondata, e, negli scritti che oggi sono conosciuti come *Opus postumum*, aveva elaborato una sorta di 'schematismo del giudizio' basato sul principio dell'unità dell'esperienza, in cui, per esempio, l'etere compariva come condizione trascendentale della possibilità dell'esperienza, ovvero come l'unità dell'esperienza sotto il suo aspetto materiale, ovvero come una sorta di 'trascendentale materiale - oggettivo'. In qualche modo, ciò che nella *Dialettica trascendentale* corrispondeva alle idee (anima, mondo, Dio), frutto della pretesa

² Sull'effettivo significato di tali principi è di grande rilievo la prospettiva di Wolfgang Pauli che interpreta Bohr anche attraverso Jung (Giannetto Pauli).

³ Non si può qua dare conto della sterminata bibliografia, che ho comunque analizzato.

⁴ In questo libro di Plotnitsky, il punto di vista di Bohr è considerato, da un punto di vista dei possibili sviluppi teoretico-filosofici, quale rivoluzionario ed 'anti-epistemologico'.



illusoria di poter estendere l'uso dei concetti a priori al di là dei limiti dell'intuizione e dell'esperienza, era stato alla fine accettato da Kant come fondamento (l'idea di etere) delle leggi particolari delle scienze fisiche.

Nel caso della fisica quantistica, però, neanche questo schematismo del giudizio risultava possibile: la dualità mutuamente esclusiva dei fenomeni rivelati dagli esperimenti microfisici (in relazione ad una non-separabilità fra particolare soggettività fisica strumentale – sperimentale e particolare oggetto), che sottostà al principio di complementarità (Bohr *Postulate*; Bohr *Foundations*), come quello che correla come mutuamente esclusivi inquadramento spazio-temporale e descrizione causale, non permetteva neanche l'applicazione di un tale principio d'unità dell'esperienza.

In questa prospettiva, lo statuto epistemologico della fisica quantistica dovrebbe essere cambiato radicalmente e passare da quello di una scienza oggettiva, trascendentalmente fondata, delle leggi generali della natura a quello di una conoscenza critica (ma non "scienza") come quella dell'arte o della psicologia o della cosmologia o della teologia, come quella delle leggi particolari o empiriche basate solo sulla necessità universalmente "soggettiva" di concepire la natura secondo un'unità. Così, Bohr avrebbe invero usato il 'principio di corrispondenza' (1913-1918, 1927) (Bohr *Correspondence*) per costruire formalmente in termini matematici le analogie simboliche che permettevano di passare dalla fisica classica alla fisica quantistica.

Vi è stato negli anni recenti un grande dibattito, quasi del tutto svincolato dalle questioni kantiane, sul ruolo dell'analogia e della metafora sia nella cultura umanistica sia in quella scientifica (Giannetto *Analogia*).⁵ Posizioni estreme ne hanno negato completamente ogni funzione all'interno delle teorie scientifiche, relegandole nell'ambito della retorica e dell'estetica letteraria; o, al contrario, attribuiscono ad esse la modalità di "categorie" fondamentali del pensiero e della conoscenza. Paradigmi recenti delle prime si collocano nella scia di una corrente di pensiero che parte dal primo Wittgenstein, e le considera come una sorta di "malattia" del linguaggio. Oppure, con opposizione più sfumata, si assegna loro un valore puramente "euristico", importante solo in quello che, con Hans Reichenbach, è stato chiamato "contesto della scoperta", concepito quale rigidamente separato dal "contesto della giustificazione". Rilevante *exemplum* delle altre è dato dai programmi di ricerca che si propongono di modellare su esse lo sviluppo dell'intelligenza artificiale. D'altra parte, il libero gioco sui concetti, presente nel processo d'invenzione e di "scoperta", ed effettuato attraverso analogie e metafore, è stato assimilato fino alle suggestioni di un'anarchia metodologica, e inoltre si è rilevata la valenza ermeneutica, critica, de-costruttiva della metafora nei confronti del fondazionalismo epistemologico e della legittimazione del discorso scientifico. Ancora, si è tentato di formalizzare analogie e metafore, in termini, ad esempio, di teoria dei modelli, teoria delle catastrofi, teoria dell'abduzione, in modo tale da assegnare loro un ruolo strutturale anche all'interno dello stadio sistematizzato delle teorie scientifiche, tanto da renderne pensabile una possibile computerizzazione.

⁵ Per le riflessioni sulla metafora, ci si permetta di rimandare alle argomentazioni e alla bibliografia ivi contenute.



Se le analogie risultano così effettivamente i meccanismi iconici fondamentali della spiegazione scientifica, che individuano le proprietà invarianti delle strutture di questa, le metafore ne caratterizzano le de-formazioni, le ri-organizzazioni, le nuove creazioni. Non solo: è proprio la scrittura matematica a rappresentare una forma evoluta di un simbolismo e di un pensiero per immagini, pluridimensionale, arcaici, poi soppiantati quasi interamente da una scrittura alfabetico -fonetica lineare legata al linguaggio ordinario. Le metafore, a partire da concetti e termini dati nel linguaggio ordinario e nella corrispondente scrittura fonetica lineare, sono quindi tentativi meta-linguistici di superare i limiti del linguaggio per accedere di nuovo a un pensiero simbolico pluridimensionale, non lineare, per immagini. Laddove non c'è effettiva visibilità fisica come nel caso atomico o microscopico, a livello linguistico sono necessarie delle metafore de-costruttive dei concetti, che ne indichino i limiti; a livello matematico cade la possibilità di una rappresentazione geometrica ordinaria e sono necessari dei simbolismi matematici di un'immaginazione non figurativa ('astratta') che superi i limiti del visibile ordinario (per esempio, le matrici, che poi userà Heisenberg con Born e Jordan per rappresentare la variabilità discontinua delle grandezze fisiche, non sono traducibili in linee o curve geometriche). È necessaria quindi un'ermeneutica metaforica o fisico - matematica simbolica non-figurativa.

Ma è a prescindere "quanto più è possibile" da qualsiasi presupposizione epistemica, ovvero secondo una metodo-logica storiografica "libera", che si deve riconoscere dall'analisi diretta dei testi di Bohr, la loro rilevanza.

Questa ricostruzione della prospettiva di Bohr attraverso il confronto con il kantismo è al più una ricostruzione razionale dell'evoluzione della fisica occidentale che considera centrale la posizione di Kant per comprendere le altre.

Tuttavia, Bohr partì da presupposti che già erano oltre il kantismo e che non lo consideravano più come un riferimento obbligato da seguire o da criticare. Bohr si basa sulla filosofia di Kierkegaard (mediata anche da Harald Høffding, amico del padre) (Faye *Harald*; Faye *Bohr*; Faye & Folse; Rodhes; Angeloni; Moreira; Darrigol et al.), che aveva già sostituito l'astratto soggetto kantiano della conoscenza scientifica, trascendentale, ideale e universale con le sue categorie intellettuali e le sue forme a priori della sensibilità, con un soggetto concretamente esistente, immerso completamente nella singolarità della sua pura esperienza. Kierkegaard era tornato alla critica di Hume, da cui era partito Kant ma da cui poi si era distaccato. Bohr aveva declinato il soggetto concretamente esistente di Kierkegaard in una soggettività fisica costituita da una molteplicità di strumenti scientifici che vanno sempre al di là dell'esperienza umana e della sua possibile intuizione diretta della realtà fisica visibile: è chiaro così che il soggetto della fisica sperimentale, di esperimenti che superano i limiti dell'esperienza umana, come per esempio nella realtà accessibile con il microscopio e con il telescopio, non può essere soggetto della conoscenza scientifica kantiana, ma soggetto di ciò che per Kant ricadeva nell'arte (la tecnica sperimentale caratterizza la fisica moderna come forma d'arte). Così, la realtà fisica non può che esprimersi in simboli, nel simbolismo matematico e non nel linguaggio naturale ordinario.



Ma c'è di più: l'esperienza fondamentale del soggetto concretamente esistente è quella di una fede in cui Kierkegaard riacquisisce, in modo anti-metafisico, gli esiti del volontarismo teologico di Martin Luther e, con questa mediazione, del francescanesimo; l'esperienza della fede è quella della assoluta finitezza umana, che evidenzia i limiti della ragione e dell'esperienza umane e che fa risalire Kierkegaard a quanto evidenziato da Hume e alla fine tradito da Kant. L'imperscrutabilità della volontà di Dio non implica soltanto l'inconoscibilità a priori, da parte della sola ragione pura, della Natura creata, ma anche l'assoluta contingenza della creazione in ogni sua parte e in ogni suo aspetto: non è possibile stabilire alcuna necessità del divenire naturale, cioè alcun determinismo o alcuna causalità fra gli eventi.

Kierkegaard sviluppa così una radicale filosofia della Natura, che segue dall'assoluta finitezza umana: l'esperienza esistenziale cristiana non fonda una metafisica, ma rivela la struttura dell'esistenza umana. Così, la sua filosofia della Natura non ha una connotazione specificamente teologico-metafisica teistica, ma è quella che si può delineare dopo aver eliminato ogni presupposto teologico-metafisico e quindi accettabile anche da un ateo come Bohr.

Come già detto trattando di Kierkegaard, l'esperienza non solo non è sufficiente per delineare alcunché di necessario, ma è tale da dover escludere la necessità: tutto accade in quanto possibilità (Kierkegaard *Briciole* 689-711).

La prospettiva di Kierkegaard supera così anche la concretizzazione storica della conoscenza umana di Hegel: il reale non è razionalizzabile in alcun modo, nella misura in cui la razionalizzazione consiste nella rappresentazioni di connessioni necessarie, cioè nella misura in cui una presunta necessità logica è proiettata sulla realtà presentandosi come necessità naturale, fisica e cosmologica, necessità del fato o causale o deterministica o legge fisico-matematica causale o deterministica, o, al contrario, opposta necessità del caso. Il divenire è sempre un annientamento parziale delle possibilità soppiantate dalla realtà: il passato non è necessario neanche dopo essere accaduto, altrimenti necessario sarebbe anche il futuro; il necessario, proprio dell'essere immutabile, non include il possibile del divenire, come erroneamente pensava Aristotele, ma ne è l'opposto. Il passato resta sempre possibile e quindi la sua stessa realtà è la realtà di una possibilità (per questo Dio può cambiare anche il passato, come per la teologia di Pier Damiani).

Come regno del possibile, il divenire non ammette causalità: Kierkegaard segue e va oltre Hume. Il divenire è conoscibile nel suo darsi immediato alla percezione, ma il divenire non è conoscibile: il cambiamento non è conoscibile. Non c'è una scienza del divenire della Natura: nessuna logica dialettica hegeliana può stabilirsi, ma neanche una scienza della Natura basabile sulla continuità e sulla causalità che non sono tracciabili.

Così, quando Bohr affronterà il problema della struttura atomica (Bohr *Constitution*; Bohr *Atomic*; Aaserud & Heilbron), costruisce, di fronte alle evidenze di impossibilità sperimentali, un modello matematico che si basa sulla violazione delle leggi della meccanica classica che prevedevano la possibilità di tutte le traiettorie per gli elettroni, e sulla violazione delle leggi dell'elettromagnetismo classico che prevedevano che ogni elettrone accelerato, in quanto carica elettrica, emettesse



radiazione elettromagnetica. Nel modello d'atomo di Bohr è una sorta di "complementarità" fra elettromagnetismo e meccanica che si viene ad evidenziare, d'indeterminazione fra variabili elettromagnetiche e meccaniche: se si dà una descrizione meccanica del moto dell'elettrone, non si possono applicare le leggi elettromagnetiche dell'irradiare di una carica accelerata; e se si dà una descrizione elettromagnetica dei processi d'assorbimento ed emissione di radiazione di quanti di luce da parte dell'elettrone, non si può descrivere meccanicamente il moto dell'elettrone in termini continui, ma solo con la discontinuità di salti da uno stato stazionario d'energia ad un altro.

In questo modello planetario dell'atomo, gli elettroni potevano ruotare intorno al nucleo atomico solo in orbite particolari dal momento angolare quantizzato, che costituivano degli stati stazionari: è possibile descrivere l'elettrone solo negli stati stazionari dell'atomo, e mai nelle transizioni da uno stato all'altro, che non sono descrivibili tramite funzioni matematiche continue o connessioni causali prevedibili e si configurano come i salti di Kierkegaard fra i vari stati d'esistenza o sfere d'esistenza. Bohr ha dichiarato di leggere le opere di Kierkegaard giorno e notte (Rud Nielsen), e aveva certamente letto il testo *Stadier paa Livets Vej (Stadi sul Cammino della Vita)* (Kierkegaard *Stadi*), che apprezzava molto e aveva regalato al fratello Harald (Bohr Early 499-503). In una rappresentazione, forse a disposizione di Bohr attraverso Høffding, legata all'idea di sfere d'esistenza, si vedono i tre stadi come corone sferiche in sezione, come gusci di sfere concentriche: il modello d'atomo di Bohr!⁶

Bohr ha ripreso da Kierkegaard una struttura che deriva dai tre stadi della vita: l'elettrone libero corrisponde allo stadio della vita religiosa, della libertà vera; l'elettrone nello stato fondamentale corrisponde allo stadio estetico vincolato al piacere e al peccato; l'elettrone negli stati eccitati superiori corrisponde allo stadio della vita etica e poi della vita religiosa. Nello stadio della vita etica valgono le leggi tradizionali dello spirito etico, e così nello stato fondamentale atomico l'elettrone segue le leggi naturali della materia. Fra uno stadio e l'altro della vita e dell'elettrone c'è un abisso e l'elettrone deve fare un salto come l'essere umano. L'elettrone può passare a uno stato superiore solo attraverso una Luce che lo illumini e gli dia quell'energia come nel passaggio dalla vita etica alla vita religiosa, che non è continuo e che non è possibile all'elettrone da solo come all'essere umano da solo. Perdendo la Luce, l'essere umano e l'elettrone ricadono nello stato naturale. Il passaggio non è comprensibile razionalmente o meccanicamente. La Luce è imprevedibile come la Grazia. Nel passaggio allo stadio superiore, il comportamento dell'elettrone acquista singolarità e non è comprensibile in termini di una legge. La singolarità dell'esistenza compresa dal cristianesimo costituisce una comprensione della singolarità dell'esistenza delle particelle che formano la struttura della materia. La fisica quantistica introduce nella Natura le singolarità esistenziali rispetto alle universalità essenziali della scienza precedente: attraverso Kierkegaard entra nella microfisica il nominalismo francescano. L'elettrone è un *Da-sein* fisico singolare che è un

⁶ La rappresentazione è ancora copiata, anche se in una forma invertita, nei resoconti più diffusi: <https://en.wikipedia.org/wiki/Either/Or> (Consultato il 06 sett. 2019).



mutamento ondulatorio tracciabile solo in una matrice di trasformazioni, la cui posizione non è in generale conoscibile se non vincolandolo a una stazionarietà non propagantesi. La legge della Natura non è assoluta; non è possibile conoscere teoreticamente la Natura, contemplandola; si tratterà, invece, di conoscerla agendo praticamente, sperimentalmente, e la finitezza degli esperimenti non può mai fondare una legge assoluta.

Nel 1924 Bohr aveva elaborato con Kramers e Slater (Bohr Kramers Slater), un modello probabilistico dei processi di transizione atomici e proposto la violazione dei principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto. In una lettera del 18 Aprile 1925 scrive a Werner Heisenberg che cerca di prepararsi e adeguarsi al "misticismo della Natura" (Bohr *Emergence* 360-361).

Questa violazione non fu completamente abbandonata come spesso si crede, ma fu rielaborata per l'interpretazione delle relazioni d'indeterminazione di Heisenberg: se usualmente si pone l'accento sulla possibilità di applicare come validi rispetto a soggettività sperimentali concretamente differenziate e mutuamente esclusive sia lo schema spazio-temporale sia lo schema causale legato ai principi di conservazione quali schemi complementari (Bohr *Postulate*; Bohr *Foundations*), è pure vero che la complementarità degli schemi decreta non solo la loro non-univocità ma anche, conseguentemente, il loro non poter essere considerate come leggi universali, e piuttosto si presentano come regolarità puramente statistiche e probabilistiche. La mutua esclusività delle disposizioni della soggettività sperimentale è enfatizzata nel solco dell'*aut-aut* (Enten-Eller) kierkegaardiano. La contingenza della realtà fisica, come meramente possibile e mai necessaria, di Kierkegaard si traduce corrispondentemente in una "teoria negativa" che si esprime in una matematica probabilistica.

L'elettrone verrà poi pensato da Bohr come una sorta di esistente singolare "libero" di una Natura libera che costituirà la condizione di possibilità fisica della libertà umana; e secondo il principio di complementarità del 1928, l'elettrone è rappresentato come avente una doppia natura di corpuscolo e di onda come la doppia natura, umana e divina, del Cristo nella fede di Kierkegaard, in cui la contraddizione è pensata in termini appunto di complementarità: la contraddizione non va risolta in una nuova sintesi razionale come in Hegel, ma va mantenuta. Solo le azioni sperimentali ci fanno raggiungere la realtà, che resta non conoscibile teoreticamente: questo comporta però una modifica a Kant, per cui, se si mantiene la non conoscibilità teoretica, allora bisogna aggiungere che la conoscenza pratica cui giungiamo non scioglie le antinomie, che restano anzi il modo paradossale in cui si presenta la realtà. Come religiosamente, con la fede, possiamo accedere alla doppia natura del Cristo, uomo e Dio, che resta per noi paradossale e non risolvibile teoreticamente, così noi accediamo alla doppia natura dell'elettrone, onda e corpuscolo, che si presentano come nel Cristo, aspetti opposti ma complementari della stessa realtà: Bohr non solo usa così il cristianesimo di Kierkegaard, ma gli dà una forma espressiva con il principio di complementarità. Il mistero della fede si traspone come mistero della Natura non superabile, da accettare nella sua paradossalità: l'identità non si può pensare senza la contraddittorietà, ma senza alcuna sintesi.



Così doppia, per Kierkegaard, si può presentare la realtà fra Natura e Grazia, che sono opposte ma si presentano come aspetti complementari. L'esistenza umana, secondo Kierkegaard, ha la struttura della possibilità: questa mette di fronte ad alternative che si risolvono attraverso scelte, come quella della fede o del peccato, ci mette in una situazione di incertezza e di indeterminazione, ovvero di inquietudine, che nell'essere umano comporta angoscia. Secondo Kierkegaard è così il cristianesimo che svela la struttura dell'esistenza umana e secondo Bohr la struttura dell'esistenza microfisica, che sfuggendo alla diretta visibilità ed esperibilità, è in qualche modo oggetto di fede. Ma anche la singolarità non nomologica dell'esistenza: la legge trovata da Schrödinger non contraddice Bohr, ma lo conferma; in realtà, non si tratta di una legge che impone all'elettrone un comportamento per cui il singolo è sussunto in qualcosa di universale e necessario, ma piuttosto l'affermazione della singolarità dell'elettrone cui si può sovrapporre solo una struttura di probabilità.

LA CONTINGENZA DELL'ESISTENZA, LA QUANTIZZAZIONE DELLA MORTE E L'UTOPIA DELLA LUCE

Il principio di esclusione (*Ausschließungsprinzip*) di Pauli nel 1925 (Pauli), affermando che nell'atomo non ci possono essere due elettroni nello stesso stato, confermerà la singolarità irriducibile delle particelle materiali microscopiche quantistiche ("fermioni"): elettroni in stati diversi sono entità diverse e non ci sono mai due elettroni effettivamente uguali. Solo le particelle immateriali microscopiche ("bosoni") come il fotone possono trovarsi nello stesso stato, essere uguali fra loro: come particelle indistinguibili e non-separabili l'una dall'altra costituiscono la realtà della radiazione e non hanno mai una posizione definita. L'utopia fisica è quella della luce.

Nel 1935, Schrödinger trovò il modo di collegare l'indeterminazione fisica microscopica delle particelle con la contingenza della vita (Schrödinger). Il famoso esperimento pensato del gatto di Schrödinger mostra infatti che l'indeterminazione sullo stato di una particella microscopica genera un'indeterminazione macroscopica sullo stato di un essere vivente, come quella di un gatto. Così, secondo il principio di complementarità onda-corpuscolo che si presenta come una cifra cosmica dell'esistenza non solo a livello microscopico, anche a un corpo macroscopico vivente, come quello del gatto, nella fisica quantistica va associata un'onda, una "funzione d'onda" e una realtà ondulatoria non percepibile neanche attraverso gli esperimenti, in quanto la sua lunghezza d'onda è estremamente piccola. La "funzione d'onda" associata a ogni corpo non ha un senso meramente matematico epistemologico, ma piuttosto fisico "ontologico" legato a un campo che va al di là dell'essere e del non-essere dei corpi materiali (l'indeterminazione quanto-relativistica comporta la creazione/annichilazione di particelle, non permette di determinare l'essere o il non-essere di un corpuscolo).

Secondo l'esperimento di Schrödinger, questa realtà ondulatoria del gatto costituisce una realtà unitaria che può manifestarsi sia nel corpo vivo del gatto sia nel corpo morto del gatto, che ne costituiscono due tipologie di stati, che appunto



l'esperimento mostra soggetti a indeterminazione. L'interpretazione tradizionale dell'indeterminazione quantistica con una situazione statica istantanea di sovrapposizione di stati di una variabile non permette una comprensione realistica e si traduce nell'affermazione paradossale che anche un gatto si troverebbe in una sovrapposizione istantanea, simultanea di stati di vita e di morte. Se invece si comprende l'indeterminazione quantistica in termini di un effettivo, reale, processo di mutamento, che avviene sempre in un intervallo di tempo finito (come le relazioni d'indeterminazione tempo-energia richiedono), si può concludere che anche l'esistenza quantistica è un processo temporale e non uno stato stabile, e l'esistenza del gatto è quantisticamente un indeterminato fluttuare fra vita e morte, un processo che in un qualsiasi intervallo finito di tempo può avere come esito la vita o la morte di un individuo. Invero, non solo nelle condizioni esplicitate dell'esperimento pensato del gatto, ma sempre l'esistenza di un corpo macroscopico vivente dipende da eventi microscopici indeterminati e quindi è soggetta a indeterminazione quantistica. La fisica quantistica non vale solo per il mondo microscopico, ma ha una portata universale, cosmica e vale per tutte le dimensioni, anche mesoscopiche o macroscopiche.

Quantisticamente, l'indeterminazione dell'esistenza individuale, nella sua finitezza temporale, implica qualcosa di impensato: non è incerta solo la vita, ma è incerta anche la morte. Vivere e morire sono lo stesso processo temporale e mai stati, non solo di un corpo, ma piuttosto di una funzione d'onda, ovvero di un campo fisico ondulatorio, di cui il corpo vivo o morto è una manifestazione e che ha un'esistenza indipendentemente dalla morte del corpo. Si ritrovano così, quantisticamente, delle proprietà del vivere e del morire che il pensiero religioso e filosofico avevano immaginato in una maniera più vaga, e che ora ricevono una formulazione fisico-matematica.

Anche il fenomeno microscopico quantistico dell'*entanglement*, conseguenza dell'indeterminazione, ha una sua corrispondente realtà macroscopica, riguardante proprietà dell'esistenza umana, giù intuite dal pensiero religioso e filosofico nella prospettiva di un con-essere costitutivo di tutte le cose: la non-separabilità quantistico-relativistica, l'intreccio inesplicabile spazio-temporale di tutte le parti fisiche individuali quali sottosistemi di uno stesso universo, generati da uno stesso universo, si basa sull'esistenza di un campo fisico cosmico (una funzione d'onda dell'universo), che comprende in sé come parti i campi individuali e che comporta il darsi di una forma di co-esistenza cosmica totale (non-individuale), in cui le parti costituiscono una realtà unitaria sempre attuale al di sotto della nostra soglia spazio-temporale percettiva, in cui tutte le esistenze, tutte le vite e tutte le morti sono intrecciate nell'u-topia della luce.

"C'è del marcio in Danimarca": *Something is rotten in the state of Denmark!* (*Hamlet*, atto I, scena 4, 90) (Shakespeare 20). Nella Danimarca si ha la rivelazione del fantasma del padre di Hamlet, che dubita di tutto, che in realtà lo stato delle cose (di Danimarca) è diverso da quello che sembra, e dietro c'è una realtà inquietante ed angosciosa, che è quella della condizione naturale di peccato in cui si trova il corpo sociale nel suo capo politico: per Bohr, il corpo dell'elettrone (o del gatto di



Schrödinger) è lo stesso fantasma del padre di Hamlet, è fantasmatico, evanescente come un'onda, almeno in alcuni casi, un fantasma che passa attraverso le due fenditure dell'esperimento quantistico che mostra la diffrazione degli elettroni. Si tratta di andare contro la logica di Aristotele e la dialettica di Hegel. Heisenberg scrive il suo articolo sulle relazioni d'indeterminazione in Danimarca, nell'attesa di Bohr. Chiaramente, così, la verità si accompagna sempre all'errore: la verità del corpo si accompagna all'errore dell'onda, la verità della posizione (fissità) è sempre errore della velocità (del mutamento) e viceversa. L'esistenza come possibilità si traduce in termini di probabilità.

COMPLEMENTARITÀ E CORRISPONDENZA

La complementarità non rappresenta così il tentativo epistemologico di salvare la natura nomotetica della fisica, ma piuttosto la condizione di possibilità del pensiero e dell'esperienza di comprendere una realtà fisica paradossale con aspetti contraddittori non risolvibili neanche in una sintesi dialettica hegel-marxiana, che pure superi la tradizionale logica classica in una nuova teoria completa.

Il 'principio di corrispondenza' elaborato da Bohr ha permesso di passare analogicamente dalla teoria classica alla teoria quantistica (Bohr *Correspondence*), considerando l'esistenza di una "corrispondenza" fra realtà fisica macroscopica e realtà fisica microscopica, ma la continuità, dal punto di vista della matematica, istituita fra le due teorie non rappresenta affatto una continuità concettuale e semantica, né una continuità epistemologica e nomotetica, gnoseologica e ontologica. Così, lo stesso principio di complementarità ha permesso analogicamente di dar conto di procedure sperimentali rivelatesi mutuamente esclusive come legate all'emergere di aspetti "complementari" della realtà fisica microscopica corrispondenti a differenti aspetti della realtà fisica macroscopica, ma, agli occhi di Bohr, questo fatto non rappresenta che una mera continuità dal punto di vista della matematica.

Invero, il principio di corrispondenza e il principio di complementarità mostrano come, al di là delle analogie simboliche, la fisica quantistica è stata costruita attraverso delle metafore de-costruttive del linguaggio ordinario e dei suoi concetti, e dei simbolismi matematici della fisica classica, e quindi della sua ontologia e della sua epistemologia; metafore anche costitutive di una nuova teoria (non-figurativa), basata su nuovi simbolismi matematici, di una nuova epistemologia e di una sorta di nuova 'ontologia negativa' per una realtà fisica che si mostra in salti "irrazionali" come quelli d'un elettrone nell'atomo che richiamano i salti della fede di Kierkegaard: per una realtà fisica che, come la realtà divina nella 'teologia negativa', risulta comprensibile solo nei termini dei limiti del linguaggio e dei concetti ordinari.

La non-separabilità di sottosistemi, che derivano da un unico sistema iniziale e si separano e si allontanano talmente da non poter scambiare fra essi alcun segnale fisico, il cosiddetto *entanglement*, che fa della Natura un intero non-separabile, è stata affermata da Bohr contro tutti i tentativi di razionalizzare questa paradossale realtà, spiegando che i principi di conservazione della quantità di moto e dell'energia non



valgono se misuriamo spazio e tempo per localizzare i sottosistemi, e viceversa, se valgono i principi di conservazione, non possiamo localizzare i sottosistemi: la non-separabilità (Einstein *Quantum-mechanical*; Bohr *Quantum-mechanical*) è una conseguenza dell'indeterminazione e del paradosso della complementarità (Giannetto *Remarks*).

La fisica quantistica di Bohr mostra quindi una realtà fisica non più trascendentalmente sussumibile aprioristicamente in condizioni necessarie e sufficienti di possibilità della conoscenza, soggettive o oggettive; la fisica quantistica è essenzialmente metaforica, è una nuova forma di "scienza" post-critica che si presenta essenzialmente come un'arte, "astratta", simbolico – matematica e sperimentale – performativa, che può cogliere la "bellezza" o il "mistero della realtà" della natura solo in simboli non-figurativi, analogie e metafore e neppure unitariamente, non più riducibili a un'ontologia positiva razionale costruita su una gnoseologia positiva razionale.

Se gli aspetti del pensiero di Bohr appena discussi ne fanno emergere certi tratti che hanno caratterizzato il suo coinvolgimento nell'elaborazione della nuova teoria quantistica, la ricerca della continuità matematica con la teoria classica ne hanno offuscato l'effettiva rivoluzionarietà.

In particolare, il principio di complementarità di Bohr (Jammer *Philosophy* 85-107, 376-379) è stato interpretato in termini conservatori per attenuare il senso delle relazioni d'indeterminazione di Heisenberg (Giannetto *Rivoluzione*). E' vero piuttosto che Bohr non solo opera, nelle ricostruzioni razionali astratte, una sorta di de-costruzione della filosofia kantiana, ma anche che la sua teoria atomica introduce i 'salti nell'infinito' dell'esistenzialismo di Kierkegaard nel 'cuore' della Natura dando ancora più consistenza, concretezza, alla discontinuità ormai riconosciuta da Poincaré; ed è vero che Bohr ha tentato di estendere in senso interdisciplinare le limitazioni epistemologiche, imposte dal principio di complementarità alla fisica, a tutte le altre discipline come la biologia, la psicologia, l'antropologia, la gnoseologia e l'ontologia filosofiche.

Ma c'è di più: Bohr ritiene che la fisica classica, il pensiero classico, la sua logica e i suoi concetti, e le sue immagini del mondo siano le uniche rappresentazioni razionali possibili basate sull'esperienza umana a cui si deve fare riferimento, non solo come linguaggio delle procedure sperimentali, ma anche come riconoscimento di aspetti parziali e mutuamente esclusivi della realtà fisica classica (Bohr *Essays*). E cioè ritiene che non si debbano cercare nuove rappresentazioni razionali possibili in quanto inesistenti, e che la fisica quantistica non possa essere costruita e intesa come una nuova forma di razionalità o una nuova teoria positiva, ma piuttosto come "teoria negativa", come de-costruzione, limitazione e negazione mutua delle rappresentazioni razionali basate sull'esperienza.

Così, Bohr non prese mai in seria considerazione la possibilità di una nuova logica quantistica o di una nuova matematica quantistica né di una nuova teoria della misura quantistica che si confronti con la possibilità di soggetti sperimentali – strumenti microscopici quantistici, né corrispondentemente la possibilità di abbandonare completamente i concetti ordinari e i modelli classici, legati all'uso di



strumenti macroscopici classici: non perché non siano realizzabili una nuova logica e una nuova matematica quantistiche, ma perché viste come non accettazione dell'irriducibile irrazionalità della Natura e come tentativo di nuove razionalizzazioni filosoficamente non profonde. Questo è legato al fatto che Bohr mantenne sempre il presupposto di una certa sperimentabilità della realtà fisica, i cui risultati siano esprimibili e comunicabili in termini riconducibili ai concetti della nostra esperienza diretta e del linguaggio ordinario, escludendo così tutto ciò che non è riconducibile, ridicolo a quest'ambito dell'esperienza, come concettualmente significativo.

Scrivendo infatti Bohr, per esempio nel saggio intitolato *I congressi Solvay e gli sviluppi della fisica quantistica* (1961) (Bohr *Quanti* 210):

“L'idea centrale era che la comunicazione univoca dei dati richiede che i dispositivi sperimentali e la registrazione delle osservazioni siano descrivibili mediante il linguaggio comune, opportunamente perfezionato col vocabolario della fisica classica”.

In ogni caso, sono state le idee di Bohr all'origine di alcuni sviluppi che hanno superato i limiti stessi in cui lui stesso aveva configurato tali problematiche.

L'IRRAZIONALITA' NELLA FISICA

Molto spesso, i fisici che hanno rifiutato e rifiutano la fisica quantistica cercano di mostrare l'esistenza di contraddizioni all'interno di essa e la caratterizzano come una teoria che presenta elementi di irrazionalità. L'ideale di una meccanica razionale, costruibile nei termini di una ragione pura apriori, nacque con l'illuminismo e si espresse per la prima volta nell'opera di Lagrange e costituì una tradizione. Certamente, la meccanica quantistica ha una fondazione irriducibilmente sperimentale, e, per quanto ne siano state fornite rigorose assiomatizzazioni, in cui si sono tradotti storicamente i progetti di una sua razionalizzazione, i suoi principi tradiscono comunque la loro origine in esperimenti che non si conformano a una ragione pura apriori. D'altra parte, le accuse nei confronti della meccanica quantistica non tengono conto che le sue origini concettuali stanno proprio, con Kierkegaard, nell'accettazione delle contraddizioni che si manifestano nella realtà, nel tentativo di non mascherarle o non risolverle in una nuova sintesi, ovvero nel rifiuto di una loro razionalizzazione deformante: anche il principio di non-contraddizione non può applicarsi apriori alla realtà fisica e le sue violazioni si devono costituire in una nuova logica sperimentale. Tutto questo ha trovato una controparte nel principio d'indeterminazione, che viene pensata quale un'effettiva indeterminazione ontologica e non come legata a una limitazione puramente gnoseologica. La meccanica di Heisenberg, Born e Jordan, la meccanica di Schrödinger, la meccanica di Dirac (Giannetto *Saggi*), la meccanica a variabili nascoste (Giannetto *fisico*), rappresentano in qualche modo dei tentativi di razionalizzazione, ma non riescono a effettuarla. Per fare un paragone storico, è come se Newton, se si fosse trovato al posto di Erwin Schrödinger (1887-1961), che aveva ricondotto l'elemento irrazionale dei salti quantici dell'elettrone fra stati stazionari d'energia dell'atomo d'idrogeno di Niels Bohr alla



legge dell'equazione della funzione d'onda con la soluzione ad autostati discreti, avrebbe affermato che gli elettroni di per sé sono corpuscoli materiali con valori continui di energia ma che Dio impone loro con una legge un comportamento ondulatorio con autostati discreti d'energia all'interno dell'atomo. Anche la meccanica a variabili nascoste ha nel potenziale d'informazione un elemento d'irrazionalità altrimenti espresso.

Ma la meccanica razionale aveva effettivamente eliminato le irrazionalità e le contraddizioni? Se non la consideriamo come un contenitore vuoto, ma inseriamo, dentro la meccanica newtoniana, la forza gravitazionale, allora abbiamo un elemento d'irrazionalità. La forza gravitazionale si presenta come un'evidenza sperimentale non assumibile a priori, espressa in una formula matematica, ma indica ugualmente qualcosa di non spiegabile razionalmente, un'azione a distanza fra corpi fisici. Di più: questi corpi fisici, da una parte, sono considerati come corpi materiali inerti e passivi, dall'altra parte, sotto l'azione di Dio, di forze a distanza e istantanee (che per questo motivo devono essere di origine divina) si comportano come organismi viventi che si attraggono, mossi da una sorta di *eros*. Si ha quindi una duplice natura dei corpi fisici, spiegabile solo attraverso la fede in azioni divine che ordinano il mondo.

Anche nella relatività speciale il moto invariante della luce si presenta come dato sperimentale e come elemento d'irrazionalità meccanica. D'altronde, il principio di relatività è come un principio d'indeterminazione del moto e si ha una dualità di spazio e tempo: quello che è tempo per un sistema di riferimento, è spazio per un altro. E, nella relatività generale, il rapporto fra spazio-tempo e materia-energia costituisce una dualità irrisolta.

Anche la teoria quanto-relativistica di campo che emerge dall'unione di fisica quantistica e relativistica si presenta con un principio d'indeterminazione ontologica ancora più profonda che permette perfino la creazione dell'universo dal nulla, con una dualità campo-particella e con un'inseparabilità effettiva dei campi che rimanda a elementi d'irrazionalità (Giannetto *Quantum*; Giannetto *Blumenberg*). Sembra proprio, quindi, che la nuova concezione esistenzialistica della Natura della fisica quantistica abbia colto elementi di realtà irriducibili.

BOHR, LA FISICA E UN'ANTROPOLOGIA QUANTISTICA

È stato soprattutto Carl Friederick von Weizsäcker fra il 1953 e il 1958 a elaborare il significato fisico e filosofico del principio di complementarità di Bohr fino ad arrivare alla formulazione di una nuova "logica quantistica della complementarità" (Weizsäcker 300-362; Giannetto *Heidegger*). Secondo von Weizsäcker, la complementarità dei fenomeni fisici di Bohr non può che trovare espressione in una complementarità logica degli enunciati corrispondenti, in cui formulare la complementarità e i limiti dei concetti classici.

Bohr è stato il primo fisico a cercare di evidenziare la portata trans-disciplinare della trasformazione quantistica della fisica e a proporre "complementarità" in filosofia, in biologia, in psicologia, in antropologia, sociologia (Bohr *Complementarity*). Alcune di



queste "complementarità" sono state largamente esplorate; in un altro lavoro, ho seguito lo sviluppo di una "psicologia quantistica" da parte di Carl Gustav Jung sulla base del dialogo con Pauli, con l'evidenza di una correlazione fra non-separabilità quantistica della realtà fisica e sincronicità (Giannetto *Pauli*). Edgar Morin ha invece cercato di sintetizzare queste "complementarità" e ha connesso l'indeterminazione quantistica alla complessità, riducendo la prima ad una forma della seconda, cercando di riassorbire poi entrambe in un principio epistemologico di "incertezza generalizzata": si tratta tuttavia in definitiva del più articolato ed estremo tentativo di una completa determinazione razionale del mondo, che per tenere conto delle più recenti rivoluzioni della fisica è costretto a mischiare alla base del suo schema ipotetiche categorie gnoseologiche deterministe ed indeterministe in una sintesi "complessa" data da "complementarità antagoniste" (Morin *Linguaggi*). Morin ha anche teorizzato una sorta di circolo virtuoso fra fisica, biologia, antropologia, sociologia (Morin *Metodo* 22): e invece anche questa idea si può in qualche modo ricollegare alle complementarità individuate da Bohr in antropologia, nel saggio del 1938, *Filosofia naturale e culture umane* (Bohr *Filosofia*).

Bohr, invece, cerca di superare l'antropologia classica che situa le culture primitive come mero oggetto d'analisi della cultura occidentale, senza ricadere, ancora con una metafora dalla fisica, in una "relatività" delle culture. E introduce così l'idea di una "complementarità delle culture", che, pur non essendo del tutto mutuamente esclusive come gli aspetti fisici quantistici complementari, rispecchia l'esperienza che spesso l'essere all'interno di una data cultura non ci permette di comprendere altre culture. Si tratta di una nuova "antropologia quantistica", che riconosca pienamente il valore complementare delle culture umane. La cultura occidentale dominante, che fondava la sua illusoria pretesa di superiorità sulle altre culture, sulla base della cultura della scienza moderna del Seicento-Settecento, che sembrava garantirle certezze assolute, ora si vede smascherata dal suo stesso frutto di una nuova cultura scientifica, quantistica che ci apre alle incertezze e alle complementarità.

Una connessione ancora più profonda fra fisica quantistica e antropologia viene poi evidenziata dal più profondo sguardo sulla complementarità del fisico Carl Friederick von Weizsäcker (Weizsäcker 363-395). Per quest'ultimo, la complementarità delle culture umane diviene anche complementarità fra cultura scientifica e cultura antropologica, e in particolare, fra fisica e antropologia, corrispondente alla complementarità fra natura e uomo, fra natura e cultura stessa: in questa prospettiva, la fisica è lo sfondo dell'antropologia e l'antropologia lo sfondo della fisica.

Si deve anche soprattutto riconoscere al pensiero di Bohr l'apertura straordinaria effettuata dell'universo chiuso del discorso scientifico della fisica in tutte le direzioni e alla ricerca di più profonde connessioni transdisciplinari fra fisica e altre discipline.

Attraverso un'analisi delle complementarità di Bohr e dei suoi sviluppi, ci è permesso di comprendere le radici effettive e storiche della fisica quantistica, il processo costruttivo e de-costruttivo che l'ha generata dalla fisica classica, i cambiamenti resi necessari dalla fisica quantistica nel nostro modo di pensare e nella nostra logica, come anche nella corrispondente realtà fisica che ci si mostra, le



connessioni profonde della fisica come attività umana alle altre attività umane ancora prima che fra differenti discipline.

Anche in questo caso, a partire dall'opera di Bohr e di Weizsäcker, si possono enucleare delle conseguenze rilevanti da loro stessi non considerate. Il problema che si pone con la fisica quantistica che fronteggia il caso di una realtà fisica non direttamente visibile e non visualizzabile figurativamente o in forme geometriche continue, induce un cambiamento antropologico nella visione e nelle pratiche simboliche umane, come anche nel pensiero scientifico che si deve ristrutturare, come nella sua fase arcaica, quale pensiero complesso per immagini non figurative, non verbale, non lineare, non basato sulla scrittura fonetico-alfabetica lineare.

Si supera così quell'alienazione antropologica propria della cultura occidentale, indotta dalla scienza moderna, nei confronti della natura, a causa della mediazione del rapporto con essa da parte di una scrittura matematica, al posto del linguaggio ordinario, ridotta a mero strumento di calcolo e posseduta solo da una ristretta cerchia di persone della comunità scientifica: vi è appunto il ritorno ad una scrittura matematica ma pienamente simbolica per considerare la natura. Si supera così anche quell'alienazione antropologica propria della cultura occidentale, corrispondentemente indotta dalla scienza moderna, nei confronti della natura, a causa della mediazione del rapporto con essa da parte degli strumenti scientifici, con l'introduzione dell'esperimento, al posto dell'esperienza umana, producibile solo da una ristretta cerchia di persone della comunità scientifica: il riconoscimento del pieno *Dasein* degli strumenti scientifici nel mondo fisico, con tutte le indeterminazioni delle misure fisiche, comporta il ritorno del valore del *Dasein* dell'esperienza umana nel mondo in tutta la sua complessità. Si supera così anche quell'alienazione antropologica propria della cultura occidentale, ancora indotta dalla scienza moderna, nei confronti della natura, a causa della mediazione del rapporto con essa da parte di una concezione materialistico-meccanicista, determinista, matematico-tecnica, geometrico-statica, che espunge la dimensione temporale della vita dalla natura per esorcizzare la morte: l'indeterminazione o l'imprevedibilità quantistica dei processi fisici restituisce all'uomo occidentale l'esperienza originaria escatologica (cristiana) del tempo futuro indeterminato e irreversibile, redento dalla ciclicità dei processi meccanici reversibili come dal ciclo delle nascite e delle morti. Si supera così anche quell'alienazione antropologica propria della cultura occidentale, indotta dalla scienza moderna, nei confronti della natura, a causa del misconoscimento di una sua possibile esperienza mistico-religiosa: la natura, ridotta a mero oggetto, a mera materia inerte e passiva, a disposizione della volontà di potenza umana dalla scienza moderna, torna ad essere con la fisica quantistica indeterminabile e incontrollabile nella sua potenza da parte dell'uomo, ad essere la grande madre generatrice, divinità ineffabile per l'esperienza umana. La natura torna ad essere guardata con stupore: il suo mistero torna ad essere colto a livello del microcosmo quantistico, come arcaicamente lo era a livello del macrocosmo celeste, dove, come nella teoria dei quarks costituenti i nuclei atomici, possiamo ancora trovare "bellezza" e "verità" e tutto il "colore" espunto da una visione riduttiva ed alienante l'esperienza umana della natura.



Una fisica separata dall'antropologia, dopo Bohr, non è più concepibile. La fisica quantistica delle complementarità si apre con Bohr metaforicamente ad un nuovo sguardo su sé stessa che non costituisca più una "meta-fisica" nel senso tradizionale del termine, e invece ne mostri i limiti, le incertezze, le complementarità. E cambia il nostro sguardo, la nostra cultura che finora si era basata soprattutto su opposizioni violente fra uomo e natura, fra uomo e uomo di differenti culture ed etnie.

BIBLIOGRAFIA

Aaserud, Finn, e John L. Heilbron. *Love, Literature and the Quantum Atom: Niels Bohr's 1913 Trilogy Revisited*. Oxford University Press, 2013.

Angeloni, Roberto. "On the Cultural Relationship between Niels Bohr and Harald Høffding." *Nuncius* 25 n. 2, 2010, pp. 317-356.

Bohr, Niels, et al. "The Quantum Theory of Radiation." *Philosophical Magazine*, vol. 47 n. 6, 1924, pp. 785-802, e, in tedesco, *Zeitschrift für Physik*, no 24, 1924, pp. 69-87.

Bohr, Niels. "On the Constitution of Atoms and Molecules." *Philosophical Magazine*, no. 26, 1913, pp. 1-25, 476-502, 857-875.

---. "The quantum postulate and the recent development of atomic theory." *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici 11-20 Settembre 1927, Como-Pavia-Roma*, Volume Secondo, Zanichelli, 1928, pp. 565-588, e discussione a pp. 589-598.

---. "The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory." *Nature*, no. 121, 1928, p. 78 e *Supplement* 121, 14 apr.1928, pp. 580-590.

---. "Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?," *Physical Review*, no. 48, 1935, pp. 696-702.

---. *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. *Interscience*, 1963; traduzione italiana di P. Gulmanelli, *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, Boringhieri, 1961.

---. "Natural Philosophy and Human Cultures." *Nature* no. 143, 1939, pp. 268-272; traduzione italiana di P. Gulmanelli, "Filosofia naturale e culture umane." Niels Bohr, *I quanti e la vita*. Boringhieri, 1977 (1965), pp. 48-57.

---. "The Solvay meetings and the development of quantum physics." *La Théorie quantique des Champs, Bruxelles 1961*. *Interscience*, 1962, traduzione italiana di P. Gulmanelli, "I congressi Solvay e lo sviluppo della fisica quantistica." Niels Bohr, *I quanti e la vita*, Boringhieri, 1977 (1965), pp. 195-220.

---. "Lettera a Harald del 20-4-1909" e "Lettera a Harald del 26-1909." Niels Bohr, *Collected Works*, a cura di Leon Rosenfeld, vol. I, *Early Work (1905-1911)*, a cura di Jens Rud Nielsen, North Holland, 1972, pp. 499-503.

---. *Collected Works*. A cura di Leon Rosenfeld, vol. II, *Work on Atomic Physics (1912-1917)*, a cura di U. Hoyer, North Holland, 1981.

---. *Collected Works*. A cura di Leon Rosenfeld, vol. III, *The Correspondence Principle (1918-1923)*, a cura di Jens Rud Nielsen, North Holland, 1976.



---. "Lettera a Heisenberg del 18-4-1925." Niels Bohr, *Collected Works*, a cura di E. Rüdinger, vol. V, *The Emergence of Quantum Mechanics* (mainly 1924-1926), a cura di K. Stolzenburg, North Holland, 1984, pp. 360-361.

---. *Collected Works*. A cura di E. Rüdinger, vol. VI, *Foundations of Quantum Physics I* (1926-1932), a cura di J. Kalckar, North Holland, Amsterdam 1985.

---. *Collected Works*. A cura di Finn Aaserud, vol. X, *Complementarity beyond Physics* (1928-1962), a cura di David Favroldt, North Holland, 1999.

---. *Collected Works*. A cura di Finn Aaserud, v. XIII, *Cumulative Subject Index*, a cura di Finn Aaserud, Elsevier, 2008.

Chevalley, Catherine. "Le dessin et la couleur." Introduction. *Physique atomique et connaissance humaine*, di Niels Bohr, Gallimard, 1991.

Darrigol, Olivier, et al., a cura di. *Niels Bohr 1913-2013, Seminar Poincaré 2013, Progress in Mathematical Physics 68*. Birkhäuser Springer, 2016.

Einstein, Albert, et al. "Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" *Physical Review*, no. 47, 1935, pp. 777-780.

Favroldt, David. *Niels Bohr Philosophical Background*. Munksagaard, 1992.

Faye, Jan. "The Influence of Harald Høffding's Philosophy on Niels Bohr's Interpretation of Quantum Mechanics." *Danish Yearbook of Philosophy*, no. 16 1979, pp. 37-72.

---. *Niels Bohr: His Heritage and Legacy. An Anti-Realistic View of Quantum Mechanics*. Kluwer Academic Publishers, 1991.

---, e Henry J. Folse, a cura di. *Niels Bohr and Contemporary Philosophy, Boston Studies in the Philosophy of Science 153*, Springer-Kluwer, Dordrecht 1994.

Gembillo, Giuseppe. "Niels Bohr." *Novecento filosofico e scientifico. Protagonisti*, Marzorati, pp.857-892, ristampato in Giuseppe Gembillo e Mario Galzigna, *Scienziati e nuove immagini del mondo*. Marzorati, 1994.

Giannetto, Enrico, et al. "Analogia e metafora nell'opera scientifica di Buridano." *Atti del VII Congresso Nazionale di Storia della Fisica. Padova 1986*, a cura di Fabio Bevilacqua, Università di Milano, 1987, 197-204.

Giannetto, Enrico. "L'epistemologia quantistica come metafora antifondazionistica." *Immagini Linguaggi Concetti*, a cura di Sandro Petruccioli, Theoria, 1991, pp. 301-322.

---. "Some Remarks on Non-Separability." *The Foundations of Quantum Mechanics*, a cura di Claudio Garola e Arcangelo Rossi, Kluwer, 1995, pp. 315-324.

---. "Heidegger and the question of physics." *Proceedings of the "Conference on Science and Hermeneutics (Veszprém 1993)"*, a cura di Marta Feher, et al., Reidel, 1999, pp. 225-245.

---. "La rivoluzione della meccanica delle matrici di Heisenberg, Born e Jordan." Introduzione. *Werner Heisenberg: Lo sfondo filosofico della fisica moderna*. Sellerio, 1999, pp. 25-37.

---. "Wolfgang Pauli e Carl Gustav Jung: una nuova percezione della natura e della scienza." *Wolfgang Pauli tra fisica e filosofia*, a cura di Giuseppe Gembillo e Giuseppe Giordano, Armando Siciliano, 2001, pp. 93-136.



---. *Saggi di storie del pensiero scientifico*. Sestante for Bergamo University Press, 2005.

---. *Un fisico delle origini. Heidegger, la scienza e la Natura*. Donzelli, 2010.

---. "Quantum-Relativistic Physis." *Istituto Lombardo - Accademia di Scienze e Lettere - Incontri di Studio n. 88, Realtà senza Realismo (2016,7 Giugno)*, a cura di Giacomo M. D'Ariano, et al., Istituto Lombardo di Scienze e Lettere, 2017, pp. 149-160.

---. *Hans Blumenberg, il significato storico del principio d'inerzia e la creatio continua. Autoconservazione e inerzia. Sulla costituzione della razionalità moderna*, di Hans Blumenberg, Medusa, 2016, a cura di Enrico R. A. Calogero Giannetto e Martino Doni, pp. 5-30.

Jammer, Max. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw-Hill, 1966.

---. *The Philosophy of Quantum Mechanics*. Wiley, 1974, pp. 85-107, 376-379.

Kierkegaard, Søren. *Briciole di Filosofia, 1844. Le grandi opere filosofiche e teologiche*, traduzione italiana di Cornelio Fabro con testi originali danesi a fronte, prefazione di Giovanni Reale, aggiornamento bibliografico e indici di Vincenzo Cicero, Bompiani, 2013, pp. 590-743.

---. *Stadi sul cammino della vita*, a cura di L. Kocø, traduzione italiana di A. M. Segala e A. G. Calabrese, Rizzoli, 1993 (1845).

Moreira, Rui Antonio Nobre. "Høffding and Bohr: Waves or Particles." *Wave and Particles in Light and Matter*, a cura di Alwyn van der Merwe et al., Plenum, 1994, pp. 395-410.

Morin, Edgar. *La Méthode I: La nature de la nature*. Seuil, 1977, traduzione italiana parziale di Gianluca Bocchi, *Il metodo*, Feltrinelli, 1983 e traduzione completata da A. Serra presso Cortina, 2001.

---. "I linguaggi della complessità." *La ragione possibile*, di Giuseppe Barbieri e Paolo Vidali, Feltrinelli 1988, pp. 412-430.

Pais, Abraham. *Niels Bohr's Times. In Physics, Philosophy and Polity*, Oxford University Press, 1991, traduzione italiana di D. Canarutto, *Il danese tranquillo. Niels Bohr, un fisico e il suo tempo, 1885-1962*. Bollati Boringhieri, 1993.

Pauli, Wolfgang. "Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren." *Zeitschrift für Physik*, vol. 31, no. 1, 1925, pp. 765-783.

Petruccioli, Sandro. *Atomi metafore paradossi. Niels Bohr e la costruzione di una nuova fisica*. Theoria, 1988.

Plotnitsky, Arkady. *Complementarity*. Duke University Press, 1994.

Rhodes, Richard. *The Making of the Atomic Bomb*. Simon and Schuster, 1986.

Rud Nielsen, Jens, "Memories of Niels Bohr." *Physics Today*, vol. 16, n. 10, 1963, pp. 22-31.

Schrödinger, Erwin. "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik." *Naturewissenschaften*, vol. 23, nn. 48, 49 e 50, November-December 1935, pp. 807-812, 823-828, 844-849; traduzione italiana a cura di Deborah Donato, *La situazione attuale nella meccanica quantistica*. Sicania, 2012, pp. 49-93.



Shakespeare, William. *The Tragicall Historie of Hamlet, Prince of Denmarke*. Trundell, 1603-1604), ristampato a cura di Samuel Timmins, Sampson Low, 1860.

Weizsäcker, Carl Friedrich von. *Zum Weltbild der Physik*. Hirzel, 1960, traduzione italiana di D. Campanale, *L'immagine fisica del mondo*. Fabbri, 1967.

Enrico R. A. Calogero Giannetto, fisico teorico, storico della scienza, attualmente è ordinario di Storia della Scienza, docente di Filosofia Contemporanea, e direttore del Dipartimento di "Lettere, Filosofia Comunicazione" dell'Università di Bergamo. È autore di numerosi lavori, tra cui: *Saggi di storie del pensiero scientifico* (2005); *Il Vangelo di Giuda. Traduzione dal copto e commento* (2006); *Un fisico delle origini. Heidegger, la scienza e la Natura* (2010); *Note per una metamorfosi* (2011); *Sguardi sul pensiero contemporaneo. Filosofia e scienze per cambiare il mondo* (2018).

enrico.giannetto@unibg.it