

# WERNER HEISENBERG

## E IL TEMPO COME MATRICE INFINITA

enrico antonio giannetto

Dipartimento di Fisica "A. Volta", Università di Pavia

via A. Bassi 6, 27100 Pavia, Italia

giannetto@fisicavolta.unipv.it

### 1. Introduzione

Esistono varie analisi storiche della nascita delle relazioni di indeterminazione negli sviluppi della fisica quantistica come nell'opera di Werner Heisenberg: una delle più recenti, quella di Mara Beller, mostra per la prima volta quanto complesse e ramificate siano le tracce di questa storia.<sup>1</sup> Tuttavia, per altro, anche il punto di vista della Beller resta all'interno di quelli che potrebbero essere chiamati, in termini analoghi a quelli usati soprattutto nella storia delle religioni, i "miti fondativi" o "i miti delle origini" della "meccanica quantistica", continuamente rielaborati ancora oggi dalla comunità degli storici attraverso una ricostruzione storiografica legittimatrice del punto di vista della comunità scientifica dei fisici.

Come per le origini di una religione, così per le origini di una teoria fisica come la "meccanica quantistica", sembra necessario (agli appartenenti alla comunità che la 'professano') ricondurre i vari "movimenti storici" che la caratterizzano ad una fittizia univocità, unità iniziale. A questo obiettivo si è teso e si tende su più livelli e su più strati di analisi storica. Dagli inizi della fisica quantistica attraverso la riduzione all'unità dei vari simboli usati per la cosiddetta 'costante di Planck' (il primo simbolo, nel 1899, era  $b$  e non  $h$ ), delle varie dimensioni fisiche attribuitele (inizialmente non si faceva neanche riferimento alla grandezza 'azione'), dei vari significati fisici che contestualmente la caratterizzavano (in Planck, prima si trattava di una costante universale all'interno di un sistema assoluto di unità di misura naturali, poi di una costante legata ai cosiddetti 'elementi d'energia' all'interno di un procedimento euristico per risolvere un problema d'intersezione fra meccanica, termodinamica ed elettromagnetismo; e, ancora dopo, di una costante legata al corpuscolarismo meccanicistico cui

---

<sup>1</sup> Si vedano, per esempio: J. Mehra & H. Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, voll. I-VI, Springer Verlag, New York 1982-2000; M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York

Einstein tenta di ridurre l'elettrodinamica; e così via).<sup>2</sup> Alla ricercata prova d'“equivalenza” fra le varie forme di meccanica prodotte fra il 1925 e il 1932, soprattutto fra la meccanica delle matrici, presentata come prima forma di “meccanica quantistica” negli articoli di Heisenberg, Born e Jordan apparsi tra il 1925 e il 1926,<sup>3</sup> e la meccanica ondulatoria di Schrödinger,<sup>4</sup> e poi di queste con quella di Dirac<sup>5</sup> (molto più "simile" a quella di Heisenberg, Born e Jordan, ma non “identica”), e con quella di von Neumann (e poi ancora con quella di Feynman, e così via). Nello stesso 1926, Schrödinger diede una "dimostrazione" dell'equivalenza tra la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria.<sup>6</sup> I fisici, da allora in poi, hanno fatto riferimento a tale presunta dimostrazione e pragmaticamente hanno usato come strumento di calcolo uno “sviluppo” della “più comoda” meccanica ondulatoria di Schrödinger. Gli storici hanno evidenziato come la dimostrazione tentata da Schrödinger fosse quanto meno

---

1966; M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York 1974; M. Beller, *Quantum dialogue: the making of a revolution*, University of Chicago Press, Chicago 1999, pp. 65-137.

<sup>2</sup> M. Planck, *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge*, quinta comunicazione, *Berliner Berichte*, 18 Maggio 1899, pp. 440-480; M. Planck, *Zur theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2 (1900) pp. 237-245 (è la conferenza del 14 Dicembre 1900), tr. ingl., *On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum*, in D.ter Haar, *The Old Quantum Theory*, Pergamon Press, Oxford 1967, pp. 82-90; A. Einstein, *Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, *Annalen der Physik* **17** (1905) pp. 132-148, tr. it., *Un punto di vista euristico relativo alla generazione e alla trasformazione della luce*, in A. Einstein, *Opere scelte*, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988, pp. 118-135; si veda anche: M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 1-46. Tutto questo, ovviamente, pone dei problemi sulla ‘data di nascita’ della ‘fisica quantistica’. Su questo problema, si veda: J. Buettner, J. Renn, M. Schemmel, *Exploring the limits of Classical Physics. Planck, Einstein, and the structure of a scientific revolution*, preprint di una conferenza tenuta il 3 Maggio 2000 al ‘Boston Colloquium for Philosophy of Science, dedicato a “Max Planck and the Quantum”’.

<sup>3</sup> W. Heisenberg, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, in *Zeitschrift für Physik* **33** (1925), pp. 879-893; M. Born & P. Jordan *Zür Quantenmechanik I*, in *Zeitschrift für Physik* **34** (1925), 858; M. Born, W. Heisenberg & P. Jordan, *Zür Quantenmechanik II*, in *Zeitschrift für Physik* **35** (1926), pp. 557-615. Traduzioni italiane del primo e del terzo articolo si trovano in: W. Heisenberg, *Lo sfondo filosofico della fisica moderna*, a cura di G. Gembillo e E. Giannetto, Sellerio, Palermo 1998, pp. 123-139, 140-206. Traduzioni inglesi di tutti e tre questi articoli, si trovano in: *Sources of Quantum Mechanics*, ed. B. L. van der Waerden, North-Holland, Amsterdam 1967, pp. 261-276, 277-306, 307-385.

<sup>4</sup> E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem*, I, II, III, IV, in *Annalen der Physik* **79** (1926) pp. 361-376, **79** (1926) pp. 489-527, **80** (1926) pp. 437-490, **81** (1926) pp. 109-139; E. Schrödinger, *Der stetige Übergang von der Micro- zur Macromechanik*, in *Naturwissenschaften* **14** (1926) pp. 664-666: la traduzione inglese di questi articoli si trova in: E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics*, Blackie & Sons, London 1927. Le traduzioni italiane delle prime quattro comunicazioni sono in: S. Boffi, *La meccanica delle onde*, Università di Pavia, Pavia 1991.

<sup>5</sup> P. A. M. Dirac, *The Fundamental Equations of Quantum Mechanics*, in *Proc. Roy. Soc. A* **109** (1926), pp. 642-653; P. A. M. Dirac, *Quantum Mechanics and a Preliminary Investigation of the Hydrogen Atom*, in *Proc. Roy. Soc. A* **110** (1926), pp. 561-569: entrambi riprodotti in *Sources of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 307-320 e 417-427; P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford 1930, 1958, tr. it. di P. L. Casalini & V. Silvestrini, *I principi della meccanica quantistica*, Boringhieri, Torino 1976.

<sup>6</sup> E. Schrödinger, *Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen*, in *Annalen der Physik* **79** (1926), pp. 734-756; tr. ingl. in: G. Ludwig (ed.), *Wave Mechanics*, Pergamon Press, Oxford 1968.

incompleta.<sup>7</sup> Si è anche creduto che tale dimostrazione fosse stata completata da Pauli (in una lettera a Jordan scoperta da Van der Waerden nel 1972) e indipendentemente da Eckart.<sup>8</sup>

Recentemente, seguendo un punto di vista comunque già espresso varie volte nella storia di questo problema, F. A. Muller ha messo in luce come quello dell'equivalenza tra meccanica delle matrici e meccanica ondulatoria non sia nulla di più che un mito, almeno da una prospettiva storica: secondo Muller, oggi si ha invece l'equivalenza delle due teorie nella loro *riformulazione* nel linguaggio contemporaneo della meccanica quantistica.<sup>9</sup> Tuttavia, si può notare come questa stessa ultima 'soluzione' di Muller sia esemplare di quanto sia difficile svincolarsi da questo mito.<sup>10</sup>

La *Quantenmechanik* di Heisenberg, Born e Jordan, la cosiddetta *meccanica delle matrici*, non è considerabile, come perlopiù è fatto nei manuali di meccanica quantistica, come un caso particolare, corrispondente alla cosiddetta "rappresentazione di Heisenberg", di una teoria più generale, quella di Dirac: è una nuova dinamica, "rivoluzionaria" rispetto alla meccanica classica e alla stessa dinamica relativistica elaborata solo una ventina d'anni prima. La dinamica delle matrici non può essere sussunta, non è inquadrabile all'interno di una "meccanica" nel senso che questa parola storicamente ha e ha avuto in stretta connessione con la cosiddetta concezione meccanicistica della natura.<sup>11</sup> Heisenberg partiva dalla prospettiva epistemologica che bisognasse limitarsi, in quanto al requisito di significato fisico, alle sole grandezze effettivamente osservabili, e nei fenomeni atomici e microfisici queste erano soltanto quelle legate all'emissione e all'assorbimento di radiazione elettromagnetica, che sole ci danno informazioni di essi: le grandezze meccaniche dovevano quindi essere ridefinite a partire da grandezze elettromagnetiche; la meccanica non era più la disciplina fondamentale della fisica, e l'elettromagnetismo veniva a ricoprire questo ruolo come nella concezione elettromagnetica della natura sviluppata verso fine Ottocento e inizio Novecento (concezione che aveva condotto Poincaré

---

<sup>7</sup> Si veda anche: G. Tagliaferri, *Storia della fisica quantistica - Dalle origini alla meccanica ondulatoria*, F. Angeli, Milano 1985, pp. 423-438.

<sup>8</sup> Il testo della lettera di Pauli a Jordan è stato pubblicato in: B. L. van der Waerden, *From Matrix Mechanics and Wave Mechanics to Unified Quantum Mechanics*, in *The Physicist's Conception of Nature*, ed. J. Mehra, Reidel, Dordrecht 1973, pp. 276-293. C. Eckart, *Operator Calculus and the Solution of the Equation of Motion of Quantum Dynamics*, in *Physical Review* **28** (1926), pp. 711-726 (una prima nota preliminare era stata pubblicata in *Proc. Nat. Acad. Sci.* **12** (1926), p. 473).

<sup>9</sup> F. A. Muller, *The Equivalence Myth of Quantum Mechanics, I & II*, in *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. **28** (1997) pp. 35-61 e v. **28** (1997) pp. 219-247 e riferimenti ivi citati. Più radicale, per certi versi, appare la negazione dell'equivalenza in: N. Hanson, *The Concept of the positron. A philosophical analysis*, Cambridge University Press, Cambridge 1963, tr. it. a cura di I. Zucchetto, *Il concetto di positrone*, Piovani, Abano 1989, pp. 151-173.

<sup>10</sup> Per tutto questo problema dell'equivalenza, mi permetto di rimandare al mio seguente lavoro (e ai riferimenti ivi citati): E. Giannetto, *La rivoluzione della meccanica delle matrici di Heisenberg, Born e Jordan*, in W. Heisenberg, *Lo sfondo filosofico della fisica moderna*, a cura di G. Gembillo e E. Giannetto, Sellerio, Palermo 1998, pp. 25-37.

<sup>11</sup> Si vedano: E. A. Giannetto, *La meccanica classica: da Galilei a Newton*, in *Verso il '99*, Comune di Pavia, Pavia 1998, pp. 29-35; E. Giannetto, *Max Born, il caos ed il mito del determinismo meccanicista*, in *Chaos, Fractals, Models*, a cura di F. Marsella Guindani & G. Salvadori, Italian University Press, Pavia 1998, pp. 169-184; E. A. Giannetto & G. Bonera,

alla formulazione della nuova dinamica relativistica, poi ripresa da Einstein, a cui fa riferimento direttamente Heisenberg).<sup>12</sup>

Il linguaggio algebrico della meccanica matriciale è, ai suoi inizi, strutturalmente (sintatticamente) discreto, e, essendo caratterizzato dalle relazioni di generale non-commutatività delle matrici, de-costruttivo dell'ontologia della fisica classica continuista, causale, reversibilista e determinista, che si traduceva nel linguaggio analitico delle equazioni differenziali; anche lo spazio-tempo classico quale “contenitore”, forma di determinazione del moto, dei processi fisici, non è più definibile ed è del tutto eliminato.

Non crolla solo il concetto di posizione di una particella in moto ad un certo istante, per cui il moto non è riducibile ad una serie di stati istantanei e ha una sua realtà processuale irriducibile di transizione, ma crollano anche il concetto di spazio-tempo come geometria globale, il concetto di punto spaziale e il concetto di evento istantaneo, in quanto non hanno una loro universale caratterizzabilità sperimentale, una loro misurabilità effettiva indipendente dai processi fisici.

Al contrario, la meccanica ondulatoria nell'interpretazione di Schrödinger era sorta per ripristinare l'intuibilità o la “visualizzabilità” teorica di una realtà fisica continua, descrivibile in termini spazio-temporali, secondo il principio di causalità, di reversibilità temporale, e del determinismo meccanicistico classico seppure in termini di particelle-"atomi" da considerare quali onde materiali (inizialmente era basata su un'algebra commutativa delle grandezze fisiche, e gli operatori saranno introdotti da Schrödinger solo come mossa *ad hoc* per stabilire la pretesa equivalenza con la meccanica delle matrici; e solo dopo Born mostrerà l'impossibilità di dare un'interpretazione "materialistica" delle onde, introducendo l'interpretazione probabilistica, mai accettata fino in fondo da Schrödinger).

Il mito dell'equivalenza della meccanica ondulatoria e della meccanica delle matrici non gioca quindi solo un ruolo nel caratterizzare l'unità della nuova meccanica, ma anche nel rendere ‘innocuo’ lo scostamento dalla meccanica classica, nel ridurre o abolire la frattura implicita nella meccanica delle matrici: al di là delle differenze segnalate dallo stesso Schrödinger, la meccanica ondulatoria può essere pensata in continuità storica, attraverso un'evoluzione lineare, con la stessa meccanica classica. Il fenomeno di radicamento storico di una qualsiasi frattura, di una qualsiasi “rivoluzione”, potrà essere paradossalmente scambiato con il riconoscimento di validità, seppure limitata storicamente e teoreticamente, del precedente “canone” di conoscenze rappresentato dalla meccanica classica come un

---

*Scienza, Cristianesimo e Incanto del Mondo. Per un'interpretazione del 'Tractatus De Sex Dierum Operibus' di Teodorico di Chartres*, in *Cultura e Spiritualità*, a cura di L. Valle, Nardini, Firenze 1999, pp. 201-241.

<sup>12</sup> E. Giannetto, *Henri Poincaré and the rise of special relativity*, in *Hadronic Journal Supplement* **10** (1995), 365-433.

“antico testamento”. Il “mito dell’equivalenza” è quindi il ‘nucleo centrale’ del più vasto “mito delle origini” della meccanica quantistica.

## 2. Il tempo come matrice infinita nelle relazioni d’indeterminazione di Heisenberg

L’analisi della Beller della nascita delle relazioni d’indeterminazione cade proprio in questo mito, nel momento in cui dà per scontata questa equivalenza o ritiene comunque inessenziale per la comprensione di queste relazioni le differenze e le contrapposizioni fra meccanica delle matrici e meccanica ondulatoria. All’interno di questo mito delle origini della meccanica quantistica non è possibile comprendere pienamente il significato e la nascita delle relazioni d’indeterminazione.

Riconsiderare questo problema storico non ha solo rilevanza per “coprire” un particolare periodo della produzione scientifica di Werner Heisenberg per evidenziarne alcuni contributi fondamentali o per una sua mera “ricostruzione storiografica”, ma ha anche un senso profondo per riportare alla luce la reale portata “rivoluzionaria” della sua prospettiva di quegli anni, legata alla meccanica delle matrici, poi ricoperta dalla sabbia della storia per la “restaurazione” operata da tutta la comunità scientifica dei fisici e successivamente anche da quella degli storici. E la “rivoluzione” operata da Heisenberg nella nostra percezione-concezione della natura ha grande importanza per le nostre relazioni con la natura, per le nostre vite. Qui, mi limiterò, comunque, solo ad una breve analisi storica del percorso complesso che ha portato dalla meccanica delle matrici alle relazioni d’indeterminazione, e non discuterò queste in tutte le loro implicazioni storiche, fisiche, epistemologiche né direttamente il lavoro in cui sono formulate per la prima volta.

Certamente, l’articolo di Heisenberg del 1927 in cui sono presentate per la prima volta le relazioni d’indeterminazione, intitolato *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*,<sup>13</sup> nasce, come afferma la Beller, dalla ‘polifonia’ di una rete di dialoghi che Heisenberg intrattiene direttamente (attraverso quanto possiamo ricostruire dall’epistolario) e indirettamente (attraverso la lettura di testi) con vari altri scienziati: Pauli, Born, Jordan, Bohr, Dirac, Schrödinger, Campbell, Sentfleben, e altri; tuttavia, va inquadrato all’interno della sua prospettiva alla base della meccanica delle matrici, come tentativo di darle un pieno e intuitivo significato fisico, anche in risposta alle obiezioni di Schrödinger.

Come in parte ricostruito dalla Beller, il retroterra dell’articolo con le relazioni d’indeterminazione di Heisenberg è abbastanza complesso.

---

<sup>13</sup> W. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, in *Zeitschrift für Physik* **43** (1927), pp. 172-198, tr. it. di G. Gregorio, C. Staiti, e G. Gembillo (a cura di), *Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica quantoteoriche*, in *Indeterminazione e realtà*, Guida, Napoli 1991, pp. 35-67.

Il problema del concetto di tempo giocò un ruolo di grande rilevanza. Già Pauli, in una lettera a Bohr del 17 Novembre 1925, aveva adombrato l'idea di definire il tempo in termini dell'energia, e nell'articolo dell'enciclopedia del 1926 aveva evidenziato come le transizioni energetiche non fossero descrivibili secondo i tempi esatti, come vi fossero un'impresione dell'istante della transizione e un problema sulla durata di essa.<sup>14</sup>

Verso la fine del 1925 e l'inizio del 1926, Born e Wiener avevano sviluppato la teoria degli operatori e avevano ricavato una relazione operatoriale del tipo:<sup>15</sup>

$$Dq - qD = dq/dt$$

dove  $D = d/dt$ .

In risposta ad una lettera di Heisenberg del 27 Gennaio 1926, Pauli, in una lettera datata 31 Gennaio 1926,<sup>16</sup> dà una nuova definizione fisica del tempo attraverso la relazione, in un formalismo di tipo matriciale,

$$Wt - tW = I h/(2\pi i)$$

dove  $W$  indica l'energia.

Dirac, nella sua teoria delle trasformazioni, aveva puntualizzato come la funzione d'onda di Schrödinger non corrispondesse ad altro che a una trasformazione da uno schema a posizione diagonale ad uno ad energia diagonale nel linguaggio delle matrici: ciò implicava per Heisenberg che il concetto fondamentale della meccanica ondulatoria era riconducibile alla meccanica delle matrici. E, ancora di più, Dirac aveva tentato di dare una generalizzazione relativistica della sua meccanica dei q-  
numeri, definendo un nuovo "quantum time" a partire dalla relazione:<sup>17</sup>

$$tW - Wt = -ih$$

Nell'articolo del 1927, Heisenberg partirà da questa relazione di Pauli e Dirac che implica questo nuovo concetto di tempo quantistico (relativistico).

In una lettera a Pauli del 28 Ottobre del 1926,<sup>18</sup> Heisenberg parla di spazio e tempo (come *continuum*) come concetti statistici quali la temperatura e la pressione, senza significato per un corpuscolo individuale: concetto questo ripreso anche dalla critica di Campbell del concetto di tempo nella meccanica matriciale.

<sup>14</sup> W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.I-II-III*, K. von Meyenn, ed., Springer-Verlag, Berlin 1979-1985-1993, v. I, pp. 257-261; W. Pauli, *Quantentheorie*, in *Handbuch der Physik*, H. Geiger & K. Scheel, eds., v. 23, Springer-Verlag, Berlin 1926, pp. 1-278.

<sup>15</sup> M. Born & N. Wiener, *A new formulation of the laws of quantization of periodic and aperiodic phenomena*, J. Math. & Phys. M.I.T. **5** (1926) pp. 84-98.

<sup>16</sup> W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.I-II-III*, op. cit., v. I, pp. 281-288.

<sup>17</sup> P. A. M. Dirac, *Relativistic quantum mechanics*, Proc. Roy. Soc. of London **A111** (1926) pp. 405-423.

<sup>18</sup> W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.I-II-III*, op. cit., v. I, pp. 349-351.

Nella lettera a Pauli del 23 Novembre 1926,<sup>19</sup> Heisenberg scrive che “è completamente impossibile che il mondo sia continuo e “che cosa significhi la parola ‘onda’ o ‘corpuscolo’ non si sa più”. E ancora: “se lo spazio-tempo è discontinuo, la velocità in un punto definito non può avere alcun significato, perché, per definire la velocità in un punto, vi è bisogno di un secondo punto infinitamente vicino al primo: cosa impossibile in un mondo discontinuo”.

Matematicamente, la riflessione di Heisenberg si può così tradurre:

$$v = ds/dt$$

e questo rende impossibile anche la definizione della quantità di moto; ed essendo

$$E = h \omega / (2\pi) = d\theta/dt \cdot h / (2\pi)$$

ovvero, essendo la pulsazione  $\omega$  associata ad una velocità angolare, anche la definizione dell’energia diventa impossibile, se lo spazio-tempo è discontinuo. Non è possibile effettuare il limite del rapporto incrementale che definisce la velocità: gli intervalli temporali, come quelli spaziali o angolari non possono tendere a zero, e alle discontinuità matematiche corrispondono indeterminazioni sperimentali finite e irriducibili delle grandezze fisiche:

$$\Delta q \Delta p \sim h$$

$$\Delta E \Delta t \sim h$$

Qui è chiara quale sia l’origine concettuale delle relazioni d’indeterminazione, per le quali non è possibile determinare simultaneamente posizione e quantità di moto, energia e tempo di una particella microfisica: la discontinuità dello spazio-tempo (come si manifesta sperimentalmente attraverso l’interazione finita della misura del mondo microfisico attraverso radiazione elettromagnetica, evidenziata poi nell’articolo del 1927).

In un’altra lettera di Heisenberg a Pauli, datata 5 Febbraio 1927,<sup>20</sup> vi è scritto: “che significa la probabilità di una posizione quando la posizione non è definita appropriatamente?” Qui si fa cenno ad una circolo vizioso intrinseco all’interpretazione di Born dell’equazione di Schrödinger, che poi invece von Weizsäcker interpreterà alla Bohr come una ‘complementarità’ circolare.<sup>21</sup>

E nella lettera a Pauli del 23 Febbraio 1927,<sup>22</sup> Heisenberg, accennerà ai limiti quanto-meccanici nella misura in analogia a quelli termodinamici.

<sup>19</sup> W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.I-II-III*, op. cit., v. I, pp. 357-360.

<sup>20</sup> W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.I-II-III*, K. von Meyenn, ed., op. cit., v. I, pp. 373-376.

<sup>21</sup> M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 102-104.

<sup>22</sup> W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.I-II-III*, K. von Meyenn, ed., op. cit., v. I, pp. 376-382.

Da Sentfleben, come nota la Beller, Heisenberg riprenderà anche la critica del principio di causalità.<sup>23</sup>

E forse l'evento paradossalmente più rilevante è l'assenza di Bohr da Copenhagen per un breve periodo che permetterà ad Heisenberg di scrivere il suo fondamentale articolo del 1927.<sup>24</sup>

Heisenberg, dalla meccanica delle matrici, che comportano una discontinuità delle grandezze fisiche in accordo a quanto è misurabile e un'evoluzione temporale delle grandezze non esprimibile attraverso funzioni continue del tempo, perviene ad una nuova concezione discontinua della realtà fisica, ad una nuova concezione discontinua dello spazio-tempo, ad una nuova concezione quantistica del tempo. Il tempo non è più un numero, non è più una variabile continua di un osservatore esterno: è il tempo interno dei processi, è un'intera matrice di processi, da cui dipendono tutte le matrici. Da tutto questo deriva l'impossibilità di ridurre il moto ad uno stato, ovvero di poter precisare lo 'stato di moto' che era stata la base su cui Galilei e Newton avevano approntato la geometrizzazione del moto oltre che dello spazio come momento fondante della matematizzazione della fisica e della natura. Derivano quindi le relazioni d'indeterminazione. Deriva quindi il crollo della geometria e dell'analisi come linguaggi matematici della fisica: l'algebra come scienza di un tempo come matrice infinita è il solo linguaggio possibile per la fisica. Deriva il crollo del principio di causalità e del principio del determinismo fisico, come anche della spiegazione causale, della predicibilità e della concezione materialistico-meccanicistica della natura ad essi legati, ovvero delle basi stesse della scienza moderna.

Come è noto, tornerà Bohr a Copenhagen, 'rimprovererà' Heisenberg e lo inviterà a non pubblicare l'articolo con le relazioni d'indeterminazione: lo porterà al pianto, ma Heisenberg non cederà e aggiungerà solo una postilla al suo articolo che dà conto della prospettiva di Bohr.<sup>25</sup>

---

<sup>23</sup> Per la discussione più approfondita di tutti questi 'dialoghi', si rimanda al testo della Beller citato alla nota 1.

<sup>24</sup> M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 323-361; M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 55-107: a questi testi si rimanda per un racconto più dettagliato e per la discussione sulle relazioni d'indeterminazione.

<sup>25</sup> M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, op. cit., p. 65. Max Jammer fa notare che Heisenberg usa in tedesco vari termini per presentare le sue relazioni o per farvi riferimento: *Ungeauigkeit* ('inesattezza', 'imprecisione', il più usato: contando le sue occorrenze insieme a quelle del suo opposto *Genauigkeit* compare più di trenta volte), *Unbestimmtheit* ('indeterminazione', due volte), *Unsicherheit* ('incertezza', tre volte). Nonostante le differenze epistemologiche insite nei diversi termini in sé, le differenze di contesto per l'uso dei vari termini nell'articolo non sembrano indicare in Heisenberg una consapevole scelta differenziata di essi: l'unica cosa certa è che l'uso di questi termini in Heisenberg ne 'tradisce' l'interpretazione delle relazioni in termini di inesattezze o imprecisioni inevitabili sulle grandezze fisiche legate al disturbo dell'atto di misura (incertezza invece è più legato all'ignoranza soggettiva dello sperimentatore, mentre indeterminazione all'assenza 'intrinseca' di valori esatti per le grandezze fisiche). Questa interpretazione non è in contrasto, in Heisenberg, con l'idea che le 'indeterminazioni' sulle grandezze fisiche hanno un'origine 'intrinseca' e *non possono essere causate* dal disturbo dell'atto di misura (al contrario, secondo Bohr più propriamente le 'incertezze' sono legate alla non-separabilità 'soggetto-oggetto' fra sperimentatore e sistema fisico osservato - per l'enfasi posta da Bohr sul soggetto che conosce - come potrebbe essere indicato dal fatto che nella Postilla finale dell'articolo di Heisenberg che tiene conto delle critiche fattegli immediatamente da Bohr, compare appunto il termine *Unsicherheit*). Come ancora fa notare Jammer, Heisenberg nel 1927 introdusse delle 'quasi-uguaglianze', mentre le disuguaglianze vere e proprie furono introdotte subito dopo da Weyl su

L'interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica è un'invenzione storiografica che fa anch'essa parte del mito delle origini. L'interpretazione che sarà accettata è quella di Bohr che, attraverso il "principio di complementarità" salverà la continuità delle grandezze fisiche classiche, la descrizione spazio-temporale continua e la causalità anche se in una complementarità in cui si escludono mutuamente quando applicate; salverà complementariamente il modello corpuscolare e il modello ondulatorio, ma anche la geometria e l'analisi, la meccanica ondulatoria e la meccanica delle matrici ponendo le basi delle successive sintesi astratte della meccanica di Dirac e di von Neumann. La meccanica astratta degli operatori e degli stati si staccherà dalle basi sperimentali di fondamento elettrodinamico, date da Heisenberg. Il tempo, non più tempo interno dei processi come nell'originaria concezione delle relazioni d'indeterminazione, sarà di nuovo ridotto ad un parametro matematico assoluto e vuoto di un "soggetto fisico" di misura macroscopico, e la reversibilità temporale sarà ripristinata falsando la matematica e la storia considerando come erronee le precedenti prospettive di Dirac ed Heisenberg sul tempo solo perché non trovano posto nel nuovo formalismo.

E anche Heisenberg via via cambierà idea e accetterà la nuova meccanica quantistica. Sarà la "restaurazione" dopo la vera rivoluzione di Heisenberg del 1925-1927. E la "rivoluzione" operata da Heisenberg nella nostra percezione-concezione della natura sarà come cancellata: senza il tempo come *matrice infinita* dei processi fisici, la natura tornerà ad essere considerata nuovamente senza una "vita" e un'attività interna propria, anche se non riconducibile ad una macchina classica; la natura sarà ridotta ancora a "natura morta", a simulacro, a modello di una forma matematica astratta e vuota, ancora oggetto manipolabile (seppure ad un livello più alto di quello classico) dalla volontà di potenza umana.

Restituire le relazioni d'indeterminazione alla prospettiva storica della meccanica delle matrici significa recuperare il cambiamento dei rapporti fra matematica e fisica che questa implicava: come nel caso della relatività che comportava il cambiamento della geometria e l'assunzione di una "geometria fisica" scelta in base alla sua sperimentabilità, così l'aritmetica e l'algebra nel caso della meccanica

---

indicazione di Pauli. Dal punto di vista storico, né Heisenberg né Bohr inizialmente parlarono di principio, ma di relazioni ricavate (come conseguenze, 'teoremi') da altri principi. Il 'battesimo' quale 'principio', che sarà decisivo per la terminologia prevalente fra i fisici ancora oggi avvenne comunque nello stesso 1927, da parte di un altro fisico, A. E. Ruark, che scrisse un articolo in inglese così intitolato: *Heisenberg's indetermination principle and the motion of free particles*, Bulletin of the American Physical Society **2** (1927), p. 16. Per una generale discussione filosofico-epistemologica delle relazioni d'indeterminazione, si rimanda a: E. Giannetto, *Il crollo del concetto di spazio-tempo negli sviluppi della fisica quantistica: l'impossibilità di una ricostruzione razionale nomologica del mondo*, in *Aspetti epistemologici dello spazio e del tempo*, a cura di G. Boniolo, Borla, Roma 1987, 169-224 e riferimenti ivi citati; E. Giannetto, *L'epistemologia quantistica come metafora antifondazionistica*, in *Immagini Linguaggi Concetti* (a cura di S. Petruccioli), Theoria, Roma 1991, pp. 301-322, e riferimenti ivi citati; E. Giannetto, *Heidegger and the Question of Physics*, in *Proceedings of the 'Conference on Science and Hermeneutics. Veszprem 1993*, M. Feher, O. Kiss & L. Ropolyi eds., Reidel, Dordrecht 1998, pp. 207-225.

delle matrici non potevano essere più date a priori, dovevano essere scelte in relazione agli esperimenti, e ciò portava ad un'aritmetica e ad un'algebra "quantistiche" o dei "numeri quantistici" (matrici o "q-numbers"). La rivoluzionaria conseguenza di ciò è il ribaltamento dei rapporti tra "logos mathematikhòs" e "physis", che poi sarà effettuato dagli approcci radicali di "logica quantistica".<sup>26</sup>

Si tratta di restituire alla "rivoluzione quantistica", a questo passaggio dalla meccanica delle matrici alle relazioni d'indeterminazione come sua base fisica, la loro estrema radicalità originaria; di riconsiderare completamente lo stesso nostro modo di rapportarci alla natura e da un punto di vista epistemologico e da un punto di vista che non potrà non essere anche etico. Recuperare l'originaria prospettiva "rivoluzionaria" di Heisenberg significa poter recuperare una nuova idea di scienza con la fine della illusoria "epoca moderna delle immagini del mondo" (in cui si tentava di ridurre la natura ad immagine delle realizzazioni tecniche dell'uomo) nel riconoscimento dei limiti delle determinazioni sperimentali e delle rappresentazioni matematiche della natura (per la sua radicale indeterminazione ontologica che non è descrivibile in un qualsiasi spazio di rappresentazione), come anche del crollo del paradigma del dominio tecnico-economico della natura, della teologia e dell'etica che le ispiravano: la natura, come *matrice infinita*, nella sua indeterminazione fondamentale non potrà più essere oggetto inerte e passivo delle nostre rappresentazioni meccaniciste come delle nostre correlate manipolazioni tecnologiche. Significa infine poter recuperare una nuova prospettiva etica verso la natura quale realtà non-separabile e non separata da noi,<sup>27</sup> non oggetto da comprendere-dominare ma da rispettare (come la "Grande Madre" dei miti arcaici) quale nostra reale *matrice cosmica* cui apparteniamo.

---

<sup>26</sup> D. Finkelstein, *Matter, Space and Logic*, in *Boston Studies in the Philosophy of Science* 5 (1969), p. 199; M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 340-416; E. Giannetto, *On Truth: A Physical Inquiry*, in *Atti del Congresso "Nuovi Problemi della logica e della filosofia della scienza"* (a cura di C. Cellucci & M. Dalla Chiara), Clueb, Bologna 1991, pp. 221-228; E. Giannetto, *La logica quantistica tra fondamenti della matematica e della fisica*, in *Proceedings of the Conference on 'Foundations of Mathematics & Physics'*, Perugia 1989, U. Bartocci & J. P. Wesley (eds.), B. Wesley, Blumberg 1990, 107-127; E. Giannetto, *The Epistemological and Physical Importance of Gödel's Theorems*, in *First International Symposium on Gödel's Theorems*, ed. by Z. W. Wolkowski, World Scientific, Singapore 1993, pp. 136-147.

<sup>27</sup> E. Giannetto, *Some Remarks on Non-Separability*, in *The Foundations of Quantum Mechanics*, C. Garola & A. Rossi (eds.), Kluwer, Dordrecht 1995, 315-324 e riferimenti ivi citati