

## L'incertezza dell'incertezza

### - Divagazioni tra scienza e filosofia sul "Principio di indeterminazione"

- di Roberto Giusti<sup>1</sup>

“Più precisamente (*genauer*) viene determinata la posizione, tanto più imprecisa (*ungenauer*) è la conoscenza dell'impulso e viceversa” (p. 49). Questa è la definizione del cosiddetto "principio di indeterminazione" introdotto da Werner Heisenberg nel 1927 in un celebre articolo che, fin dal titolo, ha destato non poche incertezze interpretative. E non è per ironia della sorte se il principio di indeterminazione è legato mani e piedi all'incertezza, a partire dall'espressione "principio di indeterminazione" che non compare nel testo. *Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, così suona il titolo, cioè *Sul contenuto anschaulich della cinematica e meccanica teoretico-quantistiche*. L'aggettivo, che letteralmente significa "intuitivo", ha fatto ammattire i traduttori: è tradotto come "On the physical content ...",<sup>2</sup> "On the perceptual content ..."<sup>3</sup>, una traduzione della Nasa addirittura propone "The actual content..."<sup>4</sup>. Le due edizioni italiane che ho consultato<sup>5</sup> lo rendono letteralmente con "intuitivo", traduzione corretta ma che, per quanto dirò, sarebbe preferibile sostituire con "fenomenico".

---

<sup>1</sup> Docente di Filosofia e Storia presso il Liceo Scientifico "G. Galilei" di Macerata

<sup>2</sup> Wheeler J.A. e Zurek, W.H., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983, dove è fornita la traduzione del testo di Heisenberg (pp. 62-84) scaricabile in [https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1477873/mod\\_forum/attachment/337596/John%20Archibald%20Wheeler%20and%20Wojciech%20Hubert%20Zurek-Quantum%20Theory%20and%20Measurement-Princeton%20univ%20press%20%281983%29.pdf](https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1477873/mod_forum/attachment/337596/John%20Archibald%20Wheeler%20and%20Wojciech%20Hubert%20Zurek-Quantum%20Theory%20and%20Measurement-Princeton%20univ%20press%20%281983%29.pdf).

<sup>3</sup> David Cassidy (*Uncertainty, the Life and Science of Werner Heisenberg*, Freeman, New York 1992)

<sup>4</sup> <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19840008978>

<sup>5</sup> Gregorio G. Saiti C. Gembillo G., "Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica quantoteoriche", in *Indeterminazione e realtà*, Guida, Napoli 1991, pp. 35-67; Boffi Sigfrido, "Il contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica", in *Il principio di indeterminazione*, Università degli Studi di Pavia 1990, pp. 45-74 (<http://www2.pv.infn.it/~boffi/Werner.pdf>). A quest'ultima edizione italiana mi riferisco nelle citazioni del testo. Così anche la tr. francese: "Sur le contenu intuitif..." ([http://iftucl.org/IFT/Heisenberg\\_files/Heisenberg\\_francais.pdf](http://iftucl.org/IFT/Heisenberg_files/Heisenberg_francais.pdf)). Per il testo originale tedesco: <https://people.isy.liu.se/jalar/kurser/QF/references/Heisenberg1927.pdf>.

E poi "indeterminazione". In realtà il termine più usato (13 volte) è *Ungeauigkeit*, traducibile con "imprecisione", "incertezza", mentre *Unbestimmtheit*, che letteralmente significa "indeterminazione", ricorre solo due volte insieme all'aggettivo *unbestimmt* che ne ricorre sei. Per non farsi mancare niente, Heisenberg per due volte usa pure *Unsicherheit*, incertezza, ed una volta *Unsicherheitsrelation*, relazione di incertezza, espressione tradotta nell'edizione francese ed italiana con "relazione di indeterminazione", (p. 74) e in quella inglese con "relazione di incertezza" (*uncertainty relation*, p. 83).

L'oscillazione terminologica che si riscontra in Heisenberg e nelle scelte dei traduttori non è casuale, ma evidenzia una "incertezza" nella determinazione dell'incertezza sintomatica delle profonde e decisive questioni filosofiche in gioco: che cos'è la realtà? che significa conoscere la realtà? che rapporto c'è tra la conoscenza della realtà e la realtà conosciuta? Incertezza e indeterminazione sono la stessa cosa<sup>6</sup>?

No, non sono affatto la stessa cosa. L'incertezza può essere interpretata in due modi: 1) in senso classico: "è incerto se domani pioverà", il "soggetto" cosciente non ha le informazioni sufficienti per stabilire se pioverà o non pioverà, motivo per cui la sua conoscenza dell'"oggetto" è indeterminata e probabilistica, anche se la situazione nell'"oggetto" è pienamente determinata, essendo le cause che produrranno la pioggia o il bel tempo perfettamente presenti in esso. 2) Indeterminazione soft. L'incertezza è dovuta all'interferenza della misurazione, al fatto che il soggetto, nell'osservare l'oggetto (che quindi si presenta come dato e costituito nel suo essere, anche se "oggettivamente" inconoscibile), lo perturba e lo modifica nel suo stato. Ma 3) l'indeterminazione è altra cosa, non è solo l'incertezza conseguente alla perturbazione causata da un eventuale processo di misurazione, ma è inerente al sistema, è la "realtà" così com'è ad essere "indeterminata" (indeterminazione hard).

Le tre concezioni corrispondono a tre rispettive ontologie: 1) quella del realismo ingenuo, che crede che l'oggetto sia lì di fronte a noi e conoscibile in

---

<sup>6</sup> Le traduzioni inglesi, e non è un caso, sono a tale proposito "incerte", vanno da *Uncertainty* (si veda ad esempio la voce "Heisenberg" dell'Encyclopedia Britannica (<https://www.britannica.com/biography/Werner-Heisenberg#ref524688>), oppure la voce "The Uncertainty Principle" della *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (<https://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/>)) oppure il titolo della biografia su Heisenberg di David Cassidy, op.cit., a *Indeterminacy* (per intuire la confusione si veda ad esempio Wheeler, J.A. e Zurek, W.H., op.cit., dove basta scorrere l'indice per vedere come la traduzione oscilla tra *Uncertainty* e *Indeterminacy*). *Indeterminacy* è utilizzato in quella che potrebbe essere la prima presentazione in lingua inglese del principio (*I shall here call it the "principle of indeterminacy"* (Arthur Eddington, *The nature of the physical World*, 1928, p. 110 (<http://henry.pha.jhu.edu/Eddington.2008.pdf>)).

sé senza essere perturbato. È questo il presupposto ontologico di Einstein che lo spinge a rifiutare la meccanica quantistica ritenendola una teoria incompleta. *"If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity"*<sup>7</sup>; 2) quella del realismo problematico, che crede sì che l'oggetto sia di fronte a noi come dato, ma che sia in sé inconoscibile a causa della perturbazione dell'osservazione; 3) quella del fenomenismo in senso kantiano, per cui l'oggetto della conoscenza è in *relazione* costitutiva con il soggetto conoscente, non c'è oggetto senza soggetto insomma.

In Heisenberg coesistono le concezioni 2) e 3) creando problemi interpretativi notevoli. Ad esempio si consideri una frase apparentemente innocua come questa: "Si illumini per esempio l'elettrone e lo si osservi al microscopio" (p. 48), il linguaggio è quello del realismo, e il lettore immagina che ci sia una particella-oggetto chiamata "elettrone" in attesa che l'osservatore indirizzi su di essa lo strumento di misurazione. Ora si confronti quella frase con quest'altra: "Io credo che l'origine dell'"orbita" classica si possa formulare concisamente così: l'"orbita" nasce solo in quanto la si osserva" (p. 61, ted 185). Insomma Heisenberg oscilla, almeno inizialmente, tra un "principio di incertezza" ed un "principio di indeterminazione", per decidersi infine, come vediamo nel testo del 1958 *Fisica e filosofia*, verso quest'ultimo. E la questione si gioca tutta sulla "perturbazione".

Parlare di perturbazione dell'osservatore è infatti ambiguo, perché lascia ritenere che l'osservatore intervenga, perturbandola, su una realtà in sé, già costituita. E questa dell'"interpretazione a disturbo" sembra essere stata la prima lettura interpretativa del principio di indeterminazione. Lo dimostra lo studio divulgativo dell'eminente astrofisico Arthur Eddington che già nel 1928 scriveva: *"But in any such interaction a complete quantum is involved; and the passage of this quantum, altering to an important extent the conditions at the moment of our observation, makes the information out of date even as we obtain it"* (p. 112), *"Thus the condition of our ascertaining the position is that we disturb the electron in an incalculable way which will prevent our subsequently ascertaining how much momentum it had"* (p. 112)<sup>8</sup>. In realtà nel testo

---

<sup>7</sup> A.Einstein, B.Podolsky and N.Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", in Physical Review, 1935, ([https://pdfs.semanticscholar.org/5c2e/af621c5a7d7d02e53e40ba74177c79d759b5.pdf?\\_ga=2.263254030.349369830.1571829067-1671773395.1570464365](https://pdfs.semanticscholar.org/5c2e/af621c5a7d7d02e53e40ba74177c79d759b5.pdf?_ga=2.263254030.349369830.1571829067-1671773395.1570464365))

<sup>8</sup> *The nature of the physical World*, op.cit. Hans Reichenbach nel 1944: *"The objet is disturbed by the means of observation"* (*Philosophic foundations of quantum mechanics*, (p.14, <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.212027/page/n30>). E più recentemente: "Misurando la posizione di un elettrone causiamo sempre una qualche perturbazione nel

del 1927 di Heisenberg il ruolo della “perturbazione” (*Störung*) è del tutto marginale: compare solo due volte, p. 59 (183 ted.) e p. 70 (193 ted.) e non in passaggi decisivi, ma certo non contribuisce alla chiarezza.

\*\*\*

Ad intricare ancor di più la questione, nel 1933, nel discorso tenuto da Heisenberg nel ricevere il Premio Nobel per la fisica per l'anno 1932, il concetto diventa invece centrale: *perturbation* e *disturbance* ricorrono 7 volte, per indicare appunto la perturbazione dell'osservazione: “*Whereas in the classical theory the kind of observation has no bearing on the event, in the quantum theory the disturbance associated with each observation of the atomic phenomenon has a decisive role*” (p.33)<sup>9</sup>. Se guardiamo però il libro del 1958 *Fisica e filosofia*<sup>10</sup>, si può notare (con sorpresa?) che non si parla più di perturbazione e disturbo dell'osservazione. Ma ci si esprime così: entrare in contatto (“che il nostro oggetto deve entrare in contatto (*has to be in contact*) con l'altra parte del mondo, cioè con l'apparato sperimentale”, p. 68); influenza (“questo significa che l'equazione di moto per la funzione di probabilità deve ora contenere l'influenza dell'interazione (*the influence of the interaction*) con lo strumento di misurazione” p. 68); interazione (*interaction*, pp. 69, 70). Non è un caso che nel testo del 1933 sia completamente assente il riferimento all'idea di potenza-possibilità sviluppato compiutamente in *Fisica e filosofia* ma già accennato in un passaggio decisivo nel testo del 1927.

“Perciò ogni osservazione è una scelta all'interno di una totalità di possibilità, e una limitazione di possibilità future” (p. 73). Osservare dunque non è “perturbare” l'oggetto di osservazione, ma *scegliere* tra le infinite possibilità in cui l'oggetto potrebbe presentarsi quelle e solo quelle determinate dall'apparato di misurazione utilizzato (è chiaro qui il riferimento al “principio di complementarità” di Bohr). In altre parole, l'osservazione non modifica un presunto oggetto già dato (come nel caso presupposto dal realismo ingenuo e problematico), ma permette la *manifestazione* dell'oggetto, il suo ap-

---

suo moto” (Greene B., *L'universo elegante*, Einaudi, Torino 2003, p. 97). Il processo di misura in un sistema *entangled* impone di rinunciare definitivamente all’“interpretazione a disturbo” (cfr. Ghirardi G.C., *Un'occhiata alle carte di Dio*, il Saggiatore, Milano 2009, pp. 168-169). Anche Bohr nel 1929 parla di interferenza/disturbo (*I quanti e la vita*, Boringhieri, Torino 2012, p. 10, cfr. 21, 43), per poi riconoscere l'ambiguità dell'espressione (p. 65).

<sup>9</sup> *The development of quantum mechanics, Nobel Lecture*, December 11, 1933, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/heisenberg-lecture.pdf>, tr.it. <http://www2.pv.infn.it/~boffi/Werner.pdf>

<sup>10</sup> *Fisica e filosofia*, tr.it. il Saggiatore, Milano 1994; ed. ingl.

<http://www.naturalthinker.net/trl/texts/Heisenberg,Werner/Heisenberg,%20Werner%20-%20Physics%20and%20philosophy.pdf>

parire, il suo *fenomenizzarsi*. L'osservazione/misurazione svolge precisamente il ruolo di condizione trascendentale di possibilità (in senso kantiano) dell'oggetto di conoscenza. Heisenberg purtroppo (non si può essere perfetti!)<sup>11</sup> non coglie questo collegamento, e in *Fisica e filosofia* si richiama invece alla *potentia* aristotelica. L'onda di probabilità è "una versione quantitativa del vecchio concetto di potenza della filosofia aristotelica. Introduceva qualche cosa che stava a metà fra l'idea d'un evento e l'evento reale, uno strano tipo di realtà fisica a metà strada fra possibilità e realtà" (p. 54, cfr. 61, 68, 70).

Ora, al di là della fedeltà (discutibile) al concetto aristotelico, quello che è interessante notare è innanzitutto che Heisenberg, richiamandosi ad Aristotele, coglie la portata ontologica dei problemi aperti dalla meccanica quantistica (in fondo ogni fisica presuppone una metafisica!) e, in secondo luogo, lega l'indeterminazione ad una condizione dell'essere e non ad una perturbazione dell'osservazione. Il problema, però, è che, quella aristotelica, è un'ontologia della sostanza - e non della relazione, come invece quella kantiana -, e il fatto che la sostanza sia già data con tutte le sue proprietà *a prescindere* dall'atto della conoscenza, la rende difficilmente utilizzabile per risolvere il "paradosso della misurazione" della meccanica quantistica.

Altra cosa, invece, l'idealismo trascendentale kantiano, che spiega nel miglior modo il perché l'oggetto d'osservazione si costituisca nell'osservazione stessa, nella *relazione* con il soggetto trascendentale e come, l'oggetto così determinato, sia esso stesso relazione. La conoscenza infatti per Kant è "attività sintetica", vale a dire creazione di relazioni. Dunque, se la misurazione di due variabili è legata all'incertezza espressa dal "principio di indeterminazione", che impedisce di migliorare la precisione della misurazione dell'una senza peggiorare contemporaneamente la precisione della misurazione dell'altra, è perché le variabili interagiscono, sono ontologicamente legate l'una all'altra, complementari, indeterminate in quanto *singole* variabili, ma perfettamente determinate in quanto *relazione* tra variabili.

\*\*\*

Alla luce di queste considerazioni, è così strano proporre di tradurre *anschaulich* con "fenomenico" in senso kantiano? Intuitivo è ciò che può essere sperimentato; sperimentare è misurare; misurare è rendere osservabile; osservabile è il fenomeno: "Sul contenuto fenomenico della cinematica e della

---

<sup>11</sup> Di quanto purtroppo la filosofia kantiana sia misconosciuta ne sia prova questa citazione dell'eminente fisico George Gamow: "Il famoso filosofo tedesco Kant perse parecchio tempo a riflettere sulle proprietà dei corpi, non come 'appaiono a noi', ma come 'sono in sé'" (*Mister Tompkins, l'atomo e l'universo*, Mondadori, Milano 1962, p. 49). Una semplice conoscenza "liceale" di Kant farebbe capire che è esattamente il contrario!

meccanica nella teoria quantistica”, eccolo il titolo dell’articolo rivoluzionario di Heisenberg del 1927.

Roberto Giusti