Istituto Universitario SOPHIA University Institute

Nuovo SEFIR

Scienza e Fede sull'Interpretazione del Reale
Tavola rotonda · 30 ottobre 2026

WERNER HEISENBERG · 1901-1976

Che cosa è indeterminato?

Heisenberg e il significato delle relazioni di indeterminazione



Werner Heisenberg nel 1933. Foto: Bundesarchiv, Bild 183-R57262, CC-BY-SA 3.0

Marco Sanchioni

Istituto Universitario Sophia
marcosanchioni.com

Intervento alla tavola rotonda di Nuovo SEFIR
a cinquant'anni dalla scomparsa di Heisenberg

1 Una cosa sola

Di Werner Heisenberg, a cinquant'anni dalla morte, si possono dire molte cose. A ventitré anni formula la meccanica delle matrici, cioè la prima versione coerente della meccanica quantistica. A venticinque scrive l'articolo sulle relazioni di indeterminazione. Negli anni successivi pone con Pauli le basi della teoria quantistica dei campi, propone che il nucleo atomico sia fatto di protoni e neutroni, e riceve il premio Nobel per la fisica del 1932. In mezz'ora potrei percorrere tutto l'elenco, ma temo che alla fine resterebbe poco. Preferisco provare a dire una cosa sola, e a dirla bene.

La cosa è questa. Tutti abbiamo sentito dire che, secondo Heisenberg, non si possono conoscere insieme la posizione e la velocità di una particella. Detta così, la frase sembra parlare di un limite della nostra conoscenza, come se la natura avesse un segreto e noi non potessimo arrivarci. Se però si leggono i testi, si vede che Heisenberg dice almeno tre cose diverse, e che la differenza fra queste tre cose è una questione filosofica seria. Quando diciamo che posizione e velocità non sono determinate insieme, che cosa manca? Può mancare la nostra conoscenza; può mancare la possibilità di dire qualcosa sulla realtà al di là di ciò che misuriamo; oppure possono mancare, nella realtà stessa, valori definiti.

Vorrei mostrare che il contributo più duraturo di Heisenberg è aver posto questa domanda, e che lui stesso non l'ha mai chiusa del tutto. Per farlo leggerò con voi alcuni passi dei suoi scritti, in ordine cronologico: l'articolo del 1925, quello del 1927, un manoscritto del 1935 e le lezioni del 1955-56. Sono quattro testi e trent'anni di lavoro, tenuti insieme da un solo problema.

2 Il 1925: rinunciare alla traiettoria

Per capire da dove viene la domanda bisogna partire dalla situazione della fisica atomica all'inizio degli anni Venti. Si dispone di un modello, quello di Bohr, in cui l'elettrone gira attorno al nucleo su orbite ben definite, come un pianeta attorno al Sole, con la regola aggiuntiva che solo alcune orbite sono permesse. Il modello funziona bene per l'atomo di idrogeno e fallisce quasi ovunque altrove. Soprattutto, parla di cose che nessuno ha mai osservato. Nessuno ha visto la posizione dell'elettrone sull'orbita, né misurato il tempo che impiega a percorrerla. Ciò che si osserva davvero di un atomo è la luce che emette, con le sue frequenze e le sue intensità.

Carlo Rovelli, che a quell'estate ha dedicato un libro, ricostruisce bene gli ingredienti che si mescolano nei pensieri del giovane Heisenberg. Il primo è la frustrazione. Nell'autunno del 1924, su raccomandazione dell'amico Pauli, Heisenberg era stato invitato da Bohr a Copenaghen, dove da più di dieci anni si cercava senza successo una forza capace di spiegare le orbite e i salti degli elettroni. Il secondo è l'esempio di Einstein, che vent'anni prima aveva mostrato come si possa avanzare abbandonando convinzioni che sembrano ovvie. Il terzo è

filosofico: l'insegnamento di Ernst Mach, giunto a Heisenberg attraverso Einstein e le conversazioni con Pauli, secondo cui la conoscenza va fondata sulle sole osservazioni, senza presupposti metafisici (Rovelli 2020, parte I, cap. 1).

Nel giugno del 1925 Heisenberg, che ha ventitré anni e soffre di febbre da fieno, si ritira sull'isola di Helgoland, nel Mare del Nord, dove non crescono piante. Il passo che compie lì, osserva Rovelli, è tanto spericolato quanto semplice. Nessuno trovava una nuova forza, e Heisenberg tiene la forza elettrica che già si conosceva. Nessuno trovava nuove leggi del moto, e Heisenberg tiene quelle di sempre. Ciò che cambia è il modo di pensare l'elettrone: si rinuncia a descriverne il movimento, e si descrive soltanto ciò che se ne osserva dall'esterno.

Sull'isola dorme pochissimo, e prova i suoi conti su un sistema più semplice dell'atomo. Nell'autobiografia racconterà che verso le tre del mattino il risultato gli stava davanti, giusto in tutti i termini, e che uscì ad aspettare l'alba su una roccia a picco sul mare. Ebbe l'impressione, scrive, di guardare attraverso la superficie dei fenomeni verso «un interno di strana bellezza». Pochi giorni dopo scrive a Pauli che tutto è ancora vago, ma che a quanto pare gli elettroni non si muoveranno più su orbite. A Born consegna il lavoro definendolo folle, senza il coraggio di mandarlo da sé a una rivista. È Born a spedirlo, e l'articolo arriva in redazione il 29 luglio.

Il sommario, che occupa tre righe, dichiara l'intero programma. Si tratta di ottenere i fondamenti di una meccanica quantistica basata

> *«esclusivamente su relazioni tra grandezze in linea di principio osservabili» (Heisenberg 1925, p. 879).*

Nella prima pagina Heisenberg spiega la ragione: le regole in uso contengono relazioni fra grandezze, come la posizione e il periodo di rivoluzione dell'elettrone, che a quanto pare non si possono osservare per principio. Nella seconda trae la conseguenza: «In questa situazione sembra più consigliabile abbandonare del tutto la speranza di osservare le grandezze finora inosservabili (come la posizione e il periodo di rivoluzione dell'elettrone) e tentare di costruire una meccanica quantistica, analoga alla meccanica classica, in cui compaiano soltanto relazioni fra grandezze osservabili» (p. 880).

Questa rinuncia ha una conseguenza che Heisenberg non aveva previsto. Nella fisica classica la posizione dell'elettrone è un numero che varia nel tempo. Se a questo numero non corrisponde nulla di osservabile, bisogna sostituirlo con qualcos'altro. Heisenberg lo sostituisce con ciò che dell'atomo si osserva: ogni riga di luce emessa corrisponde al passaggio dell'atomo da uno stato a un altro, e ha una frequenza e un'intensità. Al posto della posizione compare dunque una tabella di numeri, ciascuno associato a una coppia di stati. La domanda diventa come si facciano i conti con queste tabelle, per esempio come si moltiplichino fra loro.

Heisenberg trova la regola, e nota una stranezza. Quando si moltiplicano due di queste tabelle, il risultato dipende dall'ordine: x per y può essere diverso da y per x. Nell'articolo egli registra il fatto come una difficoltà, in mezza riga (p. 884). Nel giro di poche settimane Max Born riconosce in quelle tabelle le matrici dei matematici, e la difficoltà diventa il cuore della nuova teoria. Posizione e impulso (cioè la massa per la velocità) sono grandezze il cui prodotto dipende dall'ordine, e la differenza fra i due prodotti è fissata dalla costante di Planck. Tutto ciò che diremo sull'indeterminazione è già contenuto in questa relazione.

Si noti il carattere della mossa. Heisenberg non ha fatto una scoperta sperimentale e non ha introdotto una nuova entità. Ha preso una decisione su quali grandezze abbiano significato fisico, e ha lasciato che la matematica ne traesse le conseguenze. Il suo contributo scientifico più importante è già, in questo senso, un contributo concettuale. Egli stesso ne è consapevole e prudente: l'articolo si chiude ammettendo che solo un'indagine matematica più approfondita potrà dire se il metodo sia soddisfacente o troppo rozzo (p. 893).

Rovelli fa a questo punto la domanda che ogni lettore dovrebbe farsi davanti a quel sommario: perché "osservabili"? Che cosa ne sa la natura del fatto che qualcuno la osservi? La teoria funziona, e da un secolo non ha sbagliato una previsione, ma non dice dove sia l'elettrone quando nessuno lo guarda. Nel 1925 Heisenberg non ha una risposta. Le pagine del 1927 sono il suo primo tentativo di darla.

3 Il 1927: il microscopio

Nel frattempo la situazione si è complicata. All'inizio del 1926 Erwin Schrödinger propone una teoria alternativa, la meccanica ondulatoria, che dà gli stessi risultati e ha un vantaggio: sembra descrivere processi continui nello spazio e nel tempo, cioè qualcosa che ci si può raffigurare. La parola tedesca è *anschaulich*, che significa insieme visualizzabile e intuitivo. Molti fisici preferiscono la teoria di Schrödinger proprio per questo, e Heisenberg ne è irritato. La sua teoria funziona, ma nessuno sa dire che cosa significhi in un esperimento semplice.

L'articolo del 1927 nasce per rispondere a questa obiezione, e il titolo lo dichiara: tratta del contenuto intuitivo (*anschaulich*) della cinematica e della meccanica quantistiche. Heisenberg comincia ridefinendo la parola. Comprendere intuitivamente una teoria, sostiene, vuol dire saperne prevedere qualitativamente le conseguenze sperimentali nei casi semplici, e vedere che non conducono a contraddizioni (p. 172). Non serve un'immagine di ciò che accade dentro l'atomo. Serve sapere che cosa si troverà quando si fa una misura.

L'esempio centrale è un microscopio. Per sapere dove si trova un elettrone bisogna illuminarlo, e per localizzarlo con precisione bisogna usare luce di lunghezza d'onda molto corta, come i raggi gamma. Ma la luce di lunghezza d'onda corta trasporta molta energia, e quando colpisce l'elettrone gli imprime un urto che ne cambia l'impulso in modo brusco. Heisenberg scrive: «Nell'istante della determinazione della posizione, cioè nell'istante in cui il quanto di luce viene deviato dall'elettrone, l'elettrone cambia il suo impulso in modo

discontinuo. Questo cambiamento è tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d'onda della luce impiegata, cioè quanto più precisa è la determinazione della posizione» (pp. 174-175). Quanto meglio si conosce la posizione, dunque, tanto meno si sa dell'impulso. Il prodotto delle due imprecisioni non può scendere sotto un valore fissato dalla costante di Planck. Heisenberg vede in questo il contenuto intuitivo di quella relazione astratta, trovata due anni prima, per cui il prodotto di posizione e impulso dipende dall'ordine.

Questo è il racconto che tutti conosciamo, e conviene aggiungere due avvertenze. La prima riguarda la matematica. Pochi mesi dopo, il fisico americano Kennard dimostra la relazione in modo rigoroso, ed è questa la versione che si trova nei manuali. Il teorema di Kennard, però, non parla di urti né di disturbo. Dice che, se si preparano molti elettroni nello stesso modo e su alcuni si misura la posizione e su altri l'impulso, le due serie di risultati non possono essere entrambe poco disperse. È un'affermazione su come si possono preparare i sistemi, e in essa non compare alcuna misura che ne disturbi un'altra.

La seconda avvertenza riguarda il microscopio stesso. Nelle lezioni tenute a Chicago nel 1929 Heisenberg precisa che l'impulso dell'elettrone dopo l'urto si può benissimo misurare, e che dunque, a cose fatte, si possono conoscere con precisione sia la posizione sia l'impulso che l'elettrone aveva. La relazione, dice, non vale per il passato. Ciò che essa vieta è di prevedere: l'impulso cambia di una quantità che non si può conoscere in anticipo. Fin dall'inizio, dunque, la formula e il racconto del microscopio non coincidono, e il significato della relazione resta da stabilire.

4 Tre letture

Torniamo allora alla domanda iniziale, e teniamo fermo l'esempio dell'elettrone sotto il microscopio. Nell'articolo del 1927 si trovano tre risposte, che chiamerò epistemica, agnostica e realista.

La prima lettura è epistemica: riguarda ciò che possiamo sapere. L'elettrone ha una posizione e un impulso, ma noi non possiamo conoscerli entrambi, perché misurare l'una altera l'altro. La situazione sarebbe simile a quella di chi volesse misurare la temperatura di una goccia d'acqua con un termometro grande e caldo: lo strumento modifica ciò che misura. È la lettura suggerita dal microscopio, ed è quella rimasta nel senso comune. Non soltanto nel senso comune: è ancora oggi la lettura dei bohmiani, cioè di chi sostiene la teoria di de Broglie e Bohm, nella quale ogni particella ha sempre una posizione precisa e l'indeterminazione esprime ciò che non possiamo conoscere né controllare.

La difficoltà viene sollevata subito da Bohr. Egli legge il manoscritto al ritorno da una vacanza in Norvegia, ne discute a lungo e duramente con Heisenberg, e lo induce ad aggiungere una nota in bozze (pp. 197-198). Secondo Bohr il punto non è che l'impulso dell'elettrone cambi. Il punto è che, in quell'esperimento, posizione e impulso non possono essere definiti insieme, perché per definire l'una occorre trattare la luce come un'onda e per definire l'altro occorre trattarla come una particella. La lettura epistemica presuppone che

sotto la misura ci sia un valore preciso che viene disturbato, e questo è proprio ciò che la teoria, nella forma di Heisenberg e Bohr, non autorizza a dire. Nell'esempio del termometro la goccia aveva una temperatura; qui non è chiaro che l'elettrone avesse un impulso.

La seconda lettura è agnostica: riguarda ciò che si può dire della realtà. Il suo punto di partenza è semantico. Heisenberg sostiene che un'espressione come "la posizione dell'elettrone" ha significato solo se si indica un esperimento con cui misurarla. È la tesi di Mach, che abbiamo già incontrato. Se nessun esperimento fornisce insieme posizione e impulso con precisione arbitraria, allora l'espressione "posizione e impulso esatti nello stesso istante" non ha un significato definito. Heisenberg applica il ragionamento all'orbita dell'elettrone nell'atomo: per osservarla occorrerebbe una luce di lunghezza d'onda cortissima, e «di una luce simile basta un solo quanto per gettare l'elettrone completamente fuori dalla sua "orbita"; la parola "orbita" non ha dunque qui alcun senso ragionevole».

In questa lettura il limite non riguarda più la nostra conoscenza di un fatto: riguarda ciò che si può dire. Su come sia l'elettrone al di là delle misure non si afferma nulla e non si nega nulla; la domanda viene semplicemente sospesa. La difficoltà è che questa sospensione regge solo se si accetta che il significato di un concetto coincida con il modo di misurarlo. È una tesi filosofica impegnativa, che allora godeva di grande credito e che oggi pochi sottoscriverebbero. Parliamo sensatamente di molte cose che non sappiamo misurare, e una teoria fisica può benissimo attribuire significato a grandezze che nessun esperimento isola direttamente.

La terza lettura è realista: riguarda ciò che c'è, e colloca l'indeterminazione nella natura stessa. Verso la metà dell'articolo, discutendo come dalla teoria emerga la traiettoria di una particella, Heisenberg scrive:

> *«La "traiettoria" nasce soltanto per il fatto che noi la osserviamo» (Heisenberg 1927, p. 185).*

Qui non si dice che ignoriamo dove sia l'elettrone, né che la domanda sia priva di senso. Si dice che l'elettrone, prima della misura, non ha una posizione definita, e che la misura la fa esistere. La traiettoria è una successione di osservazioni, e fra un'osservazione e l'altra non c'è alcun percorso da scoprire. Conviene precisare in che senso questa lettura sia realista. Anche la lettura epistemica lo è, a suo modo, perché suppone che i valori esistano e ci restino nascosti: quella dei bohmiani è infatti una posizione realista. La terza lettura è realista sull'indeterminazione: ciò che è reale, prima della misura, è una proprietà che non ha ancora un valore definito. La difficoltà è evidente: che cosa significa, per una cosa, avere una proprietà in modo indeterminato? Siamo abituati a pensare che un oggetto o si trova in un luogo o si trova in un altro, e che l'incertezza stia soltanto dalla nostra parte.

Sarebbe comodo raccontare queste tre letture come tre tappe di un percorso. I testi non lo consentono. Le tre letture stanno nello stesso articolo, a poche pagine di distanza, e Heisenberg passa dall'una all'altra senza segnalarlo. Rovelli riporta in proposito un giudizio di

Pauli, che lo conosceva dagli anni di studio: Heisenberg era tutto intuizione, e non si curava di elaborare con chiarezza gli assunti fondamentali. Per Heisenberg, del resto, le tre letture erano aspetti della stessa cosa, perché assumeva che misurare una grandezza significasse insieme darle senso e darle realtà. Chi non condivide questa assunzione deve scegliere, e la scelta non è imposta dalla teoria: i bohmiani, come si è visto, scelgono ancora oggi la prima.

Nelle ultime righe dell'articolo, però, Heisenberg sceglie con decisione. Scrive: «Nella formulazione rigorosa della legge di causalità, "se conosciamo esattamente il presente, possiamo calcolare il futuro", a essere falsa non è la conclusione, bensì la premessa» (p. 197). Il presente, infatti, non si può conoscere in tutti i suoi elementi. Aggiunge che si potrebbe essere tentati di supporre, dietro il mondo statistico delle osservazioni, un mondo "vero" in cui la causalità valga; e giudica questa supposizione sterile e priva di senso.

5 La potentia

La domanda lasciata aperta dalla terza lettura riceve una risposta trent'anni più tardi. Fra il 1955 e il 1956 Heisenberg tiene in Scozia, all'Università di St Andrews, le Gifford Lectures, pubblicate nel 1958 con il titolo *Physics and Philosophy*. Qui egli riflette sulla nozione di probabilità. Quando lanciamo un dado, osserva, la probabilità esprime la nostra ignoranza: non conosciamo i dettagli del movimento della mano che determinano la caduta. Nella teoria quantistica la probabilità è un'altra cosa. L'onda di probabilità significa

> *«una tendenza verso qualcosa» (Heisenberg 1958, cap. II).*

Essa è, prosegue Heisenberg, la versione quantitativa di un concetto antico, la *potentia* della filosofia aristotelica, e «introduceva qualcosa che sta a metà fra l'idea di un evento e l'evento reale, una strana specie di realtà fisica, proprio a metà fra possibilità e realtà».

Il riferimento ad Aristotele merita una parola. Per Aristotele un seme è una pianta in potenza: non lo è ancora in atto, ma la sua capacità di diventarlo è una caratteristica reale del seme, che lo distingue da un sasso. La potenza appartiene alla realtà e non soltanto al nostro modo di parlare. Heisenberg applica questa distinzione all'elettrone. Una proprietà indeterminata non è una proprietà mancante, e non è una proprietà ignota. È una proprietà in potenza: l'elettrone non possiede una posizione, possiede una tendenza, precisa nella sua misura numerica, a farsi trovare qui piuttosto che lì.

Oggi un filosofo parlerebbe di disposizioni o di propensioni, come quando diciamo che un vetro è fragile anche se nessuno lo sta rompendo. La fragilità è una proprietà reale del vetro, e si manifesta solo in certe circostanze. Allo stesso modo la misura è la circostanza in cui la tendenza dell'elettrone si manifesta, e Heisenberg descrive infatti l'osservazione come il passaggio dal possibile all'attuale (cap. III).

Due osservazioni su questa proposta. La prima è che essa non nasce nel 1958. Già nella conclusione dell'articolo del 1927, nello stesso passo sulla causalità, Heisenberg scrive che ogni percezione è una selezione entro una pienezza di possibilità, e una limitazione di ciò che sarà possibile in futuro (p. 197). La potentia è lo sviluppo, a trent'anni di distanza, di quella riga giovanile, e ne dà una versione esplicitamente realista: le possibilità appartengono al mondo.

La seconda osservazione è che neppure qui Heisenberg decide fino in fondo. Nello stesso capitolo egli sostiene che la funzione di probabilità contiene, accanto alla tendenza oggettiva, la nostra conoscenza incompleta del sistema, e che il suo cambiamento improvviso al momento della misura è un cambiamento di ciò che sappiamo. La lettura realista e quella epistemica convivono dunque fino alla fine, e la potentia è la proposta di un fisico che continua a tenere insieme le due cose.

6 Chi osserva?

Resta un equivoco da sciogliere. Se la traiettoria nasce quando la osserviamo, e se l'osservazione fa passare le cose dal possibile all'attuale, si potrebbe concludere che per Heisenberg sia la coscienza dell'osservatore a creare la realtà. Questa conclusione ha avuto grande fortuna, anche fuori dalla fisica, e Heisenberg la respinge in modo esplicito. Scrive che «il passaggio dal "possibile" all'"attuale" ha luogo non appena entra in gioco l'interazione dell'oggetto con l'apparato di misura, e quindi con il resto del mondo; non è legato all'atto con cui il risultato viene registrato dalla mente dell'osservatore» (cap. III). L'osservazione di cui parla è un atto fisico. Poco oltre egli ricorda che la città di Londra esiste, la si guardi o no, e che la teoria quantistica non introduce la mente del fisico come parte dell'evento atomico.

Il testo più chiaro su questo punto è un manoscritto del 1935, scritto in risposta alla celebre critica di Einstein, Podolsky e Rosen. Heisenberg lo inviò a Pauli e a Bohr, pensò di pubblicarlo e non lo fece; è uscito dopo la sua morte, nell'epistolario di Pauli. Vi si legge che l'annerimento di una lastra fotografica è un fatto oggettivo, del tutto indipendente da come e quando qualcuno la guarderà. Senza questa assunzione, osserva Heisenberg, non si potrebbe nemmeno parlare della correttezza delle previsioni di una teoria (Heisenberg 1935, §2).

Nello stesso manoscritto egli sviluppa l'idea del taglio (*Schnitt*). Per applicare la teoria bisogna tracciare una linea. Da una parte sta il sistema atomico, descritto in termini quantistici; dall'altra stanno gli strumenti, descritti con i concetti della fisica classica, cioè come oggetti che hanno posizioni definite e lasciano tracce definite. Ci si può chiedere dove vada tracciata la linea: fra l'elettrone e il fotone che lo colpisce, fra il fotone e la lente, fra la lente e la lastra. Heisenberg dimostra che le previsioni non dipendono dalla risposta. La linea si può spostare a piacere verso l'osservatore, includendo nel sistema quantistico un pezzo sempre maggiore dell'apparato. Non la si può spostare a piacere verso l'atomo, e non la si può eliminare; ed è lungo quella linea che l'elemento statistico entra nella teoria (§1).

L'osservatore di Heisenberg, in conclusione, è il lato classico di un taglio di cui la descrizione ha bisogno. Può essere una lastra, un contatore, uno strumento qualunque. Un riferimento a noi resta, ma in un senso più sobrio di quello che si crede: gli esperimenti si descrivono con i concetti del linguaggio ordinario e della fisica classica, e questi concetti non si adattano esattamente alla natura. Heisenberg cita a questo proposito una frase del suo allievo von Weizsäcker, secondo cui la natura è anteriore all'uomo, ma l'uomo è anteriore alla scienza della natura. Ne segue che ogni proprietà attuale dell'elettrone è tale rispetto a un apparato con cui esso ha interagito, e che la domanda su come l'elettrone sia in sé stesso, fuori da ogni interazione, riceve come risposta soltanto un elenco di tendenze.

7 Che cosa resta aperto

Ho cercato di dire una cosa sola. Le relazioni di indeterminazione vengono di solito presentate come un limite: qualcosa che non possiamo sapere. Nei testi di Heisenberg esse sono piuttosto una domanda su che cosa sia indeterminato, alla quale egli dà tre risposte, epistemica, agnostica e realista, che non separa mai del tutto. La più impegnativa è la terza, secondo cui a essere indeterminate sono le proprietà stesse, e la nozione di potentia è il suo tentativo di renderla comprensibile.

Il dibattito non si è chiuso con lui. Negli ultimi vent'anni i fisici hanno ripreso l'argomento del microscopio e discutono ancora se esista, accanto al teorema di Kennard, una relazione rigorosa fra la precisione di una misura e il disturbo che essa produce. I filosofi, per parte loro, discutono di indeterminatezza metafisica e di proprietà non nette, cioè di come si possa attribuire a un oggetto una posizione senza attribuirgli un punto. Sono le tre letture di Heisenberg, riformulate con strumenti più precisi.

La domanda che Heisenberg lascia è che cosa sia reale fra un'osservazione e l'altra. La sua risposta è che fra due osservazioni ci sono possibilità e tendenze, e che queste appartengono alla natura quanto i fatti. È una fisica che restituisce alla possibilità un posto nel mondo, e che riconosce nella descrizione della natura un riferimento a chi la descrive. Sono questioni che riguardano l'interpretazione del reale nel senso più ampio, e su questo terreno lascio la parola a Sergio Rondinara.

FONTI

W. Heisenberg, «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik* 33 (1925), pp. 879-893.

W. Heisenberg, «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», *Zeitschrift für Physik* 43 (1927), pp. 172-198.

W. Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Hirzel, Leipzig 1930.

W. Heisenberg, «Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich?» (1935), in W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, vol. II, Springer, Berlin 1985, pp. 409-418; trad. inglese di E. Crull e G. Bacciagaluppi, 2011.

W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper, New York 1958 (trad. it. *Fisica e filosofia*, Il Saggiatore).

C. Rovelli, *Helgoland*, Adelphi, Milano 2020.

J. Hilgevoord e J. Uffink, «The Uncertainty Principle», *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2016.

Testo letto alla tavola rotonda di Nuovo SEFIR del 30 ottobre 2026. Le traduzioni dei passi di Heisenberg sono dell'autore.