



LA MECCANICA QUANTISTICA E LA FINE DEL DETERMINISMO

Fisica, Filosofia

Esame di stato 2010/2011

Nicola Mayer

FISICA

La meccanica quantistica:

- 1.1 - Il pacchetto di energia di Planck
- 1.2 - Il principio di complementarietà: la dualità onda-corpuscolo
- 1.3 - La probabilità e il principio di sovrapposizione
- 1.4 - Le variabili coniugate e il principio d'indeterminazione

FILOSOFIA

Il progresso del pensiero scientifico e il ruolo della scienza nell'interpretazione della natura:

- 2.1 - Galileo e la concezione deterministico-meccanicistica del mondo
- 2.2 - Il determinismo quantistico

BIBLIOGRAFIA

FISICA

La Meccanica quantistica

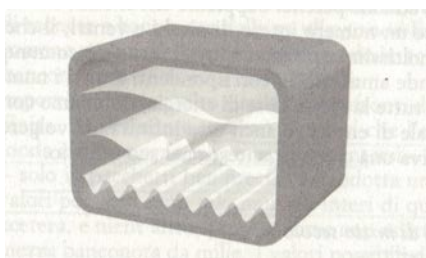
La meccanica quantistica viene ideata e si sviluppa nei primi 30 anni del XX secolo grazie al lavoro di fisici e matematici passati poi alla storia, come Planck, Bohr, Einstein, Schrödinger, Pauli, Heisenberg, de Broglie e Dirac. Questa nuova teoria fisica nasce in risposta all'incapacità della meccanica classica¹ di descrivere fenomeni subatomici come la struttura atomica², la radiazione di un corpo nero³, o gli spettri atomici⁴, ed ha alla base di questa nuova interpretazione scientifica della realtà il concetto di “quanto” introdotto da Max Planck nel 1900, ovvero di “unità più piccola in cui ogni oggetto fisico può essere frazionato”. Sviluppando e interpretando l'intuizione del fisico tedesco nella risoluzione ai problemi posti dall'inadeguatezza della teoria classica, questa generazione di scienziati portò alla nascita della seconda grande rivoluzione scientifica del '900, dopo la teoria relativistica di Einstein.

1.1 Il pacchetto di energia di Planck

Per spiegare il quadro concettuale della nuova teoria, prendiamo in considerazione un esperimento pensato che si era presentato alla fine del '800; uno dei tanti a cui la meccanica classica non era in grado di rispondere.

Consideriamo un forno, perfettamente isolato, la cui temperatura interna è di 180°.

Il riscaldamento interno genera calore e luce sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, che per la teoria di Maxwell dovranno avere un numero *intero* di picchi e ventri per incastrarsi perfettamente tra le pareti opposte. Ricordiamo che la *lunghezza d'onda* è la distanza tra due picchi o ventri successivi; di conseguenza minore sarà la lunghezza d'onda maggiore sarà il numero di ondulazioni tra le pareti. La *frequenza* è invece il numero di oscillazioni complete che compie l'onda in un unità di tempo (generalmente un secondo). E' da notare che le due sono inversamente proporzionali, cioè all'aumentare di una l'altra diminuisce. Infine, l'*ampiezza* è l'altezza massima di un'onda.



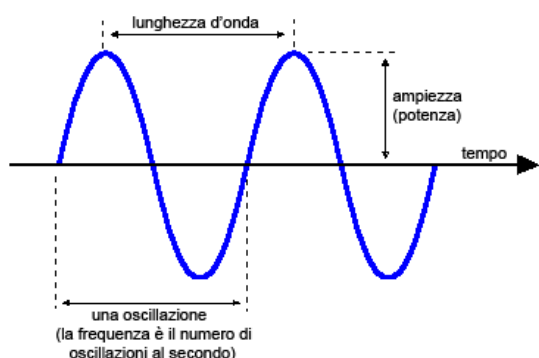
Secondo la teoria di Maxwell, le onde di radiazione all'interno di un forno hanno un numero intero di picchi e ventri, cioè formano sempre cicli completi.

¹ La fisica classica, all'inizio del '900, era descritta, nelle linee essenziali, dal “*Principia Mathematica*” di Newton (1632) per quanto riguarda il moto e le leggi orarie dei corpi e dall'opera in due volumi “*A Treatise on Electricity and Magnetism*” di Maxwell (1873) sull'elettromagnetismo.

² A quell'epoca, l'ultima teoria atomica proposta era il modello di Thomson (1897), in seguito sostituito nel '911 con il modello planetario di Rutherford, che per la prima volta individuava una carica positiva al centro dell'atomo (il nucleo) attorno alla quale ruotavano cariche negative (gli elettroni).

³ Per “corpo nero” si intende un corpo in grado di, colpito da radiazioni elettromagnetiche, di assorbirle completamente, e quindi di non rifletterle o trasmetterle, risultando alla vista approssimativamente nero.

⁴ Gli spettri di emissione e di assorbimento degli atomi erano infatti a righe, cioè avvenivano secondo frequenze definite e non continue come avrebbe supposto la teoria classica.



Rappresentazione grafica di un'onda

Le onde elettromagnetiche trasportano una certa quantità di energia; usando la termodinamica ottocentesca si può quindi calcolare quanta energia le onde elettromagnetiche trasportino per ogni lunghezza d'onda ammessa. Il risultato era che ogni onda, indipendentemente dalla sua lunghezza, portava la stessa quantità di energia; quindi, *tutti le possibili onde davano lo stesso contributo energetico*. Se ci chiediamo allora quanta energia totale abbiano tutte le possibili onde all'interno del forno, dovremo considerare un numero infinito di onde ammissibili secondo la teoria di Maxwell, cioè con un numero intero di picchi e ventri. Dato che tutte portano la stessa quantità di energia, dovremo concludere che l'energia totale interna in un forno ad una data temperatura risulta essere *infinita*.

Consideriamo adesso la visione quantistica dell'esperimento: Planck, come già detto, avanzò l'ipotesi nel 1900 che un'onda elettromagnetica potesse presentarsi solo in pacchetti, in quanti, ben precisi; introdusse cioè la discontinuità dei valori possibili di energia trasportata da queste onde, multipli interi di questa unità energetica. Questo contenuto energetico minimo non è ovviamente scelto a piacere: il fisico tedesco ipotizzò che *l'energia minima fosse proporzionale alla frequenza della radiazione*, cioè

$$E = h\nu$$

Con ν indicante la frequenza e h costante.

Per chiarificare il concetto, immaginiamo le onde nell'oceano: quelle con lunghezza d'onda maggiore, e quindi frequenza più bassa, si infrangeranno sulla costa con forza minore che quelle con lunghezza minore e frequenza più alta; *la radiazione a onda lunga porterà quindi intrinsecamente meno energia di quella a onda corta*. Portiamo un altro esempio, tratto dal libro "*L'universo elegante*" di B. Greene, per spiegare come, con la sua ipotesi, Planck riuscì ad ottenere un valore finito dell'energia totale:

..vi trovate insieme con un enorme numero di individui - diciamo un numero infinito - inscatolati in uno stanzone gelido, il cui proprietario è un profittatore. Un termostato ultimo modello fa mostra di sé alla parete; ma vi accorgerete presto che le tariffe imposte dal proprietario per il riscaldamento sono altissime. Se il termostato viene messo sui 10° C, ognuno deve pagare 100000 lire al giorno; se si alza a 15° C, la cifra sale a 150000 e così via. Visto che i vostri compagni di sventura sono infiniti, vi rendete conto che il malvagio proprietario guadagnerà una quantità infinita di denaro non appena il riscaldamento verrà acceso.

Il "malvagio proprietario" può essere quindi interpretato come il forno, che "guadagna", una quantità totale infinita di lire: ha cioè una quantità di energia totale infinita, data

dalle onde elettromagnetiche che hanno tutte lo stesso contributo “monetario” e sono infinite.

Ma leggendo meglio il contratto d'affitto, vi accorgete di una possibile scappatoia. Il proprietario è un uomo molto occupato e non intende dare resto, soprattutto a un numero infinito di inquilini. Esiste dunque un sistema basato sulla fiducia: solo chi può pagare la cifra esatta paga interamente, gli altri danno quello che hanno. Vi viene allora in mente di raccogliere tutti i soldi dei vostri compagni e di organizzare il pagamento in questa maniera: un individuo prende tutte le monete da 50 lire, un altro tutte quelle da 100, e così via; in questo strano mondo, però, esistono strane banconote, e dopo quelle da 500000 lire ve ne sono altre di valore ancora superiore, senza un limite massimo. Spavaldamente, posizionate il termometro a 25° C. Subito il proprietario si presenta a riscuotere il dovuto (250000 lire a testa). Ecco cosa succede: chi ha le monete da 50 lire gliene dà 5000, chi ha quelle da 100 lire gliene dà 2500 e così via, fino ad arrivare a chi ha le banconote da 50000, che ne paga 5, e a chi ha quelle da 100000, che ne dà solo 2 (perché con 3 il proprietario dovrebbe dare resto). Tutti gli altri, però, hanno solo banconote da 500000 in su, e quindi non possono pagare, perché ci sarebbe comunque un resto. Il proprietario, che si aspettava una quantità infinita di denaro, si ritrova invece con la misera somma di 2450000 lire (ci sono 9 tipi di monete e banconote da 50 alle 50000 lire, e quindi 9 persone che possono pagare le 250000; aggiungendo le 200000 pagate da chi ha le banconote da 100000 il conto torna).⁵

Ridistribuendo quindi i soldi tra gli inquilini, si crea una discontinuità nel taglio delle banconote: un individuo non avrà più la scala completa da 50 ad un valore qualsiasi, ma solo uno di questi possibili valori, multiplo di 50, che in questo caso risulta essere il pacchetto minimo di energia. Come verranno distribuite queste discontinuità di valori nelle onde all'interno del forno? A seconda della loro frequenza: l'onda da 50 lire avrà una frequenza bassa e una lunghezza d'onda alta, e così via all'aumentare del quanto di energia la frequenza si alzerà e si abbasserà la lunghezza. Allora, analogamente agli inquilini, le onde con pacchetto di energia minimo troppo alto rispetto al valore che dovrebbe fornire al forno, vale a dire quelle con frequenza man mano più elevata, non “pagheranno”, e i loro contributi all'energia totale interna saranno nulli. Si risolve quindi il rompicapo grazie alla discontinuità dei valori, considerando un numero finito di onde (quelle con frequenza e quindi quanto energetico accettabile) che daranno un'energia totale interna finita. La risoluzione quantistica del problema convinse gli scienziati della sua validità quando Planck trovò il fattore di proporzionalità tra la frequenza di un'onda e il suo quanto energetico, vale a dire la costante di Planck \hbar , pari a $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$. Un valore così piccolo significava pacchetti di energia minima a loro volta molto piccoli, che ci possono dare l'illusione di seguire un percorso continuo, percorso che è invece una scala formata da gradini la cui altezza aumenta all'aumentare della frequenza. Questa illusione risulta però essere trascurabile se le dimensioni, le masse, i periodi possono considerarsi “grandi”; quando cioè siamo in presenza di grandezze tipiche della meccanica classica. Bohr enunciò infatti il **principio di corrispondenza**, che afferma che *i risultati della meccanica quantistica devono ridursi a quelli della meccanica classica nelle situazioni in cui l'interpretazione classica può essere considerata valida*. Spiegato il concetto di quanto energetico, ci basta sapere che nel 1905 Einstein⁶, applicando l'idea di Planck alla luce, dimostrò come l'ipotesi sui pacchetti di energia fosse conseguenza di una proprietà fondamentale delle onde elettromagnetiche e non una semplice artificio di calcolo: esse sono formate da piccoli “grumi” di luce: i fotoni.

⁵ L'universo elegante, B. Greene, Einaudi; p. 78-79 “Pacchetti di inizio secolo”

⁶ *Emissione e trasformazione della luce, da un punto di vista euristico*, da *Teoria dei quanti di Luce*, A. Einstein, Ed. Newton Compton

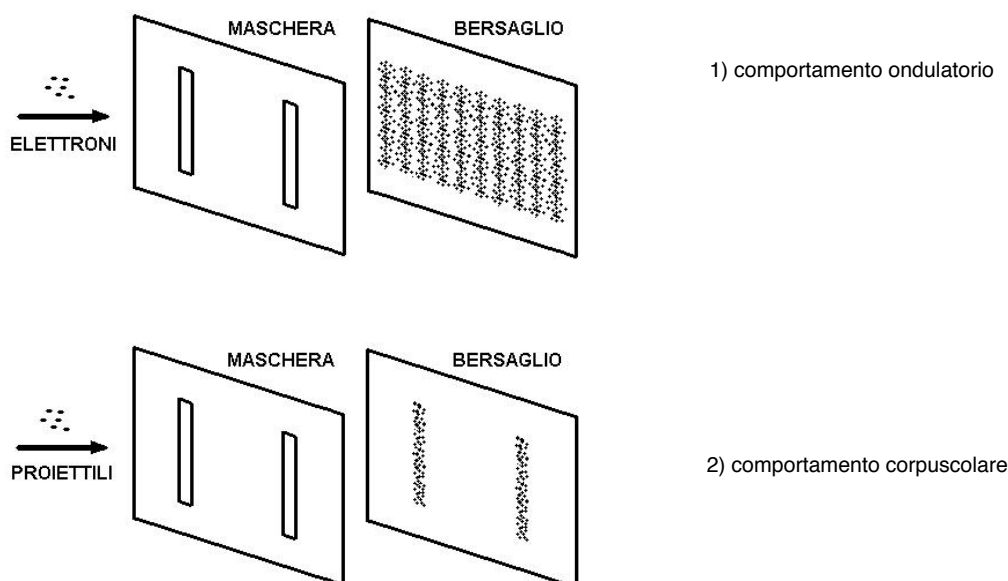
1.2 Il principio di complementarità: la dualità onda-corpuscolo

Negli anni seguenti alla scoperta della discontinuità della realtà fisica, fu trovata un'altra notevole proprietà della materia: la dualità tra aspetto ondulatorio e corpuscolare.

Ci si accorse che i fotoni, i quanti di luce, contenevano in sé le caratteristiche ondulatorie della luce: il legame tra frequenza, proprietà tipica delle onde, e energia dei fotoni, corpuscolari, era un esempio lampante di questo legame. La dualità era ancora più evidente se si osservava che nell'effetto fotoelettrico di Einstein la luce si comportava in maniera corpuscolare, mentre nel famoso *esperimento della doppia fenditura*⁷, questa assumeva un aspetto ondulatorio. Si teorizzò quindi che *la luce avesse quindi proprietà sia corpuscolari che ondulatorie*. Inoltre, Louis De Broglie, un giovane fisico francese, ipotizzò nel 1924 che anche la *materia avesse una natura sia corpuscolare che ondulatoria*; più precisamente, De Broglie teorizzò che *un elettrone, che è comunemente inteso come una particella, potrebbe avere specularmente una descrizione altrettanto valida in termini di onde*⁸. Più precisamente, che ad un corpo con quantità di moto p venisse associata un'onda con lunghezza pari a:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Infatti, i risultati sperimentali mostravano come, se si sparavano degli elettroni uno alla volta su di una maschera con due fenditure, la figura che veniva fuori, dopo che un numero abbastanza grande di questi "proiettili subatomici" erano stati sparati, sul bersaglio posto dietro questa maschera, fosse una figura d'interferenza (figura 1), tipica delle onde, e non due semplici fasce in corrispondenza delle fenditure, come nel caso di proiettili veri e propri, *corpuscolari* (figura 2)!



⁷ L'esperimento è una variante dell'esperimento del 1801 che Young concepì per dimostrare che la luce possedeva proprietà ondulatorie, e non corpuscolari come recitava la teoria newtoniana. Fu per la prima volta eseguita nel 1927 da Davisson e Germer.

⁸ De Broglie ipotizzò la dualità onda-particella nella sua tesi "Recherches sur la théorie des quanta", 1924.

Dalla felice intuizione del giovane francese, nasce un altro dei principi fondamentali della meccanica quantistica: il **principio di complementarità**⁹, secondo il quale *i fenomeni che avvengono a livello atomico e subatomico posseggono questi due aspetti, ondulatorio e corpuscolare, i quali però non possono essere mai osservati contemporaneamente durante lo stesso esperimento*. Ma come possiamo sapere quali proprietà avrà il corpo-onda in quel dato esperimento? Erwin Schrödinger risponde così:

L'aspetto che predomina al momento non dipende dall'oggetto stesso, ma dalla tecnica sperimentale con cui lo si esamina. Per esempio un fascio di raggi catodici produce nella camera a nebbia di Wilson traiettorie distinte lungo le quali si condensano goccioline d'acqua - e queste traiettorie sono curve se vi è un campo magnetico che deflette gli elettroni, altrimenti sono linee rette. Non si può fare altro che interpretarle come traiettorie di singoli elettroni. Eppure lo stesso fascio, dopo aver attraversato un tubetto che contenga polvere cristallina, produce un certo numero di cerchi concentrici su una lastra fotografica posta dopo il tubo. Questo fenomeno può venire interpretato in tutti i suoi dettagli quando lo si consideri come una figura di diffrazione prodotta da onde, e non può spiegarsi in alcun altro modo.¹⁰

Le proprietà della natura fisica a livello subatomico dipendono quindi da come le si osserva, dagli esperimenti ai quali la si sottopone e si misura. L'osservazione e la misurazione non sono più quindi, come nella fisica classica, ininfluenti sull'oggetto osservato, bensì lo modificano e lo fanno *collassare* in uno dei due possibili stati fisici in cui si può trovare in quel dato momento. Come vedremo nel paragrafo seguente, il principio di complementarità è all'origine della carattere probabilistico delle leggi nella meccanica quantistica.

1.3 La probabilità e il principio di sovrapposizione

Ma come dovevano essere interpretate queste onde? Di cosa erano fatte? La grande rivoluzione quantistica si compie in questo passaggio, nel quale il modello classico viene completamente superato e il nostro senso comune messo a dura prova.

Riguardo all'aspetto matematico, le diverse interpretazioni della teoria portarono alla nascita di due scuole di pensiero: la *meccanica quantica o delle matrici*, adottata da Werner Heisenberg, e la *meccanica ondulatoria*, promossa da Schrödinger.

La prima, citando lo stesso W. Heisenberg a riguardo, esprimeva l'idea che:

[...] le leggi meccaniche dovessero venir scritte non come equazione delle posizioni e delle velocità degli elettroni ma come equazioni delle frequenze e delle ampiezze della loro espansione Fourier.¹¹

Il nome deriva ovviamente dall'uso delle matrici nelle meccanica da parte di Heisenberg, che fu il primo ad utilizzare questo strumento matematico in una teoria fisica.

La seconda aveva come obiettivo stabilire un'equazione ondulatoria delle onde proposte da de Broglie. Schrödinger con la sua famosa *Funzione d'onda* ci riuscì nel 1926: la sostanziale differenza rispetto alla meccanica quantica risiedeva nell'associazione ad ogni particella subatomica di un'onda associata, rappresentante lo stato fisico del sistema quantistico nello spazio e nel tempo. Nemmeno lo stesso Schrödinger sapeva come interpretare inizialmente questo formalismo, ma Max Born,

⁹ Due quantità (dette osservabili) sono complementari se si escludono reciprocamente, nel senso che non è possibile conoscere con precisione entrambe.

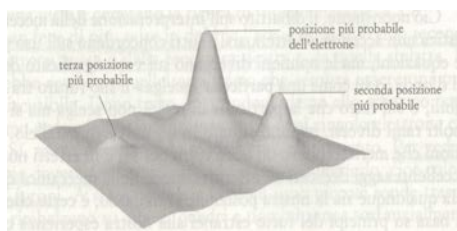
¹⁰ L'immagine del mondo, E. Schrödinger, ed. Boringhieri, p.254, "Fusione dei concetti di particella e onda"

¹¹ W. Heisenberg, Fisica e Filosofia, ed. il Saggiatore, p. 51

dopo l'ancora prematura ipotesi di Schrödinger che le onde fossero degli "elettroni spalmati", propose di considerare queste come "*onde di probabilità*", dove la probabilità di trovare un elettrone dipendeva dall'ampiezza dell'onda associata¹². Questa meccanica considerava quindi le onde come:

[...] soltanto una finzione matematica, utile per calcolare la probabilità di trovare una particella in certe condizioni (...). La figura di diffrazione dev'essere considerata come la distribuzione statistica dei grani impressionati. Sotto questo rispetto le onde vengono spesso chiamate onde "pilota", perché guidano o dirigono le particelle nelle loro traiettorie. Ma questa guida non va considerata rigida: costituisce semplicemente una probabilità. La figura di diffrazione è un risultato statistico, ed è così chiara e definita perché il numero di particelle che la producono è enorme.¹³

Il contrasto tra aspetto ondulatorio e corpuscolare veniva quindi superato con questo nuovo concetto d'onda.



1) Grafico dell'onda associata

Schrödinger stesso dimostrò in seguito che i due formalismi erano equivalenti: le conseguenze e i risultati coincidevano.

Ma è importante sottolineare l'intuizione dietro al formalismo matematico, la *probabilità*, introdotta per la prima volta nel campo della fisica. Il determinismo classico era rimasto invariato nella fisica relativistica, e una simile parola in una teoria scientifica sembra fuori contesto pure per noi, abituati al positivismo scienziato. Una certa probabilità di trovare un corpo in una data posizione significa quindi probabilità *non-nulle* di trovarlo in *ogni* posizione contemplata dall'onda, e di conseguenza all'istante t l'elettrone potrebbe trovarsi in più posti, almeno finché la misura non viene effettuata. Questa moltitudine di stati possibili in un determinato momento viene sintetizzata dal **principio di sovrapposizione**, secondo il quale "*gli oggetti possono esistere in un particolare stato di sovrapposizione di diverse possibilità*¹⁴". Conseguenza diretta di questo postulato è il superamento della descrizione classica del moto, dove, conosciute le leggi di forza, posizioni e velocità di tutti i punti materiali di cui è composto un sistema meccanico in un dato istante iniziale è possibile conoscere posizione e velocità di ogni suddetto punto materiale in un qualunque istante successivo; il concetto di traiettoria continua nella Meccanica Quantistica non esiste quindi più, essendo le variabili iniziali come posizione e velocità non più determinabili con precisione tanto grande quanto si vuole ma solo in modo probabilistico. Le leggi causali tipiche della Meccanica Classica e Relativistica saranno allora sostituite con leggi statistiche, che ci indicheranno la probabilità di trovare il corpo con determinati parametri.

¹² Più precisamente, dal modulo quadro dell'ampiezza Ψ .

¹³ E. Schrödinger, L'immagine del mondo, p. 255, La natura delle onde

¹⁴ A. Zeller, Il velo di Einstein. Il nuovo mondo della fisica quantistica, p. 135

1.4 Le variabili coniugate ed il principio d'indeterminazione

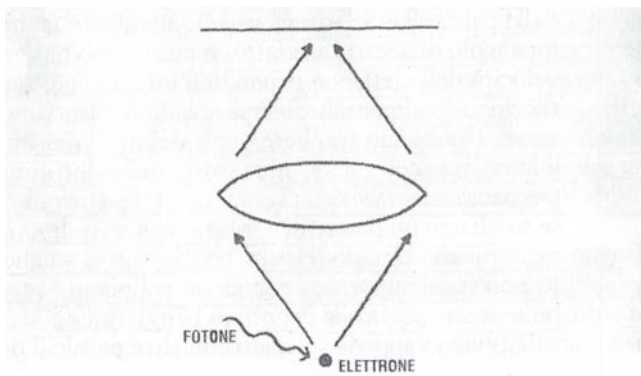
Abbiamo detto che l'introduzione della probabilità nella Meccanica Quantistica significava quindi che un sistema fisico potesse essere conosciuto in modo non più deterministico, come nella Meccanica Classica, ma probabilistico, con la funzione d'onda di Schrödinger a rappresentare le probabilità della variabile di avere un certo valore in un dato momento. Abbiamo detto poi che solo effettuando la misurazione la particella passa dallo stato di sovrapposizione delle varie possibilità ad uno stato definito. Heisenberg si rese conto che le *variabili coniugate* erano legate tra di loro da un legame d'incertezza: il fisico tedesco per *variabili coniugate* intendeva ogni coppia di variabili composta da una variabile "geometrica", usata cioè per descrivere geometricamente lo stato di un sistema, come la posizione o il tempo, e la corrispettiva grandezza meccanica che si conserva quando il sistema è invariante per *trasformazioni Fourier* della variabile geometrica. Egli enunciò quindi il **principio d'indeterminazione**, secondo il quale *esiste una limitazione intrinseca alla precisione delle misure, in particolare alla possibilità di misurare contemporaneamente quantità di moto e posizione di una particella con precisione arbitraria*¹⁵. Formalizzandola, la relazione d'indeterminazione risulta:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

con Δx pari all'incertezza della posizione, Δp_x all'incertezza della quantità di moto

e $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. Se allora effettuassimo una misura precisa su una delle due variabili, come

per esempio la posizione, in modo da ridurre Δx pari a 0, per il principio d'indeterminazione $\Delta p_x = \infty$, e la quantità di moto e velocità del corpo saranno completamente indeterminabili e sconosciute. Proviamo ora a studiare i procedimenti sperimentali adoperati per determinare posizione e velocità: supponiamo di voler misurare la posizione dell'elettrone all'istante dato. Usiamo come strumento di misura il *microscopio a raggi gamma*, un esperimento concettuale ideato da Heisenberg: per vedere l'oggetto dobbiamo illuminarlo con un fascio di luce affinché esso possa rifletterla e rivelare la sua posizione.



Dato che il fascio è composto da fotoni, questi urteranno l'elettrone, facendolo deviare. Si creerà quindi un disturbo, che causerà un'imprecisione nella misura. Possiamo però pensare di ridurre questo disturbo, magari inviando un singolo fotone verso il corpo osservato. Il problema è che la grandezza di questo disturbo non è determinabile. Proviamo per esempio ad osservare la traiettoria che prende il fotone dopo che viene deviato

¹⁵ E' da notare che Heisenberg nel suo principio d'indeterminazione tratta le variabili quando queste hanno ormai assunto un valore preciso, cioè dopo la misurazione e il collasso delle probabilità in un unico stato definito.

dall'elettrone.

Il fotone può ovviamente assumere tutti i casi intermedi tra le due traiettorie rappresentate. Prendendo per semplificare gli estremi, notiamo che in un caso l'elettrone è stato deviato di un angolo ridotto, nell'altro di un angolo molto grande. Allora nel primo caso vorrà dire che l'urto è stato leggero, e che quindi la variazione sulla velocità dell'elettrone è ridotta; nel secondo l'urto sarà più forte, e di conseguenza anche la variazione di velocità sarà maggiore: non possiamo quindi sapere quanto sia realmente il disturbo. Ipotizziamo allora di usare una lente più piccola, che, ricevendo meno luce, ridurrà l'angolo tra i due raggi fino a farli coincidere: in questo modo la variazione della quantità di moto sarà determinabile, essendo uguale per tutti i raggi. In questo modo, però, potremo determinare in modo molto meno preciso la posizione dell'elettrone: il potere di risoluzione di ogni microscopio dipende dall'angolo di apertura della luce che raccoglie. Maggiore è questo angolo, maggiore sarà la risoluzione dell'immagine. Riassumendo, tanto più precisamente determiniamo la posizione dell'elettrone, tanto meno sarà precisa la sua variazione della quantità di moto, e viceversa, tanto più precisamente sappiamo il disturbo e la variazione del momento¹⁶, tanto meno conosciamo la posizione dell'elettrone.

Il principio d'indeterminazione indica inoltre anche l'esistenza di una *limitazione alla precisione della misura contemporanea dell'energia di un corpo e dell'intervallo di tempo in cui il corpo stesso possiede tale energia*¹⁷. La relazione tra energia e tempo può essere ricavata nel seguente modo. Considerando che l'energia cinetica di una particella è:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{m^2v^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}$$

Ricaviamo $p = \sqrt{2mE}$ e quindi:

$$\Delta p = \frac{dp}{dE} \Delta E = \frac{m}{\sqrt{2mE}} \Delta E$$

Sostituendo nella formula (1), si ottiene che:

$$\Delta x \frac{m}{\sqrt{2mE}} \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

ed essendo $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ si avrà:

$$v \Delta t \frac{m}{\sqrt{2mE}} \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

¹⁶ Il momento equivale alla quantità di moto.

¹⁷ In Meccanica Quantistica non Relativistica, come in quella Classica, il tempo è considerato una grandezza fisica assoluta al di fuori degli eventi. Perciò la formula (2) può essere interpretata nel seguente modo: una eventuale variazione di energia ΔE

(cinetica) di una particella avviene in un tempo Δt in modo che valga $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$.

$$\frac{p}{\sqrt{2mE}} \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

ovvero:

$$\frac{p}{\sqrt{2m \frac{p^2}{2m}}} \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

da cui semplificando si ricava:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

Quindi, se una particella non cambia la propria energia, cioè $\Delta E = 0$, allora $\Delta t = \infty$, cioè essa rimarrà ad energia costante illimitatamente, finché una qualunque perturbazione non venga a disturbarla. Allo stesso modo se consideriamo un intervallo di tempo molto piccolo $\Delta t \equiv 0$, la variazione di energia del sistema fisico sarà $\Delta E = \infty$. Significa allora che entro i limiti temporali stabiliti dalla formula (2), *un sistema può essere soggetto a fluttuazioni energetiche che invalidano il principio di conservazione dell'energia*¹⁸!

¹⁸ Il principio di conservazione dell'energia affermava che la quantità totale di energia di un sistema isolato è una costante, ovvero il suo valore si mantiene immutato al passare del tempo.

FILOSOFIA

Il progresso del pensiero scientifico e il ruolo della scienza nell'interpretazione della natura

L'ideazione della meccanica quantistica non portò innovazioni solo da un punto di vista tecnico o matematico. Come già detto, l'innovazione principale della teoria dei quanta fu l'introduzione di concetti come probabilità e indeterminazione, che cambiarono completamente l'idea dell'oggettività del mondo naturale e il ruolo dell'osservatore nell'atto sperimentale della misurazione. Soprattutto Werner Heisenberg, il fisico tedesco ideatore del principio d'indeterminazione, e Niels Bohr, il padre spirituale della nuova teoria, furono gli artefici dello stravolgimento del pensiero scientifico; non a caso, Bohr stesso disse:

Chiunque pensi di poter parlare di meccanica quantistica senza avere le vertigini non ne ha capito nemmeno una briciola.

2.1 Galileo e la concezione deterministico-meccanicista del mondo

L'oggetto del mio studio non soddisferà tutti, solo perché la sua utilità non è evidente agli sciocchi.

Così Keplero scriveva nella *Dedica della prima edizione del «Mysterium Cosmographicum»*; ma già il suo contemporaneo Galileo, nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* del 1630, rompeva con la tradizione cristiana della scienza come metodo unicamente utile e semplificativo dell'opera di Dio, affermando il primato delle cose sugli spiriti umani, affinché questi si adattino a quelle, e non viceversa. Galilei comprese che *singoli processi naturali si possono estrarre dal complesso del tutto, determinare matematicamente e conoscere*¹⁹ e che *ogni discorso deve essere preceduto dall'osservazione, dall'esperienza, che deve confermare le proprietà dei corpi, affinché definizione e fenomeno si corrispondano perfettamente*. Nell'opera di Galileo venne per la prima volta messo in campo il rapporto tra ipotesi ed esperienza nella conoscenza del mondo²⁰, e la matematica diventò il linguaggio che permise all'uomo di conoscere il mondo naturale. Il processo di analisi e indagine del mondo dovette allora seguire regole ben definite, che il grande scienziato italiano sintetizzò nel suo famoso metodo scientifico, base di ogni conoscenza scientifica e *oggettiva* del mondo dei secoli successivi. Ma non solo: l'obiettivismo galileiano piegò alla propria *determinatezza matematica-teorica* l'intero mondo naturale, intuitivo, rendendolo intellegibile, *vero*, valido in quanto *intersoggettivo* solo grazie alla perfetta sovrapposizione di questo alla teoria e alla previsione. Conseguenza ovvia del pensiero galileiano è allora l'illusione della soggettività nel mondo intuitivo. La dottrina galileiana della *mera soggettività delle qualità specificamente sensibili*, implica la perdita di valore di quel mondo e di quella vita extra-scientifica. Infatti, se già totalmente compreso nella teoria matematica, e per le parti non comprese *non-vero*, il mondo intuitivo, che primariamente sottostà alla

¹⁹ W. Heisenberg, *Natura e fisica moderna*, ed. Garzanti, 1985, p. 104 "Gli inizi delle scienze naturali moderne".

²⁰ Più precisamente, come scrisse E. Husserl a riguardo in *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, il rapporto tra ipotesi e esperienza può essere considerato come il rapporto tra il mondo delle idealità e quello dei corpi intuitivi, i *plena*. Allora l'ipotesi generale galileiana che un'induttività universale domini il mondo intuitivo fa sì che la causalità universale idealizzata comprenda tutte *le forme e i plena fattuali*; il problema della fisica galileiana allora non è altro che il processo di approssimazione dei *plena* alle idealità presupposte matematicamente dalla teoria. Ma la caratteristica dell'ipotesi galileiana è quella di rimanere tale nonostante le infinite verifiche di essa; allora si può definire la vera natura come *"un'idea disposta all'infinito, [...] come legata a un infinito processo storico di approssimazione"*.

legge causa-effetto, risulta essere completamente prevedibile, predestinato, necessario: non c'è spazio nella fisica di Galileo, almeno apparentemente, per il soggetto e le sue *soggettività*.

L'errore di Galileo, o meglio la non perfetta comprensione dello scienziato italiano dell'operazione, del senso e della portata di tale operazione alla base della nuova disciplina da lui inaugurata, che obiettiva l'*in-sé naturale* a scapito delle intuizioni soggettive, fu ereditata acriticamente dai suoi successori²¹: l'idea di una verità matematica, geometrica, oggettiva, e di un metodo razionale d'indagine nella scoperta di tale episteme e delle sue conseguenze, fu il motore della ricerca scientifica e filosofica²² dei secoli seguenti al rinascimento italiano.

La marcata polarità tra la sfera soggettiva dell'osservatore e quella oggettiva della natura era ormai palese; tanto che si finì per dimenticare la prima, e pretendere di poter descrivere l'intero *essere*, la *natura-in-sé*, unicamente da quella oggettiva: la fisica classica newtoniana, modello ispiratore e ideale di ogni teoria successiva, fu ideata partendo dal presupposto di poter descrivere il mondo senza parlare di Dio o di noi umani. Newton rinunciò all'influenza esercitata, in ogni osservazione, sull'oggetto osservato; l'intuizione spazio-temporale, la legge di causalità e la geometria euclidea furono considerate categorie e forme intuitive *a priori* da Kant; l'idea della *ragione come vero lume*, a scapito della fede irrazionale religiosa e conseguentemente della fisica come *scienza esatta* fu rimarcata in tempo d'illuminismo, razionalismo e positivismo; la concezione *meccanicistico-materialista* del mondo, *unità sistematica razionale*, determinabile razionalmente - e matematicamente - in ogni suo minimo particolare, prese piede.

Famoso esempio di tale concezione deterministica è il *demone di Laplace*:

Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come l'effetto del suo passato e la causa del suo futuro. Un intelletto che ad un determinato istante dovesse conoscere tutte le forze che mettono in moto la natura, e tutte le posizioni di tutti gli oggetti di cui la natura è composta, se questo intelletto fosse inoltre sufficientemente ampio da sottoporre questi dati ad analisi, esso racchiuderebbe in un'unica formula i movimenti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomi più piccoli; per un tale intelletto nulla sarebbe incerto ed il futuro proprio come il passato sarebbe evidente davanti ai suoi occhi.²³

Con la riduzione del tutto ad un puro fenomeno meccanico, la scienza diventò *de facto* il metodo, la ragion d'essere di tale mondo pre-determinato.

Nell'ormai infinito processo storico di ampliamento della conoscenza umana sul mondo, profetizzato dall'illuminismo e dal positivismo, l'uomo, avvicinato e raggiunto Dio²⁴, consegue *anche un dominio sempre più perfetto sul suo mondo pratico circostante, un dominio che si amplifica attraverso un progresso infinito. Ciò implica anche il dominio sull'umanità che rientra nel mondo reale circostante, e quindi anche il dominio su se stessi e sugli altri uomini, un dominio sempre maggiore sul proprio destino, e così una*

²¹ Anche la meccanica quantistica, non traiamoci in inganno, è *galileiana*, in quanto il presupposto della matematizzazione del mondo dei pleni come modello scientifico rimane intatto. Anzi, più che il metodo, l'oggetto del metodo, e cioè quel mondo atomico ormai non-intuitivo, cambia nella fisica di Heisenberg e Bohr.

²² Esempio lampante dell'uso di un metodo scientifico nella ricerca della verità oggettiva e fondativa di tutto il sapere è il razionalismo cartesiano. Il risultato di tale applicazione fu il famoso *cogito ergo sum*: il soggetto è ciò che infine pone l'episteme in quanto soggetto pensante e percepente. Cartesio fu anche importante per la separazione e il dualismo tra *res extensa* e *res cogitans*, che il fisicalismo cercò di conciliare: ecco che scienze come la biofisica, prima ristretta al campo della *res extensa*, cominciarono a pretendere di poter spiegare la *res cogitans* come conseguenza dell'altra, o meglio a trattarla al pari dell'altro con un metodo d'indagine scientifico-fisico.

²³ *Essai philosophique sur les probabilités*, Laplace.

²⁴ Cioè onnisciente e onnipotente.

*felicità sempre più perfetta, quella felicità che gli uomini possono in generale concepire razionalmente. Perché anche nell'ambito dei valori e del bene si può giungere a conoscere il vero in sé.*²⁵ La scienza, *onnicomprendiva*, padrona di ogni campo del sapere e del vivere umano, venne quindi posta dal positivismo come la nuova *epistème*, il nuovo metro di giudizio per le azioni umane, capace di indicare una via per il progresso dell'umanità.

2.2 Il determinismo quantistico

Verso la fine dell'800, la cultura positivista-illuminista, sotto i colpi di personaggi come Nietzsche, il filosofo *distruttore* della metafisica, entrò definitivamente in crisi. Questo processo culminò, come sappiamo, con l'ideazione della teoria dei quanta nell'ambito prettamente scientifico, ma i suoi prodromi furono sicuramente condizionati e influenzati dalla critica alla cultura occidentale che investì l'Europa alla fine del secolo.

Questo ribaltamento di pensiero fu palpabile, e riuscì perfino a scalfire la *Bibbia* della visione deterministica del mondo, i Principi della Meccanica: nell'introduzione all'omonimo libro, del 1876, Heinrich Hertz, parla della fisica come una scienza della natura *le cui proposizioni, relative ai campi limitati della natura, hanno soltanto una validità corrispondentemente limitata: e che essa non è una filosofia che sviluppa una Weltanschauung*²⁶ *sulla natura nella sua totalità o sopra l'essenza delle cose*²⁷. Il fisico tedesco inoltre parla delle proposizioni fisiche come *immagini*, applicate arbitrariamente, in base a criteri umani²⁸, al mondo che ci circonda.

A fine '800 vennero anche ideate, nell'ambito della termodinamica le prime leggi probabilistiche, per la teoria cinetica dei gas: con la differenza che queste assumono il carattere probabilistico in conseguenza dell'*incapacità tecnica* di determinare con precisioni tutte le variabili del sistema fisico preso in considerazione²⁹. Al contrario, il principio d'indeterminazione ideato da Heisenberg, come visto al paragrafo 1.4, afferma la *limitazione intrinseca alla precisione delle misure, in particolare alla possibilità di misurare contemporaneamente quantità di moto e posizione di una particella con precisione arbitraria*, ed assume il carattere di legge fondamentale della meccanica quantistica.

Assumere tale principio come legge fondamentale significa ammettere come regola, come proprietà del mondo scientifico, come carattere per l'appunto intrinseco, un limite alla precisione di misura, di osservazione, ineliminabile perché non dipendente a sua

²⁵ E. Husserl, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, p.94-95.

²⁶ Traducibile con *concezione, visione*.

²⁷ W. Heisenberg, *Natura e fisica moderna* p. 173

²⁸ In particolare, Hertz individua tre criteri per la scelta di tali immagini: l'ammissibilità, ovvero la loro ammissibilità alle leggi del nostro pensiero; la loro giustezza, ovvero la loro concordanza con l'esperienza; la loro conformità allo scopo, ovvero *devono contenere quante più possibili relazioni essenziali dell'oggetto, e quante meno possibili relazioni superflue o vuote*.

²⁹ Un approccio simile fu utilizzato dall'interpretazione della meccanica quantistica delle *variabili nascoste*, che sosteneva l'illusione dell'indeterminazione dovuta all'incapacità sperimentale umana. Tale interpretazione fu però smentita dal *Teorema di Bell*, dal nome dello scienziato che lo ideò nel 1964, che afferma *l'impossibilità per una teoria fisica a variabili locali nascoste di riprodurre le predizioni della meccanica quantistica*. Bell, contro il realismo locale di matrice einsteiniana, che prevede valori definiti, indipendentemente dall'osservazione, per le proprietà delle particelle, formulò delle restrizioni, dette *disuguaglianze di Bell*, che dimostrarono la restrizione che il realismo locale porta ai fenomeni quantistici, non richiesta dalla interpretazione di Copenaghen.

volta dal soggetto³⁰. L'indeterminazione, non essendo più generata dal limite della tecnica, ma bensì assunta come postulato, al pari delle leggi fondamentali della dinamica newtoniana, distrugge il determinismo classico, perlomeno a livelli microscopici, ovvero la completa prevedibilità del mondo che Laplace aveva profetizzato, non prettamente per il suo formalismo matematico - la diseguaglianza di indeterminazione - ma per il concetto dietro tale formalismo e teoria. Infatti se in ogni momento del moto della particella una delle due variabili, a discapito dell'altra, risulta essere indeterminata, o meglio non totalmente oggettivabile, la previsione che la fisica classica e galileiana si promettono di compiere, quella previsione perfetta e totale, risulta essere impossibile, o meglio, soltanto approssimabile.

Nelle parole di Heisenberg stesso:

Tuttavia per soddisfare questi desideri - la conoscenza del mondo microscopico - ha dovuto essere compiuta una grave rinuncia; la rinuncia, per dirla in breve, proprio all'immagine scientifica del mondo caratteristica del secolo diciannovesimo; o, per essere più precisi, la rinuncia a quell'idea della realtà su cui si fondava la meccanica di Newton.

Ovvero la natura come mondo completamente descrivibile scientificamente e oggettivamente - cioè prescindendo dal soggetto descrivente. Continua Heisenberg:

La teoria dei quanti ha infatti condotto al risultato che un atomo non è più una figura accessibile alla nostra rappresentazione intuitiva come lo sono gli oggetti della nostra esperienza giornaliera. All'atomo "in sé" [...] non spettano secondo questa teoria nemmeno le più semplici proprietà geometriche e meccaniche, ma queste gli spettano solo nella misura in cui sono rese accessibili all'osservazione mediante interventi esteriori.

Cioè gli interventi esteriori e la perturbazione che essi apportano all'esperimento, come descritto al paragrafo 1.3.

[...] impedendoci, mediante la perturbazione necessariamente legata a ogni osservazione, di formarci un'immagine pienamente intuitiva dell'atomo. L'atomo non può più essere obiettivato senza riserva come una cosa nello spazio, che si modifica nel tempo in modo esattamente indicabile. Solo i risultati di singole osservazioni possono essere obiettivati, ma essi non danno mai un'immagine pienamente intuitiva. Ne consegue che l'immagine della realtà che costituiva il fondamento della meccanica di Newton era troppo ristretta, e deve essere sostituita da qualcosa di più vasto.³¹

La non-intuitività del mondo atomico, a differenza di quello dell'esperienza quotidiana, dove i *processi accessibili ai nostri sensi, con o senza l'aiuto di apparecchi, sono oggettivabili*, pone il mondo scientifico, ingerente e *indeterminante* nei confronti della realtà microscopica, a rivalutare il rapporto soggetto-oggetto nella descrizione della natura. Ma se la cornice del sistema fisico, il tempo e lo spazio assoluti, categorie assolute *a priori* per l'osservazione scientifica del mondo, vengono a mancare nella meccanica quantistica, com'è possibile una *scienza esatta*? E se il principio d'indeterminazione è valido, com'è può essere valida la fisica classica?

³⁰ Come dice Severino, in *Legge e caso*, p. 54: [...] *nella fisica quantistica la distruzione del determinismo è portata a compimento solo con l'eliminazione dell'interpretazione soggettivistica del principio d'indeterminazione. [...] Il principio d'indeterminazione conduce invece non solo alla negazione della conoscibilità, ma alla negazione dell'esistenza dell'ordinamento deterministico. E come il determinismo è essenzialmente connesso alla prevedibilità dello stato futuro del mondo, così il principio d'indeterminazione è essenzialmente connesso all'imprevedibilità di questo stato.*

³¹ W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, p. 114 - *L'immagine unitaria del mondo* (1941)

A riguardo, ricordiamo che la fisica quantistica, nonostante la sua sostanziale diversità dalla scienza precedente, adotta acriticamente comunque quell'operazione di sovrapposizione tra il mondo delle idealità, matematiche e geometriche, e la realtà intuitiva, come Husserl specificava. Alla base della teoria dei quanta l'impostazione scientifica, ovvero il metodo galileiano, è analoga a quella della fisica classica: l'esperienza e la teoria, la logica scientifica, rimangono i due motori per lo sviluppo e l'ampliamento del sapere scientifico. Non la validità, ma l'applicabilità dei concetti della fisica classica viene limitata dalle scoperte di quella moderna; l'indeterminazione nell'osservazione delle variabili coniugate non invalida la fisica classica nella sua totalità, ma semplicemente ne restringe il dominio a quei fenomeni per noi descrivibili *obiettivamente* - cioè osservabili e determinabili a prescindere dall'atto di misurazione e la sua perturbazione sull'osservato. Nella fisica quantistica ciò che c'è di diverso è l'obiettivo, lo scopo a cui essa mira:

Nella fisica classica la ricerca si proponeva di studiare fenomeni obiettivi che si verificano nello spazio e nel tempo, e le leggi che ne determinano lo svolgimento in base alle condizioni iniziali. [...] Nella teoria quantistica troviamo invece una situazione del tutto differente. Già la circostanza che il formalismo della meccanica quantistica non possa essere considerato come una descrizione intuitiva d'un avvenimento che si svolga nello spazio e nel tempo, mostra che la stessa non si occupa affatto della determinazione oggettiva di avvenimenti spazio-temporali. Piuttosto il formalismo della meccanica quantistica deve essere utilizzato allo scopo di poter determinare la probabilità di un risultato d'un nuovo esperimento in base alla determinazione d'un insieme di dati e risultati sperimentali già conosciuti.³²

Gli ideatori della teoria dei quanti, di fronte al nuovo panorama subatomico, scientificamente impenetrabile e indeterminabile sotto determinati valori, sono costretti a rivalutare il ruolo della scienza nell'indagine della natura: la fisica non è più quello strumento di previsione onnisciente e onnipotente, che tutto comprende e prevede; l'unica previsione *deterministica* possibile è la previsione delle probabilità che determinate posizioni, velocità, proprietà geometriche e meccaniche delle particelle, in seguito all'atto di misurazione³³, assumano certi valori, o rientrino all'interno di certi intervalli, senza alcun rapporto di causa-effetto tra gli autovalori in sé.

³² W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, p. 30 - *Lo sviluppo della meccanica quantistica (1933)*

³³ cfr. paragrafo 1.4

BIBLIOGRAFIA

- W. Heisenberg, *Natura e fisica moderna*, ed. Garzanti, 1985
W. Heisenberg, *Fisica e filosofia*, ed. il Saggiatore, 2010
W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, ed. Boringhieri, 1978
W. Heisenberg e altri, *Discussione sulla fisica moderna*, ed. Boringhieri, 1980
B. Greene, *L'universo elegante*, ed. Einaudi, 2005
Amadori, Lussardi, *Meccanica quantistica non relativistica*, ed. Matematicamente, 2009
J. Bell, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, ed. Adelphi, 2010
E. Husserl, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, ed. il Saggiatore, 2008
E. Severino, *Legge e caso*, ed. Adelphi, 2002
T. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, ed. Einaudi, 2009
M. Frayn, *Copenaghen*, ed. Sironi, 2009