

BREVE RIFLESSIONE SULLA CRISI DEL DETERMINISMO SCIENTIFICO

di *Leonardo Palilla*

Chi disse «preferisco avere fortuna che talento» percepì l'essenza della vita. La gente ha paura di ammettere quanto conti la fortuna nella vita: terrorizza pensare che sia così fuori controllo. A volte in una partita, la palla colpisce il nastro, e per un attimo può andare oltre, o tornare indietro. Con un po' di fortuna, va oltre... e allora si vince; oppure no... e allora si perde.

WOODY ALLEN, *Match Point*

La questione della crisi del determinismo scientifico sembra aver poco a che fare con l'argomento di oggi. In realtà, il titolo del mio intervento era originariamente "Dal *Kosmos* al *Chaos*", una provocatoria inversione dei due termini che costituiscono il tema di questo incontro. L'inversione dei due termini, però, non è solo una provocazione, ma vuole esprimere in modo conciso una delle più interessanti direzioni nella quale una parte della scienza contemporanea ha cominciato a puntare a partire dalla seconda metà del Novecento. Chi non ha mai sentito parlare almeno una volta nella vita della Teoria del Caos?

La Teoria del Caos nasce e si sviluppa, appunto, in stretta concomitanza con la profonda crisi del determinismo scientifico classico, quello di stampo newtoniano, una crisi iniziata durante l'Ottocento e da cui scaturirono, nei primi decenni del secolo successivo, due fra le teorie più rivoluzionarie della storia della scienza: la Relatività e, soprattutto, la Meccanica Quantistica. La Teoria del Caos si inserisce proprio nel solco di questa radicale messa in discussione delle concezioni scientifiche che avevano dominato le scienze europee da Galilei e Newton in poi. La crisi di tale determinismo scientifico segna quindi l'importante passaggio dal *Kosmos* della scienza newtoniana, dal suo ordine deterministico, lineare e reversibile, alla riscoperta del carattere irriducibilmente caotico, polimorfo, complesso e irreversibile della natura. Dal *Kosmos* al *Chaos*, appunto.

Il mio intervento, tuttavia, non verterà in maniera specifica sulla Teoria del Caos, ma cercherà di porre l'attenzione su alcune importanti tappe della crisi del determinismo scientifico classico che

hanno poi condotto una parte della comunità scientifica ad elaborare e abbracciare tale teoria, sancendo il trapasso dal *Kosmos* della visione deterministica della scienza newtoniana al *Chaos* di queste nuove concezioni scientifiche che iniziarono a circolare a partire dalla seconda metà del secolo scorso.

Ma in cosa consiste ciò che fino ad ora abbiamo chiamato *determinismo scientifico classico*?

La nascita della scienza moderna e il determinismo scientifico classico

Per capirlo, dobbiamo dare un rapido sguardo al modo in cui nasce la scienza moderna. La scienza moderna nasce come prodotto di quella Rivoluzione Scientifica che, tra il Cinquecento e il Seicento, cambiò il modo di intendere non solo la conoscenza umana, ma la natura stessa, ovvero l'oggetto di studio di tale conoscenza. Cosa distingue la scienza moderna da tutte le forme di conoscenza che l'hanno preceduta? Cosa la rende così diversa, rigorosa, efficace, rispetto a tutte le filosofie naturali che erano state elaborate dai tempi dei greci fino ad allora?

Un'interessante riflessione a tal proposito è presente nell'ultimo lavoro di Edmund Husserl, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, in cui il padre della fenomenologia sostiene che la scienza moderna sia nata dalla *matematizzazione della natura* compiuta da Galileo Galilei, lo scienziato italiano che pose le basi di quel metodo sperimentale su cui ancora oggi si regge l'intera scienza moderna. Tutta l'opera galileiana scaturisce dalla ferma convinzione che l'universo abbia una struttura rigorosamente matematica, come lo stesso Galilei sostiene in uno dei passi più noti del *Saggiatore*:

«La filosofia è scritta in questo grandissimo libro, che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'Universo), ma non si può intendere se prima non si impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri né quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto».

Sarà quindi possibile farsi strada, farsi luce, nell'oscuro labirinto dei fenomeni della natura imparandone il linguaggio, l'unico linguaggio attraverso cui sia possibile instaurare un vero e fecondo dialogo con essa: la matematica. E' proprio il nuovo ruolo, di fondamentale importanza, attribuito da Galilei alla matematica a costituire l'elemento decisivo che farà compiere alla conoscenza umana il salto qualitativo rispetto a tutte le altre teorie della natura elaborate dall'umanità prima di allora. Scrive infatti Husserl:

«La filosofia, dal tempo della sua origine, nell'Antichità, voleva essere "scienza", conoscenza universale dell'universo di ciò che è; non conoscenza quotidiana, vaga e relativa (*doxa*), bensì conoscenza razionale (*episteme*). Ma l'antica filosofia non raggiunge ancora la vera idea della razionalità e quindi la vera idea della scienza universale – era questa almeno la convinzione dei fondatori dell'epoca moderna. Il nuovo ideale era possibile soltanto sull'esempio della nuova matematica e delle nuove scienze naturali»¹

L'ideale della scienza come conoscenza universale, nutrito fin dalla comparsa della filosofia in Grecia, poteva essere raggiunto solo attraverso un adeguato sviluppo della matematica (sviluppo avvenuto a partire dal Cinquecento anche, e soprattutto, grazie alla riscoperta della matematica ellenistica), la quale avrebbe consentito di elaborare un metodo sistematico, sicuro, dotato di un linguaggio, quello matematico appunto, rigoroso e oggettivo, che avrebbe costituito il fondamento stesso della nuova scienza moderna:

«Conoscere il mondo "filosoficamente", in modo seriamente scientifico: ciò ha senso ed è possibile soltanto se si riesce a trovare un metodo per *costruire* sistematicamente, in certo modo preliminarmente, il mondo, l'infinità delle sue causalità»² (p. 61).

E questo metodo non poteva che trovare il suo fondamento, il suo strumento, nella matematica. La nuova scienza naturale matematica avrà quindi l'obiettivo di decifrare la natura scoprendone gli insiti rapporti di causa ed effetto, che verranno poi espressi in termini di leggi naturali attraverso una formulazione rigorosamente matematica:

«Galileo, lo scopritore della fisica e della natura fisica [...], scopre la natura matematica, l'idea metodica, egli apre la strada a un'infinità di scopritori e di scoperte fisiche. Egli scopre, di fronte alla *causalità universale del mondo intuitivo*, ciò che da allora in poi si chiamerà senz'altro (in quanto sua forma invariante) *legge causale*, la "forma a priori" del "vero" mondo (idealizzato e matematico), la "legge delle legalità esatta", secondo la quale qualsiasi accadimento della "natura" – della natura idealizzata – deve sottostare a leggi esatte»³

Con la scienza galileiana, di conseguenza, muta anche il modo di concepire la natura, intesa non più come manifestazione della *physis* greca o come prodotto dell'attività creatrice di Dio, ma come

¹ Edmund Husserl, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, EST, 1997, pp. 93-94.

² Ivi, p. 61.

³ Ivi, pp.81-82.

una fitta rete di rapporti di causa ed effetto, una foresta di simboli (ovviamente matematici) ancora tutta da scoprire e da esplorare, fitta rete che va determinata e collocata nella causalità universale prevista, preconfezionata, dal nuovo metodo scientifico. Da tutto ciò scaturisce ciò che Husserl definisce il *principio essenziale* della scienza moderna, un principio che ne mineralizza e devitalizza l'oggetto più proprio, ovvero la natura stessa:

«la natura in sé matematica, la natura che si dà nelle formule e che soltanto in base alle formule può essere interpretata»⁴

La natura diventa allora una complessa rete di rapporti causali, un sistema in cui non esistono che cause efficienti, un meccanismo in cui una particolare causa provoca sempre lo stesso effetto, così come un particolare effetto è sempre determinato da una causa specifica, un immenso ingranaggio le cui misteriose regolarità possono essere scoperte, osservate e, soprattutto, interpretate soltanto attraverso l'uso sapiente del linguaggio matematico.

A portare a compimento il progetto di Galilei fu poi Isaac Newton, il quale, con i suoi *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, pose definitivamente le basi della fisica moderna (e dunque dell'intera scienza moderna, visto che per secoli la fisica newtoniana fu considerata un modello da seguire e imitare per tutte le altre discipline scientifiche), e con essa della sua concezione deterministica dell'universo. Arriviamo così al punto che più ci interessa: in cosa consiste ciò che più volte in questa sede abbiamo chiamato *determinismo scientifico classico*?

Il determinismo scientifico classico sostiene che **la conoscenza dello stato di un sistema fisico (posizioni e velocità) in un particolare istante, anche arbitrariamente scelto, permette di determinare con assoluta precisione e esattezza lo stato di tale sistema in qualsiasi altro momento, sia passato che futuro.** Il maggior sostenitore del determinismo scientifico, il francese Laplace, così ne riassume l'essenza con un'immagine ormai famosa:

«Un'intelligenza che, per un istante dato, conoscesse tutte le forze da cui la natura è animata e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se fosse abbastanza vasta da sottoporre questi dati ad analisi abbraccerebbe nella stessa formula i moti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomo più leggero: per essa non ci sarebbe nulla di incerto, e il futuro come il passato sarebbe presente ai suoi occhi»⁵

⁴ Ivi, p. 82.

⁵ Citazione tratta da: David Ruelle, *Caso e Caos*, Bollati Boringhieri, 1992, p. 38.

Nulla sfuggirebbe dunque a questa intelligenza divina, nulla sarebbe più sottoposto all'incertezza, alla fluttuazione, al caso oscuro, imperscrutabile, se essa conoscesse in modo preciso lo stato dell'universo in un dato momento (posizione e velocità di ogni sua singola particella, di ogni suo singolo corpo, di ogni suo singolo pianeta o ammasso stellare) e, insieme alla conoscenza di tale stato iniziale, l'esatta formulazione matematica delle leggi fisiche, invarianti e universali, che determinano con assoluta precisione l'intera dinamica del cosmo.

Andiamo adesso a delineare quelle tre caratteristiche del determinismo scientifico classico che più ci interessano per la nostra discussione: la **linearità**, la **reversibilità** e il **ruolo dell'osservatore nel lavoro scientifico**.

Linearità. In un sistema fisico, la variazione dello stato iniziale A produce una variazione dello stato finale B che è proporzionale ad A. Ovvero, una piccola variazione di A provoca una piccola variazione di B, così come una grande variazione di A comporta una grande variazione di B. Se si mutano le condizioni dello stato iniziale del sistema, quindi, le condizioni dello suo stato finale cambieranno *proporzionalmente* alla variazione dello stato iniziale.

Reversibilità. Ogni fenomeno fisico è reversibile. Se un dato sistema fisico è passato da uno stato iniziale A ad uno stato finale B, è sempre possibile farlo tornare esattamente allo stato A invertendo il segno delle forze che vi sono state applicate. Il sistema può muoversi indistintamente verso uno stato successivo o verso uno stato precedente. La cosa non ha alcuna particolare rilevanza. In un sistema reversibile, dunque, non esiste nessuna direzione temporale privilegiata, nessuna freccia del tempo: il passato e il futuro sono perfettamente equivalenti, interscambiabili.

Ruolo dell'osservatore. Lo scienziato moderno osserva la natura in modo asettico, neutrale, oggettivo. Con l'avvento della scienza moderna, la natura assume i caratteri dell'*obiectum*, ovvero di qualcosa che "sta di fronte" al soggetto conoscente. La presenza dello scienziato che osserva il fenomeno naturale, però, non influisce affatto sul modo in cui tale fenomeno si presenta, si manifesta. Lo scienziato diventa il "puro occhio del mondo" che osserva in modo oggettivo i fenomeni opportunamente "provocati" all'interno della situazione sperimentale. La sfera rotola lungo il piano inclinato con scientifica regolarità, rispettando sempre le stesse leggi fisiche, sia nel caso in cui ci sia qualcuno ad osservarlo, sia nel caso contrario. Il presentarsi del fenomeno fisico preso in considerazione non dipende dalla presenza dello scienziato, il quale si limita ad osservarlo (o al massimo a creare i presupposti sperimentali affinché il fenomeno possa essere osservato nel modo migliore) e a scoprirne le leggi a cui sottostà.

Queste sono le tre caratteristiche del determinismo scientifico classico che più ci interessano per affrontare la nostra questione. Il graduale abbandono di ognuna di queste segnerà la crisi della concezione deterministica, conducendo verso la Teoria del Caos.

Crisi della reversibilità

La prima caratteristica del determinismo scientifico classico ad essere stata messa storicamente in discussione fu la reversibilità. Per questo motivo inizieremo da essa.

La maggior novità tecnologica introdotta dalla prima Rivoluzione Industriale è costituita senz'altro dalle macchine termiche. Secondo uno dei maggiori esperti della complessità, il premio Nobel Ilya Prigogine, la progettazione e la costruzione di tali macchine termiche segnarono una svolta, un punto di non ritorno, per la ricerca scientifica moderna, spostando l'attenzione dei fisici su fenomeni, quali il calore e le sue trasformazioni, che risultavano del tutto incomprensibili alla luce delle concezioni newtoniane ancora dominanti tra Settecento e Ottocento.

«Lo spettacolo delle macchine termiche, delle rossegianti caldaie delle locomotive in cui il carbone brucia senza ritorno per produrre il movimento, stabilisce un abisso invalicabile tra lo spirito classico e la cultura del XIX secolo»⁶

Tale abisso invalicabile, che cominciava a prospettarsi tra la fisica classica di stampo newtoniano e gli studi dei nuovi fenomeni fisici legati al calore che la Rivoluzione Industriale aveva fatto emergere, si aprì proprio con la scoperta di quei processi irreversibili che il determinismo della fisica classica non poteva affatto prendere in considerazione.

«La fisica credette di poter trascurare il fatto che ciò che veniva consumato dalle macchine a vapore spariva senza ritorno. Nessuna macchina termica restituirà al mondo il carbone che ha divorato»⁷

Il problema dell'irreversibilità dei processi fisici aveva quindi fatto il suo primo, vigoroso, ingresso nella scienza moderna. Non era affatto vero che, per ogni sistema fisico passato da un determinato stato iniziale A ad un determinato stato finale B, fosse possibile, invertendo il segno delle forze coinvolte in tale trasformazione, ripercorrere il cammino contrario, ritornando così dallo stato B allo stato A. Nelle trasformazioni termiche, infatti, qualcosa si perde definitivamente, in modo irreversibile. Se si brucia un pezzo di carta, si producono cenere, calore e fumo; il pezzo di carta è perduto per sempre, e non esiste alcun processo fisico inverso capace di ritrasformare questa cenere, questo calore e questo fumo nel pezzo di carta originario. Di conseguenza, cade anche la

⁶ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova Alleanza*, Einaudi, 1999, p. 119.

⁷ *Ibidem*.

tesi dell'equivalenza tra passato e futuro: esiste una direzione temporale, una freccia del tempo, che conduce dal passato al futuro, impedendo il cammino inverso; una freccia del tempo non limitata alle trasformazioni termiche, ma che si estende a tutti i processi fisici.

«Mentre le leggi della fisica classica negavano la freccia del tempo, oggi possiamo affermare che il divenire irreversibile segna tutti gli enti fisici»⁸

Tutte le indagini e le ricerche che furono avviate nella prima metà dell'Ottocento per far luce sulla natura del calore e delle sue trasformazioni sancirono la nascita di una nuova branca della fisica, la termodinamica. Tra i principi della termodinamica, quello che più ci interessa è senz'altro il secondo, ovvero quello che introduce il concetto di *entropia*.

Delle due formulazioni del secondo principio della termodinamica, prenderemo in considerazione quella di Clausius, secondo la quale è impossibile realizzare una trasformazione il cui *unico risultato* sia il trasferimento del calore da un corpo più freddo a un corpo più caldo. A questo punto, Clausius introduce un nuovo concetto, l'*entropia*, che avrà largo successo non solo nelle discipline propriamente fisiche, ma anche nella teoria dell'informazione, nelle scienze sociali, ispirando tra l'altro anche alcuni scrittori come l'americano Thomas Pynchon. Cos'è l'entropia? In termini non rigorosi, l'entropia misura il grado di disordine di un dato sistema: se un dato sistema passa da uno stato più ordinato a uno stato più disordinato, la sua entropia aumenta. Se consideriamo un sistema composto da una stanza che contiene un tavolo su cui sia poggiato un bicchiere di vetro, la caduta del bicchiere per terra e la sua conseguente frantumazione producono un aumento dell'entropia del sistema, il quale passa da uno stato di maggiore ordine (in cui il bicchiere era integro) ad uno stato di maggior disordine (in cui il bicchiere è frantumato). Espresso in termini di entropia, il secondo principio della termodinamica sostiene che **l'entropia di un sistema può solo crescere o, al limite, rimanere costante**. Secondo questa formulazione del secondo principio, l'entropia dell'universo intero tenderebbe continuamente ad aumentare.

L'introduzione del concetto di entropia, com'è facile immaginare, mise ancor più in discussione quella caratteristica del determinismo scientifico classico che stiamo qui analizzando, ovvero la reversibilità dei processi fisici. Era possibile trovare un modo efficace per spiegare il fenomeno dell'irreversibilità attraverso un'adeguata riformulazione della fisica newtoniana? Era possibile ricondurre tutti questi processi irreversibili alle concezioni deterministiche allora imperanti, vale a dire spiegare l'irreversibile attraverso il reversibile? Un tentativo in tal senso fu fatto da Ludwig

⁸ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *Tra il tempo e l'eternità*, Bollati Boringhieri, 1989, p. 139.

Boltzmann, il quale ebbe la geniale idea d'introdurre in fisica l'uso della probabilità come principio esplicativo dei fenomeni.

Immaginiamo un recipiente diviso in due da una parete divisoria, in modo tale che lo stesso recipiente sia così costituito da due settori di uguale volume. Supponiamo che il settore di sinistra contenga un consistente numero di piccole biglie nere e che quello di destra contenga lo stesso numero di piccole biglie bianche. A questo punto, viene tolta la parete divisoria che separa i due settori del recipiente. In un primo momento, la posizione delle biglie nere e delle biglie bianche non cambia più di tanto. In un secondo momento, il recipiente viene energicamente agitato per un paio di minuti. Com'è logico aspettarsi, le biglie di entrambi i colori si mescoleranno formando così nel recipiente una miscela mista di biglie bianche e nere.

La semplice situazione sperimentale appena descritta è un tipico esempio di processo irreversibile. Infatti, per quanto voi possiate agitare nuovamente il recipiente con la stessa forza e la stessa frequenza di prima, non si verrà mai a ricreare la situazione iniziale, con le biglie nere tutte da una parte e quelle bianche tutte dall'altra. L'entropia del sistema è aumentata, perché tale sistema è passato da uno stato ordinato (biglie bianche tutte a destra, biglie nere tutte a sinistra) ad uno stato disordinato (la miscela più o meno omogenea costituita dalle biglie di entrambi i colori mischiate fra di loro). In che modo spiegare questo fenomeno senza sostenerne l'assoluta irreversibilità? L'interpretazione probabilistica di Boltzmann afferma che il processo non è affatto irreversibile: il ritorno allo stato iniziale (biglie bianche tutte da una parte, biglie nere tutte dall'altra) non è del tutto impossibile, ma è solo *altamente improbabile*; maggiore sarà il numero delle biglie, minore sarà la probabilità che il sistema ritorni allo stato iniziale. Secondo tale interpretazione, se potessimo agitare il recipiente per un tempo molto lungo (anche millenni), il sistema dovrebbe passare per tutte le configurazioni possibili, fra le quali troviamo anche lo stato iniziale da cui siamo partiti (che è una delle tantissime configurazioni in cui il sistema può presentarsi). Ciò che rende questa possibilità di difficile attuazione è il fatto che la nostra particolare situazione iniziale è *una delle più improbabili* configurazioni che il sistema possa assumere. Ogni sistema fisico, secondo Boltzmann, tende ad allontanarsi dagli stati meno probabili per assumere via via gli stati più probabili, fino a quando non raggiungerà quello che, nella terminologia specialistica, viene detto *stato attrattore*, ovvero quello stato corrispondente alla massima probabilità (che nel nostro caso è lo stato in cui le biglie di entrambi i colori sono mescolate in modo più o meno omogeneo).

«L'importante formula di Boltzmann significa che l'evoluzione termodinamica, irreversibile, è un'evoluzione verso stati di probabilità crescente e che lo stato attrattore è uno stato macroscopico che corrisponde alla probabilità massima. Tutto ciò ci porta immediatamente molto lontano da Newton.

Per la prima volta un concetto fisico è stato spiegato in termini di probabilità. Certamente, lo status di questa spiegazione rimane problematico, ma la sua fecondità è fin da ora clamorosa»⁹

Può l'atto dell'osservazione modificare lo stato dell'oggetto osservato?

Con la sua interpretazione probabilistica dei fenomeni irreversibili, Boltzmann dava quindi inizio alla meccanica statistica, una nuova disciplina fisica in cui la probabilità non veniva più concepita come un semplice metodo d'approssimazione per supplire alle nostre limitate conoscenze riguardo a un sistema complesso, ma assumeva invece il ruolo di un vero e proprio principio esplicativo, con cui poter spiegare e descrivere in modo completo lo stato di un sistema fisico.

L'uso della probabilità in questa sua nuovissima accezione diventerà, qualche anno più tardi, un elemento fondamentale della Meccanica Quantistica, una delle più rivoluzionarie teorie fisiche del Novecento, la quale mise in crisi un'altra caratteristica della scienza newtoniana, ovvero il ruolo neutrale, asettico e oggettivo dello scienziato rispetto all'oggetto della sua osservazione.

Le basi della Meccanica Quantistica vengono poste nel 1900 da Max Planck, il quale introdusse, per la prima volta nella storia della fisica, il concetto di *quanto*. Per spiegare alcune anomalie relative al fenomeno fisico della «radiazione del corpo nero», Planck ipotizzò che gli scambi di energia non avvenissero in modo continuo, bensì attraverso piccole quantità discrete di energia che egli chiamò appunto “quanti”. Il fiume che scorre davanti a me sembra un flusso continuo, omogeneo, formato apparentemente da un'unica massa d'acqua che fluisce come una sola unità in movimento. Oggi, sappiamo che non è così. Il fiume che fluisce davanti ai miei occhi non è affatto un'unica massa d'acqua, continua e omogenea, ma, al contrario, è composta da miliardi e miliardi di minuscole molecole d'acqua che procedono assieme, formando in questo modo un flusso discreto di particelle così piccole e numerose da darci, però, l'impressione della continuità e dell'unità del fiume stesso. Allo stesso modo, l'energia, secondo Planck, non viene scambiata in modo continuo, ma attraverso questi piccoli pacchetti discreti, i quanti.

La tesi di Planck fu ripresa nel 1905 da Einstein, che la applicò nella sua spiegazione dell'effetto fotoelettrico: anche la luce, secondo Einstein, si comporta in certe situazioni come se la sua propagazione non avvenisse in modo continuo, bensì attraverso quantità discrete, veri e propri quanti di luce, a cui diede il nome di *fotoni*.

Nel 1913, la teoria quantistica di Planck permise al danese Niels Bohr di elaborare il suo modello atomico, superando in questo modo quello del maestro Rutherford (che paragonava l'atomo a un

⁹ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova Alleanza*, cit. , pp. 131-132.

piccolo sistema solare). Il modello di Bohr prevedeva che gli elettroni (di carica negativa) “girassero” intorno al nucleo dell’atomo, formato da protoni (di carica positiva), in modo tale, però, che stessero sempre e solo su un certo numero di orbite “permesse”, ad ognuna delle quali corrispondeva un ben definito livello energetico. Anche la disposizione dell’elettrone intorno al nucleo era adesso descritta in maniera discreta, e non più continua.

Con la quantizzazione del modello atomico assistiamo inoltre al passaggio dal concetto di “orbita atomica” a quello di “orbitale atomico”. Non possiamo determinare in modo preciso la posizione dell’elettrone nel suo velocissimo moto intorno al nucleo (come possiamo invece fare per i pianeti in ogni istante del loro moto di rivoluzione attorno al sole), ma possiamo però individuare le zone dello spazio circostante al nucleo in cui è più probabile trovarlo: a questo spazio fu dato il nome di orbitale. In tal modo, la probabilità entrava prepotentemente anche in questa nuova, rivoluzionaria, teoria fisica. Già uno dei padri della Meccanica Quantistica, Werner Heisenberg, aveva capito che l’interpretazione probabilistica della Fisica dei Quanta, come lui spesso la chiama, stava rompendo i ponti con il determinismo scientifico classico di stampo newtoniano:

«Per questa ragione il risultato dell’osservazione non può essere generalmente preveduto con certezza; ciò che può essere preveduto è la probabilità di un certo evento [...] La funzione di probabilità non deve, come fa il procedimento normale nella meccanica newtoniana, descrivere un certo evento ma, almeno durante il processo d’osservazione, un complesso di eventi possibili»¹⁰

L’impossibilità di determinare contemporaneamente la posizione e la velocità dell’elettrone è espressa da uno dei pilastri della Meccanica Quantistica, il *principio di indeterminazione* formulato dallo stesso Heisenberg nel 1927. Cerchiamo di capire l’immensa portata di tale principio attraverso un piccolo esperimento mentale. Per determinare la posizione di un elettrone, per “vederlo”, dovremmo “illuminarlo” con un raggio di luce, ovvero con un fascio di fotoni. Tuttavia, l’elettrone, “colpito” dal fascio di fotoni, finirebbe per assorbirne l’energia, e ciò muterebbe la sua traiettoria, la sua posizione. In questo caso, quindi, conosceremo la posizione dell’elettrone, ma saremo del tutto incapaci di sapere dove quest’ultimo sia andato a finire dopo aver assorbito l’energia fotonica. In conclusione, quando cerchiamo di determinare la posizione di un elettrone, sappiamo che non ci sarà permesso conoscerne con esattezza la velocità; quando invece ne vogliamo conoscere la velocità, non saremo in grado di determinarne la posizione. E questo perché la nostra osservazione, e gli strumenti con cui abbiamo compiuto tale osservazione, hanno influito in modo decisivo sull’evento che volevamo conoscere e studiare. La validità del principio di indeterminazione è stato confermato da parecchie situazioni sperimentali.

¹⁰ Werner Heisenberg, *Fisica e filosofia*, Il Saggiatore, 1982, p. 69.

Lo stesso Heisenberg afferma che tali situazioni sperimentali, a prima vista paradossali, sembrano

«indicare che l'osservazione gioca un ruolo decisivo nell'evento e che la realtà varia a seconda che noi l'osserviamo o no»¹¹

L'osservatore ha quindi perso la sua infinita distanza dall'oggetto della sua indagine, lo scienziato non è più un "occhio puro" che osserva la natura in modo asettico. Al contrario, egli, osservando i fenomeni naturali, finisce per influenzarli, modificarli, determinarne le modalità di manifestazione. La natura non si presenta più per quella che *sostanzialmente* è, ma, provocata dalle prassi specifiche con cui di volta in volta lo scienziato la interroga per carpirla, conquistarla e farla capitolare, essa gli risponde a tono, mostrandosi in forme e modi che dipendono dalla maniera in cui è stata interrogata, come una donna piacente che sceglie il vestito in funzione delle occasioni e della loro importanza.

«Noi dobbiamo ricordare che ciò che osserviamo non è la natura in se stessa ma la natura esposta ai nostri metodi d'indagine»¹²

In questo modo, a seconda degli strumenti di osservazione che adottiamo nelle diverse situazioni sperimentali, la realtà atomica, solo per fare un altro esempio, potrà apparirci sotto forma di onda o di particella. L'atto dell'osservazione, dunque, influisce in maniera decisiva sulle modalità in cui la natura osservata ci si manifesta. Anche questo aspetto del determinismo scientifico classico, perciò, va abbandonato.

Crisi della linearità

Così come la termodinamica aveva messo in discussione la reversibilità dei processi fisici e la Meccanica Quantistica il ruolo asettico e neutrale dell'osservatore, la Teoria del Caos muove una critica radicale al concetto di linearità.

Immaginatevi un campo da tennis, dove si stia svolgendo la partita del secolo. Gli spalti sono gremiti, le telecamere di tutte le televisioni del mondo riprendono l'incontro. La posta in palio è enorme: il vincitore si gioca, oltre a un premio stratosferico, anche l'immortalità nella storia del tennis. I due giocatori esausti giungono all'ultimo gioco in perfetta parità. Uno dei giocatori batte

¹¹ Ivi, p. 67.

¹² Ivi, p. 73.

l'ultimo servizio: a questo punto, chi sbaglia, perde tutto; chi vince, vince tutto. Mentre ognuno di loro risponde e contrattacca con determinazione agli assalti dell'avversario, la palla, all'improvviso, colpisce il nastro della rete, e si libra in aria, in direzione perfettamente verticale, finché la sua velocità non si annulla del tutto. La palla è ora sospesa a mezzo metro dal nastro, esattamente sopra la rete. Quando la palla inizia la sua inevitabile ridiscesa, gli occhi di tutti gli spettatori del mondo sono ansiosamente rivolti su di essa. Un silenzio quasi sacro si impadronisce del campo da gioco. La palla sta per ricadere nuovamente sul nastro. Cosa succederà a questo punto? Da quale parte del campo andrà a finire, decretando in questo modo la vittoria dell'uno e la sconfitta dell'altro? Il destino di ciascun giocatore è forse legato ad un sottile filo di vento che potrebbe deciderne, anche di poco, la traiettoria? O è legato alle minuscole increspature del nastro consunto, che potrebbero spedire la palla, ricaduta nuovamente su di esso, da una parte anziché dall'altra? O, invece, quel po' di terra che si è attaccata alla superficie della palla, durante l'ultimo rimbalzo sul campo, non potrebbe alterare il suo moto di ricaduta in modo infinitesimale ma sufficiente a determinare l'esito finale della partita? Come vedete, una seppur minima variazione nella ricaduta della palla può avere conseguenze imprevedibili e assolutamente divergenti, decidere la fortuna dell'uno e sancire il declino dell'altro. Gli esperti del Caos chiamano questa situazione *Dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali*.

Così James Gleick, autore di uno fra i più noti libri di divulgazione sulla Teoria del Caos, descrive la nascita di questa nuova scienza:

«Lo studio moderno del caos ebbe inizio con l'affacciarsi graduale della consapevolezza, negli anni sessanta, che equazioni matematicamente molto semplici potevano fornire modelli di sistemi violenti come una cascata. Piccole differenze in ingresso potevano generare rapidamente grandissime differenze in uscita: un fenomeno a cui è assegnato il nome di “dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali”. Nella meteorologia, per esempio, questa nozione si traduce in quello che è noto, solo a metà per scherzo, come “effetto farfalla”: la nozione che una farfalla che agiti le ali a Pechino può trasformare sistemi temporaleschi il mese prossimo a New York»¹³

Dobbiamo la scoperta di tale effetto al meteorologo americano Edward Lorenz.

Nel 1960, Lorenz era riuscito a programmare il suo computer, un Royal McBee i cui circuiti e le cui valvole occupavano tutto il suo ufficio del MIT, in modo tale da simulare il comportamento dell'atmosfera e degli oceani. Il numero di parametri da lui presi in considerazione era alquanto ristretto, anche perché la velocità e la memoria del computer in questione ne limitavano la potenza di calcolo. I modelli meteorologici che ne scaturivano non erano quindi del tutto realistici.

¹³ James Gleick, *Caos*, BUR, 2000, p. 14.

Nonostante ciò, le simulazioni di Lorenz destarono non poco interesse fra gli altri meteorologi del MIT. Il programma di Lorenz sembrava essere il primo passo per attuare uno dei più ambiziosi progetti scientifici di tutti i tempi: prevedere il comportamento di sistemi complessi come quelli meteorologici con la stessa precisione con cui è possibile prevedere il moto dei pianeti attorno al sole. Prima di allora, la maggior difficoltà di tale progetto consisteva nell'impossibilità di compiere in tempi ragionevoli l'immensa mole di calcoli che occorrevo in questa non semplice operazione. Un uomo armato di soli penna e foglio (oltre che di tantissima buona volontà) avrebbe senz'altro perso la sfida, fosse stato anche il più geniale dei matematici. Poi, però, vennero i computer, e la sfida cominciò ad apparire un po' meno ostica. Fu proprio uno dei più importanti matematici del Novecento, John von Neumann, a capire le grandissime potenzialità del computer nell'ambito della meteorologia. von Neumann, addirittura, riteneva che l'uso del computer avrebbe reso possibile non solo l'esatta previsione del comportamento atmosferico, ma anche il suo totale controllo da parte degli scienziati.

«Grazie alla disponibilità del computer, von Neumann immaginò che negli anni seguenti gli scienziati avrebbero calcolato le equazioni del moto dei fluidi. Poi un comitato centrale di meteorologi avrebbe inviato in cielo aerei a calare cortine di fumo o a inseminare nubi per forzare l'evoluzione del tempo nella direzione desiderata. Ma von Neumann aveva ignorato la possibilità del caos»¹⁴

Caos che fu poi scoperto nel 1961 proprio da Lorenz, e in modo del tutto casuale.

Un giorno, Lorenz, volendo riesaminare con più attenzione le fasi finali di una simulazione meteorologica da lui già precedentemente svolta, decise, per risparmiare un po' di tempo, di saltare tutta la prima metà della simulazione. Prese allora la stampato in cui si trovavano tutti i dati relativi agli stati che il sistema aveva via via attraversato durante la prima simulazione, ed estrasse tutti i valori numerici che si riferivano alla fase centrale del processo. A questo punto, inserì tali valori come nuove condizioni iniziali: il computer sarebbe quindi ripartito esattamente dalla metà della simulazione, in modo tale da riprodurre le stesse, identiche, fasi finali. Quando, circa un'ora dopo, Lorenz andò a controllare a che punto fosse la simulazione, si accorse, con sua grande meraviglia, che l'andamento atmosferico era radicalmente mutato rispetto alla simulazione precedente. Che la macchina si fosse inceppata come tante altre volte? Fu proprio dopo aver scartato questa possibilità che egli fece la scoperta della sua vita.

«D'improvviso si rese conto. Non c'era stato alcun errore di funzionamento. Il problema stava nei numeri che aveva introdotto. Nella memoria del computer erano registrati sei decimali:

¹⁴ Ivi, p. 23.

0,506127. Sullo stampato, per risparmiare spazio, ne apparivano solo tre, 0,506. Lorenz aveva introdotto il valore più breve, arrotondando, supponendo che la differenza – di un decimillesimo – non avesse alcun'incidenza»¹⁵

L'arrotondamento era stato fatto da Lorenz confidando nel carattere lineare delle equazioni che il computer implementava durante l'elaborazione dei dati. Inserendo un valore meno preciso rispetto a quello originario, il risultato avrebbe dovuto discostarsi solo di un po' rispetto alla simulazione precedente. Egli, al contrario, vide divergere i due risultati finali tanto che questi non sembravano nemmeno più partiti da condizioni iniziali quasi identiche.

«Dato un punto di partenza leggermente diverso, le condizioni meteorologiche dovevano evolversi in modo leggermente diverso. Un piccolo errore numerico era come un soffio di vento: i piccoli soffi di vento svanivano o si cancellavano fra loro prima di poter modificare i caratteri del tempo importanti, su vasta scala. Eppure, nel particolare sistema di equazioni di Lorenz piccoli errori si dimostravano catastrofici»¹⁶

La cosa che più sorprende, però, è il fatto che il caos scoperto da Lorenz ha poco a che fare con le turbolenze dell'acqua che scorre da un rubinetto, con il fumo di una sigaretta che serpeggia nell'aria o con i mulinelli d'aria che fanno turbinare le foglie in modo disordinato (tutti fenomeni che costituiscono comunque oggetti di studio privilegiati per i teorici del caos). Tale caos, al contrario, è generato da un sistema di equazioni, a volte anche di una semplicità quasi infantile, le quali, anziché produrre un ordine stabile, regolare e prevedibile (come ci si aspetterebbe alla luce del loro carattere prettamente deterministico), assumono invece andamenti e valori all'apparenza imprevedibili e disordinati, difficilmente spiegabili nel quadro teorico del determinismo scientifico classico. Tali sistemi sembrano quindi passare dal *Kosmos* delle loro condizioni iniziali, espresse in termini rigorosamente matematici, al *Chaos* di tutti quei comportamenti imprevedibili che poi assumono, in modo alquanto inaspettato, durante le loro singolari evoluzioni. Il caso più eclatante è senz'altro quello dell'equazione logistica, $y = rx(1-x)$, un'equazione non-lineare che permette di determinare la crescita di una popolazione anno dopo anno. Le strane proprietà di quest'equazione, apparentemente così semplice e inoffensiva, furono studiate negli anni Settanta da un fisico teorico convertitosi alla biologia, l'australiano Robert May. Egli scoprì che, facendo crescere i valori di un determinato parametro dell'equazione, il grafico corrispondente mostrava una visibile deriva verso

¹⁵ Ivi, p. 20.

¹⁶ Ivi, p. 21.

comportamenti tipicamente caotici. May si accorse che, da un certo punto in poi dell'evoluzione del grafico,

«la periodicità cedeva al caos, a fluttuazioni che non si assestavano mai su un modello regolare. Intere regioni del grafico erano completamente annerite dall'addensarsi dei punti. Se si stava seguendo una popolazione animale governata da quest'equazione – la più semplice di tutte le equazioni non lineari -, veniva naturale pensare che i mutamenti da un anno all'altro fossero assolutamente casuali, come se fossero stati sparsi attorno da un rumore ambientale»¹⁷

Ma anche il caos ha le sue regole: fu proprio ciò che scoprì l'eccentrico Mitchell Feigenbaum¹⁸.

Feigenbaum si era laureato in fisica delle particelle nel 1970 al MIT. Dopo qualche anno, era stato chiamato al Los Alamos Laboratory, dove aveva cominciato ad interessarsi alla non-linearità. Fu in questo periodo, nel 1975, che decise di analizzare un'equazione molto simile a quella logistica di May, e comunque della stessa, apparente, semplicità. Cominciò a calcolare i valori dell'equazione con una semplice calcolatrice, senza l'uso del computer. Contrariamente a quanto accaduto a Lorenz, fu proprio questa circostanza a permettergli di trovare ciò che stava cercando: l'ordine nel disordine, il *Kosmos* nel *Chaos*.

«Infine, fu la lentezza della calcolatrice che quell'agosto lo condusse a una scoperta[...]. Con un computer veloce e una stampante Feigenbaum non avrebbe probabilmente osservato alcuna struttura. Ma doveva scrivere i numeri a mano, e poi doveva meditare su di essi mentre stava aspettando e, per risparmiare tempo, doveva congetturare quale sarebbe stato il risultato successivo. D'un tratto si accorse che non aveva alcun bisogno di fare congetture. Nel sistema si celava una regolarità inattesa: i numeri presentavano una convergenza geometrica, nello stesso modo in cui in un disegno in prospettiva una linea di pali telefonici identici converge verso l'orizzonte»¹⁹

Dai suoi calcoli, Feigenbaum si rese conto che dietro l'andamento in apparenza disordinato, a cui tendeva l'equazione da lui considerata, si nascondeva invece una strana regolarità che si ripeteva a scale diverse, e che gli consentiva addirittura di prevedere il comportamento futuro dell'equazione e i valori che essa avrebbe via via assunto. Quando un matematico o un fisico scopre una regolarità, il passo successivo consiste nel ricercare la costante che vi soggiace. Feigenbaum compì anche questo passo, scoprendo in questo modo la prima delle due costanti che portano il suo nome, le *costanti di*

¹⁷ Ivi, p. 78.

¹⁸ Una breve e interessante biografia di Feigenbaum si trova in: Abraham Pais, *Ritratti di scienziati geniali. I fisici del XX secolo*, Bollati Boringhieri, 2007, pp. 110-138.

¹⁹ James Gleick, *Caos*, cit. , p. 172.

Feigenbaum, con le quali dimostrò che anche il *Chaos* ha le proprie regole, il proprio ordine, il proprio *Kosmos*.

Conclusione

Siamo partiti dalla scoperta dei fenomeni fisici relativi al calore e alle sue trasformazioni e, passando per la Meccanica Quantistica con il suo principio di indeterminazione, siamo giunti fino alla Teoria del Caos. Per proseguire nel nostro cammino abbiamo dovuto mettere in discussione tre caratteristiche fondamentali del determinismo scientifico classico: la reversibilità, il ruolo asettico dell'osservatore e la linearità. In questo modo, siamo partiti dal *Kosmos* del determinismo scientifico classico, dall'ordine della scienza newtoniana, e siamo arrivati al *Chaos* dei modelli meteorologici di Lorenz e dell'equazione logistica di May, per poi scoprire che anche il *Chaos* porta con sé un ordine intrinseco, rimasto gelosamente nascosto per anni, finché uno strano tipo di scienziato, di nome Feigenbaum, non ne scoprì i misteri. Il nostro percorso, dunque, non ci ha condotti soltanto *dal Kosmos al Chaos*, ma ci ha mostrato come perfino nel caos ci sia una qualche forma di ordine rigoroso, di ferrea regolarità: abbiamo quindi scoperto anche *il Kosmos nel Chaos*. La Teoria del Caos è una sfida che il mondo scientifico può, e deve, accogliere non soltanto come una semplice messa in discussione dei concetti classici della scienza moderna, ma anche come un fecondo impulso ad allargare quegli orizzonti epistemologici e mentali entro i quali si è mossa, e si muove a tutt'oggi, la titanica impresa della conoscenza dell'uomo nella sua continua e inarrestabile indagine sull'essere che lo circonda, e l'essere che lui stesso è.

Tuttavia, la sfida lanciata dalla Teoria del Caos alla scienza contemporanea può essere fatta confluire in quella, ben più ambiziosa e vasta, che la complessità rivolge oggi alle pretese della conoscenza umana di ridurre il polimorfismo e la ricchezza del reale in gabbie concettuali troppo rigide e chiuse, tanto da impedire il mantenimento di un dialogo fruttuoso e armonico con la natura stessa. Il pensiero scientifico moderno, infatti, corre il rischio di "mancare" il proprio oggetto, o addirittura di non vederlo affatto, se continuerà a imporre in modo autoreferenziale, quasi narcisistico, le proprie forme al reale, imprigionandolo e sterilizzandolo fino a ridurlo, in piena «epoca dell'immagine del mondo», ad un raggrinzito simulacro che dice solo ciò che l'uomo gli prescrive di dire. Un errore, questo, che va assolutamente evitato, così come Edgar Morin sottolinea nel seguente passo:

«Qual è l'errore del pensiero formalizzante e quantificatore che ha dominato le scienze? Non è certamente quello di essere un pensiero formalizzante e quantificatore, e non è nemmeno quello di mettere fra parentesi ciò che non è quantificabile e formalizzabile. Sta invece nel fatto che questo pensiero è arrivato a credere che ciò che non fosse quantificabile e formalizzabile non esistesse, o non fosse nient'altro che la schiuma del reale. Sogno delirante, e sappiamo che niente è più folle di un delirio della coerenza astratta»²⁰

Il rischio è dunque quello di un delirio della scienza moderna, un delirio che è tanto più pericoloso quanto più si presenta sotto forma di una razionalità che pretende, nella sua coerenza e esattezza, di essere onnisciente e onnipotente.

²⁰ Edgar Morin, *Le vie della complessità*, in *La sfida della complessità* (a cura di G. Bocchi e M. Ceruti), Mondadori, 2007, p. 33.