

Caso, caos e decisione

Pietro Greco

Diceva Norbert Wiener, uno che se ne intendeva, che il XX è stato il secolo che ha segnato il passaggio dalla scienza degli orologi alla scienza delle nuvole. Dalla scienza che, dopo aver accettato e per molti versi vinto, la sfida della certezza, si cimenta con la sfida dell'incertezza.

In realtà i guanti a forma di nuvola gettati sul tavolo della conoscenza nel secolo scorso con cui ancora oggi dobbiamo fare i conti sono almeno due. Uno riguarda lo sviluppo interno a diverse scienze, che nel cosmo, nell'universo armoniosamente ordinato e razionalmente descrivibile, ha visto affacciarsi finalmente le nuvole del caos: ovvero dei sistemi dalla dinamica non lineare, dell'evoluzione secondo percorsi non facilmente prevedibile e, infine, della complessità. L'altro guanto riguarda l'irrompere sulla scena della società umana di una serie di problemi – come i cambiamenti del clima – che chiedono ai politici e ai cittadini tutti di confrontarsi con questo caos e di decidere in regime di incertezza.

Per lungo tempo i due guanti della sfida non potevano essere indossati. Cosicché la scienza ha teso a spazzare via il cielo del suo universo meccanico dalle nubi di ciò che è complesso e non lineare, che non funziona appunto come un orologio. Mentre le società umane hanno affrontato i loro problemi, cronicamente caotici, semplicemente senza metodo. Oggi una serie di innovazione tecnolo-

giche – in primo luogo, quelle associate al computer – consente di accettare la doppia sfida: imparare a descrivere in termini scientifici l'universo caotico e imparare a decidere (al meglio) in condizioni di incertezza.

Ma cos'è, dunque, il caos? E perché è così importante occuparsene?

E questo domande, direbbero i filosofi, quale dimensione interessano: quello ontologico o quello gnoseologico? Che, tradotto in parole povere, significa: caos e incertezza sono intrinseci alla natura o sono solo il velo della nostra ignoranza? Non sono problemi astratti. Non solo perché queste domande dividono le comunità di studiosi, ma anche e soprattutto perché sono preliminare alla nostra capacità di cittadini comuni di «decidere in regime di incertezza».

Cerchiamo, allora, di capire cos'è il caos.

Nella cosmologia greca, il *caos* è l'insieme disordinato e indeterminato degli elementi materiali che preesiste al *cosmo*, al tutto meravigliosamente ordinato. Il caos era per i greci la nuvolaglia da cui è emerso quel meraviglioso orologio che è il nostro universo, ordinato e razionale.

Oggi, almeno per i matematici e i fisici, la parola caos ha un significato decisamente meno generale. E anche più deterministico. Il caos, anzi il *caos deterministico*, è la scienza che studia i grandi effetti provocati da piccole cause. O, in termini più rigorosi, l'evoluzione

dei sistemi dinamici non lineari e, comunque, dei sistemi divergenti. Sistemi così sensibili alle condizioni iniziali che la loro evoluzione nel tempo (almeno in un tempo medio-lungo) risulta, di fatto, imprevedibile.

È caotico il sistema clima, probabilmente il sistema geodinamico, lo stesso sistema solare. Sono caotici i sistemi ecologici e le società umane.

Ma, anche se ridimensionato nella sua portata cosmica e ridotto a disciplina matematica che studia solo una parte del tutto, il caos, anzi il caos deterministico, è, a ragione o a torto, uno dei protagonisti della storia scientifica e culturale del Novecento. Almeno della seconda parte del secolo: a partire dagli anni '60 del XX secolo, infatti, il caos deterministico è diventato una disciplina fisico-matematica di successo, che ha prodotto risultati, teorici e applicativi, notevoli.

Che consente (o, almeno, potrebbe consentire) ai politici e ai cittadini tutti di prendere decisioni migliori in regime di incertezza.

Si dice che, il *caos* (nella sua accezione moderna) sia apparso per la prima volta sulla scena a Boston, presso il Massachusetts Institute of Technology, nell'inverno del 1961, sul computer di un meteorologo: Edward Lorenz. L'ignaro studioso si accorge che basta modificare di un decimillesimo il valore di uno solo dei tanti parametri che descrivono un sistema climatico relativamente semplice, perché il calcolatore in breve tempo fornisca un'evoluzione delle condizioni meteorologiche del tutto diversa e inattesa.

Basta modificare leggermente le condizioni iniziali del sistema, perché la sua evoluzione *diverga*.

Le drammatiche differenze tra quei due sistemi meteorologici che partivano da condizioni iniziali quasi simili, apre la mente di Edward Lorenz e sancisce il successo di una metafora: basta dunque il battito d'ali di una farfalla in Amazzo-

nia, pensa e scrive il meteorologo texano, per scatenare un temporale a Dallas.

E poiché nessuno può prevedere se e quando una farfalla batte le ali in Amazonia, né soprattutto computare tutti i battiti d'ali delle farfalle, amazzoniche e non, nessuno, ne conclude Lorenz, può prevedere con certezza se di qui a qualche settimana ci sarà o meno un temporale su Dallas.

L'importanza della scoperta e della metafora di Lorenz non sta nel fornire una valida (e comoda) giustificazione teorica ai servizi meteorologici, che ancora oggi si dicono incapaci di prevedere che tempo farà tra due o tre settimane a Roma o in California. All'inopinata scoperta dell'*effetto farfalla* si attribuisce un ruolo nella storia e nella sociologia della scienza ben più pregnante. Si dice che con essa abbia avuto virtualmente inizio lo sviluppo, fragoroso, di una nuova disciplina scientifica: la scienza del caos, appunto. E che quel battito d'ali sul computer di Lorenz abbia segnato una delle più grandi, se non la più grande frattura epistemologica nella fisica di questo secolo. Perché avrebbe sconfitto definitivamente il determinismo e la causalità rigorosa della meccanica classica, dimostrando sul campo che l'evoluzione dei sistemi dinamici non lineari e comunque dei sistemi divergenti, cioè di gran parte dei sistemi che operano nel mondo macroscopico, è imprevedibile.

In realtà entrambe queste affermazioni non sono del tutto corrette. E impongono alcuni puntualizzazioni.

1. La scoperta del *caos* operata negli anni '60 è in realtà una riscoperta.
2. La riscoperta del *caos* non rappresenta una frattura epistemologica. Né ripropone in termini nuovi il problema del determinismo. Si limita a prendere atto (e non è poco) che ora è possibile confrontarsi con problemi un tempo giudicati intrattabili.
3. La riscoperta del *caos* difficilmente può risolvere l'aporia tra la reversibi-

- lità del tempo conosciuta dalla fisica e l'irreversibilità del tempo che noi sperimentiamo; né fornisce una spiegazione esaustiva della complessità evolutiva dell'universo e delle sue singole parti.
4. La riscoperta del *caos* non è, tuttavia, né una boutade né una semplice moda. Essa rappresenta, probabilmente, una frattura sociologica. Perché ha contribuito non poco a rinnovare gli interessi (scientifici e filosofici) di una parte della comunità scientifica, e della comunità fisico-matematica in particolare, allargandoli da un lato allo studio, trascurato in passato, dei sistemi più complessi (le nuvole di Wiener) e dall'altro a rimuovere (definitivamente?) un mito non della scienza, ma di una certa filosofia scienziata (propria magari anche di qualche scienziato) dell'Ottocento: il mito dell'universo orologio, ovvero della assoluta prevedibilità della natura e delle sue singole parti, nell'accezione gnoseologica del termine, ovvero nell'accezione che ne danno i filosofi che si occupano della teoria della conoscenza. L'uomo può prevedere tutto, in linea di principio, con precisione se non assoluta certo linearmente crescente.

La riscoperta del caos

Non è stato certo Edward Lorenz a scoprire la dinamica non lineare di alcuni sistemi e le sue drammatiche conseguenze. Molto prima, tra il serio e il faceto, Blaise Pascal, che nel XVII secolo si è occupato del caso e ha proposto una teoria matematica della probabilità, aveva fatto notare che:

Se il naso di Cleopatra fosse stato diverso, a cambiare sarebbe stata l'intera faccia del mondo.

D'altra parte il senso comune conosce da sempre l'estrema sensibilità alle condizio-

ni iniziali e, quindi l'instabilità, di alcuni dei sistemi naturali che ci circondano. Ivi inclusi i sistemi creati dall'uomo. Tutti noi abbiamo la percezione di come, a volte, basti un dettaglio piccolo e insignificante per modificare la storia di intero popolo. Recita l'antica filastrocca:

Per colpa di un chiodo si è perduto lo zoccolo;
per colpa dello zoccolo si è perduto il cavallo;
per colpa del cavallo si è perduto il cavaliere;
per colpa del cavaliere si è perduta la battaglia;
per colpa della battaglia il re ha perduto il suo regno.

Forse è meno noto il fatto che l'esistenza dei sistemi instabili era ben conosciuta anche alla nuova scienza e a padri della meccanica classica. Addirittura, come ricorda Jacques Laskar, un astrofisico che ha molto studiato i comportamenti caotici nel sistema solare, la fisica newtoniana – la fisica su cui si basa la visione dell'universo meccanico – nasce con questa consapevolezza. Isaac Newton sa che le sue equazioni gli consentono di calcolare con grande precisione l'orbita di ogni singolo pianeta intorno al Sole. E di prevedere perfettamente dove, guidato dall'attrazione gravitazionale della grande stella, ciascun pianeta sarà tra alcuni secoli o tra alcuni millenni. Purché siano note, ovviamente, la sua posizione e la sua velocità attuale. Isaac Newton, però, sa anche che nel sistema solare non operano solo le interazioni gravitazionali tra il Sole e i singoli pianeti. Ma anche le interazioni gravitazionali tra i pianeti stessi. Sono, queste ultime, interazioni molto più piccole delle precedenti. Delle mere perturbazioni. Sufficienti, tuttavia, a compromettere non solo la predicibilità di lungo periodo della dinamica planetaria, ma persino la stessa stabilità del sistema solare. Tant'è che Dio, ne conclude

Newton, deve personalmente intervenire, di tanto in tanto, per ripristinare l'ordine cosmico minato alla base dal caos generato dalle perturbazioni gravitazionali tra gli oggetti che lo costituiscono.

Newton evoca l'intervento di Dio per allontanare il caos perché non dispone degli strumenti di calcolo infinitesimale che gli consentano di tenere in conto gli effetti perturbativi della mutua attrazione gravitazionale tra i pianeti. E quindi, cosciente della estrema sensibilità del sistema alle condizioni iniziali, per superare questo *gap* della fisica matematizzata, si rivolge al potere divino. La figura di un Dio che interviene storicamente nelle faccende del mondo ogni volta che l'uomo o la fisica non sanno evitarne il collasso, sarà chiamata *Dio dei gaps*. Ci troviamo, quindi, di fronte al paradosso di una fisica, quella newtoniana, accusata di non avere una sensibilità (alle condizioni iniziali) che il suo fondatore ha dimostrato di possedere addirittura in eccesso.

Quella che viene oggi definita razionalità lineare sarà acquisita lentamente nel tempo, quando Leonhard Euler, Joseph-Louis Lagrange e, infine, Pierre-Simon de Laplace, a cavallo tra il XVIII e il XIX secolo, doteranno la fisica degli strumenti per il calcolo delle perturbazioni. In particolare Laplace dimostra che, a causa delle mutue perturbazioni gravitazionali, i pianeti non si muovono su orbite ellittiche fisse e geometricamente perfette, come immaginava Keplero. Ma su orbite se non proprio erratiche, certo un po' contorte e abbastanza mutevoli. Tuttavia queste orbite variabili possono essere predette con notevole precisione grazie a piccole approssimazioni che consentono di portare a termine il calcolo delle perturbazioni. Poiché le approssimazioni adottate sono di gran lunga inferiori alla precisione delle misure che possono essere eseguite alla fine del '700, Pierre-Simon de Laplace ne inferisce che sono sostanzialmente insignificanti. La

legge di Newton, conclude, è in grado di descrivere tutti i movimenti dei pianeti. La stabilità del sistema solare è assicurata e non c'è bisogno di alcun intervento esterno per ripristinarla. A Napoleone che gli chiede quale ruolo abbia Dio nel suo universo, Laplace risponde:

Dio? Non ho bisogno di questa ipotesi.

Il grande successo della tecnica matematica che ha messo a punto, porta il marchese de Laplace a maturare il suo noto pregiudizio metafisico a favore della visione determinista del mondo, sintetizzata in una delle pagine poeticamente più belle della letteratura scientifica di tutti i tempi:

Un'intelligenza che, per un istante dato, potesse conoscere tutte le forze da cui la natura è animata, e la situazione rispettiva degli esseri che lo compongono e che inoltre fosse abbastanza grande da sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e quelli dell'atomo più leggero: nulla le risulterebbe incerto, l'avvenire come il passato sarebbe presente ai suoi occhi.

Questo brano è diventato, giustamente, celebre come il *manifesto del determinismo scientifico*. Anche se pochi ricordano le frasi appena successive:

Lo spirito umano offre, nella perfezione che ha saputo dare all'astronomia, una debole parvenza di questa intelligenza.

E ancora:

L'astronomia fisica, la branca della scienza che rende il massimo onore alla mente umana, ci dà un'idea, ancorché imperfetta, di quale sarebbe questa intelligenza [...] La semplicità della legge che regola il moto dei corpi celesti e le relazioni tra le loro masse e distanze ci

consentono di seguire i loro moti con l'analisi fino a un certo punto; e per poter determinare lo stato del sistema di questi grandi corpi nei secoli passati o in quelli futuri è sufficiente al matematico conoscere tramite l'osservazione la loro posizione e la loro velocità in un istante qualunque. L'uomo deve questo vantaggio alla potenza degli strumenti impiegati e al piccolo numero di relazioni che entrano nei suoi calcoli. Ma l'ignoranza delle diverse cause che concorrono alla formazione degli eventi come pure la loro complessità, insieme con l'imperfezione dell'analisi, ci impediscono di conseguire la stessa certezza rispetto alla grande maggioranza dei fenomeni. Vi sono quindi cose che per noi sono incerte, cose più o meno probabili, e noi cerchiamo di rimediare all'impossibilità di conoscerle determinando i loro diversi gradi di verosimiglianza. Accade così che alla debolezza della mente umana si debba una delle più fini e ingegnose fra le teorie matematiche, la scienza del caso o della probabilità.

Il *manifesto del determinismo scientifico* contiene, dunque, l'onesto riconoscimento dell'impossibilità (gnoseologica, direbbero i filosofi) che ha la scienza dell'uomo di prevedere, completamente, tutti gli eventi futuri. Sia a causa della loro intrinseca complessità che dell'imperfezione degli strumenti analitici. Il padre del determinismo scientifico è tra i primi, dunque, a invitare la debolmente umana a usare quella che Ilya Prigogine chiamerebbe una *razionalità probabilistica*, piuttosto che una *razionalità deterministica*, per cercare di spiegare i fenomeni complessi o semplicemente caotici della vita quotidiana.

Se la *razionalità probabilistica* viene suggerita perfino da Laplace, già alla fine del '700, nell'analisi scientifica dei fenomeni complessi, non occorre andare oltre la fine dell'800 o l'inizio del '900 per un esplicito riconoscimento dell'esi-

stenza di sistemi semplici divergenti a causa della loro estrema sensibilità alle condizioni iniziali.

Il matematico francese Henri Poincaré non solo dimostra la non integrabilità, ovvero l'impossibilità di ottenere una soluzione generale esatta, del cosiddetto «problema a tre corpi»; ma scopre che, anche in presenza di leggi naturali perfettamente note, vi sono sistemi la cui evoluzione è strutturalmente imprevedibile, perché piccoli errori nella conoscenza delle loro condizioni iniziali producono grandi errori nella conoscenza delle loro condizioni finali.

Poco dopo Jacques Hadamard si impegna nello studio delle geodetiche, le linee più brevi tra due punti di una certa configurazione geometrica, di alcune particolari superfici a curvatura infinita (le superfici a curvatura negativa). Che è un po' come tentare di seguire le traiettorie di due palle su un biliardo incurvato a sella di cavallo. Hadamard si accorge che ogni differenza, anche minima, nelle condizioni iniziali di due geodetiche che restano a distanza finita, possono produrre una variazione di grandezza arbitraria nell'andamento finale della curva. In altri termini su un biliardo appena appena imperfetto, come lo sono tutti i biliardi del mondo, nessun giocatore potrà mai essere sicuro di vincere. Perché dando il medesimo colpo a due palle che si trovano (quasi) nella medesima posizione anche il più abile giocatore ottiene in breve (o, almeno, relativamente in breve) traiettorie completamente diverse e, quindi, assolutamente imprevedibili. Spostato in ambito cosmico, la partita, sostiene Hadamard, rende di nuovo imprevedibile, e quindi instabile, l'evoluzione di lungo periodo dello stesso sistema solare.

Secondo il filosofo Karl Popper sarebbe stato questo colpo a effetto sul biliardo di Hadamard a segnare il crollo definitivo, che lui evidentemente dà per avvenuto, del determinismo scientifico.

Un'opinione condivisa, peraltro, da numerosi autori, da Ilya Prigogine e Isabel Stengers, fino a Ivar Ekeland. In realtà, ancorché ben affondato e suffragato da una rigorosa analisi matematica, il colpo di Hadamard resta all'interno di quella *imprevedibilità gnoseologica* di alcuni sistemi fisici che è stato lo stesso Laplace a indicare, e non in presenza di un *indeterminismo ontologico* che, secondo molti, solo la meccanica quantistica porterà alla luce.

Insomma, l'incertezza resta un limite della capacità di conoscenza dell'uomo, non un carattere intrinseco della natura.

Resta il fatto, dunque, che la scienza alla fine dell'800 ha già scoperto il comportamento caotico di sistemi dinamici estremamente sensibili alle condizioni iniziali. E che su queste temi in Unione Sovietica lavoreranno a lungo Andrei Kolgomorov e la sua scuola, prima che in Occidente i lavori di Mitchell Feigenbaum e David Ruelle affrontino i problemi non lineari delle turbolenze nei fluidi, che Benoit Mandelbrot introduca il concetto di frattale, che Edward Lorenz si imbatta nell'*effetto farfalla* e che i computer rendano più agevole lo studio matematico e favoriscano la esplosiva (ri)scoperta dei sistemi dinamici estremamente sensibili alle condizioni iniziali.

Caos e determinismo

Le teorie del *caos* hanno molti meriti. Che abbiamo già ricordato e non mancheremo di ricordare ancora. Tra questi meriti, tuttavia, non sembra ci sia quello di aver fornito un contributo rilevante all'evoluzione del dibattito sui fondamenti della fisica. In particolare, né la scoperta né la riscoperta del *caos* rappresentano un'evoluzione del problema filosofico noto come *determinismo*. Sebbene autorevoli filosofi, come Popper,

e autorevoli scienziati, come Prigogine, sostengano il contrario.

In realtà la confusione nasce dall'uso ambiguo che si fa della parola e del concetto di *determinismo*. Troppo spesso e troppo superficialmente ritenuto del tutto intercambiabile con la parola e col concetto di *prevedibilità*.

Il *determinismo scientifico*, nella sua accezione laplaciana, ha un significato ontologico: sostanziale. Esso attiene al comportamento della natura, non alla conoscenza che l'uomo ha della natura. In particolare il *determinismo scientifico à la Laplace* sostiene che esiste una correlazione univoca (ma non necessariamente lineare) tra causa ed effetto. Per cui, dato lo stato di un sistema a un certo tempo, esiste una formula (una mappa, un'equazione differenziale) che consente in linea di principio, beninteso ad un'intelligenza che conosca tutte le forze che agiscono sul sistema e la posizione di ogni suo elemento, di stabilire in modo univoco quale sarà lo stato del sistema in un tempo futuro lungo a piacere o quale era lo stato del sistema in un tempo passato lontano a piacere.

Il *determinismo scientifico* è stato più volte messo in discussione. E con successo. Anche in un "mondo classico". Basta ricordare che già nel 1806 Siméon Denis Poisson si imbatte in soluzioni *singolari*, cioè in soluzioni delle equazioni differenziali utilizzate anche in meccanica classica, che si biforcano a partire da un medesimo stato iniziale. Le soluzioni *singolari* falsificano il teorema di esistenza e unicità delle soluzioni di un'equazione differenziale ordinaria. E Poisson, che è un fisico-matematico di gran classe, comprende che minano la base matematica della concezione deterministica della meccanica. Perché, pur definendo con precisione assoluta certe condizioni iniziali (posizione e velocità di una particella) un dato sistema di equazioni differenziali ordinarie (le equazioni di Newton) potrebbero ammettere, in casi

particolari, due diverse soluzioni (determinazione non univoca del passato e del futuro a partire dal presente). Poisson, che aderisce al pregiudizio metafisico del *determinismo scientifico*, rifiuta di credere nelle conseguenze fisiche della sua scoperta matematica. Sostenendo che lo studio attento dell'evoluzione di un sistema reale può evitare la biforcazione, escludendo l'una o l'altra delle soluzioni alternative. La fisica resta deterministica, sostiene Poisson, sebbene la matematica offra soluzioni non deterministiche. Poisson non è il solo, nel suo tempo, a rifiutare il pregiudizio metafisico indeterminista e ad aderire al pregiudizio metafisico determinista. Per cui il problema posto dalle sue soluzioni viene, di fatto, dimenticato.

Nei primi decenni del Novecento, una nuova meccanica, la meccanica quantistica, affronta (e forse a risolve) in modo radicale il tema. In particolare il giovane Werner Heisenberg, col suo *principio di indeterminazione*, dimostrerà nel 1927 l'impossibilità di seguire punto per punto l'evoluzione di un sistema quantistico (come la «traiettoria dell'elettrone») non per la divergenza di una formula matematica, ma per l'impossibilità – di principio, appunto – di conoscerne con precisione assoluta lo stato iniziale del sistema. Come scrive Heisenberg:

Nella formulazione netta della legge di causalità: “se conosciamo il presente, possiamo calcolare il futuro”, è falsa non la conclusione, ma la premessa. Noi *non possiamo* in linea di principio conoscere il presente in ogni elemento determinante.

Non possiamo conoscere con precisione assoluta la posizione e, nel medesimo tempo, la velocità con cui si muove un elettrone. Dunque non possiamo calcolarne la traiettoria.

Heisenberg nega che l'indeterminazione dello stato dell'elettrone sia gnoseologi-

ca, causata dall'ignoranza dell'uomo: è del tutto infruttuoso e insensato, dice, pensare a un mondo *reale*, inaccessibile all'uomo, ma perfettamente determinato in cui è valida la legge di causalità. L'indeterminazione del mondo che emerge dalla *nuova fisica* non è gnoseologica, ma ontologica. È un'indeterminazione reale.

Perciò [...] mediante la meccanica quantistica viene stabilita definitivamente la non validità della legge di causalità.

Neppure l'intelligenza evocata da Laplace potrebbe conoscere, contemporaneamente, la posizione e la velocità di una particella quantistica. E, quindi, prevederne il futuro.

Naturalmente non tutti accettano l'interpretazione di Heisenberg. E non tutti accettano la fine della causalità rigorosa neppure nel mondo a livello quantistico. Non senza combattere almeno, come annuncia Albert Einstein. Tuttavia la meccanica dei quanti rappresenta un punto di svolta, una vera frattura epistemologica. È infatti nel principio di indeterminazione e nella sovrapposizione di tutti gli stati possibili in cui si troverebbe una particella quantistica quando non è sottoposta a misura, che la visione deterministica del mondo trova il punto della sua massima crisi.

Al contrario, come scrive il fisico John Bricmont: «L'esistenza dei sistemi dinamici caotici non influenza in *nessun modo* questa discussione». Non c'è alcun punto di svolta, alcuna frattura filosofica operata dalla riscoperta del *caos*. La dinamica caotica non risolve, perché non affronta, il problema (aperto) del *determinismo* a livello macroscopico. E il motivo è presto detto: perché a livello dei sistemi dinamici macroscopici che si comportano in modo caotico in conseguenza della estrema sensibilità alle condizioni iniziali, l'impossibilità di conoscere con assoluta precisione il

presente è gnoseologica, non ontologica. Detto fuori dal gergo dei filosofi: deriva dalla nostra ignoranza del mondo, non dalla mondo così com'è fatto.

Nessuno discute che un sistema dinamico macroscopico che si comporta in modo caotico sia, a differenza di un sistema quantistico, sempre in uno stato perfettamente definito. Sono i nostri limiti che ci impediscono di verificarlo. Quello che, dunque, i sistemi dinamici caotici mettono in discussione non è il determinismo, ma la *predicibilità* del mondo. Il caos sancisce la nostra incapacità di fare previsioni esatte sulla evoluzione dell'universo macroscopico e delle sue singole parti, che sia valida o no la causalità rigorosa.

Da questa constatazione nasce l'indicazione di un metodo. Verificata la nostra incapacità di conoscere con precisione assoluta l'evoluzione del clima, della geodinamica terrestre o dell'ecosistema Terra, scegliamo di analizzare il mondo con una razionalità probabilistica. Costruiamo scenari di probabilità. Proprio come suggeriva Laplace.

Caos e irreversibilità

Anche in questo caso c'è un problema (metafisico) aperto che difficilmente può essere risolto dalla riscoperta delle leggi del caos. Il problema aperto è quello, enorme, della natura fisica e filosofica del tempo. E, più nello specifico, il problema della *freccia termodinamica del tempo* che sembra essere in contraddizione con le leggi, reversibili rispetto al tempo, della meccanica classica, relativistica e quantistica.

Alcuni negano l'esistenza di un problema, in quanto negano il divenire stesso del mondo. L'universo non diviene, sostengono, semplicemente è. La freccia del tempo sarebbe un'illusione prodotta dai limiti intrinseci di alcuni osservatori *parlanti*.

Altri riconoscono l'esistenza del problema, ma lo ritengono sostanzialmente risolto con il *teorema H* e la soluzione statistica proposti nel secolo scorso da Ludwig Boltzmann.

Altri ancora, infine, non negano l'esistenza di una reale *freccia del tempo*. E non si dicono affatto soddisfatti dalla soluzione di Boltzmann. Ma vedono le *origini della irreversibilità* dell'evoluzione di alcuni sistemi dinamici nelle loro particolari condizioni iniziali, piuttosto che nella natura irreversibile di nuove leggi fisiche da scoprire. All'interno di questo gruppo, c'è chi come Roger Penrose o come Ilya Prigogine, cerca le *origini della irreversibilità* nelle particolari condizioni iniziali in cui è (sarebbe) nato il *nostro* universo.

L'irreversibilità di gran parte dei fenomeni fisici presenti nell'universo è, forse, qualcosa più che un'illusione maturata dall'intelligenza limitata di alcuni osservatori di periferia. La *freccia termodinamica* coesiste, puntando nella medesima direzione, anche con una *freccia cosmologica* oltre che con una *freccia psicologica* del tempo, come nota Stephen Hawking. La loro esistenza sembra indicare che, forse, il problema, filosofico e fisico, del divenire del mondo è ancora aperto. O, per dirla poeticamente con Prigogine, che l'universo è modellato dal fluire del tempo. Certo, in mancanza di una prova decisiva, ogni ipotesi è lecita (fermo restando che sia presentata come ipotesi). Ma è molto difficile che la spiegazione di questo incessante divenire sia banalmente nascosta in qualche proprietà intrinseca attuale dei sistemi dinamici non lineari, piuttosto che in una legge fondamentale della fisica e/o nelle condizioni iniziali da cui ha avuto origine la storia cosmica.

Ma al di là di queste che restano, pur sempre, delle opinioni, c'è il fatto che, finora, dalle leggi del caos non è emerso ancora nulla che possa essere conside-

rato definitivo e fondamentale intorno all'origine della irreversibilità. Il problema resta aperto.

Il caos e il macchinismo

È possibile escludere, per tutte le ragioni su esposte, che il battito d'ali della farfalla di Lorenz e la (ri)scoperta del *caos* rappresentino una frattura epistemologica, l'evento primario che, in questa seconda parte del XX secolo, consente di ristrutturare i fondamenti della fisica.

Tuttavia il battito d'ali della farfalla di Lorenz e la (ri)scoperta del *caos* rappresentano, probabilmente, una frattura sociologica. Un evento primario che consente alla comunità scientifica, a partire dalla seconda parte del XX secolo, di ampliare i propri interessi, estendendoli allo studio di sistemi e fenomeni trascurati ai tempi di Poisson o di Poincaré. Quando furono sì scoperte la fisica e la matematica non lineari, ma senza che questo si traducesse in studi fisico-matematici sistematici dei fenomeni irregolari e non lineari esistenti nel mondo (ovviamente altre discipline scientifiche, come per esempio la biologia, erano al lavoro su questi temi, anche se non possedevano gli strumenti fisico-matematici per completarli).

La (ri)scoperta del *caos* è riuscita, forse perché i tempi sociologici sono infine maturati e certamente perché si è resa disponibile la potenza di calcolo dei computer, a dare agli studi dei fenomeni irregolari e dei comportamenti non lineari un impulso esplosivo. È un merito storico di importanza non trascurabile.

Di più. La (ri)scoperta del *caos* e delle dinamiche non lineari hanno operato un'ulteriore e, forse, più importante, frattura sociologica. Perché, riportando l'attenzione sui fenomeni non esattamente predicibili, sulla pratica impossibilità

di tener sotto controllo tutte le possibili evoluzioni di un sistema (fisico, biologico, sociale), hanno consentito a molti uomini di scienza e, più in generale, al grande pubblico (che di questi temi è stato largamente anche se non sempre lucidamente messo a parte), di superare la grande metafora dell'universo orologio. Una metafora *lineare* del mondo, antica di almeno duemila anni, che in ambito scientifico ha contribuito a rafforzare il paradigma meccanicista. E in un ambito culturale più ampio ha contribuito, almeno negli ultimi due secoli, a creare un'immagine semplicistica (e quindi pericolosa) non tanto del progresso scientifico, quanto del progresso tecnologico. Il merito forse più grande delle scienze del *caos* e dell'insieme delle filosofie è un merito, in qualche modo, indiretto. Che va oltre la scienza e la filosofia della scienza. Aver contribuito a ripensare in termini nuovi, e meno ingenuamente positivistic, i limiti e gli effetti impreveduti (e non desiderati) sia di quella idea infantile di poter "controllare il mondo", sia di quella idea di "crescita quantitativa illimitata" che sarebbe resa possibile dallo sviluppo tecnologico e considerata, con un'inferenza di tipo lineare, il mezzo più potente e, a un tempo, il fine dell'emancipazione dell'uomo.

La consapevolezza di vivere in un mondo di nuvole impone una nuova razionalità. Quella razionalità probabilistica di cui parlavano sia Prigogine, sia Wiener sia, a ben vedere, lo stesso Laplace. Ma passare da una razionalità lineare e per certi versi ingenua a una razionalità che costruisce scenari di probabilità e affronta le pieghe della complessità non è impresa facile. Soprattutto fuori dalle mura della repubblica della Scienza. Soprattutto dentro le mura dei mass media, vecchi e nuovi.

Ma di questo parleremo in un'altra occasione.