

COMPLESSITÀ E RELAZIONALITÀ NELLE SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

LAMBERTO RONDONI

I. L'idea che la scienza sia una, pur nella varietà delle sue espressioni, risale almeno ad Aristotele e alla sua gerarchia di saperi, al cui apice sta la metafisica. In epoca moderna, modelli unitari come quelli degli enciclopedisti francesi, della filosofia naturale sistematica di Lorenz Oken, della *Enciclopedia della Scienza Unificata* della scuola di Vienna, o dell'unità organizzativa della cibernetica, hanno conosciuto diversi successi. La cosiddetta *Scienza della Complessità* ne rappresenta forse l'esempio più recente e oggi tanto popolare che alcuni vi intravedono un nuovo genere di scienza¹. In questo articolo ne consideriamo potenzialità e problematicità in ambito matematico, fisico e naturale, evidenziandone la natura "relazionale", se così si può definire. Vedremo, infatti, che la complessità emerge dalle interazioni fra i componenti di un dato sistema di interesse e fra questo e l'ambiente circostante. Essendo la "relazione" comune a tutti i fenomeni conosciuti, si capisce che la si possa immaginare a base di una visione unitaria delle scienze, che rispetti lo statuto epistemologico di ciascuna.

Se, dal punto di vista del rigore scientifico, *complessità* non designa una categoria concettuale ben definita, il termine risulta efficace nell'evocare la sostanziale intrattabilità, in termini di semplici relazioni di causa-effetto, di fenomeni che emergono dall'interazione fra sistemi dotati di strutture interne, a loro volta risultanti dalle interazioni dei loro sottosistemi. Pertanto, la *complessità*

¹ S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Champaign 2002.

è spesso evocata in relazione alle sfide poste dalla globalizzazione e alle minacce di catastrofi ambientali, che sembrano rendere il mondo sempre più incontrollabile e refrattario a ogni tentativo di comprensione.

La rete telematica è un esempio eclatante di sistema complesso, ma quella del cervello umano rappresenta sicuramente la struttura che lo è maggiormente, pur avendo un peso di poco superiore al chilo e un volume pari alla cilindrata di un'automobile media. Si tratta di una collezione di neuroni, che comunicano fra loro attraverso connessioni sinaptiche, inviando impulsi elettrici alle stazioni cui sono connessi in uscita, secondo modalità stabilite dai segnali ricevuti dalle stazioni cui sono connessi in ingresso. È stupefacente che un tale mero scambio di "punti" e "linee", come quello dei telegrafisti di una volta, possa essere associato a capacità quali il riconoscimento delle immagini, il regolamento dei movimenti, la memoria e perfino il pensiero astratto.

Sulla base di questo esempio, discipline come la biologia o le scienze sociali ritengono complesso un sistema consistente di una *unità globale, organizzata*, contraddistinta da:

- una grande varietà di componenti, che possiedono delle funzioni specializzate,
- i cui elementi siano organizzati per livelli gerarchici interni,
- tale che i diversi livelli e gli elementi individuali abbiano numerosi legami fra loro.

*Secondo alcuni autori, un balzo nella complessità viene poi ottenuto se un sistema, già di per sé complesso, interagisce con l'ambiente circostante e non solo al suo interno*². D'altro canto che la numerosità degli elementi non basti a spiegare il comportamento di un dato sistema e che un ruolo determinante spetti alla quantità e qualità delle interazioni che lo riguardano è evidenziato, ad esempio, dalle differenze somatiche fra gli esseri umani e quei topi che ne condividono il 99% dei geni³.

Dato che le caratteristiche qui evidenziate si ritrovano in fenomeni alquanto diversi, già alla fine degli anni '70 del XX secolo

² M. Cotsaftis, *What makes a system complex: an approach to self organization and emergence*, LTME/ECE, Paris, arXiv:0706.0440 (June 2007).

³ J.H. Nadeau, *Tackling complexity*, in «Nature» 420, 517 (2002).

si teorizzava che uno spettro praticamente illimitato di discipline e problemi diversi potesse essere compreso entro un unico schema concettuale⁴. Tratti comuni a problemi decisamente diversi possono, infatti, essere ravvisati nella presenza di “individui” (molecole, batteri, uccelli, macchine, istituti finanziari, ecc.) che interagiscono e che perseguono obiettivi comuni o contrastanti. Si sperava, così, di capire e tradurre in termini matematici le regole di comportamento di sistemi diversi, per renderli prevedibili, utilizzabili o migliorabili.

In fisica si ritiene complesso un sistema costituito da numerose unità *semplici*, interagenti in modo *elementare*, il cui comportamento complessivo risulti sensibilmente più ricco di quanto possibile ai singoli componenti. Vi sono, infatti, differenze sostanziali fra i sistemi di interesse biologico e fisico; in particolare, mentre un neurone del cervello è connesso da circa 1000 dendriti ad altri neuroni, i componenti atomici o molecolari di un qualsiasi oggetto materiale interagiscono con poche unità di loro vicini. Inoltre, le connessioni neuronali sono caratterizzate da sofisticati fenomeni di trasporto di materia e carica elettrica, mentre quelle fra atomi si limitano a forze di attrazione o repulsione.

Le diverse visioni si possono conciliare dalla prospettiva di Prigogine e Stengers, che affermano:

Il metodo analitico [che vuole comprendere una data realtà nei termini delle sue componenti microscopiche, *n.d.a.*] ci appare oggi una fallace idealizzazione. La situazione potrebbe essere simile al ridurre i fabbricati in conglomerati di mattoni; con gli stessi mattoni si può costruire una fabbrica, un palazzo o una cattedrale. È solo a livello dell'intera costruzione che noi possiamo vedere l'effetto del tempo, dello stile in cui il fabbricato è stato concepito⁵.

⁴ Si rifletteva su come trattare unitariamente problemi derivanti, per esempio, da biologia, economia, linguistica, sociologia, fisica, chimica, scienza dei calcolatori, psicologia, ecc. Si veda la collana *Springer Series in Synergetics* fondata da H. Haken nel 1977.

⁵ I. Prigogine - I. Stengers, *La nuova alleanza. Metamorfosi della scienza*, Einaudi, Torino 1999.

In altre parole, componenti semplici possono dar luogo a costruzioni di arbitraria ricchezza, ma questa può essere apprezzata solo da opportune scale di osservazione; come ben sa il biologo, non si distingue un uomo da un pollo, osservando un campione istologico di pelle.

In definitiva, si definiscono complessi quei sistemi il cui comportamento, per più ragioni, non può essere direttamente determinato dall'analisi riduzionistica dei loro elementi costitutivi. Solitamente, questo concetto è laconicamente espresso dall'affermazione che *il complesso emerge quando l'insieme non è riducibile alla somma delle parti*. La sfida della complessità può dunque essere identificata nello studio degli effetti della cooperazione fra molti "individui" e delle relazioni che instaurano fra di loro e con l'ambiente circostante.

II. Gli sviluppi concettuali che hanno portato alla nascita di una scienza della complessità, risalgono alla seconda metà del XIX secolo e alla meccanica statistica di Maxwell, Boltzmann e Gibbs. Voler dare un fondamento sia meccanico che statistico alla trattazione dei sistemi che seguono le leggi della termodinamica, condusse allora ai primi progressi nello studio dei sistemi composti da un gran numero di elementi in interazione tra loro, con comportamenti collettivi qualitativamente diversi da quelli dei singoli componenti. L'irreversibilità dei fenomeni termodinamici, a dispetto della reversibilità delle dinamiche atomiche, costituisce, dunque, il prototipo della complessità.

Un altro progresso cruciale fu l'introduzione del concetto di *caos deterministico*, all'inizio del XX secolo, da parte del matematico francese Henri Poincaré. L'idea che il comportamento di un sistema descritto dalle leggi deterministiche della meccanica possa essere *di fatto* imprevedibile è uno dei punti di svolta nell'evoluzione del pensiero scientifico, che portò a riconoscere l'importanza, nell'indagine scientifica, di un fattore eminentemente antropologico: la misurazione. Dato che ogni misura è affetta da un margine di incertezza, questo sancì l'impossibilità, *anche in linea di principio*, di fare previsioni a lungo termine, quando le incertezze si amplificano in modo esponenziale. Si parla in tal caso di dinamiche *caotiche*, perché determinazioni comunque accurate dello

stato iniziale diventano incertezza completa in pochissimo tempo, rendendo imprevedibili le pur ben definite evoluzioni dei sistemi di interesse⁶.

Lo sviluppo delle tecnologie di calcolo elettronico e delle teorie ad esso collegate, a partire dalla metà del XX secolo, è l'ultima pietra miliare nel cammino verso la scienza della complessità. A grandi scienziati come Turing, von Neumann e Shannon si deve l'introduzione di concetti come *macchina universale di calcolo*, *automa cellulare* ed *entropia di informazione*, che contribuirono in modo rilevante al progresso dell'informatica, ma rimasero a lungo relegati al rango di curiosità nelle scienze naturali, all'epoca principalmente impegnate nell'avanzamento della fisica nucleare, della chimica organica e della biologia molecolare. Solo negli ultimi decenni, la necessità di affrontare sistematicamente i problemi dell'organizzazione della materia vivente, della meteorologia e delle proprietà dei sistemi disordinati, ha reso questi concetti centrali allo studio dei sistemi complessi in genere.

III. Poche idee, fra quelle apparse in epoca contemporanea, sono risultate così pervasive come quella della complessità; tuttavia, il suo dilagare negli ambiti più disparati ha prestato il fianco a critiche. Secondo Lucio Russo, queste possono perfino:

[...] avere un effetto liberatorio su quanti, trovandosi a disagio per la propria ignoranza sull'argomento, hanno tentato inutilmente di farsi spiegare da qualche appassionato neofita di "complessità" in cosa consista il nuovo grimaldello interpretativo, ottenendone quasi sempre risposte generiche e banali. La sterminata bibliografia sull'argomento non è di grande aiuto, in quanto i libri

⁶ Consideriamo la crescita *esponenziale* in base 10. Significa che una incertezza iniziale viene amplificata del fattore 10^n , dopo il passaggio di sole n unità di tempo caratteristiche del sistema in esame. La crescita esponenziale può manifestarsi in qualunque base $a > 1$, dando luogo ad amplificazioni di valore a^n ad ogni passaggio di n tempi caratteristici. Si tratta di una crescita violenta ed esplosiva, come quella di una bomba atomica. Concepita da Filone di Bisanzio nel terzo secolo avanti Cristo, la nozione di caos deterministico fu dimenticata, per essere riscoperta da Poincaré solo all'inizio del XX secolo.

in cui la parola appare nel titolo trattano in genere molti argomenti diversi e non è possibile trovarvi la chiara esposizione di neppure un risultato della “teoria della complessità”⁷.

Le ragioni sono molteplici e, in parte, legate al fatto che dalla fisica sono spesso mutuati i modelli matematici per lo studio di fenomeni complessi qualsiasi, malgrado l'indagine fisica si riferisca a elementi del tutto estranei a molti altri ambiti. L'interpretazione dei risultati così ottenuti si fa tanto più problematica quanto più ci si scosti dal contesto originario, per trattare di urbanistica, economia, politica, storiografia, psicologia, sociologia ecc. La complessità, vista come “scienza del tutto”, genera quindi tanto entusiasmo⁸, quanto timori che questo vada a scapito del rigore e dell'affidabilità degli studi svolti⁹. Per esempio, a chi non ha dubbi sulle ragioni del surriscaldamento del Pianeta e, oggi, stabilisce lo standard del *politicamente corretto*, risponde chi ritiene che non siamo ancora in grado di evidenziare il fenomeno, tanto meno ne possiamo cogliere le cause¹⁰.

⁷ L. Russo, *Alcune osservazioni sulla complessità*, in «Punti Critici» 2, 79 (1999).

⁸ Per esempio, il 20 agosto 2010, nel sito www2.polito.it/didattica/polymath/htmlS/info/CapitoloPrimo/ToniComelloPredeRagni/ToniComelloPredeRagni.htm#_ftn3 si leggeva: «Lo studio dei sistemi complessi è stimolante e si può rivelare un'avventura di straordinaria intensità. Significa infatti studiare noi stessi e tutti i sistemi che hanno a che fare con la nostra vita. È qualcosa di più della sterile applicazione di formule matematiche. Ha a che fare con la ricerca del senso delle cose. Ha qualcosa a che fare con il senso di smarrimento, dantesco».

⁹ Bricmont e Sokal affermano che: «Alcune sedicenti “applicazioni” della teoria del caos – per esempio alla gestione delle imprese o alla critica letteraria – rasentano l'assurdo. E, a peggiorare la situazione, la teoria del caos, che è ben sviluppata da un punto di vista matematico, è spesso confusa con le teorie, ancora in stato embrionale, della complessità o dell'auto-organizzazione» [A. Sokal - J. Bricmont, *Imposture intellettuali*, Garzanti, Milano 1999, p. 139] e che: «Infine c'è una pericolosa tendenza – acuita, certamente, dalle esigenze di marketing – a vedere in ogni novità una “rivoluzione concettuale radicale”. Tutti questi fattori combinati forniscono al pubblico istruito una visione distorta dell'attività scientifica» [*Ibid.*, p. 199].

¹⁰ Il problema del riscaldamento globale è così articolato da sfuggire alla comprensione diretta; si richiedono quindi modellizzazioni matematiche che, però, poggiano su semplificazioni e assunzioni la cui portata è difficile da giudicare

Inoltre, è da evitare l'equivoco secondo cui i sistemi complessi rappresentano ciò che è possibile studiare solo attraverso un calcolatore. Le simulazioni del traffico automobilistico, che sono impossibili senza l'elaboratore elettronico, pur essendo diventate essenziali nella pianificazione urbana di molte città, ne rappresentano un degno esempio. Ma lo studio dei sistemi complessi non dovrebbe avere l'obiettivo della descrizione o riproduzione di certi fenomeni attraverso strumenti di calcolo, quanto quello di comprenderne le leggi sottostanti.

Lucio Russo sostiene che:

In questa situazione la tentazione di concludere rapidamente che quella della complessità sia solo una moda superficiale, che nasconde il vuoto intellettuale, è forte, soprattutto da parte di chi ha sentito parlare di complessità da politici o mediologi, ma va respinta. In realtà la "complessità" appare un contenitore di aspetti in evidente e violento contrasto: sotto la stessa etichetta sono racchiuse le banalità sulla "complessità della storia", con cui qualcuno vorrebbe sostituire la storia nei programmi scolastici, ma anche importanti risultati scientifici nel pieno senso della parola, come quelli ottenuti nel campo della complessità computazionale, della teoria dei vetri di spin, della dinamica dei sistemi caotici o delle reti neurali. Il programma ambiziosissimo di descrivere e progettare sistemi "complessi" in quanto strutturati, autoregolanti e capaci di espandere la propria struttura sembra convivere con la diffusione dell'idea rinunciataria che il mondo, essendo "complesso", non è comprensibile¹¹.

Ciò testimonia un forte interesse per i problemi della complessità, dal quale può nascere una nuova stagione nella ricerca scientifica, anche se la cautela è d'obbligo e molte questioni re-

a priori. Si pensi che perfino il ben più limitato fenomeno della recente fuoruscita di petrolio, da un pozzo nel Golfo del Messico, ha per ora smentito le catastrofiche previsioni dei nostri calcoli più accurati.

¹¹ L. Russo, *Alcune osservazioni sulla complessità*, cit.

stano pendenti: come è influenzata la scienza dal contesto socio-economico e culturale del suo tempo? Deve essere intesa come mera ricerca di convenzioni e protocolli, sui quali si possa trovare un accordo, o anche come indagine sui diversi aspetti di una verità oggettiva? Le risposte alle domande di questa natura influenzeranno sicuramente lo sviluppo scientifico del prossimo futuro.

IV. *Multi-agente* è un termine che viene spesso utilizzato nella modellizzazione dei sistemi complessi e indica un mondo costituito da una sorta di scacchiera su cui gli *agenti* si muovono e interagiscono, per raggiungere collettivamente un dato scopo. Gli agenti possono adattarsi a diverse situazioni, oppure possono sviluppare comportamenti conflittuali fra di loro. Si tratta di una struttura comune a molti processi biologici oltre che fisici e l'informatica l'ha metabolizzata in una varietà di metodi di programmazione, noti come "algoritmi evolutivi" o "swarms", che mimano, in particolare, le evoluzioni degli stormi di storni. Queste sembrano infatti il risultato di regole molto semplici: un uccello deve imitare il comportamento dell'uccello più vicino:

- a) mantenendo la sua direzione e velocità,
- b) cercando di non urtarlo.

È sbalorditivo che regole così semplici possano far emergere un tipo di intelligenza collettiva, che determina evoluzioni imprevedibili e originali e ha l'obiettivo della sopravvivenza dello stormo.

Sistemi di questo tipo costituiscono un'evoluzione degli *automi* cellulari ideati da J. von Neumann, attorno al 1940, che sono modelli definiti su griglie spaziali, ai cui nodi la presenza o assenza di un "individuo" e le regole di comportamento vengono codificati in stringhe di "1" e "0", come nella memoria di un computer. L'intuizione di von Neumann era che le basi logiche dei fenomeni biologici: sopravvivenza, riproduzione, evoluzione e competizione, dovessero esprimersi in semplici regole di evoluzione e nello scambio di informazioni fra sottoinsiemi assai ristretti di elementi. Oggi, assieme alle loro varianti più recenti, come le reti multi-agente, gli automi cellulari rappresentano un campo di indagine affermato ben al di là dei confini della biologia teorica e costituiscono il modello più comune di sistema complesso.

V. Nella scienza dei calcolatori, nella teoria delle probabilità e nella teoria dei sistemi dinamici la *complessità* è stata introdotta come concetto operativo, per trattare determinati problemi in forma numerica. Un esempio ne è dato dalla dinamica delle popolazioni, in cui soggetti di una specie competono tra loro, o con soggetti di altre specie, perseguendo un equilibrio vantaggioso alla loro perpetuazione. L'antesignano dei modelli di questo tipo è quello di Lotka e Volterra, che riguarda un universo popolato solamente da prede e predatori, nel quale le due popolazioni fluttuano ciclicamente¹². Quando ci sono pochi predatori, le prede crescono in numero, andando ad aumentare le risorse alimentari dei predatori. Questi allora proliferano, fintantoché le prede non si facciano insufficienti, costringendoli a diminuire in numero. Il fenomeno può stabilizzarsi, portare all'estinzione dei soli predatori, oppure di entrambe le popolazioni. Nonostante il modello fosse estremamente idealizzato e semplice, spiegò i dati statistici relativi alle specie ittiche nel Mar Adriatico, nel periodo 1905-1923, quando, a causa della Prima Guerra mondiale, la pesca, pressoché cessata, aveva scarsa influenza sulla popolazione ittica. Volterra si dedicò con grande impegno allo sviluppo di teorie sulle interazioni fra specie biologiche, contro il parere di molti biologi, che ritenevano i modelli matematici non idonei alla loro disciplina, a causa delle inevitabili semplificazioni richieste. Oggi possiamo dire che entrambi i punti di vista erano validi: la biologia si è fortemente matematicizzata, ma manca ancora di strumenti matematici ad essa pienamente consoni.

Ora, affrancando i termini utilizzati in questa modellistica dal loro significato abituale, con un'operazione di astrazione, si possono ottenere risultati curiosi. Per esempio, se i simboli matematici rappresentanti una popolazione vengono interpretati come agenti del mercato azionario e alla competizione tra animali si sostituisce la propensione all'acquisto o alla vendita di un titolo, si ricava un modello di evoluzione del mercato finanziario, la cui adeguatezza dovrà poi essere valutata, *a posteriori*, tramite osservazione di-

¹² A. J. Lotka, *Elements of physical biology*, Williams & Wilkins Co., Baltimore 1925; V. Volterra, *Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi*, Memorie R. Accademia Nazionale dei Lincei, Ser. VI, vol. 2, 1926.

retta del fenomeno. Una tale strategia ha avuto successo, in molti casi, come nello studio urbanistico di moderne metropoli, della dinamica degli insediamenti umani in epoca protostorica o della nascita dei villaggi e città-Stato nell'antichità. Quale ne sia la ragione profonda non è ben compreso, ma è un fatto che fenomeni completamente diversi presentino spesso similitudini sorprendenti e, fintanto che ci si limiti alla descrizione di quegli aspetti, che la matematica possa trattarli come un unico fenomeno.

L'accordo con la realtà non è garantito, tuttavia le scienze naturali hanno conosciuto eloquenti successi, in questo senso, come quando una data similitudine fra immagini di tessuti cresciuti in laboratorio e di simulazioni numeriche dell'universo a larga scala portò dei ricercatori torinesi alla scoperta, negli anni '90, di un fenomeno riguardante la vascolarizzazione dei tumori. Analogamente, la diffusione di materia, il trasporto del calore e lo sviluppo di colonie batteriche sono descritti da una stessa equazione, che prende nomi diversi di volta in volta: Legge di Fick per la diffusione, Legge di Fourier per il calore, ecc. Per l'applicazione di questa equazione ai diversi fenomeni, basta interpretare diversamente gli stessi enti matematici.

Occorre sottolineare, però, che la conoscenza delle leggi d'interazione tra le molecole di un dato materiale è stata ottenuta tramite misure sperimentali, che ne hanno consentito l'espressione in formule matematiche, ripetutamente verificate nel corso dei decenni. Non si può dire lo stesso della descrizione di un sistema urbanistico o economico, le cui regole di interazione non sono direttamente deducibili da misure sperimentali e vengono invece stabilite sulla base di inferenze, giudicate pertinenti dalla comunità di ricercatori che le propone. I modelli costruiti su queste basi andranno allora validati *a posteriori* ed eventualmente modificati, qualora risultassero in contraddizione con le osservazioni. Se questo è relativamente facile da fare nel campo delle scienze fisiche, lo è molto di meno in altri ambiti.

VI. Vediamo ora in quale modo l'indagine fisica ha avuto successo, per capire fino a che punto si possa sperare di generalizzarla. Nei fenomeni termodinamici, l'impredicibilità dei moti molecolari non ha corrispondenza diretta a livello macroscopico. Così, se

non è possibile prevedere dove si troveranno le singole molecole di aria, ad un dato istante di tempo, è del tutto prevedibile che si distribuiranno in modo uniforme nell'ambiente che le contiene. Perché?

Innanzitutto, seguire il comportamento macroscopico vuol dire guardare il fenomeno da una distanza tale che le molecole non si distinguano tra loro e appaiano come un continuo nello spazio¹³. La descrizione macroscopica comporta cioè una perdita di informazione, a favore di una rappresentazione poco dettagliata ma, proprio per questo, significativa. Si pensi a un film e ai suoi fotogrammi. Cambiare qualche grano di colore, come accade a una pellicola che si deteriora nel tempo, non ne altera il messaggio, mentre l'esame dei singoli fotogrammi o dei grani di colore di ciascun fotogramma risulta privo di significato.

Grazie alla perdita di informazione, sistemi molto diversi fra loro nel dettaglio possono apparire globalmente simili e tanto maggiore è l'informazione trascurata, tanto più ampia sarà la classe di oggetti descritti da uno stesso modello. Tuttavia, è difficile stabilire un confine netto fra dettagli irrilevanti e informazione essenziale; si pensi, per esempio, ai messaggi subliminali prodotti dalla sostituzione di pochi fotogrammi, in un film. Similmente, la descrizione degli oggetti delle odierne bio- e nano-tecnologie, che sono costituiti da quantità moderate di atomi cambia in modo rilevante, come in un film molto breve, per la perdita di pochi dettagli.

Questo è da tenere presente, se i modelli della fisica devono essere applicati in altri ambiti, dato che i componenti dei sistemi comunemente considerati complessi non sono mai tanto numerosi quanto i costituenti atomici degli oggetti macroscopici.

VII. La fluidodinamica è una descrizione della materia che trascura la struttura microscopica dell'oggetto di interesse, l'atmosfera per esempio, e lo rappresenta come un continuo. Possiamo affermare che, risolvendo le equazioni del moto delle molecole dell'atmosfera, potremmo meglio determinarne l'evoluzione? A parte il fatto che l'astronomico numero di equazioni da risolvere

¹³ Analogamente, nell'osservazione da lontano della vegetazione di una collina, si vede una macchia di colore continua, nonostante le piante e le foglie siano distinte.

non consentirebbe un tale programma, vi sono degli ostacoli che non lo consentono nemmeno in linea di principio: il nostro modello di atmosfera è intrinsecamente *impredicibile*. Nonostante la sua forma perfettamente deterministica, è caotico e la benché minima imprecisione nella conoscenza delle sue variabili viene amplificata esponenzialmente nel tempo.

La situazione è diversa da quella di un cannoncino che spara una pallina; nonostante l'imprecisione nel riprodurre le condizioni di lancio, la meccanica newtoniana è in grado di dire dove la pallina andrà a cadere. L'accuratezza che si può raggiungere è impressionante; si pensi che riusciamo a spedire dei satelliti su Marte! Un esempio di evoluzione impredicibile, invece, è dato dal fumo di sigaretta. Pur partendo da condizioni iniziali molto prossime (la punta della sigaretta), le molecole di fumo raggiungono posizioni molto diverse. Ci si deve allora accontentare della *probabilità* di trovarle in un dato luogo. L'impredicibilità della dinamica di ciascuna molecola consente, allora, un'inferenza tanto semplice quanto significativa; dopo un certo tempo, la probabilità di trovare una molecola di fumo in un punto è uguale a quella di trovarla in qualunque altro punto dell'ambiente.

L'impredicibilità è la situazione ampiamente più comune in natura, come si coglie in Fig.1, dove è schematicamente rappresentato un arciere la cui freccia viaggia, con una certa incertezza, verso un bersaglio. Se il bersaglio è vicino all'arciere, l'incertezza è minima, ma cresce proporzionalmente alla distanza, fino a diventare completa. Raddoppiare la precisione della previsione richiede che l'incertezza iniziale venga dimezzata.

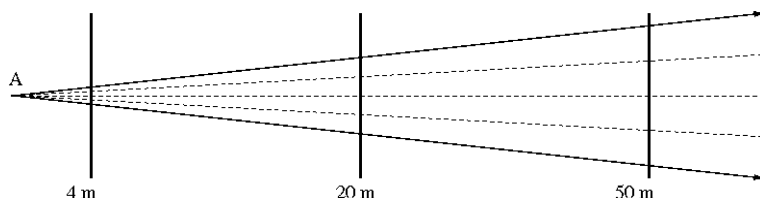


Figura 1. Non si può prevedere esattamente dove cadrà la freccia. L'incertezza cresce proporzionalmente alla distanza; se il bersaglio è troppo lontano, non si sa neanche se verrà colpito.

Se invece le incertezze crescessero in modo esponenziale, l'incertezza iniziale diverrebbe quasi immediatamente totale (cf. figura 2).

Dinamica deterministica, crescita esponenziale delle incertezze e finitezza dello spazio definiscono il *caos deterministico* che, senza appellarsi a intrinseche aleatorietà nelle leggi della natura, spiega l'impredicibilità di innumerevoli fenomeni naturali.

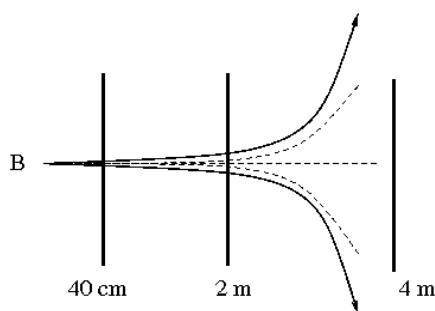


Figura 2. Le incertezze crescono in modo esponenziale; oltre una breve distanza, l'incertezza si fa completa, anche migliorando sensibilmente la precisione iniziale.

Immaginiamo le molecole di un oggetto come le bocce di un biliardo, il cui moto è noto essere caotico. Se le bocce sono solo due e le si riprende con una telecamera, il filmato proiettato all'indietro sembrerà tanto realistico quanto quello proiettato in avanti. Che le bocce si avvicinino, o si allontanino le une dalle altre, nulla dice sulla sequenza temporale degli eventi. Se, invece, le bocce sono dieci o più, disposte a formare una struttura ordinata, la sequenza temporale è inequivocabilmente caratterizzata dall'evoluzione verso una distribuzione circa uniforme (disordinata) delle bocce. Seppur possibile, la sequenza inversa corrisponde ad un tipo di moto tanto insolito da apparire del tutto irreali. Allo stesso modo, le molte molecole di un gas tendono a distribuirsi in modo uniforme all'interno del loro recipiente.

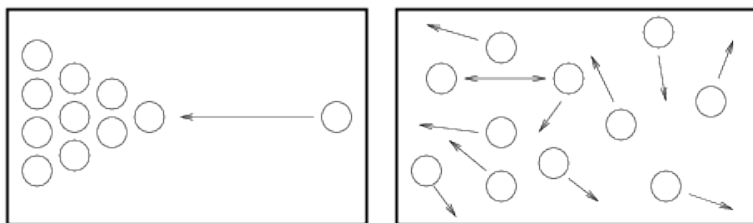


Figura 3. Se le bocce sono più di poche unità, la caoticità del moto, dovuta alle loro interazioni, conduce in breve ad una loro distribuzione casuale, ovvero uniforme, nel biliardo. Questo manifesta la direzione del tempo, che, in un sistema isolato come questo, va sempre dall'ordine al disordine.

In entrambi i casi, la dinamica delle singole bocce è reversibile e imprevedibile, ma nel moto collettivo di Fig. 3, l'imprevedibilità dei singoli moti conduce alla predicibilissima e irreversibile distribuzione disordinata.

L'*uniformità*, però, non sembra particolarmente "viva". Come si realizza l'ordine necessario alla vita? Innanzitutto serve energia da poter "dissipare": un lavoro richiede energia, che inevitabilmente "degrada", cioè rende inadatta a ulteriore lavoro. Un essere vivente trae energia dal cibo, svolge un certo lavoro e rilascia prodotti di scarto, che alimentano un livello inferiore nella scala biologica. La dissipazione, ovvero il flusso di energia buona dall'esterno e la sua degradazione e cessione all'esterno è il prezzo della creazione dell'ordine dal disordine della materia inerte! Il bilancio è delicato: la sola energia dei moti caotici interni finirebbe nel disordine; la sola dissipazione porterebbe alla stasi. Sulla Terra, tutto inizia ricevendo energia dal Sole e termina cedendone al cosmo. Si potrebbe dire, allora, che la vita ha da "laudare" tanto "Fratello Sole", che permette la complessissima fotosintesi clorofilliana, quanto il *tetro vuoto cosmico*, che si riprende degradata l'energia che aveva in origine sintetizzato.

VIII. Che cosa si potrebbe studiare di *non-complesso*, nel mondo in cui viviamo? Qualunque ricerca dovrà fronteggiare la complessità. Perfino l'astronomia, che fu il terreno del trionfo della visione deterministico-meccanicista del mondo, fa oggi i conti con

il caos. Sta dunque nascendo la sospirata e da tanti profetizzata “scienza del tutto”?

In realtà, neanche il volo degli stormi è stato ancora ben compreso; si è però preso coscienza di una miriade di connessioni fra discipline diverse, che hanno trovato una base comune nella modellizzazione matematica, nonostante le tecniche disponibili debbano essere ulteriormente affinate e adattate alle varie esigenze. Si può pertanto prevedere che la *scienza della complessità* porterà alla ridefinizione della figura del ricercatore e del suo ruolo sociale, come già si intravede nell’esperienza di gruppi interessati alla matematica in quanto strumento e linguaggio unificante.

In conclusione, è interessante notare che questa scienza, che si occupa degli effetti delle interazioni fra enti diversi, abbia preso consapevolezza di sé nell’epoca della globalizzazione, epoca nella quale il mondo intero si è scoperto fortemente inter-relato. Sembrerebbe pertanto opportuno chiamarla anche “scienza delle relazioni”, per metterne in luce lo scopo e il lato esplicativo.

SUMMARY

The so-called Science of Complexity represents the most recent manifestation of the idea of the unitary nature of knowledge, a goal of antiquity. We look at its potential and its problems in the field of mathematics, physics and the natural sciences, highlighting its relational nature. This relational nature is common to the most diverse phenomena, and, while respecting different epistemological norms, it can form the basis for a unitary view of the sciences. Given that even the simplest material objects can present amazingly diverse collective phenomena, when they interact between themselves and with their surroundings, systems can be defined as complex whose behaviour cannot be understood simply by a reductionist analysis of their constitutive parts. The challenge of complexity can therefore be understood as the attempt to understand the fascinating effects of cooperation between individuals, and of the relationships that they form with the world around them.