

“ *Nei casi di studio dove è chiamata in causa la complessità sembra quindi necessario imparare a convivere con un certo grado di imprevedibilità; termine che a un primo sguardo richiama il caso e la casualità, ma che invece racconta una diversa modalità causale, collocata in una zona d'ombra dei percorsi logici più familiari.*”

COMPLESSO-CONTROVERSO

Elena Bougleux

Università di Bergamo
elena.bougleux@unibg.it

Abstract – Complex systems are everywhere. The descriptions of specific complex features in isolated systems is related to large scale, collective and complex behavior of natural systems, revealing the implications of complexity as daily occurrences. By focusing on complexity at large and overtaking the fragmentation in single phenomena, we suggest that complexity brings out an integrated vision of sustainability, which includes economic, scientific, ethical and aesthetic dimensions.

1. Premessa (controversa)

Come sempre all’inizio di un ragionamento in un contesto multidisciplinare, sarebbe opportuno chiarire la posizione di partenza da cui si svolge il discorso, rendendo nota la propria collocazione tematica. Tuttavia in questo contesto risulta difficile specificare la collocazione disciplinare di partenza, perché quello che mi accingo a fare è proprio attraversare più volte i confini delle discipline, attingendo contemporaneamente da più territori, cercando di non cadere mai del tutto all’interno di alcuno di essi.

Collocare l’inizio di un discorso multidisciplinare fatto di molteplici attraversamenti risulta difficile perché, al contrario, “molte forme di conoscenza sembrano inclini a un indurimento dei loro confini, a un irrigidimento dei criteri di appartenenza, a un enfattizzazione delle distanze che separano ciò che è percepito come interno da ciò che è considerato altro, non controllabile e non assimilabile e quindi pericoloso e al limite letale.”

È quindi necessario impostare alcune premesse di metodo che permettano di includere posizioni di partenza non univoche, e quindi di affrontare le dinamiche solo apparentemente dicotomiche di interno/esterno, singolare/globale, naturale/artificiale, scientifico/umanistico, mediando tra esse. Muovendo da questa reimpostazione del metodo incontriamo per la prima volta il concetto di complesso.

Cominciamo semplicemente in modo etimologico: *complesso* è primariamente inteso nel senso di piegato insieme, cioè dotato di molteplici pieghe, incluso il significato per

cui un fatto *complesso* non può essere (più) spiegato, dis-piegato, aperto, privato delle suddette pieghe, quindi semplificato. Ma *complesso* ha anche il senso di cum-plexus, cioè di tessuto insieme, esito sovrapposto di tanti tessuti (di significato) che non si possono separare e districare. Sull’etimologia di complesso ragiona a lungo Michel Serres, del cui lavoro acuto e veramente multidisciplinare mi sono avvalsa più volte qui e nel seguito.

Per decidere quale insieme di pieghe del significato indagare attraverso la lente della complessità mi rivolgo inizialmente verso i sistemi composti di molti elementi, gli insiemi descritti da grandi numeri. Cum-plexus è infatti anche, se non proprio sempre, un sistema costituito da molte, moltissime parti. Ricorro quindi a un parallelo neuro-biologico: la struttura nervosa del cervello umano è estremamente *complessa*, in quanto è il risultato di milioni di anni di evoluzione, di trasformazioni e di adattamenti.

L’immensa potenzialità della sua struttura sta nella pressoché infinita capacità di creare connessioni tra i propri componenti semplici – i neuroni – creando percorsi ogni volta diversi e imprevedibili, in risposta agli stimoli esterni più diversi. Analizzato singolarmente ogni neurone è ragionevolmente uguale a tutti gli altri, e anche le connessioni – le sinapsi – che lo legano con il sistema nervoso dando vita a vere e proprie reti, funzionano tutte in modo assai simile; inoltre ancora, tutti gli esseri umani hanno approssimativamente lo stesso numero di neuroni, e quindi dispongono approssimativamente della

stessa quantità di interconnessioni (almeno potenziali). Eppure ogni meccanismo di associazione mentale è unico e personale, e seguire il percorso sinaptico di un processo di apprendimento, oppure prevedere esattamente la risposta a un dato stimolo fornita da due cervelli diversi è un'impresa impossibile. Per poter prevedere in modo deterministico, cioè esatto, il comportamento di un sistema costituito di miliardi di cellule come il cervello umano, oppure composto da miliardi di molecole come l'atmosfera, sarebbe necessario avere la mappa della rete neurologica, oppure la mappa delle posizioni delle singole molecole. In questo modo potremmo

come è noto, si utilizzano continuamente modelli che ne simulano e ne prevedono il comportamento, come se conoscessimo la sua mappa esatta, ma è altrettanto ben noto che le previsioni basate sui modelli hanno una certa attendibilità solo su tempi brevi. Il senso fondamentale di questa difficoltà di mappatura esatta di sistemi naturali che pure conosciamo fenomenologicamente bene scaturisce dal livello di complessità (letteralmente, sovrapposizione delle pieghe) della loro struttura: da una parte le nostre radici evolutive biologiche e neurologiche, dall'altra la numerosità delle interazioni tra i miliardi di molecole.



produrre un modello in grado di replicare una per una le connessioni e le interazioni tra i singoli componenti: questa sarebbe una visione dis-piegata del cervello. Se tale mappa neurologica esistesse, e anche se risultasse efficace nello spiegare qualche comportamento umano, eliminerebbe allo stesso tempo quel grado di imprevedibilità (com-plicazione) che ci rende tutti diversi e irripetibili. Se ragionassimo seguendo i percorsi dell'ipotetica mappa esatta, perderemmo la capacità essenziale di saper trovare risposte a domande non precedentemente note, e anche quella di interpretare contesti ancora non decodificati. Un altro sistema composto da molti, moltissimi elementi è notoriamente l'atmosfera. Per studiare l'atmosfera,

Nei casi di studio dove è chiamata in causa la complessità sembra quindi necessario imparare a convivere con un certo grado di imprevedibilità; termine che a un primo sguardo richiama il caso e la casualità, ma che invece racconta una diversa modalità causale, collocata in una zona d'ombra dei percorsi logici più familiari.

Ad uno sguardo più attento appare quanto siano numerosi i risvolti della fenomenologia ordinaria con una soglia di imprevedibilità sistematica e ricorrente. Complesso quindi non è una regola ma piuttosto un approccio, un'emergenza che affiora contemporaneamente da tante discipline, incluse quelle scientifiche, dentro cui si delineano le contraddizioni più sorprendenti.

2. Alcuni sistemi dinamici (un po' complessi)

Nel senso metaforico che serve a noi per la definizione di complessità, è centrale dire che il comportamento di un sistema complesso è 'passibile di *biforcazione*', cioè il sistema può manifestare spontaneamente comportamenti molteplici. Una piccolissima fluttuazione, di solito così piccola da non essere rilevabile, di un elemento oppure di una regola, che avvenga in una regione qualsiasi del sistema dinamico può avere ripercussioni enormi sulle zone centrali, e in tempi molto brevi. D'altra parte, l'eventuale ripetizione della stessa fluttuazione nella stessa regione del sistema ma in un momento diverso può risultare del tutto innocua, oppure innescare altri sviluppi, completamente diversi da quelli del primo caso. A un comportamento imprevedibile del genere si attribuisce tipicamente l'epiteto di casuale: invece il significato di molteplice nell'accezione della teoria del caos ci conduce verso un esito terzo, che non rimane schiacciato tra i due estremi consueti, il casuale e il necessario. Al contrario la dinamica descritta è *caotica*, e non è affatto casuale.

La biforcazione si può anche manifestare quando due sistemi dinamici identici vengono posti sotto osservazione per tempi molto lunghi: pur non mutando nulla nelle rispettive condizioni di partenza né nella loro "storia", i due processi evolutivi possono differenziarsi e allontanarsi, *divergendo* nei rispettivi sviluppi dinamici. Ad esempio, consideriamo due gas che si mescolano in due contenitori uguali, a partire dalle stesse distribuzioni iniziali, stessa pressione e temperatura, sottoposti alla stessa sequenza di interventi esterni, tipo le misurazioni: tutto viene replicato due volte in modo identico, eppure dopo un certo tempo le distribuzioni delle due miscele cominciano a differire, mostrando piccole e poi progressivamente crescenti disuniformità.

La biforcazione tra i due comportamenti è stata attivata da irrilevanti fluttuazioni del contesto. I due contenitori sono risultati sensibili a perturbazioni considerate a torto esterne ai sistemi in studio, come ad esempio le posizioni delle luci e gli spostamenti degli scienziati intorno al tavolo dell'esperimento. Quest'esempio mette in luce contemporaneamente due aspetti fondanti dei sistemi dinamici: da una parte

la tendenza a manifestare biforcazioni, cioè ad allontanarsi indefinitamente da traiettorie prestabilite, dall'altra la loro capacità di risentire fortemente di alcune condizioni ambientali e di disturbi seppur minimi, trasformando imprevedibilmente la propria dinamica di conseguenza.

Dal punto di vista della meccanica classica, fulcro logico del pensiero determinista, l'inclusione del contesto esterno all'esperimento fra gli elementi di cui tenere conto durante lo studio di un sistema comporta una vera e propria rivoluzione concettuale, poiché la possibilità di analizzare un comportamento dinamico nel mondo classico era inscindibilmente legata alla cosiddetta *buona definizione* del sistema di



Rappresentazione dell'attrattore simmetrico ciclico di Thomas, esempio di attrattore strano, verso cui convergono le traiettorie dei punti immagine di un sistema dinamico caotico.

riferimento: un sistema era ben definito quando era ben isolato dagli altri e dal resto del mondo, e grazie a questo la sua dinamica era ben codificabile e riproducibile. I fattori imprevisti a cui si apre la strada se improvvisamente diventa necessario includere nello studio anche il contesto, o più precisamente, se diventano sfumati i confini tra il sistema in studio ed il suo contesto, sono innumerevoli e potenzialmente inquietanti. Infatti ci dobbiamo chiedere: dove finisce il contesto? Effettivamente in natura si trovano proprio queste condizioni di difficile separabilità: nessuna parte di ambiente si può isolare e ragionevolmente studiare da sola, ritagliandola fuori dal resto, e i confini che separano l'oggetto in studio e il suo *contesto* sono sempre inevitabilmente sfumati.



Abbiamo così introdotto l'*adattività* dei sistemi dinamici, come la caratteristica che permette loro di adeguarsi simbioticamente al proprio contesto, registrarne gli aspetti rilevanti (ai propri fini) e includerli fra gli elementi "interni", trasformandoli in cause attive del proprio sviluppo. Su questa capacità di agency dei sistemi dinamici ci soffermiamo con qualche altro esempio, poiché il carattere adattivo è forse il più sorprendente fra quelli che trattiamo

in queste pagine. La capacità di sviluppare forme di adeguamento all'ambiente si ritrova nei contesti più diversi. Luca Cavalli Sforza, in *La sfida della complessità*, prende in considerazione le forme evolute del linguaggio, pensato come un composto di elementi semplici sia in senso fonetico che in senso formale, i quali si aggregano e coordinano per dare il senso al discorso in modi imprevedibili e dettati, appunto, dal contesto. Se la scelta delle sequenze

di segni e di suoni fosse mediata da un processo razionale e volontario, i risultati comunicativi sarebbero forse analoghi, ma i tempi necessari per elaborare un singolo discorso sarebbero immensi. L'*adattività* del sistema-linguaggio risiede nella sua autonomia organizzativa, cioè nella capacità che a livello di elaborazione – dunque nel cervello, un sistema dinamico – abbiamo di tenere in considerazione contemporaneamente quasi infinite

possibilità di aggregazione di senso/suono/segno, in funzione del significato che vogliamo dare. Altrettanto adattiva è la capacità di compiere la scelta lessicale e formale migliore in funzione dell'argomento da discutere subito dopo, cioè del contesto allargato nel tempo; e tutto ciò avviene in tempo utile per proseguire il processo di selezione e continuare il ragionamento. Il meccanismo di selezione è di tipo iterativo, eppure non è univoco né codificabile, infatti in ogni istante è soggetto a bloccarsi e a interrompersi irreversibilmente. Il rapporto di causa-effetto tra il senso ed il segno è un esempio di rapporto causale circolare: sono le singole parole dotate di senso a dare senso al linguaggio costruito, ma è dentro al discorso costruito che le singole parole assumono esattamente quel senso che serve nel dato preciso contesto. Come nella maggiore parte dei casi descritti, anche qui gli aspetti dinamici interessanti si manifestano

“ *Complesso quindi non è una regola ma piuttosto un approccio, un'emergenza che affiora contemporaneamente da tante discipline, incluse quelle scientifiche, dentro cui si delineano le contraddizioni più sorprendenti.*”

quando i sistemi in studio sono composti da molti, moltissimi elementi semplici. Se l'oggetto della nostra attenzione si sposta dal componente individuale alla configurazione d'insieme, notiamo che il comportamento collettivo di sistemi composti e numerosi non è deducibile o prevedibile a partire dalla conoscenza dei comportamenti dei suoi singoli componenti. Ammettendo anche di conoscere con grande precisione i componenti individualmente, ed ammettendo anche che tali componenti siano tutti uguali e che obbediscano alle stesse regole, eventualmente anche regole semplici, il puro fatto che il loro numero sia alto fa emergere comportamenti collettivi che non sono ascrivibili ad alcun particolare componente, né previsti in alcun processo causale a priori. I singoli componenti stabiliscono tra loro legami e relazioni strutturali, che finiscono con il determinare la dinamica dell'insieme in modo più rilevante del loro stesso singolo ruolo.

La struttura della felce ricostruita con un algoritmo frattale, esempio classico di frattale biomorfo.



elementari perché. Spostare il centro della nostra attenzione dall'oggetto alla relazione tra oggetti significa conferire autorevolezza alla rete, oltre che ai suoi s/nodi, agli spazi tra, alle dimensioni interstiziali, e cioè a tutte quelle emergenze dimensionali in cui il possibile non è, non solo causalmente, ma neanche topologicamente, precodificato. Un sistema dinamico, in prossimità di un comportamento del tipo di quelli descritti, contiene infatti nelle sue relazioni di struttura molta più informazione della somma delle informazioni dei suoi componenti, e non può essere né descritto


né compreso se viene ridotto alla somma dei suoi elementi semplici.

L'emergenza del comportamento collettivo a partire dalla numerosità delle interazioni non è solo una metafora, ma è il manifestarsi esplicito, l'affiorare visibile di questi surplus di informazione contenuti nelle relazioni di struttura. Se ad esempio si ricostruisce il volo di uno stormo di uccelli attraverso una simulazione, è necessario scrivere un codice che descriva uno per uno tutti i singoli uccelli, che calcoli le loro traiettorie individuali, descriva il tratto di cielo in cui dovranno volare, tenga conto della variazione dei venti, della pressione, e includa tutti gli eventuali contorni ed ostacoli che il volo potrà incontrare. Procedendo così, il programma che descrive lo stormo sarà complicatissimo e lentissimo nel funzionare. Succederà anche che alcuni aspetti del sistema-stormo, seppur ben noti nella realtà, saranno difficili da tradurre in equazioni, come ad esempio i possibili scontri in volo e l'insorgere di ostacoli imprevisti. A simulazione avvenuta, con tutte le difficoltà del calcolo superate, il volo dello stormo vero resterà comunque a un livello di perfezione ineguagliabile, gli ostacoli imprevisti verranno evitati, e la simulazione resterà comunque evidentemente approssimata. Se invece scriviamo un codice in cui un altissimo numero di uccelli semplici sono lasciati "liberi" di interagire tra loro in base a poche regole anch'esse semplici, succederà l'inaspettato: il finto stormo si adatterà perfettamente all'ambiente che attraversa, sarà mantenuto il volo di gruppo, non ci saranno incidenti, di fronte a un ostacolo lo stormo si dividerà spontaneamente

in due flussi, che si riuniranno armoniosamente appena sarà loro possibile, una volta superato l'ostacolo.

Il comportamento collettivo, pur non essendo stato programmato, emergerà dalle maglie delle relazioni di struttura tra i suoi semplici ma numerosissimi componenti. È importante anche sottolineare che nonostante la densa rete di relazioni di gruppo emerga come effetto delle regole attribuite ai singoli, ogni stormo prodotto della stessa simulazione manifesterà caratteristiche sue proprie e uniche, dovute ai margini di libertà dei suoi singoli componenti. Ogni stormo prodotto dalla stessa simulazione infatti volerà in maniera diversa, la sagoma dello stormo avrà delle fluttuazioni morfologiche, scarti di traiettoria, e anche i modi e tempi di reazione alla comparsa degli ostacoli imprevisti saranno diversi in ogni caso. In sintesi, la singolarità non viene cancellata dall'emergenza della (salvifica) dimensione collettiva.

Le semplici regole a cui obbediscono gli uccelli di questo discorso sono solo tre: a ogni elemento viene imposto di volare circa alla stessa distanza dai suoi primi vicini (cioè da quelli più vicini a lui nelle diverse direzioni); di mantenere la velocità media del gruppo, nei margini di un piccolo errore concesso; di evitare gli ostacoli. Infine, tutti gli uccelli sono uguali, anche qui, a meno di un piccolo errore "realistico".



“Le semplici regole a cui obbediscono gli uccelli di questo discorso sono solo tre: a ogni elemento viene imposto di volare circa alla stessa distanza dai suoi primi vicini (cioè da quelli più vicini a lui nelle diverse direzioni); di mantenere la velocità media del gruppo, nei margini di un piccolo errore concesso; di evitare gli ostacoli.”

L'aspetto più interessante di questo esempio è che lo stormo simulato sembra possedere una forma di intelligenza sua propria, e rivela un'autonomia decisionale non programmata. Assai impressionante se si considera che le simulazioni al computer sono tra gli artefatti umani più razionali, generati dentro la dimensione sovra-deterministica del programma, attraverso la logica binaria del nucleo di un calcolatore.

Il nodo logico risiede, come si può intuire, sempre nella numerosità dell'insieme che viene calcolato. Oltre una ragionevole (?) soglia di numerosità di operazioni, il calcolo delle relazioni tra uccelli dello stormo, o tra interazioni in un sistema, diventa troppo oneroso per qualsiasi macchina, le cifre troppo grandi vengono troncate, le approssimazioni così introdotte hanno ripercussioni casuali, la durata delle iterazioni di calcolo diventa eccessiva. Ma al di là della ragione tecnica per cui proprio in un habitat sovra-deterministico come il computer si manifesta paradossalmente un'emergenza complessa, è utile fare un altro esempio riferito a un ambiente naturale. Il comportamento delle formiche in un grande formicaio reale, e non simulato, manifesta le stesse potenzialità collettive: le singole formiche sono "semplici", nel senso che non progettano individualmente grandi imprese, né vivono l'appartenenza a una comunità numerosa in modo

consapevole – almeno per quanto ci è dato sapere oggi. Eppure nel loro spazio condiviso sono in grado di auto-organizzarsi, dando vita a comportamenti d'insieme evoluti e impensabili per un singolo, come il trasporto di pesi enormi oppure il trasferimento programmato del formicaio in un'altra zona all'approssimarsi di un pericolo.

“L'autorganizzazione dunque è la caratteristica che si manifesta come una proprietà adattiva all'ambiente nella circostanza precisa nel caso dei cambi di scala.”

Il formicaio (vero) e lo stormo (finto) ci dischiudono l'accesso ad una ulteriore caratteristica dei sistemi dinamici e delle loro evoluzioni: nel caso del volo dello stormo, osserviamo che un ristretto numero di regole con validità locale è in grado di innescare effetti di dimensioni globali, mentre nel caso reale del formicaio non disponiamo della serie di regole minime che muovono i singoli individui, ma osserviamo comunque che i comportamenti evoluti appaiono solo sulla scala complessiva, quella del gruppo, mentre ogni singolo individuo lasciato a se stesso non mostra tracce di questa potenzialità. L'autorganizzazione dunque è la caratteristica che si manifesta come una proprietà adattiva all'ambiente nella circostanza precisa nel caso dei cambi di scala.

In questo modo indiretto abbiamo introdotto l'ultima caratteristica notevole del comportamento dei sistemi dinamici, sempre restando nei limiti della nostra schematizzazione. Nelle circostanze dense di imprevisti intorno a cui ci aggiriamo sempre, constatiamo che la forma efficace di auto-organizzazione non è quella che consegue all'adesione a un progetto, ma piuttosto

quella che sorge spontaneamente dal disordine sulla scala più grande, mentre il disordine rimane il carattere dominante e osservabile sulle piccole scale. La natura degli aggregati auto-organizzati è quindi dimensionalmente duplice, e il loro equilibrio in divenire necessita di entrambe le scale: quella locale puntiforme discontinua, e quella globale macrostrutturata inclusiva, in una relazione elastica di continua andata e ritorno dal micro al macro.

Questa dinamica diventa evidente nell'organizzazione dei tessuti cellulari, di quelli nervosi in particolare: la somma di cento miliardi di cellule nervose nel cervello non costituisce di per sé la condizione per l'emergenza della coscienza autoconsapevole. Soffermandoci sul dato quantitativo, ci sono più connessioni sinaptiche nel cervello che particelle di materia nell'intero universo, e proprio questa sovrabbondanza numerica costituisce la condizione sia per il realizzarsi dell'emergenza che per l'impossibilità di ripetere un processo di associazione mentale in modo identico in due momenti distinti. In ogni caso l'informazione contenuta nelle relazioni di struttura non viene mai dispersa, è anzi archiviata in modi più o meno volontariamente accessibili, potenzialmente in grado di riaffiorare in qualunque nuovo processo di pensiero. Il cervello è il perfetto esempio di sistema il cui funzionamento dipende da, e dimostra sempre, altissimi gradi di auto-organizzazione.

3. Forme artificiali di vita intelligente

Molto ampia è la letteratura sulle simulazioni al computer di tessuti di tipo biologico costituiti da cellule sintetiche, gli *automi cellulari*, dai quali con poco addestramento impartito mediante semplici nozioni iniziali, si ottengono comportamenti collettivi fortemente auto-organizzati. La base concettuale su cui sono programmati questi tessuti è relativamente semplice, e si riconduce sempre a un tipico modello di interazione, noto come modello di Ising, bidimensionale oppure tridimensionale, secondo cui ogni automa cellulare risente del solo effetto della presenza dei suoi primi vicini, che sono quattro nel caso bidimensionale, e sei in quello tridimensionale. Nonostante questi piccoli livelli di interazione che limitano molto le relazioni di struttura, i

modelli di Ising sono in grado di propagare in tutto il tessuto informazioni create dal sistema stesso durante la sua evoluzione, o acquisite dall'esterno in regioni locali e limitate. Ancora una volta, non entriamo nel dettaglio del parametro temporale che sarebbe necessario anche qui esplicitare, perché il tempo utile per la propagazione di un'informazione non è un tempo qualsivoglia lungo, e non tutti i tessuti simulati hanno la stessa reattività alla propagazione: l'aspetto saliente è che tutti questi tessuti sistemici, una volta "accesi" nel computer, si comportano come se fossero vivi, diventano autonomi da ulteriori istruzioni esterne, sviluppano ognuno una modalità peculiare per assicurarsi una durata (una "vita"), propagando al loro interno con velocità diverse informazioni diverse, selezionate in base a criteri locali, autonomi e non programmati. I criteri di selezione delle informazioni che vengono processate localmente o propagate a tutto il sistema, sono esiti a loro volta di processi di emergenza, e sono volti al mantenimento in vita dell'automa per il maggior tempo possibile; è forse a questo punto superfluo dire anche che ogni automa cellulare sviluppa strategie di sopravvivenza diverse e singolari.

L'esito tangibile di una simulazione del genere permette di affermare, in ultima analisi, che questa forma di vita artificiale si propaga nel tempo e si autoalimenta, si difende dall'ambiente se questo diventa ostile e vi si adatta in tutti gli altri casi, insomma inscena in senso metaforico tutti i caratteri della variegata fenomenologia naturale, che in quanto non classificabili, sono a priori esclusi dai codici usati per descriverla.

Tutti i processi simulati incontrati finora abitano nello spazio virtuale della memoria dei calcolatori, i quali come è noto sono costituiti da processori, regolati nella loro struttura base da una stretta logica binaria, costituita di sequenze di zeri e di uno. Anche se può sembrare contraddittorio che proprio i computer favoriscano le emergenze complesse, va osservato che un calcolatore evoluto sa svolgere un dato compito in un altissimo numero di modi diversi, sebbene ogni modo sia singolarmente soggetto ad una logica binaria. Quindi anche un computer contiene un grado di autonomia decisionale che forse



Il corso del fiume Betsiboka (Madagascar) in prossimità della foce, rappresentabile con una curva frattale di tipo Mandelbrot.

resta insospettabile nelle condizioni di utilizzo maggiormente diffuse. Ad esempio, la modalità di trasmissione nella rete di un'email comporta la sua suddivisione in pacchetti, abbastanza piccoli da correre più veloci attraverso i nodi della rete che separa i mittenti dai destinatari; i pacchetti disgiunti seguono nella rete strade virtuali diverse, non prevedibili, mai uguali, selezionate in base a criteri momentanei e locali per minimizzare il rischio che qualche nodo bloccato nella rete arresti la trasmissione dell'intero messaggio. Solo alla fine, nel calcolatore ricevente, il messaggio verrà ricomposto e consegnato integro. Analogo processo, anche se in forme più semplice a causa della maggiore limitatezza dei percorsi possibili, avviene quando si chiede a un calcolatore di eseguire una

qualsiasi istruzione, come l'apertura di un programma: il numero di passi e la loro sequenza sarà ogni volta diversa, fino a che la casistica di sequenze possibili effettivamente sperimentate sarà tale da permettere al calcolatore di scegliere la via non solo più breve, ma anche "ottimizzata", che sarà quindi adottata in modo stabile ed invariato, fino a che nuove condizioni esterne richiederanno una nuova organizzazione e ottimizzazione delle procedure; e così reiterando ogni volta, sempre in cerca della nuova via "ottimale", che in quanto tale non è stata mai né prevista né descritta in alcuna fase della programmazione. Forse adesso appare leggermente più plausibile affermare che proprio il sovra-deterministico sistema-calcolatore, e ancor più le sue reti, possano essere habitat favorevoli alla

proliferazione dei sistemi complessi: dinamiche complesse dotate del più alto grado di affinità con i sistemi naturali, quelli cioè con i più alti tassi di imprevedibilità emergono proprio nelle maglie del calcolatore, a partire da simulazioni semplici. Sarebbe qui opportuno introdurre la questione della generazione e della propagazione dei virus, all'interno dei singoli calcolatori come nella rete. Il tema ci porterebbe lontano dal discorso centrale; basti però dire che nelle maglie innumerevoli della rete è progressivamente più probabile che si annidi un difetto non visibile, oppure che si verifichi un'anomalia locale, un errore nella ripetizione di una sequenza binaria, che si propaga in tutto il sistema con le stesse modalità e velocità dell'informazione necessaria alla sopravvivenza della struttura.

I virus, tipicamente, sono forme modificate di questi piccoli errori iniziali, e la loro efficacia risiede nella loro natura complessa che si dimostra quando sviluppano strategie di adattamento e di ottimizzazione per auto-mantenersi, imparando dall'ambiente e garantendo a se stessi una durata. Le strategie di sopravvivenza dei virus sono a tutti gli effetti delle emergenze.

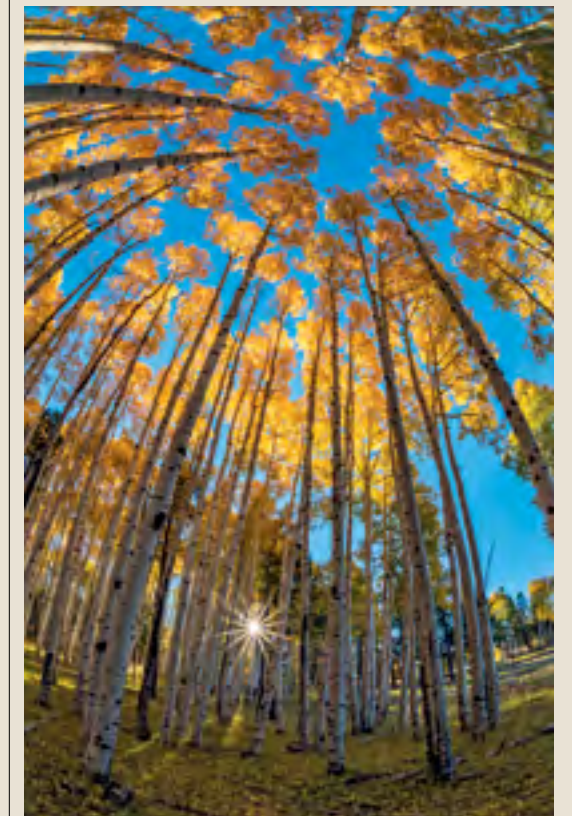
In certi casi i sistemi informatici evoluti sono in grado di auto-curarsi, cioè di distinguere le emergenze favorevoli da quelle dannose, e quindi di inibire selettivamente lo sviluppo di alcune (*Science*, luglio 2003). Mi sembra interessante notare che in questo frangente l'intervento umano di cura del virus reintroduce un fattore deterministico, e quindi debole, in quanto la discriminante favorevole-dannoso viene decisa all'esterno della macchina, una volta per tutte dall'operatore, e non è affatto adattiva. L'efficacia di questi interventi umani a posteriori (ripristinare un computer dopo l'attacco di un virus) è infatti per adesso piuttosto limitata.

4. Curve frattali negli spazi delle configurazioni

Abbiamo parlato con disinvoltura dell'esistenza di "traiettorie" per un sistema dinamico, riferendoci a metaforici percorsi di sistemi che durante la loro evoluzione mostrano biforcazioni: il discorso è parso legittimo perché il concetto di traiettoria, con la sua forte eco visiva, non ha reso necessario spiegare immediatamente il senso tecnico di questo termine polisignificante. In effetti, oltre al valore evocativo dell'immagine delle traiettorie che si biforcano, cioè che si allontanano indefinitamente e progressivamente divergono (ma per andare dove?), esiste una corrispondenza quasi esatta con effettivi insiemi e punti nello spazio che cerchiamo ora di rendere esplicita. È necessario dunque individuare il luogo virtuale dentro cui si sviluppano le traiettorie, un luogo che sia abbastanza flessibile e capiente da contenere ogni possibile biforcazione e divergenza di cui il sistema dinamico è capace. Uno spazio del genere è bidimensionale, ed è semplicemente il piano racchiuso da due assi cartesiani. Le informazioni che vi si possono rappresentare descrivono che cosa sta facendo

il sistema ad ogni dato istante. Ogni punto in un tale spazio rappresenta una configurazione del sistema, e racconta una combinazione di informazioni che muta istante per istante; infatti quello che stiamo descrivendo è noto come spazio delle configurazioni.

Il tempo non compare esplicitamente nello spazio delle configurazioni, ma la sua presenza è intuitiva: infatti se il sistema si trasforma, cioè cambia forma, o cambia luogo, o qualunque altra modifica, si sposterà anche il suo corrispondente punto nello spazio delle configurazioni, mentre invece quando il sistema resta immobile e immutato con il passare del tempo, la sua rappresentazione



nello spazio delle configurazioni rimane ferma nello stesso punto. I punti che rappresentano tutte le configurazioni di un sistema possono essere uniti, seguendo l'ordine in cui sono stati generati nel tempo e ottenere così in questo spazio virtuale una vera curva, che è una vera e propria sintesi delle informazioni complessive sul sistema che la genera.

I sistemi classici, quelli che non generano mai comportamenti caotici e che seguono fedelmente le leggi deterministiche della meccanica (assumendo semplicisticamente

che tali sistemi esistano) avranno come traiettorie nello spazio delle configurazioni delle linee continue: e modificando di poco un sistema classico, anche la sua rappresentazione si modificherà di poco. Questa prevedibilità per intorni è esattamente ciò che manca alle traiettorie dei sistemi caotici e instabili, i quali, modificati di poco, evolvono in modi divergenti da quelli originari. La biforcazione è quindi il modo per visualizzare in questo

struttura del tutto.” Quindi, se tutti i sistemi che si evolvono, inclusi quelli classici, disegnano una traiettoria nello spazio delle configurazioni, solo i sistemi caotici disegnano traiettorie frattali.

Nella seconda parte della definizione di Virasoro compare l'*autosimilarità* che rappresenta il vero apice paradigmatico del discorso sulla complessità: una curva autosimile come un frattale non può essere mai semplificata, non può essere ridotta

sottintesa, implicita nei processi complicati. Studiare un problema complicato come una curva discontinua è possibile nella misura in cui questa, presa a piccoli tratti, è trattabile come se fosse continua, e al limite come se fosse una retta. L'*autosimilarità* è qualità attraverso cui si nega più nettamente la possibilità di semplificare, e nel caso emblematico della curva discontinua impone la rinuncia ontologica alla possibilità di linearizzare. Come dice chiaramente Edgar Morin in *Il paradigma perduto*, “i processi naturali non sono lineari in quanto non sono né aggiuntivi né disgiuntivi: essi sono, appunto, complessi”.

Per fortuna anche un sistema dinamico complesso distribuisce i suoi punti immagine nello spazio delle configurazioni secondo un criterio geometrico, e di fatto si limita ad occupare una regione in cui la traiettoria immagine resterà confinata. Si tratta di regioni privilegiate dello spazio delle configurazioni, che costringono al proprio interno le traiettorie immagine dei sistemi complessi: sono attrattori, e la loro forma dipende dal tipo di caoticità del sistema.

L'attrattore di una traiettoria frattale è detto attrattore strano, ed un esempio è il famoso attrattore di Lorenz, che si trova disegnato e simulato in centinaia di pagine in rete, e anche nei libri di arte contemporanea astratta.

Senza entrare in altri tecnicismi, cerchiamo di capire perché un sistema a dinamica caotica disegni nello spazio delle configurazioni una figura chiusa – appunto come un attrattore strano – e come mai invece non si disperda per sempre in regioni casuali dello spazio delle configurazioni.

La ragione è più semplice del previsto: un sistema che ha raggiunto una sua forma di equilibrio cercherà spontaneamente di mantenerla, resistendo ai tentativi di

condizionamento dell'ambiente, adattandosi a questo ma solo nella minima misura in cui è indispensabile. Il sistema dinamico quindi, e quindi anche la sua traiettoria nello spazio delle configurazioni, fluttuerà finché può sul bordo del suo attrattore, percorrendolo come una spoletta tra l'interno e l'esterno, mantenendosi in una regione sub-critica, e rispondendo alle sollecitazioni dell'ambiente con riorganizzazioni locali che seguono la legge dell'elevamento a potenza, cioè tanto più frequenti quanto meno intense. Ad esempio: se costruiamo un mucchio di sabbia lasciando cadere dall'alto con assoluta regolarità un filino di granelli, il mucchio crescerà in maniera ordinata con forma approssimativamente conica, ed ogni granello si sovrapporrà ordinatamente ai precedenti. Procedendo, si susseguiranno numerose micro-scosse seguite da piccoli crolli e da aggiustamenti locali, che tenderanno a mantenere il mucchio della stessa forma, con minime modifiche, il più a lungo possibile.

Le micro-scosse seguono la legge dell'elevamento a potenza detta prima, cioè saranno frequenti nel tempo se di bassa intensità, e viceversa. Ma ad un certo istante un granello qualunque cadendo sugli altri provocherà un crollo disastroso e distruggerà il mucchio di sabbia, riportandolo a una condizione iper-stabile. Subito dopo, la crescita potrà riprendere come prima, e proseguirà per un lungo tempo anche senza le micro-scosse di adattamento.

La traiettoria del sistema “mucchio di sabbia” nello spazio delle configurazioni diventa un frattale nel momento del crollo, e mostra una (o più d'una) biforcazione ogni volta che tentiamo l'impresa impossibile di ripetere la sequenza di caduta dei granelli, e replicare il crollo del mucchio con lo stesso ennesimo granello. Non ci saranno, pur ripetendo tutto identicamente, due crolli uguali. In questo caso l'instabilità ha prodotto la discontinuità del sistema, ma allo stesso tempo ne ha garantito la “sopravvivenza”, permettendo al mucchio di sabbia di ricominciare a crescere tranquillamente, per molto tempo. Dal punto di vista della costruzione dell'attrattore, questa tendenza alla sopravvivenza può essere tradotta nella tendenza del sistema a non disperdersi su volumi enormi, e a restare invece confinato all'interno

di un “volume vitale” corrispondente a configurazioni non troppo disomogenee; una tendenza quindi a non trasformarsi al punto tale da diventare un altro sistema.

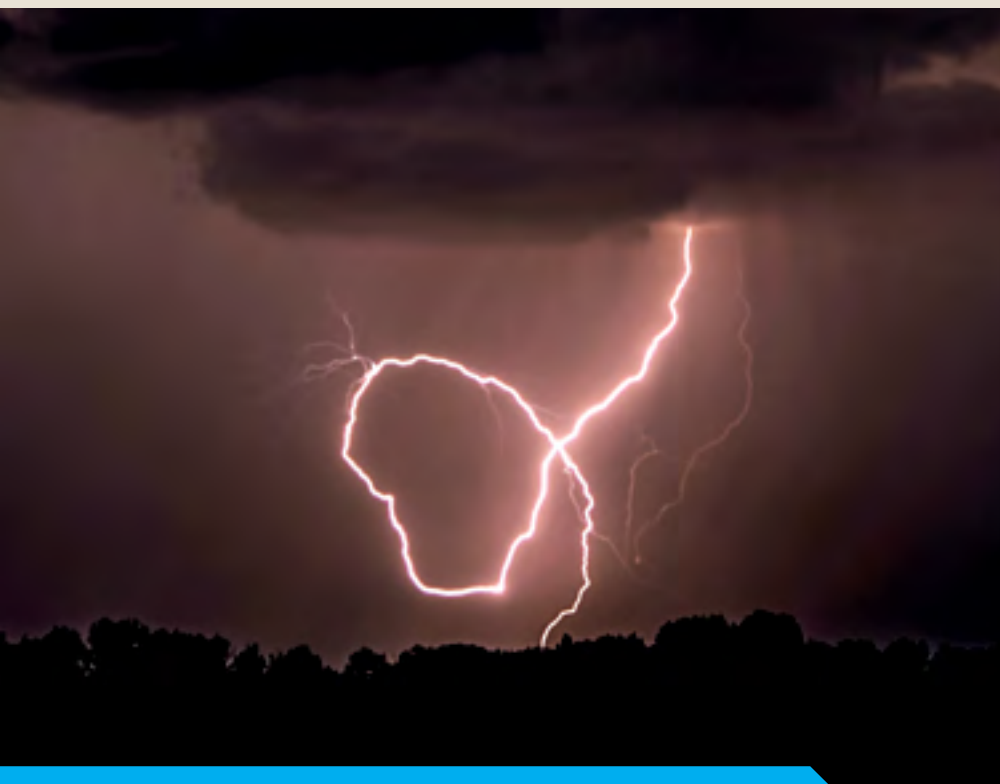
5. Segnali di innovazione epistemologica

Prevedere con esattezza i processi dell'atmosfera, oppure descrivere con una mappa le reti di sinapsi del cervello, sono esempi di problemi caratterizzati dall'alta numerosità dei componenti, che dunque non è possibile cogliere intuitivamente in tutta la loro estensione e frammentarietà. A questa difficoltà di approccio, la razionalità umana ha risposto nella storia con metodologie ed epistemologie diverse: nel seguito mi riferisco alle (alcune delle) risposte prodotte dalla storia del pensiero dell'Occidente, senza pretese di completezza e solo per semplicità.

“*I processi naturali non sono lineari in quanto non sono né aggiuntivi né disgiuntivi: essi sono, appunto, complessi.*”

A partire dall'affermazione della Nuova Scienza rinascimentale, il metodo per affrontare problemi sempre più complicati è stato quello della suddivisione del complicato (e grande) nei suoi termini costitutivi più semplici (e piccoli), meglio se più regolari, e più uniformi. La scienza cartesiana, nelle parole di Edgar Morin, “ha frammentato e suddiviso il suo oggetto al punto che questo si è sbriciolato, le discipline si sono dissociate, si sono cercate e sottolineate le antinomie, invece delle connessioni”.

La classificazione e la riorganizzazione dei problemi ricomposti dopo la loro parcellizzazione ai fini dello studio avveniva in base a categorie costruite sul modello della mente classificante, in modo da creare corrispondenze biunivoche esatte tra pensabile, conoscibile e conosciuto. Per capire quanto sia forte la critica di Michel Serres nei confronti dell'approccio di tipo tassonomico è sufficiente riportare l'enfasi che egli pone sulla derivazione del termine “classificazione” da *classis*, armata, e sulle ripetute definizioni con cui stigmatizza l'impostazione cartesiana improntata sui principi di disgiunzione e di semplificazione,



spazio virtuale l'imprevedibilità della traiettoria modificata.

Tuttavia una dinamica non deterministica non è comunque casuale: e infatti, anche un sistema dinamico instabile disegnerà nello spazio delle configurazioni una curva ben precisa, seppure con caratteristiche atipiche, chiamata *frattale*: una curva discontinua in ogni suo punto, ricorsiva e autosimile. Nelle parole di Miguel Virasoro, il frattale è “una struttura manifesta su scala globale che presenta una regolarità dettata da una regola locale, e in cui ogni parte riproduce la

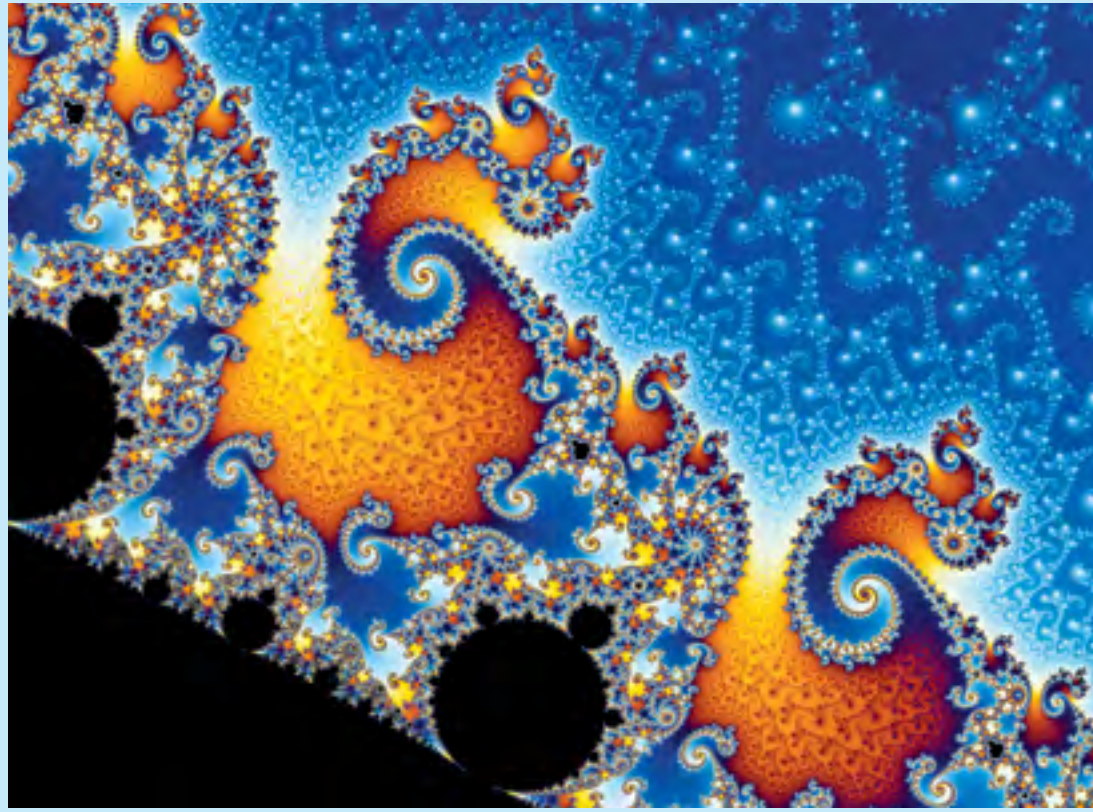
ad elementi semplici, non può essere ingrandita per poterne osservare la struttura fine. In altre parole, la struttura fine che si ottiene con l'ingrandimento replicato su ogni scala, restituisce iterativamente le caratteristiche integrali del tutto. È necessario soffermarsi a riflettere bene su quanto radicata sia, nell'approccio anche intuitivo all'analisi dei processi di pensiero, l'idea della possibilità della semplificazione. In senso tecnico questa possibilità coincide con l'assunzione dell'esistenza di una linearità, di una semplificabilità

che conseguono alla classificazione: appunto, un'azione sulla (conoscenza della) natura analoga all'intervento di un'armata (sulla natura medesima) che finisce per escludere, persino con l'immaginazione, il "composito". È necessario quindi ripristinare una relazione dialogica tra cause ed effetti, in un processo conoscitivo in cui non si cerchi a tutti i costi di idealizzare, di razionalizzare, di normalizzare; bisogna cioè "cercare di riunire quello che Cartesio ha separato".

L'approccio riunificante viene individuato da Serres già nel pensiero di Leibnitz, la

le risposte a priori, in quanto deboli sotto il profilo metodologico: esiste, in questa visione dei saperi classificati, un solo metodo duro, ed è appunto quello delle scienze dure. E così la conoscenza si frammenta, le discipline si separano, le conoscenze si allontanano al punto da sviluppare linguaggi non comunicanti, paradossalmente anche in prossimità degli stessi problemi, come ad esempio quelli della sostenibilità.

In realtà nelle scienze dure si osservano già dalla metà del Novecento tendenze localmente antiriduzioniste, anche se non



Rappresentazione dell'Insieme di Mandelbrot, un frattale autosimile e dunque non semplificabile attraverso l'ingrandimento, ampiamente usato come modello di non linearità grafica grazie alla sua sagoma ben riconoscibile.

cui concezione del mondo contempla una forte unitarietà, quasi olistica: a partire dalle monadi, componenti prime della materia e identiche basi costitutive per tutto il creato, "ogni punto del sistema leibniziano viene a costituire il vertice di una rete di corrispondenze, a cui affluiscono nuclei tematici intertraducibili". Il vertice del sistema leibniziano così descritto ha molto in comune con il nostro oggetto complesso. Ma purtroppo l'intertraducibilità è ancora lontana: gli scienziati che operano nelle scienze cosiddette dure lasciano la ricerca e l'indagine qualitativa intorno alle grandi domande umane agli umanisti, al tempo stesso squalificandone

sempre coordinate e non necessariamente univoche, che però possiamo identificare come semi dello sviluppo del tessuto di un approccio cum-plexus, che si diffonderà in modo sporadico ma crescente nei laboratori delle discipline naturali e post-naturali, dalla medicina, alla fisica, all'informatica, all'economia, alle biotecnologie. Non si discute esattamente di superare un approccio empirico riduzionista, che spesso è l'unico tecnicamente possibile, ma di valutarne i limiti, e di circoscrivere la validità dei risultati. Questo progresso è possibile se si abbandona la pretesa di eseguire esperimenti "puri", quelli cioè in cui i fattori accidentali che

discostano il risultato dalla previsione teorica sono declassificati tutti insieme sotto la stessa voce, alla stregua di "errori". La mancata indagine della natura profonda dell'errore e della sua intrinseca inevitabilità cancella una parte essenziale del processo che si sta indagando; ignorare la natura dell'errore ha significato, per tutta la storia della scienza positiva, il primato del modello sul fenomeno, e anche il moltiplicarsi senza controllo dei modelli disgiunti, pensati per includere e forse spiegare di volta in volta pochi e piccoli errori *ad hoc*; ma "se le scienze dure abbandonano l'esatto (che non esiste in natura), non possono che avvicinarsi al complesso."

Negli ultimi anni del XIX secolo Poincaré studiava le soluzioni di problemi non lineari, e la sua indagine lo portò a introdurre nella ricerca un parametro descrittivo completamente nuovo: il "grado" di risoluzione di un problema. Al posto della consueta dicotomia tra risolto e non risolto a cui venivano ricondotte la totalità delle equazioni, eventualmente con l'inclusione dello scomodo caso di "non risolvibile", introdusse una terza modalità per descrivere l'approssimazione della soluzione, cioè il grado di verità a cui si avvicinava la soluzione. La risolvibilità esatta non veniva esclusa a priori ma poteva non essere mai raggiunta, nonostante i metodi adottati non fossero "errati". Potevano coesistere, in questo quadro, soluzioni con gradi di verità diversi anche all'interno dello stesso problema: il vero, il parzialmente vero, il quasi del tutto vero, assumono per la prima volta lo stesso statuto epistemologico. La portata concettuale di questa apertura alla possibilità di imprecisione è immensa, e il ventaglio di possibilità derivate dalla rottura della dicotomia vero-falso scompagina l'ordine del sapere moderno in modo irreversibile.

Un secondo fattore di indebolimento arriva qualche decennio più tardi da Von Neumann, che come Poincaré studia la risolvibilità delle equazioni non lineari, e lavora con dei paleo computer predecessori dei moderni computer. La sua familiarità con i nuovi calcolatori è altissima: Von Neumann ha incontrato Turing a Princeton, e insieme hanno elaborato il famoso "test di Turing". Von Neumann introduce il concetto di "tempo utile" per la

ricerca di una soluzione: quando la macchina per il calcolo necessita di tempi troppo lunghi, e quando il calcolo rallenta troppo nell'avvicinarsi alla soluzione, può non essere più conveniente attendere ancora per avere la soluzione esatta. La soluzione migliorerebbe troppo poco rispetto alla sua versione approssimata, a fronte di ulteriori lunghissimi calcoli, dunque si decide di accettare un piccolo errore residuo e di interrompere il calcolo. Con questo atto ritorna determinante la valutazione prettamente umana del grado di esattezza sufficiente, del grado di approssimazione accettabile. Con l'intervento sulla macchina si decide quale errore sia "un piccolo errore", oppure anche, quale sia il rischio accettabile.

“Nel seguire le evoluzioni di questi sistemi dinamici, molto più diffusi di quanto ci si aspettasse, noi percorriamo il margine del caos, che non è una zona di confine, ma un bordo spesso, poroso e complesso, sospeso fra determinismo e indeterminazione.”

Il criterio per valutare quale sia il piccolo errore oppure il rischio accettabile non ha alcuna connessione tecnica con il particolare calcolo studiato, al contrario proviene unicamente dalla sfera decisionale personale dello studioso. L'intervento sulla macchina apre la strada all'arbitrarietà di una valutazione soggettiva, e anche in questo caso si percepisce l'innovazione epistemologica introdotta rispetto alla rigidità metodologica degli approcci descritti all'inizio.

Il terzo smacco al determinismo metodologico lo possiamo legare ai criteri soggettivi che si lasciano intervenire, in certi ambienti delle scienze esatte, nelle circostanze della valutazione della qualità di un risultato, basati su concetti molto instabili quali eleganza, semplicità, immediatezza. Criteri così arbitrari e soggettivi possono diventare determinanti nella scelta, ad esempio, di quali termini di una soluzione sopprimere, con lo scopo di accelerarne il rilassamento, e quindi possono diventare più rilevanti del processo analitico che ha portato alla scrittura del sistema studiato in forma di equazioni.

Questa possibilità di intervento “autoriale” sulla forma descrittiva della matematica ha il potere principale di interrompere quel rapporto di necessità che, nella tradizione degli studi della natura, ha sancito il ruolo (passivo) dello studioso di fronte ai suoi risultati.

Michael M. Waldrop, parlando di complessità dal Santa Fe Institute, si spinge ancora più in avanti, ed esorta le scienze dure ad abbandonare lo studio delle configurazioni di equilibrio, cioè delle situazioni di stabilità e quiete dei sistemi naturali che tipicamente hanno esistenze lunghe nel tempo (sono cioè quelle più frequenti da reperire in natura, e quindi più indicate a svolgere il ruolo di “oggetti di studio”), per dedicarsi invece alle “evoluzioni aperte”, alle transizioni di fase, a tutti i fenomeni di trasformazione e in trasformazione, in cui la validità delle leggi teoriche generali è assai limitata o cessa del tutto. In questi casi i termini usati per le descrizioni sperimentali devono essere continuamente aggiornati, in quanto ogni fattore esterno di “disturbo” all’esperimento può diventare sua parte integrante, condurre il risultato molto lontano da quanto inizialmente atteso, e dunque trasferire l’esperimento verso una zona del tutto nuova della ricerca. John Holland afferma addirittura che “la stabilità è morte”, e un trascinato da metafore lontane, sancisce che “è necessario abbandonare Platone per dedicarsi ad Eraclito”.

Nel senso a cui noi interessa per ora, cioè per il ragionamento intorno alla genesi di un sistema complesso, assistiamo con questi esempi a situazioni in cui, già all’interno di un discorso deterministico, si instaurano relazioni di tipo completamente nuovo tra causa ed effetto: relazioni non lineari, dialogiche, circolari e in qualche misura riflessive tra lo studioso e il suo problema.

6. Conclusioni

Quello che abbiamo messo in luce in questi paragrafi ha alla fine un unico scopo, quello di descrivere la difficoltà – forse l’impossibilità – del raggiungimento di un equilibrio fra due tendenze evolutive opposte, entrambe ben presenti sia nei sistemi biologici, che nei modelli dinamici, nei sistemi naturali e in quelli artificiali: da una parte le tendenze all’organizzazione, che permettono l’aggregarsi di strutture di vita che ricercano la stabilità e l’equilibrio, dall’altra quelle che portando verso il disordine, ne garantiscono la sopravvivenza, l’adattamento e l’evoluzione. A noi interessa al di sopra di tutto enfatizzare l’importanza dell’aumento delle connessioni antropiche presenti in questa tensione ciclica non riducibile; le figure della geometria frattale, oppure le transizioni di fase, permettendo la propagazione delle mutazioni pensabili, generano la rottura delle simmetrie spaziali, provocano l’emergenza della natura auto-organizzata dei sistemi, mantengono attiva la circolarità tra cause ed effetti.

Nel seguire le evoluzioni di questi sistemi dinamici, molto più diffusi di quanto ci si aspettasse, noi percorriamo il margine del caos, che non è una zona di confine, ma un bordo spesso, poroso e complesso, sospeso fra determinismo e indeterminazione.

• Riferimenti bibliografici

- Bocchi, Gianluca e Mauro Ceruti, a cura di, *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano 1986.
- Callari Galli, Matilde, Mauro Ceruti e Telmo Pievani, *Pensare la diversità*, Meltemi, Roma 1998.
- Cerrato Simona, a cura di, *Caos e Complessità*, Cuen, Napoli 1996.
- Ford, Ken, Clark Glymour e Patrick J. Hayes, a cura di, *Android Epistemology*, AAAI Press, Menlo Pk., CA 1995.

Hossenfelder, S. 2018, *Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray*, Basic Books, London 2018.

Leibniz, Gottfried Wilhelm, *Monadologia, Causa De*, a cura di Giuseppe Tognon, Laterza, Bari 1991.

Mandelbrot, B. 1982, *The Fractal Geometry of Nature, la geometria frattale della natura*, NY: Times Book.

Maturana Humberto e Francisco Varela, *L'albero della conoscenza*, Garzanti, Milano 1992.

Monod, Jaques, *Il caso e la necessità: saggio sulla filosofia naturale della biologia Contemporanea*, Mondadori, Milano 1997.

Morin Edgar, *Il paradigma perduto: che cos'è la natura umana?* Bompiani, Milano 1974.

Morin, Edgar, *Il metodo: ordine, disordine, organizzazione*, Feltrinelli, Milano 1983.

Morin Edgar, *Introduzione al pensiero complesso*, Sperling & Kupfer, Milano 1993.

Parisi Giorgio, *Statistical Field Theory*, Addison Wesley, New York 1988.

Peitgen, Heinz-Otto, e Peter Richter, *La bellezza dei frattali*, Bollati Boringhieri, Torino 1987.

Poincaré, Henri, *Geometria e caso: scritti di matematica e fisica*, a cura di Claudio Bartocci, Bollati Boringhieri, Torino 1995.

Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers, *La Nuova Alleanza: metamorfosi della scienza*, Einaudi, Torino 1999.

Serres, Michel, *Passaggio a Nord-ovest*, Pratiche Ed., Parma 1984.

Turing, Alan M., “Computing Machinery and Intelligence”, *Mind* 54 (1950), pp. 433-57.

Varela, Francisco, *La via di mezzo della conoscenza: le scienze cognitive alla prova dell'esperienza*, Feltrinelli, Milano 1992.

Waldrop, Morris Mitchell, *Complessità: al confine tra ordine e caos*, Instar, Torino 1996.

Wells, J. 2016, *Complexity and Sustainability*, London, Routledge.