

Sfruttare il caos

La scienza si confronta con la complessità. E dovrà fare ricorso alla contaminazione tra le culture diverse

Secundo Norbert Wiener, che a sette anni traduceva greco, latino e aramaico e da adulto padroneggiò gran parte della matematica e della fisica ed esplorò tra l'altro la fisiologia e la psicologia, Gottfried Leibniz (1646-1716) sarebbe stato l'ultima persona a dominare l'intera attività intellettuale della propria epoca, prima che la scienza si ramificasse tanto da impedire a chichessia di seguirne approfonditamente gli sviluppi. Già dopo Enrico Fermi, scomparso nel 1954, è divenuto impossibile per un solo uomo conoscere anche soltanto la fisica. Cinquant'anni or sono Derek De Solla-Price, nel suo *Little Science, Big Science*

(Columbia Univ. Press, 1963), sostanzio queste impressioni con una base quantitativa, mostrando la crescita esponenziale dell'attività scientifica. Se, come scopri, la quantità di conoscenze raddoppiava già allora ogni quindici anni, ecco spiegato come mai oggi nessuno più possa dirsi fisico, matematico o biologo, ma tutt'al più teorico delle stringhe, topologo o genetista. Come osservava lo stesso Wiener già nel 1948, occuparsi dell'argomento di un collega che lavora tre porte più in là nel nostro stesso Istituto è considerato un'imperdonabile indiscrezione¹.

Questo non significa che non esistano anche oggi persone di cultura scientifica prodigiosamente enciclopedica. Tuttavia,



Paolo Magrassi, fisico teorico rifugiatosi nell'informatica, si occupa da sempre di technology transfer, R&D, consulenza strategica. È partner e/o consigliere di aziende high-tech in tre continenti. I suoi lavori hanno ispirato iniziative come il progetto Virtual Australia e il programma Pontifex per lo scheduling delle flotte aeree europee. È stato membro invitato dei comitati di esperti per la formulazione del V, VI e VII Programma Quadro di R&D della Commissione Europea. Ha diretto laboratori di sviluppo software in Usa, Uk, Olanda e Germania per Ge e Siemens, e per 12 anni è stato analista di punta del GartnerGroup.

ormai è illusorio pensare che apprendendo le “nozioni di base” sia possibile dominare per intero anche una sola disciplina, come ad esempio la matematica o la fisica. Persino negli sviluppi di branche specialistiche possono annidarsi scoperte che mettono in discussione certi fondamenti, ossia proprio alcuni di quei principi di base che si credeva di avere padroneggiato. Del resto, il pensare alla scienza come conoscenza sicura e granitica è tipico di chi la frequenta solo superficialmente: tutti gli scienziati consapevoli hanno sempre avvertito l'insufficienza e la precarietà delle conoscenze acquisite. Ad esempio, terminato di formulare le leggi della gravitazione universale, Isaac Newton si convinse della impossibilità di pervenire a una soluzione matematica completa, e si rassegnò a ipotizzare che Dio periodicamente intervenisse per stabilizzare il sistema planetario e aggiustare le equazioni del moto. Le solide basi su cui poggia la scienza non sono le conoscenze, mutevoli, ma il meto-

do impiegato per conseguirle.

A sèguito dello smarrimento che deriva dal non sentirsi più padroni del sapere, è nata negli ultimi 30-40 anni la cosiddetta “teoria della complessità”. In realtà non si tratta di una teoria, né di una disciplina scientifica: per alcuni, è il tentativo di raccogliere sotto lo stesso titolo un insieme di sforzi scientifici solitamente separati ma caratterizzati da tratti comuni; per altri, un'analisi del pensiero scientifico nel tentativo di cogliere novità metodologiche emergenti; per altri ancora, il rifiuto del riduzionismo e la negazione della tirannia delle leggi fondamentali riguardanti le particelle elementari.

Il fisico Seth Lloyd disse pochi anni fa di avere catalogato 32 definizioni diverse di complessità, e questo ci dà un'idea della nebulosa di concetti e di iniziative coi quali ci troviamo a che fare. Per parafrasare Jorge Luis Borges: non una teoria, ma una vasta e complessa letteratura. Proviamo a richiamare quelli che appaiono oggi come i filoni più importanti.

Si comincia dal caos

Procedendo nelle sue indagini, la scienza si occupa di fenomeni sempre più complicati e anche sempre più complessi, ossia intricati, “tessuti assieme”. Non solo, cioè, le variabili in gioco sono moltissime, ma si influenzano a vicenda, in modi non sempre noti.

Pensate al cubo di Rubik: i cubetti sono solo 27 e ogni faccia ne contiene 9, ma la configurazione di ogni singola faccia influenza quelle delle altre cinque: appena ottenuto un colore uniforme su una faccia, cosa già di per sé non facile, ecco che andando a operare su un'altra molto probabilmente influiremo sul risultato ottenuto sulla precedente².

Verso la fine dell'Ottocento, Henri Poincaré si accorse, confermando ed estendendo scoperte di Delaunay risalenti a pochi anni

prima, che un sistema costituito da tre soli corpi nello spazio, benché soggetto alle leggi note e ordinate della meccanica newtoniana e laplaciana, poteva esibire anche comportamenti non-deterministici. Variando impercettibilmente le condizioni di partenza, il moto del sistema poteva diventare imprevedibile, caotico. Per la prima volta il caos faceva capolino in un contesto strutturato e meccanicistico, anche se l'attenzione mediatica gli fu dedicata solo cento anni dopo, quando il matematico e meteorologo Edward Lorenz parlò della famosa farfalla che, sbattendo le ali in un punto del pianeta, può causare una perturbazione migliaia di chilometri più in là.

Gli studi di Poincaré furono proseguiti nei decenni successivi da matematici e fisici come Hadamard, Levi-Civita, Birkhoff, Schrö-

dingher, Littelwood, Kolmogorov. Negli anni '70 del Novecento, poi, i matematici Yorke, Mandelbrot, Lorenz e Ruelle portarono alla formulazione di quella che va nota come "Teoria del caos". Essa è in un certo senso vecchia di oltre un secolo ma, un po' perché gli scienziati che se ne occuparono inizialmente non ne fecero una parte preminente del proprio lavoro e soprattutto perché l'argomento è divenuto veramente trattabile solo dopo l'av-

vento dei computer (fu grazie a questi che Lorenz riscoprì e analizzò l'effetto-farfalla), la disciplina è rimasta dormiente per la maggior parte del periodo 1890-1960.

Nella mente di molti Teoria del caos e Teoria della complessità sono sinonimi, e questo va a testimonianza della liberalità con cui il termine complessità viene utilizzato: vedremo infatti che parecchi altri sono i contesti in cui si parla di complessità.

Questioni di linearità

Un concetto connesso al caos è quello della non-linearità, al punto che, secondo molti, complessi sono proprio i sistemi non lineari a coefficienti variabili. Non possiamo dunque esimerci da un richiamo dei concetti di base. Un problema è lineare se lo si può scomporre in una somma di componenti indipendenti tra loro. Un altro modo per dirlo è usare la definizione sistemistica: in Teoria dei Sistemi si dice lineare un sistema (meccanico oppure elettrico, termico, eccetera) che risponda in modo direttamente proporzionale alle sollecitazioni ricevute. Ossia, per il sistema deve valere il principio di sovrapposizione degli effetti: se alla sollecitazione S_1 il sistema dà la risposta R_1 e alla sollecitazione S_2 dà la risposta R_2 , allora alla sollecitazione (S_1+S_2) esso risponderà con (R_1+R_2) .

Per esempio, se abbiamo una molla appesa al soffitto e che regge un peso, noi sappiamo che tirando la molla con forza F essa oscillerà per un certo tempo e con un'ampiezza iniziale proporzionale a F ; se, dopo che si è fermata, la tiriamo con forza doppia $2F$, la molla oscillerà per il doppio del tempo e con un'ampiezza iniziale doppia rispetto a prima. Sappiamo poi che oltre una certa sollecitazione la molla potrebbe anche spezzarsi. Anzi, di più: sappiamo, per intuito che deriva dall'esperienza, che tra il comportamento docile della molla che oscilla e, all'altro estremo,

quello catastrofico della molla che si spezza, esiste un range intermedio di forze sotto l'influsso delle quali la molla non oscilla bene e non si spezza: oscilla in modo strano, disarmonico, e si deforma irrimediabilmente, perdendo molta della sua capacità elastica. Esiste cioè, per ogni molla, una soglia di forza oltre la quale la molla non oscilla più in modo lineare e armonico, ma esibisce comportamenti bizzarri: al crescere delle sollecitazioni oltre questa soglia, la molla dapprima si deforma in modo strano, oscillando in modo assai poco armonico; al limite, si spezza. Il comportamento della molla sotto queste forze è non-lineare. Oltre quella soglia, non è più vero che applicando una forza doppia la molla vibrerà il doppio. Potrebbe vibrare 1,83 volte di più, o 1,47, o 1,13 o anche 0,84 volte, ossia addirittura meno di prima, quando la forza era minore: ciò perché la sua elasticità è stata modificata ed essa ormai vibra in modo disarmonico e capriccioso.

La molla è un esempio umile e casereccio, ma la verità è che le leggi matematiche con cui vibra una molla sono, nel range lineare, ossia finché non tiriamo troppo, le stesse con le quali oscillano i pendoli (e dunque i bilancieri degli orologi), le corde della chitarra, le correnti elettriche nei circuiti, i campi elettromagnetici nei laser, i cicli di immissione dell'insulina nel corpo umano, il ciclone El Niño se considerato isolato, il ritmo circadiano

no nelle persone e mille altri fenomeni naturali. Queste leggi dipendono da caratteristiche intrinseche dei sistemi; parametri che distinguono una molla dall'altra, una corda dall'altra, un circuito elettrico dall'altro. Nel caso della molla, il peso e le proprietà elastiche; nel caso del circuito elettrico, resistenza, induttanza, capacità; e così via.

L'intervallo lineare di un sistema è quello entro il quale i parametri che lo caratterizzano non dipendono dall'ampiezza della sollecitazione applicata. Così, se si tratta di un circuito elettrico, caratteristiche come resistenza, capacità, induttanza, risposta in frequenza dei transistor, eccetera, restano sempre le stesse qualunque sia la corrente elettri-

“ progredendo la scienza si occupa di fenomeni sempre più complicati e complessi: non solo le variabili in gioco sono moltissime, ma si influenzano a vicenda, in modi non sempre noti ”

ca che vi facciamo entrare. Beninteso, al di sopra di una certa soglia, dove termina l'intervallo lineare, l'incantesimo si rompe e il sistema comincia a comportarsi in modo non lineare, spesso caotico.

Qualunque sistema oscilla in funzione della forza applicatavi e delle proprie caratteristiche intrinseche. Le equazioni che descrivono le oscillazioni sono ben note. Il risultato, notevole, è che finché si resta nell'intervallo lineare la sollecitazione applicata in input può essere di complessità qualsivoglia: tanto, la potremo sempre scomporre nella somma di componenti fra loro indipendenti, e dunque predire quale sarà l'output del sistema in regime di linearità.

La non-linearità è naturale, e l'ipotesi di linearità di un sistema è un artificio che ci serve per descriverne il comportamento normale, ossia nel suo intervallo usuale di funzionamento. E “l'intervallo usuale di funzio-

namento” è quello che interessa noi in quel momento: non si tratta di una questione epistemologica bensì di una faccenda molto pratica³. Di solito non ci interessano le chitarre con le corde spezzate o gli amplificatori che distorcono il segnale: progettiamo chitarre pensando che a suonarle saranno chitarristi e non mocciosi dispettosi o scimmie, e progettiamo sistemi hi-fi che verranno installati in ambienti noti e controllati, con persone ragionevoli come utilizzatori.

(Quando disegniamo ali d'aeroplano o amplificatori a rumore bianco, invece, progettiamo esplicitamente la non-linearità).

Tutti i sistemi reperibili in natura sono, a ben guardare, non lineari, almeno in potenza: ma il più delle volte ci basta studiare il loro comportamento lineare per ottenere comunque risultati molto interessanti o utili. Oltre agli strumenti musicali e all'hi-fi, anche la televisione, il computer e la telefonia cellulare sono sistemi lineari.

La variabile deterministica

A ogni modo, è bene chiarire che le cose riguardanti i sistemi sono anche più complicate di così. Se andiamo a guardarli nella loro intima costituzione, diciamo con la lente di ingrandimento, i sistemi reali non sono soltanto essenzialmente non-lineari, ma anche non-deterministici! Una molla è deterministica se alla sollecitazione S_1 risponderà sempre con l'oscillazione R_1 e mai con un'oscillazione di tipo diverso. Questo genere di comportamento perfettamente prevedibile ha luogo solo se le caratteristiche della molla (o del circuito elettrico, eccetera) restano invariate nel tempo. Ma così come la linearità, anche questa condizione, ovvero la costanza nel tempo dei parametri di un sistema, è un modello ideale e, a stretto rigore, non si riscontra in natura. Il non-determinismo, come la non-linearità, è perfettamente naturale. Le proprietà elastiche della molla possono mutare nel tempo a causa dell'esercizio prolungato o di shock ricevuti; la massa appesa alla molla può variare di peso a seconda che siamo a livello del mare, a 8mila metri di altitudine oppure a bordo della Stazione Spaziale Internazionale, dove la forza di gravità è praticamente zero. Anche le vibrazioni di chitarre, violini e pianoforti, come sappiamo, cambiano sia al passare del tempo sia in funzione delle condizio-

ni di umidità ambientale, e sono tutt'altro che perfettamente 'deterministiche': che c'è di più facile del trovare uno strumento scordato anche avendolo lasciato lì senza usarlo? Se ci prendessimo la briga di andare a studiare meticolosamente le circostanze che rendono non-deterministico il nostro sistema, in linea di principio potremmo scoprirle tutte e conseguentemente modificare le equazioni matematiche così da renderle fedeli descrizioni del sistema anche in condizioni di non costanza dei parametri. La verità è che, il più delle volte, ci accontentiamo di violini, pendoli e circuiti elettrici non-deterministici, a patto che si comportino in modo prevedibile entro i limiti che ci interessano, e ci affidiamo semmai a criteri costruttivi e a buoni materiali, così da minimizzare i comportamenti strani, i quali resteranno ma avranno impatti trascurabili. Il violino non deve scordarsi troppo in fretta, la radio non deve perdere la sintonia mentre la ascoltiamo, la molla di una valvola deve aprire o chiudere quando ce lo aspettiamo: a noi sta di garantire loro condizioni ambientali standard. Non dovremo montare le valvole dello scooterino sulla moto di Valentino Rossi, e non consegneremo il pianoforte da 500 euro a Stefano Bollani, perché entrambi sperimenterebbero subito il non-determinismo.

Variabili da governare

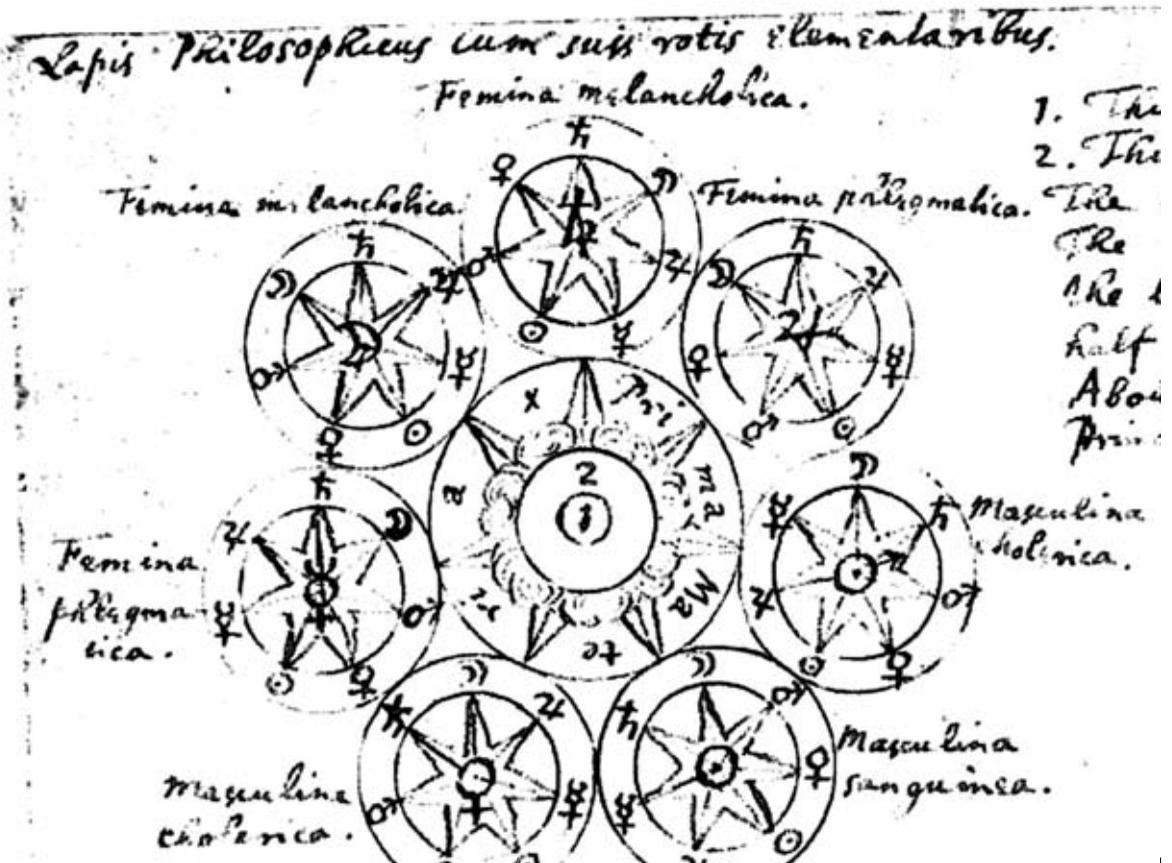
Un'altra complicazione che può presentarsi in un sistema è la “non concentrazione” delle caratteristiche fisiche che lo contraddistinguono. Quando si studia per la prima volta una molla, per semplificare si idealizza la localizzazione delle sue proprietà e le si immagina concentrate in ubicazioni fisiche ben precise: per esempio, si suppone che la massa stia tutta nel contrappeso, e che la sola parte a essere elastica sia la spirale. In realtà, la spirale a sua volta ha ovviamente una massa; così come il peso ha qualche proprietà elastica. Come al solito, il discorso non cambia se invece della molla consideriamo un circuito elettrico. Di norma si suppone che la resistenza sia tutta concentrata nei resistori, mentre in realtà un po' di resistenza al fluire della corrente elettrica ha luogo anche nei condensatori, negli induttori e persino nei fili di rame, che non sono conduttori perfetti. E neppure capacità e induttanza sono appannaggio esclusivo dei

rispettivi componenti discreti, ma in piccola parte distribuite lungo tutto il circuito.

E qui siamo alle solite: entro l'intervallo normale di funzionamento, ossia quello per cui il circuito viene progettato, l'ipotesi di “concentrazione delle proprietà” è sostanzialmente verificata: la resistenza sta tutta nei resistori, la capacità nei condensatori, l'induttanza negli induttori, con tolleranze dell'1 per 10000 o anche meno. Ma sottoponendo questo circuito a tipi inusuali di corrente elettrica (per l'esattezza, quelle di lunghezza d'onda grande all'incirca quanto le dimensioni fisiche del circuito), emergeranno tutti gli effetti perversi della effettiva, naturale distribuzione delle proprietà e il nostro sistema smetterà drammaticamente di funzionare come volevamo.

Riassumendo: i “sistemi” che si trovano in natura sono non-lineari, hanno caratteristiche intrinseche distribuite nello spazio e variabili nel tempo, e si comportano in

NOVA24 REVIEW Settembre 2008 28 SFRUTTARE IL CAOS



modo non deterministico. Per molti scopi pratici, tuttavia, ossia entro regimi di funzionamento specifici e ristretti (ristretti nel tempo e nelle prestazioni), noi sappiamo avvalerci di un loro comportamento più docile, fatto di linearità, determinismo, concentrazione e costanza delle caratteristiche naturali intrinseche.

I sistemi non-lineari sono quasi sempre di difficile comprensione, anche perché sfuggono alle piacevoli proprietà, tipiche dei lineari, della scomponibilità in sotto-problemi semplici e della generalizzabilità: stesse equazioni matematiche per molle, pendoli, circuiti elettrici, popolazioni biologiche, e così via. D'altra parte, poiché pongono problemi più

intriganti e sottili, i sistemi non-lineari rivestono grande interesse per i matematici, che li studiano dalla fine del Settecento (possiamo citare Lagrange, Hill, Hermite, Poincaré, Volterra, Wiener). E poiché sono i più diffusi in natura, essi sono anche comuni "rivali" degli ingegneri, che devono misurarsi con la non-linearità, irriducibile o quasi, in contesti come la fluidodinamica (ali d'aereo, auto di Formula 1, flussi negli oleodotti, ...), le fibre ottiche, la trasmissione del calore, la meccanica celeste, la meteorologia, la biologia (la genetica della *Drosophila*, il modello preda-predatore di Lotka-Volterra, il modello Michaelis-Menten sulla cinetica degli enzimi, ...) e molti altri.

Le difficoltà della riduzione

Speso, il comportamento di un sistema è molto difficile da spiegare sulla base delle proprietà delle sue parti: esso sembra assumere vita propria, distinta da quella delle componenti. Le colonie di formiche si comportano in modo imprevedibilmente intelligente se pensiamo alle facoltà dei singoli individui; il comportamento della folla nello stadio o dei ragazzi in un branco non assomiglia a quello delle singole persone; l'andamento del prezzo delle commodities o quello dei cambi valutari non sono facilmente spiegabili sulla scorta delle leggi economiche; una squadra farcita di campioni come il Real Madrid può non vincere nulla per un intero anno; l'internet e il web sono ben altro che la semplice somma dei computer partecipanti.

Anche nel campo della fisica, solitamente ritenuto più sotto controllo rispetto a organismi viventi e aggregati sociali, gli esempi abbondano. Per esempio, se si riguarda l'universo come un insieme di molecole, e se si considerano queste come soggette alle leggi della meccanica (classica o quantistica), si

dovrebbe concludere che passato e futuro sono identici: poiché le equazioni del moto sono invarianti rispetto a un cambio di segno della coordinata temporale, non c'è differenza tra lo scorrere in avanti o all'indietro del tempo. Questo è un dato paradossale che si scontra con la nostra esperienza di un universo inequivocabilmente irreversibile, orientato verso il futuro: non abbiamo mai visto una omelette trasformarsi in uova né il deodorante rientrare nel flacone dopo che lo avevamo spruzzato. Dunque, il tempo della materia antropomorfa sembra scorrere in una direzione, mentre quello delle particelle che la compongono è indifferente ai concetti di passato e futuro.

Come già faceva osservare Percy Bridgman, il comportamento emergente di un sistema è dovuto proprio alla non-linearità⁴. Le proprietà di un sistema lineare sono infatti, come abbiamo visto, additive: l'effetto di un insieme di elementi è la somma degli effetti considerati separatamente, e nell'insieme non appaiono nuove proprietà che non siano già presenti nei singoli elementi. Ma se vi sono

termini/elementi combinati, che dipendono gli uni dagli altri, allora il complesso è diverso dalla somma delle parti e compaiono effetti nuovi⁵.

La difficoltà di spiegare in modo puramente analitico, ossia scomponendo in parti via via più semplici, il comportamento “emergente” di un sistema si rivelò già, in un certo senso, nella seconda metà dell'Ottocento, quando fisici come Boltzmann e Gibbs dovettero ricorrere a metodi statistici (anziché esatti e puntuali) e concetti sistemici (anziché atomici e molecolari), come quello di entropia. L'entropia è una misura del grado di disordine di un sistema con moltissime componenti

“ La sfida della complessità non è tanto una contrapposizione di problemi complessi rispetto a quelli “semplici” del passato. quanto un punto di vista nuovo sull'indagine scientifica ”

NOVA24 REVIEW Settembre 2008 30 SFRUTTARE IL CAOS

– così tante che non sarebbe pratico considerarle una per una. Una configurazione ad alta entropia ammette, rispetto a una a bassa entropia, più modi di disporre un dato numero di componenti. Pensiamo a quando versiamo latte nel caffè. Ci sono moltissimi modi di distribuire le molecole in modo che caffè e latte siano completamente mescolati, ma ci sono relativamente pochi modi di distribuirle in modo tale che il latte sia completamente separato dal caffè circostante. La miscela ha un'entropia più elevata che non il grumo. Servendosi di concetti come entropia e temperatura, e di metodi statistici basati sull'assunto che le singole molecole di un gas si muovano indipendentemente l'una dall'altra e in modo stocastico, si giunse a spiegare il comportamento di grandi aggregati (il ‘sistema’ gas) e a formulare, tra le altre cose, i principi della termodinamica. Questi furono in qualche modo i prodromi dei futuri approcci “antiriduzionistici”: si ammettevano proprietà fisiche che non avevano senso a

livello molecolare e atomico, e si formulavano leggi che non somigliavano a quelle riguardanti le singole componenti dei sistemi. I singoli atomi non hanno né temperatura né entropia. La differenza con l'approccio complesso più moderno sta nel fatto che, per i fisici di allora, la meccanica statistica non era una negazione della supremazia delle leggi fondamentali riguardanti gli atomi, bensì un espediente al quale si ricorreva per non dover risolvere una per una le equazioni del moto di tutte le particelle coinvolte; si presumeva comunque che il comportamento di un aggregato macroscopico di materia – come ad esempio un gas – non fosse che la somma degli effetti delle molecole costituenti.

Il filone proseguì, sia in campo classico (Einstein, Koopman, von Neumann, Birkhoff) sia in campo quantistico (Bose, Einstein, Fermi tra gli altri), e il ventennio 1950-70 portò a un nuovo livello di maturazione la nostra visione sui sistemi macroscopici. Ad esempio, il chimico-fisico Ilya Prigogine, ponendo lo sguardo su una zona ancora poco esplorata, ossia lo stato dei sistemi quando essi sono lontani dall'equilibrio dinamico (come lo stato critico al confine tra quello gassoso e quello liquido), si accorse che in quelle situazioni, pur soggetto a oscillazioni caotiche, un sistema può tendere a uno stato di maggiore organizzazione, perdendo entropia. Questo fatto è, fra l'altro, alla base del paradosso della reversibilità del tempo microscopico: le fluttuazioni critiche lontano dall'equilibrio generano il tempo irreversibile della materia. Come spiega bene Luciano Pietronero nel suo prezioso *Complessità e altre storie* (Di Renzo, 2007), i sistemi che incontriamo sulla Terra sono, non fosse altro che per la presenza del continuo apporto energetico da parte del Sole, di fatto tutti non isolati e fuori dall'equilibrio, sicché non dobbiamo stupirci delle creazioni di ordine qua e là. Nel 1972 Philip W. Anderson scrisse su *Science* un articolo ("More Is Different") che rifondò la fisica degli stati solidi e gassosi e inaugurò gli studi "complessi", mettendo in discussione l'approccio riduzionistico in base al quale le leggi fondamentali della

natura sarebbero solo quelle che regolano le particelle elementari, dalle quali sarebbe possibile ricavare tutto il resto. Senza bisogno di arrivare a cose complicate come gli organismi viventi, ai tempi di Anderson si sapeva che persino un gruppo numeroso di elettroni può esibire un comportamento inspiegabile sulla base delle leggi fisiche che governano gli elettroni singolarmente, perché sotto certe condizioni questi cominciano a interagire fra loro in modo strano. (Accade, per esempio, nei superconduttori).

Da allora, a ogni successivo livello di indagine (le particelle elementari, i nuclei, gli atomi, le molecole, le proteine e così via, salendo nella scala geometrica) competono le proprie leggi fondamentali e nessun gruppo di leggi è più autorevole, "più basilare" degli altri. L'approccio analitico è ottimo, e ci servirà sempre. Noi vogliamo indagare di più, scomporre, capire. Ma bisogna stare attenti a non sprofondare, a volte, dall'analisi al riduzionismo, che ne è una degenerazione. Non capiremo i risultati dell'Inter studiando solo le qualità individuali dei suoi calciatori e osservando che essi valgono, sommati assieme, mezzo miliardo di euro: non si spiegherà mai, su queste basi, una sconfitta con l'Empoli o l'Atalanta. Quando i sistemi sono non-lineari, l'analisi non è risolutiva e deve essere affiancata da un approccio sistemico, olistico, che prenda in considerazione il sistema innanzitutto come un'entità autonoma e solo in seconda battuta come un aggregato di elementi.

Oggi gli studiosi dei sistemi fisici complessi si occupano del livello intermedio tra l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande, i poli sui quali per la maggior parte della sua storia la fisica ha focalizzato il grosso degli sforzi e su cui ancora oggi investe quasi tutto il budget sperimentale: non è un caso che le due più grandi teorie in vigore, ossia la relatività generale e il modello standard della meccanica quantistica, riguardino quei due opposti. Non si è affrontata ancora con altrettanta risolutezza la dimensione intermedia, ossia proprio quella antropomorfa, e forse è questa la ragione per cui chiamiamo "complessi" i problemi

che vi troviamo: non sappiamo bene perché un bicchier d'acqua congeli a zero gradi centigradi e una molecola di H₂O, invece, no; e per di più, relatività generale e modello standard appaiono inconciliabili, un po' come se, nel mezzo, ci fosse qualcosa che non torna⁶.

Partendo dal concetto fisico di auto-organizzazione lontano dall'equilibrio⁷, negli ultimi trent'anni si è pervenuti ad astrazioni sempre crescenti e a complessi modelli matematici che trovano applicazione in meteorologia, elettronica, optoelettronica, biologia, chimica.

Linfa interdisciplinare

Due fenomeni contribuirono, intorno alla II Guerra mondiale, a un'accentuazione dell'accelerazione verso una complessità sempre maggiore dell'indagine scientifica. Da un lato, lo svilupparsi di approcci interdisciplinari ai problemi tecnologici, di cui si erano già visti i prodromi negli anni '20 con i movimenti dell'olismo e della Gestalt e nei '30 con la traduzione in tedesco dei lavori dell'eccentrico scienziato e rivoluzionario bielorusso Alexander Bogdanov. Dall'altro lato, decisiva, la comparsa dei computer.

Gli anni '40 del Novecento hanno visto sorgere la necessità di sforzi trans-disciplinari per affrontare nuove sfide, come quelle poste dalla ricerca operativa (nata per scopi militari) o, peggio, dagli organismi viventi. Virus, batteri, cellule sono sì fatti di atomi e molecole, ma si comportano in modo ancora più "strano" delle perturbazioni atmosferiche, dell'aria intorno alle ali degli aerei supersonici e della propagazione delle onde nelle fibre ottiche. Esibiscono spesso quel comportamento emergente così difficile da spiegare utilizzando leggi fondamentali, e non sembrano adatti a essere studiati con gli strumenti della meccanica statistica, perché la loro complessità non è di tipo stocastico e appare semmai dovuta alle interazioni tra i componenti, un po' come nel cubo di Rubik (è una "complessità organizzata", come la chiamò Warren Weaver).

Nel 1944 Erwin Schrödinger, uno dei padri della meccanica quantistica, scrisse il pamphlet *What Is Life?*, proponendo un modello fisico del materiale genetico e gettando un

ponte destinato a durare per sempre tra fisica e biologia: Watson e Crick, gli scopritori del Dna, lo citeranno come un lavoro ispiratore.

Negli stessi anni nasceva la prima disciplina programmaticamente interdisciplinare, la cibernetica, sotto l'impulso di matematici e ingegneri come Wiener e von Neumann, di biologi come Maturana, di biongegneri come Lettvin, di fisiologi come McCulloch e Rosenblueth, di logici come Pitts⁸. Si era ormai capito che l'iperspecializzazione portava ottimi risultati localmente ma serviva a poco per affrontare certe sfide globali, a molte facce interconnesse. Negli anni '60 ebbe grande impulso anche la Teoria dei Sistemi (Bertalanffy, Bánáthy, Zwicky), tentativo di formalizzare in modo matematico la fenomenologia naturale più complessa, e vista da alcuni, oggi, come un altro sinonimo ancora di "teoria della complessità". Il Santa Fé Institute, organizzazione di ricerca non-profit, è stato fondato nei primi anni '80 per perseguire gli studi interdisciplinari che sono solitamente così difficili da svolgersi nelle istituzioni accademiche ordinarie, dove ricerche, pubblicazioni, cattedre e carriere sono rigidamente compartimentate per discipline e anzi branche di discipline.

La comparsa dei computer, infine, ha aperto la possibilità di far compiere da loro, beninteso dopo aver programmato sotto forma di software gli opportuni modelli matematici (eventualmente caotici) riflettenti la realtà naturale in esame, esperimenti che sarebbero impossibili in vivo, e ha dato formidabile

impulso alla escalation verso problemi sempre più complessi. La teoria del caos, per esempio, è stata resa possibile dagli elaboratori; e così i frattali, anch'essi oggetto di studio da oltre un secolo ma in sordina sino a quando Mandelbrot, armato di calcolatore, nel 1975 produsse le meravigliose figure che ebbero sui media e quindi sul pubblico un impatto visivo e immaginifico fortissimo, che dura

tuttora. Oggi i fisici studiano potentissime architetture elaborative per attaccare problemi come la forma delle nuvole nel vento o il modo con cui la panna si diluisce nel caffè. I matematici usano i computer per comprendere il misterioso ordine che sembra emergere dalla disposizione caotica dei numeri primi, e in genere come terreno sperimentale per le loro inesauribili elucubrazioni.

Complessità computazionale

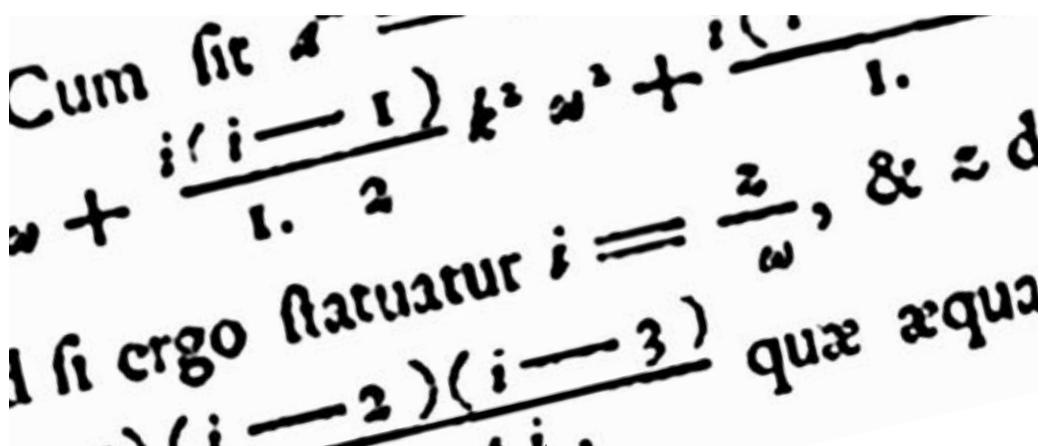
Forse il contesto nel quale si è parlato per la prima volta e più diffusamente di complessità, quantunque in un senso diverso da quello della teoria del caos o del comportamento emergente, è stato quello della teoria dell'informazione.

Bisogna considerare che un filo rosso corre tra la risolvibilità di una funzione in senso matematico e la computabilità di un programma di calcolo per computer. I due concetti sono facce di una stessa medaglia e sono anche ricollegabili a quello della decidibilità in senso di Gödel, il logico che mostrò come la matematica possa essere suddivisa in branche banali e altre non banali. Le matematiche banali sono quelle che potrebbero, almeno in linea di principio, essere affidate a dei computer affinché se ne occupino, dal momento che tutte le deduzioni che si possono trarre in quegli ambiti sono conseguenze logiche di fatti noti (assiomi e teoremi), e dunque automatizzabili. Non banali sono le

matematiche che richiedono interventi fantasiosi e ingegnosi per svilupparsi. Come ci sono matematiche banali e non banali, così esistono algoritmi/funzioni computabili e altri non computabili.

Il fil rouge della complessità computazionale parte nell'agosto 1900 alla Sorbona, quando David Hilbert espose 23 problemi che a suo parere avrebbero costituito alcune tra le più grandi sfide per la matematica nel XX secolo (per inciso, aveva ragione: due sono ancora irrisolti e intorno ad altri otto si continua a bisticciare). Il secondo di quei problemi poneva proprio la questione della banalità o meno della matematica, in parte risolta da Gödel negli anni '30, poi sviluppata anche in senso informatico da Turing negli anni '40 e da Kolmogorov nei '50.

Tra le altre cose, la complessità computazionale fu agganciata (grazie per esempio a Shannon, Kolmogorov, Chaitin, Solomonoff) al concetto di entropia, aprendo una conturbante analogia



tra termodinamica e informatica.

L'informazione ha una sua entropia, come si può comprendere se si guarda per esempio alle stringhe "01010101010101" e "1000110101001011", laddove la prima può essere sintetizzata dicendo "otto volte 01", mentre la seconda non è altrettanto semplicemente riducibile a una formula più breve della stringa stessa: la seconda stringa

ha più entropia della prima⁹. Termodinamica e informatica, due discipline che apparentemente non hanno alcunché in comune, sono state così collegate dai medesimi concetti statistici ai quali i fisici dell'Ottocento erano dovuti ricorrere per venire a capo dei comportamenti di grandi aggregati di atomi e molecole. Entropia e informazione sono concetti complementari.

Il mito della complessità

Abbiamo passato in rassegna alcuni punti di vista differenti sulla complessità, che possiamo riassumere così:

- 1) c'è, innanzitutto, una complessità nel senso della non-linearità e del non determinismo, che si manifesta, a seconda dei fenomeni che si studiano e del punto di vista che si assume, ora come caos deterministico ora come proprietà sistemiche emergenti non spiegabili con un approccio esclusivamente analitico;
- 2) c'è una complessità dovuta alla competizione fra ordine e caos (stocastico) nei sistemi lontani dall'equilibrio;
- 3) c'è una complessità computazionale¹⁰.

Di solito gli studiosi si concentrano chi su uno chi sull'altro di questi punti di vista, a causa dei limiti "politici" dell'interdisciplinarietà ai quali accennavamo sopra. Quindi, la maggior parte degli interventi competenti ai quali assistiamo sono di nicchia, confinati in ambiti ristretti. Consultando la letteratura scientifica, si trova chi parla di sistemi complessi adattivi (Cas), chi di reti cellulari nonlineari (Cnn), chi di informazione quantistica e decoerenza, chi di attrattori strani in meteorologia o nei sistemi biologici, chi di emergenza negli ecosistemi sociali: l'elenco potrebbe essere lungo.

Poi c'è, quarta e ultima tra le categorie che vogliamo ricordare qui, quella che chiameremo la complessità mitica.

La progressiva accelerazione sul terreno dell'atteggiamento complesso si somma alla sempre maggiore contemporaneità della scienza,

dovuta al fatto che, come già misurò il citato De Solla Price, vivono intorno a noi la stragrande maggioranza (forse ormai il 99%) di tutti gli scienziati più produttivi di ogni tempo. La vertigine che ne deriva colpisce l'immaginazione di molti che guardano la scienza dal di fuori, e ha dato vita a una variegata letteratura sulla complessità che ha componenti giornalistiche, pseudo-scientifiche e filosofiche. A causa del non sempre solidissimo background scientifico degli autori coinvolti, gli esiti sono molto alterni, e spaziano dal puro e semplice nonsense all'appassionata affermazione di valori come l'interdisciplinarietà o l'anti-scientismo, ossia la sacrosanta opposizione a chi pensa che con i soli approcci logico-deduttivi e sperimentali troveremo risposte a ogni quesito esistenziale. Contributi importanti in questo senso sono venuti soprattutto da Edgar Morin. La letteratura extra- o meta-scientifica può a volte confondere il lettore, presentando visioni di complessità che non assomigliano a quelle che si riscontrano in sede scientifica o che, peggio ancora, non ne tengono conto. La complessità vi viene spesso rappresentata come assenza di struttura, oppure come impossibilità di prova in sede scientifica, oppure come dominio non soggetto all'utilizzo della matematica, oppure come spazio dei problemi che non ammettono soluzione, oppure ancora come qualcosa di indefinibile che si sottrae beffardamente a ogni tentativo di circoscrizione.

Questa a-scientificità, se può essere perdonata alla letteratura “pop” (come ad esempio molta di quella dedicata al management), negli scritti filosofici costituisce in ultima analisi un tradimento, visto che tra gli intenti programmatici della sfida della complessità a opera di epistemologi come Morin o Stengers si annoverava un tentativo di riappacificazione tra scienza e filosofia, per ricucire le lacerazioni occorse dopo Leibniz.

La contaminazione tra le molte culture coinvolte (scienze della natura, scienze sociali, scienze umane, filosofia) non è solo auspicabile ma anche, in quest’epoca di inevitabili e miopi specialismi, una cura contro l’indifferenza e la chiusura in compartimenti stagni -il

rischio nichilista di chi finisce col sapere tutto di nulla. Affinché la contaminazione sia produttiva, tuttavia, gli esponenti delle parti coinvolte debbono sforzarsi di comprendere le sottigliezze delle rispettive Weltanschauung, e alcuni debbono rifuggire la tentazione di arriviare ad apprendere nulla di tutto.

Non vanno in questa direzione le esortazioni, che capita sempre più spesso di leggere in libri divulgativi sulla complessità e persino in saggi filosofici, a “superare una vista cartesiana della scienza che vada al di là del puro determinismo” (cosa avvenuta da molti decenni in fisica) o a mettere in soffitta “le nozioni classiche di legge e previsione” – senza proporre alcunché in cambio. ♦

1 Norbert Wiener, *La cibernetica*, Il Saggiatore 1968, pag. 24

2 Il cubo di Rubik ammette soluzioni algoritmiche stabili, mentre la complessità della Natura non è sempre così benigna. Crediamo comunque di aver reso l’idea dell’intricatezza che può sorgere quando le componenti di un tutto si influenzano a vicenda e rendono arduo descrivere gli stati che il sistema nella sua globalità di volta in volta acquisisce.

3 In sede epistemologica è interessante sapere che tutti i sistemi sono in realtà non-lineari, ma ciò non autorizza a concludere che approcci e modelli lineari non siano leciti. Nella pratica, essi lo sono molto spesso, a patto di operare delle approssimazioni: se l’effetto non-lineare ‘pesa’ per l’uno su centomila, non si sbaglierà di troppo assumendo di operare in condizione di linearità. Così, in Formula Uno ci si disinteressa della teoria della relatività ristretta, e in aeronautica non si ci preoccupa della teoria della relatività generale, senza che ciò infici la nostra consapevolezza circa la fallacia del tempo galileiano e della meccanica classica.

4 P. Bridgman, *The Logic of Modern Physics*, The Macmillan Company, 1927.

5 Quanto a questa complessità come “tessitura”, maglia di componenti interagenti che non possono essere scissi dal tutto, valgono le medesime considerazioni che facevamo riguardo alla linearità: c’è una differenza tra il piano epistemologico e quello pratico. La presa d’atto della complessità di un problema non è incompatibile con un approccio non complesso alla risoluzione, se questo si rivela possibile. (La realtà è sempre complessa, ma i modelli che noi ne costruiamo possono essere semplici). Per esempio: le particelle di un gas interagiscono anche a grande distanza, e anche atomi lontanissimi fra loro sono legati dal campo di forze elettrodebole, ma i relativi effetti sono spesso trascurabili e non si vede perché

dovremmo lasciarne ossessionare sempre e comunque.

6 Il tentativo, in corso da oltre quarant’anni, di unificare queste due visioni del mondo sotto un ombrello comune, non riguarda in realtà solo la materia su scala antropomorfa; esso si concentra soprattutto sui pochi picosecondi dopo il Big Bang, durante i quali l’intero universo era piccino piccino e non si erano ancora consumate certe transizioni di fase.

7 Molti oggi preferiscono parlare di complessità solo in presenza di auto-organizzazione in aggiunta alla non-linearità. Sono dotati di auto-organizzazione i sistemi che si modificano, adattandosi all’ambiente, pur in assenza di un’entità di controllo.

8 Grande impulso all’approccio interdisciplinare provenne dalle Macy Conferences, sponsorizzate da una fondazione filantropica newyorkese. Tenutesi tra il 1946 e il 1953, esse furono animate, oltre che dai personaggi soprannominati, fra gli altri dall’antropologa Margaret Mead, dal biofisico Heinz von Foerster, dall’antropologo e linguista Gregory Bateson, dagli informatici Julian Bigelow e Claude Shannon.

9 Si potrebbe anche dire che la seconda stringa è più complessa. Murray Gell-Mann ha proposto questo criterio come definizione o misura: la complessità di un sistema/problema sarebbe “la lunghezza minima della sua descrizione scientifica”.

10 C’è anche la complessità di certi problemi matematici: se prendiamo come misura “la lunghezza minima della descrizione scientifica” di un problema, come propone Gell-Mann, ecco che la matematica diviene un giacimento inesauribile di complessità.

11 Ci piace ricordare anche, per dire dell’Italia, il volume *La sfida della complessità*, raccolta di saggi pubblicata per Feltrinelli a cura di Gianluca Bocchi e Mauro Ceruti già nel 1985 (e recentemente riedito), che rese noto in Italia il pensiero di Morin.