



IL 'PENSARIO' della Biblioteca filosofica

Numero Primo – Aprile 2007

Giovanni Casini
Spiegare la complessità

<http://www.humana-mente.it>

Spiegare la complessità

I. Affrontare la complessità: un problema per le metodologie scientifiche tradizionali

Lo studio dei sistemi complessi è un ambito di ricerca oggi in pieno sviluppo. Lo studio matematico di questo tipo di sistemi nasce soprattutto per rispondere a due esigenze: da un lato i difficili tentativi di matematizzazione all'interno di molte scienze cosiddette "speciali", quali l'economia, la sociologia e la biologia, e dall'altro la nascente attenzione, in fisica, allo studio di sistemi aperti con attrattori. Negli anni '50-'60 tentò di venire incontro a queste esigenze la cosiddetta *Teoria Generale dei Sistemi*, orizzonte di ricerca dal programma fortemente interdisciplinare (e probabilmente anche fortemente dispersivo)¹. L'impostazione della Teoria Generale dei Sistemi è stata ereditata quasi immutata dalla teoria dei sistemi complessi, caratterizzata però anche da un uso massiccio del computer e da una particolare attenzione rivolta ai sistemi caotici ed ai sistemi auto-organizzanti.

La fisica di stampo classico è sempre stata legata ad un'impostazione di tipo analitico/lineare, che basa lo studio di un sistema su una scomposizione dello stesso in elementi analizzabili indipendentemente e sull'esame del suo comportamento in relazione a poche variabili rilevanti, considerando il resto dei dati come "condizioni al contorno".

[...] la fisica [...] ha potuto scoprire leggi di natura. Questa scoperta è stata resa possibile da esperimenti – reali o di pensiero – nei quali vengono mutati soltanto pochi parametri (o soltanto un parametro): ad esempio l'altezza o il peso negli esperimenti di Galileo sulla caduta dei gravi. A questa metodologia è associata una tendenza egualmente importante: la ricerca di "elementi" semplici attraverso la scomposizione dei sistemi nelle loro parti.²

Un'impostazione del genere è quindi legata ad un approccio che punta alla modularizzazione dell'oggetto di studio e all'analisi di ogni componente indipendentemente; a sua volta ogni componente può essere sottoposta a una

nuova modularizzazione, procedendo quindi attraverso una gerarchia di sistemi descritti in maniera sempre più particolareggiata.³ Questa impostazione è andata avanti di pari passo con un approccio riduzionista, secondo cui una spiegazione ad un qualunque livello di descrizione può essere ridotta, almeno in linea di principio, ad una spiegazione di livello inferiore, fino a ridursi a spiegazioni al livello micro-fisico.

Cercando di spiegare un sistema in riferimento alle sue parti, è procedimento comune assumere sia che tale sistema sia fortemente modulare, sia che abbia una struttura gerarchica.

[...]

Nella pratica scientifica, l'assunzione che i sistemi abbiano una struttura modulare e gerarchica tende a favorire programmi di tipo riduzionistico. [...] Poca attenzione viene rivolta all'organizzazione, dato che questa viene considerata lineare e relativamente poco importante. La maggior parte della ricerca viene rivolta alla comprensione delle parti.⁴

Un approccio del genere è però risultato fallimentare nel momento in cui la scienza si è dovuta confrontare con lo studio di sistemi altamente complessi. Non vi è una definizione universalmente accettata di 'sistema complesso', ma in generale possiamo dire che un sistema è considerato complesso se è costituito da un alto numero di parti interconnesse, tale che non è possibile spiegare il suo comportamento senza prendere in considerazione il 'livello organizzativo'; questo livello di analisi può essere definito come lo studio delle interazioni fra le varie componenti di un sistema, finalizzato al riconoscimento dei vincoli a cui è sottoposto il comportamento di ogni elemento in relazione al comportamento degli altri elementi, andando quindi ad identificare all'interno del sistema particolari strutture, come gruppi e gerarchie, la cui presenza risulta rilevante per la caratterizzazione del comportamento del sistema.⁵

L'attenzione che deve essere rivolta al livello organizzativo diviene un forte ostacolo al programma riduzionista poiché diviene necessaria l'analisi della topologia del sistema: almeno parte della spiegazione non è quindi riducibile allo studio dei sotto-sistemi isolati, ma corrisponde all'interazione fra essi.

[...] di fronte a tale organizzazione, le spiegazioni che fanno uso solo di informazioni ottenute investigando a livelli inferiori falliscono, e spiegazioni adeguate necessitano di una esposizione di come l'organizzazione nel sistema generi il fenomeno.⁶

Nella sua accezione più forte, la nozione di sistema complesso è fortemente olistica e l'impostazione sistemica è focalizzata sullo studio delle interazioni fra le parti, astraendo il più possibile dalla specifica natura fisica di queste (perlomeno tralasciando tutte le caratteristiche che non influiscono sulla natura delle interazioni). Il livello di complessità di un sistema si pone quindi all'interno di un continuum che va da sistemi altamente modulari, con sotto-sistemi dai comportamenti distinti, a sistemi in cui le uniche proprietà rilevanti sono di carattere topologico globale ed i cui componenti sono interscambiabili fra di loro;⁷ la maggior parte dei sistemi che i ricercatori si trovano di fronte si pongono però ad un livello intermedio, in cui le parti presentano comportamenti distinti, ma che vengono vincolati dal tipo di interazioni che esse intrattengono.

Ad un estremo abbiamo sistemi che esibiscono particolari proprietà semplicemente perchè essa è posseduta dalle parti del sistema. [...] All'altro capo di questo continuum incontriamo sistemi il cui comportamento è imputabile quasi esclusivamente al modo in cui le parti sono messe insieme. Nei casi più estremi, le componenti sono funzionalmente identiche, e quindi intercambiabili.

[...] Nel mezzo troviamo sistemi le cui parti forniscono contributi caratteristici, ma la maniera in cui queste sono aggregate impone interessanti vincoli all'azione delle singole parti e conduce a comportamenti inattesi del sistema considerato integralmente.⁸

Il livello organizzativo è quindi centrale nello studio della complessità e difatti la tassonomia dei sistemi si basa generalmente sulla natura delle interazioni fra le componenti e sull'evoluzione che queste interazioni hanno nel tempo. Prima di tutto possiamo differenziare i sistemi in 'statici' e 'dinamici'. In questi ultimi almeno parte delle interazioni fra le componenti mutano nel tempo, mentre nei primi le interazioni rimangono fisse (ad esempio in un cristallo, ma anche la maggior parte dei processi interni di un organismo adulto); la staticità del sistema è legata al tipo di analisi che siamo interessati a svolgere, alle variabili che riteniamo rilevanti, visto che ognuno di questi sistemi, ad un diverso livello di osservazione, si presta ad

essere considerato dinamico (ad esempio, nell'organismo adulto i molti processi interni che possono essere considerati stabili, perché caratterizzati da equilibri biochimici che si mantengono costanti, si rivelano ovviamente dinamici nel momento in cui andiamo a studiare i processi metabolici che sottostanno a tali equilibri).

Un sistema dinamico può essere 'organizzato' o 'disordinato': nel sistema organizzato le dinamiche di ogni componente sono vincolate dalle interazioni che intrattiene con le altre componenti (come in un flusso di liquido, in cui il movimento di una particella non è libero, ma vincolato in velocità e direzione a quello delle altre particelle), mentre nel sistema disordinato il comportamento di ogni elemento è 'libero', cioè non è vincolato da quello delle altre parti (ad esempio un volume di gas ideale in uno stato di equilibrio, in cui per ogni particella ogni direzione di movimento è ugualmente probabile). L'analisi dei sistemi organizzati tratta quindi l'organizzazione per mezzo di insiemi di variabili mutuamente dipendenti.

Un sistema si distingue in 'aperto' o 'chiuso' a seconda che abbia o meno un interscambio di materia o energia con l'ambiente attorno. La fisica classica ha principalmente studiato sistemi chiusi, come il volume di gas ideale isolabile dall'ambiente esterno tipico della termodinamica classica. Per questi sistemi vale la seconda legge della termodinamica, secondo cui un sistema tende sempre verso uno stato di equilibrio, caratterizzato dal maggiore disordine (aumento dell'entropia). Quando parliamo di sistema chiuso, come pure di sistema assolutamente disordinato (nel senso visto sopra di assoluta mancanza di reciproci vincoli fra gli elementi), stiamo ovviamente facendo delle idealizzazioni: ad esempio i sistemi chiusi di gas ideale della termodinamica classica sono un modello teorico di riferimento, utile per descrivere il comportamento dei reali sistemi gassosi utilizzati nelle procedure sperimentali. Tali sistemi reali sono 'quasi' chiusi e costituiti da elementi con un comportamento 'quasi' libero, nel senso che le interazioni del sistema con l'ambiente e fra le particelle sono talmente poco rilevanti da permettere di sviluppare modelli che non le considerano.

Per quanto riguarda invece i sistemi aperti, un classico esempio è un qualunque organismo vivente, che per il proprio mantenimento deve assumere energia dall'ambiente, restituendo materiali energeticamente degradati. Più precisamente in questo caso stiamo parlando di sistemi 'dissipativi', cioè sistemi organizzati in maniera tale da poter utilizzare un flusso di energia in ingresso per mantenere o evolvere la propria struttura, senza permetterle di cadere in uno stato disordinato. Molte scienze non fisiche (ad es. biologia, sociologia, economia, psicologia) ed anche nuovi campi della fisica (come lo studio dei sistemi caotici) hanno a che fare con sistemi per definizione aperti, che possono essere analizzati come sistemi dissipativi.

Un caso particolare di sistema dissipativo è rappresentato dai sistemi 'auto-organizzanti', cioè sistemi aperti che tendono autonomamente verso il raggiungimento ed il mantenimento di uno stato ordinato.

Un sistema si definisce auto-organizzato quando esibisce una struttura interna organizzata, la cui generazione e mantenimento è il risultato delle interazioni collettive fra gli elementi del sistema. In tali sistemi, il passaggio ad uno stato ordinato viene sì indotto da variazioni ambientali, visto che stiamo parlando di sistemi dissipativi (che quindi necessitano di particolari scambi di energia e/o materia con l'ambiente), ma l'emergere di tale comportamento ordinato non può essere spiegato facendo riferimento a forme di controllo esterne al sistema o presenti in esso in forma centralizzata; non abbiamo altra possibilità che vederlo come un risultato del comportamento locale dei singoli elementi.

Facciamo un esempio classico e molto semplice: le celle di Bénard. Prendiamo una quantità d'acqua a temperatura ambiente: essa sarà un sistema disordinato (non si tratta di un gas ideale e il movimento di ogni particella sarà moderatamente vincolato dal movimento delle particelle vicine, ma in maniera così poco rilevante per i nostri interessi che possiamo permetterci di parlare di movimento casuale). Scaldiamo l'acqua dal basso, mantenendo la superficie superiore a temperatura ambiente: il liquido in basso, riscaldato, risulterà di peso specifico minore di quello in alto e tenderà di salire, mentre il liquido in alto, più pesante, tenderà a muoversi verso il basso. Al raggiungimento di una temperatura

critica, il movimento dell'acqua si organizzerà nelle celle di Bénard, cioè in una serie di flussi ciclici paralleli che vincolano il movimento dell'acqua nel sistema.

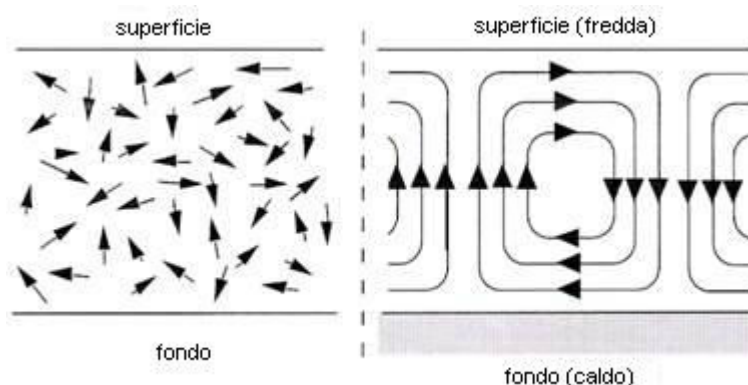


Figura 1: movimento casuale delle molecole di un liquido (sinistra) e movimento organizzato nelle celle di Bénard (destra)

Il fenomeno di Bénard è un esempio di sistema auto-organizzato: in risposta ad una particolare condizione ambientale le dinamiche degli elementi del sistema si coordinano spontaneamente in una forma organizzata e stabile, finché le condizioni ambientali non mutano in maniera rilevante. Si tratta quindi di un sistema aperto che, in risposta a certe condizioni ambientali, passa autonomamente da uno stato disordinato ad uno organizzato e lo mantiene finché le condizioni ambientali lo permettono.

Nonostante l'approccio sistemico sia fortemente olistico, un approccio modulare all'analisi del sistema non gli è comunque estraneo, e quando è possibile l'oggetto di studio viene strutturato in una gerarchia organizzativa: ambiente, sistemi e sottosistemi. Questa gerarchia risulta però ben più complessa che nell'approccio analitico. Il problema non è tanto nell'identificare le componenti del sistema, che possono essere individuate tramite metodi sperimentali;⁹ il problema reale è capire se il comportamento di tali componenti possa essere studiato indipendentemente dal resto del sistema.

Affinché il sistema sia distinguibile dal suo ambiente, o che una porzione di un sistema sia definibile come sottosistema, è necessario che il grado di

interdipendenza fra le sue componenti risulti considerevolmente più elevato del grado di interazione con l'esterno. Un sistema deve essere quindi chiaramente distinto dal suo ambiente, ma al contempo aperto a certi tipi di interazioni con l'esterno legate alla propria gestione energetica (l'interazione del sistema con l'esterno deve essere *selettiva*, come ad esempio la permeabilità di una membrana cellulare). Un buon discriminante per la demarcazione di un sistema organizzato, per quanto sempre con un alto grado di arbitrarietà nella sua applicazione, è la sua stabilità in relazione ai mutamenti esterni, definita come 'chiusura organizzativa': un sistema è chiuso organizzativamente rispetto al proprio ambiente se al suo interno è completamente definita una struttura fondata su feed-back negativi che rende il comportamento del sistema relativamente stabile in rapporto alle dinamiche ambientali. Un sistema dissipativo deve quindi per definizione essere termodinamicamente aperto, ma organizzativamente chiuso verso l'esterno.

Un'importante nozione legata allo studio dei sistemi organizzati è quella di 'emergenza': una proprietà è emergente se non è deducibile dalle proprietà delle singole parti, ma è il risultato del comportamento del sistema nella sua totalità, cioè dalla natura delle parti e dal particolare modo in cui interagiscono.

Una proprietà F di un sistema S , costituito dalle componenti C_1, \dots, C_n in una certa relazione R fra di loro, è emergente se e solo se (a) vi è una legge che abbia per effetto che tutti i sistemi con quella stessa struttura soddisfino F , e se (b) nonostante ciò, a partire dalle leggi generali della scienza naturale, che si applicano a tutti i tipi di oggetti e non solo ad oggetti come C_1, \dots, C_n in una certa relazione R fra di loro, non è possibile provare che sistemi che abbiano la stessa struttura di S abbiano tutte le caratteristiche (o esibiscano esattamente quel comportamento) che sono proprie della proprietà F .¹⁰

Anche la nozione di proprietà emergente è quindi legata al livello organizzativo del sistema, visto che si tratta di proprietà che non dipendono solo dalle componenti del sistema, ma soprattutto da come queste sono organizzate.

Tre aspetti sono fondamentali per la nozione di emergenza:

- 'Sopravvenienza': la proprietà emergente non esiste più se il livello inferiore viene rimosso (non c'è divisione "mistica" fra i due livelli); in particolare una proprietà A sopravviene su un insieme di proprietà B se e solo se non è possibile che due oggetti identici in relazione all'insieme delle proprietà B differiscano per la proprietà A. Il fatto che l'oggetto soddisfi l'insieme di proprietà B implica che l'oggetto soddisfi anche la proprietà A, ed non è possibile una variazione relativa alla proprietà A se non vi è una corrispondente variazione nell'insieme di proprietà B.¹¹
- Le strutture emergenti non sono aggregati, cioè non sono risultati prevedibili dalla "somma" delle proprietà delle parti.
- Le proprietà emergenti possono avere effetti causali sulle proprietà di livello più basso ('causalità verso il basso').¹²

La nozione di emergenza si pone quindi come "avversario diretto" della nozione di riduzione, sottolineando come nei sistemi complessi vi siano alcune proprietà la cui natura non sia esaminabile tramite un approccio rigidamente analitico, riducendole a proprietà delle parti componenti del sistema.

Questa breve presentazione delle caratteristiche più distintive dei sistemi complessi e dell'impostazione sistemica ha voluto mettere in rilievo come in questo ambito divenga fondamentale lo studio della maniera in cui le varie componenti del sistema interagiscono fra di loro e, nel caso dei sistemi auto-organizzanti, anche di come queste interazioni evolvano nel tempo. Questa linea di ricerca si contrappone alla classica impostazione analitica, e, di conseguenza, lo studio della complessità porta con sé un forte cambiamento nell'approccio metodologico e in alcuni concetti ad esso correlati, come quello di riduzione.

Questi cambiamenti, oltretutto, hanno un carattere fortemente interdisciplinare, visto che i sistemi complessi sono oggetto di studio in molti ambiti.

II. Gli strumenti formali per lo studio dei sistemi complessi

Andiamo ora a vedere alcuni degli strumenti che più tipicamente vengono usati per l'analisi dei sistemi complessi.

Come già accennato, si è soliti formalizzare l'organizzazione di un sistema per mezzo di un insieme di variabili mutuamente dipendenti.

Lo stato di un sistema viene quindi definito dal valore di una serie di variabili, che si muovono all'interno di un intervallo finito o infinito, discreto o continuo, e che inizialmente assumiamo possano variare indipendentemente l'una dall'altra. Quindi, scelte le variabili rilevanti e specificata la loro natura, lo stato s di un sistema a n variabili viene definito da una stringa di valori $\langle v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$. Col termine 'spazio degli stati' si intende l'insieme di tutte le possibili configurazioni del sistema $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ con le relative transizioni di stato, e possiamo darne una rappresentazione geometrica attribuendo ad ogni variabile del sistema una dimensione. Lo spazio degli stati è uno strumento tipico della fisica¹³ e utile soprattutto per lo studio dell'evoluzione dei sistemi dinamici.¹⁴

Prendiamo ad esempio il caso di un gas ideale: il sistema è composto da N particelle (in genere parliamo di cifre dell'ordine del numero di Avogadro, 10^{23}) e lo stato di ogni particella è definito da 6 variabili (3 per la posizione della particella nello spazio e 3 per il suo momento); in linea di principio il comportamento del sistema potrebbe essere quindi descritto in uno spazio di stati a $6N$ dimensioni.

Nella maggior parte dei casi lo spazio degli stati rimane un'astrazione teorica inutilizzabile nella pratica sperimentale: la maggior parte dei sistemi complessi in natura hanno, come nel caso precedente, un numero di variabili intrattabile, il cui valore è solitamente anche impossibile da determinare tramite osservazione.

I processi di auto-organizzazione vengono formalizzati nello spazio degli stati attraverso la teoria degli 'attrattori'. I processi dinamici di un sistema si traducono in una traiettoria all'interno dello spazio degli stati, in cui ogni punto corrisponde

allo stato del sistema in un dato momento. Per attrattore si definisce un sottoinsieme dello spazio degli stati tale che la traiettoria del sistema tende a entrare al suo interno ed a rimanervi, anche partendo da stati iniziali che differiscono fra loro in maniera rilevante. Esistono molte forme di attrattore: i più semplici sono quello puntuale (il sistema raggiunge uno stato di equilibrio) e quello ciclico (il sistema rimane "intrappolato" in un comportamento periodico, di cui un esempio sono le celle di Bénard viste sopra). Esistono comunque vari altri tipi di attrattori: cicli antilimite, attrattori toroidali, fino agli attrattori dei sistemi caotici,¹⁵ caratterizzati da una dimensione non intera, frattale.

Ad ogni attrattore è legato un 'bacino di attrazione'; questo è un sottoinsieme dello spazio degli stati che circonda un attrattore e i cui elementi corrispondono a tutti gli stati del sistema che evolvono necessariamente in tale attrattore.

Quindi, mentre nei sistemi chiusi una variazione nelle condizioni iniziali porta ad una variazione nelle condizioni finali, nei sistemi aperti è invece possibile che uno stesso stato finale sia raggiungibile a partire da diverse condizioni iniziali. Lo studio degli attrattori ha così introdotto in fisica due concetti inaspettati e strettamente legati fra di loro: l' 'equifinalità' (più stati possono tendere verso uno stesso comportamento) e l' 'irreversibilità' (se il comportamento di un sistema si trova all'interno dell'attrattore non è possibile ricostruire la storia passata del sistema).

Gli studi dei sistemi caotici¹⁶ e dei sistemi auto-organizzanti si centra fondamentalmente sulla ricostruzione dell'attrattore all'interno spazio degli stati in base ai dati e sulla formalizzazione delle sue caratteristiche attraverso equazioni differenziali.

Le equazioni differenziali sono lo strumento matematico principale per lo studio dei sistemi complessi. La forma più generale di questo tipo di equazioni è

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0$$

in cui x è la variabile di ingresso del sistema (nei sistemi che stiamo trattando corrisponderà alla stringa di variabili che definisce un punto nello spazio degli

stati), mentre y è la funzione, ignota, che definisce il comportamento del sistema, cioè che associa lo stato x del sistema al tempo t con lo stato x' del sistema al tempo $t+1$. La funzione F mette in relazione x con la funzione y e le sue derivate di ordine da 1 a n , tutte trattate come variabili indipendenti. La funzione y , che definisce il comportamento del sistema, non è quindi una funzione fissa, ma varia la sua natura in relazione allo stato del sistema, definito da x .

Un'altra tipologia di strumento per lo studio della complessità è rappresentata da insiemi di unità a stati discreti interconnesse: reti neurali, reti booleane e automi cellulari. In tutti e tre i casi si tratta di unità a stati discreti (attivo (1) o inattivo (0)) a n ingressi ed una uscita, in cui ad ogni istante ogni unità aggiorna il proprio stato in base agli input ricevuti all'istante precedente. Queste reti manifestano spesso un comportamento auto-organizzante, poiché, data una configurazione iniziale, il sistema tende a "congelarsi" in una particolare configurazione di attivazione dei nodi (attrattore puntuale) o ad attraversare periodicamente cicli più o meno brevi di attivazione (attrattore ciclico). Il loro comportamento dipende in massima parte dallo stato di attivazione iniziale della rete e dalle sue caratteristiche topologiche (l'organizzazione della rete, cioè la mappa delle interconnessioni fra i vari nodi). Le reti neurali¹⁷ sono usate principalmente nelle neuroscienze e le loro capacità auto-organizzanti vengono usate principalmente per studi sulla memorizzazione e il riconoscimento degli input percettivi. Le reti booleane (fondamentalmente una versione semplificata delle reti neurali)¹⁸ e gli automi cellulari¹⁹ sono stati usati principalmente in biologia, praticamente a tutti i livelli, a partire dall'analisi dell'attività cellulare in biologia molecolare fino allo studio degli ecosistemi.

Fra le metodologie per descrivere i sistemi complessi, non è infine da sottovalutare l'importanza dell'uso di raffigurazioni grafiche finalizzate alla descrizione delle interazioni fra le parti del sistema. La maggior parte dei testi di biologia o di fisica propongono alcune immagini che descrivono graficamente la struttura dei processi descritti. Finché l'organizzazione dei processi del sistema osservato è di tipo sequenziale, o comunque poco complessa, il cuore della spiegazione resta nel testo e l'immagine ha una funzione esplicativa secondaria,

semplicemente per rendere più immediata la comprensione della struttura. Se la topologia delle componenti del sistema, però, diviene assai complessa, l'immagine diviene parte integrante ed ineliminabile della spiegazione, poiché diviene assai difficoltoso affidarsi solo ad una descrizione verbale. A titolo esemplificativo mostriamo un'immagine che descrive l'organizzazione del processo di fermentazione dell'acido lattico, ma aprendo un qualunque testo di biologia molecolare potremo trovare molte figure che descrivono sistemi di reazioni chimiche altrettanto o più complessi.

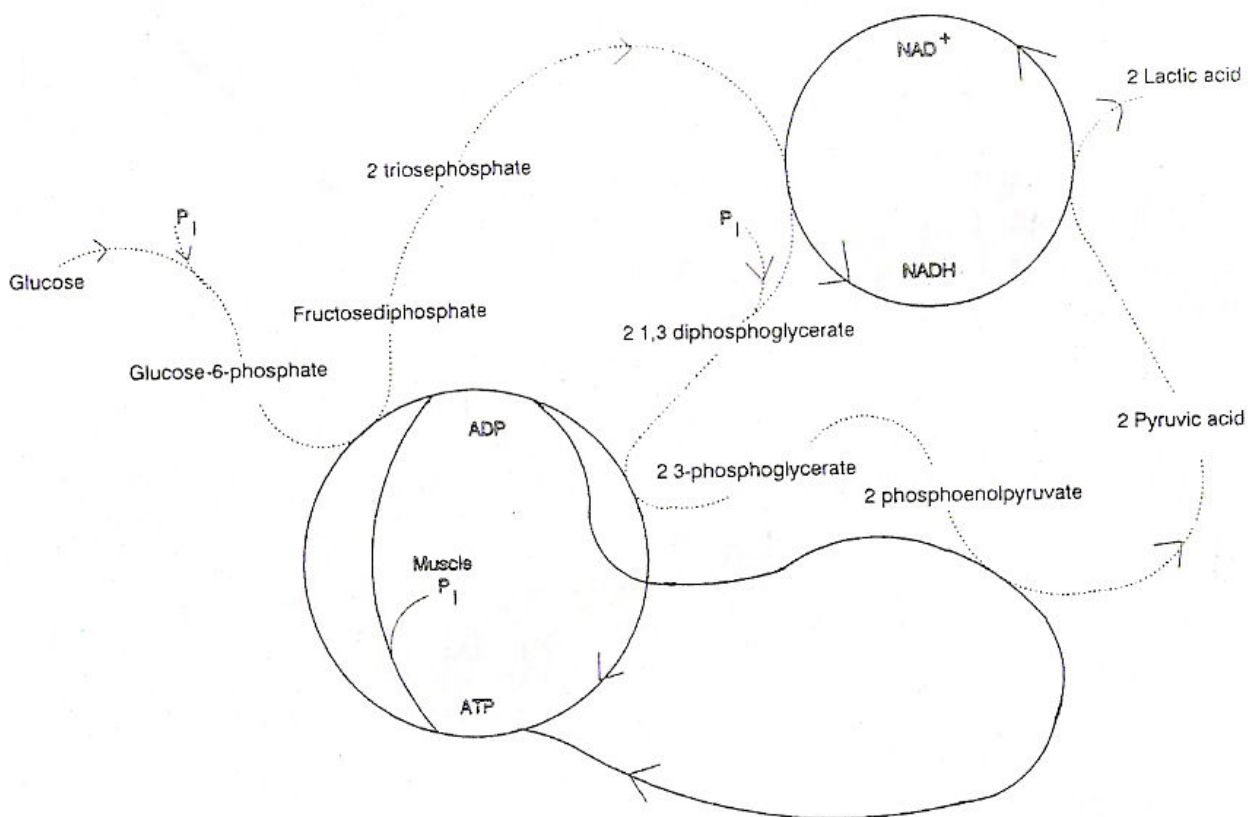


Figura 2: rappresentazione del processo di fermentazione dell'acido lattico (da W. Bechtel, R. C. Richardson, *Emergent Phenomena and Complex Systems*, p.273)

III. I problemi per la spiegazione di tipo causale e la spiegazione teoretica

Per quanto riguarda il tema della spiegazione, la filosofia della scienza “classica” ha il suo punto di riferimento nel modello nomologico-deduttivo di Hempel e Oppenheim. Esso si basa su una struttura logica di tipo deduttivo che pone come premesse dell’inferenza delle espressioni generali che abbiano almeno una validità locale (leggi) e le condizioni iniziali o al contorno; da queste premesse deriveremo il fenomeno che vogliamo spiegare.

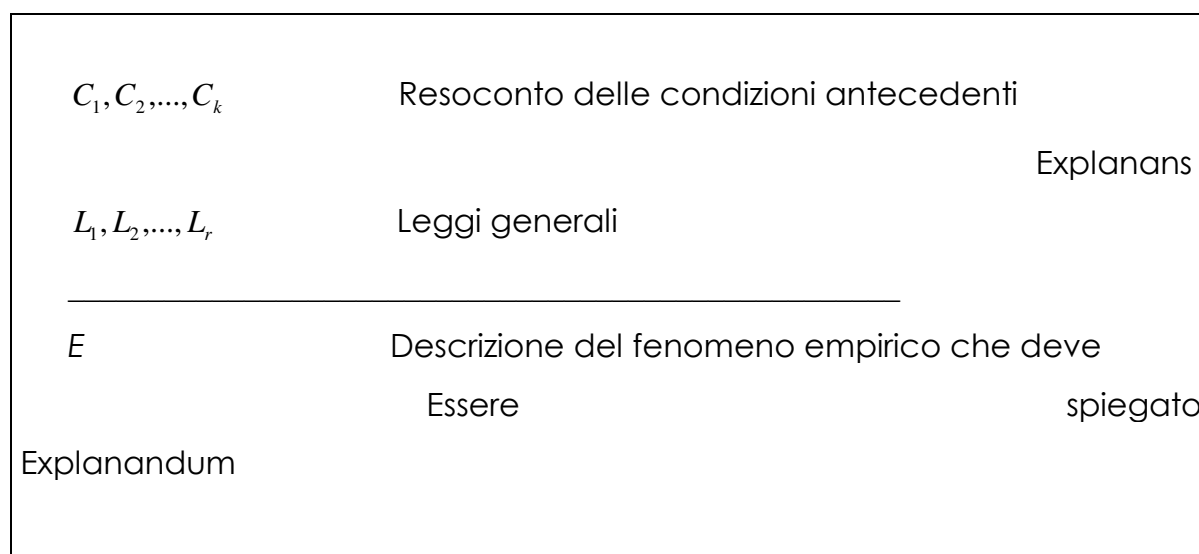


Figura 3: struttura logica della spiegazione nomologico-deduttiva

Negli anni è stato ripetutamente evidenziato come questo modello non fornisca una caratterizzazione soddisfacente della spiegazione scientifica, e la struttura di molti tipi di spiegazione che la scienza produce e accetta si discosta sensibilmente dallo schema di Hempel e Oppenheim; ciononostante tale schema rimane un punto di riferimento da cui partire per caratterizzare una particolare tipologia di spiegazione, evidenziando come questa si discosti da esso e per quali motivi.

L'impianto nomologico-deduttivo ha manifestato molti problemi proprio nella caratterizzazione delle spiegazioni di tipo causale, ma, se ci affidiamo ad un nozione di causalità di tipo ‘regolarista’, che cioè indica come una proprietà essenziale della nozione di causa la regolarità della connessione (considerando

quindi le singole connessioni causali come istanze di leggi causali che regolano il nostro mondo), la struttura nomologica-deduttiva della spiegazione si presenta come una possibile condizione necessaria, ma non sufficiente, per la caratterizzazione di tali spiegazioni: spiegare un fenomeno significa inserirlo all'interno di una sequenza temporale di eventi che, "coperti" dalle regolarità espresse da leggi di tipo causale, sono legati logicamente fra di loro.

Anche se ci affidiamo ad un approccio 'singolarista', che non lega la nozione di causa a generalizzazioni legiformi, prima di tutto resta il fatto che i processi causali vengono spiegati per mezzo di sequenze lineari di eventi, singole catene causali, ed inoltre non possiamo comunque negare che nella maggior parte dei casi il fine dello scienziato non sia l'identificazione di singole 'storie' causali, ma la ricerca delle regolarità, delle generalizzazioni legiformi che stanno dietro tali storie.

I risultati che otteniamo nell'analisi dei sistemi complessi mal si adattano, però, all'identificazione di regolarità causali. La difficoltà di trattare il comportamento dei sistemi complessi all'interno di una cornice causale viene già messa in rilievo da von Bertalanffy, che sottolinea come una delle differenze fondamentali fra l'approccio sistemico e il tradizionale approccio analitico della fisica classica sia l'impossibilità del primo di fornire modelli caratterizzati da singole catene causali isolate.

L'unico scopo della scienza risultava essere di tipo analitico, e cioè tale da consistere nella suddivisione della realtà in unità sempre più piccole e nell'isolamento di singoli treni causali. In tal modo la realtà fisica veniva frantumata in masse puntiformi e in atomi, l'organismo vivente in cellule, il comportamento in riflessi, la percezione in sensazioni puntuali, ecc. Corrispondentemente, la causalità era, in sostanza, a senso unico: un certo sole attrae un certo pianeta nell'ambito della meccanica newtoniana, un certo gene nell'ovulo fertilizzato produce questa o quella malattia, gli elementi mentali sono allineati, come i grani in una collana di perle, mediante le leggi di associazione. [...]

Possiamo affermare, come caratteristico della scienza moderna, che questo schema in termini di unità isolabili si è rivelato insufficiente.²⁰

Perché il modello analitico con treni causali isolati si rivela insufficiente per i sistemi complessi? Abbiamo detto che un sistema complesso è tale in quanto i comportamenti delle varie parti si vincolano tra di loro in maniera tale da non poter analizzare il comportamento di una parte senza considerare il tipo di interazione che essa intrattiene con le altre. Al livello dell'organizzazione del sistema questo si traduce generalmente in complesse sequenze di processi, altamente ramificate e solitamente con molti processi di retroazione.²¹ Uno schema come quello della **fig. 2** è esemplificativo della non isolabilità di sequenze lineari di processi all'interno di un sistema complesso. Ciò si traduce in una chiara difficoltà nell'identificare il ruolo causale che il comportamento di una parte ha in relazione al comportamento di un'altra.²²

[...] vi possono essere feedback significanti da stadi "successivi" a stadi "precedenti". In quest'ultimo caso non è più chiaro cosa è funzionalmente dipendente. L'*interazione* fra i componenti diviene critica. Meccanismi di quest'ultimo tipo sono *sistemi complessi*, o addirittura *sistemi integrati*. In tali casi, tentare di comprendere il comportamento dell'intera macchina seguendo semplicemente le attività in ogni componente risulterà inutile.²³

Lo stesso problema, come ha messo in rilievo Wagner²⁴, può essere evidenziato anche analizzando la formalizzazione matematica che viene più usata nell'analisi dei sistemi complessi, praticamente in ogni disciplina, cioè le equazioni differenziali.

Il modello matematico di un sistema fornisce relazioni funzionali fra le variabili di stato, associando cioè uno stato del sistema (cioè una sequenza di valori di variabili) al tempo t ad un altro stato al tempo $t+\Delta t$. Ogni variazione nel valore di una variabile nello stato iniziale viene considerata una causa, mentre l'effetto corrisponde al valore delle variabili negli istanti seguenti. La configurazione completa dello stato iniziale verrà considerata quindi la causa dell'evoluzione seguente del sistema, ma, come detto sopra, l'interesse dello scienziato non è quello di identificare cause 'singolari', ma cause 'regolari', cioè generalizzazioni sulle istanze causa-effetto.

Al fine di ottenere tali generalizzazioni lo scienziato agisce sperimentalmente per poter valutare quanto il valore di ogni variabile pesi nell'evoluzione del sistema: la tecnica di base consiste nell'eseguire esperimenti in cui lo stato iniziale del sistema presenti valori differenti per quanto riguarda una variabile, mantenendo costanti i valori delle altre variabili (che vengono quindi considerati come condizioni di contorno). Alla variabile presa in considerazione verrà attribuito un ruolo causale nella determinazione del comportamento del sistema proporzionale al peso che la sua variazione ha avuto nell'evoluzione del sistema.

Nel caso di sistemi il cui comportamento viene descritto da equazioni differenziali questo procedimento non porta però a niente: per la stessa natura di tali equazioni la funzione che descrive il comportamento del sistema non è definita, ma varia ad ogni istante a seconda dello stato del sistema, cioè del valore di ogni variabile. Il peso che una variabile ha nelle dinamiche del sistema muta quindi ad ogni istante a seconda del valore delle altre variabili: in questo tipo di formalizzazione la distinzione fra condizioni di contorno ed evento causante collassa.

Uno stesso tipo di osservazione sembrerebbe argomentabile anche per quanto riguarda le reti neurali. Le reti neurali si stanno dimostrando sempre più potenti ed efficaci, ma il loro punto debole è che la conoscenza immagazzinata in esse non ha forma esplicita e non è controllabile. Negli ultimi anni molti tentativi sono stati fatti per elaborare metodi di 'estrazione di regole' da reti neurali, cioè per descrivere il comportamento di una rete neurale per mezzo di un insieme di regole di produzione di tipo $A \rightarrow B$, cioè "un input di tipo A causa una risposta della rete di tipo B". Queste ricerche si sono dimostrate poco efficaci, limitandosi soltanto a produrre generalizzazioni approssimative e poco soddisfacenti sulle istanze input-output delle reti.²⁵

Lo studio dei sistemi complessi si trova di fronte a due principali limiti per poter fornire spiegazioni di tipo causale: un alto numero di variabili (impossibili da misurare o comunque non trattabili dal punto di vista computazionale) e l'importanza assunta dal livello organizzativo del sistema. Entrambe queste

caratteristiche sono legate all'impossibilità di affrontare lo studio di questi sistemi con un approccio analitico, modularizzando il sistema in più parti analizzabili separatamente.

Nell'approccio scientifico tradizionale, nel caso di sistemi non modularizzabili, un alto numero di variabili può essere gestito tramite un approccio statistico, come nel caso dello studio di una mole di gas ideale in termodinamica: in questo caso le misurazioni vengono fatte su proprietà come temperatura e pressione, i cui valori vengono interpretati come macro-stati del sistema, ognuno dei quali corrisponde ad un insieme di micro-stati.

Un approccio di tipo statistico, astraendo dalle particolari proprietà di ogni componente del sistema, è applicabile in sistemi disordinati come i gas ideali, in cui il comportamento di un componente non influisce su quello degli altri. Non è invece applicabile nel caso dei sistemi complessi. Nelle dinamiche di un sistema complesso il particolare conta: nell'analisi di molti sistemi tralasciare anche una singola interazione fra le componenti può significare distorcere completamente il tipo di comportamento che questi manifestano.

La gestione delle variabili nell'analisi di un sistema complesso risulta difficoltosa da vari punti di vista: prima di tutto, per le stesse argomentazioni presentate poco sopra per la nozione di causa, identificare quali variabili siano rilevanti per lo studio del sistema può essere molto problematico, poiché non è chiaro quale sia il loro peso nell'evoluzione del sistema; spesso, inoltre, la misurazione di queste variabili può risultare impossibile con i mezzi odierni; infine il numero di variabili e di loro possibili valori può risultare in uno spazio degli stati computazionalmente intrattabile.

Per quanto riguarda invece la dimensione organizzativa, essa è stata sempre considerata dalla fisica classica come una condizione al contorno, un tipo di dato da porre fra le premesse particolari alla spiegazione (all'interno dell'insieme di premesse C_1, C_2, \dots, C_k nella spiegazione nomologico-deduttiva, v. **Fig. 3**) e che non doveva essere trattato all'interno della dimensione nomologica. Questo, come fa notare Küppers²⁶, perchè nei sistemi semplici della fisica classica, tipicamente di natura disordinata, la dimensione organizzativa non è rilevante ed i valori delle

variabili non sono fra loro vincolati, e sono trattati come “contingenti”. Poiché con i sistemi complessi l'interazione fra le componenti, e quindi i vincoli fra le variabili, divengono essenziali alla comprensione del sistema, essi escono dalla dimensione della contingenza, inserendosi all'interno dell'explanandum e pretendendo quindi un trattamento a livello nomologico. Questa è un'esigenza che si fa sentire con forza maggiore nello studio dei sistemi dissipativi (in particolare quelli auto-organizzanti e caotici), nei quali la questione centrale è proprio come il sistema riesca a sviluppare e mantenere l'organizzazione interna che ne determina il comportamento.

I sistemi complessi possono essere definiti come sistemi che dipendono molto sensibilmente dalle condizioni al contorno. [...] Le condizioni al contorno di semplici sistemi fisici, come la posizione ed il momento di una particella in un particolare istante, sono quantità contingenti. In questo contesto “contingente” significa che le condizioni al contorno possono essere scelte arbitrariamente. Sono quelle quantità a margine che in un esperimento possono essere scelte liberamente ed i cui valori sono vincolati solo dall'estensione della validità delle leggi naturali in questione.

Le condizioni al contorno di sistemi complessi, d'altro canto, sono quantità non contingenti, visto che ogni alterazione significativa in tali condizioni al contorno modificherebbe significativamente anche le dinamiche del sistema, e quindi le sue proprietà. [...]

Ora [...] le condizioni al contorno di fenomeni complessi non vengono più considerate come quantità contingenti, ma come non-contingenti, tali che necessitano anch'esse di essere spiegate; esse si spostano quindi al centro della spiegazione.

[...] La contingenza dei processi naturali, precedentemente fondata saldamente sulla contingenza delle condizioni al contorno di un fenomeno naturale, ora diviene essa stessa l'oggetto della spiegazione scientifica.²⁷

Affrontando la complessità i fisici hanno fin dall'inizio sperato di trovare leggi che regolassero le dinamiche dei sistemi dissipativi o che, addirittura, potessero spiegare ogni transizione di fase;²⁸ la sinergetica, ad esempio, è una disciplina nata con lo scopo di spiegare proprio questo tipo di fenomeni.²⁹ Per ora le speranze sono state vane e le aspettative vanno sempre più diminuendo. Finora sui sistemi dissipativi sono state possibili solo generalizzazioni di tipo molto locale in base alla natura degli attrattori.

La mancanza di leggi forti riguardanti il livello organizzativo risulta sicuramente un forte handicap per poter spiegare il comportamento dei sistemi complessi. Si tratta comunque di una mancanza che niente impedisce di pensare come risolvibile in futuro; non si può dire altrettanto per quanto riguarda la trattabilità delle variabili rilevanti allo studio del sistema.

Abbiamo quindi visto come i sistemi complessi non si prestino ad essere trattati con spiegazioni di tipo causale. Si pone quindi il problema di capire di che tipo siano le spiegazioni che ci vengono fornite riguardo le dinamiche di questo tipo di sistemi.

Kitcher si è posto il problema se in certi casi siano utili tipi di spiegazione diversi da quello di tipo causale. Citiamo qui un suo passo, un po' lungo, ma molto utile alla nostra discussione.

[...] Ciononostante, anche quando sono disponibili storie causali, esse potrebbero non essere ciò che la spiegazione richiede. Due esempi illustreranno la morale.

D. Esiste uno scherzo in cui una persona "annoda" un cavo telefonico attorno ad un paio di forbici. In realtà non viene creato nessun reale nodo, e le forbici possono essere rimosse facilmente (ed il cavo riportato alla sua configurazione normale) se all'inizio la vittima compie una mossa particolare e non ovvia. Quelli che non compiono la giusta mossa iniziale possono impegnarsi per ore senza arrivare a niente. Cosa spiega il loro fallimento? In ognuno di questi casi potremmo senza dubbio fornire i dettagli causali, mostrando come le azioni eseguite abbiano condotto a configurazioni ancora più ingarbugliate. Tutto ciò, però, ometterebbe ciò che dovrebbe stare al centro della spiegazione, e cioè il fatto che le caratteristiche topologiche della situazione permettono solo quelle soluzioni che soddisfano una specifica condizione, in modo tale che le sequenze di azioni che non soddisfano tale condizione sono condannate al fallimento. Abbiamo bisogno di conoscere la struttura topologica che sta dietro le vicissitudini del particolare tentativo e del particolare fallimento.

E. Supponiamo di scoprire che, in una particolare città e su un periodo di cento anni, il rapporto fra i due sessi alla nascita, calcolato su tutti gli ospedali, risulta molto vicino ad 1,04 su 1, con i maschi in lieve maggioranza. Vi è una storia completamente causale che sottostà a tale fatto: essa chiama in causa un enorme numero di dettagli relativi alla produzione di sperma ed uova, circostanze di accoppiamento, eventi intra-uterini e così via. Ciononostante, nello spiegare il rapporto fra i sessi, noi non vogliamo alcune di queste informazioni; al contrario, è sufficiente mostrare che vi sono pressioni selettive sugli individui di Homo Sapiens che danno come risultato il raggiungimento approssimativo di un rapporto

fra i sessi 1:1 in età riproduttiva, e che una maggiore mortalità maschile fra la nascita e la riproduzione necessita di un rapporto fra i sessi alla nascita di 1,04 ad 1. Ottenere un rapporto fra i sessi 1:1 in età riproduttiva è un equilibrio evolutivo per specie come la nostra, e noi spieghiamo i dati demografici da un'ampia popolazione locale mostrando come questi approssimano l'equilibrio evolutivo.

In entrambi i casi, l'approccio causale sembra sbagliare, ignorando il fatto che il particolare fenomeno che deve essere spiegato è un esempio appartenente ad una classe, tale che tutti i suoi membri esemplificano una regolarità generale.

[...] Negli esempi D ed E, l'identificazione della regolarità è un ingrediente della spiegazione. [...]

Il risultato negativo di questi esempi è che la caratterizzazione della singola spiegazione necessita di essere corretta in modo da permettere che per le spiegazioni non sia necessario, e delle volte nemmeno auspicabile, fornire informazioni riguardo la storia causale di una particolare occorrenza. Il risultato positivo riguarda il fatto che le spiegazioni singole vengono penetrate da spiegazioni teoriche. Saremmo tentati di credere che le spiegazioni di singole proposizioni potrebbero essere studiate autonomamente senza preoccuparsi della dimensione teorica della spiegazione. Esempi D ed E intendono mostrare che questa è un'illusione.³⁰

Kitcher qui non si occupa del problema della spiegazione in relazione ai sistemi complessi, ma gli esempi che propone sono particolarmente significativi per il nostro problema.

L'esempio D, relativo allo scherzo del nodo, indica come una descrizione delle caratteristiche topologiche del nodo vada a spiegare la ragione dei fallimenti delle vittime in maniera molto migliore di una complessa descrizione di tutti i movimenti che questi hanno compiuto. L'esempio E prende invece in considerazione la questione del rapporto fra i sessi, che risulta pari a 1:1 nelle popolazioni di molti animali: una spiegazione di tipo causale sarebbe, oltre che inaffrontabile, poco chiarificatrice. Il rapporto 1:1 fra i sessi è stato invece spiegato nel 1931 da Fischer attraverso il riferimento a pressioni selettive.

Kitcher considera queste due spiegazioni come esempi di spiegazioni 'teoriche', cioè di spiegazioni che non inseriscono il fenomeno studiato all'interno di una catena causale, ma si limitano a dire che esso appartiene ad una certa classe di fenomeni, i quali manifestano certe regolarità. Per dirla in maniera semplice con le parole di Richardson:

[...] i dettagli delle spiegazioni causali non sono necessari alla spiegazione del risultato. L'adeguatezza di una spiegazione dipende interamente sul fatto che essa catturi o no gli schemi del cambiamento, e come un'istanza specifica sia inseribile all'interno di questi schemi più astratti.³¹

L'esempio D è analogo al problema della spiegazione nei sistemi complessi statici, come quello descritto nella **fig. 2**: fondamentale per la comprensione del fenomeno è la descrizione del livello organizzativo del sistema, della sua conformazione interna; ciò è sufficiente per comprendere le caratteristiche generali del comportamento del sistema.

L'esempio E richiama invece le spiegazioni fornite in fisica per il comportamento dei sistemi dissipativi: il riferimento al rapporto 1:1 come allo stato stabile verso cui il sistema si muove e a cui ritorna in caso di perturbazioni è analogo al ruolo degli attrattori nella spiegazione del comportamento dei sistemi dissipativi, nonostante nel loro caso non ci siano pressioni esterne come la selezione a spiegare l'esistenza di questo stato stabile.³²

Per i sistemi complessi l'unico tipo di spiegazione che riusciamo a fornire sembrerebbe quindi quella di tipo teorico, la cui funzione è quella di indicare certe caratteristiche e regolarità del comportamento di un sistema.

IV. La dimensione teleologica nei sistemi complessi

Abbiamo visto come sia difficoltoso spiegare i sistemi complessi all'interno del modello causale della spiegazione e che le spiegazioni che riusciamo a fornire siano di carattere teorico. È importante vedere anche quanto la dimensione teleologica pesi all'interno di queste spiegazioni.

Una dimensione finalistica nel comportamento dei sistemi complessi è sicuramente presente, come sottolinea con forza von Bertalanffy.³³ Il riferimento ad uno stato verso cui il sistema tende è presente nella descrizione dei sistemi dissipativi in genere, visto che il comportamento del sistema è finalizzato al mantenimento della propria struttura; ad esempio in biologia si usa

frequentemente la nozione di 'omeostasi' quando analizziamo il comportamento del sistema in base al suo tendere verso uno stato d'equilibrio stabile. Nei sistemi complessi della fisica la dimensione teleologica è forse ancora più forte, visto che l'analisi del comportamento del sistema è centrata totalmente sullo studio dell'attrattore.

La spiegazione teleologica ha sempre però comportato problemi, soprattutto per il fatto che l'introduzione della nozione di scopo nell'analisi del comportamento di un sistema fisico si presta all'accusa di applicare una dimensione antropomorfa all'interno delle spiegazioni scientifiche. Ciononostante la spiegazione teleologica, insieme a quella funzionale, è parte integrante di molte scienze "speciali", prima fra tutte la biologia. Per questo la filosofia della scienza ha lavorato per restituire dignità scientifica alle spiegazioni con caratteri finalistici e funzionali.

Questa "riabilitazione" è stata possibile solo accettando la spiegazione teleologica nel caso in cui sia riducibile ad una spiegazione di tipo causale.

Seguendo Salmon³⁴, la formulazione di riferimento per la spiegazione teleologica è quella fornita da Wright nel 1976. L'idea di base è quella che un certo comportamento sia analizzabile come finalizzato al raggiungimento di un certo scopo solo se è stato selezionato perché nel passato è stato causalmente efficace nel raggiungimento di tale scopo.

Quindi un sistema S manifesta il comportamento B al fine di ottenere G se e solo se:

- B porta all'ottenimento di G .
- B è presente perché nel passato aveva portato all'ottenimento di G .

Secondo l'analisi di Wright i comportamenti qualificabili come teleologici sono dunque quelli che vengono realizzati perché nel passato avevano manifestato la capacità di portare all'ottenimento di un preciso scopo. In questa tipologia rientrano quindi i comportamenti manifestati da sistemi intenzionali, quelli risultanti dall'opera della selezione naturale, quelli manifestati dai congegni a retroazione della cibernetica (per i quali la selezione del comportamento in base alla sua

efficacia per il raggiungimento di uno scopo viene effettuata dai progettisti) e, aggiungiamo noi, quelli manifestati dai sistemi dell'intelligenza artificiale in grado di mostrare delle forme di apprendimento.

La dimensione teleologica è quindi introducibile per quanto riguarda le spiegazioni dei sistemi complessi in biologia (a partire dal livello biochimico fino allo studio degli ecosistemi) e non ci dovrebbero essere problemi anche per quanto riguarda l'analisi dei sistemi in altre scienze speciali quali l'economia, la sociologia e l'antropologia, per le quali è presumibile poter spiegare la presenza di strutture con una certa funzione e comportamenti con un certo scopo sulla base di pressioni selettive o di selezioni di tipo intenzionale.

Questo per quanto riguarda le scienze "speciali"; i problemi si pongono per lo studio dei sistemi dinamici auto-organizzanti o dei sistemi caotici in fisica. Anche in questo caso la presenza di una dimensione teleologica nella spiegazione del loro comportamento è innegabile: in questi casi l'analisi del comportamento è totalmente basata sull'analisi dell'attrattore, cioè il comportamento stabile verso cui il sistema tende autonomamente.

Il problema è che il tendere del sistema verso l'attrattore non può assolutamente essere spiegato in base ad un processo selettivo: la presenza dell'attrattore è un dato di fatto, una proprietà di tipo fisico del sistema, estranea quindi a processi selettivi od intenzionali.

Il problema è quello che abbiamo evidenziato precedentemente: la mancanza di leggi in fisica riguardanti il livello organizzativo dei sistemi. In futuro è auspicabile che avremo una spiegazione della presenza degli attrattori sulla base di questo tipo di leggi. Per ora, però, questa spiegazione non c'è: non c'è per il comportamento auto-organizzante e per il comportamento caotico, come in generale non c'è per ogni tipo di passaggio di fase.

Una dimensione teleologica nelle spiegazioni dei sistemi complessi è quindi presente e in generale non dà problemi. L'unica anomalia è rappresentata dalle spiegazioni centrate sulla nozione di attrattore, che pongono il problema di sistemi che regolano il proprio comportamento in relazione al raggiungimento ed al

mantenimento di uno stato finale, senza che questo sia spiegabile sulla base della presenza di forze di tipo causale.

Giovanni Casini

Note

1. Il testo più classico per la presentazione dell'approccio sistemico è L. von Bertalanffy, *Teoria Generale dei Sistemi*, Mondadori, Milano 1983.
2. H. Haken, *L'approccio della sinergetica al problema dei sistemi complessi*, in *La sfida della complessità*, a cura di G. Bocchi, M. Ceruti, Feltrinelli, Milano 1985, p. 194.
3. Il punto di riferimento per la descrizione di questa metodologia di ricerca è universalmente considerato H. E. Simon, *The Science of Artificial*, The MIT Press, Cambridge 1969 (v. anche T. W. Zawidzki, *Competing Models of Stability in Complex, Evolving Systems: Kauffman vs. Simon*, «Biology and Philosophy», 13, 1998, pp. 541-554).
4. W. Bechtel, R. C. Richardson, *Emergent Phenomena and Complex Systems*, in *Emergence or reduction?*, ed. by A. Beckermann, J. Kim, Walter de Gruyter, New York 1992, p. 264-265.
5. Generalmente si ritiene che lo studio del livello organizzativo diviene necessario quando la natura delle interazioni fra le componenti è di tipo non-lineare. "[...] riteniamo che le proprietà vadano considerate emergenti quando la forma dell'organizzazione risulta non essere lineare, poichè quando è lineare generalmente possiamo predire prontamente come si comporterà l'intero sistema." Ivi, p. 266.
6. Ivi, p. 279.
7. Tali casi sono estremamente rari: fra i sistemi artificiali vi sono le reti neurali, in fisica potremmo indicare lo studio della dinamica dei flussi.
8. Ivi, p. 266.

9. “[...] gli scienziati spesso identificano le parti di un sistemi per mezzo di processi sperimentali che effettuano sul sistema. Ciò potrebbe richiedere l'uso di tecniche di visualizzazione, come il microscopio, o procedure sperimentali, come la centrifugazione. In entrambi i casi, [...] l'identificazione delle parti è in parte un risultato di tale esperienza procedurale.

L'identificazione delle parti è solo un'attività preliminare all'effettiva costruzione della spiegazione di come il sistema operi.” Ivi, p. 262.

10. A. Beckermann, *Reductive and Nonreductive Physicalism*, in *Emergence or reduction?*, ed. by A. Beckermann, J. Kim, Walter de Gruyter, New York 1992, p. 17.

11. “Un insieme A di proprietà sopravviene su un insieme B di proprietà se e solo se ogni coppia di oggetti indistinguibili in relazione alle proprietà di tipo B sono indistinguibili anche in relazione alle loro proprietà di tipo A; cioè, se ogni coppia di oggetti che differisce rispetto a qualche proprietà di tipo A differisce anche rispetto ad almeno una proprietà di tipo B.” Ivi, pp. 11-12.

12. Possiamo dire che ci troviamo di fronte a casi di 'causazione verso il basso' quando le caratteristiche organizzative interne al sistema impongono dei vincoli sul comportamento delle parti. Un esempio molto semplice è quello fornito da Küppers:

“Consideriamo due reagenti in equilibrio chimico. Nessuna delle molecole di tale sistema “sa” di trovarsi in un equilibrio chimico e che deve manifestare un certo comportamento dinamico, in modo da preservare tale equilibrio. Ciononostante, il sistema si mantiene stabilmente in uno stato di equilibrio. Difatti, a causare il comportamento regolare delle molecole è un qualche tipo di causazione verso il basso, o macrodeterminazione.” B. O. Küppers, *Understanding Complexity*, in *Emergence or reduction?*, ed. by A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim, Walter de Gruyter, New York 1992, p. 245.

13. Ciononostante la teoria dei sistemi auto-organizzanti e dei sistemi caotici sta raccogliendo moltissimo interesse in discipline come l'economia, la sociologia e la biologia (in particolare per il progetto dell'Artificial Life, v. S.

- A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, New York 1993, S. A. Kauffman, *Investigations*, Oxford University Press, New York 2000, C. Taylor, D. Jefferson, *Artificial Life as a Tool for Biological Inquiry*, in *Artificial Life: an overview*, ed. by C. G. Langton, MIT Press, Cambridge 1995, pp. 1-14), tutti campi in cui è presente da molto tempo, a livello qualitativo, una nozione di organizzazione spontanea.
14. In biologia molecolare viene spesso usato uno strumento formalmente analogo: lo *spazio delle sequenze*. Esso non viene usato per lo studio delle dinamiche di un sistema, ma per lo studio di possibili sequenze molecolari, ad esempio per prendere in considerazione tutte le possibili sequenze proteiche o di DNA di una data lunghezza n .
15. Un sistema è considerato caotico se, dati due stati di partenza arbitrariamente vicini, le traiettorie del sistema nello spazio degli stati divergono in maniera esponenziale. Il sistema è quindi estremamente sensibile alle condizioni iniziali. È da notare come il comportamento di un sistema caotico non sia predicibile in linea di principio, se non a breve termine: anche se avessimo delle equazioni corrette riguardo l'evoluzione del sistema, le misurazioni dello stato di partenza porterebbero necessariamente in sé un errore sufficiente a vanificare ogni predizione.
16. v. in particolare J. Koperski, *Models, confirmation, and Chaos*, «Philosophy of Science», 65, 1999, pp. 624-648.
17. Per una introduzione alle reti neurali v. I. Alexander, H. Morton, *An Introduction to Neural Computing*, Chapman & Hall, London 1990.
18. v. S. A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, New York 1993, pp. 188-191.
19. v. C. G. Langton (ed.), *Artificial Life: an overview*, MIT Press, Cambridge 1995, pp. 65-66.
20. L. von Bertalanffy, *Teoria Generale dei Sistemi*, Mondadori, Milano 1983, p. 83.

21. L'identificazione di molti processi a retroazione è una costante nell'analisi dei sistemi dissipativi, generalmente caratterizzati da un buon livello di stabilità in relazione alle variazioni ambientali. L'importanza di una nozione come quella di 'omeostasi' in biologia ne è un esempio.
22. A livello di sperimentazione l'identificazione del ruolo causale che una parte A del sistema ha su una parte B si traduce nella misurazione di quanto una variazione nel comportamento di A influisce sul comportamento di B. In biologia, ad esempio, questo procedimento viene spesso portato avanti con la lesione o la sovra-stimolazione di una certa parte dell'organismo per andare poi a vedere come ciò vada ad influire sul comportamento dell'intero organismo o di altre parti di esso. In fisica e chimica, invece, generalmente si tende a variare un certo valore all'interno del sistema (ad esempio l'intensità di una forza o la concentrazione di un certo reagente), mantenendo tutti gli altri valori inalterati (e identificandoli quindi come "condizioni di contorno"), per andare poi a vedere come tale variazione ha influito sullo stato del sistema. Fondamentalmente si tratta del metodo delle variazioni concomitanti descritto da J. S. Mill nel XIX secolo.
23. W. Bechtel, R. C. Richardson, *Discovering Complexity, Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*, Princeton University Press, Princeton 1993, p. 18.
24. A. Wagner, *Causality in Complex Systems*, «Biology and Philosophy», 14, 1999, pp. 83-101.
25. R. Andrews, J. Diederich, A. B. Tickle, *Survey and critique of techniques for extracting rules from trained artificial neural networks*, «Knowledge-based systems», 8, 1995, pp. 373-389.
26. B. O. Küppers, *op. cit.*
27. B. O. Küppers, *Ivi*, p. 251.
28. "Ecco un bel problema per i fisici teorici: dimostrare che, se si aumenta o si diminuisce la temperatura dell'acqua, ci saranno cambiamenti di fase che daranno vapore o ghiaccio. Un bel problema sì... ma troppo difficile per noi! Noi siamo troppo lontani dal poter fornire la dimostrazione richiesta. In

effetti non c'è un solo tipo di atomo o di molecola per cui si possa fornire la dimostrazione richiesta. In effetti non c'è un solo tipo di atomo o di molecola per cui si possa dimostrare che, a basse temperature, si verificherà la cristallizzazione. Questi sono problemi troppo difficili per noi." D. Ruelle, *Caso e Caos*, Bollati Boringhieri, Torino 1992, p. 136.

29. H. Haken, *op. cit.*, p. 251.

30. P. Kitcher, *Explanatory Unification and the Causal Structure of the World*, in *Scientific Explanation, Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. XIII, ed. by P. Kitcher, W. C. Salmon, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, pp. 426-427.

31. R. C. Richardson, *Complexity, Self-Organization and Selection*, «Biology and Philosophy», 16, 2001, p. 666.

32. L'esempio della spiegazione del rapporto 1:1 fra i sessi era stato anche precedentemente usato in Sober E. (1983), articolo in cui l'autore critica la pretesa che l'unica vera spiegazione scientifica sia quella di tipo causale ed offre la spiegazione elaborata da Fisher come un esempio di "spiegazione di equilibrio". La descrizione che dà di questo tipo di spiegazione rientra senza problemi nella categoria della spiegazione teorica proposta da Kitcher ("La spiegazione causale si focalizza esclusivamente sull'attuale traiettoria della popolazione; la spiegazione di equilibrio posiziona tale traiettoria attuale all'interno di una struttura più ampia. In tal maniera le spiegazioni di equilibrio possono risultare più esplicative delle spiegazioni causali, nonostante le prime forniscano meno informazioni riguardo le reali cause del fatto." E. Sober, *Equilibrium Explanation*, «Philosophical Studies», 43, 1983, p.207).

33. L. von Bertalanffy, *op. cit.*, pp. 124-130.

34. W. C. Salmon, *Four Decades of Scientific Explanation*, in *Scientific Explanation, Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. XIII, ed. by P. Kitcher, W. C. Salmon, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, pp. 111-116.

Bibliografia

- I. Alexander, H. Morton, *An Introduction to Neural Computing*, Chapman & Hall, London 1990
- R. Andrews, J. Diederich, A. B. Tickle, *Survey and critique of techniques for extracting rules from trained artificial neural networks*, «Knowledge-based systems», 8, 1995, pp.373-389
- W. Bechtel, R. C. Richardson, *Emergent Phenomena and Complex Systems*, in *Emergence or reduction?*, ed. by A. Beckermann, J. Kim, Walter de Gruyter, New York 1992, pp.257-288
- W. Bechtel, R. C. Richardson, *Discovering Complexity, Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*, Princeton University Press, Princeton 1993
- A. Beckermann, *Reductive and Nonreductive Physicalism*, in *Emergence or reduction?*, ed. by A. Beckermann, J. Kim, Walter de Gruyter, New York 1992, pp.1-21
- L. von Bertalanffy, *General System Theory*, G. Braziller , New York 1969 [trad. it.: L. von Bertalanffy, *Teoria Generale dei Sistemi*, Mondadori, Milano 1983]
- R. M. Burian, *Comments on Complexity and Experimentation in Biology*, «Philosophy of Science», 64 (Proceedings), 1997, pp. S279-S291
- H. Haken, *L'approccio della sinergetica al problema dei sistemi complessi*, in *La sfida della complessità*, a cura di G. Bocchi, M. Ceruti, Feltrinelli, Milano 1985, pp.194-206
- F. Heylighen, *The Science of Self-Organization and Adaptivity*, Encyclopedia of Life Support Systems, <http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/EOLSS-Self-Organiz.pdf> , 1999
- S. A. Kauffman, *The Origins of Order, Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, New York 1993
- S. A. Kauffman, *Investigations*, Oxford University Press, New York 2000
- P. Kitcher, *Explanatory Unification and the Causal Structure of the World*, in *Scientific Explanation, Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol.

- XIII*, ed. by P. Kitcher, W. C. Salmon, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, pp. 410-505
- J. Koperski, *Models, confirmation, and Chaos*, «Philosophy of Science», 65, 1999, pp. 624-648
 - B. O. Küppers, *Understanding Complexity*, in *Emergence or reduction?*, ed. by A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim, Walter de Gruyter, New York 1992, pp.241-256
 - C. G. Langton (ed.), *Artificial Life: an overview*, MIT Press, Cambridge 1995
 - C. Lucas, *The Self-Organizing Systems FAQ*, <http://www.carlesco.org/sos/sosfaq.htm>, 1997
 - C. Lucas, *Complexity Philosophy as a Computing Paradigm*, <http://www.carlesco.org/lucas/compute.htm>, 1999
 - I. Prigogine, *L'esplorazione della complessità*, , in *La sfida della complessità*, a cura di G. Bocchi, M. Ceruti, Feltrinelli, Milano 1985, pp.179-193
 - H. J. Reinberger, *Experimental Complexity in Biology: Some Epistemological and Historical Remarks*, «Philosophy of Science», 64 (Proceedings), 1997, pp. S245-S254
 - R. C. Richardson, *Natural and Artificial Complexity*, «Philosophy of Science», 64 (Proceedings), 1997, pp. S255-S267
 - R. C. Richardson, *Complexity, Self-Organization and Selection*, «Biology and Philosophy», 16, 2001, pp.655-683
 - D. Ruelle, *Hasard et chaos*, Éditions Odile Jacob, Paris 1991 [trad. it.: D. Ruelle, *Caso e Caos*, Bollati Boringhieri, Torino 1992]
 - W. C. Salmon, *Four Decades of Scientific Explanation*, in *Scientific Explanation, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. XIII*, ed. by P. Kitcher, W. C. Salmon, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, pp. 3-219
 - H. E. Simon, *The Science of Artificial*, The MIT Press, Cambridge 1969
 - E. Sober, *Equilibrium Explanation*, «Philosophical Studies», 43, 1983, pp. 201-210

- C. Taylor, D. Jefferson, *Artificial Life as a Tool for Biological Inquiry*, in *Artificial Life: an overview*, ed. by C. G. Langton, MIT Press, Cambridge 1995, pp. 1-14
- A. Wagner, *Causality in Complex Systems*, «Biology and Philosophy», 14, 1999, pp.83-101
- E. Winsberg, *Simulations, Models, and Theories: Complex Physical Systems and Their Representations*, «Philosophy of Science», 68 (Proceedings), 2001, pp. S442-S454
- E. Winsberg, *Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World*, «Philosophy of Science», 70, 2003, pp. 105-125
- T. W. Zawidzki, *Competing Models of Stability in Complex, Evolving Systems: Kauffman vs. Simon*, «Biology and Philosophy», 13, 1998, pp.541-554