

Aspetti del discorso sulla complessità

Elena Ghibaudi

elena.ghibaudi@unito.it - Dip. Chimica IFM, Università di Torino

Abstract

In questo articolo ci proponiamo di illustrare alcuni aspetti del discorso sulla complessità, inteso come prospettiva epistemologica capace di offrire nuove ed originali risposte ai problemi non convenzionali che la scienza odierna si trova ad affrontare. Tenteremo di offrire una definizione fenomenologica dei sistemi complessi, a partire dalla disamina delle loro proprietà peculiari, e discuteremo alcune delle implicazioni dell'approccio complesso in campo epistemologico, metodologico e didattico. Infine, traendo spunto da due definizioni distinte (ma correlate) di complessità, illustreremo il carattere trans-disciplinare di tale discorso, che si spinge fino a toccare temi di rilevanza etica e sociale.

Introduzione

Una cellula, un frattale, il World Wide Web, una città: quattro sistemi così eterogenei possono avere qualcosa in comune? La risposta, fino a non molti anni fa, sarebbe stata un "No" piuttosto deciso. Tuttavia oggi sappiamo che non è così: ciò che li accomuna è il fatto di essere "sistemi complessi". In ambito scientifico il discorso sulla complessità¹ è emerso da circa una quarantina d'anni e sta provocando una silenziosa, ma autentica rivoluzione metodologica.

Cosa significa dunque "complesso"? E in che cosa un problema complesso differisce da uno complicato?

Il dizionario Zingarelli² riporta le seguenti definizioni:

<complesso> = 1) Che risulta *dall'unione di varie parti* o di diversi elementi: organismo, reato, sistema complesso; fattispecie complessa; 2) Che si manifesta *sotto molteplici aspetti*: l'uomo è una creatura complessa

<complicato> = Difficile, intricato, confuso

Nonostante i due termini vengano spesso utilizzati come sinonimi, l'analisi semantica mette in evidenza l'erroneità di quest'uso. L'idea di confusione associata al termine "complicato" è completamente assente nel termine "complesso". La definizione di complesso, al contrario, ne

¹ La locuzione "discorso sulla complessità" è stata preferita ad altre e sarà utilizzata in tutto l'articolo a sottolineare il fatto che la complessità si propone come nuova prospettiva epistemologica e non, più limitatamente, come nuova teoria scientifica.

² Vocabolario della lingua italiana Zingarelli (2006) Zanichelli editore, Bologna

evidenza due aspetti peculiari: il suo essere correlato alla presenza di interconnessioni tra le parti e la molteplicità d'aspetto.

Ciò non è senza conseguenze, sia dal punto di vista epistemologico che metodologico. Infatti, la conoscenza di un sistema complesso comporterà l'indagine di quelle interconnessioni che sono un carattere costitutivo del sistema stesso. D'altra parte, il suo manifestarsi sotto molteplici aspetti implicherà che non può esistere un modo univoco ed esaustivo di descrivere quel sistema (ovvero un unico modello).

Sistemi complessi e problemi complessi

Ma perché la complessità merita un discorso a sé? Quali e quanti sistemi sono investiti da tale discorso? Quali problemi possono beneficiare dell'approccio complesso? E qual è l'elemento di novità che giustifica la nascita e lo sviluppo di una riflessione specifica sulla complessità?

L'elenco dei sistemi complessi è praticamente infinito e colpisce per la sua estrema eterogeneità: uno stormo di uccelli, un ecosistema, la rete neuronale del cervello, un'epidemia, i tifosi in uno stadio, un'azienda, il mercato finanziario, un Paese, un organismo vivente, Gaia (la Terra come organismo vivente), una molecola, un sistema in grado di auto-organizzarsi sono tutti esempi di sistemi complessi. Questo elenco di esempi testimonia che il discorso sulla complessità emerge tanto in ambito scientifico quanto umanistico, arrivando ad interessare un ampio spettro disciplinare: dall'informatica all'ecologia, dalla medicina alla filosofia, dalla biologia all'economia politica, dalla chimica alla teologia, dalla fisica alla sociologia, ecc³. Ecco allora emergere uno degli aspetti peculiari dell'approccio complesso: esso rompe i confini tradizionali tra le discipline, nel tentativo di trovare soluzioni a problemi non convenzionali⁴. Si tratta dunque di un approccio trans-disciplinare fondato sull'assunto che la scienza è disciplinare, ma la realtà non lo è affatto.

Quanto ai problemi che necessitano di un approccio complesso, eccone alcuni esempi significativi⁵:

- **In ambito biologico:** la comprensione del fenomeno "vita" ovvero il riconoscimento di un principio unitario che caratterizza l'organismo vivente, la cui identità non è semplicemente

³ A riprova dell'ampiezza del discorso complesso, riportiamo alcuni riferimenti bibliografici tratti da riviste specializzate in vari ambiti: Anderson R. et al., *Qual. Health Res* (2005) **15**, 669-685; Wynne B., *Theory, culture and society* (2005) **22**, 67-94; Whitesides G.M. et al. *Science* (1999) **284**, 89-92; Lee et al. *Science* (2002) **298**, 799-804; Montoya et al. *Nature* (2006) **442**, 259-264; Barabasi L., *N.Eng.J.Med.* (2007) **357**, 404-407; A Strumia, *Kos*, Nuova serie **128**, 48 (1996); Mickulecky D. *Chemistry and Biodiversity* (2007) **4**, 2480-2491; Allen P. *Hey J.* (2006) **XLVII**, 367-386.

⁴ Geoffrey West, del Santa Fé Institute for complexity studies (New Mexico), in un'intervista a TuttoScienze e Tecnologia (supplemento scientifico del quotidiano La Stampa di Torino) del 12 gennaio 2005 dichiarava: "La scienza della complessità è ancora un soggetto così nuovo e così vasto che nessuno sa come definirlo e neppure quali ne siano i confini. Se il campo sembra così scarsamente definito è perché la ricerca sulla complessità sta affrontando problemi non convenzionali"

⁵ Esempi ripresi da A Strumia "Una razionalità da dilatare" *Kos*, Nuova serie (1996) **128**, 48, reperibile all'URL: <http://www.ciram.unibo.it/~strumia/articoli/interdisciplina.html>

riconducibile alla somma delle cellule che lo costituiscono; il rapporto non-lineare tra genotipo e fenotipo (un'evidenza emersa dai recenti studi di mappatura del genoma umano)

- **In ambito chimico:** il rapporto tra proprietà molecolari e proprietà atomiche; la chimica supramolecolare e la capacità di alcuni sistemi di auto-organizzarsi; la termodinamica dei sistemi lontani dall'equilibrio
- **In ambito fisico:** il problema dei tre corpi; l'irreversibilità dell'orientamento del tempo dal passato al futuro, che impone il ricorso alla meccanica non lineare
- **In ambito medico:** il rapporto tra il cervello e la mente (intesa come insieme di operazioni eseguite dal cervello come organo); il concetto innovativo di "diseasome" (rete delle malattie) e di "network medicine"⁶
- **informatica e logica:** il problema dell'auto-referenzialità e della circolarità, che si manifesta nei processi iterativi.

L'elenco potrebbe continuare; in tutti i casi, si tratta di problemi classificabili come non-lineari. Definiamo tali quei problemi per i quali non vale il principio di sovrapposizione, ovvero problemi la cui soluzione non può essere ottenuta come somma di soluzioni più semplici; i problemi non lineari inoltre sono "non predicibili", nel senso che le loro soluzioni dipendono fortemente dalle condizioni iniziali. Queste considerazioni ci portano ad affrontare la questione epistemologica che sta alla base del discorso sulla complessità, ovvero la critica al riduzionismo. Secondo l'approccio riduzionista "Il tutto è dato dalla somma delle parti". In estrema sintesi, il riduzionismo si fonda sui seguenti assiomi:

- i. Tutte le scienze sperimentali devono ricondursi alle scienze formali: si adotta una concezione gerarchica delle discipline scientifiche: al di sopra di tutte sta la matematica.
- ii. Un sistema può essere studiato scomponendolo in parti più semplici: una volta ricomposte, esse forniscono la soluzione del problema d'origine, secondo il già citato principio di sovrapposizione.

Il discorso sulla complessità nasce dalla constatazione che l'approccio riduzionista è inefficace nel trattare un numero crescente di problemi (quelli sopraelencati ne rappresentano un saggio) e ne propone il superamento. Nei sistemi complessi, infatti, il tutto è più della somma delle parti perché: i) contiene informazione nuova, che non c'è nelle singole parti; oppure ii) non esistono parti distinguibili dal tutto (come accade nei frattali) in quanto ogni parte possiede lo stesso grado di complessità del tutto.

⁶ Barabasi L., "Network medicine – From obesity to the diseasesome" *N.Eng.J.Med.* (2007) **357**, 404-407. In questo articolo si propone l'idea che molte malattie (disease) siano interconnesse tra loro da fattori metabolici, genetici, regolatori, sociali, familiari, ecc. a formare una vera e propria rete (disease network). Di conseguenza, una piena comprensione della patofisiologia di tali malattie si può ottenere solo con un'adeguata conoscenza delle interazioni proprie del "disease network", secondo un approccio chiamato "network medicine" (medicina a rete).

Il più semplice degli organismi viventi esemplifica perfettamente tutto ciò, in quanto in esso la funzione “vita” (comunque la definiamo) emerge da livelli crescenti di organizzazione dinamica⁷ delle molecole che lo compongono, ma non è deducibile a partire dalle proprietà delle singole componenti; inoltre, ogni cellula che lo costituisce non è meno complessa dell'intero organismo.

Caratteristiche di un sistema complesso

Dunque, come si configura un sistema complesso? Il dibattito è aperto e una definizione condivisa non esiste; tuttavia resta possibile adottare un approccio fenomenologico che ci consenta di definire i sistemi complessi attraverso le proprietà loro peculiari. Gli studiosi della complessità si trovano generalmente d'accordo nell'attribuire ai sistemi complessi le seguenti proprietà:

- i) Presenza di una rete (dinamica) di relazioni tra le parti del sistema
- ii) Impredicibilità (unpredictability), associata ad una logica non lineare
- iii) Non separabilità (decomposability)⁸
- iv) Auto-similarità

La caratteristica principale di un sistema complesso non è il numero elevato di componenti, come spesso si tende a pensare, quanto piuttosto il loro essere visibilmente intrecciate in una rete di relazioni. Da tali interazioni possono derivare capacità di auto-organizzazione del sistema e - come estrema conseguenza - l'emergere di funzioni tipiche del “sistema come un tutto”, che non sono associabili alle sue singole parti. Si pensi ad un enzima, caratterizzato da quattro livelli distinti di struttura (dalla primaria alla quaternaria): soltanto l'auto-organizzazione del filamento proteico in livelli di crescente complessità porta all'emergere di proprietà (ad es., la distribuzione di carica superficiale) e di funzioni (la funzione catalitica) che non si manifestano nei singoli componenti del sistema o in livelli sottostanti di organizzazione (Fig. 1).

Tutti i fenomeni complessi, soprattutto quelli legati al mondo vivente, mostrano un'apparente mancanza di ordine nella propria evoluzione e a volte nella stessa struttura, caratteristiche che non permettono di ricostruire certe serie di eventi se non come processi caotici. Ciò è conseguenza del

⁷ Il termine “dinamico” viene qui utilizzato a sottolineare la proprietà di un sistema la cui organizzazione non è data una volta per tutte, ma è soggetta a cambiamento ed evoluzione in funzione delle esigenze del sistema stesso: ovvero essa è concepita come processo piuttosto che come prodotto. Ad es., il metabolismo è un sistema dinamico non soltanto perché caratterizzato da reazioni che sono soggette a leggi cinetiche, ma perché costituito da moduli (le vie metaboliche) il cui intreccio evolve nel tempo, al fine di consentire l'esplicazione di specifiche funzioni cellulari. La dinamicità dei sistemi complessi implica quindi l'idea di plasticità. Cfr. Oltvai Z and Barabási A.L., *Science* (2002) **298**, 763-764.

⁸ Il termine “decomposability” (tradotto con separabilità) è stato proposto da J.L. Casti. *Complexification. Explaining a paradoxical world through the science of surprise*, Harper Collins, New York, 1994; cit. da Cerruti L., *La Chimica nella Scuola* (2004) Anno **XXVI**, n°2 p. 41

loro essere soggetti ad una logica non lineare. Secondo Donald Mickulecky, un noto studioso di questi temi, “La complessità si può descrivere come una fase alla frontiera tra ordine e caos.”⁹

Una delle conseguenze più interessanti di questa attenzione per ciò che è almeno apparentemente caotico è la rivalutazione delle singolarità: il singolare ed il locale non sono più concepiti come “eccezioni” rispetto ad una regola universale, dettata dalle nostre teorie esplicative. Al punto che, secondo Anderson: “Nella logica complessa, le regole hanno meno rilevanza e la creatività (intesa come elemento imponderabile) più rilevanza di quanto non siamo abituati a pensare.”¹⁰

Si pensi alle implicazioni che ciò comporta rispetto ai sistemi viventi: equivale a riconoscere che – sebbene il modo di funzionamento degli organismi di una certa specie sia simile e comune a tutti gli esemplari della specie – l’individualità è un carattere insopprimibile e peculiare di ciascuno.

La non-separabilità⁸ è conseguenza diretta della presenza di una rete di relazioni tra le parti che è costitutiva del sistema stesso. In un sistema semplice, i componenti interagiscono debolmente e ciò consente di separarli senza provocare gravi perturbazioni del sistema medesimo. Ciò non è più vero per un sistema complesso che, con il suo alto grado di interazioni interne, è invece molto sensibile a questi cambiamenti. Di conseguenza se si interrompono le connessioni tra due o più componenti del sistema, tale separazione produce drastici cambiamenti o addirittura la disgregazione dello stesso. Un esempio abbastanza intuitivo di ciò è rappresentato dagli ecosistemi dove, ad es., l’alterazione del numero di predatori appartenenti ad una certa specie si ripercuote sulla popolazione delle prede e, a cascata, su tutte le specie ad esse connesse nella catena alimentare.

La proprietà di autosimilarità è riassumibile col principio dell’ologramma - la parte è nel tutto ed il tutto è nella parte - ed è applicabile in modo rigoroso solo ai frattali, oggetti matematici di dimensione frazionaria i quali forniscono una chiara esemplificazione di questa proprietà anche a livello visuale (Fig. 2). Più in generale, tale proprietà esprime il fatto che ogni parte di un sistema complesso non è meno complessa del tutto. Si pensi al caso della cellula e dell’organismo del quale essa fa parte.

Ma la vera novità dell’approccio complesso è il concetto di emergenza, che sottolinea l’emergere di funzioni in un sistema solo a partire da un certo livello di organizzazione del sistema stesso. Ciò implica una visione dinamica di quest’ultimo, che viene visto come un soggetto depositario di informazione, la quale risiede a diversi livelli e in diversi gradi di contenuto. J.M. Lehn, premio Nobel per la chimica nel 1987, adotta esattamente questa prospettiva quando descrive la chimica supramolecolare come una “scienza dell’informazione” e sottolinea che solo la capacità delle molecole di interagire tra loro operando una selezione (in senso darwiniano!), in risposta a fattori intrinseci o estrinseci, può spiegare l’emergere di sistemi molecolari dinamici, dotati di capacità di

⁹ Mickulecky D. *Acta Bioteoretica* (1996) **44**, 179-208

¹⁰ Anderson R. et al. , *Qual. Health Res.* (2005) **15**, 669-685

auto-organizzazione e di proprietà adattative. Secondo Lehn, questa è la strada che ci porterà a spiegare l'emergere della vita dalla materia inanimata¹¹.

Attraverso questo percorso, a partire dal concetto di emergenza e dall'esame delle proprietà comuni ai sistemi complessi, si giunge ad evidenziare altre due caratteristiche fondamentali dei medesimi: la loro dinamicità (associata all'organizzazione interna, laddove per organizzazione non si intende tanto qualcosa che è, quanto qualcosa che diviene continuamente); la loro adattabilità (ovvero, la capacità di risposta a sollecitazioni esterne o interne). Nuovamente, si pensi alle dinamiche cui è soggetto uno stormo di uccelli in volo, continuamente costretto ad adattarsi alla variabilità delle correnti aeree e capace di sfruttarle a proprio favore, mantenendosi solidale. O, ancora, ai processi omeostatici che consentono agli organismi di permanere in condizioni di stato stazionario, pur rispondendo a variazioni dell'ambiente interno ed esterno.

Il discorso sulla complessità ha implicazioni epistemologiche, metodologiche e didattiche

Alla luce di queste considerazioni, possiamo ora tornare ad esaminare le implicazioni in campo epistemologico, metodologico e didattico del discorso sulla complessità.

Le proprietà di non-separabilità e l'emergere di proprietà sistemiche, non deducibili a partire dai componenti del sistema, chiariscono l'origine della critica al riduzionismo implicita nell'approccio complesso. Quest'ultimo suggerisce che la chiave per comprendere un sistema risiede negli schemi relazionali e nelle interazioni tra gli agenti del sistema¹⁰. In altre parole, si riconosce che i sistemi sono costituiti da elementi, ma si afferma che sono le interdipendenze tra gli elementi a creare l'intero. Di conseguenza, frammentando il sistema, il metodo analitico distrugge proprio ciò che sta cercando di comprendere. Di qui la necessità di considerare il sistema come un tutto integrato (approccio olistico), secondo una prospettiva del tutto nuova e opposta a quella riduzionista.

Ciò pone immediatamente un problema metodologico: Come possiamo descrivere il sistema senza scomporlo? La comparsa di una nuova situazione teorica esige che vengano ridisegnati anche gli strumenti e le procedure d'indagine. Se si guarda all'attuale panorama di ricerca, si noterà che questa "rivoluzione metodologica" è già in atto, per lo meno in alcuni ambiti. Si pensi alla recente nascita della "biologia sistemica", che "affronta lo studio di un organismo come un network integrato ed interagente (cioè dinamico) di geni, proteine e reazioni biochimiche."¹² Essa si configura come un ambito di ricerca eminentemente multidisciplinare, che vede integrarsi le

¹¹ Lehn J.M. *Chem. Soc. Rev.* (2007) **36**, 151-160; Lehn J.M. *Science* (2002) **295**, 2400-2403; in quest'ultimo articolo si legge "Self-organization is the driving force that led to the evolution of the biological world from inanimate matter [...]. Supramolecular chemistry provides ways and means for progressively unraveling the complexification of matter through self-organisation"

¹² Estratto da "New challenges in the life sciences: prioritizing european research in molecular system biology: a document of the coordination action NMR-Life and the forum for the european structural proteomics", un documento riassuntivo elaborato nel corso dell'omonimo simposio tenutosi a Firenze il 18-19 novembre 2007.

competenze di biologi cellulari, biologi molecolari, informatici, chimici, biochimici, spettroscopisti, matematici, ecc. Curiosamente questo processo sta avvenendo in modo spontaneo, ben prima che la comunità scientifica abbia acquisito una reale consapevolezza del quadro teorico implicito nel discorso sulla complessità. Con un pizzico di ironia, lo si potrebbe interpretare come l'evidenza sperimentale che la comunità scientifica è un sistema adattivo complesso, capace di reagire alle sollecitazioni provenienti da situazioni nuove ed originali.

Infine, l'approccio riduzionista viene messo in crisi anche in ambito didattico. Scrive Luigi Cerruti: "La comprensione degli allievi del grande fenomeno "scienza" passa anche attraverso la loro cognizione esatta delle relazioni che intercorrono fra le discipline scientifiche, matematica compresa, laddove le uniche relazioni presentate sono quasi sempre quelle gerarchiche, basate su un rigido riduzionismo"¹³. Concependo la scienza stessa come sistema complesso, si fa giustizia di ogni pretesa riduzionista. Ciò spinge inesorabilmente verso un approccio integrato all'insegnamento delle scienze se accettiamo l'idea che – cito ancora Cerruti – "l'indipendenza di una disciplina si articola a livello dell'organizzazione, dominata e regolata dalle relazioni epistemiche fondamentali proprie della disciplina stessa. Il rapporto con le altre discipline avviene attraverso le strutture e sarà tanto più forte quanto maggiore sarà l'accoppiamento strutturale. Le gerarchie scompaiono e alla classica successione *matematica* → *fisica* → *chimica* → *biologia* viene sostituito un habitat sociale (antropologico) *la cultura scientifica*, in cui le discipline convivono."¹³ Ne risulta un'immagine di comunità scientifica assai più simile a quella di un "agorà" greco che ad un ambiente accademico permeato da rigide e strumentali divisioni disciplinari.

Quale definizione per la "complessità"?

Il nostro percorso ci ha portato ad identificare alcune proprietà condivise dai sistemi complessi. Tuttavia, non abbiamo ancora proposto alcuna definizione di "complessità". La ragione principale è che una definizione condivisa non esiste. Ci sembra significativo riprenderne due, proposte rispettivamente da Robert Rosen (un biologo teorico) e da Donald Mickulecky, che di Rosen fu allievo.

Rosen scrive: "Un sistema è complesso se possiamo descriverlo in una molteplicità di modi diversi, ciascuno dei quali corrisponde ad un sotto-sistema distinto. La complessità allora cessa di essere una proprietà intrinseca di un sistema, ma è piuttosto una funzione del numero di modi con cui possiamo interagire con il sistema e del numero di descrizioni separate richieste per descrivere queste interazioni"¹⁴. E di conseguenza: "Un sistema è semplice fintantoché una sola descrizione è

¹³ Cerruti L., *La Chimica nella Scuola* (2004) Anno **XXVI**, n°2 p. 37-44

¹⁴ Citato in Mickulecky D. *Acta Bioteoretica* (1996) **44**, 179-208

sufficiente per rendere conto delle nostre interazioni col sistema; nella misura in cui questo cessa di essere vero il sistema è complesso.”¹⁴

Rosen si occupò delle modalità secondo le quali gli scienziati costruiscono modelli della realtà fisica ed elaborò una teoria nota come “Modelling relation”. Quest’ultima rappresenta l’insieme di relazioni che legano un sistema naturale (che si intende sottoporre ad analisi) ed il corrispondente sistema formale (che si elabora nel tentativo di modellizzare il sistema naturale). La **Fig. 3** costituisce una rappresentazione visiva della “Modelling relation”. Rosen sostiene che quando $1 = 2+3+4$ allora il diagramma commuta e noi abbiamo prodotto un modello del mondo; è tuttavia fondamentale tenere presente che le fasi di codifica e decodifica sono *indipendenti* dai sistemi naturale e formale, in quanto non c’è modo di dedurle a partire da questi ultimi. Ciò significa che nell’elaborare un modello, ovvero nel definire le relazioni causali tra le parti del sistema e nello scegliere gli elementi rappresentativi di un certo sistema che si vuole studiare, esiste uno spazio di creatività artigianale (e quindi di soggettività). Questo - secondo Rosen - rende l’atto del modellizzare simile ad un’arte, nel senso che esso comporta un’ampia dose di arbitrarietà e di creatività. Conseguentemente, Rosen critica l’identificazione tra piano formale e piano naturale, che spesso viene inconsciamente compiuta dagli scienziati. Quando ciò accade, la scienza produce miti, ad es. il mito dell’oggettività.

Quale relazione esiste tra l’analisi di Rosen e il discorso sulla complessità? La scienza moderna, da Galilei in poi, ha adottato un approccio riduzionista: ci siamo abituati a pensare al riduzionismo come all’unico modo possibile di analizzare scientificamente la realtà fisica. Di fatto il riduzionismo è figlio della visione newtoniana/cartesiana della realtà, che è soltanto una delle possibili chiavi di lettura della medesima o – se si preferisce – una manifestazione speciale della Modelling Relation¹⁴.

Donald Mickulecky fa proprie molte delle tesi di Rosen, ma si spinge ben oltre, radicalizzandole. Ecco la sua definizione di complessità: “La complessità è la proprietà intrinseca di un sistema del mondo reale che si manifesta nell’impossibilità per ogni formalismo di catturare in modo adeguato tutte le sue proprietà. Ciò richiede che troviamo modi distintamente differenti per interagire col sistema. Differenti distintamente nel senso che quando costruiamo modelli che hanno successo, i sistemi formali necessari per descrivere ogni aspetto distinto NON sono derivabili l’uno dall’altro”. Commentando questa definizione, Cerruti osserva che “persino una conoscenza totale sulle singole parti e sulle loro relazioni reciproche non è sufficiente perché questa conoscenza riguarda ancora un sistema privo di un tratto essenziale: il funzionamento come un tutto.”¹³ Contrariamente a Rosen, Mickulecky concepisce la complessità come una proprietà intrinseca del sistema: egli abbandona definitivamente la possibilità - lasciata aperta da Rosen - che il carattere complesso possa dipendere

dal modo in cui il sistema viene osservato: la complessità è ontologica e ciò comporta un'impossibilità epistemica ovvero pone dei limiti alla conoscenza del sistema da parte di un qualsiasi osservatore. Tale punto di vista è ben rappresentato da altre affermazioni di Mickulecky, che altrove scrive: "Gli organismi biologici sfuggiranno sempre ad una formalizzazione, in quanto possiedono elementi non computabili."¹⁵ Dunque, ciò che rende la realtà complessa, secondo Mickulecky, è la sua non-computabilità¹⁶ che implica la sua irriducibilità ad un modello finito.

La fine delle certezze

Non ci deve stupire il fatto che – di fronte a queste riflessioni – molti scienziati manifestino diffidenza (se non rifiuto) rispetto al discorso sulla complessità, identificandolo con un atteggiamento perdente sul piano epistemologico, come se la rinuncia ad una conoscenza esatta ed esaustiva della realtà costituisse una sconfitta per la scienza. Non si tratta qui di rinunciare all'idea di una scienza che ci permette di conoscere e di predire aspetti della realtà ovvero di intervenire su di essa per modificarla; si tratta casomai di cambiare prospettiva. Ecco quanto suggerivano Goldenfeld e Kadanoff in un articolo pubblicato nel 1999 sulla rivista *Science*: "I prossimi anni verosimilmente vedranno un incremento degli studi sulla complessità. Nel momento in cui la scienza si volge verso la complessità, si deve prender coscienza del fatto che la complessità richiede un approccio ed un'attitudine piuttosto differenti da quelle abituali al mondo della fisica."¹⁷ Mentre Prigogine e Stengers nel 1981 scrivevano: "...il nostro interesse si è spostato dalla sostanza alle relazioni, alla comunicazione, al tempo."¹⁸

Ai lettori non sarà sfuggito che il titolo di questo paragrafo riprende quello di un famoso testo di Prigogine. Il problema dei limiti della conoscenza è stato affrontato e lungamente discusso da questo scienziato e pensatore, a partire dall'osservazione che la logica non lineare pone dei limiti al determinismo. Nell'introduzione de "La fine delle certezze", Prigogine scrive: "Il problema del tempo e del determinismo non è limitato alle scienze, ma è il centro del pensiero occidentale a partire dall'origine di quella che chiamiamo razionalità, al tempo dei presocratici. Come si può concepire la creatività umana o come si può pensare l'etica, in un mondo deterministico?"¹⁹ L'originalità del contributo di Prigogine risiede anche nella sua capacità di superare le paratie disciplinari in nome di una più profonda comprensione della realtà. Il suo lavoro ha preso le mosse da un problema fisico - quello dell'irreversibilità del tempo - che non trova giustificazione nelle

¹⁵ URL: <http://www.people.vcu.edu/~mikuleck/>

¹⁶ In logica matematica, la computabilità è definita come la possibilità di calcolare il risultato di un'operazione mediante un algoritmo finito.

¹⁷ Goldenfeld N. e Kadanoff L.P. "Simple lessons from complexity" *Science* (1999) **284**, p. 87

¹⁸ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova alleanza* (1981) p. 11, Einaudi, Torino

¹⁹ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La fine delle certezze* (1997) p. 15, Bollati Boringhieri, Torino

leggi della dinamica classica e lo ha condotto fino ad interrogarsi sul significato di libertà, di etica, di democrazia, in nome di una stessa logica. Egli scrive: “Le “leggi” della natura, come ormai siamo in grado di decifrarle, sono le leggi di un universo aperto. Esse concernono le probabilità d’evoluzione in un futuro che tuttavia non determinano. Non negano l’avventura umana, di cui costituiscono una delle più alte realizzazioni, ma al contrario, affermano il carattere irriducibile di ciò senza cui questa avventura resterebbe priva di significato. Esse costruiscono un “passaggio stretto” tra due forme di alienazione: la sottomissione a leggi che riducono l’invenzione ad apparenza e la rassegnazione al gioco arbitrario di avvenimenti aleatori, inintelligibili.”²⁰

Secondo Prigogine, la sostituzione della “certezza” con la “probabilità” è allora ben lungi dal costituire una sconfitta per la scienza: al contrario, essa preserva lo spazio della nostra libertà. Egli rifiuta l’accezione negativa del termine “probabilità” intesa come “misura di incertezza” e la sostituisce con lo “spazio delle possibilità” ovvero il luogo ove la libertà può esprimersi. Ciò comporta la rinuncia ad ogni idealizzazione in nome di una maggior concretezza ed un maggior grado di adesione alla realtà: “Stiamo assistendo all’emergere di una scienza che non si limita più a studiare situazioni semplificate, idealizzate, ma che ci mette di fronte alla complessità del mondo reale: una scienza che consente alla creatività umana di vivere se stessa come l’espressione singolare di un carattere fondamentale che è comune a tutti i livelli della natura.”²¹

Le novità del discorso sulla complessità

Uno dei più dirompenti elementi di novità della riflessione sulla complessità risiede nel superamento dell’approccio riduzionista in nome di un concetto di razionalità più ampio. A questo proposito, scrive Strumia: “Ciò non significa abbandonare il razionale per l’irrazionale, il dimostrabile per l’indimostrabile, il quantificabile per il non quantificabile: in una parola, non significa abdicare all’idea di una scienza capace di descrivere, ma anche di predire aspetti della realtà, una scienza che conservi intatta la nostra capacità di intervenire sul reale e di modificarlo. Al contrario, significa potenziare queste possibilità.”²² Ciò che si richiede è uno sforzo di creatività. Prosegue Strumia: “Anche per le scienze, l’avere a disposizione un’assiomatizzazione più ampia con dei metodi dimostrativi meno restrittivi potrebbe offrire la possibilità di indagare senza escludere degli elementi che normalmente non rientrano nell’ambito scientifico a meno che non siano ridotti a quantità e relazioni (come le qualità e la stessa finalità). Non si tratta di negare il riduzionismo (e le sue conquiste), ma di superarlo, immaginando un orizzonte più ampio od operando un salto di qualità. Non si tratta neppure di cadere nell’irrazionalismo o nell’impotenza:

²⁰ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova alleanza* (1981) Introduzione, p. XVI, Einaudi, Torino

²¹ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La fine delle certezze* (1997) p. 16, Bollati Boringhieri, Torino

²² Strumia A., *Kos, Nuova serie* (1996) **128**, p. 48, reperibile all’URL: <http://www.ciram.unibo.it/~strumia/articoli/interdisciplina.html>

semmai di sviluppare strumenti (in primis, strumenti logici e matematici) che consentano di superare l'impasse. Tutto ciò porterà a definire meglio anche i limiti della conoscenza, poiché, come ben sappiamo dopo Gödel, una scienza veramente rigorosa dimostra anche l'impossibilità di dimostrare la sua completezza"²².

L'elaborazione di una razionalità più ampia implica il dialogo tra discipline scientifiche e umanistiche: non a caso la necessità di ricostruire una "nuova alleanza" tra questi due domini è un tema caro a Prigogine, che lo affronta in una delle sue opere più note²³. A questo proposito, ci pare interessante citare la provocatoria riflessione di Mickulecky, il quale lamenta l'assenza della filosofia nel percorso di formazione degli scienziati: "L'educazione degli scienziati comporta lo studio della matematica, della chimica, della fisica, ma quasi mai della filosofia. La filosofia, a sua volta, ha relegato la filosofia della scienza ad un sottoinsieme di idee delle quali occuparsi. Il prezzo di questa omissione nella scienza e la risultante struttura della filosofia non sono calcolabili"²⁴. Secondo Mickulecky la scienza, nata come filosofia naturale, ha progressivamente abbandonato le istanze filosofiche che pure erano alla sua base. Nel momento in cui la scienza si trova di fronte a problematiche complesse, quali la comprensione del fenomeno "vita", quelle istanze riemergono con forza e non possono più essere ignorate. Si pensi al caso del finalismo in biologia²⁵.

Nel momento in cui si invoca un nuovo dialogo tra filosofia e scienza, in nome della complessità, è inevitabile ripensare i nostri modelli di formazione e di educazione scolastica. Vale la pena citare le parole di Edgar Morin che – da sociologo e filosofo - ha dedicato l'intera esistenza alla riflessione sulla complessità: "I progressi delle conoscenze (disciplinari) hanno prodotto una regressione della Conoscenza, proprio a causa della specializzazione che spesso frammenta i contesti. [...]. In queste condizioni, la mente formata dalle discipline perde la sua capacità naturale di contestualizzare i saperi, così come di integrarli nei loro insiemi naturali. L'indebolimento della percezione del globale conduce all'indebolimento della responsabilità (in quanto ciascuno tende ad essere responsabile solo del suo compito specializzato), nonché all'indebolimento della solidarietà (in quanto ciascuno non sente più il legame con i concittadini). Di fatto l'iperspecializzazione impedisce di vedere il globale (che frammenta in particelle) nonché l'essenziale (che dissolve)."²⁶ Lungi dall'essere una sentenza apocalittica, questa previsione si è già almeno in parte realizzata nella nostra società e le conseguenze sono sotto i nostri occhi. Prosegue Morin: "Il XX secolo ha vissuto sotto il regno di una razionalità che ha preteso di essere la sola razionalità, ma che ha

²³ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova alleanza* (1981), Einaudi, Torino

²⁴ Donald Mickulecky, *Chemistry and biodiversity* (2007) **4**, p. 2480-2490

²⁵ Sul riemergere del tema della teleologia in biologia ed il suo rapporto con il dibattito sulla complessità, cfr. Fabio Popolla, Elena Ghibaudi, *Il recupero dei concetti di teleonomia e complessità in ambito scientifico nella prospettiva del dialogo tra scienza e teologia*, Archivio Teologico Torinese (2010), in corso di stampa

²⁶ Edgar Morin, *I sette saperi necessari all'educazione del futuro* (2001) p. 40 e segg., Raffaello Cortina Editore, Milano.

atrofizzato la comprensione, la riflessione e la visione a lungo termine. La sua insufficienza nell'affrontare i problemi più gravi ha costituito uno dei problemi più seri per l'umanità. Da ciò deriva un paradosso: il XX secolo ha generato progressi giganteschi in tutti gli ambiti della conoscenza scientifica, così come in tutti i campi della tecnica. Nel contempo ha prodotto una nuova cecità verso i problemi globali, fondamentali e complessi e questa cecità ha prodotto innumerevoli errori ed illusioni, innanzi tutto negli scienziati, nei tecnici, negli specialisti. Perché? Perché sono stati misconosciuti i più importanti principi di una conoscenza pertinente. La parcellizzazione e la compartimentazione dei saperi rendono incapaci di percepire "ciò che è tessuto insieme". Il nuovo secolo non dovrebbe forse affrancarsi da una razionalità mutilata e mutilante affinché la mente umana possa infine controllarla? Si tratta di sostituire un pensiero che separa e che riduce con un pensiero che distingue e che collega. Non si tratta di abbandonare la conoscenza delle parti per la Conoscenza della totalità, né l'analisi per la sintesi: si deve coniugarle."²⁶

Attraverso queste considerazioni, Morin afferma che i modelli di educazione che adottiamo (e che sono figli della nostra visione del mondo) non sono neutri, ma – al contrario – hanno pesanti implicazioni sul piano sociale, civile ed etico. Prigogine sembra dello stesso avviso quando scrive che "democrazia e scienze moderne sono eredi della stessa storia, la quale condurrebbe però ad una contraddizione se le scienze facessero trionfare una concezione deterministica della natura, mentre la democrazia incarna l'ideale della società libera."¹⁹

Mickulecky, dal canto suo, riscontra implicazioni etiche nel rinnovato concetto di causalità emergente dal discorso sulla complessità, un concetto più affine al pensiero aristotelico che non a quella cartesiano. Non è possibile in questa sede dare conto di questa problematica, che meriterebbe una trattazione a parte. Riprenderemo soltanto la distinzione - proposta da Lakoff²⁷ - tra causa diretta e causa sistemica. Mentre la prima implica la presenza di un *singolo* agente chiaramente identificabile come responsabile di un certo evento, la causalità sistemica comporta agenti multipli e reti intrecciate di relazioni. Mickulecky associa i due concetti di causalità a due distinte (e inconciliabili) visioni del mondo e si spinge fino ad affermare che "il fondamentalismo è un processo mentale correlato alla causalità diretta."²⁸ Il concetto di causalità sistemica viene allora proposto come antidoto nei confronti di una lettura troppo semplificata e rigida di una realtà che è intrinsecamente e fecondamente complessa.

Conclusioni

²⁷ Lakoff G. "Whose freedom? The battle over America's most important idea", (2006) Farrar-Straus-Giroux, New York; cit. in Mickulecky D. *Chemistry and biodiversity* (2007) 4, p. 2485

²⁸ Mickulecky D. *Chemistry and biodiversity* (2007) 4, p. 2489

Il dibattito sulla complessità è in pieno svolgimento ed investe una gamma eterogenea di problematiche, proponendo una prospettiva originale rispetto all'attuale quadro epistemologico, molto condizionato da blocchi disciplinari e pregiudizi filosofici. I contenuti di novità impliciti in questo discorso comportano un rischio, nella misura in cui spingono verso terreni inesplorati e ricchi di incertezze; ma rappresentano anche un'opportunità, laddove offrono nuove prospettive per affrontare problemi non convenzionali. In questo articolo abbiamo cercato di illustrare e discutere alcuni dei contenuti di tale discorso, dalla critica al riduzionismo al recupero del dialogo tra universo scientifico ed umanistico. Ma, al di là di tutto ciò, ci pare che la sfida più ambiziosa di fronte alla quale ci pone il discorso sulla complessità sia lo sviluppo di una nuova "razionalità", più cosciente dei propri limiti e più disponibile a confrontarsi con il mistero di una realtà che sempre le resiste.

Bibliografia

- ¹ La locuzione "discorso sulla complessità" è stata preferita ad altre e sarà utilizzata in tutto l'articolo a sottolineare il fatto che la complessità si propone come nuova prospettiva epistemologica e non, più limitatamente, come nuova teoria scientifica.
- ² Vocabolario della lingua italiana Zingarelli (2006) Zanichelli editore, Bologna
- ³ A riprova dell'ampiezza del discorso complesso, riportiamo alcuni riferimenti bibliografici tratti da riviste specializzate in vari ambiti: Anderson R. et al, *Qual. Health Res* (2005) **15**, 669-685; Wynne B., *Theory, culture and society* (2005) **22**, 67-94; Whitesides G.M. et al. *Science* (1999) **284**, 89-92; Lee et al. *Science* (2002) **298**, 799-804; Montoya et al. *Nature* (2006) **442**, 259-264; Barabasi L., *N.Eng.J.Med.* (2007) **357**, 404-407; A Strumia, *Kos*, Nuova serie **128**, 48 (1996); Mickulecky D. *Chemistry and Biodiversity* (2007) **4**, 2480-2491; Allen P. *Hey J.* (2006) **XLVII**, 367-386.
- ⁴ Geoffrey West, del Santa Fé Institute for complexity studies (New Mexico), in un'intervista a TuttoScienze e Tecnologia (supplemento scientifico del quotidiano La Stampa di Torino) del 12 gennaio 2005 dichiarava: "La scienza della complessità è ancora un soggetto così nuovo e così vasto che nessuno sa come definirlo e neppure quali ne siano i confini. Se il campo sembra così scarsamente definito è perché la ricerca sulla complessità sta affrontando problemi non convenzionali"
- ⁵ Esempi ripresi da A Strumia "Una razionalità da dilatare" *Kos, Nuova serie* (1996) **128**, 48, reperibile all'URL: <http://www.ciram.unibo.it/~strumia/articoli/interdisciplina.html>
- ⁶ Barabasi L., "Network medicine – From obesity to the diseasesome" *N.Eng.J.Med.* (2007) **357**, 404-407. In questo articolo si propone l'idea che molte malattie (disease) siano interconnesse tra loro da fattori metabolici, genetici, regolatori, sociali, familiari, ecc. a formare una vera e propria rete (disease network). Di conseguenza, una piena comprensione della patofisiologia di tali malattie si può ottenere solo con un'adeguata conoscenza delle interazioni proprie del "disease network", secondo un approccio chiamato "network medicine" (medicina a rete).
- ⁷ Il termine "dinamico" viene qui utilizzato a sottolineare la proprietà di un sistema la cui organizzazione non è data una volta per tutte, ma è soggetta a cambiamento ed evoluzione in funzione delle esigenze del sistema stesso: ovvero essa è concepita come processo piuttosto che come prodotto. Ad es., il metabolismo è un sistema dinamico non soltanto perché caratterizzato da reazioni che sono soggette a leggi cinetiche, ma perché costituito da moduli (le vie metaboliche) il cui intreccio evolve nel tempo, al fine di consentire l'esplicazione di specifiche funzioni cellulari. La dinamicità dei sistemi complessi implica quindi l'idea di plasticità. Cfr. Oltvai Z and Barabási A.L., *Science* (2002) **298**, 763-764.
- ⁸ Il termine "decomposability" (tradotto con separabilità) è stato proposto da J.L. Casti. *Complexification. Explaining a paradoxical world through the science of surprise*, Harper Collins, New York, 1994; cit. da Cerruti L., *La Chimica nella Scuola* (2004) Anno **XXVI**, n°2 p. 41
- ⁹ Mickulecky D. *Acta Bioteoretica* (1996) **44**, 179-208
- ¹⁰ Anderson R. et al. , *Qual. Health Res.* (2005) **15**, 669-685
- ¹¹ Lehn J.M. *Chem. Soc. Rev.* (2007) **36**, 151-160; Lehn J.M. *Science* (2002) **295**, 2400-2403; in quest'ultimo articolo si legge "Self-organization is the driving force that led to the evolution of the biological world from inanimate matter [...]. Supramolecular chemistry provides ways and means for progressively unraveling the complexification of matter through self-organisation"

- ¹² Estratto da “New challenges in the life sciences: prioritizing european research in molecular system biology: a document of the coordination action NMR-Life and the forum for the european structural proteomics”, un documento riassuntivo elaborato nel corso dell’omonimo simposio tenutosi a Firenze il 18-19 novembre 2007.
- ¹³ Cerruti L., *La Chimica nella Scuola* (2004) Anno **XXVI**, n°2 p. 37-44
- ¹⁴ Citato in Mickulecky D. *Acta Bioteoretica* (1996) **44**, 179-208
- ¹⁵ URL: <http://www.people.vcu.edu/~mikuleck/>
- ¹⁶ In logica matematica, la computabilità è definita come la possibilità di calcolare il risultato di un’operazione mediante un algoritmo finito.
- ¹⁷ Goldenfeld N. e Kadanoff L.P. “Simple lessons from complexity” *Science* (1999) **284**, p. 87
- ¹⁸ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova alleanza* (1981) p. 11, Einaudi, Torino
- ¹⁹ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La fine delle certezze* (1997) p. 15, Bollati Boringhieri, Torino
- ²⁰ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova alleanza* (1981) Introduzione, p. XVI, Einaudi, Torino
- ²¹ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La fine delle certezze* (1997) p. 16, Bollati Boringhieri, Torino
- ²² Strumia A., *Kos, Nuova serie* (1996) **128**, p. 48, reperibile all’URL: <http://www.ciram.unibo.it/~strumia/articoli/interdisciplina.html>
- ²³ Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *La nuova alleanza* (1981), Einaudi, Torino
- ²⁶ Donald Mickulecky, *Chemistry and biodiversity* (2007) **4**, p. 2480-2490
- ²⁵ Sul riemergere del tema della teleologia in biologia ed il suo rapporto con il dibattito sulla complessità, cfr. Fabio Popolla, Elena Ghibaudi, *Il recupero dei concetti di teleonomia e complessità in ambito scientifico nella prospettiva del dialogo tra scienza e teologia*, Archivio Teologico Torinese (2010), *in corso di stampa*
- ²⁶ Edgar Morin, *I sette saperi necessari all’educazione del futuro* (2001) p. 40 e segg., Raffaello Cortina Editore, Milano.
- ²⁷ Lakoff G. “*Whose freedom? The battle over America’s most important idea*”, (2006) Farrar-Straus-Giroux, New York; cit. in Mickulecky D. *Chemistry and biodiversity* (2007) **4**, p. 2485
- ²⁸ Mickulecky D. *Chemistry and biodiversity* (2007) **4**, p. 2489

Didascalie

Fig. 1. I quattro livelli di organizzazione strutturale nelle proteine, che corrispondono a gradi di complessità crescente (adattata da Petsko and Ringe, *Protein structure and function* (2004) New Science Press)

Fig. 2. Rappresentazione di un frattale, la cui struttura ripetitiva viene riprodotta all’infinito (tratta dal sito: areeweb.polito.it)

Fig. 3. Rappresentazione schematica della “Modelling relation”, che rappresenta l’insieme di relazioni che legano un sistema naturale (che si intende sottoporre ad analisi) ed il corrispettivo sistema formale (elaborato al fine di modellizzare il sistema naturale).

FIGURA 1

(a) primaria



(b) secondaria



alfa elica



foglietto beta

(c) terziaria



(d) quaternaria

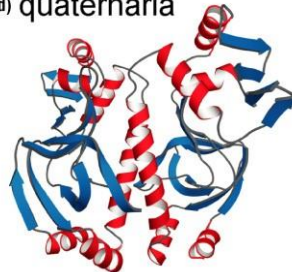


FIGURA 2

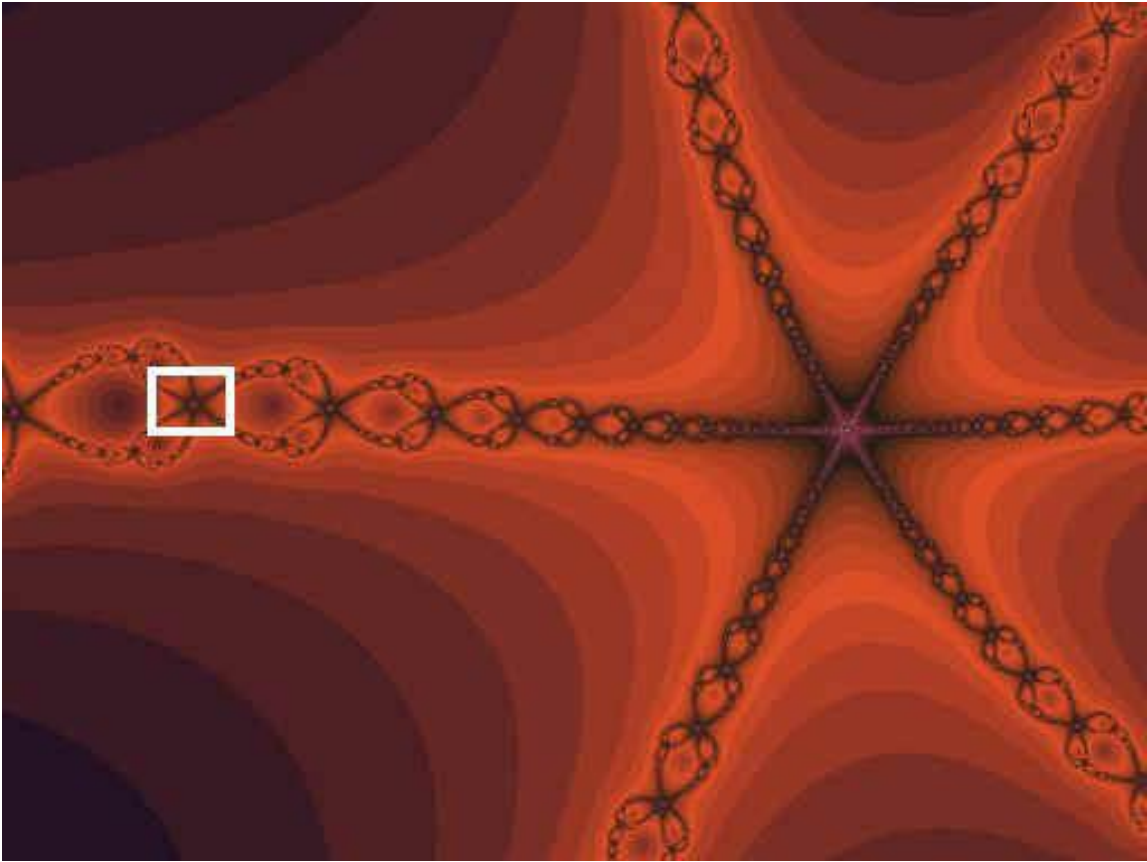
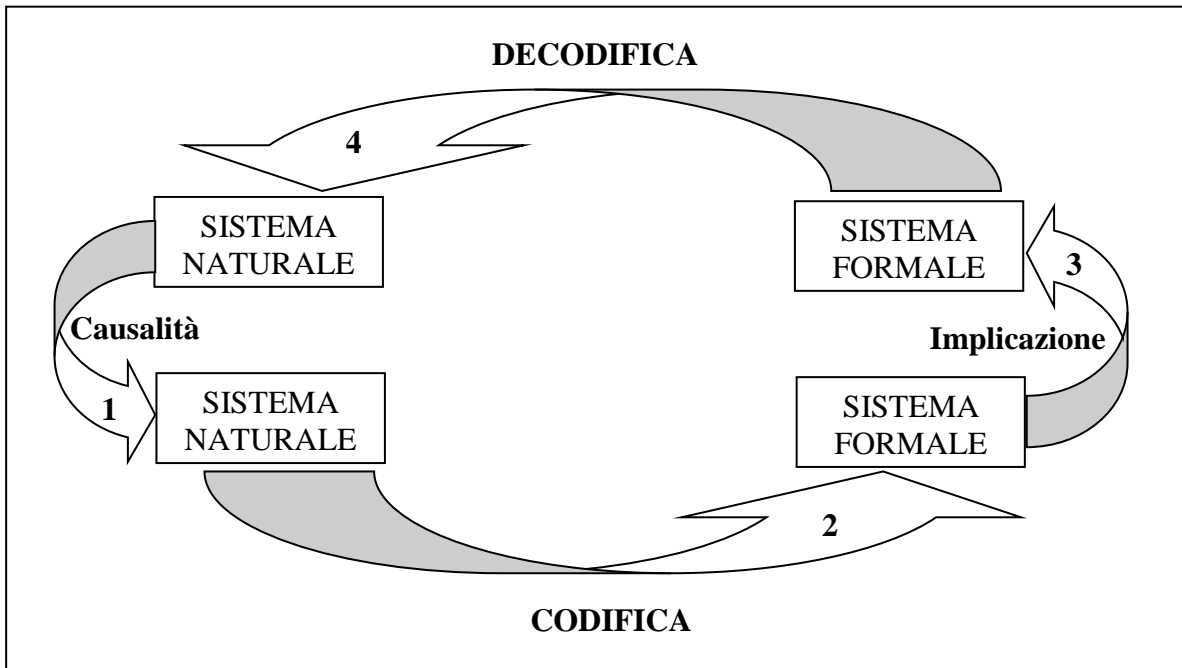


FIGURA 3



NOTIZIE degli AUTORI

Elena Ghibaudi, è ricercatrice presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Torino. Si occupa di chimica bio-inorganica e indaga le relazioni struttura-funzione nelle proteine mediante metodi spettroscopici, con particolare interesse alle problematiche legate al folding e al misfolding. Coltiva interessi nell'ambito della didattica della chimica, della divulgazione scientifica e della filosofia della scienza.