

La “sfida della complessità” verso il Duemila*

Tullio Tinti

Introduzione

La capacità critica, la diffidenza verso le mode e una certa dose di scetticismo fanno verosimilmente parte del bagaglio culturale di ogni docente che opera nella scuola. E' quindi normale che esse vengano rivolte verso quella che, a giudicare dalla maggioranza dei canali attraverso cui viene divulgata, potrebbe anche sembrare una pura creazione dei *mass media*: la cosiddetta “teoria della complessità”. In realtà, benché su molti manuali di storia della filosofia non compaia ancora, e nonostante le critiche che le hanno rivolto gli scienziati più conservatori, la teoria della complessità costituisce una delle pagine più interessanti nella storia del pensiero *filosofico e scientifico* contemporaneo. E' dunque importante, per i docenti di entrambe le forme del sapere, accostarsi ad essa e inserirla, nel modo e con il formato opportuni, nei propri programmi relativi al pensiero del Novecento.

Il presente articolo consta di due parti: inizialmente verranno illustrate le ragioni per cui la teoria della complessità è importante sia dal punto di vista filosofico che da quello scientifico; nella seconda parte verrà presentata una breve introduzione alla teoria stessa.

Importanza della teoria della complessità

La teoria della complessità, innanzitutto, non è una teoria scientifica in senso stretto. Meglio sarebbe parlare (e in effetti alcuni autori lo fanno) di “sfida della complessità” oppure “pensiero della complessità” o, meglio ancora, “epistemologia della complessità”. E' proprio come prospettiva epistemologica, infatti, che la complessità svolge un ruolo cruciale nel pensiero contemporaneo. Questo perché la complessità comporta tre *novità epistemologiche* ugualmente rilevanti: una nuova alleanza tra filosofia e scienza, un nuovo modo di fare scienza, una nuova concezione dell'evoluzione naturale.

1) *La “nuova alleanza”*. Nella seconda metà del XIX secolo i pensatori occidentali hanno cominciato a problematizzare il rapporto filosofia-scienza e, dopo averlo trasformato in problema, hanno cominciato a cercarne delle soluzioni. Due fattori sono stati determinanti in questo processo di problematizzazione: da un lato la critica dell'idealismo hegeliano, sfociata nell'idea di un inevitabile auto-superamento della filosofia (Marx, Kierkegaard, Nietzsche); d'altro lato le nuove scienze, che hanno

* Una versione modificata di questo articolo è comparsa sul numero di Dicembre 1998 della rivista *Novecento* (anno 18, n.12, pp.7-12, p.25).

intrapreso una “colonizzazione” di quello che era cartesianamente riconoscibile come il territorio privilegiato dell’indagine filosofica: il campo del *pensiero* (sia individuale, conquistato dalla psicologia, dalla logica matematica e dalla linguistica, sia relazionale, conquistato da sociologia, antropologia e storiografia). Posti di fronte al *problema* del rapporto tra una filosofia destinata all’auto-superamento e una scienza pronta alla colonizzazione del pensiero, i filosofi hanno proposto varie soluzioni: la definitiva *diversificazione* tra scienze naturali e «scienze dello spirito» (Dilthey), l’*integrazione* delle scienze in un sapere più vasto, filosofico, fondato sulla critica della scienza tradizionale (Husserl), la *trasformazione* della filosofia in analisi logica del linguaggio oppure in una sorta di appendice riflessiva della scienza (neopositivismo). Paradossalmente, ciascuna di queste proposte ha contribuito, più che a risolvere il problema, a rendere il rapporto filosofia-scienza sempre più conflittuale. A partire dagli anni Trenta, nel pensiero europeo, si sviluppa così una vera e propria “inimicizia” tra filosofia e scienza. Tale inimicizia, sul versante della filosofia, coinvolge: Heidegger e l’esistenzialismo, la Scuola di Francoforte, l’ermeneutica, le correnti spiritualistiche e neoidealistiche.

E’ solo nella seconda metà del nostro secolo che comincia a manifestarsi un’inversione di tendenza. Il primo campo in cui scienziati e filosofi di professione superano la mutua inimicizia è quello della *scienza cognitiva*. Nella scienza cognitiva, neuroscienziati, informatici, filosofi della mente, linguisti, psicologi e (alcuni) antropologi uniscono le forze per costruire modelli computazionali dell’attività psichica e per rispondere a domande recenti («è possibile costruire computer in grado di pensare?») e meno recenti («qual è il rapporto tra mente e cervello?»). Un secondo passo verso il superamento del conflitto avviene all’interno della comunità filosofica, ad opera dei filosofi *postpositivisti* e *postempiristi*, i quali danno vita ad un ampio lavoro di ripensamento e revisione critica del programma neopositivista (Quine, Hanson, Kuhn, Feyerabend, Lakatos, Laudan). Infine, un terzo contributo verso la “pacificazione” tra filosofia e scienza, il più recente e decisamente il più importante, viene appunto dall’*epistemologia della complessità*.

All’elaborazione della teoria della complessità stanno contribuendo, in egual misura, filosofi e scienziati: non solo negli istituti di ricerca lavorano “gomito a gomito” neurobiologi e filosofi (per esempio, Sejnowski e Churchland), filosofi della mente e informatici (Dennett e Hofstadter), epistemologi e chimici (Stengers e Prigogine), ma addirittura il più importante gruppo di ricerca sulla complessità degli anni Ottanta, il gruppo “BACH”, composto da matematici, economisti e biologi, è stato guidato dal filosofo di professione Arthur W. Burks. Sia scienziati che filosofi celebrano il riavvicinamento delle rispettive forme di sapere con entusiasmo: qualcuno parla della nascita di una “terza cultura”, alternativa tanto alla cultura strettamente umanistica quanto a quella scientifico-tecnologica (Brockmann), altri ritengono che tutto il movimento potrebbe essere equiparato allo sviluppo di una “autocoscienza filosofica” da parte della scienza (D’Agostini), altri ancora parlano di una “nuova alleanza” tra scienze fisiche e scienze biologiche e umane (Prigogine).

2) *La “nuova scienza”*. La seconda ragione per cui la teoria della complessità rappresenta una svolta nell’epistemologia del Novecento è legata al ruolo che in essa rivestono i computer. Con l’unica eccezione dei moderni calcolatori “ad architettura parallela”, tutti i computer costruiti fino ad oggi sono essenzialmente

sistemi formali automatici progettati per eseguire, in modo velocissimo e infallibile, qualunque algoritmo. Risolvere algoritmi in modo veloce e infallibile è la capacità che, da sola, ha reso il computer uno degli strumenti fondamentali per lo sviluppo delle società tecnologicamente avanzate. Tuttavia, il computer non è mai stato considerato solo uno “strumento di calcolo”: sia i ricercatori della scienza cognitiva, sia gli studiosi della complessità lo hanno utilizzato anche come oggetto di riflessione filosofica e come “laboratorio virtuale” in cui sperimentare modelli computazionali. Per quanto riguarda la riflessione filosofica, il computer non solo si è trovato al centro del dibattito sulla possibilità di creare macchine pensanti (Turing, Newell, Simon, Searle, Haugeland), ma è anche stato studiato come primo esempio di *sistema di media complessità*, cioè un sistema la cui complessità è intermedia tra quella del non-vivente, minima, e quella del vivente, immensa (Wiener, Ashby, von Foerster, Maturana, Varela).

In quanto laboratorio virtuale per i modelli degli scienziati cognitivi e dei teorici della complessità, il computer ha creato un nuovo modo di fare scienza, a metà strada tra *teoria matematica* ed *esperimento di laboratorio*. I ricercatori che percorrono questa “terza via” non elaborano complicate teorie matematiche con assiomi, teoremi, ecc., né tentano di riprodurre in laboratorio il comportamento del sistema che stanno studiando; essi costruiscono un modello computazionale del sistema in questione e del suo ambiente (teoria), poi osservano il comportamento del modello del sistema “immerso” nel modello dell’ambiente (esperimento virtuale o *simulazione*) e, se qualcosa non va, ritornano al modello e lo modificano (teoria); e così via. E’ però importante distinguere, nell’ambito della costruzione di modelli computazionali, due modi molto diversi di procedere: «dall’alto al basso» e «dal basso all’alto». Mentre il primo ha caratterizzato la scienza cognitiva (e, al suo interno, la cosiddetta Intelligenza Artificiale classica), il secondo contraddistingue la teoria della complessità (e, al suo interno, l’Intelligenza Artificiale subcognitiva). Procedere «dall’alto al basso» significa costruire il modello di un sistema in base alla conoscenza *globale* che abbiamo del sistema stesso: come si comporta, quali fenomeni si possono associare al suo funzionamento, a quali leggi ubbidisce, ecc. Significa, in altre parole, studiare un sistema partendo dalla riproduzione della sua *competenza* e trascurando, almeno inizialmente, i dettagli relativi alle *prestazioni* delle singole componenti (Bara). Procedere «dal basso all’alto» significa, al contrario, costruire il modello di un sistema in base alla conoscenza *locale* che se ne ha: come sono fatte e quante sono le sue componenti, come interagiscono tra loro, a quali leggi ubbidiscono, ecc. L’informatico Christopher G. Langton chiarisce questa differenza con il seguente esempio: le equazioni di Navier-Stokes descrivono la dinamica dei fluidi con eccellente approssimazione; tuttavia questa descrizione viene calata sul sistema “dall’alto”, nel senso che tali equazioni si applicano solo al sistema nel suo insieme: *le singole componenti non ubbidiscono ad esse*. La dinamica di un fluido può però essere descritta anche in termini di urti tra le sue particelle; partire dalle leggi di tali interazioni locali, per costruire il modello di un fluido, è un esempio di approccio «dal basso all’alto», approccio che ha il vantaggio di essere decisamente più aderente al modo in cui un sistema è organizzato in natura.

I pionieri della scienza cognitiva studiavano l’intelligenza umana in modo analogo all’approccio di Navier-Stokes alla dinamica dei fluidi, simulando al computer le competenze più elevate del cervello (dialogare su argomenti specifici, giocare a scacchi, scoprire teoremi, ecc.), ma trascurando la fisiologia e la

struttura neurobiologica del cervello stesso. Al contrario, gli studiosi di Intelligenza Artificiale subcognitiva (una branca della teoria della complessità) costruiscono i loro modelli computazionali partendo sempre “dal basso”: le competenze di questi modelli sono più modeste (riconoscere immagini, fare anagrammi, eseguire analogie in domini limitati, ecc.), ma hanno il merito di manifestarsi in maniera *spontanea* - analogamente a quanto avviene nel cervello - se vengono simulate correttamente le prestazioni delle cellule nervose (Hofstadter, Mitchell, Smolensky, Rumelhart, McClelland).

3) Il “nuovo evolucionismo”. I sistemi complessi, secondo alcuni teorici della complessità, rappresentano un'esigua minoranza tra gli innumerevoli sistemi dell'universo. Non solo: è probabile che la complessità dell'universo tenda ad aumentare solo come conseguenza dell'aumento di complessità dei *sistemi più complessi*, al contrario di quanto hanno suggerito molti decenni di interpretazioni assai discutibili dell'evoluzione biologica. Com'è noto, l'evoluzione della biosfera è iniziata con i batteri, gli organismi viventi meno complessi, ed è culminata con l'*Homo sapiens*, la creatura più complessa che esista sulla terra; ora, se si utilizza il valore *medio* come misura della variazione della complessità, e poiché la complessità *media* della biosfera tende a crescere, è facile concludere che la complessità dell'universo abbia una tendenza intrinseca ad aumentare («progresso»). In realtà, dal momento che quasi certamente esiste una soglia di complessità al di sotto della quale un sistema non può dirsi biologico (un cosiddetto “muro sinistro”), la distribuzione dei sistemi viventi in funzione della loro complessità risulta fortemente asimmetrica, con una lunga coda “verso destra”; in questo caso il valore medio non fornisce informazioni soddisfacenti sulla variazione di complessità, perché la media non è *mai* una buona misura della tendenza principale di una distribuzione asimmetrica: basta un unico sistema molto complesso per trascinare il valore medio della complessità verso destra, così come basta un solo Bill Gates per trascinare verso destra il reddito *medio* di tutti gli statunitensi. Per distribuzioni di questo tipo, asimmetriche, è il valore *modale*, e non quello medio, che misura la *tendenza principale* (in una distribuzione di frequenze, la *moda* è il valore della variabile indipendente a cui corrisponde la frequenza più elevata). Come documentano gli studi del geologo e paleontologo Stephen J. Gould e di altri studiosi (Woese, Gold, McShea, Boyajian), il valore modale della complessità biologica è fermo, da sempre, alla complessità degli organismi viventi più vicini al “muro sinistro” della distribuzione: i batteri. In altre parole, secondo i criteri scientifici utilizzati dalla maggior parte dei ricercatori (durata, resistenza, tassonomia, distribuzione, biomassa), gli organismi *meno complessi* della biosfera hanno sempre dominato, dominano e probabilmente domineranno sempre, la vita sulla terra. Estendendo il discorso oltre i limiti della biosfera, è lecito affermare che il valore modale della complessità nell'universo è probabilmente fermo, da sempre e forse per sempre, alla complessità dei sistemi naturali più vicini al “muro sinistro” dell'essere: gas, rocce e altri sistemi chimici prebiotici.

Le precedenti considerazioni hanno due implicazioni teoriche molto importanti: i fenomeni più preziosi della nostra esistenza, come la vita stessa, la coscienza e la cultura, essendo indissolubilmente associati ai sistemi più complessi dell'universo, quali i sistemi biologici, neurobiologici e sociali, risultano essere dei fenomeni isolati e probabilmente rari: *null'altro che microscopiche isole di complessità in uno sconfinato oceano di sistemi non complessi*. La seconda implicazione riguarda le teorie evolucionistiche:

indipendentemente da qualunque altro aspetto interpretativo della storia della vita, esse devono *abbandonare l'idea che sia il progresso a governare l'evoluzione*, cioè l'idea che esista una tendenza attiva ed intrinseca verso l'aumento di complessità; come dimostra la costanza nel tempo della moda batterica, se nella biosfera vi è un aumento della complessità media, esso può essere solo una *tendenza secondaria* e non la tendenza principale. Ciò non significa che le creature più complesse non tendano ad aumentare la loro complessità nel tempo, ma significa che tale fatto non fornisce argomenti per definire l'aumento di complessità come spinta intrinseca della storia della vita.

Avvicinamento di filosofia e scienza, ricerca scientifica basata sulle simulazioni al computer e sull'approccio «dal basso all'alto», rinuncia all'idea di «progresso» da parte delle teorie evuzionistiche: tutti questi cambiamenti nell'epistemologia contemporanea, strettamente connessi allo sviluppo della teoria della complessità, esortano ad inserire quest'ultima nei corsi di filosofia e di scienze matematiche, fisiche e biologiche.

Introduzione alla teoria della complessità

L'espressione «teoria della complessità» compare per la prima volta più di vent'anni fa, in un articolo pubblicato su *Scientific American* (1978), ma la nascita di un “pensiero della complessità” è avvenuta molto prima, alla fine degli anni Quaranta. Sono stati gli studiosi di cibernetica (Wiener, Weaver, Ashby, von Foerster) e di teoria dell'informazione (von Neumann, Shannon, Marcus, Simon) i primi ad occuparsi di complessità; ad essi si sono aggiunti, nel corso degli anni, pensatori provenienti da tutte le discipline. Nel 1984, mentre nel Vecchio Mondo la nascita della nuova epistemologia veniva sancita da una serie di convegni internazionali (“La Science et la Pratique de la Complexité” a Montpellier, “La sfida della complessità” a Milano), nel Nuovo Mondo nasceva quello che sarebbe diventato immediatamente il più importante centro internazionale di studi sulla complessità, il Santa Fe Institute. Attualmente, come fa notare il fisico J. Doyne Farmer, la teoria della complessità è ancora molto frammentaria e assomiglia alla teoria della termodinamica così com'era nella prima metà dell'Ottocento, quando gli scienziati cominciavano a farsi un'idea dei concetti di base ma non si raccapezzavano ancora con le grandezze da misurare.

Possiamo definire la teoria della complessità come *lo studio interdisciplinare dei sistemi complessi adattivi e dei fenomeni emergenti ad essi associati*. (La definizione proposta diverrà più chiara gradualmente, nel corso di questa introduzione.) Poiché si parla di «sistemi complessi», potrebbe sembrare ovvio il fatto che la complessità sia una proprietà oggettiva e intrinseca di certi sistemi. In realtà, secondo i più eminenti teorici della complessità, la cosiddetta complessità “di un sistema” non è tanto una proprietà di tale sistema, quanto piuttosto una proprietà della rappresentazione scientifica attualmente disponibile del sistema, cioè del *modello* del sistema, o più esattamente, poiché è sempre l'*osservatore* del sistema a costruirne un modello, una *proprietà del sistema costituito dall'osservatore che costruisce il modello e dal modello stesso* (Le Moigne, von Foerster, Varela). Adottare questa prospettiva è un passo arduo, perché significa abbandonare

l'*oggettivismo* della scienza classica, cioè la concezione dell'essere come insieme di oggetti manipolabili e misurabili, sottoposti al dominio teoretico e pratico del soggetto umano, e assumere un punto di vista *relazionale e dialogico* nei confronti dell'essere (Morin, Stengers, Bateson). Da questo nuovo punto di vista, per «sistema complesso» si deve intendere un «sistema *il cui modello* attualmente disponibile, costruito dall'osservatore del sistema, è *complesso*». E' evidente che la complessità, così intesa, acquista una dimensione prettamente *storica*: i modelli cambiano nel tempo e ciò che oggi è rappresentato come complesso può non esserlo domani, o viceversa. Ma come valutare la complessità di un modello? Il modello scientifico di un sistema è una *descrizione non ridondante* del sistema in questione; e la complessità è la lunghezza di tale descrizione. In sintesi, si può definire la complessità di un sistema come la *lunghezza minima di una sua descrizione scientifica*, ovviamente eseguita da un osservatore umano (Gell-Mann).

Esistono alcune caratteristiche comuni a tutti i sistemi complessi:

- 1) *Tante componenti più o meno complesse*: in generale, più numerosi e complessi sono i (sotto)sistemi che lo compongono, più complesso è il sistema nel suo insieme; nei sistemi più complessi, i sottosistemi (cioè le componenti) sono a loro volta ad alta complessità; le componenti possono essere "hardware" (molecole, processori fisici, cellule, individui) o "software" (unità di elaborazione virtuali);
- 2) *Interazioni tra le componenti*: le componenti interagiscono passandosi *informazioni* (sotto forma di energia, materia o informazioni digitali); la quantità di connessioni e la presenza di sottostrutture ricorsive e di circuiti di retroazione (i cosiddetti "anelli") aumentano la complessità del sistema, ma le informazioni che le componenti si scambiano non possono essere né troppo numerose (altrimenti il sistema diviene caotico), né troppo poche (il sistema si "cristallizza");
- 3) *Assenza di gerarchia "piramidale"*: se vi è un'unica componente che, da sola, governa il comportamento del tutto, il sistema non può essere complesso; la sua descrizione, infatti, può facilmente essere ridotta a quella del sottosistema-*leader*; diverso è il caso dei sistemi complessi "ologrammatici", in cui ciascuna componente possiede informazioni relative al sistema nel suo insieme (per esempio, ciascuna cellula contiene tutta l'informazione genetica dell'organismo di cui fa parte).

A queste proprietà si aggiunge la caratteristica che rende *adattivi* i sistemi complessi:

- 4) *Interazione adattiva con l'ambiente*: il sistema è tanto più complesso, quanto più numerosi sono i fattori che influiscono sul suo adattamento all'ambiente (dei quali deve tener conto il modello): incidenza di fattori casuali, apprendimento, interazione con l'osservatore del sistema, ecc.; mentre il sistema evolve, i suoi sottosistemi co-evolvono sviluppando strategie di co-adattamento (simbiosi, cooperazione, comunicazione, ecc.).

In base a queste caratteristiche, è possibile classificare i sistemi come segue (Ashby):

- A) Sistemi minimamente complessi: sono i sistemi naturali non biologici, vicini al "muro sinistro" della complessità minima assoluta, e gli artefatti semplici (quelli che i cibernetici chiamano "macchine banali"); rientrano in questa categoria cristalli, nuvole, fiumi, particelle elementari e intere galassie (prive di vita), nonché tutti i dispositivi artificiali completamente descrivibili in termini di ingressi/uscite. I sistemi minimamente complessi non manifestano interazioni adattive con l'ambiente;

B) Sistemi di media complessità: sono gli artefatti complessi (quelli che i cibernetici chiamano “macchine non-banali”), dal termostato al computer, nonché alcuni sistemi prebiotici, come i ribosomi e i virus; sono di media complessità tutti i dispositivi che hanno “stati interni” e che pertanto non sono descrivibili completamente in termini di ingressi/uscite, tutte le *macchine virtuali* implementabili su computer e i virus informatici. I sistemi di media complessità possono essere adattivi e possono manifestare comportamenti nuovi e imprevedibili (“innocentemente emergenti”);

C) Sistemi complessi (complessità medio-alta) e molto complessi: sono tutti i sistemi della biosfera, dai batteri (vicini al “muro sinistro” della complessità biologica minima) alle popolazioni umane (in fondo alla “coda destra” della complessità biologica); tra questi si possono distinguere i sistemi “semplicemente” biologici (complessità medio-alta) e quelli *neurobiologici* (ad alta complessità). I sistemi complessi sono tutti adattivi e ad essi vengono associati i cosiddetti *fenomeni emergenti* (vita, mente, organizzazione sociale, ecc.).

Vari autori sottolineano la differenza tra complessità e *complicazione*: i sistemi *poco complessi* possono essere *molto complicati*, nel senso che il modello scientifico che li descrive può essere difficile da capire (Dawkins); la presenza delle equazioni matematiche, in particolare, può rendere *complicato* il modello, ma non è indizio di complessità: anzi, indica che il sistema è *così poco complesso*, che per descriverlo si può usare la matematica di cui già disponiamo (la matematica necessaria per descrivere interamente un sistema di complessità medio-alta non esiste ancora).

La domanda cruciale a cui i teorici della complessità stanno tentando di rispondere è: quali sono le caratteristiche dell’evoluzione dei sistemi complessi adattivi? La risposta a questa domanda attende ancora una sistemazione teorica rigorosa; attualmente, gli studiosi rispondono usando più l’intuizione che gli strumenti concettuali della scienza. L’idea, o meglio l’intuizione fondamentale, è che i sistemi adattivi di media, alta e medio-alta complessità evolvano verso una regione intermedia tra l’ordine e il caos: il cosiddetto “margine del caos” (Packard, Langton). Il margine del caos è lo stato ottimale posto tra i due estremi di un ordine rigido, incapace di modificarsi senza essere distrutto, come lo stato dei cristalli e dei totalitarismi, e di un rinnovamento incessante, irregolare e caotico, come lo stato degli anelli di fumo e dell’anarchia (Atlan, Waldrop).

Benché per la maggioranza dei sistemi complessi il margine del caos rimanga ancora un’immagine metaforica, è già possibile darne una precisazione rigorosa per alcuni sistemi di media complessità, come gli automi booleani (Kauffman) e le reti neurali (Hopfield). Sistemi come questi sono composti da un insieme di unità di elaborazione, materiali o virtuali, connesse tra loro; ogni unità riceve informazioni da altre unità e, in funzione di tali informazioni, modifica il proprio stato di attivazione; lo stato di attivazione costituisce l’informazione che ciascuna unità trasferisce a quelle a cui è connessa. Poiché in ogni istante la situazione di ciascuna componente del sistema è determinata da un valore numerico che corrisponde al suo stato di attivazione, si può immaginare uno spazio matematico a più dimensioni (tante quante sono le componenti del sistema), in cui ogni punto specifica la situazione di ciascuna unità del sistema. L’evoluzione del sistema può essere rappresentata da una traiettoria in questo spazio (chiamato “spazio degli stati”). Durante l’evoluzione

del sistema, si possono presentare tre situazioni: a) la traiettoria raggiunge un punto o un'orbita (*attrattori*) da cui, nonostante eventuali perturbazioni provenienti dall'esterno, non si allontana più; b) la traiettoria si muove in maniera irregolare e sempre instabile nello spazio degli stati; c) la traiettoria converge verso certi punti o certe orbite (*attrattori*), ma eventuali perturbazioni possono destabilizzarla e allontanarla; queste tre situazioni vengono chiamate rispettivamente: a) ordine, b) caos, c) margine del caos. Quando un sistema si trova al margine del caos, una perturbazione (per esempio, il cambiamento dello stato di un'unità - imposto dall'esterno) può: non avere conseguenze, oppure condurre il sistema verso nuovi attrattori (in questo caso si dice che il sistema è "resiliente") o, ancora, verso il caos.

Attualmente, come si è detto, non abbiamo ancora una dimostrazione incontrovertibile del fatto che i sistemi complessi adattivi evolvono necessariamente verso il margine del caos; tuttavia, *se* la congettura si dimostrerà vera in generale, *allora* avremo la certezza che *tutti i sistemi umani si trovano in uno stato di equilibrio instabile, tra loro e con l'ambiente*, e che anche la più piccola perturbazione potrebbe farli precipitare nel caos irreversibile. Convinti che presto l'ipotesi verrà provata, alcuni teorici della complessità hanno deciso di dedicarsi al problema dello "sviluppo sostenibile", cioè al problema dello "sviluppo al margine del caos"; si tratta indubbiamente di una delle implicazioni pratiche più importanti della teoria della complessità: individuare le condizioni che possono rendere compatibile lo sviluppo globale della società umana con il suo precario equilibrio al margine del caos (Speth, Gell-Mann).

Mentre alcuni ricercatori si dedicano alle implicazioni concrete, altri stanno cercando di sistemare e completare la teoria. Ora, secondo la teoria, che cosa succede quando un sistema complesso adattivo si trova al margine del caos? Il sistema si *auto-organizza*. Definire l'auto-organizzazione, ovvero l'*organizzazione spontanea delle componenti* del sistema, non è affatto facile; essa è stata considerata in molti modi diversi, talvolta fra loro scarsamente conciliabili. I cibernetici la definivano come *aumento di ridondanza* (von Foerster) oppure come *aumento di complessità* (Atlan); gli studiosi della complessità ricorrono invece a concetti come la *stabilità asintotica* (Prigogine), la *retroazione positiva* (Arthur), l'*auto-riproduzione* (Eigen), l'*auto-catàlisi* (Kauffman), lo *stato di criticità* (Bak). L'unica idea su cui sono tutti d'accordo è che l'auto-organizzazione sia possibile esclusivamente al margine del caos: l'ordine "cristallizza" il sistema e il caos rende impossibile qualsiasi organizzazione (spontanea o meno); solo l'equilibrio al margine del caos ha le caratteristiche giuste per l'organizzazione spontanea.

Quando un sistema complesso adattivo si auto-organizza, avviene ciò che rende davvero sorprendenti tali sistemi: *emergono* fenomeni nuovi e imprevedibili, chiamati «fenomeni emergenti». In epistemologia, un fenomeno è detto *emergente* se e solo se: i) ha natura processuale, cioè *non è fatto di materia* (né massa, né energia), ii) può essere descritto utilizzando un linguaggio *qualitativamente diverso* da quello usato per descrivere le altre proprietà del sistema a cui è associato, iii) il suo comportamento *non è previsto* dal modello del sistema, iv) la sua esistenza non dipende dall'esistenza di *singole componenti* del sistema (Morin, Broad, Morgan, Nagel, Bunge). Esempi di fenomeni che hanno tutte queste caratteristiche sono i seguenti: la vita, associata a qualsiasi sistema biologico (cellule, organi, organismi); l'apprendimento e il pensiero, associati al sistema nervoso centrale degli esseri umani e, forse, di altri animali particolarmente

complessi; l'organizzazione sociale, associata ai sistemi sociali di alcuni animali (tra cui insetti sociali ed esseri umani); la cultura e l'economia, associate ai sistemi sociali umani; il cosiddetto "equilibrio ambientale", associato agli ecosistemi.

Come si vede, i fenomeni emergenti sono gli stessi fenomeni che *fanno sì che la nostra esistenza sia possibile e che sia proprio così come la conosciamo*. E' evidente, quindi, che l'importanza della teoria della complessità, la quale si afferma come lo studio interdisciplinare dei fenomeni emergenti, è difficilmente sopravvalutabile. Tuttavia, è opportuno anche riconoscerne gli attuali limiti.

I teorici della complessità utilizzano come principale metodo di ricerca la simulazione su computer; ciò significa che i sistemi complessi adattivi vengono studiati mediante modelli computazionali, i quali però sono solo sistemi *di media complessità*. Il passaggio dai sistemi complessi reali ai loro modelli computazionali comporta di conseguenza un'*immensa* diminuzione di complessità: le componenti del sistema reale, di solito molto complesse, vengono rappresentate da semplici unità di elaborazione; le prestazioni delle componenti, incredibilmente varie nei sistemi reali, vengono rappresentate da semplici regole di interazione locali; gli stessi fenomeni emergenti, infine, vengono rappresentati da fenomeni assai più banali, da qualche autore definiti "innocentemente" emergenti (Dennett, Hofstadter). Lo scarto di complessità tra modelli computazionali e sistemi complessi tende invero a decrescere insieme alla produzione di computer e programmi di simulazione sempre più complessi; resta il fatto che oggi la complessità dei modelli è ancora eccessivamente lontana da quella dei sistemi complessi adattivi reali.

In breve, la "sfida della complessità" è appena iniziata.

Bibliografia (in italiano) introduttiva

- Atlan H. [1979], *Tra il cristallo e il fumo*, Hopeful Monster, Firenze 1987
- Axelrod R. [1984], *Giochi di reciprocità*, Feltrinelli, Milano 1985
- Battaglia L. - Ceruti M. (a cura di) [1998], *Bioetica e cultura della complessità*, Macro, Cesena 1998
- Bocchi G. - Ceruti M. (a cura di) [1985], *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano 1994
- Brockman J. (a cura di) [1995], *La terza cultura*, Garzanti, Milano 1995
- Ceruti M. [1986], *Il vincolo e la possibilità*, Feltrinelli, Milano 1986
- Davies P. C. (a cura di) [1989], *La nuova fisica*, Bollati Boringhieri, Torino 1992
- Dawkins R. [1986], *L'orologiaio cieco*, Rizzoli, Milano 1988
- De Michelis G. [1995], *A che gioco giochiamo*, Guerini, Milano 1995
- Gell-Mann M. [1994], *Il quark e il giaguaro*, Bollati Boringhieri, Torino 1997
- Gould S. J. [1996], *Gli alberi non crescono fino in cielo*, Mondadori, Milano 1997
- Hofstadter D. R. (a cura di) [1995], *Concetti fluidi e analogie creative*, Adelphi, Milano 1996
- Manghi S. (a cura di) [1998], *Attraverso Bateson*, Raffaello Cortina, Milano 1998
- Morin E. [1977], *Il metodo*, Feltrinelli, Milano 1985
- Morin E. [1990], *Introduzione al pensiero complesso*, Sperling & Kupfer, Milano 1993
- Nicolis G. - Prigogine I. [1989], *La complessità*, Einaudi, Torino 1991
- Pagels H. R. [1988], *La cultura dei computer*, Bollati Boringhieri, Torino 1989
- Prigogine I. [1980], *Dall'essere al divenire*, Einaudi, Torino 1986
- Prigogine I. - Stengers I. [1979], *La nuova alleanza*, Einaudi, Torino 1981
- Tonfoni G. [1991], *Sistemi Cognitivi Complessi*, Pagus, Treviso 1991
- von Foerster H. [1987] (a cura di Ceruti M. - Telfner U.), *Sistemi che osservano*, Astrolabio, Roma 1987
- Waldrop M. M. [1992], *Complessità*, Instar Libri, Torino 1996

Il sito Internet del Santa Fe Institute è <http://www.santafe.edu>