

NUOVACIVILTÀ DELLEMACCHINE

Ottobre/Dicembre 4/2012

Complessità

Rai Eri

Complessità in fisica: che cos'è il cambiamento?

IN FISICA LA COMPLESSITÀ FA IL SUO INGRESSO NELLA FISICA STATISTICA PER POI APPARIRE NELLO STUDIO DEI COMPORTAMENTI COLLETTIVI NELLA MATERIA CONDENSATA E DELLA SOFT MATTER, E DA ULTIMO NELLA NUOVA TEORIA DEL CAMBIAMENTO. RIDUZIONISMO ED EMERGENZA NON SONO APPROCCI OPPOSTI BENSÌ COMPLEMENTARI.

DI **IGNAZIO LICATA**

I. SCIENZA “COMPLESSA” MA “GALILEIANA”

In questi ultimi anni il termine “complessità” ha conosciuto una diffusione crescente e viene usato in più ambiti disciplinari. Negli ultimi anni Edgar Morin ha proposto una distinzione, che si ispira a quella utilizzata in fisica relativistica, tra complessità ristretta e generale (Morin, 2005). Quella ristretta consisterebbe nello studio scientifico dei sistemi complessi, quella generale attiene invece alle massime questioni epistemologiche. Un fisico praticante avrebbe più di un motivo di perplessità davanti ad una distinzione siffatta. Infatti nella ricerca scientifica è piuttosto naturale considerare gli aspetti metodologici di un problema come uno strumento critico per individuare gli approcci ottimali ad un problema. In altre parole, non esiste un'epistemologia “sopra” la pratica scientifica, generalissima, ma si tratta di un momento interno alla ricerca. Inoltre, pur condividendo l'ispirazione costruttivista del pensatore francese, anche questa rischia di apparire una posizione *naive* se non la si confronta con i problemi e in particolare con la “resistenza” del mondo ai nostri modelli (Licata, 2009; 2011). Infine, quando andiamo a guardare alcuni dei punti chiave della complessità “generale” è la perplessità ad

Ignazio Licata

Institute for Scientific Methodology, Palermo. Docente di Teoria della Complessità, Università di Messina.

avere il sopravvento dal punto di vista scientifico. Ad esempio la critica al riduzionismo come “male assoluto”. Anche questa contiene un ovvio *quantum veritatis* ma portata all'estremo senza un opportuno contesto teorico e metodologico rischia di sfociare in ovvietà olistiche.

Come ben sapevano Norbert Wiener e Ludwig von Bertalanffy (Conway & Siegelman, 2005; Wiener, 2012; Bertalanffy, 2004) parlare in astratto di sistemi, costituenti e confini senza alcun riferimento a specifiche dinamiche fisiche, biologiche, sociali ed economiche è assai poco proficuo, e possiamo dire che le promesse mancate della cibernetica e della teoria dei sistemi sono più legate all'assenza di valide implementazioni che a pecche teoriche originarie. I suggerimenti di Wiener sui problemi squisitamente matematici legati allo studio di sistemi con più scale di grandezza, dai processi markoviani alla cognizione, e quelli di Bertalanffy sui limiti del vecchio fisicalismo in biologia, non sono stati adeguatamente sviluppati. C'è stato, per così dire, meno sviluppo aristotelico e troppa astrazione platonica. Inevitabilmente questo porta il linguaggio sistemico-relazionale a diventare vago e inefficace. Ci sembra che affermazioni come “tutto è connesso con tutto” e “il mondo è troppo complesso per essere rispecchiato dai nostri modelli” non costituiscano propriamente un successo tale da giustificare la dichiarazione dell'avvento di un nuovo “paradigma” in senso kuhniano. Non vogliamo qui contestare la semantica di altre discipline, ma dal punto di vista della fisica una contrapposizione netta tra riduzionismo (spiegazioni centrate sugli elementi costituenti) ed emergenza (attenzione agli aspetti globali e collettivi) non ha alcuna cittadinanza. Si tratta piuttosto di approcci che si completano e giustificano a vicenda.

Questi punti sono ben chiariti nel fondamentale articolomanifesto del 1972 del Nobel per la fisica Philip Anderson, *More is Different*, al quale vogliamo associare i più recenti lavori di R. Laughlin, D. Pines e Co., *The Theory of Everything* e *The Middle Way*. Ed è recente l'uscita della raccolta di scritti di Anderson, *More and Different* (Anderson, 1972; Laughlin, 2005; Laughlin & Pines, 2000; Laughlin e co., 2000; Anderson, 2011).

In questi lavori viene chiarito in modo esemplare che il problema non è tanto il riduzionismo, quanto l'ipotesi tacita che spesso questo sottende, ossia quello che ironicamente Anderson chiama il *costruzionismo*: è innegabile infatti che la ricerca ha individuato dei costituenti chiave a più livelli energetici ed organizzativi, come può essere ad esempio la sequenza "classica" molecole-atomi-nuclei-quark..., ma è assolutamente illusorio pensare che esista un livello fondamentale dal quale poter dedurre tutto il resto girando la manopola matematica a partire soltanto dalle interazioni fondamentali! Un caso evidente può essere quello di poter ricavare tutta la biologia dallo studio dell'interazione tra cariche elettriche. Il riduzionismo inteso in questo modo sfocia in un "nient'altro che" in grado di banalizzare e sviare i problemi. Al di là di dichiarazioni da salotto che tendono ad essere prese troppo sul serio e alla lettera, ogni scienziato sa che la costruzione di un modello efficace necessita di considerare più scale di grandezza e livelli organizzativi, e ognuno richiede un'attenzione particolare e precise ipotesi di "raccordo" tra i vari livelli. Si può dichiarare che il mondo è fatto di "oggetti fondamentali" - come dovrebbero essere le famose brane, i loop o i twistor -, ma ogni scienziato sa benissimo che la descrizione della pluralità di forme e dinamiche che osserviamo non è minimamente toccata da affermazioni così generali. Dichiararsi anti-riduzionista è dunque utile quanto professare di essere un riduzionista, perché nel fare scientifico nessuno si sognerebbe di trasformare affermazioni di questo tipo in prassi metodologica, e per ragioni molto precise che hanno a che fare proprio con il concetto stesso del fare scienza, ossia costruire modelli basati su osservazioni.

Un riduzionismo "radicale" è impraticabile per diverse ragioni; ci limitiamo qui a ricordare le più importanti ed immediate. Un'attenzione esclusiva ai "costituenti" introduce implicitamente una asimmetria tra leggi e condizioni al contorno. Una legge fisica in genere ci dice qualcosa su una classe di fenomeni. Ma all'interno della classe quel particolare fenomeno si realizzerà in situazioni particolari che sono fisicamente rilevanti e possono cambiare notevolmente la fisica del problema. In generale i sistemi complessi sono sistemi in cui il gioco generale delle

condizioni al contorno e dei vincoli globali è importante quanto le leggi relative ai costituenti coinvolti. In alcuni casi fortunati (in genere resi tali da opportune semplificazioni nell'apparato sperimentale ed in quello teorico), si ha una pluralità di comportamenti possibili, tutti compatibili con le caratteristiche dei costituenti, e sarà possibile fare qualche debole previsione asintotica su alcuni di questi comportamenti. In altri non sarà possibile neppure una previsione di questo tipo.

Sono questi i luoghi propri della manifestazione di proprietà emergenti, che non hanno nulla di misterioso e non sono affatto in contrasto con l'approccio riduzionistico, ma lo completano appunto quando il "more" rende gli esiti del processo "different" rispetto a una situazione semplificata di poche particelle in gioco con semplici vincoli fissi. Inoltre non è raro, anche senza scomodare i sistemi biologici e sociali, che sotto condizioni particolari e con molti costituenti in gioco cambiano non soltanto i comportamenti generali del sistema osservato, ma la stessa natura dei "costituenti". Esempio è il caso della superconduttività, in cui al di sotto della temperatura di Curie gli elettroni si legano quantisticamente in coppie di Cooper, cambiando la loro natura da fermioni a bosoni (cambia dunque la loro statistica, il loro modo di "stare assieme"), e permettendo alla corrente di scorrere indefinitamente all'interno del reticolo conduttore. Un altro caso classico è quello del laser, in cui la cavità in cui sono "imprigionati" gli elettroni permette loro di sincronizzare l'emissione di fotoni favorendo l'emergere di un fascio elettromagnetico estremamente coerente. A volte, "costituente" è soltanto la comoda etichetta "statica" di un processo. Ad esempio il "fonone" è la perturbazione sonora quantizzata che si crea quando un'onda sonora attraversa un reticolo cristallino. Naturalmente il fonone non esiste fuori dal cristallo, come il fotone non esiste fuori dall'onda elettromagnetica (per quanto alcune descrizioni imprecise di esperimenti di ottica quantistica facciano credere di sì!). Oggetto di recenti verifiche sperimentali è il fenomeno della formazione "spontanea" dei domini di coerenza nella materia condensata, previsto teoricamente da R. Dicke e successivamente studiato da G. Preparata, E. del Giudice e G. Vitiello (Preparata, 2002;

1995; Yinnon & Yinnon, 2009) Si tratta della capacità degli oscillatori quantistici in situazioni di densità critica di legarsi in modo analogo ai fotoni coerenti nel laser. In questo modo una scansione temporale si trasforma in un dominio spaziale che emerge con caratteristiche nuove. In particolare, i domini di coerenza si stanno rivelando un'impalcatura teorica molto promettente per comprendere le tante anomalie dell'acqua e l'origine di molti processi organizzativi in biologia. Citiamo tra tutti un recente risultato sulle proteine viste come spugne frattali che agiscono in acqua da loro stesse strutturate. Sono tutti esempi in cui l'approccio analitico e riduzionista e quello globale ed emergente si legano assieme per dare una visione più completa della ricchezza dei fenomeni fisici.

La radice della fisica è galileiana, ma questo non vuol dire sposare ingenuamente il riduzionismo, il meccanicismo ed il determinismo come metodologia unica ed universale. Il messaggio più forte e preciso della scienza galileiana è scegliere cosa osservare e come osservarlo, creare una coerenza operativa tra termini teorici e procedure sperimentali. Sotto questo punto di vista le proprietà emergenti non sono una stranezza epistemologica su cui versare fiumi d'inchiostro di definizioni astruse, ma semplicemente osservabili su scale tipiche delle dinamiche globali di certi processi. E sono ben note in fisica sin dalle formulazioni della fluidodinamica, della termodinamica e della teoria statistica dei gas.

2. UNA STORIA ANTICA DAL CUORE MATEMATICO: MICRO, MACRO E MESO

In realtà la fisica è stata sempre “complessa” almeno quanto “riduzionista”. L'universo di Newton è completamente descritto da forze che agiscono su particelle intese come sferette puntiformi (un piccolo peccato di *hybris* tipico delle modellizzazioni matematiche, la cui forza non consiste tanto nel “realismo” descrittivo dell'oggetto ma piuttosto nel range di effettiva applicabilità del modello). In un passo famoso del suo *Essai philosophique sur les probabilités* (1820), P. S. de Laplace immaginò che un'entità in grado di tenere a mente la posizione e la velocità di ogni particella avrebbe potuto calcolare passato,

presente e futuro dell'universo semplicemente utilizzando le leggi di Newton. Oggi potremmo pensare al demone di Laplace come ad un supercalcolatore di inaudita potenza. Ma sappiamo anche che un programma di questo tipo oltre ad essere computazionalmente impraticabile (una mole di gas contiene un numero di particelle dell'ordine del numero di Avogadro, 10^{23}), è anche fortemente irrealistico. Un universo siffatto sarebbe infatti costituito da un incessante moto browniano di urti elastici senza memoria, fluttuazioni casuali su più scale e dunque la formazione di strutture sarebbe un puro miracolo di Poincaré su tempi lunghissimi, una sorta di effimero eterno ritorno in forma matematica. Oggi sappiamo che la formazione delle strutture altamente organizzate che osserviamo è legata ad una straordinaria varietà di interazioni e di comportamenti collettivi sotto condizioni iniziali ed al contorno che, risalendo attraverso una catena di scale, troveranno forse la loro spiegazione ultima in una storia cosmologica unitaria della materia e della sua organizzazione. Eppure anche in un universo ipersemplificato come quello di Newton è già presente l'emergenza.

Uno dei più grandi successi della fisica teorica fu infatti la ricerca di correlazioni matematiche tra proprietà microscopiche delle molecole e comportamenti di un gas perfetto. Questa mirabile connessione è merito imperituro dei lavori di W. Gibbs, L. Boltzmann e J. C. Maxwell che, utilizzando il raffinato impianto statistico-probabilistico iniziato dai lavori dei matematici del Settecento, trovarono una connessione tra grandezze macroscopiche come pressione e temperatura e proprietà particellari dei moti molecolari. Ma abbiamo già qui una esemplare realizzazione del "more is different" di Anderson con comparsa di proprietà emergenti; che significato avrebbero infatti i concetti di temperatura o di entropia (quest'ultima legata al "disordine" molecolare, ovvero alla perdita di correlazione tra livelli energetici), per un universo con una singola particella? Ma c'è di più. Nelle equazioni di un punto materiale (sia quelle classiche che quantistiche), non c'è alcuna asimmetria temporale; l'equazione non cambia forma né significato fisico sostituendo il tempo t con $(-t)$. In altre parole, "girando il film al contrario" non si vede nulla di fisicamente impossibile. Lo sarebbe

invece vedere le molecole di un gas che dopo essersi diffuso invertono il loro moto per tornare nella boccetta! Questo avviene perché agisce il “more is different” in congiunzione con la particolarità “improbabilità” delle condizioni iniziali ed al contorno (il gas nella boccetta all’istante t_0). Emerge dunque dai comportamenti collettivi una freccia del tempo. Abbiamo già qui tutti gli ingredienti della complessità fisica, e la possibilità di tentare una definizione informale ma sufficientemente generale e corretta.

Parliamo di complessità quando si pone il problema non banale delle correlazioni tra scale diverse di un sistema fisico, come quelle microscopiche, che riguardano appunto i cosiddetti “costituenti elementari”, quella macroscopica, che ci suggerisce convenzionalmente in base a scelte operative una distinzione ideale tra sistema e ambiente esterno mediata da parametri che ne fissano le relazioni, e la scala mesoscopica, quella che Pines e Laughlin chiamano “la terra di mezzo”, quella dove si manifesta la complessità e l’emergenza, e dove l’approccio puramente riduzionistico fallisce. Perché la terra di mezzo è di difficile conquista? Alcuni degli esempi fatti ci suggeriscono già la risposta. Il concetto di “sistema” non va pensato come una distinzione netta e statica tra “ciò che è dentro” e “ciò che è fuori” (per intenderci, un po’ come pensiamo i diagrammi di Venn nella teoria degli insiemi). E bisogna considerare che le relazioni tra costituenti e tra sistema e ambiente non sono fissi, ma si modificano. Ed è chiaro che certi valori dei parametri e in generale le inter-relazioni tra sistema e ambiente possono indurre alcune forme organizzative dei costituenti piuttosto che altre. In questo senso la complessità dal punto di vista fisico è più propriamente una fisica dell’emergenza e dell’organizzazione, e dal punto di vista matematico pone problemi formidabili che riguardano sostanzialmente la possibilità di descrivere un processo attraverso opportuni approcci analitici.

Costruire un modello matematico significa fare delle scelte su variabili e parametri. In alcuni casi ci si riesce, il fenomeno è in qualche modo “catturato” nei suoi tratti essenziali da un modello formale esprimibile tramite un’equazione ed una classe di soluzioni.

Si tratta di casi “fortunati” in cui l’approccio riduzionista è sufficiente (purché integrato da opportune condizioni al contorno), e permette la costruzione di una trattazione analitica esatta o comunque affidabile. Ma nella maggior parte dei casi questo non è possibile, e la costruzione del modello è fatta in modo “mirato”, ossia tende a descrivere certi aspetti e inevitabilmente a trascurarne altri, selezionando tra i comportamenti osservabili. Questa potrebbe essere una definizione di complessità, legata al concetto di apertura logica.

3. COMPLESSITÀ COME APERTURA LOGICA

Gran parte dei sistemi con cui si lavora, soprattutto in biologia e scienze cognitive, non sono sistemi chiusi con relazioni fisse tra costituenti e ambiente, ma sistemi aperti, lontani dall’equilibrio, attraversati da un flusso continuo di materia ed energia, che modificano la loro organizzazione interna e la loro capacità di gestire informazione. Questo flusso si distribuisce all’interno del sistema in relazione alla struttura del sistema e alla sua natura, “nutrendolo” energeticamente. È abbastanza intuitivo comprendere che un sistema molto strutturato ed organizzato, che deve sostenere una grande attività informazionale, avrà bisogno di un gran numero di vincoli che gli impediscano di contrastare l’entropia per mantenere la sua struttura dinamicamente articolata ed attiva. Più alto è il numero di vincoli più il sistema consumerà energia e sarà in grado di elaborare informazione in modo raffinato. Possiamo considerare il numero di vincoli come il grado di apertura logica del sistema. Più è alta l’apertura logica di un sistema, meno sarà efficace l’approccio riduzionistico perché saranno possibili una pluralità di comportamenti osservabili. E’ possibile dimostrare che un sistema ad alta apertura logica non è descrivibile da un singolo modello formale. Ancora una volta, va ribadito che questo non significa rinunciare ai principi della scienza galileiana, ma diventare sempre più consapevoli che un sistema di questo tipo non può essere “zippato” in una descrizione unica, e necessiterà per il suo studio di una modellistica varia, in relazione ai particolari aspetti in esame (Minati et al. 1998; Licata, 2008a).

Il ragionamento fatto può essere facilmente posto in termini di variabili macroscopiche, microscopiche e mesoscopiche. Un sistema a bassa apertura logica è un sistema con pochi vincoli; la struttura è relativamente semplice e fissa, ed è determinata dalle relazioni dei costituenti. È il caso di un cristallo o di una macchina di Turing (ricordiamo che quest'ultima è lo schema base dei modelli simbolici della cognizione umana). In entrambi i casi la molecola o il simbolo possono essere visti come gli "atomi" immutabili della struttura, il passo reticolare o le sequenze simboliche- il mesoscopico- sono strettamente determinate in un caso dalle interazioni molecolari nel reticolo e nell'altro dall'algoritmo, e la struttura macroscopica- il cristallo o l'output della Macchina di Turing- sono deterministicamente prodotti dunque dalle relazioni tra i costituenti microscopici. Al contrario un sistema con altissima apertura logica consente un ampio numero di forme aggregative tra i costituenti, e dunque le risposte globali del sistema non possono essere dedotte dai costituenti, ma spesso avviene il contrario: sono i vincoli generali che influenzano certe forme organizzative piuttosto che altre, secondo una causalità circolare di tipo, per utilizzare i termini informatici, *top down* e *bottom up*. Ed è proprio nella ricchezza dei comportamenti della "terra di mezzo" mesoscopica che si pone il problema della pluralità e dei *range* di applicabilità dei modelli matematici, ed in essa che risiede d'altra parte la straordinaria varietà delle forme naturali, in particolare della materia vivente.

Un esempio semplice che riassume questo discorso sono i modelli formali della cognizione. L'intelligenza artificiale ed i sistemi simbolici e sub-simbolici potrebbero essere visti come un approccio riduzionistico a bassa apertura logica: ogni simbolo corrisponde ad un oggetto - caratteristica che viene detta "trasparenza semantica" -, e catene algoritmiche molto strutturate fissano le sequenze logiche e dinamiche. Gli approcci connessionisti (come le reti neurali) invece lavorano con modelli che si deformano dinamicamente (modificano le connessioni tra nodi) in relazione agli input dell'ambiente ed alla storia del sistema. Si tratta di descrizioni ad alta apertura logica, che rinunciano alla trasparenza semantica in favore di una maggiore flessibilità dinamica

ed è questo che permette, a parità di costituenti, una enorme varietà di emergenze mesoscopiche. Va notato che nessuno dei due approcci è più “vero” dell’altro. Si tratta di considerare l’efficacia descrittiva in relazione a ciò che vogliamo descrivere. Gli approcci simbolici si sono mostrati efficaci nei mondi semanticamente chiusi, dove per quanto complicati i comportamenti sono ben definiti ed univoci (gli scacchi, alcuni aspetti elementari della logica formale, semplici compiti di classificazione), ma falliscono dove la dinamica del sistema richiede una struttura organizzativa rapidamente variabile; qui l’approccio connessionista si mostra più efficace, come nei processi di apprendimento. Infine, entrambi sono *toy models* rispetto alla straordinaria complessità del cervello, per spiegare la quale sono stati invocati addirittura principi quantistici, come hanno ipotizzato R. Penrose e S. Hameroff, per citare solo i più noti. Questa è una tipica reazione alla complessità. Se non si riesce a costruire un modello unico e definitivo di qualcosa utilizzando un dominio concettuale noto, si pensa che il gioco potrebbe riuscire cambiando dominio. Nel caso del cervello, ad esempio, l’incapacità di costruire un modello classico del cervello ha portato ad invocare un nuovo tipo di fisica. Ma è proprio l’apertura logica a suggerirci che in alcuni sistemi semplicemente un modello unico, definitivo ed omnicomprensivo, non c’è. E nel caso del cervello non è tanto la fisica classica che fa acqua, quanto il modo di costruire i modelli. Non abbiamo a che fare con una rete neurale, per quanto complicata, ma con un sistema biochimico denso e stratificato, messo a punto dall’evoluzione in migliaia di anni, raffinando processi di sincronizzazione e di feedback che sfruttano il rumore e richiedono modelli altamente non-lineari (Licata, 2008b; Scott; 1998).

L’apertura logica ci ha offerto la possibilità di una comprensione della complessità che lega la struttura fisica di un sistema alla sua capacità di elaborare informazione. Il numero di vincoli è un’indicazione del grado di apertura logica, e più alto è questo numero più è ricca la pluralità di comportamenti esibiti dal sistema. Non ci dice però quale approccio utilizzare, e come costruire un modello. Va detto subito che non esiste - come è facile immaginarsi - una procedura

generale per costruire modelli di sistemi complessi. Sono stati studiati però un buon numero di approcci validi per ampie classi di sistemi, che ora passeremo rapidamente in rassegna.

4. SCENARI PER I SISTEMI COMPLESSI: MODELLI IDEALI E NON IDEALI

Uno degli obiettivi più ambiziosi della fisica teorica contemporanea è la ricerca di scenari in grado di rendere conto dell'aumento di organizzazione di un sistema e su come questi sistemi riescano a tenersi in equilibrio meta-stabile. Benché sia ormai entrato nell'uso comune, il termine "auto-organizzazione" va ricordato che è sempre l'interazione tra i vincoli del sistema e le loro modificazioni sotto il flusso di materia-energia dell'ambiente a produrre variazioni nella struttura, e dunque a rigore bisognerebbe sempre parlare di etero-auto-organizzazione. Nei casi in cui è possibile applicare i principi di conservazione - ad esempio avere una funzione hamiltoniana per l'energia-, si parla di casi ideali, ed è possibile procedere a un'analisi in grado di dirci come si modifica l'informazione del sistema in relazione alla variazione del suo spazio delle fasi, ossia lo spazio delle osservabili, sotto specifiche condizioni al contorno ed iniziali. E' possibile identificare tre classi generali di sistemi: i conservatori di informazione (sistemi che conservano perfettamente l'energia), i dissipatori di informazione (sistemi in cui l'entropia ha il sopravvento) e i sistemi amplificatori di informazione. Prima di trattare questi ultimi, i più interessanti dal punto di vista dell'emergenza e dell'organizzazione, notiamo che l'energia che si conserva nel primo tipo di sistemi è quella che "sostiene" le osservabili caratteristiche: ad esempio la variabile angolare e la velocità nel caso di un pendolo senza attrito. Quando c'è dissipazione le variabili di stato tendono a smorzarsi e cancellarsi, e l'energia si disperde nel sistema e nell'ambiente sotto forma di energia particellare. La situazione è dunque quella di un'informazione macroscopica che si trasforma in informazione microscopica delle singole particelle. I due principi della termodinamica possono così legarsi in uno: l'informazione si conserva sempre (primo principio) ma la dissipazione la trasforma da macroscopica in microscopica (secondo principio).

Gli amplificatori di informazione sono sistemi in cui c'è emergenza. L'ampliamento dello spazio delle fasi significa che entrano in gioco continuamente nuove variabili. Non tutte naturalmente hanno la stessa importanza ai fini dell'analisi del comportamento globale del sistema, ed uno dei grandi problemi fisico-matematici è costituito proprio da come operare una selezione significativa. Aumento dello spazio delle fasi vuol dire che emergono nuove osservabili e nuovi tipi di comportamento che indicano processi altamente selettivi di immagazzinamento dell'energia, bilanciamento con i processi entropici, nuovi canali di gestione dell'informazione. Si tratta in generale di sistemi strutturalmente instabili, altamente non-lineari, che tendono a "sentire" e "incorporare" l'effetto delle fluttuazioni ambientali. Chiariamo qui che per informazione intendiamo l'informazione sintattica, sia nelle forme tradizionali di Shannon-Turing, che somigliano a una sorta di "fotografie" dell'informazione del sistema in istanti diversi, che in quelle dinamiche di Sinai-Kolmogorov, che permettono invece di misurare più sottilmente le variazioni. Senza entrare qui in dettagli matematici, si tratta in entrambi i casi non del "significato" dell'informazione (che pure è rilevante nei sistemi biologici e cognitivi), ma delle stringhe di osservabili che il sistema in evoluzione produce nello spazio e nel tempo e che indicano la capacità, grazie alla sua complessità interna o alta apertura logica, di rispondere agli input ambientali in modo non banale.

Nel caso di amplificatori di informazione in tempo polinomiale è possibile osservare una caratteristica biforcazione che innesca una fase di crescita e auto-organizzazione fino al suo assestamento su una struttura ben definita e generalmente meta-stabile. Si tratta di sistemi aperti che si auto-organizzano grazie a processi non-lineari che consentono un "bilanciamento" tra l'energia libera in entrata e l'entropia in uscita, chiamate da I. Prigogine Sistemi dissipativi. Esempi classici sono il modello di Turing della morfogenesi, le reazioni chimiche oscillanti di Belusov-Zhabotinsky, il modello predatore-preda di Lotka-Volterra, le celle di convezione di Bènard, il Laser, gli iper-cicli di Eigen. Contrariamente a ciò che pensavano però I. Prigogine e R. Thom (che si era proposto una caratterizzazione geometrica delle

biforcazioni con la sua teoria delle catastrofi), le strutture dissipative non sembrano essere la panacea per i fenomeni di auto-organizzazione. Meno “universali” di quanto si pensava all’inizio, un teorema di N. Kopell e D. Rouelle dimostrò che c’è un limite alla complessità generabile con questi processi (Bertuglia & Vaio, 2011; Prigogine & Kondepudi, 2002; Prigogine, 1997; Thom, 1980; Arnold, 1990; Kopell & Rouelle, 1986). L’attenzione si è perciò spostata verso gli amplificatori esponenziali di informazione. Si tratta di sistemi dove l’instabilità non-lineare è molto forte ed implica effetti caotici, ed in cui le biforcazioni si presentano con tale frequenza e varietà da rendere impossibile ogni tentativo di ordinata classificazione geometrica alla Thom. I sistemi caotici sono estremamente sensibili alle condizioni iniziali o ad ogni pur piccola perturbazione: condizioni iniziali vicinissime nello spazio di fase possono dar luogo a traiettorie completamente diverse e ogni instabilità viene amplificata. È questo il famoso “effetto farfalla”. Diversamente dalle strutture dissipative che “reggono” abbastanza bene le perturbazioni, sia ristabilendo la loro struttura e la loro autonomia, sia “assorbendola” per passare ad un nuovo livello di auto-organizzazione, i sistemi caotici si “impadroniscono” immediatamente di una fluttuazione e l’amplificano fino ad estenderla all’intero sistema, provocando comportamenti nuovi ed assolutamente inaspettati. È sotto questo aspetto che il tipo di amplificazione dell’informazione realizzata dai sistemi caotici può condurre a stati più ordinati. Gli attrattori caotici agiscono come “miscelatori” di ordine e disordine, favorendo imprevedibilmente ora l’uno ora l’altro. A parte i modelli della turbolenza, i sistemi caotici sono studiati proprio per questa loro interessante capacità di interagire in modo “creativo” con il “rumore” esterno. I. Tsuda e K. Matsumoto hanno mostrato come alcuni sistemi caotici a cui viene aggiunta l’azione di fluttuazioni mostrano bruscamente un comportamento collettivo ordinato, come ad esempio l’emergere di oscillazioni armoniche (Matsumoto & Tsuda, 1983). In breve, in alcuni casi, caos più caos può dare luogo a strutture ordinate. Partendo da questo risultato e considerando che il sistema nervoso umano è un amplificatore d’informazione, J. S. Nicolis, I. Tsuda ed altri hanno

sviluppati modelli dell'attività neurale in cui l'attività mentale viene vista come l'incessante "lavorio" di più attrattori caotici in condizioni di rumore. Quando uno stimolo esterno entra nel sistema può così indurre una "risposta" ordinata: idee, connessioni, processi di memorizzazione e di riconoscimento e così via. In altre parole, la caoticità neurale agisce come un elemento "attentivo", pronto a "catturare" rapidamente nuovi input. (Gleick, 2000; Nicolis & Tsuda, 1999).

È interessante notare che se la classe polinomiale (A) produce strutture limitatamente interessanti, la classe esponenziale (B) non permetterebbe alcuna regolarità. Il nostro mondo sembra essere un singolare "compromesso" tra classe (A) e (B), con la capacità di mischiare elementi di meta-stabilità con un po' di caos come catalizzatore di transizioni ordine/disordine. Nelle strutture discrete, come gli automi cellulari, questo corrisponde alla famosa classe IV di Wolfram-Langton. Non è ancora del tutto chiaro se esiste una classe intermedia tra (A) e (B) nel linguaggio continuo delle equazioni differenziali, equivalente alla classe IV discreta, e allo stato attuale delle conoscenze è un problema aperto. Ma è sicuramente vero che il nostro mondo è costituito da una miscela di processi continui e strutture discrete (Wolfram, 2002; Waldrop, 1996).

Abbiamo detto che non tutte le variabili hanno la stessa importanza. Durante la dinamica del processo. In effetti, in un'ampia classe di fenomeni, H. Haken e i suoi collaboratori hanno osservato come nelle transizioni da uno stato meno ordinato ad uno più organizzato emergono, ad un punto critico che dipende dalla natura del sistema, alcuni parametri ordinatori che "pilotano" il sistema verso la nuova fase (*slaving principle*). Questi comportamenti sono "universali", ossia le caratteristiche della transizione non dipendono dal sistema specifico. Tutto ciò è intuitivamente comprensibile se pensiamo all'apertura logica e ai vincoli. L'ottimizzazione energetica e le condizioni al contorno limitano in qualche modo la "pura" casualità del sistema e fanno sì che si affermino fluttuazioni abbastanza forti da indurre una biforcazione in cui una fluttuazione investe l'intero sistema e permette l'instaurarsi

dei parametri ordinatori. Si potrebbe dire che durante la transizione di fase le diverse parti del sistema sono in forte correlazione tra loro e sono indotte verso nuove forme di cooperazione. Qualcosa di simile è stato dimostrato anche per le transizioni al caos (Haken, 1983, 2005, 2010, 2012).

Esiste un'altra grande classe di modelli ideali, che sono quelli ispirati al linguaggio della teoria quantistica dei campi. Si tratta di una teoria matematica molto raffinata che studia le forme cooperative dei modi del campo sotto opportune condizioni critiche e l'emergere di correlazioni long-range (bosoni di Goldstone e rottura spontanea di simmetria verso fasi più vincolate). Se la sintassi della Quantum Field Theory è davvero la più generale possibile per descrivere i processi d'emergenza, e soprattutto se è in grado di offrire una base teorica così potente da inglobare i sistemi dissipativi e caotici è ancora una questione aperta. Notiamo però che se il mondo classico emerge da quello quantistico, almeno i "semi informativi" del primo devono appartenere a processi quantistici. E del resto sono sempre più numerosi gli studi su effetti quantistici di interesse nello studio dell'organizzazione biologica (Licata, 2008c; 2010; Arndt et al. 2009).

5. I VESTITI NUOVI DELL'OSSERVATORE?

Le riflessioni fin qui proposte miravano a rivelare la forte linea di continuità tra l'approccio galileiano e la complessità, mostrando che sin dagli inizi la fisica nasce con il problema di scegliere le "osservabili" giuste. Chi invoca facili "rivoluzioni paradigmatiche" forse dimentica che comprendere la natura implica sempre una serie di scelte cognitive mirate ed attive, frutto di un sapiente accordo tra dati dell'osservazione e strumenti teorici. La natura non è mai ovvia, e tantomeno "già lì". Come abbiamo detto, fa resistenza ai nostri modelli. E non è un gioco di parole ricordare a questo punto l'acutissima analisi di Galilei sull'attrito e il principio d'inerzia contro l'oggettivismo ingenuo della posizione aristotelica sulla "spinta motrice". Anche in quel caso, dal punto

di vista termodinamico, si ripropone il gioco tra informazione macroscopica fissata dalle leggi di conservazione che si traduce in informazione microscopica generata dai processi dissipativi indotti dall'attrito. Nei sistemi ad alta apertura logica l'emergenza di nuovi comportamenti, pattern e proprietà significative ha portato i fisici a rinunciare – almeno per quello che riguarda la “terra di mezzo” -, ad una teoria del tutto, ma è almeno dai tempi della meccanica statistica che il fisico teorico sa bene che l'approccio riduzionista non può essere “ingenuo” e deve essere integrato con altri mirati alle caratteristiche globali di tipo sistemico-relazionale, più adatti per la comprensione dei comportamenti collettivi. Per arrivare poi alla teoria del cambiamento, dove la strategia cognitiva della scelta delle “giuste” variabili configurazionali non può affidarsi a comodi e ben noti bagagli teorici, ma richiede tutta l'arte di saper osservare e costruire modelli. A questo punto si potrebbe dire che forse la vera lezione epistemica, “generale”, della complessità consiste nel considerare la conoscenza del mondo come una sorta di equilibrio omeo-cognitivo che si realizza tra'osservatore e l'osservato tramite teorie e modelli, e che ha ben poco senso parlare di un mondo “senza osservatori”(Licata, 2012). Questo non vuol dire sposare forme di relativismo. Anzi, c'è persino un teorema recente che mostra come ad un osservatore che fa parte di un sistema si pongono dei problemi di “decidibilità” nel senso di Gödel (Brauer, 1995). Del resto, anche la teoria dell'apertura logica può essere considerata una lettura fisica e informazionale del teorema del grande logico austriaco. Ma proprio come Gödel non considerava i suoi teoremi un limite della matematica ma piuttosto il segno del fallimento del programma “forte” di Hilbert sull'assiomatizzazione, così il fisico non considera la complessità una rottura con la tradizione. Abbiamo sempre saputo che le nostre mappe non sono il territorio. Quello che ci sorprende continuamente è come, con mappe così semplici, fondate sempre su un'attenta scelta di cosa osservare e come farlo, riusciamo a conoscere tanto della varietà del mondo che ci circonda.

Riferimenti bibliografici

- ANDERSON, P. (1972), *More is Different*, Science 177, 393.
- ANDERSON, P. (2011), *More and Different: Notes from a Thoughtful Curmudgeon*, World Scientific.
- ARNDT, M., JUFFMANN, T., VEDRAL, V. (2009), *Quantum physics meets biology*, HFSP Jour., 3, 6, 386–400.
- ARNOLD, V. I. (1990), *Teoria delle catastrofi*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- BERTALANFFY L. VON, (2004), *Teoria generale dei sistemi. Fondamenti, sviluppo, applicazioni*, Mondadori, Milano.
- BERTUGLIA, C. S., VAIO, F. (2011), *Complessità e modelli*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- BREUER, T. (1995), *The Impossibility of Accurate State Self-Measurements*, Phil. Of. Science, 62, 197-214.
- CONWAY F, FLO, SIEGELMAN J. (2005), *L'eroe oscuro dell'età dell'informazione. Alla ricerca di Norbert Wiener, il padre della cibernetica*, Codice edizioni, Torino.
- GLEICK, J. (2000), *Caos. La nascita di una nuova scienza*, Rizzoli, Milano.
- HAKEN, H. (1993), *Sinergetica. Il segreto del successo della natura*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- HAKEN, H. (2005), *Nel senso della sinergetica*, Di Renzo Editore, Roma.
- HAKEN, H. (2010), *Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems*, Springer.
- HAKEN, H. (2012), *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*, Springer.
- LAUGHLIN, R. B., PINES, D. (2000), *The Theory of Everything*, PNAS 97, 1, 28-31.
- LAUGHLIN, R. B., PINES, D., SCHMALIAN, J., STOJKOVIC, B. P., WOLYNES, P. (2000) *The Middle Way*, PNAS, 97, 1, 32–37.
- LICATA, I (2009) *Osservando la resistenza del mondo*, in *Connessioni Inattese*, Politi editore, Milano.
- LICATA, I (2008a), *Logical Openness in Cognitive Models*, Epistemologia XXXI, 177-192.
- LICATA, I (2008b), *La logica aperta della mente*, Codice edizioni, Torino.
- LICATA, I (2008c). *Emergence and Computation at the Edge of Classical and Quantum Systems, Physics of Emergence and Organization*, (Licata, I. & Sakaji, A., Eds), World Scientific.
- LICATA, I (2010), *Almost-Anywhere Theories: Reductionism and Universality of Emergence*, Complexity, 15, 6, 11-19.
- LICATA, I (2011) *Complessità. Un'Introduzione semplice*, Due Punti edizioni, Palermo.
- LICATA, I (2012), *Epistemologia Adattativa: Vedere con i Modelli*, RetiSaperiLinguaggi, 4, 1, 9-16.
- KOPELL, N, D. RUEJELLE, D. (1986) *Bounds on complexity in reaction-diffusion systems*. SIAM J. Appl. Math., 46, 68-80.
- MATSUMOTO K., TSUDA, I. (1983) *Noise-induced order*, J. Stat. Phys., 31, 87-106.
- MIINATI, G. (2008), *New Approaches for Modelling Emergence of Collective Phenomena*, Polimetrica, Milano.
- MIINATI G., LICATA, I. (2012), *Meta-structural Properties in Collective Behaviours*, Int. Jour. of Gen. Sys., 41, 3, 283-311.
- NICOLIS, J S , TSUDA, I (1999) *Mathematical description of brain dynamics in perception and action*, J. of Consciousness Studies, 6, 215-228.
- MIINATI G., PENNA M. P., PESSA E. (1998) *Thermodynamic and Logical Openness in General Systems*, Systems Research and Behavioral Science, 15 (3), 131-145.
- PREPARATA, G (1995), *Qed Coherence in Matter*, World Scientific.

- PREPARATA, G (2002), *Dai quark ai cristalli. Breve storia di un lungo viaggio dentro la materia*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- PRIGOGINE, I (1997), *La fine delle certezze. Il tempo, il caos e le leggi della natura*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- PRIGOGINE, I., KONDEPUTI, D. (2002), *Termodinamica. Dai motori termici alle strutture dissipative*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- SCOTT, A. (1998), *Scale verso la mente. Nuove idee sulla coscienza*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- SPEZZANO, G., TALIA, D. (1999), *Calcolo parallelo automi cellulari e modelli per sistemi complessi*, Franco Angeli, Milano.
- THOM, R. (1980), *Stabilità strutturale e morfogenesi. Saggio di una teoria generale dei modelli*, Einaudi, Milano.
- WALDROP, M.M., (1996), *Complessità. Uomini e idee al confine tra ordine e caos*, Instar Libri, Torino.
- WIENER, N., (2012), *Introduzione alla cibernetica. L'uso umano degli esseri umani*, Bollati-Boringhieri, Torino.
- WOLFRAM, S., (2002), *A New Kind of Science*, Wolfram Media.
- YINNON, C., YINNON, T., (2009), *Domains in Aqueous Solutions: Theory and Experimental Evidence*, *Modern Physics Letters B*, 23, 16, 1959-1973.