

Forma informazione e biologia

Alberto Strumia Scuola Internazionale Superiore per la Ricerca Interdisciplinare

L'articolo esamina il ruolo dell'*informazione* quando "guida" il caso, nell'evoluzione e nell'emergenza della *complessità* nei sistemi fisici e biologici. In particolare, con riferimento alla modellizzazione al computer dell'evoluzione delle specie viventi e della formazione dei loro organi

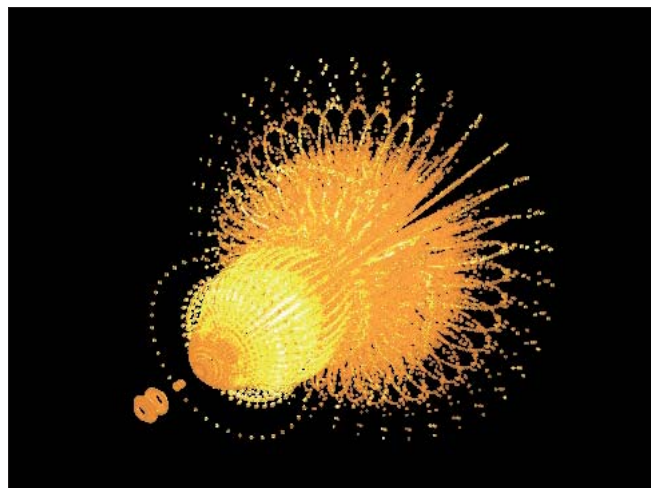
In questo contributo accenneremo al ruolo che l'*informazione* ha assunto nell'ambito delle scienze biologiche, a partire dai primi decenni del XXI secolo, in rapporto all'emergenza della vita, all'evoluzione delle specie e, in generale, all'emergere dell'ordine nella struttura dei sistemi complessi (per una trattazione più ampia dell'argomento rinvio a [1]).

Questo ambito disciplinare vede la collaborazione di biologi, fisici della non linearità, informatici e filosofi alla ricerca di modelli di simulazione e di una loro adeguata interpretazione "filosofica". A un livello più fondamentale, si sta ricercando una definizione di *informazione* che, andando oltre gli aspetti puramente ingegneristici relativi alla *teoria della comunicazione di segnali* e quelli meccanico statistici della *termodinamica del non equilibrio*, possa essere adeguata anche alla *biologia* dei sistemi viventi. Si può constatare come ci si stia riavvicinando, in certo modo, anche all'antica nozione di *forma* aristotelica.

Informazione ed evoluzione biologica

Al momento sono presenti due linee di orientamento, in merito a una comprensione dell'evoluzione delle specie, che fanno capo a due scuole di pensiero [2].

- La prima sostiene una posizione che parte dal-



l'ipotesi che siano sufficienti le *mutazioni genetiche casuali* e la *selezione naturale* a produrre *nuova informazione*.

- La seconda, al contrario, parte dall'ipotesi che non bastino le mutazioni casuali e che occorra ricercare una diversa spiegazione della comparsa dell'*informazione biologica*.

La seconda posizione trae una delle sue motivazioni in parte su base sperimentale e soprattutto sulla base delle simulazioni al computer dei fenomeni evolutivi.

A nostro parere, si deve riconoscere, piuttosto, una coesistenza di casualità nelle *condizioni iniziali* delle traiettorie evolutive dei sistemi che vengono guidate da un'*informazione* che le orienta verso una condizione dinamica, per quanto possibile stabile (*attrattore*), figura 1.

Infatti, da queste ricerche risulta che la maggior parte delle *mutazioni* sono *svantaggiose* e solamente poche possono essere *vantaggiose* o *migliorative* per i soggetti nei quali si presentano. Esiste quella che viene detta *entropia genetica* che fa diminuire la qualità dell'*informazione* anziché accrescerla, così come in termodinamica il calore perde la sua capacità di produrre lavoro con il diminuire della temperatura. La maggior parte delle *mutazioni* comporta un *aumento del disordine* in un sistema anziché un *aumento di ordine* e di *organizzazione*.

Inoltre, le mutazioni tendono a non permanere nei

discendenti dei viventi nei quali si sono verificate e scompaiono dopo poche generazioni. Si è riscontrato che esiste una *soglia numerica* al di sotto della quale l'effetto delle mutazioni, siano esse migliorative o svantaggiose, si esaurisce rapidamente dopo un certo numero di generazioni¹.

Le simulazioni al computer, effettuate con i programmi-modelli disponibili², hanno fornito esiti negativi, contribuendo a falsificare il meccanismo dell'*evoluzione puramente casuale* che non genera nuova *informazione* stabile, migliorativa delle specie.

Questi e altri risultati hanno indotto i ricercatori ad approfondire la nozione di *informazione* come elemento che entra in gioco e governa sia la comparsa della vita che l'evoluzione e, più in generale, la complessità, non spiegabili come fenomeni puramente *causali*.

Si vengono così ad aprire due problemi non ancora del tutto risolti: a) come *definire* e *modellizzare l'informazione*; b) qual è la *causa dell'emergere dell'informazione*³ nei sistemi materiali, cioè quelli che dal punto di vista fisico sono dotati di *massa-energia*.

L'*approccio riduzionista* di tipo puramente materialista che ha tentato di ricondurre l'*informazione* a un fenomeno spiegabile in termini di *massa-energia*, riducendo in qualche modo l'*informazione* al *supporto materiale* che la veicola, è riconosciuto ormai universalmente come inadeguato a rendere conto dell'esperienza. L'*informazione*, infatti, grazie alla sua natura "immateriale", può essere trasferita da un supporto materiale ad un altro mantenendo inalterato il suo contenuto informativo, indipendentemente dal supporto materiale che le è necessario per essere veicolata e per esistere *in atto*. Si tratta di una scoperta che ha preceduto di molto le recenti problematiche biolo-

gico-evolutive, risalendo ai primi passi della *teoria dell'informazione* sorta nell'ambito delle telecomunicazioni e della cibernetica. Com'è noto, uno dei padri della *Teoria dell'Informazione*, Norbert Wiener aveva sostenuto che "*l'informazione, non è né materia né energia. Nessun materialismo che non lo riconosca potrà sopravvivere al giorno d'oggi*" [3] (p. 132).

Definizioni operative provvisorie di informazione

Nei tentativi che si sono succeduti possiamo riconoscere una progressione successiva che ha permesso di passare da una *descrizione* puramente fisica e statistica dell'*informazione*, basata sul confronto con la *termodinamica* e la *meccanica statistica*, verso una sua caratterizzazione più astratta e prossima a una *spiegazione causale*. Si fa riferimento comunemente a diverse tipologie di teoria dell'informazione⁴: a) la *teoria classica dell'informazione*; b) la *teoria dell'informazione complessa specificata*; c) la *teoria algoritmica dell'informazione*; d) la *teoria universale dell'informa-*

¹ Cfr. AAVV, *Can Purifying Natural Selection Preserve Biological Information?*, in [2] pp. 232-263.

² Come, ad esempio, i programmi *Tierra*, *Mendel* e *Avida* che simulano un'evoluzione della specie basata su mutazioni casuali (cfr. W. Ewert, W.A. Dembski, R.J. Marks II, *Tierra: The Character of Adaptation*, in [2], pp. 105-138; C.W. Nelson, J.C. Sanford, *Computational Evolution Experiments Reveal a Net Loss of Genetic Information Despite Selection* in [2], pp. 338-368.

³ In termini aristotelici diremmo: qual è la causa adeguata dell'*educazione* della forma dalla materia.

⁴ Cfr. W. Gitt, R. Compton, J. Fernandez, *Biological Information. What is It?*, in [2], pp. 11-25.

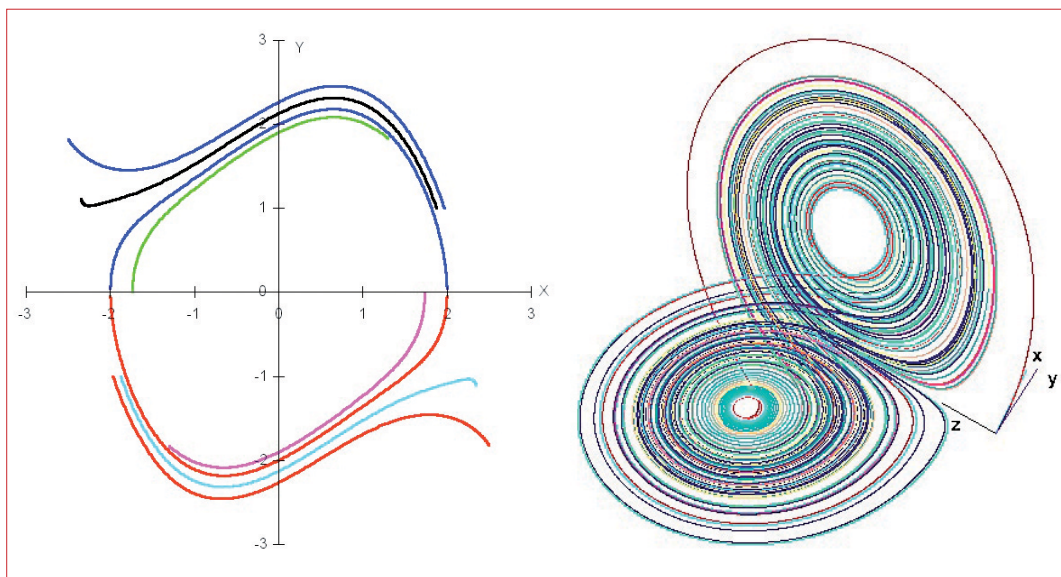


Figura 1
Attrattori - a sinistra: ciclo limite di Van der Pol; a destra: attrattore di Lorenz

zione che cerca una sorta di definizione filosofica della nozione di informazione; e) la *teoria pragmatica dell'informazione* che definisce l'informazione in termini dei costi necessari per gestirla.

Per non estenderci troppo accenneremo qui solo alla terza, tra le più interessanti per la nostra esposizione. Dobbiamo notare come, almeno per il momento, si stia tentando di caratterizzare l'informazione mediante delle *definizioni operative*, cercando di avvicinarsi sempre meglio e per quanto possibile, a raggiungere una sorta di *definizione essenziale* dell'informazione stessa, che la caratterizzi al meglio in ciò che essa è in se stessa, piuttosto che attraverso la descrizione di alcuni dei fattori che a essa si accompagnano, come i *supporti* che la veicolano, le *cause* che la producono o gli *effetti* operativi che essa induce.

La teoria dell'informazione algoritmica

Al momento sembra essere questo l'approccio all'informazione, in chiave scientifica, più interessante e avanzato. La *teoria dell'informazione algoritmica*, che vede tra i suoi ideatori R. Solomonoff, A.N. Kolmogorov e G. Chaitin, si occupa della *complessità* - opportunamente definita nella teoria stessa - dei *simboli* nelle strutture dei dati e degli oggetti in generale. Per esporla, sinteticamente, dobbiamo partire da una definizione di *algoritmo*. Un "algoritmo è una successione di operazioni capace di portare alla soluzione di un problema in un numero finito di passi" (E. Sarti, *Informazione*) [4].

Due esempi di algoritmi

Consideriamo due esempi di algoritmi e cerchiamo di comprendere quale *livello* di informa-

zione sia presente in ciascuno di essi.

- Il *primo livello* consiste in una semplice *procedura di operazioni* da eseguire materialmente per risolvere un problema: in questo caso il *tipo di informazione* che esso contiene ha carattere semplicemente *operativo* e non *definitorio* di un nuovo ente.
- Il *secondo livello* è più significativo del primo in quanto, invece, *definisce* un *ente* nella sua *struttura*. In questo secondo caso, infatti, non ci si limita a *informare* sulle *operazioni* da effettuare meccanicamente per ottenere la soluzione di un problema, ma si offre un'informazione che *definisce* un ente costruendolo; in termini filosofici si direbbe ne caratterizza l'essenza.

I) Algoritmo per lo scambio di liquido fra due bicchieri

Supponiamo di avere due bicchieri che indichiamo con A e B, pieni rispettivamente uno di acqua e l'altro di vino, e di voler travasare A in B e viceversa.

Il problema può essere risolto facilmente usando un terzo bicchiere C e l'algoritmo che risolve il problema è il seguente:

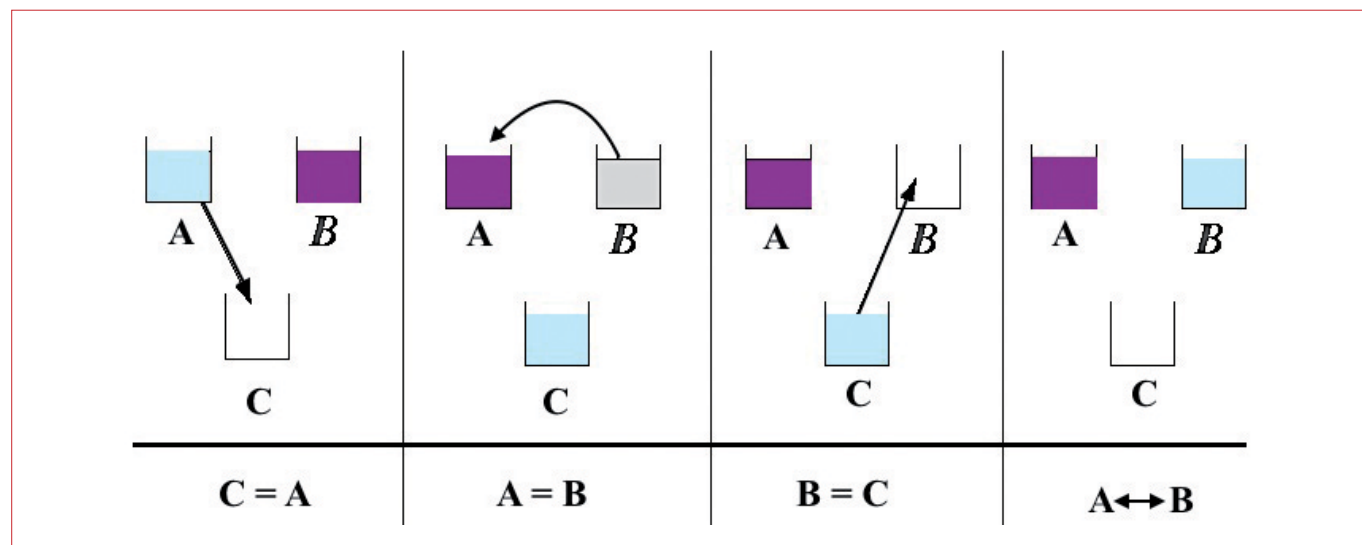
1) versa A in C, 2) versa B in A, 3) versa C in B.

Al termine della procedura avremo ottenuto il risultato voluto che il contenuto iniziale di A è finito in B e viceversa (figura 2).

Questo tipo di algoritmo si limita, effettivamente, a descrivere una *procedura* che muta ma non definisce, né costruisce un *ente*.

II) Generazione di un frattale

Consideriamo la generazione di un *frattale* [5-6]. Approssimativamente possiamo caratterizzare un *frattale* come una curva, o una superficie, che si



▲ Figura 2

Algoritmo dello scambio di liquidi tra due bicchieri

presenta infinitamente frastagliata, mantenendo il suo *grado di complessità* a qualunque scala di ingrandimento essa venga sviluppata. L'algoritmo matematico, o informatico, che lo genera non si limita a descrivere una *procedura*, ma propriamente *definisce* costruendolo, un *ente*. L'esempio della costruzione di un frattale è di tipo matematico e, come tale, si basa sul calcolo. Tra i tanti tipi di frattali scegliamo, per il nostro esempio, uno dei più tipici: un *insieme di Julia*.

L'algoritmo che lo definisce è il seguente:

- si parte considerando un numero complesso $z_0 = x_0 + i y_0$ la cui parte reale x_0 e la parte immaginaria y_0 vengono fatte variare entro un intervallo sufficientemente ampio:
 $-L < x_0 < +L, -L < y_0 < +L$;
- si sceglie un altro numero complesso $c = a + i b$ che si mantiene fissato durante l'intera procedura di costruzione del frattale;
- si costruisce una successione di numeri complessi $z_n = x_n + i y_n, n = 1, 2, \dots$, il cui primo termine è z_0 e ogni termine successivo viene ottenuto aggiungendo c al quadrato del termine dal quale si parte. Abbiamo così la "legge di ricorrenza":

$$z_{n+1} = z_n^2 + c,$$

- si considera la somma di un numero abbastanza grande (in teoria infinito) dei termini così ottenuti;

Si calcola il modulo h della somma ottenuta e se questo valore è maggiore di un valore positivo R prescelto, si associa al suo valore un colore da assegnare sullo schermo del computer al punto corrispondente alle coordinate (x_0, y_0) .

Dalla descrizione che abbiamo dato si comprende

come questo tipo di algoritmo *definisca essenzialmente* la stessa *struttura* di un *ente*, in questo caso un *insieme di Julia*, costruendolo (figura 3).

Osservazione

Chi si occupa di *informazione algoritmica* spesso si concentra sulla *quantità* di *informazione* contenuta in un algoritmo trascritto in un programma per il computer e definisce come *più ricco di informazione* il programma che si può scrivere con il minore numero di caratteri (*algoritmo dalla stringa più corta*) per ottenere uno stesso risultato. Ma, come ormai è ben noto anche in ambito logico-matematico, non tutte le attività di un sistema, soprattutto se è vivente, sono *computabili* e occorre studiare scientificamente anche quegli aspetti del mondo fisico, biologico e cognitivo che non sono riducibili al solo *calcolo*. Perciò è divenuto significativo, anche dal punto di vista scientifico, oltre che da quello filosofico, scoprire e conoscere gli aspetti *qualitativi* e che si nascondono nell'*informazione*. Nell'algoritmo, così inteso sembra di poter intravedere, di fatto un primo tentativo - realizzato con metodo rigorosamente scientifico - di accostare la *definizione/essenza* dell'ente del quale l'algoritmo attua la *struttura* del medesimo ente. Perciò l'*informazione algoritmica* è più ricca di contenuto "filosofico" di una semplice *quantità* di *informazione*, misurabile in qualche modo. Di questo aspetto si sta accorgendo, ormai da tempo, anche l'analisi scientifica che si è orientata a cercare di descrivere e spiegare anche quegli aspetti più qualitativi della *forma/informazione* che vanno ben oltre la sola lunghezza della *stringa-supporto* che la codifica. In questa direzione si è mossa, ad esempio nell'ambito della teoria fisico-matematica dei *sistemi dinamici* non lineari, quella branca che

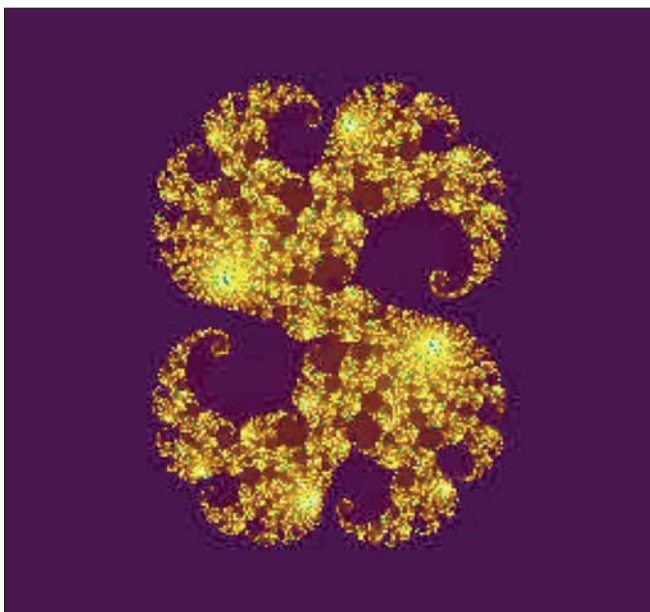


Figura 3

Un insieme di Julia ($c = 0.27334 + i 0.00642$)

è nota proprio come *analisi qualitativa* del moto e della dinamica dei sistemi. Questi metodi vengono utilizzati anche per cercare di elaborare dei modelli in ambito biologico, al fine di descrivere l'evoluzione delle specie e l'auto-organizzazione del passaggio dalle strutture non viventi al vivente.

Caratteristiche proprie dell'Informazione

È interessante vedere quali sono le caratteristiche proprie dell'*informazione* che sono state evidenziate nei principali approcci alla Teoria dell'Informazione così come si è venuta a sviluppare in ambito scientifico. Ed è significativo constatare, mediante un adeguato confronto, il progressivo - pur se ancora parziale - avvicinamento tra la il concetto scientifico di "informazione" e alcuni aspetti della nozione aristotelico-tomista di "forma". Possiamo, in particolare riscontrare come l'informazione si caratterizzi per i seguenti elementi che le sono propri (caratteri "formali" che la identificano) o almeno che le sono necessari per veicolarsi (caratteri "materiali" che la supportano).

a. Codice e sintassi: al livello della *teoria delle comunicazioni* di Shannon troviamo, innanzitutto, la presenza di un codice, ovvero di un *alfabeto* simbolico che permette di legare l'informazione a un *supporto materiale* che le è necessario per essere veicolata. Un codice governato da regole (*sintassi*) per divenire significativo dell'informazione che deve codificare.

Tuttavia, l'informazione in sé stessa è completamente indipendente dal mezzo materiale, che serve solo a veicolarla e può essere diverso volta per volta (*hard disk, cavo, fibra ottica, wi-fi*). Il portatore materiale, in sé stesso, non può essere la *causa efficiente*, né *formale*, né *finale* dell'*informazione*.

b. Significato: il significato è un attributo essenziale dell'informazione che è codificata in un linguaggio in ordine alla *comunicazione*.

- In particolare, le *parole*, sia scritte che dette, possono essere utilizzate per rappresentare simbolicamente degli enti, degli eventi e/o dei concetti, e cioè ogni cosa.
- Tali enti non necessitano di essere fisicamente presenti insieme alle parole, perché queste prendono il loro posto, li rappresentano come simboli, e comunicano qualcosa della loro realtà come se gli enti stessi fossero presenti.
- Si è constatato sperimentalmente, finora, come dei puri e semplici processi fisico-chimici (materiali) non siano in grado di realizzare questo tipo di sostituzione simbolica. Intendiamo qui riferirci a processi fisico-chimici naturali, non guidati da un sistema di control-

lo esterno a essi come quello che si trova nei sistemi dotati di informazione.

c. Attesa di un'operazione: l'informazione si presenta come qualcosa che viene inviata da un *trasmettitore* in vista dell'esecuzione, da parte del *ricevitore*, di un'operazione finalizzata ad uno scopo. L'analisi delle frasi o dei paragrafi di un messaggio rivela la richiesta o l'ordine, per il ricevitore del messaggio, di eseguire una qualche operazione.

Qui dobbiamo distinguere tra due tipi di ricevitori: i) un ente *intelligente* che possiede la capacità di compiere *scelte libere* e di *cogliere il significato del messaggio*; ii) oppure una macchina che non ha queste capacità.

d. Intento finalizzato: prima di inviare il messaggio originale, scritto o verbale, deve esserci un processo interno, di pensiero, che motiva il trasmettitore a formulare il messaggio.

Per rendere scientificamente utilizzabili questi quattro caratteri occorre tradurli, a loro volta, in un *linguaggio simbolico* applicabile per poterli inserire in un processo di *calcolo* (per gli aspetti computabili), oppure in un'*analisi qualitativa* (per gli aspetti non computabili).

L'informazione in biologia

La grande attenzione al ruolo dell'*informazione* in biologia sta ponendo almeno tre grandi questioni alla ricerca scientifica.

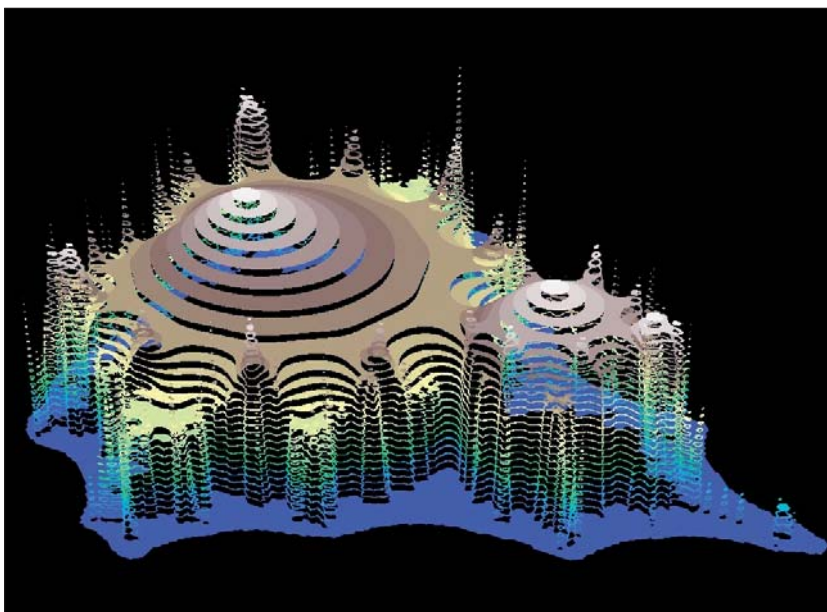
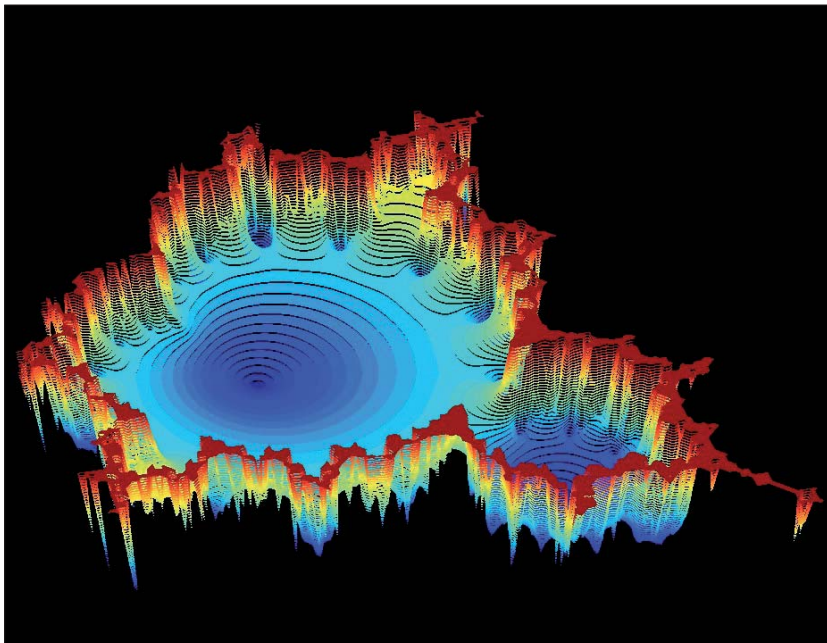
- La prima è la questione dell'*emergenza*, o *origine*, dell'*informazione biologica*. In linguaggio aristotelico, nel quale si parla di *eduazione* della *forma* dalle *potenzialità* della materia e si pone la questione in termini della ricerca di una *causa efficiente* adeguata ad attuare tale eduazione, ogni volta che avviene una *mutazione sostanziale* che fa evolvere con una certa stabilità un ente in un altro. Nel contesto scientifico odierno la questione viene spesso posta in termini di *produzione* o di *aumento* dell'informazione presente all'interno di un sistema e si tende a ritenere che l'informazione possa emergere o aumentare *spontaneamente* senza una *causa* adeguata, in concomitanza con una capacità di auto-organizzazione spontanea del sistema stesso, che si origina in una *pura casualità* di eventi.
- La seconda questione, legata alla prima, che oggi si pone è quella dell'*evoluzione* dell'informazione e, in particolare, del suo *aumento spontaneo* all'interno di un sistema e in particolare di un sistema vivente.
- Infine, la terza questione è quella della *codifica* e *copia dell'informazione*, che sembra, ormai chiaramente, non risiedere solamente nel DNA ed essere, in ogni caso stratificata a

diversi livelli anche su un medesimo supporto biochimico, elettro-chimico e materiale in genere.

L'ipotesi che la *complessità della vita* sia il risultato della sola *non linearità* dei *sistemi caotici*, sembra essere incompatibile con i risultati matematici e informatici (modelli di simulazione) su computer a partire dalle equazioni che li governano. “L’esplosione di gran quantità d’informazione biologica richiede una spiegazione”⁵.

Le *mutazioni migliorative* non ambigue (non dannose a nessun livello), e utili (soggette a selezione naturale), risultano essere estremamente rare. Il caso non sembra generare miglioramenti senza una *causa adeguata*.

Anzi, si riscontra il fenomeno di una *perdita di informazione* a causa delle *mutazioni dannose* che sono le più probabili - è la cosiddetta *entropia genetica* - che costituiscono una vera e propria barriera conservativa della *complessità*.



Per ciò che riguarda la codifica dell’informazione biologica, si è riscontrato che le *unità genetiche* sono istruzioni ben precise, codificate con un linguaggio tale che “ogni gene ha il grado di complessità di un libro”⁶. Sono presenti più linguaggi (“codici genetici”) in uno stesso genoma, livelli multipli e addirittura tridimensionali di informazione biologica, distribuiti in una rete a più strati.

I modelli di simulazione al computer non hanno avuto successo nello spiegare né la nascita, né l’incremento di informazione, anche se si è riscontrato che i programmi eseguibili al calcolatore e il genoma umano contengono schemi ripetitivi di codice che sono piuttosto simili.

L’informazione produce come effetto sulla *struttura* di un sistema l’organizzazione di un *ordine* nella struttura stessa, per cui un aumento di informazione comporta un aumento di ordine nel sistema stesso. Ciò che si riscontra, nelle simulazioni numeriche basate sulla meccanica statistica e la termodinamica del non equilibrio, è il fatto che l’ordine non viene generato spontaneamente dall’interno di un sistema, anche quando questo è *aperto* - cioè, è in grado di scambiare materia ed energia con l’ambiente esterno - ma può comparire all’interno del sistema solo grazie all’azione causale di un qualche fattore la cui azione viene importata dall’esterno del sistema. “Se un aumento di ordine è estremamente improbabile quando un sistema è chiuso, è estremamente improbabile anche quando il sistema è aperto e dissipativo, a meno che nel sistema non entri un qualcosa di esterno che rende tale aumento non così estremamente improbabile”⁷.

⁵ J.C. Sanford, *Introduzione alla seconda sessione dei lavori del convegno*, in [2], p. 204.

⁶ G. Montañez, R.J. Marks II, J. Fernandez, J.C. Sanford, *Multiple Overlapping Genetic Codes Profoundly Reduce the Probability of Beneficial Mutation*, in [2], pp. 139-167.

⁷ G. Sewell, *Entropy, Evolution and Open Systems*, in [2], p. 174.

Si innesca, grazie all'azione di una tale causa *efficiente/formale* quel processo che oggi è noto come *auto-organizzazione*, che sembra equivalere a ciò che, nella visione aristotelico-tomista è l'*eduazione* di una *forma sostanziale* dalla *materia*.

Basandosi sulle nostre conoscenze della fisica dei sistemi non lineari e, in particolare sulla termodinamica del non equilibrio dei sistemi aperti dissipativi, si sta cercando di modellizzare questo processo dell'emergenza dell'informazione dalla materia - ovvero dell'auto-organizzazione che fa emergere una struttura ordinata da una configurazione che inizialmente non lo è - in termini di attrattori caotici stabili. La dinamica di tali attrattori, pur presentandosi come caotica e casuale genera una struttura ordinata. Infatti, le

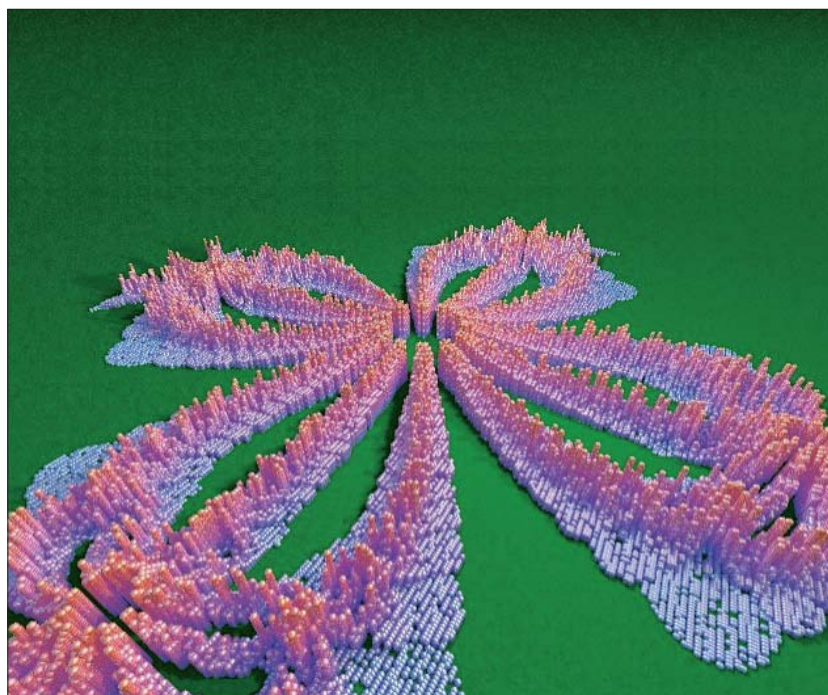
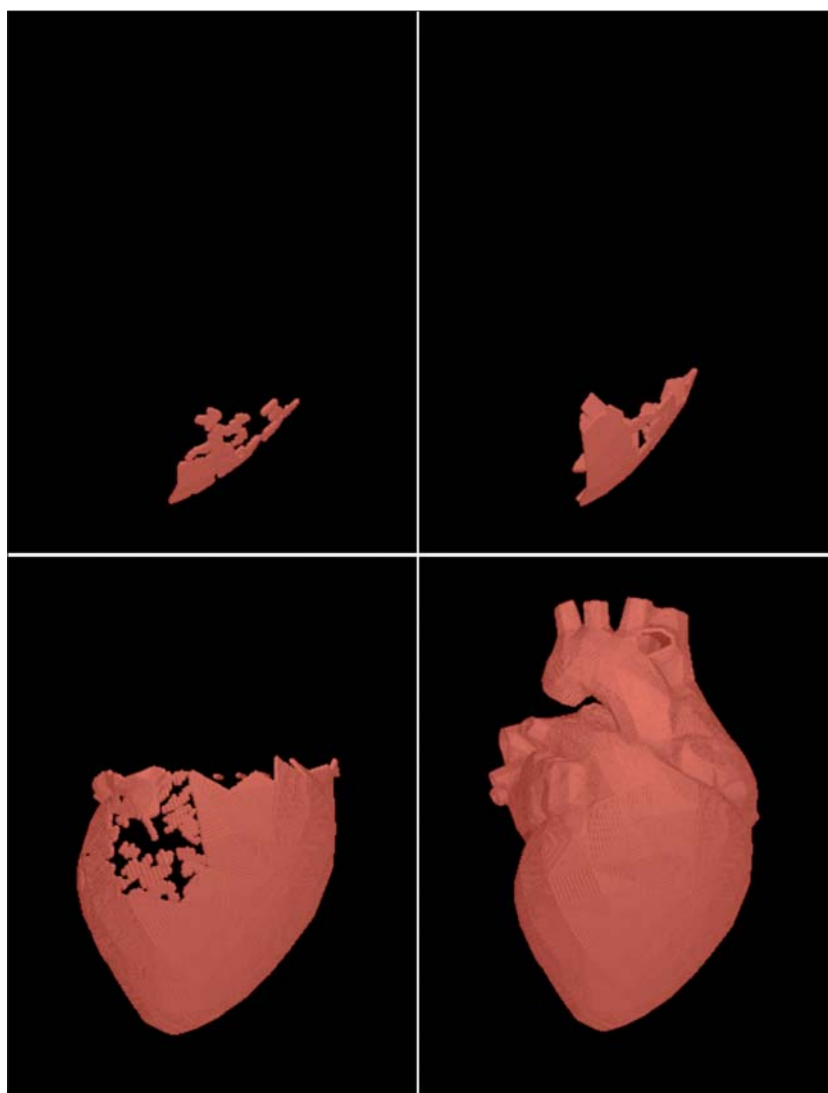


Figura 4 ▶

Modello delle fasi di formazione di un cuore umano basato su automi cellulari



traiettorie che li generano, pur partendo da punti diversi di un bacino di attrazione, anche assegnati a caso, tendono a collocarsi in alcune regioni dello spazio delle fasi. Emerge così un tutto dalla confluenza di parti che, pur apparentemente separate, sono inseparabili dal tutto nella struttura del quale confluiscono.

L'intuizione che occorre una Teoria dell'Informazione di un nuovo tipo (non solo statistico e sintattico) sembra andare, in ogni caso, nella giusta direzione⁸.

Così, ad esempio, l'idea di avere un *attrattore stabile* come portatore dell'informazione:

- da un lato garantisce che sia presente un *ordine guidato* da un'informazione che emerge nella *struttura* del sistema;
- dall'altro lascia la possibilità di una completa *casualità* nella *dinamica* del sistema, in quanto la scelta delle *condizioni iniziali* (interne al *bacino di attrazione*) delle singole traiettorie può essere del tutto *casuale*, senza per questo compromettere il risultato che esse tendano tutte allo stesso *attrattore*.

Si può dire, allora, che non c'è una legge nella scelta *casuale* delle *condizioni iniziali* delle traiettorie, che possono risultare *impredicibili* se l'attrattore è *caotico*, ma che c'è una *legge* nell'attrattore stesso, che include una certa finalità, che è propria dell'informazione.

Per avere più *livelli analoghi* di organizzazione e finalità si possono concatenare più attrattori, l'uno nell'altro, in maniera tale che un livello di attrattori sia attratto a sua volta da un attrattore di livello superiore, fino a giungere ad un primo attrattore universale che non può essere a sua volta attratto per non incorrere in un paradosso simile a quello dell'insieme universale.

Un *primo livello* di *organizzazione* si può descrivere con un insieme di *attrattori* stabili che strut-

turano, ad esempio le molecole, la cui dinamica è regolata da:

- a. un *secondo livello* di *attrattori* che strutturano ad esempio le cellule, la cui dinamica è regolata, a sua volta, da
- b. un *terzo livello* di *attrattori*, che strutturano gli organi di un vivente, la cui dinamica è regolata da
- c. un *quarto livello* di *attrattori* che strutturano degli organismi individui completi, la cui dinamica è regolata da
- d. un *quinto livello* di attrattori che strutturano le specie, e così via.

Si può costruire, secondo questo modello ad *attrattori nidificati*, una catena che inizia con le *particelle elementari* e termina con le *galassie* e il *cosmo* intero, pensati anche questi come *attrattori stabili*. La catena si interrompe dove un attrattore da *stabile* diviene *instabile* per effetto di una causa che modifica i parametri della dinamica dell'attrattore stesso: si ha in tal caso la prevalenza locale del *secondo principio della termodinamica*, che fa aumentare il *disordine* a prezzo della perdita dell'ordine dell'organizzazione di un individuo, che cessa di esistere come sistema organizzato. Si ha così uno schema di attrattori che tende ad assumere una struttura in certo modo *frattale*, pur non essendo necessariamente autosimilare (figura 4).

In ordine alla biologia del vivente e alla formazione dei suoi *organi* a partire dalla moltiplicazione di cellule staminali, si può osservare un comportamento del tutto simile. La scelta *casuale* delle condizioni iniziali e della direzione verso la quale la cellula si riproduce, è guidata da un'informazione contenuta in un codice genetico che la dirige nella costruzione di quell'attrattore che è la struttura dell'*organo* in questione (cuore, fegato, cervello, ecc.) e della *dinamica* che ne governerà il funzionamento nel vivente [7-8].

La ricerca in questa, come in altre direzioni, è tuttora aperta e in corso d'opera e si mostra davvero affascinante.

⁸ S. Kaufmann, *Evolution Beyond Entailing Law: The Roles of Embodied Information and Self Organization*, in [2], pp. 521-522.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Strumia: *Dalla filosofia della scienza alla filosofia nella scienza*, Roma, Edusc-Sisri, 2017, cap. XV.
- [2] R.J. Marks II et al.: *Biological information. New perspectives, Proceedings of a Symposium held May 31 through June 3, 2011 at Cornell University*, Singapore, World Scientific, 2014 - www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8818.
- [3] N. Wiener: *Cybernetics; or the control and communication in the animal and the machine*, Technology Press, MIT, Cambridge, 1965.
- [4] Portale di documentazione di scienza e fede: www.disf.org
- [5] A. Strumia: Che cosa sono e a che cosa servono i frattali?, *Pixel*, n. 7/8, vol. 5, 1996 - www.albertostrumia.it/articoli-didattica
- [6] Galleria di frattali: www.albertostrumia.it/fractal-gallery
- [7] A. Strumia: *From Fractals and Cellular Automata to Biology. Information as Order Hidden within Chance*, Singapore, World Scientific, 2020 - www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/11743#t=aboutBook.
- [8] A. Strumia: Information Drives Chance to Order and Organization: Applications to Mathematics, Physics and Biology, in *Newest Updates in Physical Science Research*, vol. 10, 14 luglio 2021, pp. 116-154 - <https://stm.bookpi.org/NUPSR-V10/article/view/2384>