



### **Massimo Piattelli Palmarini**

Professore di Scienze Cognitive,  
Università dell'Arizona  
Professor of Cognitive Science at the  
University of Arizona

### **Il ritorno delle leggi della forma**

Questa relazione è, in un certo senso, realmente dedicata a Isabelle Stengers che conosco da parecchio tempo. Non ci eravamo visti da alcuni anni, ma mi riferisco al periodo in cui lavorava con Ilya Prigogine. Io lavoravo con Jacques Monod ed ero più strutturalista radicale di quanto non fossero lei e Prigogine, ma credo che le cose stiano cambiando.

La mia presentazione s'intitola: «Il ritorno delle leggi della forma».

Credo che ci troviamo davanti a un problema fondamentale, che riassumerei in questi termini: "Com'è fatto un gene che codifica un particolare carattere?" e ancora: "Com'è fatto un carattere per poter essere codificato da un gene?". Questo per parafrasare un articolo di Warren McCulloch del 1961 che si intitolava: "Com'è fatto un numero perché un essere umano lo possa conoscere e com'è fatto un essere umano perché possa conoscere un numero?"

Prenderemo in considerazione le prime versioni delle leggi della forma, quindi l'avvento dell'era della specificità, che è ancora quella in cui viviamo dal punto di vista biologico (l'era della specificità, il DNA, le sequenze del DNA, i genomi e così via) e il recente ritorno delle leggi della forma.

Esiste un dato fondamentale che dobbiamo prendere in considerazione. Nella nostra specie ciascun individuo possiede circa 24.500 geni deputati a varie funzioni. Tra le altre cose, devono costituire dieci milioni di varietà specifiche di anticorpi,  $10^{11}$  neuroni situati e, infine, un numero esorbitante, ossia da  $10^{13}$  a  $10^{14}$ , di contatti tra i neuroni, che prendono il nome di sinapsi, alcune delle quali eccitatorie, altre inibitorie. Quindi, per

### **The return of the laws of form**

This paper is, in a sense, really dedicated to Isabelle Stengers whom I have known for many years. We had not seen each other for some years, but we go back to the time when she was working with Ilya Prigogine. I was working with Jacques Monod and I was a more radical structuralist than she and Prigogine were, but I think things are changing.

My presentation is entitled: «The return of the laws of form».

I think we have a fundamental problem that I summarise in this way: "What is a gene that it may code for a trait?" and "What is a trait that it may be coded for by a gene?". This is a paraphrase of Warren McCulloch's paper in 1961. The title of his paper is: "What is a number that a human being may know it and what is a human being that he may know a number."

We are going to consider the early versions of the Laws of Form, then the advent of the age of specificity, which is still what we are living today in biology (the age of specificity, DNA, DNA sequences, genomes and so on and so forth) and the recent return of the laws of form.

There is a basic datum that we have to take into consideration. In our species each individual has about 24,500 genes, which have many functions. Among other things, they have to build ten million specific varieties of antibodies; then  $10^{11}$  situated neurons, and then the gigantic number,  $10^{13}$  to  $10^{14}$  contacts between neurons, called synapses, some of which are excitatory and some of which are inhibitory. So, to give an idea, imagine that you have the crazy neuro-anatomist, who can identify a different synapse every minute, non-stop, night

darvi un'idea, immaginate di avere a disposizione un neuroanatomista pazzo capace di identificare, senza mai fermarsi, giorno e notte, diverse sinapsi al minuto. A questo pazzo neuroanatomista occorrerebbero dieci milioni di anni per completare il lavoro.

Qual è quindi la soluzione al problema? Com'è che 24.500 geni riescono a fare così tanto? Ebbene, sappiamo che, nel caso del sistema immunitario, esiste un processo combinatoriale: ci sono infatti tre serie di alcune centinaia di geni che possono ricombinarsi l'uno con l'altro senza alcun limite, generando decine di migliaia di anticorpi specifici. C'è l'idea, risalente a Monod e Changeux, dell'*"Envelope génétique"*, ossia di un involucro genetico; i geni non specificano tutto, quanto piuttosto le linee generali di sviluppo. Esiste poi l'idea di un'auto-organizzazione massiccia (leggi di massa, fenomeni di diffusione, morfogeni, gradienti interni, inter-coordinamento spontaneo mediante i contatti più vicini, molecole di adesione cellulare ecc.). Si è quindi in presenza di leggi fisico-chimiche (le leggi della forma), che agiscono dall'alto e dal basso (a livello molecolare, a livello atomico-molecolare e a livello generale), nonché di molti processi di massimizzazione (impaccamento più denso, distanza minima, calcolo minimo, memoria minima, rapporti superficie-volume, riempimento dello spazio con frattali, ecc.). Più tardi vi fornirò alcuni esempi in questo senso. Esistono anche altri tipi di algoritmi combinatorici, per esempio l'uso infinito di mezzi finiti.

A questo proposito c'è un piccolo caveat: i neo-darwiniani sarebbero perfettamente d'accordo con questa idea di ottimizzazione, ma c'è stato tempo sufficiente? Intendo dire: lo spazio di ricerca può essere così vasto?

Osservando alcuni esempi di ottimizzazione in natura, è proprio vero che sia stato provato tutto, preservando soltanto i risultati migliori? Questa ricerca a tappeto, per tentativi ed errori, è quanto postula un adattazionista standard, gradualista, neo-darwiniano. Non può essere, non c'è stato tempo sufficiente. Non c'è stato un sufficiente numero di generazioni.

Pertanto ritengo che debba trattarsi di qualcos'altro. Ovviamente c'è stato un adattamento, ci sono stati selezione e adattamento, ma senza sfruttare tutte le varie possibilità. Per esempio, Chris Cherniak, dell'Università del Maryland, ha pubblicato, un paio d'anni fa, un interessante articolo in cui dimostrava che la connettività della corteccia rappresenta la

and day. It will take this crazy neuro-anatomist, ten million years to complete the job.

So, what is the solution to this? How can 24,500 genes do so much? Well, we know, in the case of the immune system that there is a combinatorial process: there are three sets of a few hundred genes that can recombine one with the other without limits, giving tens of thousand of specific antibodies. There is this idea, which goes back to Monod and Changeux of the *"Envelope génétique"*, that there is a genetic envelope; genes do not specify everything but rather they specify general lines of development. Then there is the idea of massive auto-organisation (mass laws, diffusion phenomena, morphogenes, internal gradients, spontaneous inter-coordination via nearest neighbour contacts, cell adhesion molecules etc.). So you have physical-chemical laws (the laws of form) acting from above and from below (at the molecular level, the atomic-molecular level and the general level) and many maximisation processes (densest packing, minimal distance, minimal computation, minimal memory, surface-to-volume ratios, fractal space-filling, etc.). Later on, I shall give some examples. In addition there are other kinds of combinatorics e.g. the infinite use of finite means.

Now, a little caveat here. The neo-Darwinians would be perfectly in agreement with this idea of optimization but has there been enough time? I mean, can the search-space be so large?

When we observe some optimization in nature, is it really the case that all sorts of things were tried out and only the best results were retained? This blanket search, by trial and error, is in fact postulated by standard adaptationists, gradualists, new Darwinians. It can't be the case. There has not been enough time. There has not been a sufficient number of generations.

So, I think that it must be something else. There has been adaptation of course, there have been selection and adaptation, but not with all sorts of possibilities. For instance, Chris Cherniak, from the University of Maryland, published a very interesting paper a couple of years ago, in which it is shown that the connectivity of the cortex is the best solution among all conceivable variants, the best among billions of such variants. He tried with the computer billions of alternatives to the connection of the cortex and found that the connection of the cortex, as it is, is the best solution. Can we think that billions of solutions for the cortex have been tried out and only the best have been retained? It

soluzione migliore in rapporto a concepibili varianti, la migliore tra miliardi di tali varianti. Utilizzando il computer, ha provato miliardi di alternative alla connessione della corteccia, scoprendo che, così com'è, la connessione della corteccia è la soluzione migliore. Possiamo ipotizzare che siano stati provati miliardi di soluzioni per la corteccia per arrivare a tenere soltanto la migliore? Non può essere. Deve essere qualcos'altro. Lo vedremo tra un attimo.

Cosa si può dire, quindi, dell'ottimizzazione senza una ricerca? Senza provare tutto o provando soltanto le cose che si possono provare, perché questo è ciò che la fisica e la chimica consentono. C'è un aneddoto di Antonio Coutinho, immunologo di origine portoghese, che ha trascorso tanti anni all'Istituto Pasteur. L'aneddoto è il seguente: un figlio dice al padre: "Papà, com'è che quando si fa cadere un sasso cade sempre a terra?". Al che il padre risponde: "Be', tutti i sassi che avevano la tendenza a volare verso l'alto sono andati persi nel corso dell'evoluzione milioni di anni fa".

Il punto è che abbiamo leggi fisiche, ma non abbiamo questo tipo di selezione. Finora, però, siamo frequentemente caduti in versioni meno drastiche e meno evidenti di quella citata dicendo, per esempio, che c'è stato un qualche tipo di selezione e trascurando che ci sono state anche le leggi fisiche, le leggi della forma, a plasmare le cose. Questo è il messaggio su cui vorrei insistere. Può essere, quindi, che l'evoluzione passi attraverso stretti canali? Gli stretti canali di ciò che è possibile, gli stretti canali del sistema che possono crearsi attraverso una ripidissima discesa e una stretta canalizzazione. Pertanto, la selezione naturale può selezionare soltanto ciò che "può" essere selezionato nell'ambito dei vincoli basilari di stabilità e riproducibilità. Più di recente, la rivoluzione dell'Evo-Devo ha riunito evoluzione e sviluppo. L'idea su cui si basa deriva da Sean Carroll che farà presto visita a Genova; egli propone che l'evoluzione sia l'evoluzione delle ontogenie. L'evoluzione è l'evoluzione non solo degli adulti, non solo dei neonati, ma di tutte le ontogenie. È da questo punto di vista che, credo, dovremmo partire ora.

Sappiamo che c'è una notevole conservazione, mediante processi chimici, dei processi genetici di base che presuppongono la modularità genetica. È sorprendente quanta conservazione sia presente in questi moduli genetici, almeno dalla *Drosophila* fino agli esseri umani, risalendo perfino ai batteri.

cannot be the case. It must be something else. We will see that in a moment.

So, what about optimisation without a search? Without trying everything, trying only the things that can be tried because physics and chemistry allow only those systems.

There is a joke told by Antonio Coutinho, an immunologist of Portuguese origin; who spent many years at the Pasteur Institute. The joke is the following: a son says to his father: "Daddy, how is it that when you drop a stone, it always falls to the ground?". And the father says: "Well, all the stones that tended to fly upwards were lost in evolution millions of years ago".

The point is that we have physical laws, we don't have this kind of selection. But aren't we so far very frequently falling into less dramatic, less evident versions of that? - saying that there has been selection but neglecting the physical laws, the laws of form that have shaped these things. This is the message I would like to insist upon. So, can it be that evolution passes along narrow channels? The narrow channels of what is possible and the narrow channels of the system that can exist through steepest descent and narrow canalization. So, natural selection can only select what "can" be selected within the basic constraints of stability and reproducibility. More recently the Evo-Devo revolution, has put together evolution and development. The idea behind this comes from Sean Carroll, who will be visiting Genoa soon; he proposes that evolution is the evolution of ontogenies. Evolution is the evolution not just of adults, not just of newborns, but it is the evolution of all ontogenies. This is the perspective I think we should now be taking. We know that there is a remarkable conservation by chemical processes of the core genetic processes involving genetic modularity. It is stunning how much conservation there is in these genetic modules, from the *Drosophila* to human beings, at least, and going back even further up to bacteria. So, it is only the remarkable conservation of the core processes which allows for variation at the periphery. This is one of the secrets of life: variation at the periphery and a great deal of exploratory behaviour but preservation of the modular core processes.

P.T. Saunders, editor of the reprinted version of A.M. Turing's work on Morphogenesis, published in 1992, said something interesting: "The primary task of the biologist is to discover the set of forms that are likely to appear, for only then is it worth

Quindi è soltanto la notevole conservazione dei processi basilari che consente la variazione alla periferia. Questo è uno dei segreti della vita: variazione alla periferia e tanto comportamento esplorativo, ma conservazione dei processi modulari centrali.

P.T. Saunders, redattore della ristampa dei lavori di A.M. Turing sulla morfogenesi, pubblicata nel 1992, affermò una cosa interessante: «Il principale compito del biologo è scoprire la serie di forme che hanno probabilità di manifestarsi, perché è soltanto a quel punto che vale la pena chiedersi quale di esse verrà selezionata».

In questa prima illustrazione (figura 1, pagina 76) si possono osservare forme spontanee. Si tratta della reazione di Belousov-Zhabotinsky, ulteriormente sviluppata dal gruppo di Bruxelles e perfezionata nel corso degli anni.

Si comincia quindi da una soluzione perfettamente omogenea: la ricetta chimica è molto semplice, dopo di che compaiono e si diffondono queste meravigliose forme. Si assiste a un notevole grado di morfogenesi spontanea.

L'immagine riportata in figura 2 mostra una ricostruzione computerizzata di questi fenomeni (instabilità di Rayleigh-Bénard). Si può osservare la formazione di forme bellissime in modo perfettamente spontaneo, con una struttura dissipativa. La temperatura della piastra inferiore è maggiore di quella della piastra superiore.

Ilya Prigogine (1917–2003), con cui Isabelle Stengers collaborò creativamente per molti anni, ricevette il Premio Nobel per la Chimica nel 1977 per il proprio contributo alla termodinamica di non equilibrio, in particolare per la teoria delle strutture dissipative. Egli contribuì veramente ad estendere il dominio della fisica e della chimica includendovi queste strutture e le figure 3.1 e 3.2 sono tratte dalla relazione che tenne in occasione del conferimento del Premio Nobel.

In alcuni casi un valore del parametro corrisponde a un solo valore, a una sola soluzione, a un solo morfo del sistema mentre, in altri casi, ne esiste più di uno ma dipende da come ci si arriva. Ciò non significa semplicemente che ci sia più di una possibilità.

Di fatto è stato introdotto, in fisica e in chimica, da Ilya Prigogine e collaboratori, un elemento storico un tempo riservato soltanto alle scienze che riguardano i fenomeni biologici, sociali e culturali, ovvero una dimensione storica molto importante. Vorrei citare questo passo della relazione che tenne in occasione del conferimento del Nobel:

asking which of them will be selected».

In this illustration (Figure 1. Page 76) spontaneous forms can be seen This is the Belousov-Zhabotinsky reaction that the Bruxelles Group has further developed, perfected over the years.

So, you start with a perfectly homogeneous solution: the chemical recipe can be given very simply, and then these wonderful forms appear and diffuse. A great deal of spontaneous morphogenesis occurs.

The next slide (Fig. 2) shows a computer reconstruction of these kinds of phenomena (the Rayleigh-Bénard instability). The formation of beautiful forms in a perfectly spontaneous way can be seen, and there is a dissipative structure. The temperature of the bottom plate is greater than that of the top plate.

Ilya Prigogine (1917–2003), with whom Isabelle Stengers worked creatively for many years, was given the Nobel Prize for Chemistry in 1977, for his contribution to non-equilibrium thermodynamics, particularly the theory of dissipative structures. He really enlarged the domain of physics and chemistry to include these structures and Figures 3.1 and 3.2 come from his Nobel Prize lecture.

In some cases one value of the parameter corresponds to one value, one solution, one morph for the system but in other cases there is more than one, and it depends on how you get there. It is not just that there is more than one possibility.

In fact an historic element was introduced into physics and chemistry, which was once reserved only for sciences dealing with biological, social and cultural phenomena, by Ilya Prigogine and his collaborators, a very important historical dimension.

This is a quote from his Nobel lecture: «It is shown that non-equilibrium may be a source of order and that irreversible processes may lead to a new type of dynamic states of matter which I have called “dissipative structures”, ...“The classical case (macroscopic equilibrium) is a special case of this new and larger theory”.

### **Previous historical landmarks**

Considering the laws of form, we can go back to D'Arcy Wentworth Thompson and in his very large, fascinating book, there are these pictures (Fig.4). These are real animals, real fish, which are encountered in nature. D'Arcy shows that one can be obtained from the other with minor geometrical transformation.

«È dimostrato che il non equilibrio può essere fonte di ordine e che processi irreversibili possono portare a un nuovo tipo di stati dinamici della materia che ho denominato 'strutture dissipative'», ...«Il caso classico (equilibrio macroscopico) è un esempio particolare di questa nuova e più ampia teoria».

### **Precedenti pietre miliari nella storia**

Considerando le leggi della forma, possiamo fare riferimento a D'Arcy Wentworth Thompson che, nel suo affascinante e voluminoso libro, ha incluso queste immagini (Fig. 4). Sono animali reali, pesci veri che si trovano in natura. D'Arcy dimostra che è possibile ottenerne uno dall'altro con poca trasformazione geometrica.

D'Arcy scrisse il libro "Crescita e forma" nel 1917, proponendo il concetto delle leggi della forma. In figura 5 è riportata l'illustrazione di una trasformazione più complessa: si tratta di veri e propri crani fossilizzati.

L'idea di D'Arcy Wentworth Thompson era che due o tre parametri, variando in modo continuo, possono generare diverse forme di vita; in figura 6, dove sono illustrate piante, polipi e meduse, è chiaramente visibile che esiste una profonda comunanza di forma mentre è una sottile ma continua variazione dei parametri che genera queste meravigliose forme di vita.

Ebbene, attorno al 1924, in modo convergente ma indipendente l'uno dall'altro, l'americano Alfred J. Lotka (1889-1946) e l'italiano Vito Volterra (1860-1940) svilupparono la biologia matematica e la biologia fisica. Scopirono le stesse equazioni differenziali per crescita, estinzione e oscillazioni stabili. Descrissero il fenomeno che sto per prendere in esame.

Quello riportato in figura 7 è un disegno originale di Vito Volterra che rappresenta l'interazione predatore-preda con un attrattore. La scoperta di queste equazioni ha dimostrato che lievi variazioni di questi parametri possono portare all'estinzione (per esempio, nel caso di predatore-preda, si può avere l'estinzione di entrambi) oppure che si possono ottenere stati stabili con oscillazioni. In realtà dipende dalla variazione dei parametri e, uscendo da questi cicli limite, si verifica, per esempio, l'estinzione. Se si rientra nei cicli limite (Fig. 8) si verificano oscillazioni ma non estinzione. La figura 9, dove è illustrato un ciclo limite e un attrattore, mostra invece qualcosa di più complesso.

Ora, partendo dagli anni '20, arriviamo al lavoro di

D'Arcy wrote his book: «On Growth and Form» in 1917, and he put forward the idea of the laws of form. In Figure 5 there is an illustration of a more complicated transformation - these are real fossilised skulls.

D'Arcy Wentworth Thompson's idea was that two or three parameters, varying in a continuous way can give rise to different forms of life; in Fig. 6 there are plants, polyps and jellyfish and it can be seen clearly that there is a deep commonality of form, and a slight, continuous variation in parameters gives these wonderful life forms. Now, around 1924, in a convergent, independent way the American, Alfred J. Lotka (1889-1946), and the Italian, Vito Volterra (1860-1940) developed mathematical biology, and physical biology. They discovered the same differential equations for growth, extinction and stable oscillations. They described the following phenomenon (Fig. 7).

This is an original drawing by Vito Volterra himself: it shows a predator-prey interaction with an attractor. The discovery of these equations showed that slight variations in these parameters can lead to extinction (for instance in the case of predator-prey you can have extinction of both), or you can have stable states with oscillations. It really depends on the variation of parameters and, if you go outside these limit cycles you have, for instance, extinction, if you stay within the limit cycles (Fig.8) you have oscillations, but no extinction. Something more complicated is illustrated in figure 9, where there is a one limit cycle and one attractor.

Now, moving on from the 1920's, we come to the work of Alan Mathison Turing who produced a less well-known but equally beautiful paper on: "The Chemical Basis of Morphogenesis" (1952). He said that we do not need new laws of nature, we do not need a different physics, or a different chemistry. The canonical laws of physics and chemistry can explain a lot of morphogenesis, a lot of the forms that you see in living beings and he demonstrates a ring of cells with stationary waves and a two-dimensional field.

So he claimed that well-known physical laws are sufficient to account for many of the facts of morphogenesis. It is interesting that he uses this expression. He says that "a system of chemical substances, called morphogens reacting together and diffusing through a tissue is adequate to account for the main phenomena of morphogenesis." In other words, morphogenes

Alan Mathison Turing che scrisse un articolo meno noto ma altrettanto bello su: "La base chimica della morfogenesi" (1952). Affermò che non abbiamo bisogno di nuove leggi della natura, non abbiamo bisogno di una diversa fisica o di una diversa chimica. Le leggi canoniche della fisica e della chimica possono spiegare molte cose della morfogenesi, molte delle forme che si vedono negli esseri viventi. A questo proposito l'autore fa l'esempio di un anello di cellule con onde stazionarie e un campo bidimensionale. Asserì quindi che le ben note leggi fisiche sono sufficienti a spiegare molti aspetti della morfogenesi. È interessante l'espressione di cui fa uso. Dice infatti che «un sistema di sostanze chimiche, denominate morfogeni, che reagiscono tra di loro e si diffondono attraverso un tessuto, è adatto a spiegare i principali fenomeni della morfogenesi». In altre parole, i morfogeni persuadono il tessuto a svilupparsi secondo linee diverse da quelle che sarebbero state seguite in loro assenza. Vorrei sottolineare proprio questo aspetto, ossia che: "lo persuadono a svilupparsi". Si tratta di un concetto particolarmente interessante, poiché ritengo che ci sia motivo di credere che i geni siano necessari proprio per persuadere le cellule e, quindi, gli organismi a fare determinate cose. È un concetto più blando del determinismo.

La figura 10 è tratta dall'articolo di Turing dal titolo "*Chiazze bidimensionali in conseguenza di un morfogene*". In questo disegno, tratto appunto dall'articolo, si comincia da un sistema in equilibrio (in corrispondenza della linea) per arrivare poi a uno spazio intermedio seguito da concentrazioni nettamente separate.

Cosa significa quindi tutto questo? Significa proprio quel che è illustrato nelle due figure successive (11 e 12). Esse illustrano, in bianco e nero, i calcoli fatti da Turing con le diffusioni fisiche e chimiche. Quindi l'immagine a colori "Macchie e strisce" (Fig. 13) illustra le forme reali di animali veri. Questo significa quindi che la diffusione fisico-chimica può spiegare le forme reali che si trovano negli animali veri. Turing fa poi riferimento ad altri casi, per esempio l'anemone di mare *Hydra* e la stellina odorosa (*Asperula odorata*). Casi reali di vita reale. (Fig. 14) Vorrei, a questo punto, passare al lavoro di René Thom (1923-2002). Nel 1972 pubblicò "Stabilità strutturale e morfogenesi" in cui suggeriva che quel che realmente conta, in questo mondo di morfogenesi, sono le discontinuità. Se si ha uno

persuade the tissue to develop along different lines than would have been followed in its absence. Now, I would like to stress this: «persuade it to develop». It is a very interesting notion, because I think there is reason to believe that what genes are needed for is to persuade cells and therefore organisms to do things. It is a milder notion than determinism.

Figure 10 is from Turing's paper, it is entitled "*Dappling in 2D as the result of one morphogen*". In this drawing from his paper: you start with an equilibrium system here (at this line) and then there is an intermediate space followed by sharply separated concentrations.

Now, what does this mean? It means the sort of thing that can be seen in the next two figures (11 and 12). They show in black and white Turing's calculations made with physical, chemical diffusions. Then in colour "Spots and Stripes" (Fig. 13) illustrates real shapes of real animals. So, this means that physical-chemical diffusion can explain the real shapes you find in real animals. Then Turing mentions other cases, for example the sea-anemone *Hydra* and the woodruff (*Asperula odorata*). Real cases in real life. (Fig. 14)

Now, I would like to move on to the work of René Thom (1923-2002). In 1972 he published "Structural Stability and Morphogenesis" in which he suggested that what really counts in this world of morphogenesis are the discontinuities. If you have a space of development of morphogens, what really captures the invariance of the phenomenon are the points of singularity. A very powerful approach.

So you have phenomena like the one that is depicted in Figure 15 in which you have different possibilities for the energy of the system, but you have zones in the system, shown in red, which are inaccessible to the system. So you have discontinuity: very sharp, sudden discontinuities that correspond to the progressive continuous variation of a parameter. There is a parameter, one or two parameters, that vary with continuity, and then all of a sudden you have a big discontinuity in the outcome, in the morphology.

Here, (Fig. 16) can be seen this energy minima - this is the simplest case of this kind of discontinuity for this cusp catastrophe - you have different regions.

What you see in pink is the space of variation of two parameters and they are very qualitatively distinct regions in this plane. If you remain in one of these regions what you have is very similar, but

spazio di sviluppo dei morfogeni, ciò che realmente cattura l'invarianza del fenomeno sono i punti di singolarità. Si tratta di un approccio veramente incisivo.

Si hanno quindi fenomeni del tipo illustrato in figura 15, dove esistono diverse possibilità per l'energia del sistema, ma ci sono anche zone del sistema (indicate in rosso) che sono inaccessibili al sistema stesso. In questo modo si verifica la discontinuità: le discontinuità molto accentuate e improvvisate corrispondono alla variazione continua e progressiva di un parametro. Uno o due parametri variano con continuità e poi, improvvisamente, si assiste a una grande discontinuità del risultato, della morfologia.

In questo caso (Fig. 16) si può osservare un minimo energetico: si tratta del caso più semplice di una simile discontinuità in rapporto a una catastrofe a cuspidi e si è in presenza di diverse regioni.

Le aree in rosa corrispondono allo spazio di variazione di due parametri e costituiscono regioni qualitativamente distinte di questo piano. Se si rimane all'interno di una di queste regioni, il risultato è molto simile ma se si supera questa cuspidi, se si attraversa questa linea, compare qualcosa di improvviso e di drastico, ovvero la continuità di variazione dei parametri o, in alcuni casi, la discontinuità della morfologia che ne deriva.

In uno spazio a quattro dimensioni si conoscono sette catastrofi elementari. È un fenomeno universale e, di fatto, queste sette catastrofi elementari si ritrovano ovunque. Se siete interessati all'argomento potete fare riferimento a un'interessante pagina Internet ([http://perso.orange.fr/l.d.v.dujardin/ct/eng\\_index.html](http://perso.orange.fr/l.d.v.dujardin/ct/eng_index.html)). Si tratta veramente di un grosso risultato.

### **Le 7 catastrofi elementari**

Catastrofi di sistemi con soltanto una variabile di stato:

- Piegatura (1 parametro di controllo)
- Cuspidi (2 parametri di controllo)
- Coda di rondine (3 parametri di controllo)
- Farfalla (4 parametri di controllo)

Catastrofi di sistemi con due variabili di stato:

- Ombelico iperbolico (3 parametri di controllo)
- Ombelico ellittico (3 parametri di controllo)
- Ombelico parabolico (4 parametri di controllo)

(Lucien Dujardin, Pharmacology, Lille)

if you cross this cusp, if you cross this line, something sudden and dramatic appears: so, continuity of variation of the parameters, in some cases discontinuity in the resulting morphology. There are seven elementary catastrophes, in a space with four dimensions, that have been known. This is universal, and in fact, these seven elementary catastrophes are found everywhere. If you are interested you can consult an interesting webpage ([http://perso.orange.fr/l.d.v.dujardin/ct/eng\\_index.html](http://perso.orange.fr/l.d.v.dujardin/ct/eng_index.html)). This is really a major result.

### **The 7 elementary catastrophes**

Catastrophes in systems with only one state variable:

- The fold (1 control parameter)
- The cusp (2 control parameters)
- The swallowtail (3 control parameters)
- The butterfly (4 control parameters)

Catastrophes in systems with two state variables:

- The hyperbolic umbilic (3 control parameters)
- The elliptic umbilic (3 control parameters)
- The parabolic umbilic (4 control parameters)

(Lucien Dujardin, Pharmacology, Lille)

So, what about these older approaches to the laws of form? Well, they suffer from poverty of the mathematical tools before René Thom. They suffer from poverty of the physico-chemical tools before Prigogine. The microscopic determinants were completely unknown, diffusion and catalysis were the only available concepts. Turing's idea was that genes are catalyst, but that is not correct, genes are not catalyst. There was no real genetics, there was no genetic dynamics i.e. no idea of genes as switches, no idea of genetic regulation, no idea of genetic networks, no idea of genetic modularity. These were the limits of the older approaches. But since then a lot has happened and in particular the advances in molecular biology.

### **Specificity "steals the show"**

- 1953 the double helix (Crick and Watson)
- 1960 genes as switches (Monod and Jacob)
- 1960 the structure of myoglobin (Kendrew) and hemoglobin (Perutz)
- 1961 the genetic code (Nirenberg and Matthaei, Crick and Brenner)  
Then a cascade of discoveries:
- Homeo-boxes

Cosa si può quindi dire di questi approcci alle leggi della forma più datati? Ebbene, essi risentono della scarsità degli strumenti matematici esistente prima di René Thom. Risentono anche della scarsità degli strumenti fisico-chimici esistente prima di Prigogine. I determinanti microscopici erano completamente sconosciuti mentre gli unici concetti disponibili erano diffusione e catalisi. L'idea di Turing era che i geni fungessero da catalizzatore, ma non è corretto perché i geni non sono un catalizzatore. Non c'era una genetica vera e propria, non c'era la dinamica genetica, ossia l'idea di geni come interruttori, non c'era l'idea di regolazione genetica, di reti genetiche, di modularità genetica. Questi erano i limiti degli approcci più datati. Ma, da allora, sono accadute tante cose e, in particolare, i progressi nel campo della biologia molecolare.

### La specificità “ruba la scena”

- 1953 la doppia elica (Crick e Watson)
  - 1960 i geni come interruttori (Monod e Jacob)
  - 1960 la struttura della mioglobina (Kendrew) e dell'emoglobina (Perutz)
  - 1961 il codice genetico (Nirenberg e Matthaei, Crick e Brenner)
- Poi, a cascata, una serie di scoperte:
- Geni regolatori homeo-box
  - Editing dell'RNA
  - Geni solo per RNA
  - Micro-RNA (Premio Nobel 2006)
  - Transposoni
  - Epigenetica
  - Geni knock-out e kick-in
  - Sequenziamento genomico massiccio

Biologia molecolare: scoperta della struttura genica, geni come regolatori, codice genetico ecc.. Tutte meravigliose scoperte che hanno caratterizzato gli ultimi vent'anni (geni master, micro-RNA). Nel 2006 il Premio Nobel è stato assegnato alla scoperta delle molecole regolatrici del micro-RNA. Inoltre vanno almeno citate tutte le meraviglie a cui abbiamo assistito con l'epigenetica. Nel frattempo c'è stata la biologia molecolare, il DNA, le sequenze del DNA, che ora si possono ottenere con estrema rapidità. L'età della specificità si è veramente impossessata della scena.

### Il ritorno alle leggi della forma

C'è stato, però, un ritorno alle leggi della forma e, a questo proposito, vorrei brevemente citare

- RNA editing
- RNA-only genes
- Micro-RNAs (Nobel Prize 2006)
- Transposoni
- Epigenetics
- Knock-out and kick-in genes
- Massive genome sequencing

Molecular biology: the discovery of the structure of the genes; genes as regulators, the genetic code, and so on. All the marvellous discoveries of the last twenty years (master genes, micro-RNA). The Nobel Prize 2006 was awarded for the discovery of micro-RNA regulatory molecules. Then mention should be made of all the wonders we have seen with Epigenetics. In the mean time what has happened is molecular biology, DNA, DNA sequences, now we can make sequences of DNA very rapidly. The age of specificity has been really stealing the show.

### The return to the laws of form

But there has been a return of the laws of form and let me give you briefly four cases, which I think are rather symptomatic.

My first example is taken from the work of Adrian Bejan and James H. Marden (Fig.18) entitled: *Invariants of Optimal Locomotion*. For every species, the optimal speed (i.e. the speed that really maximises the utilisation of energy) is a perfect scaling with its size, from bacteria to whales. This is shown by a straight line in a suitable scale — very interesting.

Another example (Fig.19) Here is a very different but equally representative case, illustrated by the foraging strategies of bumblebees. This was noted many years ago by Von Frisch. The bees leave the hive, they find food, they come back into the hive, they dance, they tell other bees where to go and look for food. Well, the author is one of my colleagues at the University of Arizona, Anna Dornhaus, originally from Germany. She has been studying these things for many years with very interesting results.

The issue here is: how many bees should go out and look for food? - these are the proactive searchers, and how many bees should stay in the hive and wait for the bees to come back and tell them where the food is (reactive searchers). Is there an optimum equilibrium? Yes there is. These equations prepared with the help of powerful computers tell you that what you see here is the optimum equilibrium. In different situations there is

quattro casi che, a mio avviso, sono piuttosto sintomatici.

Il primo esempio è tratto dall'opera di Adrian Bejan e James Marden (Fig.18) dal titolo: *Invariants of Optimal Locomotion (Le invarianti della locomozione ottimale)*. Per ciascuna specie la velocità ottimale, vale a dire la velocità che massimizza realmente l'utilizzo dell'energia, è in scala perfetta con le proprie dimensioni e questo vale per tutti, dai batteri alle balene. Inoltre, cosa particolarmente interessante, questo fenomeno è indicato da una retta, in una scala opportuna. Passiamo ad un altro esempio. In figura 19 è indicato un caso molto diverso ma ugualmente rappresentativo, illustrato dalle strategie di ricerca del cibo adottate dai bombi [imenottero, molto simile alla comune ape - NdR]. Questa osservazione venne effettuata molti anni fa da Von Frisch. I bombi abbandonano l'alveare, trovano il cibo, ritornano all'alveare, danzano e dicono agli altri bombi dove andare a cercare il cibo. Ebbene, l'autrice è una collega all'Università dell'Arizona, Anna Dornhaus, di origini tedesche. Ha studiato queste cose per anni con risultati molto interessanti.

La questione è: quanti bombi dovrebbero lasciare l'alveare per andare alla ricerca di cibo — dimostrandosi cercatori proattivi — e quanti dovrebbero invece rimanere all'interno dell'alveare attendendo il ritorno dei loro compagni con le informazioni su dove si trova il cibo (cercatori reattivi)? Esiste un equilibrio ottimale? Certo che sì. Queste equazioni, preparate con l'ausilio di potentissimi computer, ci rivelano che quel che si osserva qui è un equilibrio ottimale. A seconda delle situazioni c'è una determinata percentuale di cercatori proattivi e una certa percentuale di cercatori reattivi. Questo è ciò che ci dicono i computer e questo è quel che fanno i bombi. Essi agiscono come se avessero un proprio computer, come se avessero consultato i massimi esperti di statistica esistenti sulla terra. Fanno esattamente ciò che è meglio per l'intera comunità. Vedete, esistono situazioni in cui tutti dovrebbero mobilitarsi alla ricerca di cibo e situazioni in cui soltanto pochi escono per trovare cibo mentre gli altri aspettano: tutto dipende da quanto siano stabili le fonti alimentari. In taluni casi il cibo è disponibile per alcuni minuti, in altri casi per poche ore e in altri ancora per tantissime ore. Il diverso comportamento dei bombi può essere previsto mediante le equazioni studiate dal computer. Come fanno i bombi a sapere tutto ciò? Hanno

a certain percentage of proactive searchers and a certain percentage of reactive searchers. This is what the computers tell you, and this is what the bees do. The bees act as if they had their own computers, as if they had consulted the greatest statistical experts on earth. They do exactly what is best for the whole community. You see, you have situations in which everybody should go out and look for food, you have situations in which very few should go out and look for food and wait, and so on, depending on how stable the food is out there. In some situations you have food that lasts a few minutes, in other cases you have food that lasts some hours and in other cases you have food that lasts many, many hours. The different behaviour of the bees can be predicted with the equations prepared by the computer. How do the bees know? They only have a tiny little brain with a few millions cells — interesting, fascinating. What can account for that? They have too small a brain to account for these things.

Some of you, if you are familiar with second-order phase transitions, will recognise these graphics (Fig.20). Paramagnetic to ferromagnetic transitions, one kind of liquid to another kind of liquid. Isn't it extraordinary that you find, in the behaviour of bees, the graphics that you find for second-order phase transitions (paramagnetic, ferromagnetic materials, or in different kinds of liquid).

My third example: the canary. This example is dedicated to Niles Eldredge who has a book entitled "The Canary".

The song of the Waterslager canary is complicated. It is a long sequence of distinct syllables, each of which is repeated a variable number of times (phrase) before a switch to a new syllable type occurs. Syllable repetition rate varies between phrase types and can be as high as 30Hz for syllables that are followed by a mini breath and even greater than 60 Hz for phrases which are sung during a sustained expiration (pulsatile syllables).

There are three different kinds of songs (Fig. 21) - and there is an equilibrium between breathing in/breathing out. This paper: "Nonlinear model predicts diverse respiratory patterns of birdsongs", was published by a group of physicists in the Physical Review Letters. So here is the physics of the song of the canary. These physicists have discovered that all these very complicated patterns of songs that you can analyse in a more abstract space with very interesting D-parameters. This is a model of the brain regulation of this song, and the

soltanto un cervello piccolissimo con pochi milioni di cellule: il tutto è veramente interessante, affascinante.

Cosa può spiegare questo comportamento? Il loro cervello è troppo è piccolo per tener conto di tutte queste cose.

Chi di voi ha familiarità con le transizioni di fase di secondo ordine riconoscerà questi grafici (Fig. 20). Si tratta di transizioni ferromagnetiche-paramagnetiche, di transizioni da un tipo di liquido a un altro. Non è straordinario che nel comportamento di bombi si trovino i grafici delle transizioni di fase di secondo ordine (materiali paramagnetici, ferromagnetici o tra diversi tipi di liquidi)?

Il mio terzo esempio è relativo al canarino ed è dedicato a Niles Eldredge, che ha pubblicato un libro dal titolo "Il canarino".

Il canto del canarino Waterslager è complesso. Consta di una lunga sequenza di sillabe distinte, ciascuna ripetuta per un numero variabile di volte (frase) prima di passare a un nuovo tipo di sillaba. La ripetizione sillabica varia a seconda dei tipi di frase e può raggiungere i 30Hz per sillabe seguite da un mini-respiro o addirittura superare i 60 Hz per frasi cantate durante una espirazione sostenuta (sillabe pulsatili).

Esistono diversi tipi di canto (Fig. 21) e c'è un equilibrio tra inspirazione ed espirazione. Questo articolo, dal titolo: "Modello non lineare per prevedere diversi modelli respiratori nel canto degli uccelli", è stato pubblicato da un gruppo di fisici nella rivista Physical Review Letters. Esiste quindi anche una fisica del canto del canarino. Questi fisici hanno scoperto che tutte queste complicatissime modalità di canto possono essere analizzate, in uno spazio più astratto, mediante parametri dimensionali molto interessanti. Si tratta di un modello di regolazione cerebrale del canto e il risultato è che equazioni differenziali non lineari e piuttosto semplici sono in grado di spiegare tutto. (Fig. 22,23,24,25)

Dato che in molte specie aviarie i principali meccanismi respiratori della produzione del canto sono simili a quelli del canarino, questo modello dovrebbe essere ampiamente applicabile al comportamento canoro in generale. Il modello identifica inoltre un possibile meccanismo neuronale per la generazione di svariati modelli ritmici comportamentali che hanno validità generale malgrado le differenze di specifica configurazione neuronale tra i sistemi. Questo studio suggerisce che anche semplici modelli fisici

result is that rather simple non linear differential equations explain everything. (Figs 22,23,24,25) Because in many bird species the principal respiratory mechanisms of song production are similar to those of the canary, this model should be broadly applicable to singing behaviour.

Furthermore, the model identifies a possible neural mechanism for generating diverse rhythmic behavioural patterns in general, despite the differences between systems in their specific neural arrangements. This study suggests that simple physical models can play an important role in providing a complex variety of responses with minimal neural substrate.

Now, finally, the last example, which I think is the most stunning: the fourth dimension of living systems.

What is the fourth dimension of living systems?

### **The "fourth dimension" of living systems**

Body sizes vary between  $10^{-13}$  grams (bacteria) to  $10^8$  grams (whales)

That is: 21 orders of magnitude

How do exchange surfaces and internal rates of transport scale?

Tradeoff: Maximize inner and outer exchange surfaces but minimize distances of internal transport (maximize rates of transport)

The entire circulatory system of a human body (capillaries notably included) is 60 thousand miles. The diameter of capillaries is an invariant in the realm of vertebrates

Metabolic rate scales as the 3/4th power of mass

The rate of metabolism and a number of other global biological parameters follow the law of one fourth, which is very strange because it should be one third, because there is a volume, a linear dimension and then you are in three dimensions. (We are creatures in three dimensions) and so, you should have the powers of one third. But you have powers of one fourth. This has been known for a long time but nobody had an explanation until relatively recently.

Physicists and mathematicians of the typical New Mexico approach looking at biology invariance in Biology Los Alamos and Santa Fe laboratories, made a calculation: maximise inner and outer exchange surfaces, minimise distances of transport. Now the whole circulatory system in our body is sixty thousand miles — which is rather a stunning data, don't you think? Obviously the capillaries are included and no cell in our body is

possono svolgere un importante ruolo nel fornire una complessa gamma di risposte con minimo substrato neuronale.

Passiamo, infine, all'ultimo esempio che, a mio avviso, è anche il più sorprendente: la quarta dimensione dei sistemi viventi.

Qual è la quarta dimensione dei sistemi viventi?

### La "quarta dimensione" dei sistemi viventi

- Le dimensioni corporee variano tra  $10^{-13}$  grammi (batteri) e  $10^8$  grammi (balene)
- Ciò equivale a 21 ordini di grandezza
- Come si bilanciano le superfici di scambio e le velocità di trasporto interne?
- Compromesso: massimizzare le superfici di scambio interne ed esterne minimizzando le distanze di trasporto interno (massimizzando le velocità di trasporto)
- L'intero sistema circolatorio dell'organismo umano (compresi anche i capillari) misura 60.000 miglia
- Il diametro dei capillari è un'invariante nel regno dei vertebrati
- Il tasso metabolico equivale ai  $3/4$  della potenza della massa

Il tasso metabolico e una serie di altri parametri biologici globali seguono la legge del quarto, cosa molto strana, perché in realtà dovrebbe essere un terzo, visto che c'è un volume, una dimensione lineare, quindi si è in un ambito tridimensionale. Siamo creature tridimensionali e, di conseguenza, le potenze dovrebbero essere di un terzo, invece sono di un quarto. Questo fatto è noto da tempo ma nessuno ne aveva trovato la spiegazione se non molto recentemente.

I fisici e i matematici che seguono il tipico approccio del New Mexico nel valutare l'invarianza biologica presso i laboratori di biologia di Los Alamos e di Santa Fe, hanno fatto il seguente calcolo: massimizzare le superfici di scambio interne ed esterne, minimizzare le distanze di trasporto. Il sistema circolatorio del nostro organismo misura 60.000 miglia: non vi pare un dato piuttosto sorprendente? Ovviamente questo valore comprende anche i capillari e non vi è cellula del nostro organismo che disti più di due diametri cellulari da un capillare. La dimensione dei capillari è una invariante nel regno dei vertebrati. Tenendo conto di tutti questi fattori, il gruppo ha avanzato la seguente interessante ipotesi per spiegare perché le cose seguano la legge del quarto: c'è un sistema di frattali, un sistema che

further away from a capillary than two cell diameters. The size of the capillaries is an invariant in the realm of vertebrates.

Taking all this into consideration, the group put forward this interesting hypothesis to explain why things go by one fourth: there is a fractal system, a space filling system, which is a fractal (maximum space-filling system of a fractal).

### Paradigm instances:

General equation:  $Y = Y_0 (M)^b$  where  $b$  (the scaling exponent) is a simple multiple of  $1/4$   
 $M$  is the body mass,  $Y_0$  a normalization constant  
Diameter of tree trunks and aortas  $b = 3/8$   
(therefore, for their cross section area  $b = 3/4$ )  
Rates of cellular metabolism and heart beat  $b = -1/4$   
Blood circulation time and life span  $b = 1/4$   
Whole organism metabolic rate  $b = 3/4$   
Puzzle: Why multiples of  $1/4$  and not of  $1/3$ ?

These are some of the examples. So, what do you have in systems like that? In Fig.26 on the left can be seen the solution for mammals; on the right, the solution for plants.

The two most famous fractals are the Julia set, discovered by Gaston Julia, and the Mandelbrot set (Fig.27). This is a mathematical property, this is a solution by iteration of a simple equation in the field of complex numbers. But what is important here is that if you zoom into the figure of the Mandelbrot set, you obtain exactly the same, ad infinitum.

Now, why am I showing you this? Because, if you take one cell (one bacterium, one cell of our body), inside this cell there are compartments, which have membranes and these membranes exchange energy and flows of matter.

Well, the laws of one individual cell in our body are the same as the laws for the whole body. This is the discovery of these fractals.

In Fig. 28, on the left you have an illustration of the ramifications that you get. On the right you have the law that metabolic activity goes as three quarters. You have the typical ratio between logarithm, you have the typical fractal and this is what we are. So, fractal has added a fourth dimension to life. In biology, you have the three dimensions of space and the fractal nature of the so-called "material transport systems" in biology such as the blood circulation system which, for example, has added a fourth dimension.

So, what are the main lessons here? Well, it is that

riempie lo spazio che equivale a un frattale (sistema di massimo riempimento spaziale del frattale).

### Esempi paradigmatici:

Equazione generale:  $Y = Y_0 (M)^b$  dove  $b$  (l'esponente di scala) è un multiplo semplice di  $1/4$   
 $M$  è la massa corporea,  $Y_0$  una costante di normalizzazione

Diametro di tre tronchi e dell'aorta  $b = 3/8$   
(quindi, per la loro sezione trasversale  $b = 3/4$ )

Tassi di metabolismo cellulare e battito cardiaco  
 $b = -1/4$

Tempo di circolo ematico e arco di vita  $b = 1/4$

Tasso metabolico dell'intero organismo  $b = 3/4$

Domanda: perché tutti multipli di  $1/4$  e non di  $1/3$ ?

Questi sono alcuni esempi. Cosa accade, quindi, in simili sistemi? In Fig. 26, a sinistra, è illustrata la soluzione per i mammiferi e, a destra, per le piante. I due frattali più famosi sono l'insieme di Julia, scoperto da Gaston Julia, e l'insieme di Mandelbrot (Fig.27). Questa è una proprietà matematica, questa è una soluzione in iterazione di soluzioni di una semplice equazione nel campo dei numeri complessi. La cosa importante, a questo proposito, è che se si fa uno zoom sulla figura dell'insieme di Mandelbrot, si ottiene esattamente la stessa figura, all'infinito.

Perché vi sto mostrando tutto questo? Perché se si prende una cellula (un batterio, una cellula del nostro organismo), si osserva che, al suo interno, ci sono dei compartimenti dotati di membrane che si scambiano energia e flussi di materia. Ebbene, le leggi che si applicano a ogni singola cellula del nostro organismo sono le stesse che valgono per l'intero organismo. Questa è la scoperta effettuata grazie a questi frattali.

In Fig. 28 sono illustrate, a sinistra, le ramificazioni che si ottengono e, a destra, la legge secondo cui l'attività metabolica procede a tre quarti. Si ha il rapporto tipico tra i logaritmi, si ha il frattale tipico e questo è ciò che siamo. Pertanto il frattale ha aggiunto una quarta dimensione alla vita: ci sono le tre dimensioni dello spazio e la natura frattale dei cosiddetti "sistemi di trasporto materiale" in biologia, come il sistema di circolazione del sangue, per esempio, che ha aggiunto una quarta dimensione.

Quali sono, quindi, le principali lezioni che possiamo trarre a questo proposito? Prima di tutto che il codice genetico si è evoluto soltanto una volta nella vita, poiché noi tutti possediamo lo stesso codice

the genetic code has only evolved once in life, because we all have the same genetic code. But fractal like distribution networks have evolved many times, from bacteria to mammals. Living beings occupy a 3-dimensional space but have a 4-dimensional internal physiology and anatomy.

Now, is there a gene that codes for this fractal? It is not very likely. This is something else. The genetic system of the organism rides these laws of form, but they are not specified by the genes. So, you have this fourth dimension.

And, what these authors say is that natural selection has exploited variations on this fractal theme to produce the incredible variety of biological form and function. So, you have natural selection, but there were severe geometric and physical constraints on metabolic processes. Of course, you have DNA, and genes, but there is much else besides which interacts with DNA. So, in conclusion, what do I think the future is: - to integrate the DNA-centric and sequence-centric analysis with the laws of form. A wonderful revolution in biology: the molecular biology revolution.

- evolution has to be re-thought, re-conceptualized. The space of what can be selected has to be narrowed down.

- integrate evolution and development which is already beginning with the Evo-Devo Revolution (Sean Carroll 2005).

- re-think the evolution of the brain, cognition and language and open up the space of what Charles Randy Gallistel of Rutgers University has rightly suggested: room at the bottom. What does he mean by "room at the bottom"? He means below the level of neurons. Looking at the nematode, which is a little worm with only three hundred neurons, and at its incredibly sophisticated behaviour and learning capacity, it is apparent that just three hundred neurons cannot explain this. So, you have to go one level below the neurons to: DNA, enzymes, the machinery of the cells etc. So, I think really that the big question is a little different from the one I started with. What is a genome that it may code for an ontogeny and what is an ontogeny that it may be coded for by a genome? — in the context of general laws of scaling and morphogenesis.

genetico. Invece le reti di distribuzione simili a frattali si sono evolute diverse volte, dai batteri ai mammiferi. Gli esseri umani occupano uno spazio tridimensionale ma la loro fisiologia interna e anatomia hanno caratteristiche a quattro dimensioni.

Esiste, a questo punto, un gene in grado di codificare questo frattale? Non è molto probabile. C'è qualcos'altro. Il sistema genetico dell'organismo cavalca queste leggi della forma ma esse non sono specificate dai geni. Pertanto si è in presenza di una quarta dimensione.

Questi autori affermano inoltre che la selezione naturale ha sfruttato le variazioni sul tema dei frattali per produrre l'incredibile varietà di forma e funzione biologica. Quindi, malgrado la selezione naturale, ci sono stati pesanti vincoli geometrici e fisici sui processi metabolici. Ovviamente abbiamo il DNA e i geni ma c'è molto di più che interagisce con il DNA. In conclusione, quindi, credo che in futuro si debba:

- integrare l'analisi DNA-centrica e sequenza-centrica con le leggi della forma. Una meravigliosa rivoluzione biologica: la rivoluzione della biologia molecolare;
- riconsiderare e riconcettualizzare l'evoluzione. Lo spazio di ciò che si può selezionare deve essere ristretto;
- integrare evoluzione e sviluppo, cosa che ha già avuto inizio con la rivoluzione Evo-Devo (Sean Carroll 2005);
- ripensare all'evoluzione del cervello, delle funzioni cognitive e del linguaggio, aprendo lo spazio di ciò che Charles Randy Gallistel della Rutgers University ha correttamente indicato come "spazio nel sottosuolo". Cosa intende dire con "spazio nel sottosuolo"? Intende il livello inferiore a quello dei neuroni. Osservando il nematode, un piccolo verme con soli trecento neuroni, il suo comportamento incredibilmente sofisticato e la sua capacità di apprendimento, è evidente che trecento neuroni non possono essere la sola spiegazione. Si deve quindi scendere di un livello sotto i neuroni: DNA, enzimi, meccanismi cellulari, ecc. Credo, quindi, che il grosso quesito sia un po' diverso da quello con cui ho cominciato. Com'è fatto un genoma capace di codificare un'ontogenia e com'è fatta un'ontogenia capace di essere codificata da un genoma? Tutto questo nel contesto delle leggi generali di scala e morfogenesi.