

Studio di sistemi complessi: la prospettiva ecodinamica in chimica-fisica ambientale

*P. P. Franzese, *A. Scopa, **A. Riccio, ***G. Barone.

* Dipartimento di Produzione Vegetale - Laboratorio di Ecodinamica - Università della Basilicata, Potenza

** Istituto Matematica, Fisica ed Applicazioni - Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

*** Dipartimento di Chimica - Università degli Studi di Napoli "Federico II"

SOMMARIO

I sistemi ecologici, da un punto di vista termodinamico, sono caratterizzati da fenomeni irreversibili di non equilibrio. Inoltre, essi sono sistemi aperti, di dimensioni finite, limitati da vincoli biofisici e altamente integrati attraverso una rete di flussi di materia ed energia.

In questo articolo viene esposta una descrizione concisa delle caratteristiche chimico-fisiche dei sistemi complessi, con particolare riferimento alla prospettiva ecodinamica ed ai concetti di autoorganizzazione e strutture dissipative.

Parole chiave: ecodinamica; strutture dissipative; complessità; ecosistema.

ABSTRACT

Ecosystems are characterised, from a thermodynamic point of view, by non equilibrium and irreversible phenomena. In addition, they are open systems of finite dimensions, which are highly integrated through matter and energy fluxes and restricted by biophysical constraints.

In this paper a concise description of chemical-physics nature of the complex systems is given, with special reference to ecodynamic approach and dissipative structure theory.

Keywords: ecodynamic; dissipative structure; complexity; ecosystem

Introduzione

La teoria secondo la quale un sistema complesso possa venir compreso completamente studiando le proprietà delle sue parti è al centro del **paradigma cartesiano**. Il celebre metodo analitico di Cartesio, uno dei più influenti principi informatori del pensiero scientifico moderno, trova in questo assunto il suo principio fondante.

Nell'**approccio analitico**, o "**riduzionistico**", le parti di un sistema possono essere analizzate sino ad un definito livello di approfondimento il cui superamento presuppone la necessità di ridurre il sistema in esame in parti ancora più piccole.

Inoltre, il grado di simmetria sempre più elevato che si riscontra a scale dimensionali sempre più piccole, ha contribuito notevolmente nel determinare il crescente successo di questo approccio: "*è nel più piccolo che si trova l'eleganza e la simmetria, dunque il fondamentale*" (Virasoro, 1996).

Alcune discipline scientifiche come la "**chimica-fisica di non equilibrio**" (conosciuta anche come "**termodinamica evolutiva**") hanno evidenziato come non sia possibile cogliere tutta la complessità dei sistemi viventi e di quelli ecologici per mezzo dell'analisi riduzionistica. Le proprietà delle componenti di un sistema complesso possono essere comprese solo studiando l'organizzazione del tutto (Capra, 1997).

Esistono, infatti, proprietà sistemiche definite "emergenti", che si manifestano solo ad un certo stadio di organizzazione gerarchica della materia, non valutabili nell'analisi delle singole componenti di un sistema (Franzese *et al.*, 2003). Tale nuovo approccio scientifico dal carattere contestuale prende il nome di "**pensiero sistemico**"; esso supera lo studio esclusivo dei "**mattoni elementari**" e la relativa perdita d'informazione che ne deriva, concentrandosi piuttosto sui principi di organizzazione fondamentali.

Ludwig von Bertalanffy, biologo austriaco autore del famoso testo *Teoria generale dei sistemi* (von Bertalanffy, 1971), fu uno dei primi scienziati ad investigare sistemi di diversa natura focalizzando l'attenzione sui processi e sulle "relazioni organizzanti".

Egli contribuì notevolmente allo sviluppo di questo approccio metodologico, ricercando nella **teoria generale dei sistemi** una **forma mentis** in grado di unificare le diverse teorie e discipline scientifiche, consentendo uno studio olistico dei sistemi complessi.

Fu inoltre tra i primi scienziati ad arguire la natura **autopoietica** e **neghentropica** dei sistemi viventi, che trenta anni più tardi venne dimostrata dal **Premio Nobel** per la Chimica Ilya Prigogine¹.

Altri protagonisti di questo nuovo approccio, le cui basi teoriche

risalgono agli anni sessanta del secolo scorso, furono scienziati brillanti come *L.D. Landau, K. Wilson, L.P. Kadanoff e M. Fisher*. Essi misero in rilievo due importanti caratteristiche dei sistemi dinamici: la prima è nota come “**comportamento collettivo emergente**”, mentre la seconda è relativa alla “**transizione di fase come rottura spontanea di una simmetria**”.

Chimica-fisica di non equilibrio

Considerata la necessità di ragionare in termini di flussi di entropia in sistemi aperti, quali sono i sistemi biologici ed ecologici, ripercorriamo i passi salienti del passaggio dalla termodinamica classica alle teorie di *Prigogine*, ovvero alla termodinamica dei processi lontano dell'equilibrio.

In primo luogo ricordiamo le fondamentali differenze esistenti tra sistemi isolati, chiusi ed aperti.

I **sistemi isolati** non consentono lo scambio di materia ed energia con l'ambiente esterno.

I **sistemi chiusi** consentono lo scambio di energia, ma non di materia, con l'ambiente esterno.

I **sistemi aperti** consentono invece lo scambio continuo di materia e di energia con l'ambiente esterno (ad es. i sistemi ecologici ed i sistemi viventi).

I sistemi isolati tendono inesorabilmente verso uno stato di equilibrio termodinamico che viene raggiunto quando l'energia è completamente degradata e pertanto non è più in grado di fornire lavoro.

Tali sistemi sono ben descritti dalla **termodinamica classica** che nel secondo principio enuncia una tendenza universale verso uno stato caratterizzato dalla totale omogeneità di temperatura, pressione e composizione chimica. Questa tendenza viene misurata dalla variazione di una funzione che prende il nome di entropia (dalle parole greche *τροπή*= trasformazione ed *εντροπή*= mutazione, confusione). L'**entropia** (simbolo **S**) è una funzione dello stato termodinamico macroscopico del sistema, che definisce anche una misura del disordine organizzativo della materia nel sistema stesso.

Conseguenze dirette del secondo principio sono constatabili nelle esperienze della vita quotidiana. Ad esempio: il calore passa sempre spontaneamente da un corpo caldo ad uno freddo; le molecole di profumo in una bottiglia aperta diffondono disordinatamente nella stanza; un mazzo di carte cadendo a terra si sparpaglia in modo disordinato; ecc.

In tutti questi processi si manifesta una spontanea ed irreversibile tendenza al disordine. Questo disordine è presente anche nei moti con attrito, nella viscosità, nei grandi fenomeni naturali, tutti esempi di processi irreversibili che hanno una direzione temporale privilegiata. Per contro, fenomeni idealizzati come ad esempio il pendolo ideale (senza attrito), sono reversibili e descritti da equazioni d'evoluzione invarianti rispetto all'inversione del tempo: il futuro (+t) ed il passato (-t) si equivalgono.

La probabilità che si verifichino i processi inversi (ad es. che le molecole di profumo dalla stanza si riuniscano nella bottiglia) è però talmente bassa che possiamo considerare questi ultimi come impossibili.

Così, dall'irreversibilità e dalla rottura della simmetria temporale scaturisce il concetto della “**freccia del tempo**”. La simmetria

temporale è sempre associata a processi reversibili, mentre il tempo unidirezionale è invece caratteristico dei processi irreversibili. La natura, secondo *Prigogine*, “*ci presenta sia processi irreversibili che reversibili, ma i primi sono la regola e i secondi l'eccezione*”!

Riepilogando con l'ausilio del formalismo matematico, diciamo che in termodinamica classica, **per processi reversibili**, il differenziale dell'entropia di un sistema, **dS**, è dato dall'espressione:

$$dS = \delta Q / T \quad (1.0)$$

dove δQ è il flusso di calore scambiato reversibilmente e **T** la temperatura assoluta del sistema.

Per un sistema isolato (come veniva considerato il nostro universo) qualsiasi scambio di calore fra due parti a temperatura diversa avviene in modo asimmetrico: la parte calda perde calore e la sua variazione di entropia è data da:

$$dS' = \delta Q / T'$$

mentre quella fredda subisce una variazione data da:

$$dS'' = \delta Q / T''$$

Poiché $T' > T''$ allora $dS' < dS''$ ed in totale risulta:

$$dS = dS' + dS'' > 0 \quad (1.1)$$

Per processi irreversibili (o spontanei) si è dimostrato che l'incremento di entropia è più grande di quello che avviene nei processi reversibili. Per il passaggio di calore, ad esempio, vale la relazione:

$$dS > \delta Q / T \quad (1.2)$$

Questo risultato implicava la considerazione che tutti i processi spontanei che avvengono irreversibilmente all'interno dell'universo, portano ad un aumento dell'entropia, a meno di casi particolari che avvengano in condizioni di equilibrio e siano completamente reversibili, per i quali l'entropia rimane costante. Poiché l'entropia è un indice del grado di dispersione dell'energia e di disorganizzazione della materia di un sistema, il nostro universo avrebbe dovuto, in base al secondo principio della termodinamica, costantemente ed irreversibilmente tendere a stati sempre meno ordinati, fino a raggiungere lo stato di equilibrio termodinamico, per il quale l'entropia è massima (**morte termica di Clausius**)². Inoltre, poiché in fisica si associa sempre l'ordine con una riduzione dell'entropia, la relazione (1.1) esclude, in un sistema isolato, la formazione spontanea di strutture ordinate.

Consideriamo ora un sistema che è all'equilibrio, ma che può scambiare energia con l'esterno ad una certa temperatura costante **T** (*sistema chiuso*).

La termodinamica di equilibrio mostra che il suo comportamento è descritto da una nuova funzione di stato, l'**energia libera di Helmholtz**, **F**, data dalla seguente relazione:

$$F = E - TS \quad (1.3)$$

dove **E** è l'energia interna del sistema. All'equilibrio **F** risulta essere minima.

Per un'interpretazione microscopica di questo minimo, supponiamo che il sistema si possa trovare su diversi livelli energetici. Allora, all'equilibrio la probabilità che il sistema si trovi in uno stato di energia E_n è data da:

$$P \propto \exp(-E_n / k_B T) \quad (1.4)$$

dove k_B è la costante di Boltzmann.

Per T sufficientemente bassa, le due equazioni precedenti implicano che saranno occupati in modo apprezzabile solo i livelli con E_n bassa. Al crescere di T , il contributo di S in F diventa superiore al contributo di E , cioè le molecole sono disperse su un maggior numero di livelli. Tanto premesso, vediamo che in un sistema non isolato esiste la possibilità di formare strutture ordinate purché T sia bassa. Questo principio, indicato come il **Principio d'ordine di Boltzmann**, è responsabile della comparsa di strutture come i cristalli ed anche delle transizioni di fase. Tale principio non è però sufficiente per spiegare le strutture di origine biologica. Pensiamo ad esempio alla formazione di una macromolecola biologica come una catena proteica di 100 amminoacidi.

Consapevoli che la funzione fisiologica della proteina è soddisfatta solo se la disposizione degli amminoacidi costituenti segue un ordine ben definito, notiamo che il numero di permutazioni necessario per ottenere la disposizione voluta a partire da una distribuzione arbitraria iniziale è: $N \cdot 20^{100} \cdot 10^{130}$.

Se si assumono tutte le configurazioni corrispondenti come equiprobabili, anche considerando un cambiamento di struttura (per esempio in seguito a mutazione) della proteina iniziale ogni 10^8 secondi, sarebbe necessario un tempo di $t = 10^{122}$ secondi per ottenere la proteina desiderata. Se ricordiamo che l'età della Terra è di "soli" 10^{17} secondi, ci rendiamo conto che la formazione spontanea della proteina considerata deve essere esclusa.

Queste riflessioni sull'origine della vita sono dovute al biochimico *Manfred Eigen*, premio Nobel per la chimica e direttore dell'Istituto *Max Planck di Göttinga* per la chimica-fisica, il quale ipotizzò processi di evoluzione pre-biologica ai quali diede il nome di "**auto-organizzazione molecolare**".

Per spiegare l'apparente contraddizione tra l'ordine biologico ed il secondo principio della termodinamica bisogna assumere che i sistemi viventi siano in stato quasi stazionario e lontano dall'equilibrio termodinamico.

La teoria adatta a descrivere il comportamento di tali sistemi è stata sviluppata inizialmente da *De Donder* a *Bruxelles* nel 1929. Successivamente è stata ulteriormente approfondita da *von Bertalanffy* nel 1932, da *Schrödinger* e da *Prigogine* nel 1945.

Prigogine ha dimostrato che per i sistemi aperti la variazione infinitesima di entropia dS è data dalla somma di due termini, uno $d_e S$, legato agli scambi con l'esterno, l'altro $d_i S$, legato all'entropia prodotta all'interno del sistema (Figura 1);

$$dS = d_e S + d_i S \quad (1.5)$$

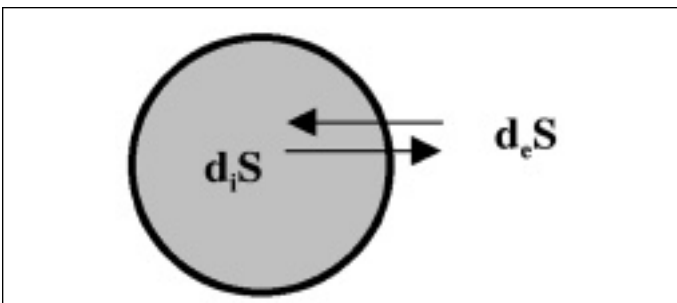


Fig. 1 - Flusso e produzione di entropia in un sistema aperto.

$d_i S$ (entropia prodotta all'interno del sistema) risulta sempre maggiore di zero, perché dovuta a processi irreversibili, mentre su $d_e S$ (trasferimento di entropia dai confini del sistema) non esistono vincoli, ovvero può essere maggiore, minore o uguale a zero.

Per un qualsiasi sistema si avrà pertanto:

- 1) $-d_e S < d_i S \rightarrow dS > 0$
- 2) $-d_e S = d_i S \rightarrow dS = 0$
- 3) $-d_e S > d_i S \rightarrow dS < 0$

Se si verifica il primo caso, l'entropia del sistema è in aumento, ma a velocità inferiore a quella che avrebbe se il sistema fosse isolato; nel secondo caso, il sistema è in uno stato stazionario nei confronti dell'entropia, visto che gli scambi con l'esterno annullano l'aumento di entropia dovuto ai processi interni; nel terzo caso l'entropia del sistema diminuisce, ovvero aumenta la propria organizzazione.

In altre parole, i sistemi aperti differiscono da quelli isolati per la presenza di termini di flusso, $d_e S$, nella variazione di entropia, e, contrariamente a $d_i S$ che non può mai essere negativo, questi termini non hanno un segno definito. Il risultato è che si possono ottenere trasformazioni in cui il sistema raggiunge uno stato a entropia più bassa di quella iniziale:

$$\Delta S = \int_{\text{percorsso}} dS < 0 \quad (1.7)$$

Questo stato, che dal punto di vista della relazione (1.4) sarebbe altamente improbabile, può essere indefinitamente mantenuto purché al sistema sia permesso di raggiungere uno stato stazionario tale che

$dS = 0$ ossia:

$$d_e S = -d_i S < 0 \quad (1.8)$$

In definitiva, se diamo ad un sistema una sufficiente quantità di flusso di entropia negativa (*neghentropia*), lo rendiamo capace di mantenere una configurazione ordinata. Come mostra la relazione (1.8), questo rifornimento deve avvenire sotto condizioni di non-equilibrio, altrimenti sia $d_i S$ che $d_e S$ si annullerebbero. Il non-equilibrio può rappresentare una sorgente di ordine e ciò è di grande interesse per i sistemi viventi.

La biosfera è nel suo insieme un sistema in non-equilibrio, in quanto soggetta al flusso di energia solare.

A livello cellulare, le membrane della cellula o le diverse catene di reazioni biochimiche sono sottoposte a gradienti di concentrazione dei costituenti chimici. In tutti questi casi, grazie agli scambi con l'ambiente esterno, i sistemi aperti rallentano il proprio cammino verso l'equilibrio, oppure, addirittura si allontanano dall'equilibrio aumentando la propria complessità ed autoorganizzandosi. Tutto questo avviene nel totale rispetto del secondo principio della termodinamica, perché, considerando la variazione totale di entropia del sistema e dell'ambiente, questa risulta sempre positiva.

Autoorganizzazione e Strutture Dissipative

Lo studio dei dettagli microscopici di un sistema (microstati) porta come massima informazione quella sulle possibili fasi

(macrostati) in cui esso può venire a trovarsi.

La particolare fase che il sistema effettivamente “sceglie” comporta la rottura spontanea di una simmetria, una transizione di fase, la cui spiegazione non risiede nelle interazioni elementari. A tal proposito, *Murray Gell-Mann* correla i concetti di entropia ed informazione, definendo *l'entropia del macrostato come una misura del grado di ignoranza circa il microstato in cui il sistema si trova, avendo assunto tutti i microstati nel macrostato come equiprobabili*.

Il comportamento collettivo di un sistema emerge solo quando il numero delle componenti è molto grande. Ad esempio, in condizioni di non-equilibrio, miliardi di molecole interagiscono manifestando correlazioni di grande portata, non presenti nello stato di equilibrio.

Un esempio relativo al mondo biologico è riscontrabile nel processo di aggregazione delle amebe (Figura 2).

Nel caso di risorse abbondanti le amebe si comportano in modo indipendente, cibandosi di batteri e riproducendosi per divisione cellulare. In caso di risorse scarse, invece, le amebe si raggruppano intorno ad un centro di aggregazione, fino a formare un organismo pluricellulare detto *pseudoplasmodio* (tale meccanismo coinvolge circa 10^5 amebe per ogni pseudoplasmodio).

Il motivo che le spinge ad aggregarsi, con un movimento detto *chemio-taxis*, sembra essere la diffusione di un messaggero biochimico (*l'adenosin-monofosfato ciclico* o anche *c-AMP*)³.

L'informazione biochimica trasportata nel mezzo rompe la simmetria spazio temporale ed è responsabile del fenomeno di autoorganizzazione.

L'organizzazione rappresenta quindi una realtà che condiziona il movimento (*la mente*) delle molecole (*dei singoli*), anche se, circolarmente, l'organizzazione stessa non esisterebbe senza le unità elementari che la determinano. Un'organizzazione vivente è quindi qualcosa che costruisce se stessa (si auto-produce) mentre è in relazione circolare con le parti che la costituiscono. Parfrasando *Proust* potremmo dire: “ogni atomo della società è a sua volta complesso e, come in un gioco di specchi, ha l'intero mondo dentro di sé”.

Per restare nella metafora, verrebbe pertanto da chiedersi: possediamo dei geni? Ovvero sono i nostri “*geni egoisti*” a possederci?

Quando parliamo di autoorganizzazione ci riferiamo ad una dinamica globale, ossia un'organizzazione che “emerge” senza essere progettata da nessuno (*Zanarini, 1996*). Moltissimi esem-

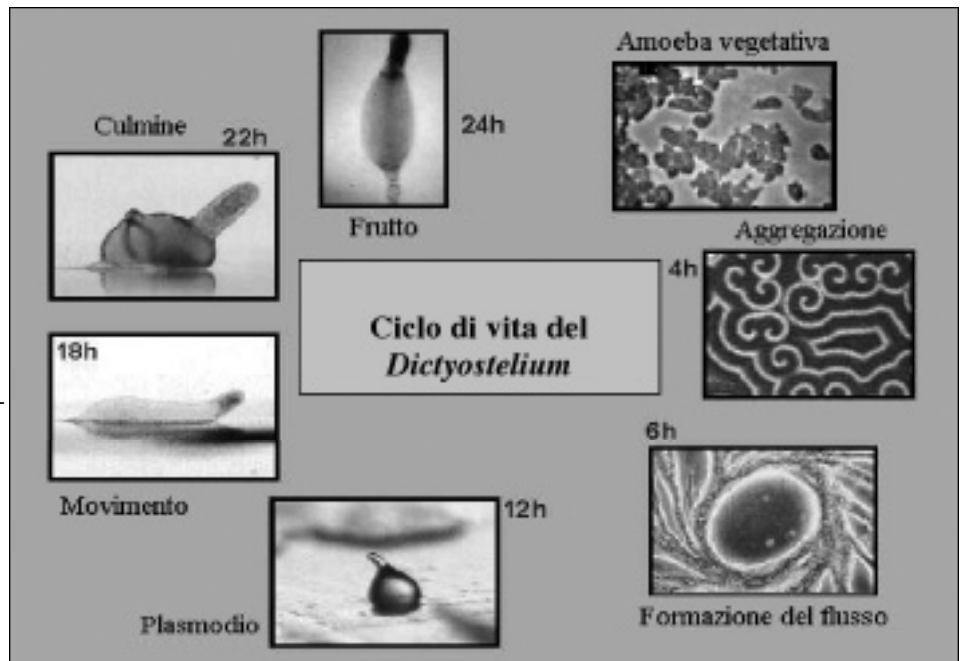


Fig. 2.A - Ciclo di vita del *Dictyostelium discoideum*.

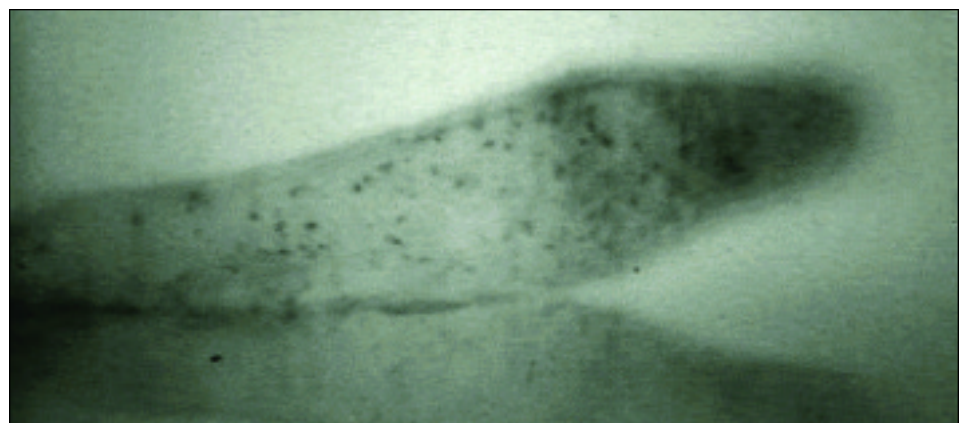


Fig. 2.B - Evoluzione del *Dictyostelium discoideum* dopo 24 ore.

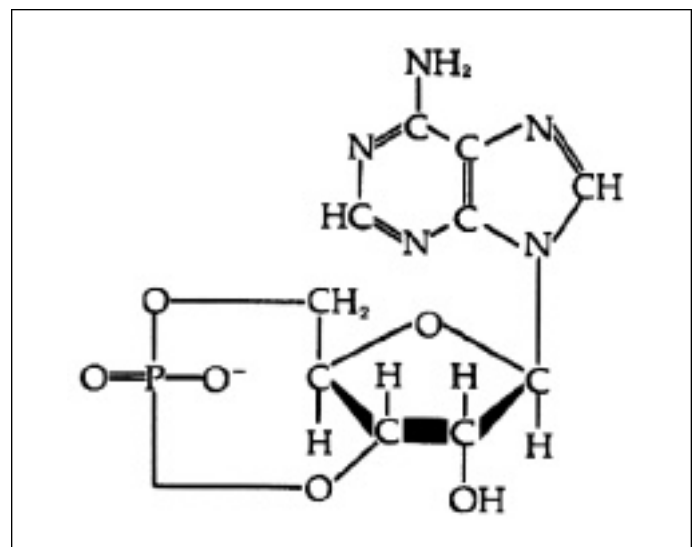


Fig. 3 - AMP ciclico.

pi di tale situazione sono riscontrabili in natura a diverse scale spazio-temporali. Pensiamo ad esempio alle “*celle di Bénard*”, agli “*orologi chimici*” di Prigogine, ai “*cicli catalitici enzimatici*” di Manfred Eigen, o alle “*strutture ultrametriche*” di S. Kirkpatrick.

Prigogine definì questi sistemi col termine di “*strutture dissipative*”, in quanto dissipano materia ed energia all'esterno, aumentando l'entropia dell'ambiente nel quale si trovano.

Non tutte le strutture dissipative sono dei sistemi viventi e forse può risultare più facile visualizzare la coesistenza di flusso continuo e stabilità strutturale rivolgendo l'attenzione a semplici strutture dissipative non viventi, quali ad esempio i vortici ad imbuto che si formano in un lavandino quando da questo togliamo il tappo.

In questa situazione l'acqua fluisce continuamente attraverso il vortice, eppure la sua forma caratteristica di imbuto che si restringe a spirale resta straordinariamente stabile (Figura 4).



Fig. 4 - Vortice ad imbuto di un mulinello in acqua corrente.

Anche nella cellula vivente si nota una struttura stabile attraversata da un flusso continuo di materia ed energia. Le forze che si bilanciano nel mulinello sono meccaniche, mentre quelle che agiscono nella cellula sono di natura chimica. Più precisamente sono cicli catalitici nella rete autopoietica della cellula che, oltre ad agire da anelli di retroazione autobilancianti, possono anche agire da anelli di retroazione autoaforzanti, i quali spingono il sistema sempre più lontano dall'equilibrio finché non si raggiunge un limite di stabilità.

Tale limite è chiamato *punto di biforcazione*.

Si tratta di un punto di instabilità in prossimità del quale possono emergere spontaneamente nuove forme d'ordine che conducono a sviluppo ed evoluzione. Dal punto di vista matematico, un punto di biforcazione rappresenta un cambiamento radicale e inaspettato della traiettoria del sistema nello spazio delle fasi.

In definitiva, per restare viva e mantenere il proprio ordine una struttura dissipativa vivente, in quanto sistema autoorganizzato, ha bisogno di ricevere dall'ambiente un flusso continuo di materia ed energia che attraversi il sistema, mentre la vasta rete di processi metabolici mantiene quest'ultimo lontano dall'equilibrio termodinamico.

Gli anelli di retroazione che sono insiti in tale rete danno origine a biforcazioni e, di conseguenza, a sviluppo ed evoluzione. Prigogine sviluppò la sua teoria studiando sistemi chimici e fi-

sici che mostravano un “*comportamento coerente*”, anche se va ricordato che fu spinto a tali ricerche da uno spiccato interesse per la natura della vita.

Due fenomeni oggi ben noti caratterizzarono le sue ricerche agli inizi degli anni settanta: le “*instabilità di Bénard*” e gli “*orologi chimici*”.

Il primo di questi fenomeni si manifesta quando un sottile strato di liquido viene riscaldato uniformemente dal basso, stabilendo un flusso costante di calore dal basso verso l'alto. Il liquido rimane a riposo e il calore viene trasferito per sola conduzione fino a quando la differenza di temperatura fra le superfici superiore ed inferiore raggiunge un dato valore critico.

In queste condizioni alla conduzione subentra la convezione, mediante la quale il calore viene trasferito dal moto coerente di grandi quantità di molecole.

Appare così uno schema di celle esagonali (Figura 5) nelle quali il liquido più caldo sale attraverso il centro delle celle, mentre

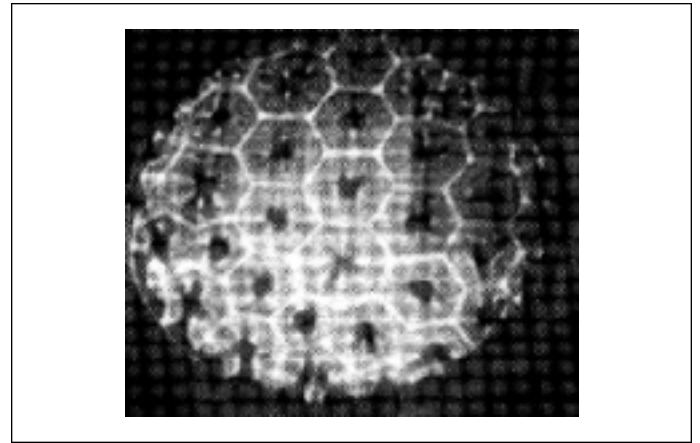


Fig. 5 - Schema di celle esagonali di Bénard in un recipiente cilindrico visto dall'alto.

quello più freddo scende verso il fondo lungo le loro pareti.

Lo stato di non-equilibrio (distribuzione di temperatura non uniforme) mantenuto dal continuo flusso di calore attraverso il sistema consente la formazione di uno schema spaziale complesso, nel quale milioni di molecole si muovono in modo coerente per formare le celle esagonali di convezione.

Nel caso degli “*orologi chimici*”, le oscillazioni chimiche in una

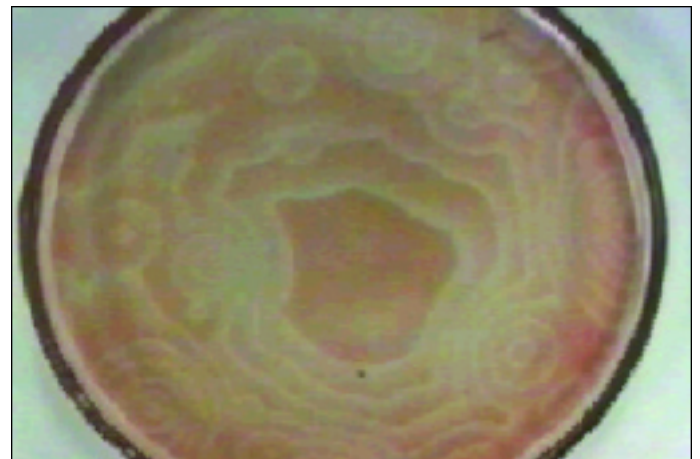


Fig. 6 - Attività chimica ad onda nella reazione di Belousov-Zhabotinsky.

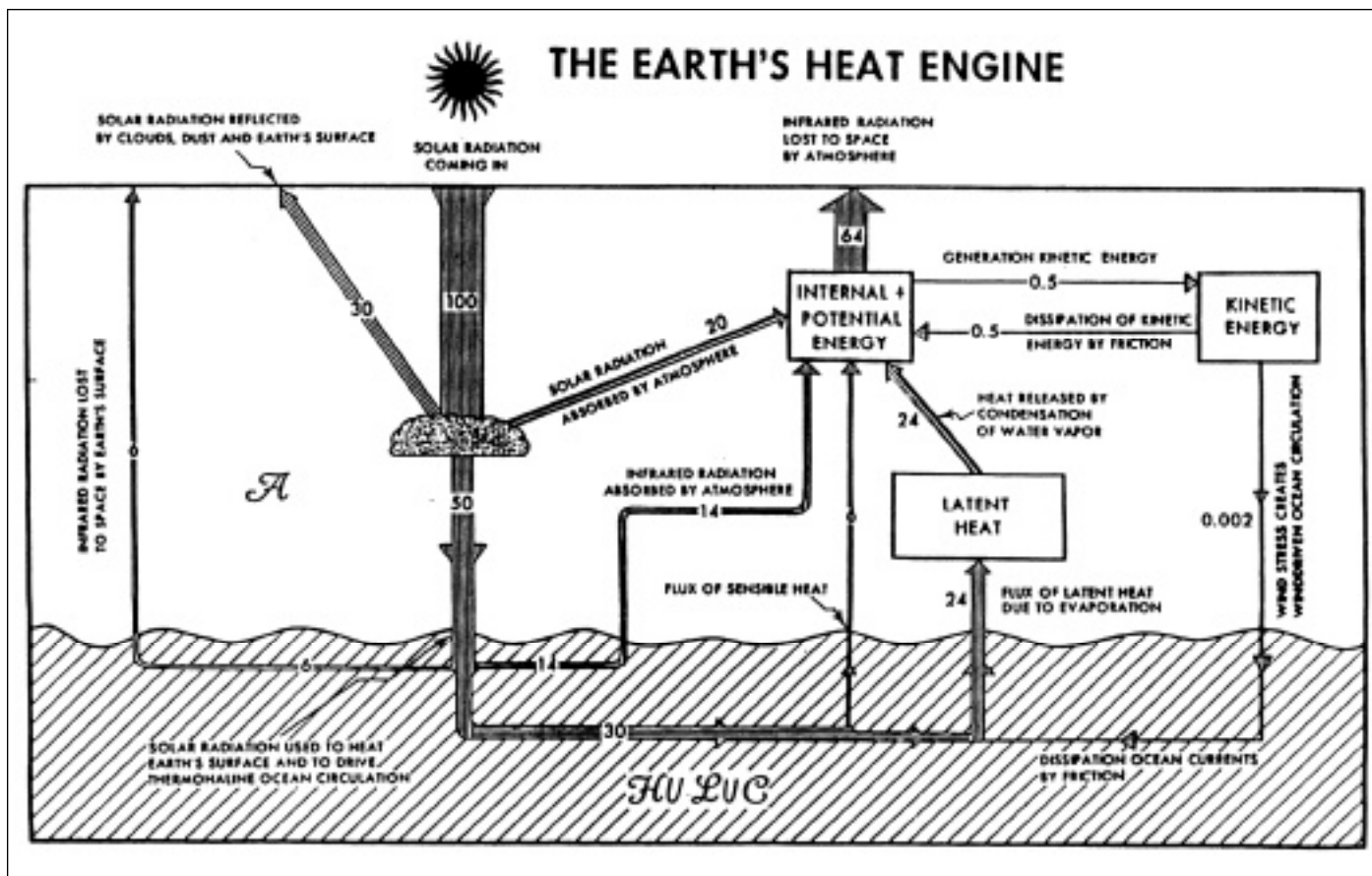


Fig. 7 - Diagramma schematico del flusso di energia nel sistema climatico.

soluzione contenente due tipi di molecole di colore diverso determinano il cambiamento di colore improvviso e ad intervalli regolari dell'intera soluzione. E' possibile inoltre che si producano onde di attività chimica, come nel caso della famosa reazione di **Belousov-Zhabotinsky** (Figura 6). Anche in questo caso il sistema chimico deve agire come un tutto, producendo un alto grado di ordine attraverso l'attività coerente di miliardi di molecole.

Gli orologi chimici non sono sistemi viventi, tuttavia lo stesso tipo di anelli catalitici sono al centro del metabolismo delle cellule, che possiamo considerare il più semplice sistema vivente conosciuto.

Persino nelle cellule più semplici, infatti, l'attività metabolica coinvolge diverse migliaia di reazioni chimiche accoppiate e richiede, quindi, delicati meccanismi di coordinazione e regolazione. Le reazioni metaboliche richiedono catalizzatori specifici, gli enzimi, ognuno dei quali assolve a compiti ben specifici. Emerge così una relazione definita tra struttura e funzione, con un ordine biologico che è al contempo architettonico e funzionale. Ma questo è esattamente il tipo di ordine che caratterizza le strutture dissipative, le quali appaiono come risultato della loro funzione in condizioni lontane dall'equilibrio.

Vediamo infine attraverso due esempi, la metropoli e l'ecosfera, come tali strutture siano presenti anche su scale spaziali me-

dio-grandi. Una metropoli può essere considerata come una struttura dissipativa con ciclo aperto di materia ed energia. Il suo flusso energetico, basato su di un'economia a combustibili fossili (Rifkin, 2002), è veicolato da una rete infrastrutturale che integrata al sistema dei trasporti garantisce il convogliamento da regioni lontane di grandi quantità di **energia primaria** (petrolio greggio, gas metano, carbone), **energia secondaria** (derivati del petrolio, gas manifatturato) ed **energia incorporata nelle merci** (alimenti, manufatti, ecc.).

Il flusso energetico verso la metropoli innesca nella stessa processi di *feedback* positivo autoafforzante con un conseguente aumento dei consumi.

Anche l'intera ecosfera può essere interpretata nel suo insieme come una struttura dissipativa. Un gigantesco "organismo"⁴ che grazie a: una sorgente calda (il sole), un flusso continuo di energia, un serbatoio freddo (lo spazio), si mantiene in uno stato stazionario, neghentropico, ordinato, quindi vivo (almeno da un punto di vista termodinamico). Un'alterazione di questo schema (dovuto ad esempio all'incremento dell'effetto serra antropogenico) potrebbe comportare il decadimento della biosfera verso uno stato di equilibrio termodinamico, cioè verso la morte termica.

NOTE:

1) **I. Prigogine** ha conseguito il *Premio Nobel* per la chimica nel 1977 per le ri-

cerche sulle "strutture dissipative" in sistemi lontani dall'equilibrio, dopo che nel 1968 era stato assegnato a Lars Onsager per la scoperta delle proprietà di simmetria della matrice dei coefficienti fenomenologici in condizioni vicine all'equilibrio.

2) **R. Clausius**: l'energia subisce una degradazione in tutto l'universo e nel tempo la sua disponibilità diventa sempre minore, fino alla morte termica, il momento in cui tutto l'universo avrà raggiunto ovunque la stessa temperatura, il momento in cui si avrà il livello massimo di entropia e tutta l'energia si troverà sotto forma di calore "a bassa temperatura", cioè nella completa impossibilità di trasformarsi in lavoro.

3) **L'AMP ciclico** si forma a partire dall'ATP. Il termine "ciclico" si riferisce al fatto che gli atomi del gruppo fosforico sono utilizzati per formare un anello. Questa sostanza è quella che stimola le cellule ameboidali del *Dictyostelium* ad aggregarsi. Nei mammiferi questa stessa sostanza agisce come messaggero ormonale. Vedi "Biologia delle piante" di P.H. Raven, R.F. Evert e H. Curtis – Ed. Zanichelli.

4) Il riferimento è alla "**Ipotesi Gaia**" formulata su basi scientifiche negli anni ottanta da James Hutton e Lynn Margulis. Tale teoria, oltre a decretare il superamento della visione cartesiana di un modo meccanicistico, evidenzia la natura integrata e autoregolante del pianeta Terra, contribuendo alla comprensione dei *feedback* esistenti tra il comparto biotico e quello abiotico.

Bibliografia

- 1) Bateson G., "Mente e natura" - Adelphi 1984.
- 2) Bateson G., "Verso un'ecologia della mente" - Adelphi 1976.
- 3) Capra F., "La rete della vita" - Rizzoli 1997.
- 4) Eigen M., "Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution"

- Quarterly Reviews of Biophysics, 4, 2&3, 149, 1971.
- 5) Franzese P. P. *et al.* (2003). Valutazione della sostenibilità ambientale: verso un approccio Ecodinamico. *Biologi Italiani* Anno XXXIII n.7: 58-60.
- 6) Gell-Mann M., "Il quark e il giaguaro". *Avventure nel semplice e nel complesso*. Bollati Boringhieri - 1996.
- 7) Kuhn T., "La struttura delle rivoluzioni scientifiche" - Einaudi - 1969/1978.
- 8) Liquori M. A., "Le Strutture dissipative. Auto-organizzazione dei sistemi termodinamici in non equilibrio". Manuali Sansoni 1982.
- 9) Luisi P. e Varela F.J., "Self-Replicating Micelles - A chemical Version of a Minimal Autopoietic Systems" - *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19, 633-643, 1989.
- 10) Mandelbrot B., "La geometria della natura. Sulla teoria dei Frattali" - Imago 1987.
- 11) Morin E., "Il metodo" - Feltrinelli 1983.
- 12) Morin E., "Introduzione al pensiero complesso" - Sperling & Kupfer 1990.
- 13) Prigogine I., "La fine delle certezze" - Bollati Boringhieri 1997.
- 14) Prigogine I., "Le strutture dissipative" - Sansoni 1982.
- 15) Prigogine I., "Termodinamica dei processi irreversibili" - Leonardo 1971.
- 16) Prigogine I., Kondepudi D., "TERMODINAMICA. Dalle macchine termiche alle strutture dissipative". Bollati Boringhieri 2002.
- 17) Rifkin J., "Economia all'idrogeno". Mondadori 2002.
- 18) Schrödinger E., "Che cos'è la vita" - Sansoni 1947.
- 19) Tiezzi E. *et al.* "Chimica fisica per le scienze ambientali" - Etaslibri 1996.
- 20) Tiezzi E., "L'equilibrio. I diversi aspetti di un unico concetto" - CUEN 1995.
- 21) Tiezzi E., Ulgiati S., "Entropia e dintorni" - 1992.
- 22) Virasoro M., "Il disordine e la complessità nella scienza" in *Caos e Complessità* - CUEN 1996.
- 23) von Bertalanffy L., "Teoria generale dei sistemi" - Mondadori 1971.
- 24) Zanarini G., "Complessità come modo di pensare il mondo" in *Caos e Complessità* - CUEN 1996.