

La Termodinamica dei sistemi aperti

Giovanni Villani

Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici,
(UOS Pisa) del CNR
e-mail: villani@pi.iccom.cnr.it

Abstract: In this paper we will analyze the transformation that thermodynamics underwent in the second part of the 20th century. This transformation is still on going and we do not know whether it will lead to a complete restructuring of physics, as Prigogine hoped, or only to a sub-discipline that allows us to study important, but still limited, systems. Even in the latter case, however, the relevance of the systems studied, such as open biological systems, and a “new” understanding of the concepts of order and organization configure this transformation of thermodynamics as “revolutionary”.

Keywords: Prigogine; Morin; sistemi aperti; sistemi dissipativi; binomio sistema-ambiente; situazioni di non-equilibrio

1. Prigogine e i sistemi aperti

La differenza qualitativa tra diversi tipi di sistemi è nota da tempo. Fu von Bertalanffy a valorizzare la distinzione tra sistemi aperti e chiusi, ma fu poi il chimico Ilya Prigogine a sviluppare scientificamente tale distinzione. La concezione di un organismo come sistema aperto fu avanzata, infatti, da von Bertalanffy nel 1932, seguita dallo sviluppo dei principi cinetici generali e delle loro implicazioni biologiche [1, 2], ma, nella seconda metà del XX secolo, è stata soprattutto l'opera di Prigogine che ha definito e sviluppato gli strumenti concettuali termodinamici per trattare i sistemi aperti.

Un sistema è definito “isolato” quando non scambia energia con l'ambiente, “chiuso” quando in esso non entra né esce alcuna sostanza materiale, mentre è detto “aperto” quando vi è uno scambio di energia e materia tra esso e l'ambiente esterno. Due precisazioni sono necessarie. La prima è che non esistendo nella fisica moderna una distinzione assoluta tra energia e materia, la differenza tra sistema isolato e sistema chiuso, ben definita in Termodinamica, lo diventa molto meno nella fisica moderna, soprattutto in sistemi ad alta energia. Va, inoltre, precisato che non esistono sistemi assolutamente isolati, come non ne esistono di assolutamente aperti. I sistemi isolati sono “aperti” dal punto di vista delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche e, nel caso limite di un sistema assolutamente isolato, cioè senza alcuna interazione con l'esterno, questo sarebbe

un sistema su cui non sarebbe possibile avere nessuna informazione e sarebbe, quindi, un sistema “inesistente” dal punto di vista scientifico. Inversamente, anche i sistemi aperti dal punto di vista termodinamico devono avere una qualche forma di chiusura che gli consenta di preservare la loro individualità.

Detto questo, la differenza tra sistemi aperti e chiusi resta un punto scientifico fondamentale: l’apertura energetica/materiale (e poi informazionale/comunicazionale) è qualcosa di più rispetto all’apertura relazionale/interazionale che qualsiasi sistema comporta. A lungo la Termodinamica si è occupata quasi esclusivamente di sistemi chiusi, ricercando la loro condizione di equilibrio. I sistemi aperti, invece, non raggiungono uno stato di equilibrio, ma una situazione detta di “stato stazionario” e l’insieme dei processi che agiscono per mantenere questo stato, nella sua morfologia e nelle sue condizioni interne (nonostante le perturbazioni esterne), è definito “omeostasi”.

Lo studio dei sistemi aperti ha apportato molte modifiche concettuali alla Termodinamica. La principale è senz’altro quella che riguarda il concetto di entropia. Da un punto di vista strettamente termodinamico si può fare la seguente distinzione tra i sistemi aperti e quelli chiusi. Gli equilibri si trovano nei sistemi chiusi e, in uno stato d’equilibrio, il sistema contiene la maggiore quantità possibile d’entropia, compatibile con le particolari condizioni in cui si trova. Il concetto di uno stato stazionario dinamico, mantenuto tale da un dispendio continuo di energia, è valido, invece, per i sistemi aperti. In un sistema aperto ha luogo un interrotto afflusso di energia proveniente dall’ambiente esterno e una continua fuoriuscita di prodotti; nonostante ciò il suo “carattere”, le sue caratteristiche relazionali interne e il rapporto di scambio con l’esterno, restano invariati. Per esempio, i processi catabolici e anabolici della distruzione e della rigenerazione delle sostanze necessarie agli esseri viventi generano uno stato stazionario nella cellula per effetto del quale, sebbene il “contenuto” chimico cellulare o di un organismo possa variare nel tempo, l’essere vivente può continuare tutte le sue trasformazioni chimiche essenziali alla vita.

Il secondo principio della Termodinamica, accennato da Carnot e formulato da Clausius nel 1850, introduce l’idea non di perdita (che contraddirebbe il primo principio) ma di *degradazione* dell’energia. Mentre le altre forme di energia si possono trasformare l’una nell’altra integralmente, l’energia che prende nome di calore non può riconvertirsi completamente e fa perdere, quindi, a un sistema una parte della sua capacità di svolgere un lavoro. Questa diminuzione irreversibile della capacità di trasformarsi e di svolgere un lavoro, propria del calore, è stata designata da Clausius con il nome di *entropia*. Secondo questo principio, la degradazione irreversibile può crescere soltanto fino ad un massimo, che è lo stato di omogeneizzazione e di equilibrio termico. Il principio di degradazione dell’energia di Carnot, Kelvin e Clausius si è trasformato in principio di degradazione dell’ordine nel corso della seconda metà del XIX secolo, con Boltzmann, Gibbs e Planck. L’entropia è, quindi, diventata una nozione che

“misura” allo stesso tempo sia la degradazione dell’energia sia quella dell’ordine e dell’organizzazione.

L’importanza del secondo principio della Termodinamica per i sistemi chiusi e aperti può essere espressa anche in un altro modo. Tale principio asserisce che la tendenza generale è orientata verso stati di massimo disordine, che le forme superiori di energia (l’energia meccanica, chimica e luminosa) sono irreversibilmente degradate a energia termica e che i gradienti termici devono sparire. Nella versione filosofica, il secondo principio della Termodinamica si staglia come la grande legge dell’universo, che si applica non soltanto a tutti gli oggetti fisici presenti in esso, ma al divenire dello stesso universo, comprendendovi la sua fine in un “tutto disordinato e omogeneo”. In quest’ottica, tuttavia, si pone il problema di capire perché tutto non sia già disordine, perché si siano costituite e a distanza di tempo ritroviamo “isole” di ordine e organizzazione. Per capire ciò, va posta l’attenzione sul fatto che il secondo principio della Termodinamica è valido per i sistemi chiusi e per l’insieme del sistema aperto più l’ambiente, che è, ovviamente, un sistema chiuso. Sebbene il secondo principio della Termodinamica non sia violato nei sistemi aperti o, più precisamente resti valido per il sistema più il suo ambiente, esso non si dimostra per niente valido per il sistema aperto in sé. Per tali sistemi, la “degradazione” imposta da tale principio non è necessaria: si può, quindi, “creare” ordine locale, non degradare localmente le forme “migliori” di energia e mantenere gradienti termici a scapito dell’ambiente, nel quale si ottiene l’aumento netto di entropia. L’antinomica opposizione, quindi, tra ordine e disordine, che per secoli è stata la fonte della separazione tra la natura animata e quella inanimata, va spostata sulla differenza epistemologica/scientifica tra i sistemi aperti e quelli chiusi. Lo sviluppo e l’evoluzione, evidenti negli esseri viventi con la creazione di ordine e con la loro differenziazione, non sono caratteristiche specifiche dei sistemi viventi, ma di tutti i sistemi aperti e richiedono energia dall’ambiente. Infatti, in condizioni idonee, tutti i sistemi aperti si muovono nella direzione della differenziazione e della complessità, dove gli schemi d’azione di natura generica sono sostituiti da funzioni più specializzate.

Fino alla prima metà del XX secolo si faticava a capire come mettere in relazione il secondo principio della Termodinamica e l’ordine sia dell’individuo vivente sia dell’evoluzione della specie. La risposta attuale è che il secondo principio della Termodinamica non esclude che un sottosistema, parte di un sistema più ampio, possa muoversi nel tempo verso uno stato più ordinato e portare, quindi, tale sottosistema a evolvere in una forma più organizzata e complessa. Il secondo principio della Termodinamica, infatti, afferma solo che in tali trasformazioni l’entropia totale del sistema globale aumenta. Se la creazione della vita e dell’ordine sulla Terra implica una trasformazione dinamica verso uno stato strutturato e organizzato, tale trasformazione è inevitabilmente accompagnata da un aumento maggiore di disordine nel sistema chiuso (o

quasi) che comprende il Sole e la Terra. In altre parole, sebbene alcune parti di questo sistema guadagneranno entropia e altre perderanno entropia, l'entropia totale del sistema globale aumenterà sempre nel tempo.

Il nostro Sole è la fonte predominante di energia che sostiene la vita sulla Terra. Tutti gli organismi mantengono uno stato altamente organizzato estraendo energia solare dall'ambiente circostante ed esportano in esso rifiuti, producendo così entropia. È importante sottolineare che il Sole fornisce continuamente alla Terra energia di alta qualità che mantiene bassa l'entropia della Terra. La bassa entropia della Terra è poi prevalentemente mantenuta attraverso gli organismi fototrofi (cioè piante, alghe, cianobatteri e tutti i fotosintetizzatori), che sono i primi utilizzatori dell'energia dei fotoni solari e dei composti inorganici. Nello specifico, l'assorbimento dei fotoni da parte dei fotosintetizzatori genera percorsi per la conversione di energia (reazioni fotochimiche, chimiche ed elettrochimiche) che portano a energia di alta qualità. Questa energia viene convertita in lavoro utile che consente di mantenere tali esseri viventi in un complesso stato organizzato ad alta energia che supporta, poi, tutta la vita eterotrofica (quella degli animali) sulla Terra.

Un'altra importante differenza tra sistemi aperti e sistemi chiusi riguarda il concetto classico di causalità. Tramite concetti come *feedback* e regolazione, il nesso diretto e semplice causa → effetto è stato modificato. Alla modifica del concetto di causa ha contribuito in maniera decisiva la cibernetica con l'introduzione di dispositivi che operano una retroazione (*feedback*) negativa per individuare e annullare i cambiamenti esterni. Fu Wiener a porre l'accento sui sistemi in cui due generici processi *A* e *B* possono essere, nel medesimo tempo, causa ed effetto l'uno dell'altro, sistemi in cui l'effetto influenza la causa, attraverso retroazioni o *feedback*, creando una *causalità circolare*. Una delle idee di base della cibernetica era, infatti, che in natura "ogni cosa è connessa a tutto il resto". La sua idea era che, proprio attraverso questa connessione olistica, estranea al tradizionale approccio meccanico della fisica, si concretizzasse un intreccio di azioni e di retroazioni attraverso le quali i sistemi complessi e organizzati, fossero essi animali o macchine, potessero autoregolarsi e sopravvivere nell'ambiente che cambiava. Vi era, inoltre, un'ulteriore ipotesi cibernetica: non esistono differenze sostanziali tra organismi viventi e macchine complesse autoregolanti e il comportamento degli uni e delle altre può essere descritto da una medesima teoria.

Almeno tre sono i livelli di complessità che in un modo o nell'altro vanno considerati nello studio della dinamica di un sistema.

(a) I processi che avvengono nel nostro sistema in studio, la sua dinamica, si esplicano nel suo livello di complessità con interazioni "alla pari" tra sistemi. Nel caso molecolare, le molecole interagiscono tra di loro e *idem* tra le cellule nel livello cellulare di complessità. Anche le interazioni tra individui biologici o tra le specie biologiche avvengono nei loro livelli di complessità.

Per esempio, i rapporti familiari o quelli predatore/preda sono rapporti tra organismi viventi che restano e possono essere spiegati nel loro livello di complessità. È questo tipo d'interazione che consente quella che potremmo chiamare una "causalità in orizzontale" e che permette di studiare i sistemi nella loro totalità senza considerarli formati di parti.

- (b) La dinamica di un sistema dipende dalla dinamica dai suoi componenti. Il sistema è un ente dinamico, un ente con una sua dinamica interna [3, 4]. Una caratteristica fondamentale del concetto di sistema è, infatti, la sua duplice natura di ente e di processo, di ente dinamico. La classica divisione di "ente" e "processo" utilizzata in scienza va, quindi, rivista in un'ottica sistemica in cui ambedue questi aspetti confluiscono nel sistema. Nella chiusura identitaria del sistema, quella che lo separa concettualmente dall'ambiente, alcuni suoi processi dinamici entrano a costituire la dinamica interna del sistema, altri costituiscono l'interazione dinamica del sistema come un tutto con l'ambiente. I tempi caratteristici di questi due set di processi sono spesso differenti e questo semplifica la separazione e la modellizzazione tra "l'interno" e "l'esterno" del sistema. Vi sono dei casi, tuttavia, in cui questa separazione non è facilmente identificabile e l'accoppiamento tra i processi interni ed esterni negli esseri viventi può essere un buon esempio e le problematiche umane e sociali, degli esempi ancora migliori. Per fare un esempio, la dinamica interna alla molecola (le vibrazioni o altri moti interni) influenza quello che il sistema fa o può fare. Allo stesso modo, lo stato cellulare influenza l'organismo nella sua totalità, come le malattie possono mettere in evidenza. È questa una dinamica tra due livelli di complessità e, essendo noi interessati a ciò che avviene al nostro sistema, è una causalità *bottom-up* (dal basso in alto), perché si utilizza quello che avviene nel livello dei componenti (livello inferiore) per capire quello che avviene al nostro sistema in studio.
- (c) La dinamica di un sistema dipende dall'ecosistema, dall'ambiente in cui il sistema è posizionato. La dipendenza temporale dall'ambiente (livello di maggiore complessità) è ovvia in molti casi e più "occultata" in altri. Per esempio, spesso i chimici teorici studiano la singola molecola per capire come essa si comporterà in differenti ambienti. È, tuttavia, evidente a tutti i chimici che quello che una molecola o una macromolecola fa e può fare dipende sia dalle sue caratteristiche sia dall'ambiente in cui è posizionata. Una molecola o una macromolecola in una cellula può svolgere un'attività, un "ruolo", sia in virtù delle sue caratteristiche sia, ovviamente, di quelle dell'ambiente. Un animale in una nicchia ecologica, una pianta in una foresta o un pesce in una barriera corallina, oltre a dipendere dagli altri sistemi presenti (gli altri organismi viventi), dipende anche dall'ambiente generale in cui si trova, dalle condizioni fisiche a quelle globali biologiche presenti. Questo tipo d'interazione permette una causalità *top-down* (o *downward causation*), spesso negata dai filosofi della scienza che, a volte, sono più riduzionisti degli stessi scienziati.

Infine, questi tre livelli di complessità possono essere attraversati da cicli di processi che li coinvolgono direttamente e in maniera così integrata da operare sul nostro sistema in modo complessivo. Questo genera una “causalità circolare” che “chiude” le causalità dal basso, in orizzontale e dall’alto.

Questi sono i tre livelli minimi da tenere in conto per studiare l’evoluzione di un sistema, ma a volte i sistemi sono così integrati verso l’interno e verso l’esterno, che la profondità di analisi deve essere spinta anche in altri livelli di complessità. In pratica, più il nostro sistema d’interesse è integrato nel tutto, più alto è il numero di livelli di complessità che si devono considerare per studiarne la dinamica. Ovviamente, è sempre possibile semplificare lo studio della sua dinamica riducendo i piani di complessità implicati ma, in questo caso, si deve sempre tenere presente che si stanno semplificando le causalità e si ottiene una dinamica semplificata per il nostro sistema.

Un altro aspetto generale da sottolineare per i sistemi aperti è quello legato al concetto di *equifinale*. Vi sono sistemi per cui, indipendentemente dal punto di partenza, si raggiunge sempre lo stesso punto di arrivo. Questo è vero anche nei casi semplici di sistemi termodinamici chiusi che, indipendentemente alla condizione iniziale, arrivano alla condizione di equilibrio. Nel caso dei sistemi aperti, tuttavia, il sistema presenta un numero grande di possibili risultati finali, ma il sistema aperto ne seleziona uno preferenziale. I fenomeni vitali, per esempio, si comportano in questo modo in quanto lo stato finale può essere raggiunto non solo partendo da condizioni iniziali differenti, ma in modi molto diversi. Fu von Bertalanffy a dare il nome di *equifinale* a un tale comportamento e, come ci dice Morin [5]: “equifinalità significa che un sistema può, secondo le alee, le difficoltà, le resistenze che incontra, utilizzare diverse strategie per raggiungere un medesimo obiettivo, e che più sistemi simili possono conseguire i medesimi fini con mezzi differenti”.

Per parecchio tempo, l’equifinalità è stata considerata come la principale prova di differenza assoluta tra vivente e non-vivente. Lo stesso von Bertalanffy affermava che [6]: “L’analisi dimostra che i sistemi chiusi non sono in grado di tenere un comportamento equifinale ed è questo il motivo per cui, in generale, nei sistemi inanimati non si trova l’equifinalità. Viceversa, nei sistemi aperti, dove si ha uno scambio di materiale con l’ambiente esterno nella misura occorrente a far loro raggiungere uno stato stazionario, quest’ultimo è indipendente dalle condizioni iniziali e si ha quindi un comportamento equifinale”.

Per poi dover aggiungere [7]: “L’equifinalità si trova anche in certi sistemi inorganici che, necessariamente, sono sistemi aperti. Detti sistemi fanno riscontrare un comportamento paradossale come se il sistema ‘fosse a conoscenza’ dello stato finale a cui esso deve pervenire in futuro”.

Il fatto che questo comportamento avvenga anche in sistemi altamente complessi, in cui, a priori, vi sarebbero molte situazioni finali possibili, è una caratteristica importante dei sistemi aperti e non esclusiva dei soli sistemi viventi.

A tale riguardo, si pensi alla forma nativa di una proteina: essa, se analizzata nei termini dell'energia potenziale, presenta moltissime forme stabili, ma nella realtà dell'ambiente cellulare, tale proteina è quasi sempre nella sua forma nativa [8].

Riassumendo, i sistemi aperti hanno tutti in comune le seguenti caratteristiche: la possibilità di non tendere ad un massimo di entropia, il feedback, l'omeostasi, e una notevole equifinalità [9]. Il fatto che l'entropia possa diminuire in un sistema (ovvero il sistema aumenta il suo ordine) ci indica che i sistemi possono sopravvivere e mantenere il loro caratteristico ordine interno soltanto finché essi importeranno dall'ambiente più energia di quanta essi ne spendono nei loro processi di trasformazione e di esportazione dei loro prodotti. Il principio di feedback può essere riferito alle informazioni che sono introdotte nel sistema e può essere visto come un particolare tipo di segnale che il sistema e l'ambiente si scambiano e che fornisce informazioni circa le condizioni ambientali e circa il funzionamento del sistema stesso: il feedback costituito da tali informazioni mette in grado il sistema di modificare il suo funzionamento per adeguarsi ai cambiamenti ambientali e mantenere (omeostasi) il suo stato stazionario. Infine, i sistemi aperti sono caratterizzati da una notevole equifinalità, cioè essi possono raggiungere lo stesso stato finale pur partendo da condizioni iniziali molto diverse e seguendo differenti linee di sviluppo.

È doverosa un'ultima precisazione: si è sottolineata l'utilità di spiegare gli esseri viventi come sistemi termodinamici aperti che scambiano materia ed energia con il loro ambiente, ma la sola fattibilità termodinamica della vita, implicita in tale analisi, non è sufficiente; occorre che accanto alla Termodinamica si consideri la Cinetica, come la chimica ci ha insegnato nello studio delle trasformazioni. Affinché avvengano le reazioni essenziali alla vita, le barriere energetiche per innescare tali reazioni devono essere superate e negli esseri viventi anche le reazioni relativamente veloci devono essere accelerate. Più del 99% delle reazioni rilevanti per i sistemi biologici sono catalizzate da enzimi. Tali sostanze sono, quindi, una necessità fondamentale per l'esistenza della vita: la vita come noi la conosciamo non sarebbe possibile senza i catalizzatori enzimatici. Sulla Termodinamica di non-equilibrio dei sistemi aperti, elaborata principalmente da Prigogine e che è essenziale nella spiegazione dell'ordine del vivente, si deve fornire qualche ulteriore dettaglio.

2. Prigogine e la Termodinamica di non-equilibrio

Il lavoro di Prigogine cerca di spiegare i principi della relativa stabilità dei sistemi ordinati e, talvolta, altamente ordinati in un universo governato dal secondo principio della Termodinamica e lo fa tramite il concetto di *sistema dissipativo*. La biosfera del pianeta Terra è il miglior esempio di sistema dissipativo: il flusso continuo di energia (e un po' di materia) proveniente dall'esterno, la mantiene stabilmente lontana dall'equilibrio termodinamico, cosicché essa

può sbizzarrirsi nella creazione di neghentropia (entropia negativa), sotto forma di strutture ordinate e di organismi viventi. Secondo Prigogine, per i sistemi aperti si può affermare che:

- gli stati stazionari non sono definiti dall'entropia massima, ma dall'avvicinamento alla produzione dell'entropia minima;
- l'entropia può diminuire in questi sistemi;
- gli stati stazionari con una produzione d'entropia minima sono, in generale, stabili; pertanto, se una delle variabili del sistema muta, il sistema manifesta delle trasformazioni in senso contrario;
- la considerazione dei fenomeni irreversibili porta al concetto di tempo termodinamico, in antitesi con quello astronomico.

Venendo allo stato stazionario, due caratteristiche vanno evidenziate. In primo luogo, la composizione del sistema in uno stato stazionario rimane costante, sebbene il rapporto tra i suoi componenti non si basi su un equilibrio chimico dato da reazioni reversibili, ma, al contrario, le reazioni continuano a svilupparsi e siano, in parte, irreversibili. In questa costanza qualitativa della materia, un ruolo importante è svolto dalla chiusura a ciclo delle reazioni chimiche. In secondo luogo, il rapporto tra i componenti di uno stato stazionario dipende dalle costanti del sistema, oltre che dalle condizioni ambientali, poiché il sistema è in grado di esprimere forze antagoniste nei confronti di un'eventuale interferenza al suo stato stazionario. Usando il linguaggio biologico, possiamo affermare che il sistema dà prova di una capacità di adattamento a un ambiente mutevole. La cellula adulta, per esempio, si mantiene in uno stato stazionario non tanto per effetto dell'assenza di reazioni degenerative, bensì perché le reazioni degenerative e quelle sintetiche si sviluppano in essa di pari passo. Von Bertalanffy dice che tutte le forme organiche sono l'espressione di un susseguirsi di processi e possono persistere soltanto se i loro componenti subiscono continui mutamenti. Tutti i sistemi aperti sembrano statici se li consideriamo da un punto di vista macroscopico, ma se spingiamo più a fondo l'osservazione, troviamo che il mantenimento dello stato stazionario implica un continuo cambiamento dei componenti del sistema: i composti chimici nella cellula, le cellule negli organismi pluricellulari, gli individui nelle unità sovra-individuali come le società. In tal senso, tutti i sistemi organizzati costituiscono essenzialmente un ordine gerarchico di processi in una condizione dinamica.

È possibile un'ulteriore generalizzazione della relazione di un sistema a una perturbazione esterna: sebbene la tendenza verso uno stato stazionario nella sua forma più semplice sia omeostatica, come nel caso del mantenimento di una temperatura corporea costante, il principio fondamentale è quello della conservazione del carattere specifico del sistema. Per conservare il carattere

distintivo del sistema, la struttura organizzata tenderà a importare più energia di quanta non gliene occorra per dare il suo output. Per esempio, la cellula, anche a riposo, ha bisogno di un'erogazione ininterrotta di energia, come dimostrato dal fatto che, privando una cellula (aerobica) d'ossigeno, se ne provoca sempre la morte. Possiamo, quindi, dire che, lo stato stazionario, che al livello più semplice è quello conservato dall'omeostasi nel tempo, ai livelli più complessi diventa lo stato che preserva inalterato il carattere distintivo del sistema globale, anche durante l'accrescimento e l'espansione. Il carattere fondamentale di un sistema non cambia in maniera diretta come conseguenza dell'espansione né della moltiplicazione nella riproduzione. La crescita quantitativa, tuttavia, può esigere che i sottosistemi pervengano a un carattere specialistico, non necessario quando il sistema era più piccolo, e il sistema può arrivare a generare differenze qualitative nel suo funzionamento.

Un punto importante delle idee di Prigogine riguarda le fluttuazioni del sistema dall'equilibrio, perché esse, in particolari condizioni, possono essere considerate il motore dell'evoluzione in natura: attraverso un progressivo allontanamento da un equilibrio termodinamico, determinano una crescita spontanea e stabile di organizzazione. È ben noto che lo stato di equilibrio termodinamico non possiede quelle caratteristiche di assoluta omogeneità previste dalla teoria, ma solo a livello statistico. Le grandezze estensive si distribuiscono entro il sistema con una densità variabile da punto a punto e da istante a istante intorno al valore medio e, di conseguenza, anche i valori che andrebbero attribuiti alle grandezze intensive sono soggetti a fluttuazioni locali. Nei sistemi chiusi bastano piccole fluttuazioni per causare intense forze di richiamo che le annullano; in condizioni particolari, invece, le forze di richiamo sono generate solo quando le fluttuazioni sono abbastanza grandi: in questo caso, cioè, le piccole fluttuazioni possono crescere indisturbate e, quindi, diventare "discriminanti" in prossimità dei punti critici.

In conseguenza delle fluttuazioni, il secondo principio della Termodinamica riveste solo un carattere probabilistico: uno scambio, per esempio di calore, potrebbe anche aver luogo dal sistema a temperatura (media) più bassa al sistema a temperatura (media) più alta, solo che tale scambio è meno probabile di quello inverso, sicché alla lunga il principio risulterà comunque rispettato. Un buon esempio di ciò è il moto browniano. Come notò Henri Poincaré all'inizio del XX secolo, l'esistenza di tale moto era in contraddizione con il secondo principio della Termodinamica [10]: "ma vediamo sotto i nostri occhi ora il movimento trasformato in calore da attrito, ora inversamente il calore è trasformato in movimento, e [tutto] questo senza perdita, poiché il movimento dura per sempre. Questo è il contrario del principio di Carnot".

In altri termini, le leggi che governano i processi termodinamici sono *deterministiche* finché si ha a che fare con quantità scambiate macroscopiche, mentre gli scambi infinitesimali possono essere descritti solo in maniera probabilistica.

La situazione diviene ancora più complessa se si considerano situazioni di non-equilibrio. Prigogine analizza un caso particolare, l'instabilità di Bénard che si verifica in uno strato liquido riscaldato dal basso [11]. Superato un certo valore di soglia, nel sistema si creano delle correnti di convezione, che risultano dall'interazione di non-equilibrio tra il flusso di calore e la gravitazione, generando celle di Bénard ordinate (Figura 1). Tali correnti di convezione comprendono una quantità di molecole dell'ordine di 10^{21} , un numero enorme di particelle. Il non-equilibrio ha creato, quindi, delle coerenze tra un numero enorme di molecole, permettendo alle particelle di interagire a lunga distanza. Con una bella e incisiva metafora, Prigogine dice [12] che gli piace pensare che la materia in prossimità dell'equilibrio è 'cieca', perché ogni particella 'vede' soltanto le molecole che la circondano; lontano dall'equilibrio, invece, si producono le correlazioni a lunga distanza che permettono la costruzione degli stati coerenti che oggi incontriamo in numerosi campi della Fisica e della Chimica.

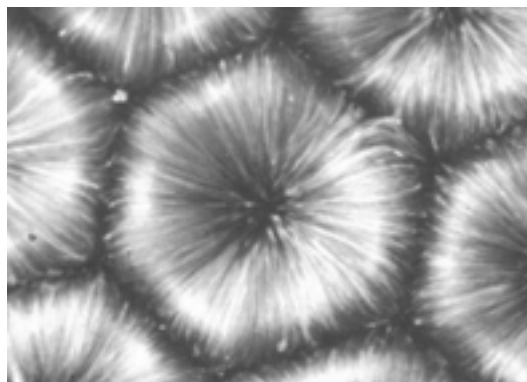


Figura 1. Celle di Bénard

L'esempio dell'instabilità di Bénard non è un caso isolato. Negli ultimi anni si è osservata la comparsa di strutture di non-equilibrio anche in campi diversi dall'idrodinamica e, principalmente, in chimica. Non appena vi sono fenomeni autocatalitici, non appena si possono avere retroazioni che amplificano i fenomeni cinetici, si possono generare condizioni che portano a queste strutture. Uno dei fatti sorprendenti è stato il rilevare che le reazioni chimiche "regolari" non sono che una classe di reazioni. Accanto ad esse vi sono quelle dal comportamento "irregolare", quelle che hanno fatto parlare di caos chimico. Quando la struttura dissipativa, infatti, subisce una fluttuazione critica il sistema è sottoposto a una biforcazione. Per questo dobbiamo abbandonare ogni fiducia nella causalità rigorosa proposta dal determinismo e abbracciare una nuova razionalità, che Prigogine definisce probabilistica. Il processo di biforcazione, infatti, è descritto non da equazioni lineari, ma da equazioni stocastiche che danno adito a una serie di eventi possibili, uno solo dei quali, di volta in volta, si realizza. Lo

sviluppo della Termodinamica di non-equilibrio, di cui Prigogine è l'iniziatore, ci mostra che non vi è necessariamente esclusione e che è possibile una complementarità fra fenomeni disordinati e fenomeni organizzatori. La devianza, la perturbazione e la dissipazione possono generare una "struttura", vale a dire organizzazione e ordine nello stesso tempo [13]. È il principio di *order from noise* (ordine dal rumore) di von Foerster [14], del *caso organizzatore* di Atlan [15], o del *principio di organizzazione tramite il disordine* di Morin [16].

Morin va anche oltre Prigogine dicendo che ogni sistema aperto e complesso è immaginabile come un *tutto conflittuale* [17]. In questi sistemi esiste un'unità manifesta, emergente e nello stesso tempo un antagonismo latente, apportatore potenziale di disorganizzazione e disintegrazione. Morin chiama tale caratteristica "il principio di antagonismo sistemico". L'idea di sistema non è così soltanto armonia, funzionalità, sintesi superiore; essa porta in sé, di necessità, la dissonanza, l'opposizione, l'antagonismo. Ogni sistema la cui organizzazione è attiva è in realtà un sistema in cui sono attivi degli antagonismi. L'organizzazione tollera un margine di fluttuazioni le quali, se non fossero tenute al di sotto di una certa soglia, si svilupperebbero con esiti disintegratori. L'organizzazione attiva mette così in relazione in maniera complessa e ambivalente la complementarità e l'antagonismo. A ogni crescita di complessità nell'organizzazione corrispondono nuove potenzialità di disorganizzazione. L'unica possibilità di lottare contro l'effetto disintegratore degli antagonismi è attiva. Questo spiega perché nessun sistema organizzato è eterno. Alla lunga, gli antagonismi interni disintegrano sempre il sistema e per ogni tipo di sistema organizzato, per ogni tipo di organismo vivente, per esempio, il tempo di vita è una caratteristica specifica e distintiva. Quanto quest'ottica sia applicabile ai sistemi umani e sociali, appare a noi evidente.

3. Il binomio sistema-ambiente

Per prima cosa si nota, seguendo Prigogine [18], che la grande differenza tra la Meccanica e la Termodinamica si basa sul concetto di ambiente. Prigogine ci dice che la descrizione meccanica è in fondo il tentativo di isolare il sistema, di considerarlo indipendente dal resto dell'universo. Qual è, invece, il presupposto della descrizione termodinamica? Questo si potrebbe definire globale: collocare il sistema nel suo ambiente. Lo spazio che circonda il sistema termodinamico, infatti, non è mai completamente inerte e indifferente al sistema. La descrizione di un sistema termodinamico, pertanto, richiede la definizione delle "pareti" che lo separano dall'ambiente esterno e ne forniscono le condizioni al contorno: l'azione su di esse può modificare i parametri del sistema e dare inizio alla sua trasformazione. Esistono pareti restrittive di vari tipi, pareti che selettivamente impediscono lo scambio di una determinata proprietà tra il sistema e l'ambiente. Una parete che impedisce il passaggio sia del lavoro sia del calore è restrittiva dell'energia, ma le pareti possono essere più spe-

cifiche. Possono, per esempio, impedire il passaggio solo di alcune particelle di materia, come nel caso di una membrana semi-porosa. La generalizzazione alla cellula e ad altri sistemi viventi è concettualmente immediata e crea un substrato comune, importante per limitare la separazione tra i sistemi animati e quelli inanimati.

Partendo dal concetto termodinamico di ambiente è possibile estenderne il suo uso alla scienza in generale. Infatti, ogni sistema è delimitato dall'ambiente disponibile per effetto della sua capacità di interagire con esso e tutta la sua azione è condizionata dall'ambiente disponibile. In particolare, gli input che entrano nei sistemi aperti non sono costituiti soltanto da materiali energetici, destinati a essere trasformati o modificati dal lavoro che si svolge nel sistema, ma sono anche rappresentati da informazioni che forniscono all'organizzazione interna "segnali" circa l'ambiente in cui si trova e "notizie" circa il funzionamento del sistema in rapporto all'ambiente. Se vogliamo che un organismo si possa adattare a un particolare ambiente, dobbiamo assumere che le modifiche che può subire/attivare dipendono non solo dalla sua "natura", ma anche, e in eguale misura, dall'ambiente e dalla possibilità per il sistema di "conoscerlo". Questo è evidente per i sistemi viventi, ma tale caratteristica vale per tutti i sistemi aperti: il concetto di ambiente, nato nel contesto biologico, va quindi esteso a tutta la sistemica.

È evidente che la parte che è inclusa nel sistema è più correlata rispetto alle altre parti che sono inserite nel suo ambiente. Se tutto, infatti, fosse correlato allo stesso modo la separazione sistema/ambiente non potrebbe essere utilizzata e in questo caso si dovrebbe ampliare drammaticamente il sistema. È altrettanto chiaro, tuttavia, che è lo scopo per il quale studiamo il sistema, il nostro concentrarsi su determinate proprietà, a separare in un modo o nell'altro il sistema dall'ambiente. Più precisamente, nella coppia sistema/ambiente, il rapporto tra "l'interno e l'esterno" deve essere differenziato sia in funzione dell'ordine organizzativo del sistema, sia in relazione alla prospettiva in cui è studiato. A seconda dell'ente o del processo considerato, a seconda delle proprietà studiate, a seconda dell'analisi a cui si vuole sottoporre il sistema, possono esserci diverse divisioni di cosa entra nel sistema e cosa ne costituisce l'ambiente.

Ciò è ben evidente nell'arte. Consideriamo il *Cristo velato* della Cappella Sansevero a Napoli (Figura 2): *quale parte del marmo della statua sia riferibile a Cristo e quale al velo è una nostra "aggiunta" concettuale.*



Figura 2. Il *Cristo velato* della Cappella Sansevero a Napoli

Quest'effetto è stato ben utilizzato nell'arte moderna e il quadro *Day and Night* di Escher ne è un buon esempio. In questo quadro, gli uccelli (che possiamo considerare l'ambiente rispetto al sistema dei campi arati) pian piano si fondono con i campi (Figura 3).



Figura 3. Il quadro *Day and Night* di Escher

Tali tipi di separazione hanno sollevato la questione del grado di autonomia implicato nella nozione di sistema per il collegamento, da un lato, a suoi elementi costitutivi e, dall'altro, per lo stretto rapporto con altri sistemi e con l'ambiente in generale. La soluzione a questa problematica non è facile, ma passa attraverso di essa l'idea "complessa" che ogni sistema è sia chiuso e sia aperto verso l'esterno, non solo per quanto riguarda i suoi costituenti, ma anche il suo ambiente e i molti altri sistemi individuati in esso. Ciò sostituisce la rigida nozione di gerarchia fra sottosistemi/sistema/ambiente con una concezione molto più fluida dell'impatto reciproco di sistemi anche di differenti livelli di complessità.

Esistono due posizioni estreme per il rapporto tra sistema organizzato e am-

biente: una posizione che si può chiamare ecologica, in cui il sistema è “immerso” nell’ambiente, e un’altra nella quale si considera l’ambiente come privo di struttura, immutabile o completamente casuale (una sorta di rumore di fondo), il che equivale a ipotizzare un’assenza di relazioni o interdipendenze specifiche fra le proprietà del sistema e quelle dell’ambiente, a tutto vantaggio di un’interazione media. La scelta della prima o della seconda opzione qualifica in maniera diversa il ruolo dell’ambiente per il sistema. Tale scelta, spesso operata in maniera implicita e non chiarita, porta a notevoli differenziazioni anche tra gli scienziati e i filosofi che lavorano sugli stessi argomenti con approcci sistemici. Invece, è di notevole importanza la relazione tra i sistemi aperti e organizzati e l’ambiente, perché è solo attraverso lo scambio con l’ambiente che essi “si tengono in vita” (in senso lato). È questo scambio che, per un sistema aperto, permette d’acquisire la capacità di raggiungere e mantenere la stabilità in uno stato stazionario indipendente dal tempo: condizione necessaria per consentire l’adattamento ai mutamenti ambientali. Tali stati stazionari, come è stato detto, differiscono moltissimo dagli stati d’equilibrio descritti dalla Termodinamica classica (stati dei sistemi chiusi), che in passato sono stati utilizzati troppe volte come modelli per rappresentare le proprietà biologiche e sociali. Negli stati d’equilibrio, infatti, una volta raggiunto l’equilibrio, il sistema non può più produrre alcun lavoro. Viceversa, lo stato stazionario permette, anzi implica, un continuo rapporto tra il sistema e il proprio ambiente e, perciò, non ne limita la capacità di lavorare che, se limitata, impedirebbe al sistema di adattarsi e all’organismo di sopravvivere.

Un’ultima precisazione riguarda la scala dei tempi in cui si studia un sistema in un ambiente. Non sempre è sufficiente distinguere la coppia concettuale sistema/ambiente in maniera statica. Se ci si concentra, infatti, sulla coppia sistema/ambiente da un punto di vista statico, il sistema opera in una condizione di quasi-isolamento rispetto all’ambiente. È, quindi, più facile scindere la coppia concettuale. In una trattazione dinamica, se i tempi interni al sistema e quelli dell’interazione sistema/ambiente sono comparabili, il sistema deve essere studiato in rapporto con il suo ambiente, ossia in un rapporto d’elezione reciproca: l’ambiente modifica il sistema e il sistema modifica l’ambiente. La teoria dei sistemi aperti sostiene che le influenze provenienti dall’ambiente non sono solo fonte di variazione e di errore per il sistema, ma possono essere correlate in modo integrale al suo funzionamento e che, quindi, in tanti studi dinamici non si può comprendere un sistema senza includere nello studio le interazioni che costantemente lo modificano. Pensando, invece, alla dinamica dell’organizzazione come ad un sistema chiuso ci si pone nell’incapacità di comprendere i meccanismi (come il feedback) necessari a farci acquisire informazioni adeguate circa i cambiamenti che intervengono nelle forze ambientali. Il sistema, inoltre, non si adatta solo all’ambiente, ma, interagendo con esso, lo modifica: il rapporto tra il sistema e l’ambiente è complesso, con reciproche trasformazioni.

4. La dimensione ambientale della vita in Morin

Per Morin [19] l'unità globale sistemica sulla Terra è il prodotto dell'unione di un *biotopo* (l'ambiente geofisico) e di una *biocenosi* (l'insieme delle interazioni degli esseri viventi di tutti i tipi che popolano il biotopo). Ciò che organizza l'ambiente e che lo rende sistema sono proprio le interazioni fra i viventi, combinandosi con i vincoli e le possibilità fornite dal biotopo fisico e retroagendo su di esso. I reciproci rapporti fra il tutto e le parti sono di complessità sistemica e l'ambiente cessa di rappresentare un'unità esclusivamente territoriale, diventando, invece, una realtà organizzata e organizzatrice, l'ecosistema che porta in sé sia l'ordine/disordine geofisico sia quello del vivente. Da questo momento l'approccio ecologico si fonda sull'idea di eco-sistema, idea che integra e che sorpassa sia le idee di ambiente e quelle di mezzo, sia la separazione assoluta tra l'ambito fisico e il vivente. Con il termine *ecosistema* si intende mettere in evidenza come l'insieme delle interazioni nell'ambito di una determinata unità geofisica, comprendente diverse popolazioni viventi, costituisca un'unità complessa di carattere organizzata e, dunque, un sistema. Per il vivente, questo significa che non possiamo più considerare l'ambiente soltanto come vincolo esterno che, con i suoi determinismi, i suoi "condizionamenti del mezzo", lo determina. Esso è sia disordine, distruzione e rischio a cui il vivente si deve sottomettere, sia un tutto che organizza. Allo stesso modo, il vivente è causa oltre che effetto per l'ambiente.

Per Morin la dimensione ecologica costituisce la terza dimensione organizzativa della vita. Prima dell'approccio ecologico, la vita era caratterizzata soltanto in due dimensioni, quella della specie e quella dell'individuo. Per quanto importante potesse essere, l'ambiente sembrava soltanto l'involucro esterno della vita. La vita, tuttavia, non è soltanto l'organizzazione cellulare delle molecole, non è nemmeno solo l'albero ramificato delle diversificazioni prodotto dall'evoluzione. La vita è eco-organizzazione, è una componente integrata dell'organizzazione multipla dell'ecosistema.

Considerando in dettaglio la biocenosi, le interazioni che si effettuano in essa appaiono di carattere complementare (associazioni, società, simbiosi, mutualismi), concorrenziale (competizioni, rivalità), o antagonista (parassitismi, predazioni).

Nel mondo vivente le associazioni di esseri complementari e/o solidali sono molteplici. In primo luogo, dobbiamo rammentare le associazioni degli organismi monocellulari da cui sono derivati gli organismi pluricellulari. Dobbiamo, inoltre, attribuire tutta la loro importanza, a lungo ignorata, anche ai raggruppamenti sociali, come ad esempio quelli fra gli insetti. Le stesse specie vegetali fanno parte di associazioni ben precise, che dipendono dalla natura dei biotopi, e una disciplina ecologica è chiamata, in maniera metaforica ma significativa, fitosociologia.

Le simbiosi, associazioni permanenti fra specie differenti e nel contempo

vantaggiose per tutte le specie coinvolte, posso aver luogo: (a) fra i vegetali, come nel caso dei licheni, associazione simbiotica di un fungo e di un'alga; (b) fra animali e vegetali, come quella fra formiche "tagliatrici di foglie" e i funghi che esse coltivano; (c) fra animali, come l'esempio del paguro e delle attinie; (d) fra gli organismi ospitanti e i microorganismi che abitano nei loro intestini, dove questi ultimi degradano quelle sostanze che l'organismo ospitante è incapace di assimilare. Persino l'addomesticamento delle piante e degli animali da parte dell'uomo ha provocato dei fenomeni simbiotici: ad esempio, le piante coltivate hanno perso alcune capacità di resistenza e ora non possono fare più a meno degli interventi che i loro coltivatori devono effettuare contro i parassiti e le erbacce, proprio come gli stessi coltivatori non possono fare a meno dei prodotti di tali piante.

Le associazioni, le simbiosi, i mutualismi e le interdipendenze in generale costituiscono delle relazioni ad anello in cui ambedue i partner soddisfano i bisogni dell'altro. Queste relazioni costituiscono non soltanto isole di organizzazione nell'ambito degli ecosistemi, ma anche veri e propri arcipelaghi di eco-organizzazione. Tali arcipelaghi di complementarità/solidarietà, tuttavia, sono circondati da oceani di parassitismi, di concorrenze, di antagonismi e di distruzioni. Così il parassitismo imperversa nel mondo vegetale (batteri, funghi, vischio) e nel mondo animale (pulci, pidocchi, zecche e persino i cuculi che depongono le uova nei nidi di altri uccelli).

Le concorrenze sono ancora più diffuse dei parassitismi. Nel regno animale esse si scatenano sia all'interno di una specie e delle loro società, sia tra specie diverse. Anche nell'ambito del regno vegetale le concorrenze sono all'ordine del giorno. Nelle foreste gli alberi si innalzano verso il Sole facendo ressa: essi lottano per la luce, si arrampicano l'uno sull'altro e conducono "guerre chimiche" sotterranee.

Antagonismo e complementarità non si escludono a vicenda. Niente è più complementare delle interazioni che costituiscono la catena trofica, che alimenta e organizza la vita di un ecosistema. La predazione, ad esempio, non è soltanto la pura e semplice distruzione di una vita animale da parte di un'altra vita animale. I modelli matematici di Volterra e Lotka mostrano che "la lotta per l'esistenza" fra viventi produce delle "leggi". Le curve demografiche a lungo periodo, infatti, come è ben evidente nel caso limite in cui una specie predatore vive esclusivamente di una specie preda, mostrano che la diminuzione del numero delle prede comporta una carestia per i predatori e, quindi, una diminuzione del loro numero. Questo, tuttavia, consente un rinnovato accrescimento del numero delle prede, con conseguente aumento delle nascite dei predatori e così via, secondo una causalità retroattiva che può essere rotta soltanto dall'intervento di qualcosa di esterno al ciclo. È in questo modo che la relazione antagonista più intensa, quella fra il predatore e la preda, produce la propria regolazione e diventa fattore organizzativo. La predazione non cessa di esser

un fattore di distruzione, ma diventa anche un fattore di conservazione di chi mangia e di chi è mangiato, un fattore di conservazione della diversità.

Dopo aver visto che gli antagonismi portano con loro delle solidarietà e che le distruzioni alimentano le eco-organizzazioni, vediamo dunque che nella complementarità e nella solidarietà possono essere presenti concorrenza e antagonismo. Siamo dunque costretti a pensare l'antagonismo e la complementarità in maniera complessa. Le due nozioni opposte hanno anzitutto una base in comune: è il bisogno esistenziale dell'altro. Ognuna di queste nozioni contiene l'altra, sono due facce inscindibili (se non per motivi di analisi) della stessa medaglia.

Tutte queste interazioni contingenti, aleatorie e senza scopi sono, allora, contemporaneamente provocate e provocatrici, generate e generatrici, nell'ambito di catene e di cicli fisici, chimici, biologici, catene e cicli mescolati, aggrovigliati, ognuno dei quali contribuisce al sistema generale costituito dalla eco-organizzazione.

Si può partire dall'irraggiamento del Sole che arreca energia alla vita. La gravitazione che esso esercita sul pianeta Terra, con la conseguente rivoluzione della Terra attorno al suo astro e con la sua rotazione su sé stessa, crea un ordine ciclico che il mondo vivente integra come ordine organizzativo. Con l'alternanza giorno/notte, con l'alternanza delle stagioni, la rotazione e la rivoluzione della Terra impongono variazioni cicliche di luce, di temperatura, di idrologia; si creano in questo modo dei climi locali che variano secondo le latitudini, le regioni e i periodi. Questi cicli geofisici segnano dall'interno l'organizzazione biologica degli individui, delle specie, degli ecosistemi che sincronizzano il riposo e l'attività, il sonno e la veglia, i cicli di germinazioni, di fioriture, di fecondazioni, di ibernazioni.

La dimensione temporale è un tratto caratteristico dell'eco-organizzazione; essa, infatti, ingloba la regolazione del tempo geofisico con gli innumerevoli micro-orologi viventi. Il tempo cosmico innesca e controlla ogni vegetale, direttamente tramite la luce o indirettamente tramite la temperatura, e tutte le operazioni vitali, interiorizzandosi con gli orologi biologici interni che operano negli stessi vegetali. Anche l'universo animale, in maniera diretta o indiretta, è sottoposto al governo congiunto del tempo geofisico, degli orologi vegetali e della loro interazione con quelli individuali degli animali. Le stesse originarie società storiche umane determinarono il calendario del cielo e regolarono su di esso il calendario degli uomini. L'ordine temporale dei movimenti del nostro pianeta costituisce così il fondamento di ogni organizzazione vivente e anche di ogni organizzazione antropologia e sociale umana.

Considerando globalmente la Terra, sono tanti i cicli materiali che la caratterizzano. Se ne citano due che avvolgono, attraversano, alimentano tutta la biosfera: il ciclo dell'acqua e il ciclo ossigeno-anidride carbonica. Questi cicli alimentano e sono alimentati da un ciclo globale della materia e dell'energia,

dalla vita e dalla morte, dalla catena trofica. Quest'ultima va dalle piante, agli erbivori, ai carnivori la cui decomposizione nutre la terra e torna alle piante. È un ciclo in cui tutto diventa nutrimento, compresi i rifiuti respiratori e digestivi dei viventi. Nella catena trofica si ritrovano, dunque, quegli stessi caratteri di fondo che abbiamo visto in altri sistemi. È il paradigma dell'anello retroattivo/ricorsivo, chiuso/aperto, che si produce e si regola da sé in un processo in cui ogni momento dell'anello è costitutivo del momento successivo, in cui il ciclo si compie nel momento stesso in cui ricomincia, in cui i prodotti e gli esiti finali sono nello stesso tempo i nuovi stati e le condizioni iniziali.

Tale anello globale è di natura energetica, è di natura chimica, è di natura vivente. Esso è un formidabile turnover di nascite, di vite, di morti che si distruggono e che si generano reciprocamente. Questo vortice è l'essenza stessa dell'eco-organizzazione.

Riferimenti

- [1] L. von Bertalanffy, *Der Organismus als physikalisches System betrachtet*, *Naturwissenschaften*, 1940, **28**, 521-531.
- [2] L. von Bertalanffy, *The theory of open systems in physics and biology*, *Science*, 1950, **111**, 23-29.
- [3] G. Villani, *L'interpretazione chimica del vivente. Fondamenti sistemici delle scienze della vita*, Clueb, Bologna, 2023, Introduzione.
- [4] M. P. Banchetti, G. Villani, *From the atom to living systems. A chemical and philosophical journey into modern and contemporary science*, Oxford University Press, Oxford (UK), in stampa, Introduction.
- [5] E. Morin, *Il metodo 1. La natura della natura*, Milano, Raffaello Cortina, 2001, p. 312.
- [6] L. von Bertalanffy, in *La Teoria dei sistemi* (a cura di F. E. Emery), Milano, Franco Angeli, 1994, nota 5, pp. 83-84.
- [7] *Ivi*, nota 5, p. 85.
- [8] M. P. Banchetti, G. Villani, *From the atom to living systems*, cit., Capitolo 11.
- [9] G. Villani, *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*, Milano, Franco Angeli, 2008, Chapter 1.
- [10] J. H. Poincaré, Congress of Art and Science. Universal Exhibition Saint Louis 1904, in I. Müller, *A History of Thermodynamics. The Doctrine of Energy and Entropy*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (DE), 2007, p. 281.
- [11] I. Prigogine, *La nascita del tempo. Le domande fondamentali sulla scienza dei nostri giorni*, Bompiani, Milano, 1988, p. 70.
- [12] I. Prigogine, *La nascita del tempo*, cit., p. 27.

- [13] G. Villani, *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*, Cuen, Napoli, 2001, Capitolo 8.
- [14] H. von Foerster, On self-organizing systems and their environments, in *Self-organizing systems: proceedings of an interdisciplinary conference* (Eds. M. C. Yovitis, S. Cameron), Pergamon Press, New York, 1960.
- [15] H. Atlan, Sul rumore come principio di autoorganizzazione, in E. Morin, *Teorie dell'evento*, Milano, Bompiani, 1972, p. 35.
- [16] E. Morin, *Il metodo 1*, cit., note 7, p. 56.
- [17] E. Morin, *Il metodo 1*, cit., Capitolo 2.
- [18] I. Prigogine, *La nascita del tempo*, cit., p. 68.
- [19] G. Villani, *L'interpretazione chimica del vivente*, cit., Capitolo 7.