

Sandro Pignatti
Bruno Trezza

Assalto al pianeta

Attività produttiva
e crollo della biosfera

Bollati Boringhieri Scienze



Nell'affrontare il problema del rapporto tra attività umana e ambiente si tende comunemente a considerare l'ambiente come una risorsa da utilizzare nel modo più efficiente nell'attuazione dei programmi di produzione e consumo.

La questione ambientale si pone quando diventa evidente l'esistenza di un limite ai programmi di espansione della base produttiva e dei livelli di consumo. Il superamento di questo limite è stato tentato attraverso la formulazione del concetto di sviluppo sostenibile. A prescindere dal giudizio sulla efficacia delle metodologie adottate per giungere a valutazioni significative dell'impatto ambientale, quello che per gli autori è errato e fuorviante è l'approccio in sé.

Viceversa, la teoria qui proposta è fondata sulla convinzione che l'ambiente non è un luogo amorfo, ma un sistema complesso che si mantiene tramite il funzionamento delle sue componenti in una condizione di omeostasi tale da consentire la vita al suo interno. Tale sistema, che può essere identificato con la biosfera, è efficacemente indicato col nome di ecosistema, di cui il sistema produttivo è un sottosistema. Se il sistema produttivo raggiunge dimensioni troppo grandi - come sta succedendo - l'ecosistema non è più in grado di mantenere il funzionamento dei suoi cicli e dunque la sua struttura attuale.

Sandro Pignatti è professore ordinario di Ecologia presso l'Università di Roma «La Sapienza». Socio dell'Accademia Nazionale dei Lincei, è autore, tra l'altro, di *La flora d'Italia*, (Edagricole, 1982, 3 voll.) e di *Ecologia vegetale* (Utet, 1994).

Bruno Trezza è professore ordinario di Economia Politica presso l'Università di Roma «La Sapienza». Premio Saint Vincent per l'Economia (1979), è autore, tra l'altro, di *Economia e moneta* (il Mulino, 1975) e *Origine e sviluppo delle teorie economiche* (CISU, 1993).

In copertina, David C. Turnley, *In secca nell'Aral* (Foto Corbis / Grazia Neri).

ISBN 88-339-1216-7



LIRE 58.000 (I.L.)

9 788833 912165



Sandro Pignatti
Bruno Trezza

| | |
|-----|---|
| 268 | 6. Oltre il mito |
| | 6.1. La nuova filosofia della vita: ecoliberalismo, 269 |
| | 6.2. I limiti della capacità portante, 271 |
| | 6.3. È necessaria una nuova teoria integrata, 273 |
| | 6.4. Una nuova etica, 277 |
| 281 | <i>Glossario</i> |
| 287 | <i>Letture consigliate</i> |
| 293 | <i>Bibliografia</i> |
| 303 | <i>Indice dei nomi</i> |

Prefazione

Questo libro nasce dal convincimento che il problema del rapporto tra attività umana e ambiente, problema che oggi riveste importanza capitale, non sia stato collocato nella giusta prospettiva né sia stato affrontato con strumenti concettuali adeguati; a causa di ciò l'approccio corrente tende a considerare l'ambiente come una risorsa, accanto alle altre, da essere utilizzata nel modo più efficiente possibile nell'attuazione dei programmi di produzione e consumo. La questione ambientale si pone quando diviene evidente l'esistenza di un limite ai programmi di espansione della base produttiva e dei livelli di consumo. Il superamento di questo limite è stato tentato attraverso la formulazione del concetto di sviluppo sostenibile, e sono state studiate varie tecniche per la valutazione dell'uso efficiente delle risorse. Queste hanno assunto il ruolo di strumenti per la concreta individuazione di tale tipologia di sviluppo.

Posto in tal modo, il problema del degrado ambientale si è trasformato nel problema della valutazione dell'impatto ambientale connesso alle diverse attività che possono essere poste in essere in modo da poter valutare costi e benefici di queste stesse azioni senza trascurare, ma tenendo in debito conto gli effetti sull'ambiente. Questo punto di vista e il conseguente approccio sono stati adottati da tutte le maggiori istituzioni che presiedono alla erogazione di finanziamenti per investimenti, ad esempio i fondi strutturali UE, e hanno anche dato luogo all'emergere di nuove figure professionali come i certificatori ambientali.

A prescindere dal giudizio sull'efficacia delle metodologie adot-

tate in pratica per pervenire a valutazioni significative, e sulle quali ci sarebbe molto da dire, ciò che a noi sembra errato e fuorviante è l'approccio in sé, in quanto basato su un modo di intendere l'ambiente e il rapporto tra uomo e ambiente non solo lontano dalla realtà, ma assolutamente inefficace per poter dare adeguato inquadramento concettuale al problema che oggi l'uomo si trova ad affrontare.

La teoria che viene qui proposta è fondata sulla convinzione che l'ambiente non è un luogo amorfo nel quale l'uomo si trova collocato, ma un sistema complesso che si mantiene tramite il funzionamento delle sue componenti in una condizione di omeostasi tale da consentire la vita al suo interno. Tale sistema, che può essere identificato con la biosfera, è efficacemente indicato con il nome di ecosistema, ovvero come sistema casa (casa = *oikos*): il sistema che ospita e nutre i viventi che ne fanno parte, tra cui l'uomo.

Tutti gli organismi viventi, l'uomo compreso, compongono la biosfera e la loro attività, di natura chimica e meccanica, è un elemento fondamentale del funzionamento dell'ecosistema. La stessa base energetica su cui si fonda il funzionamento della biosfera, e della vita sul pianeta, è fornita dall'attività di suoi componenti come le piante terrestri e il fitoplancton. Questi organismi, infatti, concentrano l'energia solare e la fissano nel sistema vivente rendendola disponibile alle altre forme di vita che altrimenti non potrebbero accedervi; non è certamente possibile indicare, specie in una introduzione, il ruolo svolto dalle relazioni tra gli organismi viventi nel costruire e mantenere le caratteristiche dell'ecosistema; per dare un'idea basta tuttavia pensare al ruolo degli impollinatori, animali essenziali per la riproduzione delle piante, oppure della barriera corallina dove alghe e animali danno vita a una formazione rocciosa in grado di sfidare tempi geologici.

In parallelo al complesso ciclo chimico che si crea all'interno dell'ecosistema, formato dall'insieme interagente dei viventi, esistono i cicli meccanici indotti dall'energia solare, come il ciclo idrico che lega evaporazione dell'acqua e piogge e altri ancora, ma questi cicli, pur necessari, sono caratteristici anche dei pianeti che non ospitano la vita, come Marte o Giove; non è su di essi, quindi, che deve volgersi la nostra attenzione, anche se la loro struttura può essere importante e ancora più importante è l'inte-

razione di essi con il ciclo della vita: basti ricordare l'interazione tra CO₂ nell'atmosfera, CO₂ ottenuto da cicli chimici anche connessi alla vita, l'effetto serra connesso al fenomeno meccanico della riduzione della dispersione di calore nello spazio e le variazioni climatiche conseguenti che hanno natura meccanica, organica e chimica.

Il concetto fondamentale, a nostro avviso, da cui partire è quindi che l'ambiente non è il luogo in cui l'uomo vive, ma il sistema a cui appartiene, di cui fa parte e di cui condivide le sorti, così come il feto non vive nell'utero materno come in un qualsiasi luogo, ma appartiene al sistema mamma-bambino e ne condivide la sorte vivendo ed eventualmente morendo con esso. Men che meno, quindi, l'ambiente può essere considerato come una risorsa, ovvero un elemento estraneo o esterno all'uomo e alla vita che lo circonda, utilizzabile per fini separati dall'ambiente stesso e dalla sua preservazione.

Una volta accettata questa impostazione, il primo problema che si pone consiste nel definire gli strumenti concettuali necessari per comprendere la funzione dell'ecosistema; nel paradigma della scienza meccanicista di derivazione galileiana-newtoniana questo oggi viene tentato mediante il metodo riduzionistico. Ma questo procedimento porta al fallimento perché non si può disarticolare l'ecosistema senza perderne la complessità, che ne costituisce la caratteristica essenziale. Noi abbiamo scelto una via diversa, che parte dal concetto di sistema complesso. Il passo successivo è determinato dalla considerazione che l'ecosistema è costituito da infiniti sottosistemi che, singolarmente presi, si presentano a loro volta come sistemi complessi a tutti gli effetti: in particolare i viventi e le comunità di viventi tra cui l'uomo stesso e la società umana. Una delle caratteristiche fondamentali dei viventi, e quindi dell'ecosistema in quanto sistema da loro formato, è che non vi è alcuna volontà o progetto definito dall'esterno finalizzato alla costruzione di questi sistemi: essi invece nascono spontaneamente e, tramite il funzionamento delle loro strutture, si preservano sino al momento del loro dissolvimento o morte. Su questo tipo di sistema vi è una vasta letteratura che presenta molte e interessanti formulazioni concettuali, dai sistemi complessi adattativi di Gell-Mann ai sistemi autopoietici di Varela e Maturana e così via; abbiamo preferito la

nozione di sistemi auto-organizzanti sia perché più chiara sia per non volere assumere alcuni aspetti delle concettualizzazioni indicate e che non sembrano condivisibili.

Il punto rilevante a questo riguardo non è tuttavia dato dalla definizione e dall'analisi delle caratteristiche dei sistemi auto-organizzanti in termini di teoria dei sistemi o di teoria dell'informazione e simili, quanto dalla caratterizzazione di questi sistemi in termini di fisica e chimica sia in modo da poterli definire come viventi o composti di viventi sia al fine di poter analizzare la relazione con l'ambiente; relazione che certamente avviene tramite gli effetti di reazioni chimiche ed attività fisiche.

La definizione di strutture dissipative e l'analisi della termodinamica lontano dall'equilibrio svolta da Prigogine fornisce uno schema concettuale di base molto più soddisfacente di quello fornito dal paradigma della scienza meccanicista.

Dedichiamo alcune parole a questo punto di estrema rilevanza. In termodinamica si possono distinguere fenomeni vicino all'equilibrio e fenomeni lontano dall'equilibrio. La termodinamica dei sistemi vicino all'equilibrio studia il funzionamento di sistemi termodinamici tenuti in condizioni di non equilibrio, ovvero in condizioni di compiere lavoro, come qualsiasi macchina termica usata dall'uomo, dalla locomotiva allo scaldabagno, mediante immissione di energia dall'esterno; perché un sistema del genere possa permanere in questo stato occorre che vi sia un soggetto esterno che continui a immettere energia decidendo il livello di funzionamento del sistema stesso: velocità della locomotiva o temperatura dell'acqua nello scaldabagno. Si tratta, quindi, di sistemi concepiti dall'uomo e che sono alla base di tutti gli impianti produttivi e delle macchine usate; questi, abbandonati a se stessi, cessano di funzionare e ogni trasformazione si arresta. La termodinamica lontano dall'equilibrio studia invece i sistemi che si auto-organizzano e quindi determinano in modo endogeno come e quanta energia assorbire dall'ambiente, ovvero dall'ecosistema che li contiene: sono i viventi, che sono parte organica e funzionante della biosfera. L'assunzione di energia ha lo scopo iniziale di consentire a questi sistemi di formarsi e raggiungere dimensioni adeguate; successivamente essa ha la funzione di mantenere il più possibile integra la struttura che il sistema ha assunto e infine, quando tale assun-

zione diviene impossibile, il sistema si disintegra, ovvero il vivente muore.

La termodinamica in queste sue due suddivisioni offre lo schema concettuale per lo studio sia della biosfera, e quindi degli organismi viventi che la compongono, sia dell'attività produttiva e di consumo posta in essere dall'uomo; l'omogeneità concettuale e dell'oggetto di indagine che lega le due branche della termodinamica consente di trattare coerentemente ed efficacemente la relazione esistente tra ecosistema e sistema produttivo.

Consequentemente alla impostazione concettuale e metodologica adottata in questo libro, si è resa necessaria una prima parte dedicata alla illustrazione dei concetti usati e degli aspetti metodologici più rilevanti, in modo da offrire al lettore non aduso a essi sufficiente cognizione per affrontare in modo relativamente semplice e senza la barriera di tecnicità matematiche i temi affrontati.

Come si è detto, mediante l'uso dei concetti della teoria dei sistemi e della termodinamica è possibile procedere all'analisi dell'ecosistema e dei viventi; tuttavia un problema ulteriore sorge al momento di analizzare il sistema produttivo e con esso l'attività umana volta alla produzione e al consumo di beni. L'attività umana svolta a questi fini, e quindi il sistema produttivo, appartiene contemporaneamente a due spazi diversi ognuno caratterizzato da un suo proprio: lo spazio del mondo fisico e lo spazio dell'economico. Il sistema produttivo, in quanto appartenente al primo spazio, interferisce con l'ambiente e, in quanto appartenente al secondo, persegue le finalità attribuitegli e si ritrova soggetto alle regole assegnate dall'uomo allo spazio economico in cui è iscritto. Un esempio interessante di questo dualismo è dato dall'esistenza del prodotto netto, che si presenta come condizione necessaria per qualsiasi produzione e che, tuttavia, se inteso in puro senso materiale, contraddice la fondamentale legge di Lavoisier che nulla si crea e nulla si distrugge.

Questa situazione dualistica si riflette, pur se in modo non consapevole, anche nel tentativo fatto dall'analisi ambientale corrente di riportare il problema dell'ambiente nel proprio dello spazio economico mediante l'attribuzione di una valutazione, se non di un prezzo, al danno ambientale. Sia per affrontare questo problema dal punto di vista della duplice appartenenza del sistema pro-

duttivo a due spazi conoscitivi diversi sia per trattare di per sé il problema della duplice appartenenza, ovvero del problema dell'uomo che si trova ad affrontare una tematica che, pur essendo unitaria nella sua interazione reale, appartiene a comparti concettuali diversi, è stato necessario introdurre uno schema concettuale apposito a cui abbiamo dato il nome di teoria degli osservabili. Abbiamo dovuto, inoltre, brevemente considerare alcuni aspetti relativi alle finalità dell'attività produttiva come espresse dal sistema imprenditoriale oggi in essere.

All'introduzione di questi concetti e all'analisi di queste tematiche è dedicata la terza parte del libro.

Una volta affrontata in modo corretto la relazione tra sistema produttivo e ambiente, si vede con chiarezza che essa non ha a che fare con rapporti tra tassi di crescita, ma - il che, peraltro, è anche intuitivamente ragionevole - tra livelli; in altre parole, sia la dimensione del processo produttivo sia la dimensione della popolazione mondiale non possono superare determinati limiti in assoluto data la dimensione finita dell'ecosistema. In particolare l'effetto del sistema produttivo sull'ambiente è quello di disarticolare i cicli e quindi di compromettere la capacità dell'ecosistema di permanere nella sua condizione di omeostasi che consente la vita sulla Terra. In effetti l'ecosistema è un sistema complesso che contiene al suo interno un sottosistema, rappresentato dal sistema produttivo, che non ha partecipato, e quindi non ne è parte, del processo di auto-organizzazione della biosfera: è naturale quindi che, se questo sottosistema raggiunge dimensioni troppo grandi, l'ecosistema non è più in grado di mantenere il funzionamento dei suoi cicli ai livelli necessari per il mantenimento della sua struttura attuale. Una ulteriore difficoltà, a tal riguardo, nasce dal fatto che il sistema economico di tipo imprenditoriale, per sua intrinseca natura, tende a crescere senza limiti creando un conflitto insanabile con l'ambiente; in modo analogo, anche se non mediante una contrapposizione così radicale in termini di reciproca coerenza, si presenta come insostenibile l'attuale andamento demografico. Per questo siamo arrivati alla conclusione che l'attività produttiva costituisce un vero e proprio assalto al pianeta e alle risorse che sostengono la vita.

Questo libro non intende suggerire soluzioni, impensabili all'in-

terno dell'assetto attuale in cui sarebbero richiesti cambiamenti di enorme portata. Recentemente Dahrendorf ha affermato che se le condizioni del dissesto ambientale sono quelle da più parti denunciate (e non vi è alcun serio motivo di dubitarne) allora le nostre istituzioni democratiche non sono adeguate per affrontare il problema, e quindi la scelta può essere tra perire nella democrazia o sopravvivere nella dittatura. Noi non siamo d'accordo con questa specifica formulazione anche se dobbiamo condividere fino in fondo la denuncia della drammaticità della situazione e delle responsabilità della democrazia parlamentare. Nessuno sa quali evoluzioni e cambiamenti può riservare il futuro; ciò che ci sembra indispensabile è che la questione ambientale sia posta nella giusta prospettiva e compresa nella sua vera natura, come il problema della nostra convivenza con il sistema in cui viviamo: solo così, infatti, è possibile che si sviluppino atteggiamenti, dibattiti, discussioni, comportamenti, programmi di ricerca, rapporti tra nazioni e individui, finalità comuni in grado di aprire una nuova via per un corretto rapporto tra l'uomo e la sua casa nell'universo.

Capitolo I

Introduzione

1.1. *Argomento e scopi del libro*

L'estate del 1972 non è stata particolarmente calda: non molti avranno notato che stava iniziando una fase nuova dell'assalto per la conquista del pianeta. Eppure, più o meno in quel periodo è avvenuto il grande sorpasso: per la prima volta l'energia prodotta dalle attività industriali ha superato il naturale flusso energetico che attraversa la biosfera. Autore di questo avvenimento è stato l'uomo, l'ultimo arrivato sulla Terra: il bipede intelligente che si è dapprima sviluppato come un elemento della biosfera, convivendo con l'immensa complessità dei viventi, ma progressivamente ne è divenuto consapevole, ed ha cercato di arrivare a dominarla. Dal 1972 diviene evidente che l'attività produttiva guidata dall'uomo è in conflitto con la persistenza dei cicli naturali e rappresenta un assalto alla struttura che sostiene la vita sul pianeta.

L'assalto al pianeta si compone di mille atti singoli, ciascuno dei quali è probabilmente sopportabile, ed addirittura utile, per qualcuno: però la somma di questi atti mette in crisi la stessa permanenza della vita sulla Terra. L'azione dell'uomo è regolata dalle certezze che stanno alla base della scienza e della tecnica; queste a loro volta derivano dalla cultura occidentale di stampo aristotelico-tomistico, basata sul principio di causa-effetto, e sviluppata successivamente come paradigma della scienza meccanicista da Galileo, Cartesio e Newton. Tuttavia, quando queste certezze sono state applicate su scala sempre più vasta hanno portato ad un risultato disastroso per l'ambiente.

L'uomo occidentale da sempre ha immaginato di poter carpire i segreti della natura per dominarla: un sogno fondato su un atto di superbia, che negli ultimi secoli è sembrato sempre più diventare realtà; oggi, tuttavia, i limiti di tale impostazione sono diventati evidenti.

Il tentativo di dominare le forze della natura nella mitologia greca viene attribuito a Prometeo, il previdente (pro-meteus), il quale dona agli uomini il fuoco e con esso la padronanza delle arti. Ma un grave pericolo si cela dietro la *techne*: la vita intesa come prevaricazione, come illusione di uscire dalla condizione umana del dolore, ed è questa la *hybris*, che cercando di organizzare e dominare la vita porta al fallimento di Prometeo. Su chi segue questa via il dio interviene duramente, e lo punisce con la distruzione. La via giusta è quella intermedia, elogiata anche da Aristotele, e dominata dal vero timore di violare l'ordinamento di Dike, ovvero l'ordinamento della necessità, il principio supremo ed eterno; la via intermedia che dà la felicità che sorge dalla salute della mente, nella quale la potenza è liberamente mantenuta all'interno di limiti e lontana dagli estremi. Il dono della *techne* dato da Prometeo agli uomini è quindi un dono avvelenato in quanto conferisce potere e capacità di prevaricare gli uomini e la natura, spinge verso obiettivi irraggiungibili e sostiene un ingiusto desiderio di potenza, fonte dell'ultima rovina. Il messaggio che proviene dal profondo dell'insegnamento greco è un messaggio di ricerca della saggezza e della verità e non della sola scienza e delle sue applicazioni.

L'uomo moderno è stato sordo all'insegnamento dei greci e ha proseguito verso la ricerca del potere. La traiettoria dell'uomo moderno è l'argomento del *Faust* di Goethe. È la storia dell'erudito che, attraverso lo studio, cerca di appropriarsi delle leggi che reggono il mondo per dominarlo; l'incompletezza e l'inutilità della conoscenza scientifica come tale, se non sorretta da una più alta visione del mondo, spinge Faust a stringere un patto col diavolo per ottenere quel potere che, desiderato e perseguito tramite lo studio, continua a sfuggirgli. È questa la nuova *hybris* dell'uomo moderno, che arriva fino al sogno di creare un paese del tutto nuovo bonificando l'ambiente marino, però alla fine anche questo progetto fallisce e Faust per Goethe trova riscatto solo nel pentimento della fede.

Nell'attività di tutti i giorni si cercano i rimedi ai danni causati dall'azione della tecnologia sul mondo. Questo però non basta. È inutile cercare di riparare i danni, bisogna trovare una nuova cultura che ci permetta di agire senza provocare danni. Il paradigma della scienza meccanicista applicato alla analisi dei fenomeni permette di compren-

dere i legami tra singoli avvenimenti, ma porta a una concezione riduzionista che sul piano globale ci offre soltanto pseudo-certezze. Da qui la conclusione che vada cercato un nuovo paradigma e il tentativo di svilupparlo mediante una concezione nuova, centrata sul sistema auto-organizzante. Questa, infatti, incorpora le conoscenze scientifiche acquisite mediante il metodo riduzionista, però mantiene una visione globale dei fenomeni e rifiuta di analizzarli in singole catene di causa effetto. Il sistema auto-organizzante è sempre in intenso scambio con l'esterno, tende ad accumulare ordine e si struttura fino a un livello di soglia oltre il quale può aversi la transizione al caos. Il paradigma sistemico non fa parte dei programmi d'insegnamento, quindi risulta anzitutto necessario riassumerne le idee portanti: questo può sembrare arido e nozionistico, ma è una condizione indispensabile per effettuare il necessario distacco dalla visione riduzionista dei problemi; esso risulta necessario per la comprensione dei capitoli successivi.

L'attuale condizione di rapporto conflittuale tra attività produttiva e ambiente viene a costituire la questione ambientale. Questo conflitto mette l'umanità di fronte a problemi del tutto nuovi e forse privi di soluzione. La questione ambientale, con le sue cause e conseguenze, costituisce l'argomento di questo libro.

1.1.1. Definizioni

L'uomo può venire definito come un mammifero bipede con andatura eretta, arti anteriori prensili (le mani) e un cervello altamente differenziato, in grado di gestire e accrescere l'informazione come memoria e linguaggio. Esiste sulla Terra da almeno 130 000 anni. L'uomo è stato classificato tra i Primati, con il nome scientifico *Homo sapiens*, unico rappresentante attuale del genere *Homo* (altre 2-3 specie estinte sono note soltanto attraverso resti fossili); vive in società composte da numerosi individui, e nell'antichità Aristotele l'aveva indicato come *zoon politikon*, o «animale politico», per la sua capacità di fondare la convivenza tra individui su un principio razionale. Egli si trova oggi di fronte alla questione ambientale, che minaccia la sua stessa possibilità di sopravvivenza. Da questo deriva l'idea di analizzare se e in quale misura la questione ambientale possa venire spiegata dalla natura stessa dell'uomo, che si comporta come il predatore della biosfera.

In generale, da un punto di vista filosofico l'uomo viene considerato come un universo a sé stante, ovvero viene posto in relazione a Dio, e ciò verrebbe a limitare l'analisi al solo campo spirituale. Tuttavia, siamo convinti che proprio il fatto di aver considerato l'uomo come indipendente dal resto del mondo, e superiore a esso, sia la causa principale degli attuali disastri. L'operazione che si vuole attuare consiste in tre fasi:

- definire struttura e funzione dei viventi (uomo incluso) nella natura;
- analizzare le nuove condizioni che si sono stabilite nella società creata dall'uomo moderno;
- discutere perché l'uomo abbia imboccato una via che porta al disastro.

Fare una diagnosi è la condizione necessaria per ricercare un rimedio, e questa trattazione ha pertanto lo scopo di indagare se, ed entro quali limiti, l'umanità (o almeno una parte di essa) possa capire le cause del suo male ed evitare il peggio.

1.1.2. Proprietà della specie umana

L'uomo è dotato di vita, e pertanto condivide con l'insieme delle specie biologiche i caratteri generali dei viventi. L'uomo va incluso tra gli eucarioti, piante e animali, il cui numero è variamente valutato tra 5 e 20 milioni di specie. Più differenziati sono i batteri, che hanno un nucleo primitivo e dai quali l'uomo differisce per molti caratteri sostanziali.

La specie umana presenta individui riferibili a uno tra due sessi (femminile/maschile), con una durata media della vita di circa 70-80 anni; nel maschio adulto il peso corporeo è di circa 60-75 kg con un'altezza di 160-175 cm, e per mantenere un livello medio di attività si richiede giornalmente un'alimentazione di 2700 kcal, 2,5-3 l di acqua e 2000 l di ossigeno; nella femmina questi valori sono un po' inferiori. Si tratta comunque di dati medi, soggetti a forti variazioni in dipendenza di età, razza, clima, condizioni sociali, attività fisica e fattori individuali. Sul numero complessivo degli individui si hanno statistiche molto precise: il totale è in

continuo aumento da oltre 300 anni e mentre scriviamo sta raggiungendo i 6 miliardi.

Come la generalità dei viventi, l'uomo può essere interpretato come un sistema aperto, *sistema complesso* che scambia materia ed energia con l'ambiente esterno ed è in grado di auto-organizzarsi. La teoria dei sistemi complessi è tuttora in fase di elaborazione e in questo primo capitolo ne verranno richiamati i punti essenziali. L'interazione con l'ambiente è un fatto necessario, ma questo tuttavia non autorizza a considerare uomo e ambiente esterno come due cose separate. Sarebbe una visione condizionata dalla logica che sta alla base della moderna scienza sperimentale, e che può venire considerata erronea, perché riduzionistica (su questo punto dovremo ritornare in seguito): infatti una separazione del vivente (e in particolare dell'uomo) dall'ambiente esterno risulta incompatibile con il mantenimento delle funzioni vitali. Effettivamente, senza la continua immissione di ossigeno nei nostri polmoni, in pochi minuti avviene una degenerazione irreversibile delle cellule nervose, che annulla le funzioni del cervello, essenziali per la caratterizzazione dell'uomo; la situazione per animali e piante è analoga: dunque un vivente, separato dal suo ambiente, perde la caratteristica di vivente. La caratteristica essenziale della *vita* è dunque la possibilità/necessità di interazione continua con quanto è esterno al vivente.

Questo «esterno» può essere prossimo o remoto. Una pianta per compiere la fotosintesi assorbe l'anidride carbonica che si trova nell'atmosfera sita nelle immediate vicinanze della superficie fogliare; invece, l'anidride carbonica emessa da un vulcano posto a migliaia di chilometri di distanza è per essa irrilevante; lo stesso si ripete per l'ossigeno che l'uomo assorbe attraverso la respirazione. Però la pianta sopra indicata, per la fotosintesi ha bisogno anche dell'energia solare, e questa giunge da milioni di chilometri di distanza. L'anidride carbonica dell'atmosfera è prossima, il Sole è remoto, ma entrambi sono in egual misura necessari. Il vivente, dunque, può essere concepito soltanto se inserito in un sistema più ampio, cioè l'*ambiente*, e, reciprocamente, si può affermare che qualsiasi porzione dello spazio suscettibile di ospitare vita costituisce un ambiente.

Va qui specificato una volta per tutte che questa distinzione tra il vivente e il suo esterno, ovvero l'ambiente, viene posta solo al fine di analizzare le strutture e le funzioni a esse collegate; essa però è priva di significato sostanziale, in quanto si tratta di componenti indivisibili di una realtà unica: la natura. La stessa distinzione tra il singolo vivente e l'ambiente fisico che lo circonda, come si vedrà più avanti, ha carattere di arbitrarietà.

A questo punto sarà opportuno definire e approfondire tre nuovi concetti, che abbiamo utilizzato esponendo sinteticamente le proprietà della specie umana:

sistemi complessi auto-organizzanti
vita
ambiente.

Ciascuno di questi concetti è un paradigma di grande rilevanza per il successivo svolgimento delle argomentazioni. I primi due (sistemi complessi, vita) servono a precisare il contesto interpretativo per quanto si viene esponendo, mentre con il terzo (ambiente) entriamo nella trattazione vera e propria. Il contenuto del libro è dunque decisamente multidisciplinare e si sviluppa mediante un discorso che a volte può risultare nozionistico. Va comunque tenuto presente che non si intende dare una trattazione esauriente né della teoria dei sistemi, né della biologia, dell'ecologia o dell'economia, ma fornire un quadro di insieme che metta in grado il lettore di affrontare la tematica del rapporto uomo-ambiente nella sua vera e multiforme natura.

1.2. Il paradigma sistemico

La condizione della specie umana, come del resto quella della generalità dei viventi, può essere compresa sulla base di un paradigma di valore generale: la concezione sistemica, che ci permette di comprendere come materia ed energia possano organizzarsi, e di comprendere il fenomeno-vita, che rappresenta il livello più elevato e ormai largamente autosufficiente di tale organizzazione. Questo paradigma verrà esaminato alle sezioni 1.2.1 e 1.2.2.

1.2.1. Dei sistemi

Il concetto di sistema è utilizzato per l'interpretazione dei fenomeni che verranno descritti e discussi nella nostra trattazione: vediamo il perché di questa scelta. La moderna scienza di derivazione galileiana-newtoniana applica largamente il metodo riduzionistico, consistente nell'isolare singoli fenomeni e interpretarli come catene di causa-effetto: questo procedimento assicura una grande chiarezza nell'affrontare i problemi ed è la principale causa dei successi del metodo sperimentale, però rende difficile o impossibile la visione globale sugli avvenimenti. La nostra tesi è che la questione ambientale sia una conseguenza di questa visione riduzionistica, che ha permesso di risolvere mille problemi di dettaglio, ma ha causato un progressivo squilibrio dell'ambiente nel suo complesso. Secondo il paradigma sistemico i singoli fenomeni, anziché venire isolati, debbono necessariamente esser considerati come parti di un tutto. Questo permette di mantenere una visione unitaria del rapporto tra uomo e ambiente, anche se ne rende più difficile la comprensione.

SISTEMA Si definisce sistema un insieme di parti interagenti.

Secondo la definizione sopra enunciata, il sistema è caratterizzato da due proprietà: anzitutto esso risulta costituito da più componenti, che possono avere - e in genere hanno - carattere di sistema (quindi può essere scomposto in sottosistemi); inoltre tra i componenti esistono rapporti di interazione, dunque il sistema è qualcosa di più della semplice somma di questi.

Qualsiasi porzione dell'universo può venire interpretata come sistema, e anche l'universo tutto nella sua interezza. Però il sistema non è un oggetto reale: il sistema è soltanto un nostro modo di interpretare la realtà. Quindi il sistema è una creazione della nostra mente, e non esiste se non in quanto da noi pensato. Ne consegue che il sistema è un concetto arbitrario, e anche i suoi contenuti e limiti vengono fissati arbitrariamente dall'osservatore in relazione ai fini conoscitivi che persegue.

1.2.1.1. Generalità sui sistemi

Lo studio dei sistemi si è sviluppato nel secolo scorso come termodinamica, scienza di contatto tra fisica e chimica, riguardante le trasformazioni di materia ed energia. In epoca più recente queste conoscenze sono state riunite nella teoria generale dei sistemi (Bertalanffy, 1972).

Alla base della termodinamica vi sono due principi generali:

- I) non è possibile avere creazione o distruzione di materia ed energia, ma soltanto modificazioni, ovvero l'energia non può essere creata né distrutta;
- II) le modificazioni avvengono lungo la direzione che ha caratteristica di irreversibilità.

Il concetto di entropia è stato introdotto per indicare la direzione della modificazione del sistema: quando il sistema è isolato (cioè non può ricevere energia dall'esterno né emettere energia verso l'esterno) ogni trasformazione naturale viene indicata come aumento di entropia. Si abbia, ad esempio, una barra di metallo e se ne riscaldi un'estremità: essa risulterà da un lato a temperatura ambiente, dall'altro, poniamo, a 100°. Allontaniamo la sorgente di calore, e in maniera del tutto spontanea l'estremità calda tenderà a raffreddarsi, mentre aumenterà la temperatura dell'altra estremità. Alla fine tutta la barra avrà la medesima temperatura: il processo si sviluppa come se il calore contenuto nella barra fosse una sorta di fluido, che tende a distribuirsi in maniera uniforme. Il processo inverso è impossibile: non potrà mai accadere che un punto si riscaldi in quanto il calore della barra si è spontaneamente concentrato; sarà sempre necessario un intervento dall'esterno, ad esempio avvicinando una fiamma. Pertanto, il passaggio verso la condizione di uniformità viene indicata come aumento di entropia del sistema, mentre si ha una diminuzione di entropia quando viene riscaldata un'estremità. Il livello di massima entropia corrisponde al punto di equilibrio. L'entropia si può dunque così definire:

ENTROPIA è la funzione di stato del sistema il cui valore aumenta quando il sistema si modifica spontaneamente (senza interventi dall'esterno). In un sistema isolato negli stati iniziali e finali del sistema la quantità di energia

resta invariata, ma nei secondi l'entropia è maggiore che nei primi.

Ne consegue che le variazioni nel tempo dell'entropia di un sistema isolato hanno valore positivo, il che si esprime con la [1]:

S = entropia
 δ = variazione
 t = tempo

$$\frac{\delta S}{\delta t} > 0 \quad [1]$$

Il concetto di sistema isolato ha permesso importanti progressi nel campo della termodinamica; esso rimane tuttavia un'astrazione: infatti nessun sistema studiabile con metodi sperimentali è veramente isolato; nel mondo reale i sistemi sono in qualche modo in contatto con l'esterno e le trasformazioni risultano irreversibili. I contatti con l'esterno permettono di definire, accanto ai sistemi isolati, altri due tipi di sistemi:

- a) sistemi isolati - non hanno scambi con l'esterno;
- b) sistemi chiusi - scambiano energia, ma non materia;
- c) sistemi aperti - scambiano sia energia che materia.

Gli scambi con l'esterno di un sistema non isolato si attuano mediante flussi di energia (sistemi di tipo *b*) oppure di energia e materia (tipo *c*). In relazione alle condizioni del flusso l'energia può trovarsi in diversi stati, che qui non è il caso di analizzare; da qui tuttavia derivano i concetti di exergia, eMergia, energia incorporata (*embodied energy*), per i quali si rimanda agli articoli di Joergensen, di Szargut e di Odum H. T., in Ulgiati (1998).

I flussi di energia e materia si stabiliscono spontaneamente, soltanto nel senso di un passaggio da un sottosistema a maggiore concentrazione verso un sottosistema a concentrazione inferiore, e anche questo è conseguenza del II principio. Se l'energia (oppure la materia o entrambi) è più concentrata all'interno del sistema, si avrà un flusso verso l'esterno, oppure un flusso in senso contrario se questa è più concentrata all'esterno. La differenza tra la concentrazione esterna e quella interna è essenziale perché il flusso

possa stabilirsi e viene detta *gradiente*. Però questa differenza non può essere infinitamente piccola, in quanto in genere il flusso si stabilisce soltanto quando venga superato un *valore di soglia*. Per effetto del flusso una certa quantità di materia ed energia viene trasferita dall'ambiente al sistema considerato. A questo punto, la differenza tra sistema e contorno, o ambiente, ha significato limitato, in quanto entrambi i componenti vengono a costituire un sistema di ordine superiore. Quando, per effetto del flusso, la differenza tra esterno e interno si annulla, il flusso cessa.

Si immagini ora che sistema e contorno siano separati da un setto o parete, che, benché permeabile a energia e materia, li divida l'uno dall'altro secondo un piano geometrico. Se i parametri che descrivono materia ed energia hanno lo stesso valore dalle due parti del piano, si ha una situazione di uniformità: di conseguenza, i valori assunti dal parametro considerato risulteranno simmetrici rispetto al piano stesso. Quando invece il valore è differente, tale simmetria viene annullata. La *rottura di simmetria* rappresenta la condizione necessaria perché si formi un gradiente.

Considerando assieme sia il sistema che il suo contorno, la somma di materia ed energia durante il processo di flusso rimane invariata, però cambia la distribuzione, in quanto prima si aveva una differenza, che alla fine non c'è più. Il gradiente è stato annullato. Esso può venire ripristinato soltanto mediante operazioni che necessariamente avranno un costo energetico. Bisogna quindi attivare un nuovo flusso energetico, che annullerà un altro gradiente, che a sua volta potrà venire ripristinato solo con una ulteriore fase di flusso, e questo continuerà a ripetersi con regresso infinito. Dunque, la differenza che viene annullata non può ricostituirsi spontaneamente. Il processo innescato dallo scambio di materia ed energia risulta pertanto irreversibile. Ergo: i sistemi non isolati sono connessi al loro contorno mediante flussi energetici che annullano irreversibilmente i gradienti definiti da preliminari rotture di simmetria.

Per semplificare il linguaggio, i sistemi non isolati verranno d'ora in poi indicati come «sistemi aperti», tra i quali si intenderanno inclusi anche i sistemi chiusi (tipo *b*) che ne rappresentano una sorta di caso-limite. Nei sistemi aperti si possono osservare soltanto modificazioni irreversibili.

L'irreversibilità è in stretta dipendenza dal II principio e si ricollega alla definizione di entropia. Il passaggio a un livello più elevato di entropia avviene in maniera naturale e spontanea, mentre un abbassamento di entropia nel sistema si può avere soltanto se dall'esterno viene introdotto qualcosa, materia o energia o, più spesso, entrambe, che modifica le condizioni del sistema; però questo qualcosa-dovrà essere stato sottratto a un altro sistema e dovrà venire reintegrato prelevando altra energia, e così via in una catena senza fine. Dunque, un processo con aumento d'entropia ha costo zero, mentre il contrario ha sempre un costo energetico. Pertanto, se in un sistema accade un processo interpretabile come aumento di entropia, è impossibile che il sistema stesso possa ritornare spontaneamente allo stato iniziale: la reversibilità del processo viene esclusa dal II principio. Di conseguenza, l'entropia definisce una direzionalità dei processi: *l'aumento di entropia indica «il verso naturale delle cose»* (Dupré, 1990, p. 139); come si vedrà più avanti, i sistemi complessi, e in particolare i viventi, hanno un verso naturale nel senso contrario, cioè verso una diminuzione d'entropia: come questo sia possibile senza violare il II principio è oggetto delle sezioni 1.2.1.3-1.2.1.7. Il principio dell'aumento d'entropia viene inoltre a stabilire una relazione di prima-dopo, perché in seguito all'aumento di entropia le condizioni del sistema sono cambiate irreversibilmente. L'entropia e le modificazioni irreversibili a essa conseguenti ci portano (C.F. von Weizsäcker, 1972) al concetto di *tempo*, anch'esso essenziale per la comprensione dei sistemi viventi.

Il concetto di entropia è stato sviluppato soprattutto per la comprensione dei fenomeni che si svolgono a livello molecolare. Esso risulta spesso di applicazione difficile, soprattutto nei sistemi viventi; per questo si è tentato di sostituirlo con il suo opposto (entropia negativa o neg-entropia), che però presenta limitazioni di altro genere. Quando, secondo Boltzmann, l'entropia viene intesa come la misura del disordine molecolare, valori crescenti di entropia corrispondono a stati di sempre maggiore probabilità. In questo il concetto di entropia risulta simmetrico a quello di *ordine*, che corrisponde al contrario, cioè a uno stato di improbabilità (cfr. 1.2.1.4). Pertanto, nella continuazione del discorso si preferisce far uso del concetto di ordine, inteso come corrispondente a uno stato di bassa entropia, oppure disordine (alta entropia).

I sistemi perfettamente isolati vengono immaginati soltanto per sviluppare una teoria. Nel mondo reale risulta impossibile avere un isolamento perfetto, quindi abbiamo a che fare soltanto con sistemi che scambiano energia con l'esterno (quindi del tipo *b*) ovvero scambiano energia e materia (tipo *c*). Per ottenere una misura dell'entropia come funzione di stato del sistema, viene applicata la formula [2] proposta da Boltzmann:

p_j = probabilità dell'evento j , ovvero, del verificarsi casi del microstato j ;

K_b = costante di Boltzmann

$$S = -K_b \sum p_j \log p_j \quad [2]$$

Riportiamo qui la [2], perché essa è stata utilizzata per la misura dell'informazione (cfr. 1.2.1.7) e della biodiversità (cfr. 2.4.1.4 sgg.). La comprensione della [2] richiede alcune nozioni specializzate, per le quali si rimanda a un buon testo di chimica-fisica, ad esempio Dupré (1990, p. 154). La relazione tra entropia e ordine sarà meglio definita nel paragrafo 1.2.1.7.

1.2.1.2. Sistemi aperti

Lo studio dei sistemi aperti che danno luogo a trasformazioni irreversibili costituisce un ramo specializzato della termodinamica (Prigogine, 1971). Per quanto ci riguarda, il punto più importante è che il sistema isolato è assestato su un certo livello di entropia, e spontaneamente tende a trasformarsi in modo da raggiungere il livello di massima entropia possibile nelle date condizioni: ogni trasformazione implica dunque un aumento di entropia. Nel sistema aperto invece l'entropia può aumentare, può restare invariata oppure anche diminuire. Infatti, il sistema aperto può importare materia o energia in uno stato tale da determinare una rottura di simmetria: si viene così a costituire un gradiente per effetto del quale nel sistema si ha un abbassamento dell'entropia. Con una drastica semplificazione di linguaggio questo stato di cose si può esprimere affermando che il sistema aperto può «importare entropia negativa» oppure «importare ordine». Risulta pertanto necessario distinguere tra l'entropia interna al sistema e l'entropia che viene importata dall'esterno del sistema:

S_e = entropia della materia/energia che entra nel sistema

S_i = entropia della materia/energia interna al sistema

δS = variazioni dell'entropia

$$\delta S = \delta S_e + \delta S_i \quad [3]$$

dove

$$\delta S_e + \delta S_i \neq 0 \quad [4]$$

quindi, alla fine del processo, l'entropia del sistema può aumentare o diminuire oppure, nel caso si abbia

$$\delta S_e + \delta S_i = 0 \quad [5]$$

l'entropia del sistema al termine del processo risulta immutata.

Se è uniforme anche l'intensità dei flussi che provocano le variazioni di S_e ed S_i , si ha la condizione di *stato stazionario*, nella quale l'entropia non ha forti variazioni nel tempo: è una condizione particolarmente importante, perché in questo modo, salvo rare eccezioni, funzionano i viventi, l'ecosistema e la biosfera. In queste condizioni avremo:

$$\frac{\delta S}{\delta t} = \frac{\delta S_e}{\delta t} + \frac{\delta S_i}{\delta t} = 0 \quad [6]$$

ora, secondo la [1], per il sistema isolato abbiamo $\delta S/\delta t > 0$, e questo nel sistema aperto va riferito all'entropia interna S_i . Allora, se questa tende ad aumentare, si avrà necessariamente che

$$\frac{\delta S_e}{\delta t} \leq 0 \quad [7]$$

cioè la [6] è vera se, e soltanto se, gli scambi con l'esterno producono una diminuzione di entropia: questo significa che si ha una condizione corrispondente a quanto è stato sopra indicato come importazione di ordine o di entropia negativa. Nell'evoluzione verso uno stato stazionario l'entropia diminuisce e assume i valori più bassi possibili. L'entropia dello stato stazionario è minore di quella dello stato iniziale (Prigogine, 1971, p. 97); lo stato stazionario è, inoltre, uno stato di minima produzione di entropia per unità di tempo (Prigogine, 1971, pp. 103-04). Evidenze sperimentali ci dimostrano che l'importazione di entropia negativa è un fenomeno diffuso quando un sistema si trova in condizione di poter utilizzare una sorgente energetica, ad esempio una pianta che compie la fotosintesi.

La possibilità che in un sistema aperto si possano avere condizioni nelle quali l'entropia diminuisce porta conseguenze di grande rilievo. In un sistema percorso da un flusso energetico particolarmente intenso, la dissipazione dell'energia in uscita determina la comparsa di *strutture dissipative* (Prigogine, 1971), che aumentano l'ordine del sistema e quindi ne abbassano l'entropia. Si tratta di strutture che esistono soltanto come conseguenza del flusso energetico e scompaiono quando questo rallenta oppure cessa. Esempi ben noti sono le correnti di convezione che si formano in un recipiente che contiene acqua, quando questa viene riscaldata a temperatura prossima al punto di ebollizione. In un senso più generale, però, molte strutture essenziali per il funzionamento dei viventi, e i viventi stessi, possono considerarsi anch'esse strutture dissipative.

La possibilità di definire condizioni che permettono l'insorgenza di *strutture dissipative* ha grande significato per la comprensione dei fenomeni biologici. Infatti, come si vedrà sotto 1.2.2, i viventi funzionano in generale nel senso di un accumulo di ordine, quindi in una direzione contraria a quella preconizzabile sulla base del II principio. Diventa a questo punto essenziale capire come questo sia possibile senza violare il II principio, altrimenti si dovrebbe ipotizzare che i sistemi viventi siano soggetti a leggi differenti da quelle della termodinamica, il che riporterebbe a una concezione vitalistica, cioè sostanzialmente antiscientifica.

Come struttura intendiamo una discontinuità di un mezzo altrimenti uniforme, consistente in relazioni non casuali tra gli elementi del sistema. Una configurazione casuale, per sua stessa natura, può essere riprodotta soltanto mediante una sua descrizione integrale, cioè con una ripetizione della configurazione iniziale; una struttura, invece, essendo non casuale, può essere riprodotta sulla base di una regola di generazione della stessa. Ad esempio, se consideriamo l'insieme dei numeri interi, l'operazione $F = +1$ genera ancora un numero intero. Il numero 1 può essere scritto come $F(0)$ e il numero 2 come $FF(0)$, così il numero $N = F^n(0)$. Si dice che l'insieme dei numeri interi è chiuso sotto l'operazione $+1$. Così la serie infinita dei numeri interi può essere ottenuta dalla semplice operazione dell'aggiunta del numero 1 al numero precedente, fissando in 1 il numero di partenza. Questa struttura, benché costituita da una serie infinita di elementi, possiede una descrizione che, non solo è finita, ma è anche incomparabilmente più breve. Lo stesso ragionamento vale per le strutture

architettoniche (arco, volta, pilastro, architrave ecc.), nelle quali la disposizione degli elementi costruttivi segue regole ben precise.

Per concludere va ancora ricordato che, per effetto del II principio, l'aumento di ordine del sistema va pagato con una diminuzione in qualche altro luogo, cioè con un aumento di disordine. Può quindi venire posto un ulteriore problema: dove avviene questo aumento di disordine? L'importazione di ordine nel sistema determina necessariamente una diminuzione di ordine all'esterno di questo. Se, per semplificare il linguaggio, consideriamo ordine/disordine come qualcosa di materiale, queste trasformazioni si possono interpretare come se il sistema espellesse il disordine. L'esterno funziona da *sink*, cioè da *discarica* per il disordine gettato fuori dal sistema. Con questo ci si avvicina al concetto di ambiente, che sarà trattato nel capitolo 2.

1.2.1.3. Sistemi complessi: interpretazione al macrostato

Dato un sistema composto da più sottosistemi, può aversi una condizione nella quale due di essi, indicati come A e B , interagiscono l'uno sull'altro; questo avviene quando A subisce una modificazione e passa allo stato A_1 e per questo fatto agisce su B , che ne viene modificato in B_1 ; supponiamo ora che, per effetto di tale modifica, reciprocamente B agisca su A . Si stabilisce in tal caso tra A e B una relazione ciclica, che viene detta anello di retroazione o feedback [8] e si può esprimere in vari modi:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & & A_1 \leftarrow A & \\
 A \rightarrow B \rightarrow A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots & & & & & \downarrow & \uparrow \\
 & & & & & B \leftarrow B_1 &
 \end{array} \quad [8]$$

SISTEMI COMPLESSI vengono qui definiti come sistemi aperti caratterizzati dalla presenza di feedback.

Il feedback è conseguenza di costrizioni presenti nel sistema: infatti, un componente che agisca in maniera indeterminata, aumenta l'entropia del sistema e lo porta all'equilibrio, dopo di che tutto si ferma. Quando invece l'azione è limitata (ad esempio nel caso di una molecola che catalizza una determinata reazione) esiste la possibilità di passare ad anelli di feedback, la cui presenza conferisce al sistema nuove proprietà molto interessanti.

In determinate condizioni, potrà succedere che alla fine del ciclo lo stato del sistema risulti modificato. Consideriamo cosa avviene quando il feedback modifica la dinamica del sistema. Se gli effetti della modificazione di A e della modificazione di B hanno la stessa direzione, un incremento di A provocherà un incremento di B , che a sua volta determinerà un ulteriore incremento di A e così via a infinito; in tal caso il sistema segue un modello di crescita (sistema auto-catalitico). Oppure a un decremento di A seguirà un decremento di B che determinerà un ulteriore decremento di A e così via sino a raggiungere il punto zero (sistema auto-inibitore). Se invece la modificazione di B è di tipo contrario a quella di A , e circa della stessa intensità, si stabilisce una funzione di auto-controllo e il sistema può tendere a stabilizzarsi (stato stazionario). Un esempio è dato dal termostato che riscalda una stufetta da laboratorio: quando la temperatura aumenta, la colonnina di mercurio si dilata, riduce il passaggio del gas e, di conseguenza, la temperatura si abbassa, allora il mercurio si contrae, passa più gas, la temperatura di nuovo aumenta e così via. È una condizione molto interessante, perché i sistemi viventi hanno in generale comportamento stazionario, che viene regolato da feedback di questo tipo.

Consideriamo infine l'effetto del feedback sulla strutturazione del sistema. Se la modificazione di A consiste nell'insorgere di una struttura, che trasferisce energia su B , può avvenire che questo reciprocamente rinforzi la struttura di A , rendendola stabile e incrementandone l'efficienza. In una cellula vivente ciò potrebbe ad esempio avvenire attraverso l'azione di sostanze specificamente devolute a questo compito. Ad esempio, nelle piante le molecole di clorofilla a inserite nelle lamelle dei cloroplasti, attraverso la fotosintesi, sono in grado di legare una parte dell'energia luminosa; essa viene passata a composti che fungono da trasportatori di energia, e quindi può venire utilizzata per reazioni enzimatiche che portano, tra l'altro, anche alla sintesi di nuova clorofilla a . Dunque, più lamelle ci sono, più energia viene resa disponibile per la costruzione di nuove lamelle. In questo modo il sistema aperto è in grado di strutturarsi e, mediante la struttura, può immettere dall'esterno energia oppure stimoli che sono fonte d'informazione.

Nella realtà, la dinamica e la strutturazione non sono due processi distinti, quindi il sistema complesso si trasforma costruendo

strutture che a loro volta ne regolano la dinamica. Il processo di trasformazione è unitario, e rimane attivo sempreché esista una sorgente energetica disponibile. Quando sono possibili scambi energetici con l'esterno, il sistema si mantiene in condizione dinamica; dunque esso

- 1) risulta in grado di ciclizzarsi;
- 2) può incrementare gli scambi con l'esterno sviluppando strutture adatte;
- 3) può controllare autonomamente la propria attività.

1.2.1.4. Auto-organizzazione

Riesaminiamo gli esempi sopra ricordati: si tratta di sistemi complessi che lavorano in ciclo con ripetizioni ricorsive. Constatiamo che per il termostato ogni ciclo è perfettamente identico al precedente e al successivo. Il ciclo di retroazione non è inerente all'attività del sistema, ma è stato appositamente studiato dal progettista e non può modificarsi. Se nella dinamica qualcosa varia in maniera imprevedibile, si tratta in generale della conseguenza di meccanismi entropici, come quelli che producono usura del materiale, attriti, deposito di scorie, rotture. Vi sono invece sistemi nei quali le condizioni (1), (2) e (3), cioè ciclizzazione, strutturazione e auto-controllo, si stabiliscono senza interventi dall'esterno e in maniera largamente imprevedibile. Un sistema complesso che presenta queste caratteristiche ha funzionamento di tipo non banale che porta ad auto-organizzazione. Il termostato è, come si è visto, un sistema aperto che lavora con cicli ricorsivi, però non è auto-organizzante; invece i viventi funzionano di regola mediante processi di auto-organizzazione.

I sistemi auto-organizzanti sono sistemi complessi nei quali il processo di auto-organizzazione risulta da una somma di trasformazioni tra loro combinate. La dinamica del sistema complesso può venire rappresentata con un'equazione che può essere scritta nella forma generale

X – stato del sistema nel tempo 0, 1, ... ecc.

λ – parametro specifico per il sistema considerato

$$X_1 = F(X_0, \lambda)$$

[9]

applicazioni successive di F danno luogo all'andamento temporale secondo lo schema iterativo

$$X_n = F^n(X_0, \lambda) \quad [10]$$

dove λ è un parametro che indica l'acquisizione di materia ed energia dall'esterno. L'andamento di X nel tempo può tendere a un valore definito e permanente o punto fisso, può dar luogo a diversi valori in successione con andamenti ciclici, può dar luogo ad andamenti complessi e infine ad andamenti caotici a seconda dei valori dei parametri che regolano la dinamica del sistema.

Dobbiamo adesso trattare brevemente delle caratteristiche dei sistemi complessi auto-organizzanti in quanto tale discussione può fornire utili punti di vista per interpretare il comportamento dei sistemi ecologici ed economici trattati nei capitoli successivi.

1.2.1.5. Sistemi complessi: interpretazione al microstato

Macchine banali/non banali La macchina da scrivere è una macchina nella quale a ciascun tasto è connessa una lettera: premendo il tasto viene scritta la lettera; se la relazione è ignota (ad esempio per l'interpretazione di un documento in cifra), essa può essere scoperta mediante tentativi successivi. Si dicono macchine banali quelle strutture che hanno immissioni (input) ed emissioni (output) legate da relazioni specifiche e non alterabili. Immaginiamo ora, come esperimento mentale, di avere una struttura nella quale immissioni ed emissioni siano legate da relazioni mutevoli, i mutamenti essendo innescati dagli impulsi che la macchina riceve. La macchina non banale (macchina di Ashby) può essere considerata come una scatola nera rappresentata da strutture matematiche caratterizzate da un vettore finito di immissioni, da un vettore finito di emissioni, dalla funzione dello stato interno e dalla funzione dell'emissione (Gill, 1962). Tutte le macchine inventate dall'uomo (macchina a vapore, motore a benzina ecc.) sono macchine banali in quanto strumenti governabili; una macchina non banale potrebbe essere realizzata creando una situazione nella quale la struttura della relazione complessiva che lega i componenti è molto difficile da scoprire, anche se strettamente deterministica. Il concetto di macchina non banale riesce utile soprattutto per l'interpretazione dei viventi.

Anche nei casi più favorevoli (vale a dire nei casi in cui le immissioni, le emissioni e gli stati interni sono conosciuti) il numero degli schemi di transizione che possono essere ottenuti è enorme: un sistema con solo tre immissioni binarie, tre emissioni binarie e quattro stati interni ha 10^{48} possibili schemi di transizione, un numero più grande dell'età dell'universo calcolata in microsecondi (Laise, 1994), e ciò senza tener conto della complessità computazionale dovuta alla lunghezza della sequenza di identificazione.

Operatore Rifacendoci alla [8], e trascurando il termine B , possiamo porre l'eguaglianza:

$$\begin{array}{c} \leftarrow A \\ \downarrow \uparrow = OP \\ \rightarrow A_1 \end{array}$$

nella quale con OP si indica un operatore, ovvero una serie di trasformazioni, che porta il sistema, o almeno un oggetto A , dallo stato A_0 allo stato successivo A_1 . La differenza tra A_1 e A_0 , indicata in qualche modo, non deve superare un certo limite, ovvero quel limite per il quale A_1 e A_0 possono essere considerati come stati diversi o fasi di un sistema. Questo si può anche ottenere dalle [9] e [10] ed esprimere come:

$$A_1 = (OP) A_0 \quad \text{oppure, dopo } n \text{ trasformazioni: } A_n = (OP)^n A_0$$

In un sistema fisico-chimico questa trasformazione ha un costo energetico, e pertanto il tutto potrebbe essere formalizzato come

$$A_1 = [(OP) A_0] \cup (e_w \rightarrow e_d) \quad [11]$$

ovvero

$$\begin{array}{c} A_1 = (OP) A_0 \\ e_w \rightarrow e_d \end{array}$$

il che sta a indicare che l'operatore OP trasforma A_0 in A_1 quando una certa quantità di energia disponibile per eseguire lavoro (e_w) viene dissipata (e_d).

Quando infine si abbia un A_1 tale che $A_1 = (OP) A_1$, ci si viene a trovare nella condizione che formalmente si intende come punto fisso o equilibrio (vedi oltre).

In generale un operatore possiede autofunzioni e autovalori; quando agisce su una delle sue autofunzioni il risultato è l'autofunzione moltiplicata per l'autovalore associato; nel nostro caso $(OP) A_1 = X A_1$ ove X sono gli autovalori e A_1 è l'autofunzione; nel caso precedente $X = 1$.

Chiusura, punto fisso, attrattore In matematica si indica con *chiusura* la proprietà di un sistema di generare elementi appartenenti al sistema stesso mediante determinate operazioni. In generale in matematica sono definite strutture, gruppo, anello ecc., per le quali sono soddisfatte determinate condizioni relative alla chiusura. Ognuna di queste strutture è caratterizzata dall'invarianza di queste specifiche proprietà e relazioni che le definiscono.

Per la definizione del concetto di operatore (vedi sopra) abbiamo considerato un sistema A , sul quale, o nel quale, è definito un operatore OP , ovvero una serie di operazioni da porre in essere. Supponiamo ora che l'effetto dell'applicazione di detto operatore non sia causa di modificazione dello stato del sistema alla fine del ciclo. L'operatore, applicato su un elemento di A , dà ancora luogo a un elemento di A , quindi avremo $OP(a_1 \in A) \rightarrow (a_2 \in A)$, dove \in è il simbolo d'appartenenza. In questa condizione, lo spazio A è chiuso sotto l'applicazione dell'operatore OP . La reiterata applicazione dell'operatore su una sequenza $a_1, a_2, \dots = (OP)a_0$, e quindi anche $a_n = (OP)^n a_0$, genera una sequenza ricorsiva, che genera gli elementi di a . In questo stesso modo possono essere generati gli stati di un sistema; gli elementi di A ottenuti in sequenza si possono collocare in modo caotico, ripetersi a intervalli precisi - cicli - o, da un certo punto in poi, ripetersi senza modificazioni.

Quando si ha un A' tale che $OP(A') = A'$ per cui anche $OP^n(A') = A'$ il sistema non subisce ulteriori modificazioni; A' è detto un *punto fisso*. Partendo da uno stato A_0 , la serie A_0, A_1, \dots, A_n rappresenta l'andamento, o autogenesi, del sistema nel tempo e quando si passa alla condizione in cui $A_0 = A_1 = A_n = A'$ il sistema rimane immobile, senza trasformarsi ulteriormente, cioè il sistema ha raggiunto il punto fisso. Il punto d'equilibrio, che come si è visto è la condizione finale stabile di un sistema isolato, è di regola un punto fisso rispetto alla trasformazione rappresentata dall'applicazione ripetuta dell'operatore OP .

Attrattori ed equilibrio Si dicono *attrattori* del sistema quegli stati verso i quali il sistema si dirige partendo da date posizioni iniziali; come *bacino di attrazione* viene indicato l'insieme degli stati iniziali dai quali un sistema si dirige verso un dato attrattore.

Un sistema lasciato a se stesso può andare verso una condizione di equilibrio, ovvero una condizione nella quale il sistema non subisce più alcuna modificazione, e questo in genere è il caso dei sistemi termodinamici, dove l'equilibrio termodinamico è definito come quello nel quale l'entropia è massima. In questo caso, lo stato che caratterizza l'equilibrio è un attrattore il cui bacino di attrazione è globale in quanto qualsiasi stato iniziale del sistema va verso la stessa configurazione d'equilibrio.

Tuttavia, ricordando l'equazione $X_t = f(X_0, t, \lambda)$, se si determina λ a un valore dato, allora si possono avere più stati stazionari, ovvero stati del sistema che non mutano nel tempo fintanto che il parametro λ resta inalterato, e verso i quali il sistema si dirige partendo da diversi stati iniziali. In questo caso, questi stati stazionari sono anche essi attrattori e hanno di solito un bacino di attrazione limitato a un sottoinsieme dei possibili stati iniziali del sistema. Si tratta, quindi, di attrattori locali e, conseguentemente, di stabilità locale.

In situazioni lontane dall'equilibrio vi possono essere molti stati stazionari e molti attrattori e il sistema può anche trovarsi in una fase in cui gli attrattori hanno dimensione frattale; in questi casi il sistema esibisce, come si vedrà, andamenti caotici per cui tali attrattori sono chiamati anche attrattori caotici. Essi possono coesistere assieme ad attrattori normali in relazione agli stessi valori dei parametri λ .

Biforcazioni Abbiamo finora considerato situazioni nelle quali il sistema tende verso un attrattore, che può essere normale oppure caotico. Esiste però anche la possibilità di una molteplicità di attrattori. In questo caso si apre per il sistema la possibilità di comportamenti differenziati, in dipendenza del fatto che la traiettoria del sistema approssimi l'uno o l'altro attrattore. Può dunque succedere che un sistema che si trova in una situazione di stabilità, con il variare delle condizioni esterne, possa trovarsi nella condizione di avere una *biforcazione*, ovvero un valore di λ al qua-

le insorgono nuovi attrattori per cui il sistema può dirigersi verso nuovi e diversi stati stazionari.

Il termine «biforcazione» fa immaginare una condizione nella quale il sistema si sdoppia in due metà tra loro indipendenti, ma non è così. Un esempio più vicino al mondo reale può essere rappresentato da un recipiente che contiene un liquido ed è inserito in un gradiente energetico (ad esempio una pentola piena d'acqua sul fuoco): sul fondo l'acqua si scalda e forma una corrente ascendente alla quale corrisponde una corrente discendente di acqua fredda, stabilendo così un regolare anello di convezione; aumentando l'intensità del flusso termico, il gradiente diviene più ripido, la velocità delle trasformazioni aumenta e si stabiliscono altri anelli di convezione che interferiscono con il primo; la biforcazione del sistema consiste nella complicazione della dinamica interna dello stesso e relativa alla direzione, destrorsa o sinistrorsa, di rotazione dei moti convettivi.

Il concetto di biforcazione può esser chiarito mediante la figura 1.1. Iniziamo con il considerare la presenza di più stati stazionari. Supponiamo di avere una valle a forma di scodella e un peso G da portare all'altezza h ; per far ciò si deve impiegare una forza proporzionale al peso per cui possiamo dire di avere applicato il lavoro F per la distanza q , $F(q)$; (dove $q = h$). Per ogni data altezza la collina presenterà una pendenza che farà scivolare il grave verso il basso, con ciò riducendo l'energia potenziale, pari alla forza necessaria per portare il grave all'altezza h , connessa a ogni data altezza o distanza da terra. La variazione dell'energia potenziale (E) sarà quindi $-(dE/dq) = F(q)$; tale variazione si arresterà quando il grave avrà raggiunto il fondo della scodella al punto nel quale E assume il suo valore minimo e $F(q) = 0$. Se la valle ha la forma di una scodella, anche la funzione $E(q)$, il potenziale di $F(q)$ in termini matematici, ha l'aspetto di una scodella, ovvero assume una forma del tipo $E = -q^2 (a + bq^2)$ con $a > 0$; di conseguenza $E = 0$ per $h = q = 0$, come nella figura 1.1(a). Tuttavia se a è minore di zero allora la E non si presenta più come una scodella, ma come due scodelle attaccate per un bordo, l'attaccatura essendo per $q = 0$. Si ha cioè la figura 1.1(b). In questo caso $E = 0$ per tre valori di q , $q(1)$, $q(2)$ e $q(3)$ in cui $q(2) = 0$; $q(2)$ è un valore instabile mentre gli altri due sono stabili. Ciò significa che una pallina posta in cor-

rispondenza di $q(2)$ resta immobile, ma appena spostata va verso uno degli altri punti di equilibrio, ovvero si colloca all'altezza $q(1)$ o $q(3)$. In linea di principio, non si può dire verso quale punto essa potrà cadere senza conoscere con esattezza assoluta lo stato del sistema: ma l'esattezza assoluta è una condizione che è impossibile raggiungere, per cui l'andamento di un sistema in una specifica condizione del genere rimane imprevedibile.

Se consideriamo i valori stazionari di q , $q(e)$, ovvero quelli che non mutano più, in relazione ai diversi valori del parametro a , possiamo tracciare la figura 1.1(c). Come si vede, per $a > 0$ si ha un solo valore di equilibrio, mentre per $a < 0$ si hanno tre punti stazionari: due stabili sono $y(1)$ e $y(3)$, mentre lo stato $y(2)$ è instabile; per $a = 0$ insorge la biforcazione che permane per $a < 0$.

Se immaginiamo a come una variabile in qualche modo connessa con l'esterno dello specifico sistema in esame, allora possiamo dire che variando a si possono avere biforcazioni, ovvero modifiche sostanziali nel comportamento del sistema. I punti di stazio-

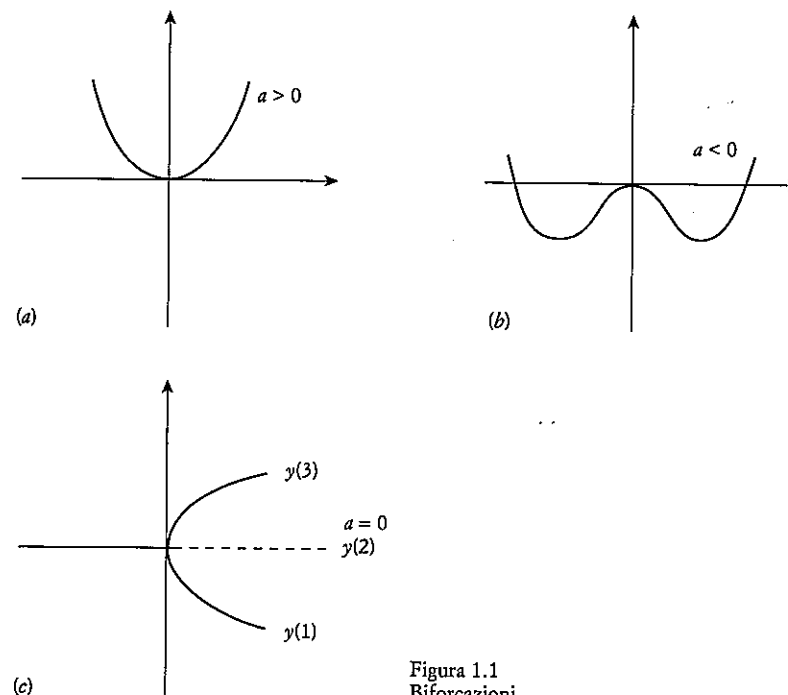


Figura 1.1
Biforcazioni.

narietà fungono da attrattori per il sistema. Esso viene così ad avere la possibilità di tendere verso attrattori diversi. Se i possibili punti di equilibrio sono 2, si ha una biforcazione; però le biforcazioni possono ripetersi.

Caos Ritorniamo a quanto indicato in 1.2.1.2: una struttura può venire riprodotta quando se ne conosca la regola generatrice; invece, quando un sistema ha una configurazione casuale, è necessaria una descrizione integrale dello stesso. La descrizione di un sistema strutturato è dunque più breve di una descrizione dettagliata di tutte le sue componenti, mentre indichiamo come sistema caotico quello per il quale una descrizione abbreviata è impossibile.

CAOS è l'evoluzione di un sistema, la cui più breve descrizione algoritmica coincide con la descrizione della evoluzione stessa. Ciò significa che l'andamento del sistema non è prevedibile sulla base della legge che lo governa e lo definisce.

Al caos viene comunemente dato un significato ben diverso: i rifiuti accumulati in un magazzino, il traffico in un centro urbano congestionato, l'aspetto di una città dopo un disastro naturale; si tratta sempre di situazioni che suscitano una reazione negativa. La nostra definizione ha un senso molto più ampio, così da includere tutte le condizioni di cui non è possibile dare una descrizione abbreviata; il giudizio di valore diviene così irrilevante. Anche la ramificazione di un albero, che può essere percepita come elegante ed esteticamente pregevole, può essere non riproducibile con una regola abbreviata e pertanto risultare una condizione caotica.

La descrizione abbreviata di un sistema caotico è impossibile perché si hanno comportamenti macroscopici imprevedibili, dipendenti dalle possibili biforcazioni del sistema; tali comportamenti, tuttavia, possono anche assumere forme regolari e ripetitive (caos modulato o *patterned chaos*), ad esempio nella formazione della nuvolosità oppure nel moto delle onde; non si tratta di fenomeni simili al disordine molecolare di un gas, come si potrebbe pensare dal normale significato di questa parola. Nella fase di caos il comportamento del sistema, pur essendo deterministico, diviene imprevedibile. Ad esempio, le onde del mare sono indubbiamente un fenomeno deterministico,

in quanto causato da forze misurabili; tuttavia è impossibile prevedere con esattezza le dimensioni e il momento d'arrivo della singola onda; soltanto la periodicità dei gruppi di onde può essere prevista con una certa approssimazione.

I sistemi caotici sono sistemi di equazioni differenziali, $x = f(t, x_0)$, nei quali le variabili di stato, x , dipendono dalle condizioni iniziali, x_0 , in tal modo che la differenza tra il valore di $f(t, x_0)$ e $x = f(t, x_1)$, dove x_0 e x_1 sono due condizioni iniziali differenti, cresce in modo estremamente rapido al crescere di t (Devaney, 1989). Per poter predire l'evoluzione nel tempo di un tale sistema, le condizioni iniziali debbono essere conosciute con infinita precisione, il che risulta evidentemente impossibile. L'ammontare di informazione sulle condizioni iniziali cresce molto rapidamente con l'ampiezza temporale sulla quale il comportamento del sistema va analizzato, per cui risulta computazionalmente impossibile allargare la finestra di osservazione oltre certi limiti; dopo che un certo lasso di tempo è trascorso, il valore delle variabili effettive può largamente differire da quelle calcolate, per cui qualsiasi previsione basata sul calcolo, anche con l'aiuto del più potente computer, si presenta distorta ed inaffidabile.

In conclusione, il sistema caotico è un sistema che presenta un comportamento di carattere casuale, come avviene tipicamente in corrispondenza a un attrattore strano. Il comportamento del sistema caotico ha carattere deterministico, però non è prevedibile, in quanto strettamente dipendente dalle condizioni iniziali. Per ottenerne la prevedibilità sarebbe necessaria una conoscenza perfetta delle condizioni iniziali, il che è praticamente impossibile.

1.2.1.6. Ritorno al macrostato: dinamica dei sistemi complessi

Un sistema si modifica quando passa da uno stato a un altro. Ciascuno stato corrisponde ai valori di determinate variabili. La descrizione del sistema può essere a livello macroscopico, ovvero a livello di variabili intensive, come temperatura, pressione, oppure a livello microscopico e cioè relativamente a ogni singolo componente del sistema come le molecole che compongono un gas. Ad esempio, i valori di tre variabili che definiscono uno stato del sistema possono venire riportati su coordinate, così da individuare

un punto, che rappresenta lo stato del sistema per quelle variabili ed in un dato tempo o fase; se i valori cambiano, verrà individuato un altro punto. Lo spazio che contiene i punti corrispondenti agli stati del sistema viene detto *spazio delle fasi*. Le variazioni degli stati del sistema definiscono dunque una successione di punti nello spazio delle fasi, e questi descrivono una linea che può venire interpretata come la traiettoria del sistema. La traiettoria può, dunque, venire descritta come una linea nello spazio delle fasi, che regola la dinamica a lungo termine del sistema.

Quando in un sistema l'energia totale è costante, come ad esempio in un sistema isolato, la traiettoria viene determinata dal II principio della termodinamica: il sistema passa attraverso una successione di fasi transitorie e alla fine raggiunge lo stato di equilibrio, che corrisponde a un punto ben definito nello spazio delle fasi. Il punto di equilibrio costituisce dunque l'attrattore del sistema isolato. Può succedere che l'attrattore rimanga invariato anche quando le condizioni iniziali sono caso per caso differenti e allora l'attrattore può essere considerato un punto fisso, verso il quale convergono tutte le possibili traiettorie. Raggiunto il punto di equilibrio, il sistema non può ulteriormente modificarsi.

Nei sistemi aperti la situazione è profondamente diversa, in quanto gli scambi di energia con l'esterno impediscono che il sistema raggiunga lo stato di equilibrio. Nei sistemi che si mantengono lontani dall'equilibrio si hanno attrattori del tutto differenti da quello di un sistema isolato, ed essi permettono al sistema di mantenersi in condizione dinamica. In questo caso, la successione di fasi transitorie non punta direttamente verso l'attrattore, ma si avvicina a questo con oscillazioni smorzate, e qui si hanno diverse possibilità: ad esempio, il sistema può seguire una traiettoria a spirale che si conclude raggiungendo il punto d'equilibrio, oppure il sistema assume un comportamento ciclico, così da ruotare con orbite più o meno irregolari attorno all'attrattore descrivendo un anello che si ripete continuamente con deboli variazioni. In determinati casi, e sempre in presenza di attrattori caotici, la traiettoria e le tracce del sistema non sono individuabili.

Da qui derivano conseguenze importanti, che hanno portato Joergensen (in Ulgiati, 1998) a formulare il cosiddetto IV principio della termodinamica: «un sistema che riceve un flusso d'energia utilizza que-

sto flusso per spostarsi lontano dall'equilibrio termodinamico. Se questo può venire effettuato attraverso più traiettorie, quella che trattiene una quota maggiore dell'energia, cioè che porta alla struttura maggiormente ordinata, avrà la massima probabilità di venire scelta».¹

Supponiamo che A_0 e A_1 siano stati del sistema tra loro estremamente vicini: in sistemi di questo genere gli ordinamenti generati da A_0 , ovvero $A_0^n = (OP)^n A_0^0$ sono molto differenti da quelli generati da $A_1^n = (OP)^n A_1^0$; anche per n non molto elevato le differenze possono essere notevolissime. L'operatore in questo caso funziona da amplificatore e la differenza iniziale, che poteva essere considerata trascurabile, può venire dilatata, così da presentare dinamiche del sistema completamente diverse per A_0 e A_1 .

Questa condizione viene indicata come *Butterfly effect*: «Se una farfalla batte le ali in Brasile, si stabilisce una discontinuità che può venire interpretata come rottura di simmetria, e come conseguenza può succedere che il movimento dell'aria venga tanto amplificato da provocare un tornado nel Texas» (Lorenz, 1979).

Tutto ciò è rigorosamente studiato per i sistemi caotici generati da sistemi di equazioni differenziali o mappe multidirezionali. Poiché l'esatto stato iniziale del sistema non è conoscibile – per mancanza di informazioni, enorme numero delle variabili, impossibilità di misurazioni sufficientemente precise (complessità computazionale) – non è neppure possibile conoscere l'andamento futuro del sistema. Non è infatti possibile distinguere tra A_0 e A_1 (per l'osservatore si presentano come microstati equivalenti) mentre gli andamenti da loro generati divergono tanto da essere rapidamente considerati dall'osservatore come non equivalenti, ovvero generanti macrostati differenti. Quando il sistema mostra andamento caotico, diviene intrinsecamente imprevedibile.

Nel caso di comportamenti caotici, si può affermare che in un qualsiasi intorno piccolo a piacere di un dato stato del sistema, esiste un altro stato del sistema dal quale parte un andamento divergente, ovvero la comparsa di strutture e la canalizzazione delle trasformazioni del sistema vengono percepiti come *fenomeni emergenti*, cioè come elementi di ordine del sistema che emergono spontaneamente dal disordine; a differenza delle strutture dissipative, queste sono strutture che in determinate condizioni possono divenire stabili e mantenersi, regolando la dinamica del sistema.

1.2.1.7. Ordine alla soglia del caos

Una teoria generale che permetta di interpretare la dinamica dei sistemi complessi auto-organizzanti ancora manca, anche se molti ricercatori hanno iniziato lo studio di una simile teoria generale, in particolare Per Bak (1996), John Holland (1995), Stuart Kauffman (1993, 1995), Harold Morowitz (1986, 1992), Ilya Prigogine (1980), e sulla base di essa sono state avanzate interessanti ipotesi sulla nascita e l'organizzazione della vita (ad esempio Smolin, 1997). Sulla base di quanto illustrato nella sezione 1.2.1.5, è, tuttavia, possibile riconoscere gli elementi più importanti. Il sistema viene attraversato da un flusso energetico, e si modifica di conseguenza formando strutture; in linea generale, la trasformazione del sistema lo mantiene lontano dall'equilibrio e pertanto si può interpretare come un aumento di ordine/informazione.

Per indicare il sistema auto-organizzante usiamo la notazione Ω ; esso non può venire interpretato mediante una formula algebrica, a causa della sua intrinseca complessità. Ci si deve quindi limitare ad analizzare la condizione di stato del sistema, che varia per effetto di operatori \uparrow identificabili con alcuni parametri che indichiamo come κ , λ , μ . Per indicare quale di questi operatori sia prevalente nel determinare l'attività del sistema si userà la bandierina \uparrow e, al contrario, per le funzioni che incidono scarsamente, la \downarrow . Così con linguaggio simbolico:

$$\Omega < a | \kappa \uparrow, \lambda, \mu | > b \quad [12]$$

il che significa che il sistema Ω , sistema complesso auto-organizzante, passa dallo stato a allo stato b per effetto dell'azione di tre operatori, dei quali κ è trainante; per effetto della sua attività la traiettoria del sistema tende verso un attrattore situato in una zona nella quale si ha alta diversità. Dunque, alla fine del processo si avrà che la diversità in b è maggiore che in a .

Il parametro κ esprime la diversità interna del sistema: infatti questo è sempre composto da sottosistemi che possono essere in numero più o meno elevato; inoltre tra i vari sottosistemi si può avere una situazione di equilibrio oppure può avvenire che uno oppure alcuni siano quantitativamente o funzionalmente prevalenti rispetto ad altri, oppure che il campo di possibilità rispetto ad un quadro esterno di riferimento sia completo o parziale ecc. Questi

problemi in generale si possono trattare mediante l'uso della formula di Shannon-Weaver (che riproduce la formula di Boltzmann [2] per l'entropia). Essi divengono particolarmente importanti quando nel sistema vi è un componente vivente, ed in tal caso ci si può riferire al concetto di biodiversità (2.4.1.4). Mediante κ è possibile rappresentare una misura della strutturazione del sistema.

Il parametro λ può essere interpretato come il vincolo che mantiene il sistema lontano dall'equilibrio; esso in generale è costituito dal *flusso energetico* che agisce nel senso di ordinare il sistema. Questo è il fattore che sta a monte di strutture dissipative, come i moti convettivi che si producono in un liquido riscaldato da una fonte energetica ad alta temperatura, i fenomeni meteorologici, i processi metabolici nei viventi. In molte applicazioni, sia di tipo matematico sia in relazione a sistemi fisici oppure a sistemi posti sul calcolatore per simulare la vita (*artificial life*), come ad esempio gli automi cellulari, si nota che il comportamento del sistema, rispetto al parametro λ , è rappresentabile dai diagrammi della figura 1.2.

Viene infine utilizzato un parametro μ , che sta a indicare la presenza di *costrizioni* per l'attività del sistema che risultano particolarmente sensibili e pertanto tali da condizionarne la dinamica. In linea generale, le costrizioni forti frenano lo sviluppo del sistema e lo mantengono a un livello elementare. Invece, costrizioni deboli possono generare fenomeni che presentano una formazione di ordine, ad esempio i fenomeni di turbolenza nel flusso di un liquido.

Il sistema si trasforma (fig. 1.2) mediante una dinamica com-

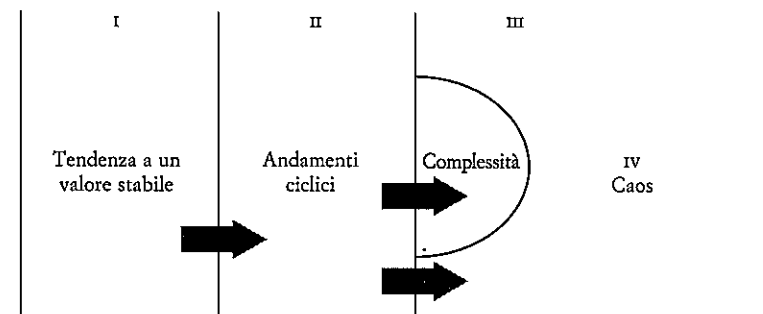


Figura 1.2
Dinamica dei sistemi complessi. Il sistema tende a passare dalla stabilità (i) a una prima fase di andamenti ciclici (ii), alla quale può seguire direttamente la transizione al caos (iv), nella fase alla soglia del caos si può avere (iii) l'emersione di strutture complesse.

plexa: qui possono comparire cicli ricorsivi, attrattori, geometrie frattali, biforcazioni, attrattori strani e transizione al caos. La trasformazione avviene in maniera deterministica, però le sue fasi sono strettamente vincolate dalle condizioni iniziali. Sarebbe possibile rendere prevedibili le trasformazioni del sistema soltanto quando le condizioni iniziali fossero perfettamente determinate, il che evidentemente non è dato, a causa della relazione di indeterminazione. Dunque il sistema, benché deterministico, risulta largamente imprevedibile oppure si ha una certa prevedibilità soltanto a livello statistico, ed è quella che si cercherà di sviluppare in questa trattazione.

Incrementando λ , il sistema passa da un andamento che tende verso una condizione di equilibrio, ad andamenti ciclici, a comportamenti complessi e poi esibisce andamenti caotici. La complessità nasce quindi in prossimità del caos, ma, inoltre, il sistema può passare direttamente da comportamenti ciclici a comportamenti caotici, come indicato dalla freccia inferiore, senza passare per comportamenti complessi. In altre parole un sistema per dar luogo a complessità richiede un adeguato flusso di energia (all'interno di un dato intervallo) che lo mantenga lontano dall'equilibrio; se l'energia è insufficiente o sovrabbondante si avranno andamenti prevedibili e non complessi oppure andamenti caotici.

Va anche osservato che negli stati I e IV i dati attendibili non consentono l'acquisizione di informazione in quanto in I sono tutti eguali e in IV sono distribuiti casualmente; in III si ottengono dati dai quali si può ricavare un massimo di informazione. Questo è un punto essenziale: si tratta di quelli che Kauffman (1993) ha indicato come fenomeni emergenti, cioè fenomeni dai quali l'emergere di ordine nel sistema appare evidente. Si tratta in generale (ma non sempre) di strutture del sistema, ed è qui che la divergenza tra i sistemi isolati e i sistemi complessi appare più evidente. I sistemi isolati sono sottoposti alla legge dell'aumento di entropia, mentre nei sistemi complessi si osserva un comportamento apparentemente contrario. È quanto ha portato Schrödinger (1945) ad affermare che «i viventi si nutrono di neg-entropia», qui è l'origine del concetto di teleonomia di Bertalanffy (1968), a questo si riferisce l'apofisma di Monod su «caso e necessità».

Entropia, informazione, ordine

Ogni struttura, quale che sia la sua natura, spaziale, temporale o relazionale, può dar luogo a segnali da cui un percipiente può ricavare *informazione* nella misura in cui tale struttura non coincide con una configurazione puramente casuale. Lo studio di questi problemi è stato formalizzato come teoria dell'informazione (Wiener, 1961), che presenta un interessante isomorfismo rispetto alla termodinamica.

INFORMAZIONE La possibilità per un osservatore di ottenere informazioni dall'oggetto.

È opportuno a questo punto meglio definire i tre concetti tra loro interconnessi: entropia, informazione e ordine. Grosso modo possiamo dire che una situazione ordinata consente informazione e dà luogo a bassi valori di entropia. Una riduzione di ordine invece implica una minore capacità di offrire informazioni e un incremento di entropia nell'oggetto in esame. Il problema consiste nel quantificare questo fenomeno. In premessa, tuttavia, si deve chiarire che si cerca una misura dell'informazione sulla struttura dell'oggetto in esame, ad esempio una riga scritta, per sapere se questo oggetto ha una struttura tale da poter rappresentare un messaggio, ovvero poter fornire un significato, un'informazione a un percipiente. Ad esempio, una frase scritta in italiano si presenta come una frase che possiede un ammontare di informazione nel senso che ha una struttura riconoscibile; tuttavia essa non ha significato, non dà informazione, per chi non conosce l'italiano.

Con ammontare di informazione si intende la capacità di consentire l'acquisizione di informazione a seguito dell'esistenza di una qualche struttura riconoscibile e non il fatto che effettivamente esista un soggetto che veda in detta struttura una specifica e definita informazione. È questo, quindi, uno specifico punto di vista da cui si pone l'osservatore dell'oggetto: quale metodo è possibile usare per riconoscere nell'oggetto in esame l'esistenza di strutture tali che un percipiente possa, tramite queste, acquisire delle informazioni?

Esaminiamo rapidamente questo problema. Supponiamo di avere una stringa sulla quale sono impressi solo due simboli, 0 e 1; la stringa è quindi scritta in sistema binario. Una stringa con n elementi può essere, in questo caso, scritta in $R = 2^n$ modi diversi; una stringa di due elementi può quindi essere scritta in quattro modi diversi: (0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1). L'ammontare di informazione può essere definito come:

$$H = -\ln_2 R = -\ln_2 2^n = -n \quad [13]$$

ovvero

$$H = -k \ln R; \text{ dove } k = \frac{1}{\ln 2} \quad [13\text{bis}]$$

È importante notare come, definita così, l'informazione è minima ($-n$) quando nulla si sa della scrittura della stringa per cui la quantità d'informazione risulta eguale a meno il numero di tutte le possibili scritture. Nel caso

descritto si ha $H = -2$, se invece risultano possibili solo due scritte, invece delle quattro, allora $H = -1$ con un guadagno di informazione pari a 1. Nel caso di una sola scrittura, perfetta certezza, allora $H = 0$.

Supponiamo adesso di scrivere il messaggio (x, y) in cui 0 è presente una volta e 1 anche una volta; indicando con N' e N'' il numero di volte in cui 0 e 1 sono presenti si ha $N' = 1$ e $N'' = 1$ per cui, ponendo $N' + N'' = N$ si ha $1 + 1 = 2$. Un messaggio di due termini in cui 0 e 1 siano presenti una volta può essere scritto solo in due modi possibili (1,0) e (0,1), $R = 2$. Con generici valori di N' ed N'' si applica il calcolo combinatorio e si ha $R = N!/(N'! N''!)$. Ponendo

$$p_1 = \frac{N_1}{N}$$

si può scrivere:

$$H = -k \ln R = -k \sum p_i \ln p_i \text{ dove le } p_i \text{ rappresentano frequenze relative.} \quad [14]$$

Una stringa casuale presenta tutte le $p(i)$ eguali, mentre una stringa scritta in italiano dovrebbe in qualche modo riflettere le frequenze specifiche in cui le diverse lettere si presentano in questa lingua. Ad esempio, se immaginiamo una stringa lunga 50 elementi usando le 24 lettere dell'alfabeto più un segno per il distacco tra le parole, una stringa del tutto casuale implica che ciascun simbolo è presente due volte per cui $p(i) = 1/25$; se, invece, la stringa è scritta in italiano, le $p(i)$ saranno diverse le une dalle altre e rifletteranno la specifica presenza di ciascuna lettera nonché la lunghezza media delle parole italiane. In generale, il valore di H è tanto minore, da un punto di vista algebrico, quanto maggiormente la composizione della stringa si avvicina ad una struttura del tutto casuale. Ovviamente alla base di questa definizione vi è il punto di vista della statistica e la definizione di evento casuale. In tale ottica possiamo parlare di ordine in relazione all'ammontare di informazione presente, quanto maggiore il valore assunto da questa quantità tanto maggiore sarà l'ordine presente. In quel che segue sarà preferibile parlare di ordine lasciando alla parola informazione il sinonimo di significato attribuito a un messaggio.

La stessa formula per la misura dell'ammontare di informazione è quella che, come si è visto (1.2.1.1), viene usata per misurare l'entropia S :

$$S = -K_B \sum p_i \ln p_i \text{ dove } K_B \text{ è la costante di Boltzmann.} \quad [2]$$

Un modo per chiarire ulteriormente il significato della formula di Boltzmann può essere il seguente.

Consideriamo due scatole con dentro un numero di palline pari a m per una scatola ed n per l'altra; $m + n = N$. Supponiamo che le palline abbiano un numero da 1 a N e che tale numero sia chiamato a caso e che quando sia chiamata la pallina corrispondente al numero sia spostata dalla scatola in cui si trova all'altra. Si può osservare che se una scatola è vuota l'incremento di una pallina in quella scatola è del tutto certo, così tanto minore è il numero delle palline in una scatola tanto maggiore la probabilità che in quella scatola venga aggiunta e non tolta una pallina. Dopo un certo tempo si può pensare che le palline saranno in numero più o meno pari a $N/2$ in ciascuna scatola e tenderanno ad oscillare intorno a quel numero, salvo rari spostamenti significativi.

A questo punto la domanda è: con un numero di spostamenti che tende all'infinito qual è la probabilità che in una scatola vi sia proprio un numero di palline pari a m ? tale probabilità è data da $P(m) = kN! / m!n!$, dove $k = 2^{-n}$, essendo k un coefficiente di normalizzazione. Se $m = (N/2)$ allora la probabilità è massima, mentre tanto più m si allontana da $N/2$ tanto più la probabilità diminuisce. Ad esempio per $N = 6$ e $m = 1$ si ha $P(1) = 0,08$ mentre per $m = 3$ si ha $P(3) = 0,26$.

Analogamente, la formula di Boltzmann per l'entropia può essere interpretata come la misura della probabilità, dopo un tempo che tende all'infinito, di una configurazione caratterizzata dal numero di particelle nello stato A; e il rimanente numero nello stato B. Supponiamo infatti di mettere dello zucchero nel caffè: qual è la probabilità che tutte le molecole di zucchero meno una si trovino in una metà della tazza? e qual è la probabilità che esse si distribuiscano in modo uniforme, ovvero vi sia lo stesso numero di molecole in ambedue le metà della tazza? Si vede subito che in tal modo si possono distinguere configurazioni con elevata probabilità e configurazioni con bassa probabilità.

Come si vede, i concetti di informazione, entropia e struttura di una serie su una stringa fanno tutti capo allo stesso paradigma interpretativo connesso alla misura della probabilità di un dato evento, ovvero di una data configurazione o stato; ciò consente di collegare strettamente la diminuzione di entropia con un aumento dell'ammontare di informazione ed un aumento di ordine. Diremo, quindi, che in un sistema una diminuzione di entropia è collegata ad un aumento di ordine ed a un aumento nella quantità di informazione, ovvero della possibilità di un osservatore di ottenere dall'oggetto informazioni. Quando l'entropia è massima, si ha massimo disordine e nessuna possibilità di acquisire informazioni.

1.2.1.8. Problemi di linguaggio

I sistemi aperti, secondo la descrizione data in 1.2.1.6-1.2.1.7, rappresentano uno strumento essenziale per la comprensione degli avvenimenti nel mondo. Infatti, le modificazioni di qualunque genere, quando vengano interpretate nel contesto del sistema isolato, sono soggette (II principio) alla legge dell'aumento di entropia, che annulla ogni possibilità di modificazione ulteriore oltre il punto di equilibrio. Un mondo così regolato è destinato alla «morte entropica» e questo viene da alcuni autori (Georgescu-Roegen, Rifkin) applicato al sistema economico (cfr. 5.2). Però, come si è visto, questa è un'astrazione lontana dalla realtà, perché nella vita reale non accade mai di aver a che fare con sistemi isolati. Il sistema complesso, invece, si caratterizza per la comparsa e stabilizzazione di strutture emergenti e questo permette di mantenere il sistema lontano dall'equilibrio (livello di bassa entropia), in condizioni dinamiche che portano a un aumento di ordine.

Per questi sistemi complessi sono state proposte differenti denominazioni: *Autopoiesi* (Maturana e Varela, 1987), *Complex Adaptive Systems* (Gell-Mann, 1994). Preferiamo tuttavia mantenere la denominazione di sistemi auto-organizzanti (Ashby, 1962; Kauffman, 1993) in quanto essa è maggiormente comprensiva ed appare di più generale applicabilità.

La complessità degli strumenti matematici necessari all'interpretazione dei sistemi auto-organizzanti tuttavia pone problemi di difficile soluzione per la modellizzazione di questi sistemi. Infatti la matematica di cui attualmente disponiamo si adatta alla trattazione dei processi lineari; tuttavia, già il problema di un sistema gravitazionale costituito da tre corpi è privo di soluzione, benché le relazioni dell'uno con l'altro siano regolate da ben note equazioni lineari. I sistemi auto-organizzanti si caratterizzano per esser fondati su processi non-lineari. Una matematica in grado di descrivere fenomeni del tipo di quello esemplificato alla figura 1.2 non esiste, almeno per il momento non è conosciuta. Quando non si è in grado di trovare una formula, bisogna limitarsi ad approssimazioni oppure ricorrere a descrizioni qualitative (Stewart, 1995). Questa esigenza ha portato allo sviluppo di diagrammi di flusso, come nuove forme di espressione adeguate alla descrizione dei sistemi.

Nonostante si abbia una teoria generale dei sistemi da alcuni decenni, questo problema del linguaggio non è stato finora considerato come rilevante: così si è insistito nel tentativo di applicare il linguaggio matematico, il che da un lato ha portato a un eccessivo tecnicismo, e dall'altro ha costituito un limite obbiettivo alle possibilità di espressione. I tentativi di modellizzare attraverso simboli sono rimasti per lo più nel campo di esperienze singole, ad esempio nei lavori del Club di Roma oppure nel recente volume curato da Ulgiati (1998). In questo libro si farà uso di diagrammi di flusso con i simboli utilizzati da Odum H. T. (1959) e di qualche altro simbolo che vien qui proposto per esigenze che non erano presenti nel lavoro sopra indicato (cfr. fig. 1.3). I diagrammi di flusso sono ideati allo scopo di mostrare le connessioni tra i principali fattori che provocano le trasformazioni del sistema.

Nella fig. 1.4 viene proposto un semplice modello di sistema complesso: l'energia fluisce da una sorgente e in gran parte viene

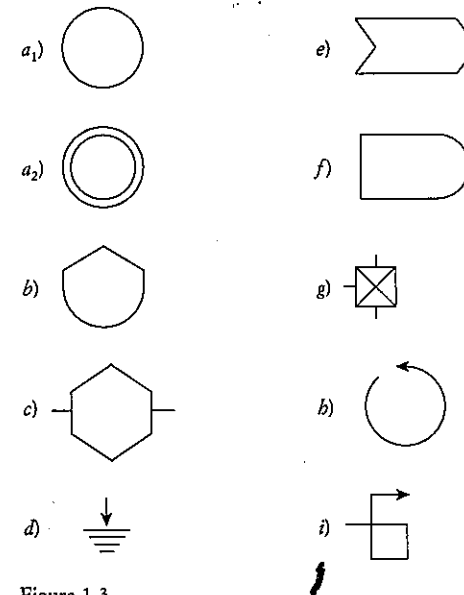


Figura 1.3

Simboli utilizzati per i diagrammi di flusso: *a*₁) sorgente energetica; *a*₂) sorgente energetica solare; *b*) comparto attivo; *c*) comparto statico; *d*) sink; *e*) processo attivo; *f*) fotosintesi; *g*) switch; *h*) ciclo ricorsivo; *i*) bootstrapping.

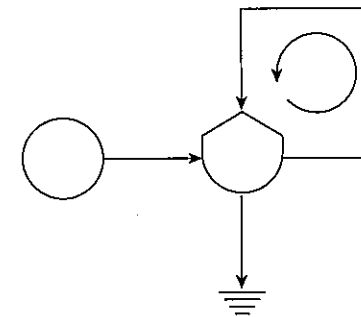


Figura 1.4

Modello di sistema complesso: un flusso energetico scorre dalla sorgente al sink provocando trasformazioni cicliche di carattere ricorsivo.

dissipata; quanto resta rimane nel sistema che subisce una trasformazione ciclica con ulteriore dissipazione; se nuova energia viene erogata dalla sorgente, il ciclo può ripetersi e il processo diviene ricorsivo.

1.2.1.9. *La termodinamica dei sistemi lontani dall'equilibrio come paradigma*

I sistemi rilevanti per la nostra analisi sono quelli la cui dinamica viene interpretata sulla base del concetto di entropia (1.2.1.1): essa aumenta continuamente fino al raggiungimento del punto d'equilibrio, e da questo si può inferire la capacità dell'energia di produrre lavoro. Infatti, qualsiasi trasformazione nella quale sia coinvolta una quantità di energia e implica una riduzione della capacità di utilizzo di questa energia, pur rimanendo la quantità totale di energia inalterata. Ricordiamo che il II principio della termodinamica (1.2.1.1) implica che un sistema isolato, o comunque al quale non viene fornita energia dall'esterno in modo da compensare l'aumento dell'entropia interna, si evolve necessariamente verso l'equilibrio, una condizione nella quale S è massima e nessuna trasformazione ulteriore è possibile in quanto non vi è più energia capace di compiere lavoro, ovvero di dar luogo a trasformazioni.

Per i sistemi aperti, invece, come indicato dalle (3) e (4), l'entropia interna aumenta sempre, mentre l'entropia complessiva può anche diminuire a causa della immissione di energia a bassa entropia proveniente dall'esterno. Tuttavia, nessun sistema è in grado di evitare dispersione di calore; nella realtà, quindi, i sistemi termodinamici sono sempre sistemi aperti che scambiano energia ed eventualmente materia con l'ambiente; essi vengono indicati come *sistemi dissipativi*. Il sistema che è in grado di acquisire energia dall'esterno può evitare di cadere nella condizione di equilibrio termodinamico, così da mantenersi in stato stazionario. L'energia acquisita dall'esterno deve risultare in condizioni di bassa entropia in modo da compensare il naturale aumento di entropia all'interno. La condizione di stazionarietà può venire raggiunta a un livello vicino all'equilibrio oppure lontano dall'equilibrio.

Si hanno dunque le seguenti tre condizioni:

- 1) Il *sistema in equilibrio* termodinamico: non sono possibili modifiche ulteriori.
- 2) Il *sistema vicino all'equilibrio*: valgono le relazioni di Onsager, dalle quali risulta che vicino all'equilibrio il sistema è in condizione di linearità, cioè può venire studiato linearizzandolo,

quindi si hanno reazioni reciproche: se a agisce su b , b agisce su a nello stesso modo. Esiste una relazione di causa-effetto tra il valore che assume il sistema ed il valore dei parametri di controllo, e pertanto, modificando il parametro, è possibile modificare la condizione del sistema, cioè diviene possibile ottenere lo stato di stazionarietà che si preferisce. In genere, i sistemi nei quali avvengono le reazioni della chimica inorganica sono sistemi vicini all'equilibrio, e anche se si tratta di sistemi non lineari, che reagiscono su se stessi, è possibile governarli regolando il flusso esterno di energia. In queste condizioni il sistema è soggetto a scambi con l'ambiente, come input ed output. Consideriamo un esempio: un recipiente contenente acqua calda disperde calore e dopo un certo tempo, se lasciato a se stesso, raggiunge la temperatura ambiente: con questo finisce ogni trasformazione naturale; se è posto a contatto con una sorgente di calore, si può mantenere a qualsiasi temperatura. Il calore che viene immesso è il parametro di controllo, e variando questo è possibile regolare la temperatura dell'acqua, mantenendola a valori diversi da quelli ambientali. Essendoci uno scambio con l'ambiente, la temperatura nel recipiente non è costante: ci sono, ad esempio, fasi nelle quali si disperderà più rapidamente, altre volte meno; quando il calore che si immette e il calore che si disperde si compensano, la temperatura si mantiene stazionaria. Gli stessi parametri di controllo possono avere oscillazioni. Il problema consiste nel capire se il sistema è stabile, cioè se il sistema, quando ha subito una variazione provocata dall'esterno, torna o meno nella condizione iniziale. Entro questi limiti, in condizioni di termodinamica vicina all'equilibrio, il sistema risulta linearizzabile e controllabile.

- 3) Il *sistema lontano dall'equilibrio*. Esaminiamo ora cosa succede quando, aumentando il valore dei parametri di controllo, il sistema viene allontanato dal punto di equilibrio. Abbiamo dimostrato (1.2.1.6) che il sistema non si comporta in maniera lineare, e allontanandosi dall'equilibrio esso dà luogo a biforcazioni ovvero insorgono soluzioni stazionarie nuove. Ci sono valori dei parametri ai quali corrisponde un solo ramo stabile, ma quando questi valori aumentano, può avvenire che esso diventi instabile mentre emergono due nuovi rami stabili, cioè si hanno più solu-

zioni: una biforcazione. A questo punto il sistema lontano dall'equilibrio cessa di essere globalmente stabile: esso può essere localmente stabile, cioè può avere condizioni di stazionarietà multiple che sono localmente stabili, per cui si hanno attrattori locali con un proprio bacino di attrazione; di solito tali bacini sono separati da valori stazionari instabili. Un sistema aperto è necessariamente collocato in un ambiente e quindi esposto a fluttuazioni nei valori dei parametri causate da variazioni che avvengono nell'ambiente. Se queste variazioni sono modeste in relazione all'ampiezza del bacino di attrazione relativo allo stato stazionario in cui il sistema si trova, questo recupererà il suo stato iniziale; se invece tali fluttuazioni sono ampie, allora il sistema può passare da uno stato stazionario a un altro. In prossimità di una biforcazione, i bacini di attrazione sono molto piccoli, quindi basta una piccola fluttuazione e il sistema lontano dall'equilibrio salta da un ramo a un altro. Per ogni stato prossimo a una biforcazione il grado di stabilità del sistema rispetto a un'azione esterna diventa molto piccolo.

Se ci si allontana dall'equilibrio e insorgono biforcazioni, non è più possibile applicare i teoremi fondamentali della statistica (legge dei grandi numeri e teorema del limite centrale) per neutralizzare gli inevitabili errori di misurazione, in quanto la presenza di una molteplicità di stati stazionari stabili non consente la costruzione di una funzione di densità di tipo normale intorno al valore stazionario che si intende misurare. Quando poi la molteplicità di rami stazionari cresce ulteriormente, diviene del tutto impossibile individuare le singole tracce, in quanto in un qualsiasi volume nello spazio delle fasi, per quanto piccolo, esistono tracce divergenti per cui anche un minimo, e pertanto inevitabile, errore di misurazione può dar luogo a risultati estremamente diversi.

Se si considera il fatto che i parametri del sistema sono soggetti a fluttuazioni indotte dall'ambiente, è chiaro che un'analisi esclusivamente deterministica del sistema lontano dall'equilibrio diviene impossibile e occorre rifarsi a un approccio probabilistico che riflette la natura intrinsecamente casuale di questi sistemi. Tale approccio ha come strumento principale l'uso della *Master Equation*, cioè un modo per valutare la probabilità che il sistema si trovi in un determinato stato.

A questo livello interviene anche il concetto di stabilità strutturale, ovvero di come varia la struttura del sistema lontano dall'equilibrio, per l'insorgenza di nuovi rami stazionari e annullamento dei precedenti, alle variazioni dei parametri. In sostanza la variazione dei parametri, ad esempio indotta da fluttuazioni casuali connesse all'ambiente, può dar luogo a tre possibilità:

- a) il sistema ritorna allo stato stazionario in cui si trovava prima della fluttuazione, in quanto la fluttuazione non è stata in grado di portare il sistema fuori del bacino di attrazione di quel ramo;
- b) il sistema non ritorna allo stato stazionario precedente, ma si colloca in uno stato diverso in quanto la fluttuazione ha fatto saltare il sistema da un bacino di attrazione a un altro;
- c) si modifica la struttura degli attrattori, ovvero degli stati stazionari localmente stabili, e il sistema avendo cambiato configurazione va verso uno stato stazionario del tutto nuovo.

È quindi abbastanza chiaro come i sistemi termodinamici lontani dall'equilibrio abbiano una evoluzione e quindi una storia; storia che implica e richiede che emergano rotture di simmetria spaziali e temporali. Questa storia è idealmente rappresentabile come la progressiva esplorazione, svolta in modo casuale, degli attrattori del sistema. La struttura di questi attrattori definisce le potenzialità del sistema, ovvero i possibili stati che il sistema può assumere mentre l'impatto casuale determina quali di questi stati vengano effettivamente assunti, ovvero quali di questi attrattori passano dallo stato di possibilità a quello di realtà.

Un tipo di analisi molto interessante a tal riguardo può essere svolto mediante l'uso degli automi cellulari, ovvero di reti booleane casuali. Si tratta di un importante avanzamento rispetto alla tesi, proposta da Monod (1970) e nota come «il caso e la necessità». Secondo tale tesi, i sistemi vitali nascono casualmente e poi vengono perpetuati mediante la trasmissione dei dati attraverso il DNA; in altre parole la nascita di un organismo è casuale, ma questo, una volta nato, si perpetua necessariamente. Secondo il modo di interpretare i fenomeni qui esposto, non tutti gli stati del sistema sono equiprobabili, ma hanno probabilità positiva solo quelli che rappresentano attrattori per cui l'insorgere di uno stato del sistema non è del tutto casuale in quanto si tratta di una scelta casuale tra un numero

limitato di possibilità, quelle che rappresentano attrattori nella struttura del sistema, e la permanenza nello stato non è del tutto necessaria e definitiva in quanto la stabilità dello stato del sistema non è assoluta o globale, ma relativa, o locale, e comunque modificabile in seguito a fluttuazioni indotte dall'ambiente. In questo senso la nascita di qualsiasi organismo, l'organizzazione di qualsiasi ecosistema, e anche lo stesso processo evolutivo, si presentano come esplorazione casuale degli attrattori connessi alla struttura che il sistema vivente assume in ogni dato momento del tempo.

Da questo si giunge a una prima conclusione: i sistemi termodinamici vicino all'equilibrio non si auto-organizzano, mentre lontano dall'equilibrio sono in grado di auto-organizzarsi. Di conseguenza, i sistemi vicino all'equilibrio possono essere mantenuti indefinitamente in uno stato stazionario, mentre ciò non è possibile quando essi si trovano lontano dall'equilibrio ed essi in questo caso sono necessariamente votati a un processo evolutivo.

Se il sistema presenta più rami stazionari, sarà possibile definire una curva a campana attorno a ciascun ramo stabile: queste curve parzialmente si sovrappongono. Pertanto l'insieme non è più rappresentabile con una curva a campana complessiva: cioè abbiamo un fenomeno casuale, stocastico, intrinseco del sistema, che non possiamo eliminare a causa del rumore di fondo. In una condizione nella quale vi sono molti rami, non siamo più in grado di individuare le tracce perché attorno a qualsiasi punto del sistema esistono almeno due tracce che divergono. In realtà ci sarebbe bisogno di una capacità di misurazione infinita per individuare una traccia. Non siamo più in grado di analizzare la realtà per quello che è, ma abbiamo bisogno di passare alla sua interpretazione statistica. Da questa impossibilità di individuare le tracce sono stati derivati gli insiemi di Gibbs e la teoria statistica di Einstein. Si tratta di una interpretazione statistica intrinseca, non di un errore aggiuntivo. Ci troviamo, quindi, con sistemi che hanno caratteristiche casuali intrinseche che nascono dalla loro struttura e dal fatto che sono soggetti all'impatto di fluttuazioni dall'esterno. Si può vedere questo anche come un problema di stabilità strutturale: man mano che varia un parametro, varia anche la struttura del sistema, perché ci si allontana dall'equilibrio. Pertanto, lo stato di sistema lontano dall'equilibrio può venire definito in base al presentarsi di biforcazioni.

Il sistema lontano dall'equilibrio si auto-organizza in maniera casuale, sempre esplorando la propria struttura e realizzando una delle strutture possibili, ma non una qualsiasi a caso. Nel caso della sintesi proteica le catene possibili sono tantissime, ma nella cellula non è che si formi qualsiasi catena: si realizzano solo quelle poche che sono attrattori. Il fenomeno-vita pertanto è *un fatto probabile*, perché questa vita può venire considerata un attrattore.

Il sistema auto-organizzante deve prelevare energia a bassa entropia dall'esterno; se le condizioni non lo permettono, esso non può mantenere la condizione di stazionarietà e va incontro a una modificazione irreversibile. Se, invece, assume troppa energia dall'esterno, esce dalla fase delle biforcazioni e passa alla fase degli attrattori strani: condizione caotica con turbolenza, nella quale il vivente non si può mantenere.

Riassumiamo alcune caratteristiche interessanti dei sistemi lontani dall'equilibrio:

- 1) creano una rottura di simmetria nello spazio;
- 2) creano una rottura di simmetria nel tempo – questa c'è anche nei sistemi che vanno all'equilibrio ed è la storia del passaggio alla massima entropia; nei sistemi lontani dall'equilibrio invece è la storia della creazione della loro struttura;
- 3) sono sistemi irreversibili – creano delle strutture ma non si possono destrutturare: non è possibile andare a marcia indietro nel tempo; sono stabili, ma soltanto quando non vengano modificate le condizioni che li mantengono nello stato stazionario. Ad esempio, nel caso della morte l'organismo non è in grado di assumere ulteriormente energia dall'esterno e la sua organizzazione viene a dissolversi.

La conclusione dei paragrafi riuniti sotto il codice 1.2.1 è che il sistema auto-organizzante può venire considerato un paradigma di alto significato, in quanto fornisce un modello unificante per l'interpretazione dei fenomeni naturali e di quelli dipendenti dall'azione dell'uomo. Si tratta, come si è visto, di un modello deterministico, però la complessità dello stesso e l'impossibilità di avere una conoscenza perfetta delle condizioni iniziali ci impediscono di ricavarne previsioni certe: modelli di previsione si possono costruire soltanto su base statistica.

1.2.2. *La vita*

La vita viene definita in maniera intuitiva come la capacità di crescere e riprodursi, ma queste sono funzioni peculiari ai sistemi viventi, dunque rappresentano ciò che si intende definire. In altre parole, per definire la vita su questa base sarebbe necessario conoscere in anticipo che cosa è la vita. Questa definizione è tautologica.

Una via per sfuggire alla tautologia è stata proposta già negli anni venti da Oparin (1961), che ha definito la vita come «una particolare forma di movimento della materia». Il problema viene dunque spostato alla necessità di comprendere in cosa consista questa particolarità. Il moto dei corpi è studiato dalla meccanica, e su questo è basata la grande teoria di Newton. Non è però certamente il caso del movimento proprio degli organismi, i quali non necessariamente si spostano (ad esempio i vegetali). Chiaramente, Oparin intendeva il movimento a livello molecolare, che è oggetto della termodinamica. Come si è visto nelle pagine precedenti, i principi della termodinamica stabiliscono che nei sistemi isolati ogni trasformazione spontanea è diretta verso il punto di equilibrio, che corrisponde al livello di massima entropia. Questa non è la condizione dei viventi, e pertanto dobbiamo dedurre che la vita è una proprietà di sistemi aperti lontano dall'equilibrio, che funzionano come sistemi complessi auto-organizzanti. Si hanno pertanto tre conseguenze:

- il sistema vivente interagisce con il suo contorno;
- il sistema vivente è inserito in un flusso energetico;
- il sistema dispone di strutture adatte a catturare una porzione dell'energia disponibile.

Queste strutture sono l'effetto di un processo di auto-organizzazione del sistema, mediante cicli ricorsivi che, regolati da attrattori, definiscono un cammino evolutivo non ripetibile.

1.2.2.1. *Definizione*

VITA La vita è una particolare forma di movimento della materia (Oparin, 1961), caratterizzata dal fatto che il vivente è in grado di mantenersi lontano dal punto di equilibrio (Schrö-

dingier, 1945), pur essendo completamente soggetto alle leggi della termodinamica che impongono un continuo aumento dell'entropia interna dei sistemi. Questo risultato viene ottenuto mediante flussi di materia e di energia, regolati da strutture che hanno funzione di organizzazione, prima fra tutte il DNA. I sistemi viventi sono dunque sistemi complessi auto-organizzanti. In quanto tali, anche nei sistemi viventi si possono riconoscere le caratteristiche già descritte, come cicli ricorsivi, attrattore, biforcazioni, frattali, ed eventualmente anche la transizione al caos.

Tenendo conto di quanto indicato in 1.2.1.7 si può arrivare alla seguente formulazione: si indica come «vita» l'attività dei sistemi auto-organizzanti. La capacità di auto-organizzazione dei viventi è strettamente dipendente da scambi di informazione con l'esterno, che vengono determinati attraverso strutture adatte, cioè le strutture caratteristiche della vita; le membrane biologiche sono un esempio di tali strutture.

In generale vengono considerati organismi viventi soltanto gli animali, le piante, i batteri. Già per i virus si discute se possano venire considerati a pieno titolo viventi, oppure se si tratti solamente di macromolecole che divengono attive soltanto quando si trovano all'interno della cellula di un altro organismo. La definizione del vivente come sistema auto-organizzante allarga il campo e include anche sistemi che normalmente non verrebbero considerati viventi. Ad esempio, secondo Lovelock (1988), il pianeta è sede di processi di auto-organizzazione e pertanto va considerato come vivente (Gaia).

1.2.2.2. *La vita come flusso energetico*

Un organismo può venire correttamente interpretato soltanto se viene inserito in un ambiente. Ci basti per il momento questa come affermazione di uno stato di fatto, per le relazioni tra gli organismi e l'ambiente si rimanda alle sezioni 2.1 e seguenti. Il vivente è un sistema complesso auto-organizzante, i cui soli aspetti singoli possono venire descritti mediante funzioni lineari. La matematica non ha finora proposto un linguaggio adeguato per descrivere l'insieme di un vivente; pertanto qui si presenta un diagramma di flusso come modello generale (fig. 1.5).

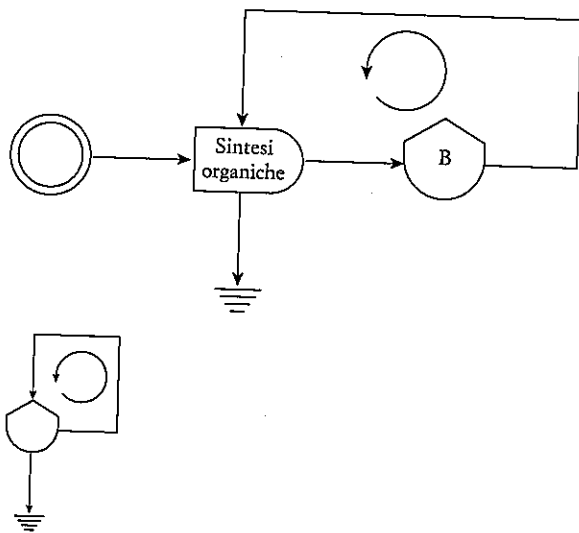


Figura 1.5

Questo modello del sistema vivente, estremamente semplificato, è derivato dalla figura 1.4. La sorgente energetica può essere il Sole per gli organismi fotosintetici oppure una trasformazione chimica per gli organismi demolitori, erbivori, carnivori e per i chemiobatteri; l'energia viene in parte dissipata, in parte utilizzata in sintesi di sostanze organiche, che vengono incorporate nel vivente B. Il metabolismo di B fornisce sostanze che servono per nuove sintesi; la sorgente continua ad erogare energia e il processo è ricorsivo.

Il sistema vivente dipende dal Sole come fonte d'energia (fatta eccezione per i batteri chemiosintetici, che usano l'energia liberata in alcune trasformazioni chimiche, e probabilmente sono un relitto delle più antiche forme di vita). La radiazione solare arriva sulla Terra come luce e calore ed è solo in parte disponibile, in quanto il rimanente viene riflesso dall'atmosfera e dissipato. La luce rappresenta una forma di energia a livello di bassa entropia. Quando essa viene a impattare una superficie di materiale inorganico, ad esempio una pietra, si ha il passaggio a energia termica, la pietra viene riscaldata e quindi il calore viene dissipato con passaggio al livello di massima entropia; durante la notte, questa energia viene dispersa come calore a bassa temperatura nell'atmosfera circostante e non può venire utilizzata per lavoro ulteriore. Se l'energia solare raggiunge la particolare molecola della clorofilla *a*, un elettrone di un atomo in posizione periferica viene trasferito

su altre molecole e origina un flusso energetico che può venire utilizzato per ulteriori trasformazioni endergoniche, ad esempio la sintesi di carboidrati, lipidi o proteine. Nel processo di *fotosintesi* atomi di carbonio vengono sottratti all'atmosfera e incorporati nelle piante sotto forma di composti organici. Si tratta di un processo con carattere ricorsivo sia al livello molecolare (dove si ha continua ripetizione di trasformazioni cicliche) sia come successione temporale nella connessione con eventi astronomici (periodicità giornaliera e annuale). In questo modo hanno inizio i cicli vitali: queste molecole possono fornire ulteriore energia e operare la biosintesi di un'immensa varietà di composti organici. Queste trasformazioni includono reazioni ossidative e costituiscono il processo della *respirazione*. L'energia è passata ad altre parti del sistema e il processo continua fino alla morte. Ma anche con la morte di un certo organismo il trasferimento d'energia non cessa, in quanto altri organismi potranno utilizzare la spoglia come sorgente energetica (un diagramma dettagliato alla fig. 2.7). L'atomo di carbonio sottratto all'atmosfera deve percorrere una via molto lunga prima di venire restituito all'atmosfera. In generale, esso può passare nel suolo e restarvi per un tempo indefinito, anche come carbone o petrolio, e in questo caso tornerà nell'atmosfera solo come conseguenza di una combustione attivata dall'uomo. Questo flusso energetico permette l'attivazione dell'operatore λ , il quale mantiene il sistema lontano dal punto di equilibrio, e di conseguenza gli conferisce la possibilità di attuare processi di auto-organizzazione. I vegetali utilizzano l'energia luminosa proveniente dal Sole, batteri, funghi e animali utilizzano l'energia ricavata dall'ossidazione dei composti organici sintetizzati dai vegetali.

In linea generale, si può supporre che si sia stabilita una situazione di equilibrio tra l'input di carbonio nei sistemi viventi e l'output di questi nell'atmosfera. Gli organismi controllano questo ciclo, e, come conseguenza, la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera rimane stabile durante lunghi periodi di tempo. Questo carbonio è continuamente disponibile per nuovi cicli di fotosintesi e respirazione. Nel modello generale (fig. 2.3, cfr. anche la 4.2), dopo la fotosintesi il sottosistema attivo P (produttori) trasferisce l'energia al sottosistema C (consumatori) e così carbonio e nutrienti ritornano disponibili per la fotosintesi.

Il modello della biosfera è basato su un ciclo nel quale i produttori generano un feedback che agisce in senso positivo incrementando le attività vitali. La biosfera si può dunque interpretare come un sistema auto-organizzante del tipo precedentemente definito, cioè

$$\Omega < a | \kappa \uparrow, \lambda, \mu | > b \quad [12]$$

Si tratta, quindi, di un sistema che si ordina per effetto di un ingente flusso energetico, nel quale le costrizioni dovute alle differenze tra terre emerse e continenti hanno conseguenze relativamente semplici, mentre le grandi costrizioni astronomiche (rotazione e rivoluzione, con le conseguenze sulla periodicità dell'irradiazione solare) esistono praticamente invariate da miliardi d'anni e quindi fanno ormai parte delle caratteristiche intrinseche del pianeta; la diversità pertanto rimane relativamente bassa. Questo sistema auto-organizzante è stato indicato come Gaia (Lovelock, 1988). Su queste relazioni ritorniamo nelle sezioni 2.1 e 2.2. L'attrattore del sistema corrisponde a una situazione di elevata diversità.

In maniera semplificata, la biosfera può esser paragonata a un motore che lavora in ciclo usando l'energia solare quale carburante. La radiazione solare totale che raggiunge la Terra costituisce una immensa quantità di energia: solo una piccola percentuale di essa entra nella biosfera attraverso la fotosintesi: circa 1,5%, però anche così rimane una quantità cospicua. La rimanente energia (98,5%) viene dissipata come calore a bassa temperatura, tuttavia, prima di esser completamente perduta per il sistema, essa produce alcune importanti trasformazioni sulla superficie della Terra, essenzialmente l'evaporazione dell'acqua dagli oceani, venti, monsoni ecc., attivando la cosiddetta «macchina climatica». Anche questi sono determinanti essenziali delle attività vitali.

1.2.2.3. Trasferimento dell'informazione a livello molecolare

La teoria generale della biologia afferma che l'informazione biologica è contenuta in una particolare sostanza: il DNA. Si tratta di macromolecole di grandi dimensioni con una sequenza aperiodica di costituenti elementari (i nucleotidi). Ciascuna sequenza di tre nucleotidi costituisce un'unità che corrisponde a un particolare aminoacido. Questa sequenza può venire interpretata come

una sorta di linguaggio. Da un punto di vista semplicistico si può supporre che la sequenza dei nucleotidi componga un messaggio che descrive forma e funzione degli organismi: questo però non corrisponde alla realtà. Il DNA fornisce le istruzioni per la sintesi di molecole organiche che agiscono su sottosistemi subordinati. Comunque, nella generalità degli organismi l'informazione essenziale è contenuta nel DNA; da qui passa all'RNA, alle proteine e viene a regolare le varie funzioni organiche (*central dogma*). Questa concezione appare biocentrica e implica una cascata di informazione dal centro verso la periferia. Invece l'informazione può anche fluire nella direzione opposta. Infatti il processo di auto-organizzazione, intrinseco ai viventi, permette un flusso d'informazione generata nei singoli componenti del sistema, e che quindi investe la struttura stessa del sistema. Ogni organismo possiede qualche tipo di sensori periferici che vengono attivati da segnali esterni; essi inducono trasformazioni nell'organismo o in parti di esso. In condizioni favorevoli le conseguenze di segnali esterni possono interferire con l'assetto del DNA e in tal caso venire fissate dai meccanismi di selezione naturale. Quindi l'informazione è non soltanto endogena, ma anche esogena.

1.2.2.4. Struttura e funzione

La caratteristica generale dei sistemi biologici è la capacità di ricevere energia dall'esterno e questo implica l'esistenza di recettori adatti per catturare questa energia. In linea generale essi possono venire considerati strutture. In conseguenza, i sistemi biologici sono sempre caratterizzati da strutture, talora molto complicate. Ogni sistema biologico produce le proprie strutture durante il processo di crescita: la morfogenesi. Tali strutture hanno spesso carattere frattale, particolarmente evidente nell'aspetto di organismi primitivi (fig. 1.9). Anche nell'uomo si possono riconoscere strutture con dimensioni frattali, ad esempio il sistema nervoso che sappiamo esser costituito da cellule filamentose sottilissime (dimensione lineare), le quali però raggiungono ogni parte del nostro corpo, che è un solido a tre dimensioni: dunque il sistema nervoso ha una dimensione frattale compresa tra 1 e 3. Le strutture per catturare energia possono esser molto diverse: le più ovvie sono i

cloroplasti, nei quali la clorofilla è disposta in maniera ordinata, così che la molecola possa funzionare da sensore dell'energia radiante. Dalla conformazione spaziale della struttura dipende strettamente la sua funzionalità: la forma della molecola di clorofilla è essenziale per la fotosintesi, e lo stesso vale per l'emoglobina nei processi respiratori. La struttura della molecola determina la funzionalità, sia degli enzimi che regolano un gran numero di trasformazioni metaboliche, sia degli anticorpi nel sistema immunitario.

Le strutture per il trasferimento di energia sono in generale membrane, oppure organelli come i mitocondri ecc. Si possono riconoscere tre livelli di integrazione:

Molecole: ad esempio la clorofilla, che però non è l'unica sostanza sensibile alla luce; nelle piante si hanno ancora ficobiline e xantofille. Sembra che nelle prime fasi della vita sul pianeta si sia avuto un processo di selezione tra un'ampia varietà di pigmenti: la clorofilla *a*, che si è affermata come il più efficiente, è ora diffusa in tutti i gruppi di piante.

Ultra-strutture: le molecole sono ordinate in complessi di piccole dimensioni, che non possono venire studiati con il microscopio normale e pertanto vengono indicati come ultra-strutture: cloroplasti, mitocondri, ribosomi. All'origine questi organelli potrebbero esser stati organismi unicellulari «catturati» in cellule più grosse. I cloroplasti in alcuni organismi fotosintetici primitivi come i cianobatteri mostrano strutture rudimentali e molto differenziate, ed è verosimile vi sia stato un processo di selezione per raggiungere la condizione di maggiore efficienza; nelle piante superiori, invece, il cloroplasto ha una struttura più o meno uniforme, e il mitocondrio ha struttura simile in quasi tutti i viventi, quindi sembra che non si sia avuta evoluzione ulteriore.

Organi: le ultra-strutture sono ordinate in organelli e questi a loro volta in complessi, così da ottenere un massimo di funzionalità. Nelle piante si hanno organi come la foglia e il fusto; negli animali gli organi sono molto più complicati e permettono funzioni centralizzate, ad esempio il cuore, i polmoni, il cervello ecc.

L'attività degli organismi produce risultati che possono essere considerati dal punto di vista sia quantitativo che qualitativo. Nel primo caso l'organismo appare simile a una macchina (Descartes) il cui compito consiste essenzialmente nell'accumulare materia organica: il funzionamento è continuo finché vi sono risorse dispo-

nibili. In questo caso le risorse consistono in una sorgente energetica ed alcuni composti chimici essenziali come anidride carbonica, nitrati ecc. In teoria, vi è una possibilità di crescita indefinita, che però viene limitata da costrizioni fisiche: gli alberi più elevati superano di poco i 100 m, perché esiste una difficoltà crescente a spingere la linfa ad altezze superiori; il più grosso animale terrestre è l'elefante, e un mammifero di dimensioni maggiori avrebbe la necessità di ossa più massicce e di un cuore più forte, il che per altre ragioni ne renderebbe difficile la sopravvivenza. La possibilità di crescita è inoltre limitata dal fatto che materia ed energia non sono disponibili in quantità infinita, un problema che sarà discusso nel quadro della teoria ecologica (2.4.1.5).

Altrimenti, la crescita degli organismi non significa solamente il fatto di diventare più grossi, ma anche più complicati, e questo è il lato qualitativo del processo. La crescita qualitativa può venire interpretata come un accumulo di ordine. Ritornando al modello della macchina-organismo, in questo caso si tratta di una macchina che lavora per organizzare le proprie strutture. Dunque, nei viventi constatiamo l'esistenza di due processi di accumulazione progressiva: uno orientato verso l'accumulo di materia organica e l'altro verso l'accumulo di ordine. Gli organismi, come esempio di sistema auto-organizzante, in questo caso verranno dunque descritti ponendo l'enfasi sull'operatore della biodiversità:

$$\Omega < a | \kappa \uparrow, \lambda, \mu | > b \quad [12]$$

Anche in questo caso lo stato di elevata diversità può essere definito come l'attrattore del sistema. Le strutture sono peculiari per l'organismo di cui rappresentano un componente materiale concentrato in parti specializzate (cloroplasti, mitocondri, acidi nucleici). Queste strutture possono catturare materia ed energia ed usarle per costruire altre strutture. Si tratta di un processo continuamente sottoposto a una sorta di funzione di controllo dell'efficienza. Negli animali più evoluti le strutture più importanti sono centralizzate (reni, cuore, cervello). Questo è il risultato di un processo di selezione che è la base di ogni forma di vita. Quindi, l'auto-organizzazione non è soltanto la costruzione dell'organismo attraverso un processo ricorsivo, ma anche un continuo miglioramento dell'organismo stesso.

1.2.2.5. *La vita come attività dei sistemi auto-organizzanti*

Le funzioni tipiche degli organismi sono crescita e adattamento. La crescita è soprattutto, ma non soltanto, quantitativa; adattamento è la conseguenza di processi selettivi, soprattutto qualitativi. I due processi sono regolati in forme che possono venire considerate leggi naturali, rappresentanti in maniera fenomenologica il funzionamento degli organismi. Esse non possono venire derivate come necessarie da principi generali della fisica; infatti sarebbe possibile immaginare dei viventi che seguono leggi del tutto differenti. Per questa ragione esse sono state chiamate leggi biotoniche (Davies, 1995; cfr. anche Montalenti, 1974 e Peacocke, 1986).

Crescita – viene descritta essenzialmente dalla legge esponenziale (fig. 1.6), applicata a caratteri quantitativi come la crescita del peso di un albero oppure del numero di individui di una popolazione di topi.

Ricorsività – la macchina-organismo lavora in ciclo e ripete continuamente le stesse azioni. Il ciclo viene condizionato dalla disponibilità di energia e, quando la sorgente è il Sole (come nel caso delle piante), i cicli vengono regolati da eventi astronomici come giorno, stagione o anno. Nel caso degli animali, la sorgente energetica corrisponde al cibo ed i cicli si fanno più complicati e spesso irregolari. Però i processi fondamentali al livello cellulare e delle ultra-strutture sono nei due casi sostanzialmente eguali.

Controllo – ogni funzione include anelli di feedback che agiscono come sottosistema che controlla l'attività generale. Questi feedback sono di natura molto diversa (per lo più reazioni biochimiche) ed in generale agiscono in senso contrario alla funzione principale oppure hanno l'effetto di limitarla.

Omeostasi – il controllo attraverso feedback ha importanti conseguenze: anzitutto l'organismo si comporta come sistema complesso, inoltre la sua attività viene regolata in condizione stazionaria, lontano dal punto di equilibrio; così l'organismo rimane per tempi prolungati in condizioni pressappoco costanti. L'omeostasi, quindi, ha conseguenze opposte alla tendenza verso la crescita. La capacità di omeostasi del sistema dipende dalla diversità dello stesso, nel senso che sistemi a elevata diversità hanno anche elevata omeostasi; questa caratteristica diviene fondamentale, assieme

alla resilienza, quando si ha a che fare con sistemi minacciati dall'azione dell'uomo (cfr. più avanti 4.2).

Resilienza – il sistema biologico è abbastanza flessibile e può tollerare cambiamenti prodotti da cause esterne senza trasformazioni permanenti: quando queste cessano, il sistema ritorna nella condizione primitiva. L'organismo si comporta come un corpo elastico.

Soglia – il conflitto tra la tendenza alla crescita e l'omeostasi produce l'accumulo di materia e/o strutture informazionali negli organismi, e questo processo può continuare fino a un certo livello, in corrispondenza del quale avviene un cambiamento nella complessità del sistema. Si tratta di una trasformazione brusca dopo un periodo di stato stazionario, che rappresenta la versione biologica del processo descritto in matematica come catastrofe (Thom, 1975).

La termodinamica vicino all'equilibrio è relativa a sistemi nei quali i parametri di controllo sono tali da mantenerli al di fuori dallo stato di equilibrio termodinamico, ma non nelle fasi di biforcazione. La termodinamica lontano dall'equilibrio si realizza quando il sistema, auto-organizzandosi, assorbe sufficiente energia e materia da mantenersi nella zona delle biforcazioni, ma prima di entrare in fasi di andamenti caotici, come quella caratterizzata da attrattori frattali. I parametri stessi si modificano nel tempo, e quindi il sistema si auto-organizza, e cioè realizza la sua storia. Anche in questo caso perde memoria, perché i sentieri sono infiniti e la finestra di conoscenza è ristretta rispetto al futuro; non si può prevedere causa-effetto, perché la modificazione di un parametro è in grado – essendo il sistema dotato di auto-organizzazione – di determinare quanta energia assumere dall'ambiente. Nell'esempio sopra descritto, risulta possibile decidere quanta energia immettere nel sistema vicino all'equilibrio; invece un sistema vivente decide autonomamente quanta energia prelevare: è lui che decide se e quanto mangiare – man mano che cresce assume più energia, mentre con l'invecchiamento il bisogno di energia diminuisce. Possiamo immaginare un parametro «energia dall'esterno», che tiene il sistema lontano dall'equilibrio termodinamico: nel sistema vicino all'equilibrio è un parametro di controllo esterno, mentre nel vivente si tratta di un parametro interno che, variando nel tempo, può portare il sistema da una struttura *a* a una struttura *b*.

1.2.2.6. Crescita, biforcazioni e transizione al caos

L'intervallo tra la nascita e la morte nei viventi è occupato dalla crescita, in termini quantitativi oppure in termini di ordine: questo vale sia per l'individuo in toto che per le cellule che lo compongono (gli organismi più semplici sono monocellulari, dunque i due concetti coincidono, invece piante e animali superiori sono costituiti da un gran numero di cellule). La crescita di una specie oppure di una popolazione dipende dal numero degli individui che nell'unità di tempo sono nati e, inversamente, dal numero dei morti (lo stesso si ripete per il numero di cellule di un individuo). Si avrà dunque:

N numero degli individui nell'anno y
 a costante di efficienza riproduttiva

$$N_{y+1} = a N_y \quad [15]$$

Questa equazione indica *crescita esponenziale*, cioè un aumento del numero di individui sempre più rapido, e che tende ad infinito (fig. 1.6).

Ovviamente, la possibilità di un numero infinito di individui non esiste, in quanto la natura (e le sue risorse) hanno sempre dimensioni finite. Si rende pertanto necessario introdurre una seconda costante, in base alla quale calcolare la differenza tra nascite e morti:

b costante di mortalità

$$N_{y+1} = a N_y (a - b N_y) \quad [16]$$

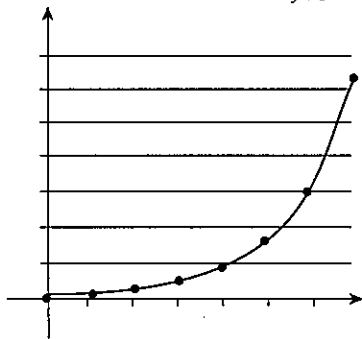


Figura 1.6
Dinamica della crescita esponenziale.

Si ottiene così l'*equazione logistica*, che descrive una popolazione che, dopo una crescita iniziale, si stabilizza a un dato livello. Il livello al quale la crescita si arresta dipende dal valore di b , che regola tutto l'andamento del fenomeno.

Graficamente essa può essere rappresentata con la curva logistica di figura 1.7.

La dinamica del sistema dipende dalle condizioni iniziali in maniera strettamente deterministica e piccole differenze possono provocare conseguenze importanti. Compare dunque quella che abbiamo visto essere una importante caratteristica dei sistemi complessi: la *dipendenza dalle condizioni iniziali*. La curva logistica con valori bassi di a raggiunge un livello massimo oltre il quale non si ha ulteriore crescita; con valori più elevati compaiono regolari oscillazioni. Un valore critico si ha con a pari a $3,5699\dots$ (uno dei numeri di Feigenbaum), in corrispondenza del quale si ha una biforcazione: ciò significa che gli individui che compongono il sistema possono assestarsi indifferentemente su una tra due possibilità (fig. 1.8). Continuando ad aumentare a le biforcazioni si ripetono con ritmo sempre più rapido e il sistema diviene completamente imprevedibile. Così viene raggiunta la fase di *caos deterministico*, che include la possibilità di oscillazioni periodiche corrispondenti a particolari valori di a . A questo punto risulta evidente che il sistema si sviluppa secondo una legge deterministica; tuttavia minime differenze nelle condizioni iniziali determinano un risultato che nei vari casi è del tutto differente: anche questo corrisponde a quanto viene espresso con la metafora del *Butterfly effect*.

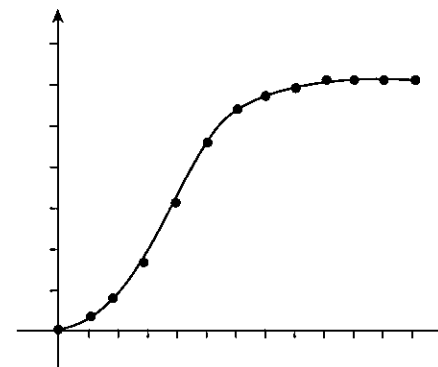


Figura 1.7
Modello di crescita logistica per un ecosistema in condizione stazionaria.

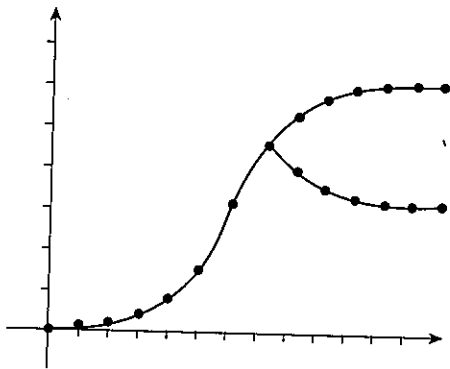


Figura 1.8
Dinamica dell'ecosistema in condizione di risorse scarse: in corrispondenza della biforcazione gli individui di una specie n vengono ad assumere due tipi di comportamento tra loro differenziati.

La transizione al caos sembra essere una caratteristica generale dei sistemi, mentre il caso contrario, cioè sistemi che si mantengono nello stato di complessità, è raro; sono soprattutto i sistemi biologici (i viventi, gli organismi), quelli che attraverso processi di omeostasi e resilienza possiedono l'essenziale capacità di mantenersi alla soglia del caos senza superarla, cioè di evitare la transizione al caos che verrebbe a limitare o completamente distruggere la vitalità del sistema. Sono le condizioni dei sistemi lontano dall'equilibrio, dei quali si è trattato nella sezione 1.2.1.9. Possiamo pertanto arrivare a un tentativo di definizione più concisa, anche se con linguaggio non rigoroso:

VITA (II) la vita è la proprietà di sistemi auto-organizzanti alla soglia del caos, che si mantengono lontani dall'equilibrio concentrando ordine all'interno ed espellendo disordine al contorno.

La vita, quindi, può esser considerata come accumulo di ordine ad opera di strutture emergenti al margine del caos: in un universo caratterizzato dall'aumento di entropia, si tratta di un fatto del tutto eccezionale. Non siamo in grado di capire se esso sia avvenuto un'unica volta, e noi ne siamo partecipi, oppure se si tratti di un evento necessario che si è riprodotto su molti corpi celesti, con i quali però non siamo in contatto.

Il excursus nella teoria dei sistemi auto-organizzanti ci porta a una conclusione importante: il sistema si sviluppa lungo una traiettoria fissata in maniera autonoma, che dipende dalle caratteristiche stesse del sistema, caratteristiche sulle quali possiamo avere conoscenze generali, che consentono di elaborare schemi previsionali, ma per le quali una conoscenza completa ed esatta è impossibile. Di conseguenza, anche la prevedibilità degli accadimenti futuri è limitata. Qui ci si rende conto dei limiti di una conoscenza basata sulla scienza newtoniana. Una discussione più approfondita è stata dedicata al sistema-vita, e ha permesso di stabilire che questo è l'esempio più importante di sistema auto-organizzante. Lo studio dei sistemi in generale e dei viventi in particolare ci porta a una convinzione: l'idea che qualsiasi problema possa venire chiarito mediante un'adeguata applicazione del metodo riduzionista è illusoria. Dopo esserci sbarazzati in questo modo del bagaglio della cultura scientifica di origine galileiano-newtoniana, possiamo quindi passare all'esame dei veri protagonisti di questo libro: sistema ambientale e sistema economico.