

**Nota della redazione.** Nel primo anniversario della scomparsa del prof. Michele Sarà, ne onoriamo la memoria pubblicando “*La complessità della vita*”, che è il primo capitolo della sua ultima, notevole opera qui accanto segnalata.

La scelta del titolo, in cui l’evoluzione è definita *costruttiva*, sta a sottolineare che i processi di trasformazione non equivalgono al concetto teologico di *creazione*. Sarà non esclude affatto quanto vi è di valido nella teoria neodarwinista ma la incorpora in un contesto molto più vasto suggerito dalle nuove conoscenze della biologia molecolare. Vi è nella sua opera una messe straordinaria di osservazioni scientifiche che mostrano l’esistenza di fenomeni di interazione, cooperazione ed organizzazione nella dinamica evolutiva.

Michele Sarà è stato un amico teilhardiano che ha avuto sempre cura di tener disgiunto il piano scientifico da quello filosofico-metafisico. Lo ricordiamo come un uomo concreto, per nulla animato dalla frenesia di mettersi in mostra, e molto umano.

La sua ultima opera è una ricchezza di conoscenze scientifiche offerte con passione a lettori specializzati e non.



## **LA COMPLESSITÀ DELLA VITA**

Michele Sarà <sup>1</sup>

### **1. Sviluppo delle conoscenze sulla complessità dei viventi**

Il fenomeno della complessità, che ci circonda anche senza che ce ne accorgiamo, nella nostra esperienza quotidiana, emerge man mano che si approfondisce la conoscenza delle strutture e dei processi dell’universo. Esso si manifesta dall’estremamente piccolo degli atomi e delle molecole all’estremamente grande delle stelle e delle galassie e trova la sua massima espressione e ricchezza nel mondo della vita, pervadendo anche il mondo delle attività umane

Il mondo dei viventi ci colpisce a prima vista, ancor prima d’ogni investigazione scientifica, per il numero di specie e la varietà d’aspetti e di processi che mostra in ogni istante, e la sua complessità si manifesta ancora di più se si considerano i diversi aspetti che i viventi presentano nel succedersi del tempo. Essi derivano non solo dai rapporti fra gli organismi ma anche da quelli fra le parti (organi, tessuti, cellule, molecole) da cui sono formati e dai sistemi più

---

<sup>1</sup> Era professore emerito dell’Università di Genova. Ha insegnato Zoologia e Biologia e Zoologia generale nelle Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, e Medicina e Chirurgia delle Università di Bari e Genova. È autore di oltre 400 pubblicazioni scientifiche nel campo della zoologia, biologia marina e biologia generale e anche nel campo dell’evoluzionismo, per lo più su riviste internazionali.

ampi, come le comunità, cui partecipano. Per renderci conto di tutta la complessità della vita dobbiamo quindi studiare i viventi a differenti livelli dimensionali: quello delle molecole costitutive, in particolare proteine e DNA, delle singole cellule e della miriade di cellule diverse che formano un organismo pluricellulare, e della molteplicità degli organismi (microrganismi, vegetali e animali) che formano la biosfera e s'integrano nei più diversi ecosistemi.

La varietà degli aspetti in cui la vita si esprime è stata prodotta, a tutti i livelli, dal processo d'evoluzione biologica. Le forme e strutture che ne derivano sono però coinvolte in un ciclo continuo di costruzione e di demolizione, un aspetto dinamico fondamentale per la vita. La ricchezza degli aspetti presente in un dato istante nella biosfera è quindi il risultato congiunto del ciclo vitale dei singoli organismi e del corso storico dell'evoluzione dei viventi. L'evoluzione impedisce che il mondo, e non solo quello dei viventi, si trasformi solo ciclicamente, rimanendo uguale a se stesso, e dà ad esso una direzione storica, che va, nell'insieme, verso la complessità e l'autonomia degli enti che vi partecipano. Le caratteristiche del disegno evolutivo, una direzione costruttiva che sembra accompagnare nel suo complesso il corso dell'evoluzione nonostante le ramificazioni e diversità, saranno esaminate, per i viventi, nel cap. II. Infatti, prima di studiarne i possibili meccanismi e cercarne le cause, è necessario considerare in modo obbiettivo le manifestazioni dell'evoluzione e, in particolare, il suo *pattern* o corso.

La conoscenza dell'enorme varietà d'aspetti dei viventi è andata aumentando, in modo esponenziale, soprattutto per merito dei nuovi mezzi d'indagine forniti dal progresso scientifico e tecnologico. Si possono indicare, schematizzando, alcune fasi fondamentali di tale crescita nelle conoscenze. La prima fase può considerarsi legata all'avvento e perfezionamento del microscopio ottico, e quindi alla possibilità d'individuare strutture e organismi non visibili ad occhio nudo. Già nel Settecento l'ancora poco perfezionata microscopia ottica consentiva di scoprire in acque dolci il ricco mondo fin'allora sconosciuto dei protozoi (denominati allora infusori), organismi unicellulari di qualche decina di micrometri (millesimi di mm) e quindi al disotto del potere risolutivo dell'occhio umano (che è di circa 1/5 di mm). All'inizio dell'Ottocento la sempre più perfezionata microscopia ottica consente di elaborare la teoria fondamentale dell'organizzazione dei viventi, cioè la teoria cellulare, con cui risulta stabilito che tutti i viventi sono costituiti da cellule che si riproducono (da cui l'aforisma di Virchow: *omnis cellula e cellula*). Ma solo nella seconda metà dell'Ottocento, grazie ai progressi delle tecniche istologiche associate alla microscopia ottica, è possibile gettare uno sguardo sulle strutture presenti all'interno della cellula, sulle diversità fra le cellule e su alcuni processi co-

me la divisione cellulare (mitosi) e la formazione dei gameti (meiosi). Ciò porta all'individuazione nel nucleo della cellula di quelle particolari strutture, i cromosomi, in cui sarà poi riconosciuta la principale sede del DNA e quindi dei geni. Con il progresso della microscopia è stato anche possibile osservare per la prima volta il mondo dei batteri.

Un secondo e fondamentale passo in avanti si ha con l'avvento nella seconda metà del Novecento della microscopia elettronica. Con essa è possibile risolvere strutture di centesimi e millesimi di micrometri (nanometri). La cellula si manifesta ora ben diversa nella organizzazione primitiva dei batteri (procarioti) in cui è priva di nucleo e in quella più evoluta, con nucleo, di tutti gli altri organismi (eucarioti). In questi la cellula si rivela attraversata da un reticolo complicato di canali (reticolo endoplasmico), dotata di uno scheletro complicato di fibre (citoscheletro) e provvista di tutta una serie di organelli di varia forma, dai mitocondri ai ribosomi, al Golgi, a vari tipi di vacuoli. La conoscenza sempre più approfondita dei dettagli della struttura, per esempio della membrana cellulare con il suo doppio strato lipidico, ha consentito di entrare nell'organizzazione e nel modo di funzionare della cellula. La microscopia elettronica ha anche permesso di scoprire il nuovo mondo subcellulare dei virus e dei fagi.

Con la seconda metà del Novecento ha inizio un profondo rinnovamento della biologia cellulare, tuttora in corso, in cui si cerca di decifrare con metodi sempre più sofisticati l'organizzazione e il funzionamento della cellula e dei vari tipi di cellule in condizioni normali e patologiche. Il rinnovamento è legato all'avvento della biologia molecolare. Con questa, al di là dello studio delle ultrastrutture rivelate dalla microscopia elettronica, le ricerche di genetica molecolare e di biochimica consentono di penetrare nel più intimo funzionamento della cellula. L'indagine sperimentale si avvale di biotecnologie avanzate spesso legate alla manipolazione del DNA (ingegneria genetica). Le caratteristiche biochimiche e i processi cui prendono parte acidi nucleici, proteine ed altre sostanze si stanno rivelando d'anno in anno, si potrebbe dire di giorno in giorno, a giudicare dalle pubblicazioni che escono a getto continuo sui più importanti periodici scientifici come «Nature» e «Science», sempre più ricche e varie. Questo vale sia per i processi che hanno luogo nel citoplasma che per quelli nucleari del genoma, l'insieme dei geni. Basti considerare, solo per portare un esempio, quello che sta emergendo dallo studio del sistema d'espressione di un singolo gene in una singola cellula. Affinché un gene si esprima, cioè trascriva un RNA messaggero per la formazione di una proteina, occorre un complesso di trascrizione al quale partecipano decine di proteine diverse, ciascuna con una propria funzione. La complessità è quindi grandissima anche esaminando il solo momento della trascrizione senza considerare ciò che precede e ciò che segue.

Le conoscenze ottenute in questi ultimi anni mediante il sequenziamento delle basi nucleotidiche di alcuni genomi tra cui quello dell'uomo sono soltanto la prima tappa di un lungo percorso verso una conoscenza approfondita a livello molecolare della cellula e del suo funzionamento. Il panorama sempre più ricco offerto dalla biologia cellulare si riflette anche in un progresso negli studi sullo sviluppo e sul funzionamento di organismi pluricellulari come i vertebrati e l'uomo. Per i pluricellulari si deve tener conto non solo della rete di comunicazioni intracellulari, con i relativi segnali, recettori e trasduttori, ma anche di quella di comunicazioni intercellulari a cui appartengono i morfògeni, i fattori di crescita e segnali di varia natura fra cui gli ormoni. Fenomeni come l'apoptosi, cioè la morte programmata delle cellule, scoperta di recente, mostrano come la vita di una cellula possa, nonostante la sua complessità, essere regolata con precisione dalle reti di comunicazione presenti nell'organismo oltre che nella cellula.

Un sistema che si è affermato in particolar modo nell'evoluzione degli animali, il sistema nervoso, può considerarsi un vertice nel fenomeno della complessità della vita. Il cervello umano conta 100 miliardi di cellule (neuroni), una trentina di miliardi per la sola corteccia, ciascuna collegata alle altre da migliaia di sinapsi, cioè dalle interazioni da cui dipende il suo funzionamento, per cui il numero delle sinapsi si calcola in almeno un milione di miliardi. Il numero di cellule su cui si basa l'organizzazione complessiva di un mammifero come l'uomo è anch'esso sconvolgente, dell'ordine del milione di miliardi. Esso supera le attuali stime del numero di galassie dell'universo, circa 100 miliardi, pur restando inferiore a quello delle stelle ( $10^{21}$ ).

La complessità del mondo dei viventi risulta ancora più grande se si considerano anche i livelli superiori a quelli della cellula e dell'organismo. Il numero delle specie conosciute si è accresciuto dalle 10.000 circa descritte da Linneo ai quasi due milioni attuali, una cifra che, da valutazioni recenti fatte su campionamenti nella canopia della foresta equatoriale, potrebbe raggiungere valori fra i 10 e i 50 milioni di specie. L'esistenza di diverse entità specifiche comporta anche quella di un'enorme varietà di tipi di struttura e d'organizzazione. Lo sviluppo dell'ecologia e dell'etologia nella seconda metà del Novecento ha inoltre mostrato come ogni specie abbia una ricca gamma di relazioni con l'ambiente e, quindi, una miriade di comportamenti diversi.

## **2. Le interazioni nei fenomeni biologici**

È importante sottolineare che la crescita delle conoscenze sui fenomeni biologici ha rivelato

che la loro enorme varietà e complessità dipende da interazioni molto più varie, oltre che più dinamiche, di quelle che si stabiliscono fra gli oggetti del mondo abiotico. Queste interazioni, servendosi di un materiale chimico di base d'eccezionale ricchezza, producono strutture e sistemi di strutture, inseriti gli uni negli altri, dai più semplici ai più complessi. La loro mobile trama produce la straordinaria complessità dei viventi ai vari livelli organici, dalla cellula all'organismo pluricellulare con una crescita in organizzazione che raggiunge il suo culmine nei mammiferi. Ma una grande complessità d'interazioni si ha anche ai livelli più alti, come quello delle specie e delle comunità ed ecosistemi.

Per comprendere come si formi la complessità d'un organismo pluricellulare occorre prendere in considerazione due tipi di processi. Il primo, che si produce sotto i nostri occhi, è quello ontogenetico o di sviluppo, in cui da una semplice cellula, lo zigote, si forma un organismo composto di cellule fra loro differenziate che producono tessuti e organi, in modo da poter sopravvivere, porsi in rapporto con altri organismi e l'ambiente e riprodursi. L'altro, che possiamo solo dedurre perché si è prodotto storicamente e la documentazione è basata principalmente sui fossili, è quello filogenetico o evolutivo per cui, in un passato remoto quasi quattro miliardi di anni fa, da forme semplicissime e ipotetiche di vita derivarono i primi batteri. Questi diedero origine agli eucarioti unicellulari che a loro volta produssero gli organismi pluricellulari, dai più semplici ai più complessi. Questi due processi sono le finestre attraverso cui possiamo dare uno sguardo sulla genesi della complessità nei viventi e cercare di comprenderne modo di essere è significato.

La complessità dei viventi è solo l'aspetto più rilevante di quella che si trova anche nel mondo della non vita, dall'atomo alle galassie, e in quello delle manifestazioni sociali, economiche e psichiche umane. Ciò è divenuto evidente negli ultimi decenni dando origine a una scienza dei sistemi e della complessità che non riguarda la sola biologia. Questa fioritura fa emergere nuove visuali nel pensiero scientifico che si collegano all'olismo (da *olos*, intero) (Procacci, 2001), in quanto pongono l'accento su una visione globale dei fenomeni da considerarsi prioritaria rispetto agli aspetti parziali. L'olismo porta a considerare che il tutto è più delle parti e quindi prende in considerazione il fatto che la genesi di sistemi più complessi comporta l'emergenza di nuove proprietà. Il riduzionismo, fino a ora dominante, che ritiene che dall'analisi degli aspetti parziali si possa dedurre il funzionamento globale, risulta ridimensionato anche se resta utile da un punto di vista metodologico. La biologia, soprattutto attraverso le nuove discipline, la biologia molecolare e l'ecologia, sorte alla metà del Novecento e in cui si manifesta con i più recenti sviluppi l'importanza determinante delle intera-

zioni, si può porre all'avanguardia d'un rinnovamento culturale che richiede l'adozione d'una scienza olistica anziché riduzionistica.

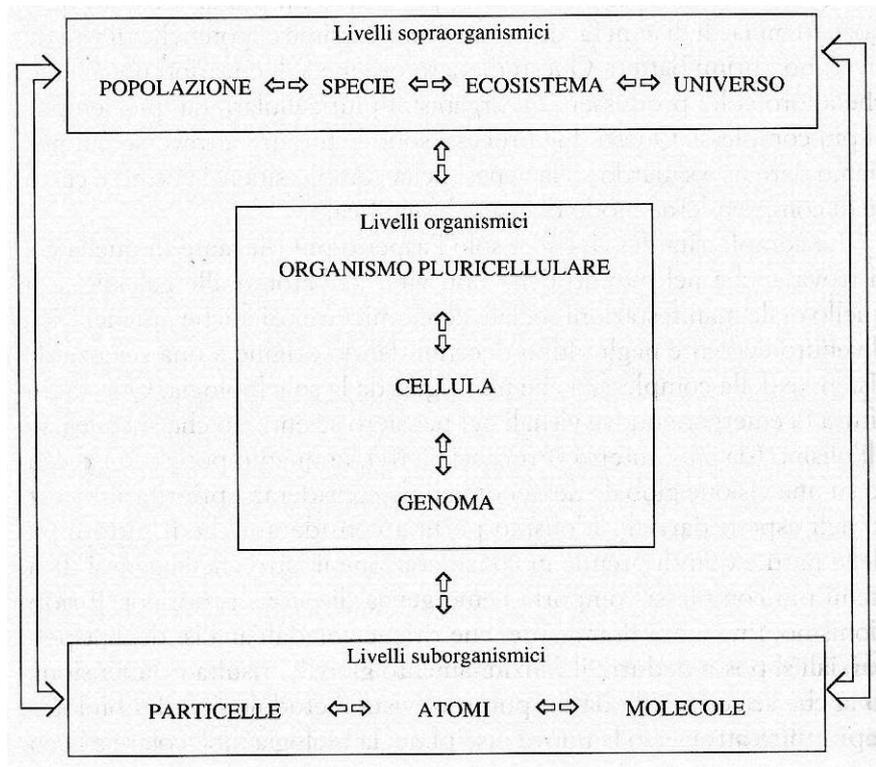
### 3. La gerarchia, i livelli e i sistemi nel mondo biologico

La complessità dei fenomeni della vita si esplica mediante una struttura gerarchica fatta da diversi livelli, contenuti gli uni negli altri a guisa di scatole cinesi. [Nota della redazione: lo schema qui a lato raffigura "I livelli gerarchici della evoluzione biologica e loro interazioni"].

Essi sono interconnessi da rapporti, con un'origine e regolazione che per ciascun livello può provenire dal basso (*down-top*) o dall'alto (*top-down*).

L'organismo, unicellulare o pluricellulare, è al centro della gerarchia dei livelli, in quanto entità essenziale della vita. Se l'organismo è pluricellulare il suo sistema presenta sottosistemi come gli apparati, gli organi e le cellule. A sua volta, nella cellula si distinguono altri sottosistemi fra cui ha importanza fondamentale, in tutti i processi della vita e dell'evoluzione, il genoma, il complesso dei geni. Il genoma è un sistema molecolare formato da molecole di DNA ma richiede, per il suo funzionamento, il concorso d'altre molecole e in primo luogo di proteine enzimatiche. Ciò è un esempio della necessaria interconnessione dei vari sistemi e sottosistemi per le funzioni della vita.

Procedendo verso il basso la vita si basa dunque su sistemi molecolari, ma a loro volta le molecole che li costituiscono sono sistemi atomici e gli atomi sono sistemi di particelle. Andando verso l'alto l'organismo fa parte di sistemi d'organismi come le popolazioni e le specie, e queste di comunità e di ecosistemi, in cui entra una componente ambientale. Gli ecosistemi sono, infatti, composti non solo dalle specie ma da fattori ambientali biotici, dati dalle interazioni fra le specie, e abiotici, per le interazioni con l'ambiente fisico e chimico. Infine,



tutti gli organismi partecipano al grande sistema della vita che è la biosfera. D'altra parte la biosfera è parte integrante della Terra e dell'universo.

Quella sopra descritta è la gerarchia della vita osservata nella sua attualità, nei rapporti che ad ogni momento si pongono fra i costituenti della biosfera, e perciò definita «economica». Esiste però una gerarchia tassonomica, la cui origine è temporale, perché riflette il corso storico dell'evoluzione dei viventi. Questa gerarchia, detta «genealogica» (Eldredge, 1985), si distacca dalla precedente a livello della specie e comprende i *taxa* superiori a questa (generi, famiglie, ordini, classi, *phyla*). Essa, pur non avendo valore «economico», in quanto gli organismi anche se appartenenti a *taxa* superiori interagiscono fra loro e con l'ambiente come individui di una data specie, è l'impronta, sotto forma d'albero filogenetico, dell'evoluzione della vita sulla Terra.

Nella visione gerarchica della vita, che trova la sua piena espressione solo nell'ambito del pensiero olistico, a ogni sistema sovrapposto corrispondono delle proprietà nuove di forma e di funzionamento, per cui è giustificato parlare di livelli diversi. Le proprietà che definiscono i livelli, ma anche molte proprietà all'interno di uno stesso livello, sono dette «emergenti» in quanto non possono essere desunte dalle proprietà del livello sottostante. Così, il livello molecolare aggiunge nuove e imprevedibili proprietà al livello atomico, il cellulare al molecolare, l'organismico (pluricellulare) al cellulare, l'ecosistemico all'organismico. Da ciò deriva che, anche se ci si limita a considerare i rapporti gerarchici dal basso verso l'alto, quelli di causa-effetto generalmente presi in considerazione in ambito riduzionistico e meccanicistico, il risultato non può essere definito in modo strettamente deterministico. La costruzione, dai livelli più bassi a quelli più alti, si basa su novità ed esse si sono affacciate nel corso dell'evoluzione.

Il sistema gerarchico, d'altra parte, è regolato e sottoposto a modificazioni anche dall'alto verso il basso. Le interazioni dall'alto verso il basso s'intrecciano con quelle dal basso verso l'alto in reti complesse e ciò aggiunge ulteriore indeterminazione al funzionamento complessivo dei sistemi viventi. Le attuali teorie legate alla complessità parlano di caos deterministico, d'un ordine all'orlo dal caos (Kauffman, 1993) per il funzionamento dei viventi. Ad esempio, per l'espressione genica le concause sono moltissime ed è difficile separare con un taglio netto, a causa delle loro interazioni, l'azione dei fattori di regolazione d'origine genica da quelli d'origine citoplasmatica. Il flusso d'informazione che porta all'espressione dei geni è bidirezionale, dall'alto in basso, attraverso le cascate geniche di regolazione e dal basso in alto, attraverso le proteine del complesso di trascrizione e altri fattori di provenienza citopla-

smatica come alcuni ormoni.

Nel sistema gerarchico della vita ciò che opera non sono concatenazioni lineari di causa ed effetto ma un sistema regolatore, fatto da una rete d'informazioni e comunicazioni di varia natura. La cellula non funziona come un semplice sistema a cascata che va dai geni (il genotipo) alle proteine (il fenotipo), ma come un sistema complesso in cui, prima che nuove proteine siano formate ad opera dei geni questi devono essere attivati da reti di molecole che regolano l'informazione necessaria per produrle. Essa è dapprima elaborata a livello della membrana cellulare dalla rete dei recettori, sulla base dei segnali che giungono alla cellula dall'esterno, ed è poi trasmessa al nucleo, e quindi ai geni, da una rete di trasduttori. Inoltre, prima che un gene possa esprimersi e produrre una proteina, è necessario che l'informazione citoplasmatica sia elaborata dalle complesse reti regolatrici del genoma. Ciò avviene anche in rapporto alla struttura dei cromosomi su cui i geni sono disposti. Ai segnali che pervengono dall'ambiente interno dell'organismo, e quindi da altre cellule, si sovrappongono anche quelli provenienti dall'ambiente esterno che, negli animali, sono mediati dal sistema neurosensoriale.

L'insieme gerarchico dei viventi funziona come un unico sistema integrato. Esso, dal punto di vista dell'energia, è un sistema aperto, mosso dal flusso continuo dell'energia solare che, dopo essere stata immagazzinata sotto forma di energia chimica nella materia vivente, è dispersa come energia termica e meccanica, ma, dal punto di vista della materia, è invece sostanzialmente chiuso. La materia circola da un organismo all'altro anche se, per periodi più o meno lunghi di tempo, può essere immagazzinata in rocce o depositi, da cui torna agli organismi. L'evoluzione dei sistemi viventi si basa sul fatto straordinario che essi non subiscono degradazione termodinamica, anzi tendono ad aumentare nel corso del tempo la loro complessità e organizzazione. Ciò sembra contraddire la seconda legge della termodinamica, quella dell'entropia o del livellamento dell'energia, secondo cui dovrebbe esservi, in natura, crescita di disordine e non d'ordine. La spiegazione sta nel fatto che un vivente è un particolare sistema complesso lontano dall'equilibrio e dissipativo (Prigogine e Stengers, 1984). Esso non contraddice la seconda legge della termodinamica perché si nutre a spese d'un aumento di disordine nell'ambiente circostante (Schrödinger, 1944).

L'evoluzione dei viventi, com'è sottolineato dalla teoria costruttiva esposta in questo libro, è stata contrassegnata, nel suo insieme, da una crescita d'ordine e d'organizzazione che ha portato a un aumento di complessità e d'autonomia. Questa crescita, che emerge nel corso del processo filogenetico è anche presente nello sviluppo ontogenetico d'ogni singolo viven-

te, dal suo concepimento allo stato adulto. Haeckel aveva enunciato, nel 1866, come legge biogenetica fondamentale, la teoria secondo cui l'ontogenesi, lo sviluppo di un organismo dal germe all'adulto, ricapitola il corso dell'evoluzione della specie alla quale quell'organismo appartiene, la sua filogenesi. Questa concezione, anche se non più accettata in questi termini, è considerata ancora valida per alcuni aspetti (Gould, 1977). Nella biologia degli ultimi decenni, con l'impulso datole dalla corrente *Evo-Devo*, d'evoluzione dello sviluppo, è emersa l'importanza che i processi dello sviluppo embrionale hanno nel condizionare il corso dell'evoluzione. Le novità, prima di affermarsi nell'evoluzione, devono manifestarsi come modificazioni dello sviluppo e v'è quindi intima connessione fra sviluppo ed evoluzione. L'evoluzione biologica è stata, perciò, anche definita come un'evoluzione dello sviluppo.

Il meccanismo che determina la crescita della complessità d'un sistema opera mediante interazioni fra i costituenti, siano essi atomi, molecole, cellule, organismi, popolazioni, specie o comunità, spesso con rapporti costruttivi. Tali rapporti, che implicano attrazione e scambi d'energia e d'informazione fra le entità interagenti, cooperano alla formazione di un tutto più ampio. Però, affinché il sistema non assuma la rigidità della non-vita, poiché la vita è possibile solo nel dinamismo e nella trasformazione, è necessario che le interazioni positive di tipo costruttivo siano accompagnate da quelle di tipo negativo o demolitivo e che all'attrazione possa contrapporsi la repulsione. Ciò comporta in un organismo la fase catabolica del metabolismo, la senescenza e la morte. Ma l'evoluzione, come l'ontogenesi, mostra che nel bilancio complessivo la fase costruttiva prevale sulla distruttiva. L'albero dei viventi presenta molti rami che si sono estinti ma nel complesso si è espanso e diversificato e soprattutto si è verificata la costruzione d'organizzazioni sempre più complesse e autonome fino a quella dell'uomo.

È interessante osservare che i processi biologici dipendono non solo dal complesso sistema gerarchico della vita ma anche dai sistemi della Terra ed extraterrestri, del cosmo. Si può prendere ad esempio ciò che avviene nella concatenazione di fenomeni sulla riproduzione degli uccelli. Questa, in genere, inizia in primavera quando le giornate si allungano perché gli uccelli sono molto sensibili all'aumento della durata dell'irradiazione solare. La luce, assorbita mediante gli occhi e trasformata in impulsi nervosi convogliati al cervello, induce, a partire dai centri dell'ipotalamo, la produzione nell'ipofisi di ormoni steroidi. Questi, trasportati dal sangue, stimolano l'attività delle cellule delle gonadi, e in particolare il loro genoma, entro un complesso sistema di correlazione intercellulare formato da vari tessuti e or-

gani e basato sulla produzione di nuovi ormoni. Tutto ciò porta alla maturazione delle gonadi con la formazione d'uova che, fecondate dagli spermatozoi, assicureranno la futura generazione. Inoltre, gli ormoni sessuali stimolano la difesa del territorio e il corteggiamento con esibizione di danze e livree nuziali ed emissione di canti di richiamo. Ciò favorisce l'accoppiamento e quindi la fecondazione delle uova.

La funzione riproduttiva degli uccelli, quindi, è stimolata esternamente dalla radiazione solare, un fattore di provenienza cosmica, coinvolge i fattori chimici e fisici dell'ambiente terrestre e poi si esplica ai diversi livelli dell'organizzazione animale; da quello organismico (mediante i sistemi neurosensorio, endocrino, circolatorio e respiratorio) a quello cellulare (con i neuroni, cellule endocrine e bersaglio) e molecolare (con la produzione di ormoni e con i geni che sono da essi stimolati per consentire lo sviluppo della gonade e delle uova). Per i rapporti comportamentali di coppia e la nascita della prole sono interessati anche i livelli della specie e dell'ecosistema. Caratteristiche paragonabili di complessità e d'integrazione di livelli si possono, del resto, trovare, con modalità diverse, in moltissimi altri fenomeni della vita. Nel caso della riproduzione degli uccelli alcuni aspetti, ad esempio la produzione del canto, mostrano una nuova dimensione o livello, generalmente non preso in considerazione; quello interiore e psichico, la cui importanza nel funzionamento ed evoluzione dei sistemi biologici è sottolineata nel cap. VIII.

-----  
La **bibliografia** citata dall'Autore in questo Capitolo è, nell'ordine, la seguente:

PROCACCI S., *Alle radici dell'olismo. La filosofia della natura in J.C Smuts*, ESI, Napoli 2001.

ELDREDGE N., *Unfinished synthesis. Biological hierarchies and modern evolutionary thought*, Oxford University Press, New York-Oxford 1985.

KAUFFMAN S., *The origins of order: self-organization and selection in evolution*, Oxford University Press, New York 1993.

PRIGOGINE I., STENGERS I., *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, Parigi 1988.

SCHRÖDINGER E., *What is life? The physical aspect of the living cell*, Cambridge University Press, Cambridge 1944.

GOULD S.J., *Ontogeny and phylogeny*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Mass-Londra, 1977.