

L'interpretazione chimica del vivente. Fondamenti sistemici delle scienze della vita

Giovanni Villani

Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici (ICCOM) del CNR

Area della Ricerca di Pisa

giovanni.villani@cnr.it

Seminario/Presentazione libro

Gruppo Nazionale di Fondamenti e Storia della Chimica

18 Aprile 2023

Saggi



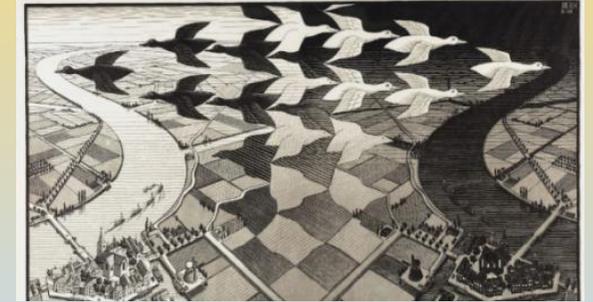
Biblioteca Clueb

Chimica vs Biologia

- **Lungo rapporto storico**
Dall'alchimia alla Biologia Molecolare, dall'elisir di lunga vita al DNA e oltre
- **Idea riduzionista**
Fisica → Chimica → Biologia → Psicologia → ...
- **Chimica vs Biologia**
“La vita non è altro che Chimica”, “La vita non è riducibile a Chimica”
- **Autonomia della Biologia**
Dicotomia inanimato/animato
Dicotomia inanimato/animato/umano
Dicotomia materia/mente (Cartesio: res extensa, res cogitans)
- **Approccio sistemico**

Approccio sistemico

- Sistema/ambiente
- Concetto di sistema



Esempio biologico ed esempio chimico

- Livelli di complessità
- Connessione tra livelli
- Causalità sistemica



Il mondo sistemico molecolare

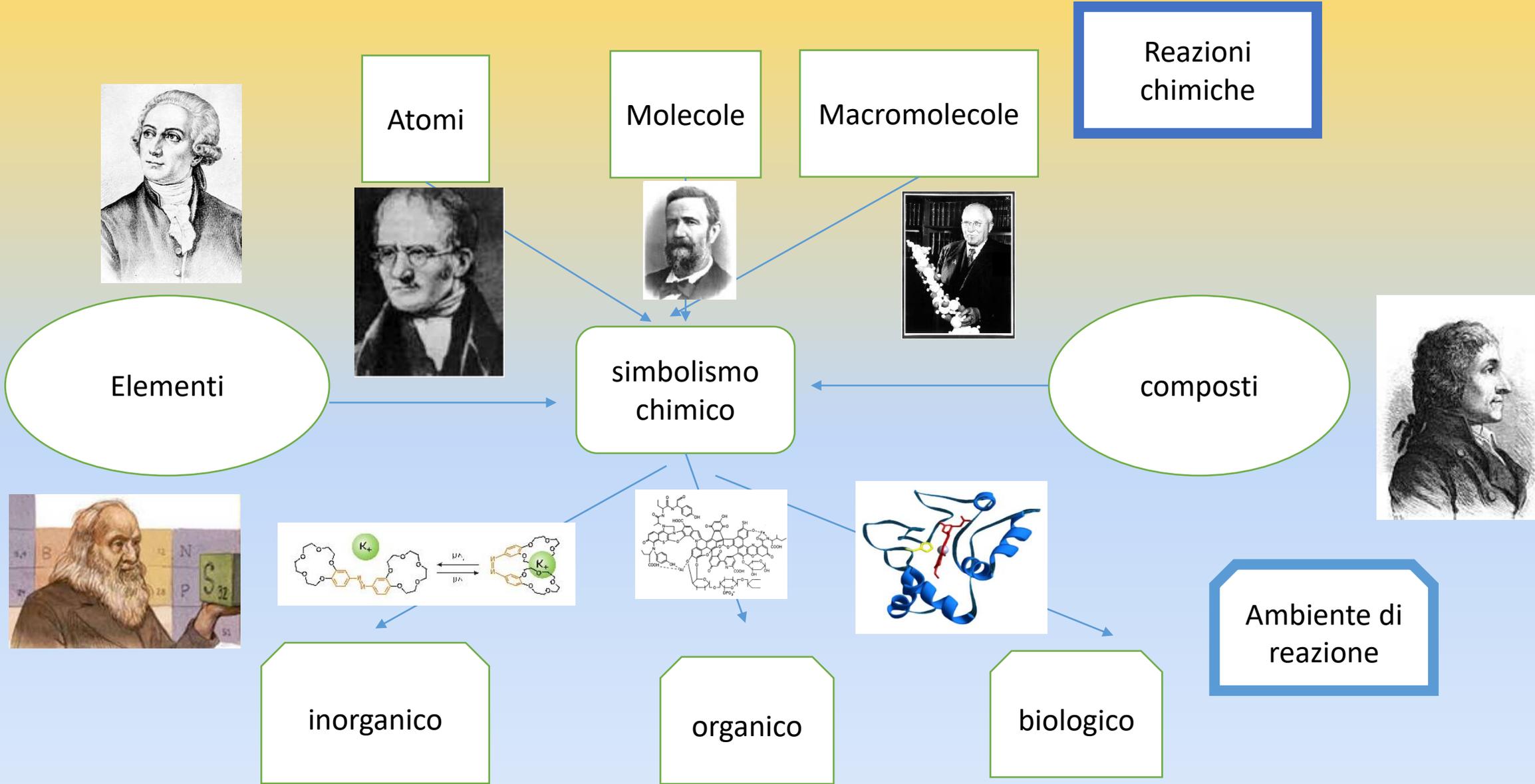
Una chiave di lettura universale: inorganico, organico, biochimico

io dico l'universo ... è scritto in lingua **matematica**, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.

Io affermo però che in ogni dottrina particolare della natura si può trovare tanta scienza propriamente detta, quant'è la matematica che vi si trova [...] la chimica non potrà divenire nient'altro che un'arte sistematica, o dottrina sperimentale, mai una vera e propria scienza; i suoi principi, infatti, sono soltanto empirici e non permettono nessuna esibizione a priori nell'intuizione, e di conseguenza, essendo inadeguati nell'applicazione della matematica, non rendono affatto comprensibili secondo la loro possibilità i principi dei fenomeni chimici - Kant, 1786.

Il mondo materiale scientifico odierno è scritto in linguaggio chimico e i caratteri sono atomi, molecole e macromolecole nel mondo microscopico e sostanze chimiche in quello macroscopico;

le **trasformazioni materiali** possono essere descritte chimicamente tramite reazioni



Introduzione – Il sistema come ente dinamico

Capitolo 1 – La Chimica vs la Biologia nel XIX secolo

Capitolo 2 – La nascita del concetto di macromolecola

Capitolo 3 – Da Mendel alla biologia molecolare

Capitolo 4 – La biologia molecolare oltre le macromolecole

Capitolo 5 – La cellula e il chimismo cellulare

Capitolo 6 – Gli organismi pluricellulari e il loro chimismo

Capitolo 7 – Oltre la genetica classica: epigenetica e metagenomica

Capitolo 8 – What is life? La prospettiva chimica

Capitolo 9 – Ai confini della vita

Conclusione – La spiegazione chimica sistemica come modello da estendere

Introduzione – Il sistema come ente dinamico

- I concetti di ente e trasformazioni in scienza
- Il sistema e l'organismo: le parti strutturate/organizzate che formano un tutto
- Causalità nei sistemi e riduzionismo
- La spiegazione chimica sistemica al vivente

Capitolo 1 – La Chimica vs la Biologia nel XIX secolo

- **La materia del vivente: dal vitalismo alla chimica**

 - La sintesi artificiale di Wöhler dell'urea*

 - La disputa tra Berthelot e Pasteur sulla fermentazione*

 - La scoperta della fermentazione cell-free di Buchner*

- **L'energia e il calore negli esseri viventi**

 - Le “stufe ambulanti” di von Liebig*

 - La conservazione dell'energia: dal vivente a legge universale*

- **L'aumento della complessità nel vivente**

 - Finalismo ed evoluzione delle specie: Darwin, Spencer e Bergson*

- **Due teorie biologiche di ampio respiro**

 - La teoria cellulare*

 - Il “mezzo interno” di Claude Bernard*

Capitolo 2 - La nascita del concetto di macromolecola

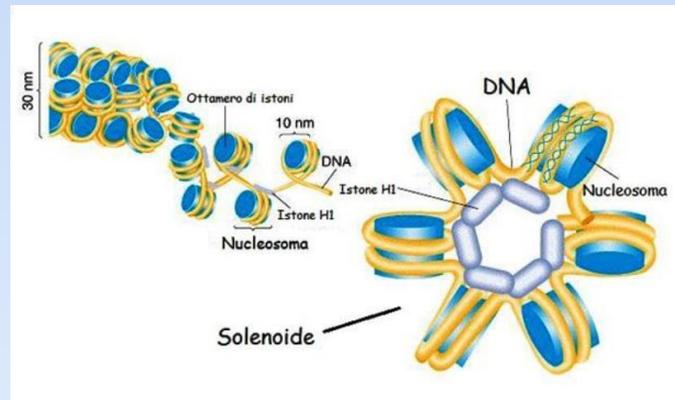
- La teoria protoplasmatica
- Lo stato colloidale
- Verso le macromolecole
- Il folding delle proteine *in vitro* e *in vivo* e la loro denaturazione
- Considerazioni filosofiche sul folding delle proteine
Statistiche e auto-organizzazione
- Determinazione delle differenti strutture delle proteine
- Struttura e forma nelle molecole e nelle macromolecole

Capitolo 3 – Da Mendel alla biologia molecolare

- **Mendel, un innovatore del XIX secolo riscoperto nel XX secolo**
- **Il concetto di gene**
- **La materializzazione del gene: il DNA**
- **La complessificazione del DNA**
- **Il DNA come fattore d'identità di una specie vivente**

Capitolo 4 – La biologia molecolare oltre le macromolecole

- **La cromatina: una struttura dinamica per compattare e utilizzare il DNA**
- **Nanoscienze, nanotecnologie e nanomateriali**
- **La chimica supramolecolare e le macchine molecolari artificiali**



Capitolo 5 – La cellula e il chimismo cellulare

- **Modelli macroscopici di una cellula**
- **La cellula: l'unità fondamentale degli esseri viventi?**
- **Lo stato interno della cellula: i costituenti e i processi che lo caratterizzano**
- **La cellula in un ambiente: la sua capacità di “conoscerlo” e di interagire con esso**
- **Un codice nella cellula e tutti i processi ad esso collegato**
- **Due classi di reazioni chimiche nelle cellule: quelle molecolari e quelle macromolecolari**
- **Due modelli di azione enzimatica: modello chiave-serratura e modello guanto-mano**
- **Il metabolismo energetico**

Capitolo 6 – Gli organismi pluricellulari e il loro chimismo

- **Problematiche filosofiche degli organismi pluricellulari**
- **Aspetti generali del rapporto tra sistema inglobato e sistema inglobante e relative identità**
- **Due tipi di organismi pluricellulari: quelli semplici e quelli complessi**
- **Il chimismo degli organismi pluricellulari e la sua integrazione con il chimismo cellulare**

Capitolo 7– Oltre la genetica classica: epigenetica e metagenomica

- **L'epigenetica**

La dimensione ambientale della vita in [Morin](#)

- **La metagenomica**

- **Motivi biologici e culturali contro la [simbiosi](#)**

Capitolo 8- What is life? La prospettiva chimica

- L'efficacia dell'approccio chimico allo studio della vita
- Sistemi chiusi e sistemi aperti
- Prigogine e la Termodinamica di non-equilibrio
- Il binomio sistema-ambiente
- Una considerazione filosofica su “what is life”

Capitolo 9 – Ai confini della vita

- Sono i virus degli esseri viventi?
- I confini spazio-temporali della vita: la sua origine e la sua diffusione fuori della Terra
- Una vita “artificiale” creata in laboratorio
- Ai confini della vita: lo stato del vivente. Salute, malattia e morte

Conclusion - La spiegazione chimica sistemica come modello da estendere

- Riepilogo dell'ottica chimica sistemica
- La strutturazione del mondo materiale
- La spiegazione chimica come modello per altre discipline

Utilizzo didattico del libro

- Relazione tra chimica e biologia: essenziale in chi insegna entrambe
- Orientamento area universitaria biofisica, chimica, biologia, biotecnologia, farmacia e medicina
- Progetti interdisciplinari
- Istituti a indirizzo biologico e/o medico

Conclusione

- Come la scienza «modella» la realtà: sistemica

- Le differenti «scale»:

Complessità → (tempo, dimensione, energia)

- Perché la biochimica è così efficace?

Sistemica, rappresentazione/modelli

- La Chimica: un linguaggio per leggere il mondo materiale

- La Chimica: una scienza della complessità sistemica

- Aspetti disciplinari e interdisciplinare del concetto di “vita”

La fisica indaga la natura essenziale del mondo e la biologia descrive una protuberanza locale.

La psicologia, la psicologia umana, descrive una protuberanza su una protuberanza.

Willard Van Orman [Quine](#) (1981)

Il fisico Philip W. [Anderson](#), premio Nobel per la fisica nel 1977, partendo da quando aveva detto Paul Dirac (da lui indicato come “lo scopritore del positrone”) che, dopo che le leggi della Meccanica Quantistica erano state stabilite, “il resto è chimica”, cioè fisica applicata, dice:

«L’arroganza del fisico delle particelle e la sua ricerca intensiva possono essere alle nostre spalle (lo scopritore del positrone ha detto “il resto è chimica”), ma dobbiamo ancora riprenderci da quella di alcuni **biologi molecolari**, che sembrano determinati a cercare di ridurre tutto ciò che riguarda **l’organismo umano** alla “sola” chimica, dal comune raffreddore, a tutte le malattie mentali fino all’istinto religioso. Sicuramente ci sono più livelli di organizzazione tra l’etologia umana e il DNA di quanti ce ne siano tra il DNA e l’elettrodinamica, e ogni livello può richiedere una struttura concettuale completamente nuova»

Philip Warren Anderson, More is different, in «Science», 177 (1972), pp. 393-396].

La biologia oggi è a un bivio. Il paradigma molecolare, che ha guidato con tanto successo la disciplina per gran parte del XX secolo, non è più una guida affidabile. La sua visione della biologia ora realizzata, il paradigma molecolare ha fatto il suo corso. La biologia, quindi, ha una scelta da fare, tra il percorso comodo di continuare a seguire l'esempio della biologia molecolare o quello più corroborante di cercare una visione nuova e stimolante del mondo vivente, che affronti i principali problemi della biologia che la biologia del XX secolo, la biologia molecolare, non poteva gestire e, quindi, ha evitato. Il primo corso, sebbene altamente produttivo, trasformerà sicuramente la biologia in una disciplina ingegneristica. Il secondo, sostiene la promessa di **fare della biologia una scienza ancora più fondamentale, che, insieme alla fisica, sonda e definisce la natura della realtà.**

Carl Richard [Woese](#), 2004

La spiegazione riduzionista incentrata sulle parti non può ritenersi sufficiente nello studio dei sistemi/organismi. Essa elimina alla radice l'organizzazione, l'unità complessa che sostiene il sistema.

D'altro canto, neppure la posizione contraria al riduzionismo, l'approccio olistico, può essere considerata totalmente efficace nel mettere in luce la complessità sistemica. Essa, infatti, cerca la riduzione di tutti gli aspetti complessi del sistema a quello di totalità.

Riduzionista oppure olistica che sia, la spiegazione in entrambi i casi è troppo semplificante: entrambe queste ottiche sono figlie del paradigma scientifico/filosofico della **semplicità** che implica sempre l'esistenza di una razionalizzazione semplice sottesa alla **complessità** dei processi naturali.

La posizione [sistemica](#) è, invece, molto importante e rappresenta una sorta di posizione intermedia tra quella riduzionista e quella olistica, una sorta di sintesi. Nel concetto di sistema, infatti, possono essere fatti confluire sia aspetti riduzionistici sia olistici, tanto le parti quanto il tutto.

La posizione sistemica, inoltre, trasforma le dicotomie in differenze epistemologiche, da analizzare e studiare.

Tre sono le asserzioni chiave intorno a cui si articola l'idea di sistema, asserzioni che possono sembrare contraddittorie, ma che sono necessarie e complementari in tale concetto.

Il sistema è più della somma delle sue parti considerate in isolamento o giustapposte. Il sistema possiede molto di più delle sue componenti considerate isolatamente: la sua organizzazione, la sua unità globale e le nuove qualità e **proprietà emergenti** da queste, sono i fattori che lo differenziano dal mero aggregato di parti. Queste nuove caratteristiche non si manifestano, però, soltanto al livello della globalità, al livello del sistema inteso come un “tutto”, ma **anche al livello delle singole parti**. *Tutto ciò che forma, si trasforma.*

Il sistema è meno della somma delle sue parti considerate in isolamento o giustapposte. Raramente è stata riconosciuta questa idea. Eppure è deducibile dall'idea di organizzazione e si lascia comprendere in maniera più semplice di quanto non sia l'emergenza. La presenza di un'organizzazione equivale, infatti, all'esistenza di **vincoli**, di restrizioni sugli stati che possono assumere le parti che compongono il sistema.

Esempio molecolare. Le acquisizioni e le perdite ci indicano che gli elementi che prendono parte a un sistema sono trasformati *anzitutto in parti di un tutto*.

Il sistema è un ente intrinsecamente dinamico. Il sistema ha una duplice natura di ente e processo: è un ente dinamico. La classica divisione di **ente** e **processo** utilizzata in scienza va, quindi, rivista in un'ottica sistemica dove **ambidue questi aspetti confluiscono nel sistema**. Nella chiusura identitaria del sistema, quella che lo separa concettualmente dall'ambiente, alcuni processi dinamici entrano a costituire la dinamica interna al sistema, altri costituiscono l'interazione dinamica del sistema come un tutto con l'ambiente. Possiamo, quindi, dire che un sistema è un ente con interazioni dinamiche intrinseche tra i suoi costituenti e in interazione dinamica globale con l'ambiente.

La teoria della torta a strati (layer-cake) di Oppenheim e Putnam ha tre componenti.

In primo luogo, pretende di essere una teoria *comprehensive* (onnicomprensiva), cioè ritiene di essere in grado di rendere conto di tutti i casi in cui si possa parlare di “livelli”.

In secondo luogo, i livelli sono correlati da relazioni compositive, strutturate in modo graduale, *stepwise* (passo passo). In pratica, tutti gli enti di un livello sono correlati a quelli del livello inferiore adiacente essendo enti formati dall'insiemi di parti nel piano inferiore e, a loro volta, come costituenti per gli enti che si trovano al livello superiore adiacente. Probabilmente è questo aspetto che ha dato il nome di “torta a strati”.

Infine, Oppenheim e Putnam assumono una stretta relazione (*correspondence*) (corrispondenza) tra gli enti che compongono un livello e i predicati e le teorie scientifiche legate ad essi. Questo significa che i livelli della scienza si associano ordinatamente ai livelli della natura, in modo che per ogni livello in natura vi sia una disciplina scientifica o teoria corrispondente e viceversa.

Tali autori propongono sei “livelli fondamentali”: gruppi sociali, esseri viventi pluricellulari, cellule, molecole, atomi e particelle elementari.

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

Il livello inferiore delle parti costituenti.

Il livello del sistema.

Il livello superiore dell'ambiente in cui il sistema è inglobato.

Questi sono i tre livelli minimi da tenere in conto, ma a volte i sistemi sono così integrati verso l'interno e verso l'esterno, che la profondità di analisi deve essere spinta anche in altri livelli di complessità.

In pratica, più il nostro sistema d'interesse è integrato nel tutto, più alto è il numero di livelli di complessità che si devono considerare per studiarne la dinamica.

È, ovviamente, sempre possibile **ridurre la complessità della sua dinamica**, riducendo i piani di complessità implicati ma, in questo caso, si deve sempre tenere presente che si stanno semplificando le causalità e si ottiene una **dinamica semplificata** per il nostro sistema.

Causalità in orizzontale. I processi che avvengono nel nostro sistema, la sua dinamica, si esplica nel suo livello di complessità con interazioni “alla pari” tra sistemi. Nel caso molecolare, le molecole interagiscono tra di loro e *idem* tra le cellule nel livello cellulare di complessità.

Causalità bottom-up. La dinamica di un sistema dipende dalla dinamica dai suoi componenti. La dinamica interna alla molecola (le vibrazioni o altri moti interni) influenza quello che il sistema fa o può fare. Allo stesso modo, lo stato cellulare influenza l’organismo nella sua totalità, come le malattie possono mettere in evidenza.

Causalità top-down. La dinamica di un sistema dipende dall’ecosistema, dall’ambiente in cui il sistema è posizionato. Una molecola o una macromolecola in una cellula “agisce” in virtù delle sue caratteristiche, ma anche in funzione di quelle dell’ambiente. Un animale in una nicchia ecologica, oltre a dipendere dagli altri sistemi presenti (gli altri organismi viventi), dipende anche dall’ambiente generale in cui si trova, dalle condizioni fisiche a quelle globali biologiche presenti.

Causalità circolare. Questi tre livelli di complessità possono essere attraversati da cicli di processi che li coinvolgono direttamente e in maniera così integrata da operare sul nostro sistema in maniera complessiva.

Ambedue queste varianti del riduzionismo, e tutte le altre «varianti» non considerate, implicano una sola direzione della spiegazione, sempre bottom-up. Una spiegazione ciclica come quella sistemica, invece, prevede la compresenza di spiegazioni bottom-up e top-down, con l'aggiunta della loro chiusura esplicativa in un ciclo.

A un certo livello di spiegazione un essere umano può non essere altro che un insieme di 10^{27} protoni, neutroni ed elettroni, ma al livello del comportamento che esso può esibire è indubbio che un uomo è più dell'ammasso delle sue particelle costitutive, più della somma delle sue parti e loro interazioni. Non giova a niente dire che se si includessero tutte le relazioni tra le parti si riatterrebbe l'uomo. Chi sostiene questo, da un lato non ha presente che significa esplicitare tutte le relazioni di 10^{27} protoni, neutroni ed elettroni, per fermarci a queste particelle che ancora non sono elementari e, dall'altro, non ha chiaro la differenza tra un componente nel sistema e lo stesso ente isolato.

Nella discussione sul riduzionismo e l'anti-riduzionismo un ruolo essenziale lo deve svolgere l'analisi del significato di spiegazione. Dire che l'unica spiegazione è quella delle particelle costituenti è fuorviante. Le proprietà degli esseri umani, per fare un ovvio esempio, sono una manifestazione del particolare livello e tipo di complessità considerato. Rispondere a problematiche complesse dando per assodato che solo una descrizione meccanicistica possa «spiegare» una situazione è non capire che in questo caso più che spiegare al massimo si «descrivere» la situazione. Se riduzionismo significa che tutte le spiegazioni della complessità vanno ricercate a un livello inferiore, e in definitiva nel mondo dei costituenti più elementari della materia, allora il riduzionismo è totalmente falso, in linea di principio, oltre che da un punto di vista pratico. Invece, ci si deve attendere, e nei casi che ci riguardano lo vedremo in dettaglio, di trovare nuovi tipi di organizzazione ad ogni livello di complessità, via via che si procede dal mondo dei quark a quello dei nucleoni, e poi a quelli degli atomi, delle molecole e degli insiemi di molecole organizzate che costituiscono le cellule. Ciascuno di queste nuove entità avrà specifici «comportamenti», manifestazione di un particolare livello di organizzazione raggiunto in specifiche condizioni ambientali.

Questo libro, l'abbiamo detto ma forse è già evidente dalle precedenti argomentazioni, è di impostazione nettamente anti-riduzionista, ma, proprio per l'importanza filosofica che riveste, lasciateci dire qualcosa sull'anti-riduzionismo presente in biologia e, ancora di più, in filosofia della biologia. Io ritengo che la tesi di fondo di molte posizioni anti-riduzionistiche in ambito biologico sia sbagliata e dannosa alla «causa anti-riduzionista». La tesi di fondo di questi anti-riduzionisti è, infatti, l'antinomia tra vivente e non-vivente. Non è casuale che questi anti-riduzionisti pongono l'accento sull'insufficienza dell'approccio fisico e chimico nello studio del vivente. A questi anti-riduzionisti, dico che la loro soluzione al riduzionismo è peggiore del problema che vogliono risolvere. Se al riduzionismo opponiamo una separazione assoluta, un'antinomia filosofica, tra il vivente e il non-vivente, creiamo una duplice area di riduzione. Se poi vi aggiungiamo anche la dicotomia dell'animato con l'umano, introduciamo un'ulteriore dicotomia, ma non si risolve il problema. Questo è evidente sulla problematica dell'origine della vita e dell'uomo. Avrebbero gioco facile i riduzionisti se chiedessero a questi anti-riduzionisti come spiegano, allora, i passaggi tra queste aree dicotomiche.



nomologico-deduttivo è quella di spiegare perché certe cose sono accadute. Pertanto, esso ci dice anche, in seconda istanza, perché ci si doveva aspettare queste cose. Potevamo aspettarcele, poiché dovevano accadere. Nel modello probabilistico-induttivo le funzioni sono invertite. Esso spiega, in primo luogo, perché ci si doveva (o non ci si doveva) aspettare che certe cose accadesero. Solo secondariamente esso spiega perché quelle cose sono accadute, e precisamente «perché esse erano altamente probabili». Mi sembra, quindi, preferibile evitare di dire che il modello probabilistico-induttivo spiega ciò che accade e limitarsi, invece, a dire che esso giustifica certe aspettative e previsioni.

La chimica che ci apprestiamo ad analizzare è piena di enti ed eventi individuali; una spiegazione tramite leggi che, come abbiamo visto, *devono non contenere nomi individuali e riferimenti spatio-temporali*, mal si adatta a tale disciplina. Questo non significa, tuttavia, che la chimica non «spieghi» i fatti individuali, cioè non connetta i casi «singoli» al «generale», ma solamente che la connessione avviene in maniera diversa da quella fatta tramite leggi generali. Qui non mi addentrerò, inoltre, nel problema se per la chimica esistano o meno sue leggi specifiche. Il lettore interessato può fare riferimento all'altro mio libro già citato, *Complesso e organizzato*.

La spiegazione che la chimica offre o ricerca dei fenomeni che studia è qualitativamente incomparabile con il modello nomologico-deduttivo di Hempel-Oppeheim e in questo senso si deve considerare radicalmente distinta da quella della fisica. Vediamolo in riferimento alle leggi e alle condizioni iniziali su cui si impernia lo schema nomologico-deduttivo. Per quanto riguarda le leggi, ammesso che quelle della chimica possano classificarsi in questo modo, esse sono di natura diversa da quelle della fisica in quanto riguardano la costituzione piuttosto che il comportamento degli enti materiali e tali leggi hanno un limitato valore euristico ed esplicativo. Non sono leggi di necessità, ma norme limitative. Per esempio, le leggi delle proporzioni definite e multiple non permettono, in generale, di prevedere quale particolare composto si formi in una reazione, ma soltanto – e con notevoli eccezioni – una serie di possibili prodotti. Per quanto riguarda poi le condizioni iniziali utilizzate dal modello nomologico-deduttivo, esse, in congiunzione con le leggi della chimica, non consentono di costruire catene univoche di cause ed effetti. Le leggi della fisica, in astratto utili a ciò, sono in pratica inutilizzabili, e pertanto prive di valore esplicativo, in quanto le sostanze studiate dalla chimica sono di gran lunga troppo complesse perché si possa trarre qualche lume sul loro comportamento da leggi generali traducibili solo in equazioni intrattabili da uomo o da macchina. Inoltre, i differenti livelli di complessità della realtà e le «emergenze» tipiche di ogni livello, ci tolgono ogni speranza di poter risolvere questi «problemi tecnici» e avere spiegazioni *ab initio*.

Accenniamo, ora, all'aspetto saliente della spiegazione molecolare proposta dalla chimica. La cosa essenziale da notare è la particolarità della spiegazione chimica di rifarsi a uno specifico piano microscopico, quello delle molecole, per comprendere le proprietà delle sostanze macroscopiche chiamate sostanze chimiche²⁵. Questo tipo di spiegazione è strettamente legato alla storia di tale disciplina

²⁵ G. Villani, *Una weltanschauung scientifica: la chimica*, Atti del Convegno triennale del-





Seconda legge della termodinamica, con l'evidenza che il mondo vivente è organizzato/ordinato e le sue specie, nascendo ed estinguendosi, evolvono verso una complessità crescente. È questo l'ambito in cui una forma specifica di vitalismo resisterà a lungo. Non a caso, anche nel XXI secolo, non tutti sono convinti della spiegazione scientifica dell'ordine e della complessità del vivente.

Considereremo, infine, tre teorie generali che hanno avuto ampia fortuna nello sviluppo successivo della biologia. Accenneremo alla teoria evoluzionistica di Darwin che nella biologia ha avuto in tutto il XX secolo un ruolo predominante, ma che non tratteremo in dettaglio in questo libro; parleremo della teoria di Claude Bernard del «mezzo interno» del vivente e della lotta del vivente per conservare la diversità dell'interno rispetto all'esterno ambientale e, infine, della teoria cellulare, la cui importanza è evidente. Queste tre teorie, in forme differenti, saranno riprese più avanti in questo testo per la loro importanza nel XX secolo e nella biologia odierna.

1. La materia del vivente: dal vitalismo alla chimica

Uno dei problemi «storici» della biologia in quanto studio dell'animato e del suo rapporto con le scienze dell'inanimato è stato sempre quello se esistesse o meno una differenza materiale tra questi due mondi.

Possiamo dire che nello studio del vivente in tutta la cultura occidentale, due posizioni si sono contrapposte sulla sua composizione materiale: quella che riteneva la materia del vivente diversa da quella del mondo inanimato e quella per la quale la materia fosse di un solo tipo, la stessa sia nel mondo inanimato sia in quello animato, ma, in quest'ultimo, essa fosse «organizzata» in maniera differente, con ovviamente differenti significati del termine «organizzazione».

Per Aristotele, gli esseri viventi e il mondo degli oggetti inanimati erano composti dagli stessi elementi naturali, dalla stessa materia. La qualità che era intrinseca alla vita non andava, quindi, cercata nella materia, ma nella sua forma, intesa in senso aristotelico. Tutti gli esseri erano il risultato dell'unione di una materia con una forma e nel caso dei viventi ciò significava l'unione del corpo con l'anima.

La storia della biologia che va dagli antichi Greci al XVII secolo è caratterizzata dall'opposizione animismo/materialismo. Tale opposizione non appare più apertamente oltre tale periodo, ma essa resta sottesa nelle spiegazioni successive, anche in quelle che rifiutano l'anima, ed è un problema fondamentale che persisterà anche quando l'anima sarà sparita dai concetti filosofico-scientifici. Ancora oggi, seppure in un significato differente da quello originale, per distinguere gli esseri viventi da quelli non viventi, usiamo i termini *inanimato* e *animato*.

Cartesio era altrettanto materialista di Aristotele, ma per lui la materia esisteva in due tipi differenti: quella che costituiva i corpi degli esseri viventi (uomo compreso) era uguale a quella del mondo inanimato e si caratterizzava per la sua «estensione» nello spazio (*res extensa*). Il secondo tipo era quella caratteristica della mente umana (*res cogitans*). Per Cartesio, il corpo umano (come quello di tutti gli animali) era una macchina governata dalle leggi della meccanica; invece l'anima, localizzata nel cervello, era composta da una materia qualitativamente differente. Si poneva, ovviamente, il problema di come queste due «materie» po-



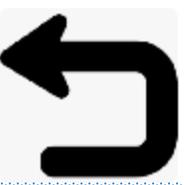
La nascita del concetto di macromolecola

La nascita del concetto di macromolecola biologica è avvenuta nella prima metà del xx secolo. Le macromolecole sono molecole giganti del peso molecolare di decine o centinaia di migliaia di dalton (un dalton è circa la massa atomica dell'atomo di idrogeno), nel caso del DNA anche molto di più. A tale concetto si è pervenuti superando due ostacoli scientifici generali. Il primo è quello di capire come sia possibile avere molecole così grandi, tenute insieme dai normali legami chimici. A lungo, infatti, all'ipotesi dell'esistenza di sostanze con particelle elementari formate da molecole giganti è stata contrapposta l'idea che le sostanze biologiche, che sembravano essere formate da queste macromolecole, fossero degli «aggregati» di piccole molecole. Questo è il caso della natura colloidale delle sostanze degli esseri viventi che sarà a breve esaminato. Un secondo ostacolo scientifico da superare per pervenire al concetto di macromolecola è stato quello che Erwin Schrödinger definì il problema del «polimero aperiodico». Schrödinger fu uno dei padri della meccanica quantistica e negli anni Quaranta del xx secolo scrisse il libro *What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cos'è la vita? L'aspetto fisico della cellula vivente) che ebbe una notevole influenza sulla nascita della biologia molecolare, libro di cui ci occuperemo più avanti. Egli osservò che, quand'anche si fosse ritenuta possibile l'esistenza di un'enorme molecola, essa poteva essere solo formata da una singola unità ripetuta un numero virtualmente infinito di volte, come le macromolecole che oggi chiamiamo polimeri. La possibilità per un organismo di sintetizzare un polimero aperiodico, una macromolecola formata da differenti unità ripetitive in uno specifico ordine, poneva uno scoglio scientifico/filosofico da superare. Fu il superamento di questa difficoltà a gettare le basi dell'attuale concetto di macromolecola biologica, basi valide sia per le proteine sia per gli acidi nucleici.

Prima di analizzare questi due problemi generali, consideriamo un caso un po' particolare: una «macromolecola» con le caratteristiche della vita.

1. La teoria protoplasmatica

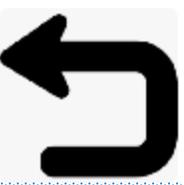
Il termine «protoplasma» era sinonimo di «materia vivente». Nella teoria protoplasmatica, infatti, si riteneva che i tessuti degli esseri viventi fossero formati da un aggregato di piccole masse gelatinose, senza membrana e senza nucleo e, quindi, non configurabili come cellule. Il protoplasma era, quindi, una forma



Lo stato colloidale era uno stato viscoso, intermedio tra lo stato solido e quello liquido. Esso era, inoltre, uno stato dinamico, uno stato energetico, la cui energia veniva dissipata nei processi vitali. Alla base di tale teoria c'era un problema generale riguardante le proprietà necessarie alle sostanze di supporto alla vita, problema ancora oggi non superato. Da un lato, c'erano le sostanze allo stato solido; esse avevano una forma fissa, ma si riteneva che non avessero il tempo di cambiare forma per essere «adatte» alla vita. Dall'altro, le sostanze allo stato liquido: senza forma e con cambiamenti temporali quasi istantanei. Per lo stato della materia vivente, servivano caratteristiche intermedie e furono trovate in questo stato colloidale della materia. In questo stato la materia aveva una certa forma, ma questa poteva essere modificata in qualsiasi momento, abbastanza lentamente da poter essere utile a descrivere i processi nei viventi. Lo stato colloidale, quindi, conciliava la forma e la temporalità della materia con i bisogni statici e dinamici tipici del vivente. Un altro punto essenziale da considerare era il rapporto tra la vita e l'ambiente e, anche in questo caso, lo stato colloidale sembrava avere le giuste caratteristiche. La forma del colloide, infatti, era suscettibile di trasformazione sotto l'influenza di diverse azioni esterne (la temperatura, ad esempio) e la materia colloidale, quindi, aveva una certa «sensibilità» a queste proprietà esterne. Un ulteriore esempio del rapporto tra lo stato colloidale e la vita era il caso delle reazioni lente che servivano a quest'ultima ed erano spiegate in questa teoria con la diffusione lenta delle sostanze reattive nella materia colloidale. Si riteneva, infatti, che, a causa della loro lenta diffusione, la materia colloidale potesse «controllarle» e «correlarle» alle altre reazioni, poiché la loro velocità di diffusione poteva dipendere dalle altre reazioni simultanee in grado di modificare lo stato delle sostanze colloidali. Tutto sembrava collegare la materia colloidale alla vita.

In parole povere, si riteneva che lo stato solido fosse troppo organizzato e troppo rigido per servire a spiegare la vita; lo stato liquido, invece, era troppo disorganizzato e troppo veloce per essere modificato in modo organico e servire alla vita. Lo stato colloidale, infine, era adatto alla vita perché la materia in quello stato non era né troppo organizzata né troppo disorganizzata ed era il luogo in cui i processi vitali potevano interagire attraverso i cambiamenti fisici/chimici interni ed esterni. Il problema che la teoria dello stato colloidale cercava di risolvere era, quindi, quello di trovare un materiale in cui far nascere l'organizzazione, problema che si incontrava allora e si incontra ancora adesso nella spiegazione degli esseri viventi. Per spiegare la vita, era necessario che la materia degli esseri viventi fosse «soft», ma suscettibile di organizzazione per dare vita a esseri viventi organizzati. Lo stato colloidale aveva il vantaggio di conciliare lo stato fluido, necessario all'ambiente chimico, e lo stato solido, richiesto dall'organizzazione.

La soluzione era seducente ed evidenziava problematiche valide anche oggi. Affinché le macromolecole potessero essere utili nella comprensione della vita, fu necessario teorizzare che esse non fossero un substrato indistinto e gelatinoso, ma ciascuna di esse avesse una propria forma ben definita, ma suscettibile di mutare sotto l'azione di differenti agenti. La forma delle macromolecole e la sua «sensibilità» agli agenti fisici/chimici, come vedremo, giocheranno un ruolo nell'organizzazione della chimica cellulare, un ruolo simile a quello svolto



5. Considerazioni filosofiche sul folding delle proteine

Per prima cosa, partendo dalle differenze tra il folding *in vitro* e quello *in vivo*, vogliamo evidenziare il significato e l'importanza, filosofica e non solo scientifica, dell'ambiente in cui avviene un processo e dell'ambiente cellulare altamente complesso, nel caso dei sistemi viventi. In un'ottica tipicamente riduzionista, ogni processo viene studiato separatamente dagli altri e quest'ottica ci serve a capire le caratteristiche intrinseche del processo. Non bisogna però mai dimenticare che i processi naturali avvengono spesso insieme e si influenzano tra loro. L'ottica sistemica può aiutare a semplificare lo studio, considerando in un primo momento i processi separati e poi analizzare le loro connessioni su tale risultato.

Una seconda considerazione filosofica sul folding delle proteine è quella relativa all'importanza dell'ambiente di tale processo nella determinazione del risultato finale, della struttura stabile. Questo, dal punto di vista filosofico, introduce la problematica del significato di ente isolato e di ente come parte di un tutto. È un caso analogo agli atomi isolati e agli atomi nella molecola, con la determinazione specifica che, nel caso molecolare, gli atomi si uniscono a formare un nuovo sistema; nel caso delle macromolecole, le interazioni con altre specie chimiche possono portare a differenti forme dello stesso ente macromolecolare.

Abbiamo detto che la proteina *in vitro* spesso presenta una configurazione stabile molto simile alla configurazione nativa (*in vivo*), sebbene quest'ultima dipenda sia dalla struttura primaria della proteina (struttura molecolare) sia dall'ambiente in cui essa si trova. La similitudine tra le due configurazioni può sembrare «strana» se quella *in vivo* dipende anche dall'ambiente ed è ottenuta in maniera completamente differente (si pensi solo alla presenza dei ribosomi, agli enzimi e agli chaperon molecolari). Per capire questa «stranezza» ci può aiutare la meccanica quantistica. Abbiamo visto che nella meccanica quantistica gli stati globali del sistema sono energeticamente separati. Se la separazione energetica di tali stati è così ampia che l'interazione ambientale non può modificarli, possiamo assumere che lo stato che il sistema assume nell'ambiente è molto simile al suo stato isolato.

Una terza considerazione filosofica riguarda la forma macromolecolare. Essa si differenzia concettualmente dalla struttura della macromolecola e questo è il punto che ci porta a dire che le macromolecole sono un livello di complessità superiore rispetto alle molecole perché hanno proprietà non spiegabili con la sola struttura molecolare, come abbiamo visto nelle proteine denaturate. Dovendo, tuttavia, la macromolecola «lavorare» in un ambiente cellulare, la sua forma è stata «selezionata» dall'evoluzione per adattamento all'ambiente e le malattie dovute a folding differenti della stessa proteina, ne sono una riprova.

Queste considerazioni aprono un discorso generale su che cosa si debba intendere come ambiente e sul rapporto ente-ambiente. Che cosa implica distinguere un pezzo di realtà in sistema+ambiente, e altre problematiche filosofiche, oltre che scientifiche, di questo tipo? Qui vogliamo evidenziare che ogni processo sistemico è «guidato» sia da aspetti intrinseci (macromolecolari, in questo caso) sia da aspetti estrinseci (ambientali) e il folding delle proteine non fa eccezione, anzi ne è un buon esempio. Il rapporto, inoltre, tra gli aspetti intrinseci ed estrinseci, in questo come in altri casi, è complesso, in senso tecnico. Ogni sistema+ambien-

te, ogni eco-sistema, è attore e recettore nello stesso tempo. Le stesse regole di interazione si modellano reciprocamente. Questo non sempre è evidenziato nelle teorie scientifiche. Morin, ci dice che il carattere competitivo della selezione naturale, che la teoria darwiniana ha così ben evidenziato, fa parte della categoria concorrenziale dell'eco-organizzazione, ma ciò che la selezione integra non è soltanto concorrenze, ma anche complementarità. L'evoluzione, dunque, non è soltanto effetto, prodotto, ma anche causa e fattore di coproduzione della realtà sistema+ambiente complessa. Su questo punto torneremo più avanti. Ora lasciamo l'esempio del folding delle proteine per discutere un altro aspetto ancora più generale.

5.1. *Statistiche e auto-organizzazione*

Sempre partendo dal caso specifico considerato, vogliamo sottolineare un argomento generale sotteso ai calcoli statistici applicati al processo di folding e ad altri tipici del mondo molecolare. Secondo me, in tutti questi casi c'è un errore «di principio», un errore che si lega alla mancata comprensione del ruolo che svolge la spiegazione chimica del mondo materiale. Il problema di analisi statistiche «intrinsecamente» sbagliate per questo motivo è largamente presente nella letteratura scientifica e viene fuori in maniera preponderante quando si ragiona sulla probabilità che nelle fasi iniziali di origine della vita si siano potute formare molecole complesse. Spendiamoci, quindi, qualche parola di chiarificazione.

Questi tipi di calcoli di probabilità, infatti, considerano le molecole/macromolecole (o i suoi pezzi) come unità a-strutturate, come palline colorate, per le quali si possono «contare» tutte le possibili permutazioni. Noi abbiamo visto lungo tutto il libro, e continueremo a vederlo, che le molecole di tutte le dimensioni, e anche i singoli pezzi molecolari, non sono palline colorate da mescolare in tutti i modi possibili con eguali probabilità, ma pezzi strutturati di realtà con caratteristiche e interazioni specifiche che hanno poche, a volte una sola, interazione largamente privilegiata. Se si ragiona, infatti, con tutti casi equiprobabili, come palline colorate che possono essere disposte in tutti i modi possibili, si vede che in questi casi il numero di possibilità cresce velocemente al crescere del numero di palline. Da questo spesso si arriva alla conclusione che, essendo tale numero talmente alto, per quanto breve sia il tempo necessario a ogni singolo passo di interazione, non basterebbe il tempo dell'universo per «esplorare» tutte le possibilità. Quello che io qui voglio evidenziare è che dietro a questi ragionamenti c'è una premessa da discutere: quella di «tutti gli stati equiprobabili».

Consideriamo un primo esempio: un polimero che in un particolare ambiente si forma con una sua specifica orientazione dei monomeri. In chimica un tale polimero si chiama stereospecifico. Anche in questo caso, potremmo facilmente asserire che il numero di passi per formare il polimero stereospecifico in quell'ambiente sarebbe enorme e, se anche due monomeri venissero in contatto ogni milionesimo di secondo, il tempo necessario per la sintesi del polimero nella sua struttura stereospecifica sarebbe molto più grande di quello dell'universo. Anche in questo caso, tuttavia, siamo noi che stiamo supponendo che il sistema debba esplorare tutte le possibilità perché sono tutte equiprobabili, ma il processo





1.1. La dimensione ambientale della vita in Morin

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

Per Morin, da un punto di vista generale-filosofico, la dimensione ecologica costituisce la terza dimensione organizzativa della vita. Prima dell'approccio ecologico, la vita era nota soltanto in due dimensioni, quella della specie e quella dell'individuo. Per quanto importante potesse essere, l'ambiente sembrava soltanto l'involucro esterno della vita. La vita, tuttavia, non è soltanto l'organizzazione cellulare delle molecole. Non è nemmeno solo l'albero ramificato delle diversificazioni prodotte dall'evoluzione, albero composto di *phyla*, di ordini, di classi e di specie. La vita è eco-organizzazione, è una componente integrata dell'organizzazione multipla dell'ecosistema.

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

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

Le simbiosi, associazioni permanenti fra specie differenti e nel contempo vantaggiose per tutte le specie coinvolte, possono aver luogo: (a) fra i vegetali, come nel caso dei licheni, associazione simbiotica di un fungo e di un'alga, dove il primo fornisce alla seconda l'acqua, i sali minerali e l'anidride carbonica, e la seconda sintetizza le sostanze organiche necessarie alla vita del primo; (b) fra animali e vegetali, come quella tra formiche «tagliatrici di foglie» e i funghi che

specie si «allarga», rendendo sempre più complessa e sistemica la sua definizione e funzione.

3. *Motivi biologici e culturali contro la simbiosi*

Dall'Ottocento alla fine del Novecento, gli effetti evolutivi dell'integrazione interspecie dovuta alle specie microbiche sono rimasti ai margini della comunità biologica. Diverse ragioni sono state le cause di questo atteggiamento.

(1) L'importanza della simbiosi ereditaria nell'evoluzione è in conflitto con l'insistenza dei genetisti mendeliani sul fatto che i geni cromosomici siano l'unica base dell'ereditarietà. Le loro concezioni dell'evoluzione sono sempre state basate su mutazioni genetiche. I genetisti hanno sempre studiato le differenze tra gli individui della stessa specie; i fenotipi simbiotici, comuni agli individui di una specie, sono sfuggiti alla loro attenzione per molto tempo.

(2) Il ruolo della simbiosi come fonte di cambiamento evolutivo è anche in conflitto con i principi centrali della sintesi evolutiva darwiniana degli anni '30 e '40 del xx secolo. Tale sintesi è stata costruita sulla premessa che la selezione naturale agiva su piccole differenze ereditarie tra gli individui delle popolazioni. Le popolazioni si sono evolute gradualmente a causa dei cambiamenti nella frequenza dei geni al loro interno. Simbionti microbici specifici erano stati descritti in molti protozoi, vermi, spugne, coralli, idre e molluschi, nonché insetti e piante. Erano considerati, tuttavia, delle eccezioni, delle curiosità, «aspetti speciali della vita».

(3) Gli studi sulla vita degli organismi e sugli effetti morfologici e fisiologici delle simbiosi non sono al passo neppure con le tendenze iniziali dell'ecologia. Gli ecologisti generalmente prestavano poca attenzione alla simbiosi microbica. I loro libri di testo di solito contenevano solo pochi paragrafi sui casi standard di simbiosi: licheni, micorrize e fissazione dell'azoto. Una delle principali tendenze dell'ecologia dopo la seconda guerra mondiale è stata, infatti, la comprensione dell'ecosistema in termini di scambi di energia e alcune sostanze chimiche. Gli ecologisti hanno sempre misurato il flusso di energia, la circolazione dell'acqua, il flusso del carbonio e di altri elementi essenziali e hanno evitato il più possibile di fare riferimenti a specie e fenomeni specie-specifici.

(4) Gli effetti creativi della simbiosi, inoltre, sono stati oscurati da esempi di conflitto e competizione, una visione della natura che, a lungo, è stata il riflesso delle visioni sociali umane. A metà del xx secolo, il botanico britannico F. G. Gregory lamentava che l'analisi delle relazioni tra organismi è stata dominata dalla nozione di «competizione» e «lotta» e la nozione di «cooperazione» è stata di conseguenza ignorata. L'evoluzione della cooperazione tra individui di specie diverse è rimasta in gran parte inesplorata.

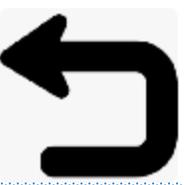
(5) Gli studi sulla simbiosi sono sempre stati in contrasto con la specializzazione crescente che ha caratterizzato la crescita delle scienze della vita. Coloro che studiano la simbiosi, infatti, hanno necessariamente attraversato i confini istituzionali che separano microbiologia, citologia, zoologia, botanica, embriologia e genetica.

(6) Che i batteri potessero svolgere un ruolo benefico nei tessuti di piante e animali è sempre stato in conflitto con i principi di base della teoria della malattia

da germi. I batteri non hanno mai avuto un grosso peso nella storia naturale e, sin dai tempi di Louis Pasteur e Robert Koch, sono stati definiti in gran parte come germi patogeni e descritti come nemici dell'umanità. Le proprietà vitali dei batteri e il loro ruolo fondamentale nella biosfera sono state, quindi, oscurate dagli aspetti patogeni per l'uomo di alcuni di essi. I batteriologi hanno cercato un microbo negli organismi solo quando i suoi tessuti erano malati, mai nei tessuti sani, e per molti era ridicolo suggerire che i batteri che vivono nei tessuti degli organismi potessero far parte del benessere fisiologico degli animali.

(7) Nel 1928 Alexander Fleming (1881-1955) scoprì la penicillina, che, ottenuta in grandi quantità e purificata da Howard Florey (1898-1968) ed Ernst Chain (1906-1979), salvò migliaia di vite umane durante la seconda guerra mondiale e ha portato all'incessante guerra condotta dagli antibiotici contro le infezioni batteriche. Fleming, Florey e Chain hanno condiviso il Premio Nobel per la medicina nel 1945. L'immagine distruttiva rappresentata dalle infezioni microbiche rimane oggi predominante quando incontriamo malattie emergenti e riemergenti e minacce di guerra biologica.

Oggi la situazione è cambiata, almeno in ecologia. Le nicchie ecologiche non sono più considerate caratteristiche preesistenti del mondo naturale che gli organismi si sforzano di occupare adattandovisi. Al contrario, è riconosciuto che gli organismi svolgono ruoli attivi nella costruzione, definizione e, potenzialmente, nell'invenzione dei loro modi di vita. Modificare, quindi, l'idea classica del darwinismo porta in primo piano la questione dell'origine delle «novità», che nel racconto standard è semplicemente un epifenomeno della lotta per l'esistenza. Ora che sappiamo, tuttavia, che le forme esistenti adattate alla nicchia possono prosperare in ambienti completamente diversi da quelli in cui si sono evolute e che nuove forme possono partire dal loro punto di origine e stabilirsi in contesti più adatti, non è necessario fare appello alla sola competizione per rendere conto della sopravvivenza di nuove forme.



uno stato stazionario, quest'ultimo è indipendente dalle condizioni iniziali e si ha quindi un comportamento equifinale⁷.

Per poi dover aggiungere: «L'equifinalità si trova anche in certi sistemi inorganici che, necessariamente, sono sistemi aperti. Detti sistemi fanno riscontrare un comportamento paradossale come se il sistema “fosse a conoscenza” dello stato finale a cui esso deve pervenire in futuro»⁸.

Voglio aggiungere che il fatto che questo comportamento avvenga anche in sistemi altamente complessi in cui, a priori, vi sarebbero molte situazioni finali possibili è una caratteristica importante dei sistemi aperti e non esclusiva dei soli sistemi viventi. A tale riguardo, si pensi alla forma nativa di una proteina che abbiamo considerato in dettaglio: essa, se analizzata nei termini dell'energia potenziale, presenta moltissime forme stabili, ma nella realtà dell'ambiente cellulare, tale proteina è nella sua unica forma nativa.

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

Pertanto, il netto contrasto tra ordine e disordine che per molti secoli è stato attribuito alla natura inanimata e animata, deve essere spostato nella differenza tra sistemi aperti e chiusi. Lo sviluppo e l'evoluzione, evidenti negli esseri viventi con la creazione di ordine e con la loro differenziazione, non sono caratteristiche specifiche dei sistemi viventi, ma di tutti i sistemi aperti, e richiedono energia dall'ambiente. Infatti, in condizioni idonee, tutti i sistemi aperti si muovono nella direzione della differenziazione e della complessità, dove gli schemi d'azione di natura generica sono sostituiti da funzioni più specializzate.

Un'ultima precisazione. Ho sottolineato l'utilità di spiegare gli esseri viventi come sistemi termodinamici aperti che scambiano materia ed energia con il loro ambiente, ma la sola fattibilità termodinamica della vita, implicita in tale analisi, non è sufficiente: occorre che accanto alla termodinamica si consideri la cinetica,

⁷ L. von Bertalanffy, *La teoria dei sistemi aperti in fisica e biologia*, in *La Teoria dei sistemi*, a cura di F.E. Emery, Milano, Franco Angeli, 1994, nota 5, pp. 83-84.

⁸ *Ivi*, nota 5, p. 85.





tale vescicola un minimo, ma sufficiente, numero di enzimi e acidi nucleici per creare un'entità capace di vita. Ovviamente, il problema generale di che cosa si debba intendere per «vivo» resta da chiarire.

Sullo stesso tema, altri scienziati si sono mossi verso il concetto di «genoma minimo». Tale concetto è apparso come un tentativo di rispondere alla domanda quale sia il numero minimo di geni o la quantità minima di DNA per sostenere la vita. Poiché i batteri sono le cellule che portano i genomi più piccoli, è stato generalmente accettato che il genoma minimo debba appartenere a una specie batterica. Attualmente il genoma più utilizzato negli studi sul genoma minimo appartiene al *Mycoplasma genitalium*, un batterio parassita il cui materiale genetico totale è di circa 580 kb (migliaia di basi). Nel 2016 su *Science* è stato pubblicato lo studio *Progettazione e sintesi di un genoma batterico minimo*⁷ nel quale il team californiano di Craig Venter rivelava che, proprio partendo da tale batterio, aveva progettato e realizzato il più piccolo genoma batterico in grado di sostenere la vita: 473 geni, compresi, come spiegano gli autori «quelli necessari per l'espressione dei geni stessi e quelli che codificano per proteine 'universali', che si ritrovano in molti esseri viventi». Ovviamente, anche in questo caso il problema generale è come definiamo la vita, e, quindi, anche come definiamo il genoma minimo. Tale batterio, infatti, è un parassita e richiede sostanze fornite dal suo ospite per vivere. Pertanto, se un genoma di un parassita può essere considerato come un genoma minimo, perché non considerare i genomi dei virus o dei plasmidi? – si chiede Wegrzyn nel *Paradosso del genoma minimo*⁸.

La rivista *Nature* ha chiesto a otto esperti di biologia sintetica quali fossero le implicazioni per la scienza e la società della «cellula sintetica» realizzato dal J. Craig Venter Institute (JCVI)⁹. Riportiamo una sintesi degli otto giudizi sull'esperimento. Come si può vedere, le idee sono molto varie e articolate.

Mark Bedau, *Life after the synthetic cell* (La vita dopo la cellula sintetica):

un genoma protesico [dove «protesico» significa un componente necessario per l'attività biologica] affretta il giorno quando le forme di vita potranno essere fatte interamente da materiali non viventi. In quanto tale, rivitalizzerà domande perenni sul significato della vita – che cos'è, perché è importante e quale ruolo gli uomini dovrebbero avere nel suo futuro. Sebbene queste domande sono controverse e difficili da risolvere, la società guadagnerà da tale sforzo.

George Church, *Now let's lower costs* (Ora abbassiamo i costi):

JCVI ha creato una «nuova vita» e testato il vitalismo? Non proprio. Il micobatterio semisintetico non è cambiato dallo stato selvaggio in qualunque senso fondamentale.

⁷ C.A. Hutchison III, R.-Y. Chuang, V.N. Noskov et al., *Design and synthesis of a minimal bacterial genome*, in «*Science*», 351 (2016), 6280.

⁸ G. Wegrzyn, *The minimal genome paradox*, in «*Journal of Applied Genetics*», 42 (2001), pp. 385-392.

⁹ In «*Nature*», 465 (2010), pp. 422-424. <https://doi.org/10.1038/465422a>.

questa sua caratteristica che lo rende particolarmente utile nello spiegare tanto il complesso mondo macroscopico quanto, l'ancora più complesso, mondo vivente. Questa sua varietà è una diretta conseguenza della strutturazione/organizzazione a livello microscopico e su questo aspetto scientifico, fondamentale per la chimica e per tutta la scienza, va posta la giusta attenzione.

Per un'estensione alle scienze umane e sociali del tipo di spiegazione chimica, vediamo l'esempio della sociologia. L'approccio sistemico è ormai da tempo presente in ambito sociologico. Come ci viene detto in uno degli infiniti esempi che si potrebbero portare: «i compiti principali di un approccio sistemico in sociologia dovrebbero essere l'analisi dei processi sistemici a livello macro-sociale [...] l'applicazione della metodologia funzionalistica implica quindi l'esame delle singole parti di un sistema (sottosistemi) dal punto di vista dei loro contributi specifici (cioè le funzioni) al mantenimento del tutto»¹⁰.

Ci viene poi detto che: «l'ottimismo e l'entusiasmo che inizialmente accompagnavano l'approccio sistemico in sociologia si sono notevolmente raffreddati oggi, ma gli approcci sistemici sopravvivono e continuano a svilupparsi nelle idee della teoria delle reti, nei concetti di sinergia (che affrontano il tema dell'auto-organizzazione o la creazione, stabilità e scomparsa di strutture temporali e spaziali organizzate e spontaneamente emerse), entropia e caos».

Ho l'impressione che la sociologia, come le altre scienze umane e sociali, continuano a basarsi sulla prevalenza degli aspetti processuali (di tipo fisico) rispetto alla individuazione delle caratteristiche specifiche degli enti sociologici. In pratica, l'idea è più quella dell'ampio network di nodi identici che interagiscono secondo differenti pattern, più che l'idea chimica che anche pochi nodi con caratteristiche individuali (sull'esempio degli atomi) possono generare sistemi complessi con proprie caratteristiche (sull'esempio delle molecole).

È questo il contributo di prospettiva che la spiegazione sistemica di tipo chimico può portare alle discipline sociali e umane, mostrando come un approccio, in cui gli enti e le loro trasformazioni siano presenti «alla pari», abbia funzionato nello studio del complesso mondo vivente.

¹⁰ J. Šubr, *Systemic Approach in Sociology: Reflections on its Development, Current Status and Possibilities*, in «World Complexity Science Academy», 1 (2020), p. 9.





«La chimica è un *libro* non soltanto da *leggere* (esplorazione di molecole e processi naturali), ma anche da *scrivere* (sviluppo di molecole e processi artificiali) e se la parte non ancora letta è molto vasta e complicata, quella ancora da scrivere è praticamente infinita».

• Vincenzo Balzani e Margherita Venturi, 2012 •

