

GIOVANNI VILLANI\*

## **Sistema strutturato in chimica. Confronto con la fisica e la biologia**

### **Structured system in chemistry. A comparison with the physics and the biology**

**Summary** – In this paper the fundamental concept of system has been analysed in chemistry. In this discipline this concept is closely connected to that of structure, like in biology, but not in mechanics. Both the molecule and the chemical compound concepts have been identified as systemic concepts and their use in each chemical explanation (from the school to the research) can be only justified in this approach. Two general consequences are shown in the paper: the first about the relation among chemistry, physics and biology and the second on the inanimate-animate and animal-man dichotomies.

**Key words:** system, structure, molecule, chemical compound, inanimate-animate, animal-man.

### 1. INTRODUZIONE

Il concetto di sistema ha due accezioni diverse in ambito scientifico. In certi ambiti (per esempio in meccanica o in termodinamica), per sistema s'intende un pezzo di realtà (un ente) in studio e non esiste alcun collegamento ai concetti d'organizzazione o di strutturazione. In altre realtà, si pensi ai sistemi viventi, nel concetto di sistema è implicito che si stia parlando di un pezzo di realtà strutturata e/o organizzata. In questo contesto non mi addentrerò sulla differenza tra i concetti di struttura e di organizzazione perché questi due concetti sono, almeno in ambito chimico, considerabili come equivalenti. L'accezione di sistema che useremo in questo lavoro è la seconda, vale a dire quella di realtà strutturata. Quando tale accezione può essere considerata equivoca (come nel titolo) aggiungeremo esplicitamente il legame con i concetti di struttura e organizzazione.

Il concetto di sistema è presente in tutte le discipline scientifiche. Tuttavia,

\* Istituto per i Processi Chimico-Fisici (IPCF) del CNR, Area della Ricerca di Pisa.  
villani@ipcf.cnr.it

possiamo affermare che tale concetto acquista maggiore importanza passando dalla fisica, alla chimica, alla biologia e procedendo con l'uomo e le scienze umane. Da questo punto di vista la chimica svolge un ruolo essenziale: è la prima vera scienza della realtà strutturata. Non è un caso che la biologia, che in quest'ipotetica scala dà ancora maggior risalto della chimica al concetto di sistema, utilizzi molto di più la chimica che la fisica nelle sue spiegazioni. Quest'ultima, infatti, con la sua "insistenza" sulle leggi universali coglie della realtà materiale gli aspetti (come l'energia o il movimento) che non necessitano di individualizzazione. La chimica, invece, e ancor più la biologia, è una scienza che dà un'importanza notevole, oltre che all'universale e al generale, alle entità individuali. Questo è evidente se si pensa al concetto di specie: esso è del tutto assente in fisica ed è simile (se non uguale) in chimica e in biologia.

Il concetto di sistema si riconnette anche all'ottica generale in cui s'inserisce la scienza. Due ottiche generali sono state utilizzate sia per "studiare" la scienza, da un punto di vista filosofico, sia come base concettuale di partenza degli stessi scienziati: un'ottica riduzionista e un'ottica olistica. Nel primo approccio si suppone, più o meno implicitamente, che la realtà complessa che ci circonda è semplificabile poiché nel "profondo", sia materiale sia concettuale, la realtà è semplice. L'ottica è ben esemplificata dalla teoria atomistica greca, quella di Leucippo e Democrito cui si fa qualche cenno anche nei testi scolastici scientifici. La concezione principale di questi due autori era la seguente: le cose erano aggregati (più o meno stabili, ma mai indivisibili) di parti indivisibili ("atomi"), eterne, immutabili, senza parti o moto al loro interno e di numero infinito. Gli atomi erano frammenti del medesimo essere, la materia prima, che non poteva essere ulteriormente definita e differivano fra loro soltanto nella forma e nelle dimensioni. Questi atomi erano, infatti, di diverse grandezze, diverse figure, occupavano nel corpo posizioni diverse, ma erano tutti qualitativamente identici, o meglio non avevano in sé qualità, se non quelle sopraddette, matematicamente identificabili. Un aspetto molto importante del programma degli atomisti (e in generale dei riduzionisti) era (ed è) la riduzione dei cambiamenti qualitativi a livello macroscopico a cambiamenti quantitativi a livello microscopico. Gli atomisti concordavano con i pitagorici nel dire che le spiegazioni scientifiche dovevano essere formulate in termini di rapporti geometrici e numerici e la "vera" realtà era accessibile solo quantitativamente: la vera scienza era la scienza matematica della natura. Molti secoli dopo, alla nascita della scienza (e principalmente della fisica) moderna Galileo dirà: "Che ne' corpi esterni, per eccitare in noi i sapori, gli odori e i suoni, si richiegga altro che grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci, io non lo credo; e stimo che, tolti via gli orecchi le lingue e i nasi, restino bene le figure i numeri e i moti, ma non già gli odori né i sapori né i suoni, li quali fuor dell'animal vivente non credo che sieno altro che nomi" [1]. Nell'ottica riduzionista il concetto di sistema strutturato è praticamente assente in quanto è il concetto di struttura come entità globale, e quindi irriducibile alle sue parti elementari ed interazioni, ad essere assente. Opposta è l'idea olistica

della realtà. Tale idea, che tra un attimo andremo a qualificare, è stata sempre minoritaria in ambito scientifico al punto che essa è identificata con più di un termine (olistica, non-riduzionista, complessità, ecc.). L'idea che è alla base di questa visione della realtà è che "il tutto è più della somma delle parti". A parte ambiguità terminologiche [6] (il significato di "somma", per esempio) tale frase suggestiva sta ad indicare che sebbene sia possibile dividere una realtà in pezzi (le "parti") e dalle loro caratteristiche e interazioni ottenere informazioni sulla realtà originale (il "tutto") in quest'operazione analitica prima e sintetica poi qualcosa si perde. Per venire ad un esempio più concreto: spezzettando un essere vivente per analizzarlo e poi ricomponendolo si perde la proprietà "vita" che non è presente in nessun suo pezzo, solamente nel tutto. Questo che appare evidente in ambito biologico è, a mio avviso, una caratteristica generale che cercheremo di far vedere all'opera in chimica. Probabilmente è superfluo dirlo, ma in quest'ottica il concetto di sistema è il cardine su cui costruire ogni disciplina scientifica.

Venendo alla chimica, in un'ottica tipicamente riduzionista non dovrebbero essere messe in evidenza (e quindi esistere concettualmente) né le molecole né i composti chimici in quanto "aggregati" di uniche e vere realtà concettualmente distinte: gli atomi e gli elementi. Qui ovviamente si trascura, ed in ambito chimico è corretto farlo, che gli atomi non sono le particelle elementari della materia e neppure gli elementi rispettano il loro nome (elemento viene da elementare). Non ha senso, infatti, per il riduzionista inserire un piano, concettuale oltre che fisico, intermedio tra il mondo atomico ed il mondo macroscopico: come non esiste un concetto autonomo (ed un corrispondente termine) per gli aggregati di molecole così non dovrebbe esistere un concetto per gli aggregati di atomi. Il problema trova soluzione nell'affermare che una molecola non è un aggregato di atomi, ma un sistema (strutturato) di atomi. Ecco perché senza introdurre il concetto di sistema diventa impossibile (a tutti i livelli non solo in quello didattico) introdurre coerentemente il concetto di molecola e di composto chimico.

## 2. IL SISTEMA IN AMBITO SCIENTIFICO

Prima di passare ad analizzare il concetto di sistema nelle differenti discipline scientifiche, occorre analizzare in qualche dettaglio una differenziazione essenziale usata da tutte le discipline scientifiche: quella tra sistema e ambiente.

### 2a. *Sistema e ambiente*

L'ambiente in ambito scientifico è per definizione il contesto dal qual è staccato il sistema di interesse, cioè tutto ciò che non rientra nella nostra definizione di sistema. Chiaramente, poiché il sistema studiato è solitamente una piccola parte dell'universo, l'ambiente, definito per negazione del primo, tenderà a riferirsi a gran parte dell'universo se non a tutto. Una sua descrizione risulta quindi difficoltosa, se non addirittura impossibile, e comunque più difficoltosa della descrizione

del sistema stesso. Solitamente, quindi, l'ambiente è circoscritto ai soli aspetti che afferiscono a forze o azioni aventi diretta rilevanza per il sistema: insieme di tutti gli oggetti per cui un cambiamento nei loro attributi influenza il sistema e viceversa. Questa definizione generale può essere poi ristretta in casi particolari, per esempio considerare la variazione del sistema dovuta all'ambiente, ma trascurare la variazione ambientale dovuta al sistema. Parte del processo di modellizzazione del comportamento del sistema si riferisce anche all'individuazione di queste interazioni con l'ambiente.

Spesso anche l'ambiente di un sistema ha natura sistemica e, quindi, ogni sistema può essere immaginato, per un verso, come inserito in un sistema più ampio e, per l'altro, costituito da oggetti che sono a loro volta dei sistemi, cioè dei *sottosistemi* rispetto ad esso. È questo l'approccio a "matrioska" dove ogni singola statua comprende ed è compresa in qualcosa di simile. Nella prospettiva che qui seguiremo, i livelli di qualsivoglia sistema non sono necessariamente disposti secondo un ordine lineare e gerarchico, in cui potere e importanza crescono dal basso verso l'alto. Al contrario, specie nel mondo biologico, essi si organizzano circolarmente, in un rapporto paritetico.

Una fondamentale caratteristica di definizione di ambiente è legata al fatto che non c'interessa descrivere quel pezzo di realtà come un mondo materiale obiettivo nella sua totalità, ma soltanto i suoi aspetti che hanno rilevanza per il nostro sistema. In ambito fisico e chimico questo è evidente tramite la modellizzazione che è fatta dell'ambiente. Per esempio, in chimica quantistica si studia prima la molecola isolata e poi la si connette alla molecola reale introducendo una modifica *a posteriori* degli stati molecolari dovuta alla perturbazione ambientale. In ambito biologico questo traspare da concetti come lo "spazio vitale" di un organismo. In biologia quindi quello che noi definiamo "ambiente" sarà un'entità condizionata dai "bisogni", dagli "stimoli" o dagli "obiettivi" dell'organismo e dell'apparato percettivo di quest'ultimo [3]. In questo caso, un sistema è perciò delimitato dall'ambiente disponibile per effetto della sua capacità di interagire con esso e tutta la sua azione è condizionata dall'ambiente disponibile. In particolare, gli input che entrano nei sistemi non sono costituiti soltanto da materiali energetici, destinati a essere trasformati o modificati dal lavoro che si svolge nel sistema, ma sono anche rappresentati da informazioni che forniscono al sistema segnali circa l'ambiente e informazioni circa il funzionamento del sistema in rapporto all'ambiente. Se un organismo deve dare prova di adattabilità ad un particolare ambiente, i tipi di modificazioni che può avere dipendono non solo dalle caratteristiche e dalla natura del sistema, ma anche, ed in eguale misura, dall'ambiente e dalla possibilità per il sistema di "conoscerlo".

Il concetto di *interdipendenza* è la chiave di volta del modello sistemico: esso si riferisce al fatto che una variazione nello stato di una delle componenti – o sottosistema – di un sistema tende sempre a riflettersi sulle altre e sul sistema visto come totalità, modificandone in qualche modo lo stato; analogamente, un cambia-

mento nel sistema quale totalità tende ad influenzare sia le parti componenti, sia il sistema ambiente di cui esso è a sua volta membro. L'interdipendenza ha nella *comunicazione* il suo emissario; essa è cioè possibile grazie al reciproco scambio di materiali, di energia o di informazione, che rappresentano i "veicoli" mediante i quali ciò che avviene in un sistema può influenzarne un altro. Man mano che dai sistemi inanimati si passa a quelli biologici e ancor più a quelli più umani, cresce l'importanza del livello *informativo* rispetto a quello energetico o materiale.

Esistono due posizioni estreme per il rapporto tra sistema e ambiente: una posizione, che con Morin chiameremo ecologica, in cui il sistema è "immerso" nell'ambiente ed un'altra nella quale si considera l'ambiente come privo di struttura, immutabile o completamente casuale, una sorta di rumore di fondo, il che equivale a ipotizzare un'assenza di relazioni o interdipendenze specifiche fra le proprietà del sistema e quelle dell'ambiente, a tutto vantaggio di un'interazione media. La scelta della prima o della seconda opzione di fondo qualifica in maniera diversa il ruolo dell'ambiente per il sistema. Tale scelta è spesso operata in maniera implicita e porta a notevoli differenziazioni anche tra gli stessi scienziati e filosofi che lavorano sugli stessi argomenti con approcci sistemici. Basti pensare che nell'importante concetto d'autopoiesi di Maturana e Varela, l'ambiente svolge, a mio avviso, un ruolo sottostimato. Io credo, invece, ad una notevole importanza della relazione sistema-ambiente perché è attraverso lo scambio con l'ambiente che l'organismo si procura l'energia in più che gli permette di non tendere al massimo d'entropia per quelle condizioni (e creare il paradosso della fisica classica: l'ordine) e d'acquisire la capacità di raggiungere e mantenere la stabilità in uno stato stazionario indipendente dal tempo: condizione necessaria per consentire l'adattamento ai mutamenti ambientali. Tali stati stazionari, infatti, differiscono moltissimo dagli stati d'equilibrio descritti dalla fisica classica (stati dei sistemi chiusi), e che sono stati utilizzati troppe volte come modelli per rappresentare le mutazioni biologiche e sociali. Negli stati d'equilibrio una volta raggiunto l'equilibrio, il sistema non può produrre più alcun lavoro. Viceversa, lo stato stazionario permette, anzi implica, un continuo rapporto tra il sistema e il proprio ambiente e perciò non ne limita la capacità di lavorare che, se limitata, impedirebbe al sistema di adattarsi e all'organismo di sopravvivere. Per fare un esempio non biologico, la costanza della fiamma di una candela è inseparabile da uno squilibrio termodinamico, cioè da un flusso di energia che la percorre. Il flusso, sotto determinate condizioni, invece di distruggere la fiamma, la alimenta, contribuisce cioè alla sua esistenza e alla sua organizzazione. Il blocco del flusso, infatti, implica la morte del sistema.

Vorrei chiudere questo paragrafo sull'ambiente accennando al caso umano. L'uomo, in quanto essere vivente, è un sistema naturale altamente organizzato. L'uomo, tuttavia, non nasce isolato, ma "naturalmente" implica una famiglia. Quest'unità biologica e sociologica è un sistema organizzato con proprie caratteristiche individuali da famiglia a famiglia. L'aver inserito l'uomo in una famiglia e averla definita un'unità sia biologica sia sociologica ci apre due strade che vanno entrambe

percorse. L'uomo, in quanto essere vivente, è integrato in una *habitat* ambientale e come gli altri animali (e purtroppo anche di più) modifica il suo stesso ambiente naturale. L'uomo, in quanto essere sociale, è inserito in una famiglia, in un clan, in un'etnia, in uno stato, ecc. e tutti questi enti sono sistemi sociologici che sono determinati e determinano il singolo uomo. Dice Morin che l'uomo è un auto-eco-socio-organizzazione e con quest'apertura sia sociale sia naturale dell'uomo non posso che concordare.

Passiamo ora ad esaminare il concetto di sistema in fisica (e più in particolare in meccanica), in chimica e in biologia.

#### 2b. *Il concetto di "sistema meccanico" [11]*

Per trattare l'ente concettuale "sistema meccanico" partiamo da cosa s'intende per sistema e suo stato in meccanica. Diamo per assodato che è stato definito un ente fisico, distinto dai processi in cui è immerso, nonostante i problemi generali che esistono a riguardo [8] e riprecisiamo che nella meccanica il termine "sistema" è sinonimo di "ente" e non include in nessun modo il concetto di struttura o d'organizzazione. Consideriamo, quindi, un ente fisico che muta nel tempo. Tale sistema sarà assunto isolato dall'ambiente. Questa è ovviamente una limitazione, ma lo studio di sistemi fisici aperti, come quelli trattati dalla termodinamica, è più problematica in meccanica classica. In fisica tal ente è descritto da un'ennupla di valori di grandezze fisiche osservabili. Tal ennupla può essere divisa in due gruppi principali: le  $M$  grandezze che sono costanti (o approssimativamente costanti) nell'intervallo di tempo che c'interessa e le  $N-M$  restanti grandezze fisiche che si modificano in maniera sostanziale. Le prime, chiamate "variabili del sistema", formano e descrivono il sistema in esame; le seconde sono le "variabili di configurazione" (o di stato) del sistema e istantaneamente descrivono il suo stato. Questa divisione in sistema e suo stato è legata all'intervallo di tempo in esame (a priori tutte le variabili si modificano, anche se non tutte alla stessa velocità [9, Cap. 8]) e alla precisione della misura, cioè alla strumentazione usata per misurare le variabili. Il numero delle variabili di stato (nel nostro caso  $N-M$ ) ci dà il numero di "gradi di libertà" del sistema, numero che è una caratteristica univocamente fissata per un dato sistema in meccanica. Non sono, invece, determinate le grandezze fisiche che devono rappresentare tali gradi di libertà. Tali grandezze sono, in generale, chiamate "coordinate generalizzate" di un opportuno spazio, detto delle "configurazioni". Tale spazio è essenzialmente statico e, quindi, può essere usato solo per descrivere gli stati d'equilibrio del sistema. Se definiamo anche le "velocità generalizzate", cioè le derivate rispetto al tempo delle coordinate generalizzate (saranno anch'esse  $N-M$ ), possiamo definire uno "spazio delle fasi" (di dimensione  $2(N-M)$ ) dove un punto in tale spazio individua lo stato dinamico del sistema. Riassumendo, un sistema fisico isolato, nel senso della meccanica classica, è un sistema *determinato dal proprio stato*, il che significa, tra l'altro, che lo stato del sistema in qualsiasi momento può essere rappresentato da un'equazione univoca del suo *stato iniziale* e

della coordinata del *tempo*. In pratica, in simili rappresentazioni teoriche lo stato del sistema in qualsiasi particolare istante è definito specificando i valori di una serie selezionata di variabili per quel dato istante e della loro variazione (derivata). Tali variabili sono chiamate *variabili di stato* e il loro numero dipende, naturalmente, dal grado d'astrazione o di semplificazione che si vuole inserire nel modello e dalle *condizioni* che si presumono costanti ai fini dell'indagine che si sta compiendo.

Fu Hamilton, nel XIX secolo, a formulare il problema dinamico in questa maniera astratta: non più in termini di coordinate spaziali e delle loro derivate rispetto al tempo (le velocità), ma introducendo coppie di variabili,  $p$  e  $q$  (coordinate e momenti generalizzati), considerate variabili indipendenti e legate da una relazione fondamentale che le definisce come variabili canoniche. Così uno stesso sistema può essere descritto mediante più coppie di variabili canoniche differenti. In questo formalismo, l'energia del sistema (la somma dell'energia cinetica e potenziale) svolge un ruolo fondamentale. Espressa nelle variabili canoniche, essa costituisce l'hamiltoniana del sistema, che è lasciata invariata da tutte le trasformazioni canoniche e da tutti i possibili cambiamenti di variabili. L'hamiltoniana di un sistema permette di esprimere le equazioni d'evoluzione delle coordinate e velocità generalizzate sotto forma di  $2n$  equazioni differenziali del primo ordine. Essa descrive pertanto in qualche maniera il moto del sistema. Durante il XIX secolo, e fino ai giorni nostri, gli sforzi si sono concentrati soprattutto sulla questione dell'identificazione dei problemi dinamici che possono essere effettivamente risolti in questo modo, cioè formulati in termini d'equazioni differenziali integrabili che permettano dunque il calcolo delle traiettorie a partire dalle  $2n$  variabili canoniche.

In meccanica esistono solo due forme d'energia: quella cinetica e quella potenziale. L'energia cinetica è legata alle velocità generalizzate, ed è sempre esprimibile in una forma quadratica. L'energia potenziale, invece, è legata alle coordinate generalizzate, e può assumere diverse forme matematiche. La somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale è l'energia totale del sistema e si deve conservare. Un punto importante da evidenziare è che in meccanica esiste una differenza sostanziale tra l'energia cinetica e quella potenziale. Mentre la prima può essere sempre scritta come una somma di contributi, ciascun pertinente ad un singolo grado di libertà, non è sempre vero che ciò valga anche per l'energia potenziale. Infatti, se fosse sempre vero che ambedue le forme d'energie possono essere scritte come somma di  $N-M$  contributi, ciascun relativo ad un singolo grado di libertà, si avrebbero  $N-M$  equazioni dinamiche indipendenti, una per ciascun grado di libertà, e per ognuno varrebbe un principio di conservazione dell'energia e nessuno scambio sarebbe possibile tra i diversi gradi di libertà che descriverebbero un sistema a  $N-M$  gradi non interagenti. Viceversa, un'energia potenziale che sia una funzione non decomponibile delle coordinate costituirà un "serbatoio comune" attraverso il quale i diversi gradi di libertà potranno, come risultato finale, scambiarsi energia cinetica. Esistono, poi, per i sistemi integrabili (sotto classe dei sistemi dinamici) delle trasformazioni canoniche che hanno per effetto di annullare il termine d'e-

nergia potenziale. Tutta l'energia del sistema è con ciò attribuibile ad opportune *particelle* del sistema prese isolatamente, particelle definite dalla trasformazione canonica. Tali particelle, in questa descrizione, sono non-intereagenti le une con le altre e, quindi, si muovono (hanno solo energia cinetica) in maniera indipendente. Ciò non vuol dire che si sia dimostrato che gli oggetti sono “realmente” indipendenti e le interazioni illusorie. Il formalismo hamiltoniano ha *assunto* che tutte le interazioni sono della stessa natura ed eliminabili mediante una trasformazione di variabili che le contenga tutte allo stesso modo, generando una descrizione in termini di oggetti indipendenti che evolvono spontaneamente. Questo tipo di formulazione fa apparire in modo evidente una delle caratteristiche essenziali dei sistemi conservativi descritti dalla dinamica hamiltoniana: la loro completa determinazione mediante le condizioni iniziali. La formulazione hamiltoniana mette in evidenza la proprietà essenziale di tutti i sistemi dinamici integrabili: il determinismo dell'evoluzione. In ciascun istante, lo stato del sistema è interamente determinato da quello che era lo stato iniziale e risalta il carattere essenzialmente statico di quest'evoluzione dinamica: la traiettoria di ciascun punto indipendente è definita da un invariante e lo studio dell'evoluzione delle variabili è ricondotto alla definizione di variabili tali da permettere di ricondurre l'evoluzione stessa a invarianza.

Ogni sistema fisico in meccanica classica è costituito da un insieme di “punti materiali”, cioè punti dotati di massa, ciascuno dei quali possiede tre gradi di libertà, rappresentati dalle sue coordinate spaziali. In meccanica, quindi, ogni sistema fisico è costituito da un insieme di  $P$  particelle (atomi, molecole, ecc.) con  $3P$  gradi di libertà ed il suo stato ad ogni istante è determinato da  $6P$  valori. In meccanica esistono leggi generali del moto, che si traducono in un insieme d'equazioni differenziali, che, una volta risolte, permettono di ottenere le funzioni che descrivono l'evoluzione temporale di tutti i punti materiali. Tali funzioni ci danno una traiettoria nello spazio delle fasi per ogni singolo punto materiale e l'insieme delle traiettorie ci dà la trasformazione nel tempo di uno stato del sistema. Ogni traiettoria resta interamente fissata una volta noto un suo punto (determinato dalle condizioni iniziali). Tale traiettoria descrive, quindi, la storia completa (passata, presente e futura) del nostro punto materiale e l'insieme dei punti materiali quella del sistema, che è del tutto determinato e deterministico.

In sintesi possiamo riassumere lo schema meccanico: ogni corpo può essere decomposto in un insieme di particelle, ciascuna con la propria energia cinetica e con un'energia potenziale dovuta alla configurazione globale dell'insieme. Per ognuna di queste particelle esiste una traiettoria nello spazio delle fasi che determina in maniera univoca la sua evoluzione temporale e per la quale passato e futuro hanno lo stesso significato determinato.

### 2c. Sistemi chimici

Lo scopo di questo paragrafo è di ricercare il concetto di sistema, come da noi inteso (realtà strutturata), nell'ambito della chimica e di mostrare le differenze e le



similitudini con il sistema meccanico già trattato. La chimica lavora su due piani: quello macroscopico delle sostanze pure (elementi e composti) e quello microscopico degli atomi e delle molecole. Svilupperemo, di conseguenza, il concetto di sistema chimico su ambedue i piani. In particolare, ci concentreremo sul concetto di *composto chimico* nel piano macroscopico e sull'aggregato strutturato d'atomi, la molecola, nel piano microscopico.

A differenza della fisica, ambedue questi tipi di sistemi chimici svolgono un ruolo fondamentale in questa disciplina, configurando, quindi, la chimica come la prima vera scienza sistemica e proponendola come uno snodo essenziale per guardare al mondo materiale (inanimato e animato) in un'ottica non riduzionista e pluralistica. Infatti, già prima di cercare il concetto di sistema in biologia, la visione del mondo materiale che viene fuori è articolata, con un approccio riduzionista ed uno olistico, con un'ottica fisica incentrata sul "semplice" ed un'ottica chimica sulla "complessità". Da un punto di vista culturale e filosofico, la peculiarità del mondo chimico è quella di essere un mondo ricco qualitativamente: i suoi tipi d'enti (molecole e composti), milioni, sono tutti diversi gli uni dagli altri al punto da meritare un nome individuale. È questa sua caratteristica che rende la chimica atta a spiegare tanto il complesso mondo macroscopico inanimato, fatto d'oggetti diversi sotto tanti punti di vista qualitativi, quanto, l'ancora più complesso, mondo vivente.

Anche dal punto di vista strettamente scientifico, i livelli di complessità delle molecole e dei composti chimici presentano delle peculiarità: sono il gradino precedente la biforcazione tra il mondo inanimato e quello animato. Rispetto al mondo vivente, le molecole ed i composti sono i livelli di studio immediatamente precedente e sono, quindi, fondamentali nel suo studio, come la biochimica sta ad evidenziare. Essi sono, tuttavia, anche i livelli immediatamente precedenti degli oggetti inanimati macroscopici che ci circondano ed anche per essi il mondo molecolare e quello dei composti chimici diventano il referente di spiegazione.

Iniziamo dal livello macroscopico per poi proseguire con quello microscopico, seguendo sia un metodo storico sia un metodo epistemologico.

Un punto essenziale nella genesi del concetto di composto chimico, come è ora concepito, è stato quello di superare la visione che tali sostanze fossero strettamente legate alla "metodologia" di ottenimento e che, quindi, fossero di numero infinito. A prima vista, può sembrare strano che per il concetto moderno di elemento si è dovuto procedere verso una pluralità (dai quattro elementi di Aristotele ai trentatré di Lavoisier [9, Cap. 1]) e per quello di composto ridurre la sua pluralità (da infiniti a moltissimi). In realtà, la logica riduzionista che porta a pochi elementi presuppone che i composti siano infiniti in quanto mescolanza senza creazione di nuovo. La logica olistica, invece, presuppone a tutti i livelli una complessità intermedia tra "pochi" e "infiniti". Ritornando ai composti chimici quindi, l'idea, alchemica prima che chimica, che essi fossero in numero infinito costituiva un ostacolo da rimuovere verso l'attuale visione chimica. Nel Seicento e Settecento quasi tutti i chimici ragionavano secondo l'ottica riduzionista. Per esempio nel 1706

W. Homberg nel suo *Essays de chimie* diceva che, poiché la sostanza di un corpo composto consisteva esclusivamente nell'assemblaggio delle materie di cui era composto, se si fosse cambiato quest'assemblaggio (o raggruppandone le parti in altro modo o aumentando qualcuna di queste parti), poiché tali possibilità erano in numero infinito, era chiaro che il cambiamento di sostanza poteva essere anch'esso infinito. Inoltre, Homberg riteneva che erano le innumerevoli circostanze concrete alle quali avvenivano le reazioni chimiche a dar luogo alla serie continua e infinita di composti diversi: "La materia della luce producendo le materie solforose, s'introduce nella sostanza dei corpi, ne cambia l'arrangiamento delle parti e le aumenta, e di conseguenza cambia la sostanza stessa di questi corpi in tutti i modi in cui essa può differentemente collocarsi e in quantità differente, la qual cosa produce una varietà infinita; in modo tale che se si volesse paragonare la varietà delle materie che esistono, a quella che potrebbe esistere per mezzo di tutte le combinazioni possibili, noi saremmo obbligati a dire che l'Universo conosciuto è ben poca cosa in confronto di ciò che potrebbe essere, e anche se si avessero numerosi Mondi come il nostro, essi potrebbero essere tutti forniti di oggetti differenti senza cambiare la materia, né la maniera in cui questi oggetti sarebbero composti; la qual cosa dimostra una ricchezza ed una potenza infinita dell'Essere che ha prodotto l'Universo" [2]. L'idea dell'esistenza in natura di un *continuum* di composti chimici sviliva il significato e l'importanza degli effettivi composti ricavati sperimentalmente. Essi, infatti, erano solo legati alle capacità storiche della sperimentazione chimica e, quindi, anche ogni loro classificazione era artificiale e limitata: l'essere strettamente legati alle condizioni delle reazioni abbassava lo *status* ontologico dei composti chimici.

All'inizio dell'Ottocento si opposero due visioni dei composti chimici e di conseguenza anche del loro numero: quella di Claude Louis Berthollet [1748-1822] e quella di Joseph Louis Proust [1754-1826]. Nel 1799 con la *Recherches sur le loi de l'affinité* e nel 1803 con l'*Essai de statique chimique*, Berthollet costruì la sua teoria sulle affinità chimiche, e qui n'analizzeremo solamente il corollario che riguarda il numero dei composti chimici. Per Berthollet il numero dei composti chimici era infinito ed in particolare dalla mescolanza di due reagenti si otteneva una serie infinita di prodotti la cui proporzione nei reagenti era sempre compresa tra due valori limite, un minimo ed un massimo. L'esistenza di due punti limite in un composto di due elementi, e quindi l'impossibilità di infiniti altri composti accanto agli infiniti possibili, emancipava parzialmente i composti chimici dalle circostanze di reazione in quanto vi erano dei composti non ottenibili, in qualunque circostanza di reazione. Dall'altra parte, a seguito di ricerche sperimentali soprattutto sugli ossidi metallici del ferro, del rame e dello stagno, Proust enunciò la sua *legge delle proporzioni definite* secondo la quale ogni composto chimico era costituito da una proporzione fissa e costante dei componenti, indipendentemente dalle condizioni sperimentali nelle quali esso era formato. Le ricerche di Proust ebbero un discreto successo e la legge delle proporzioni definite prevalse sull'ipotesi continuista di Berthollet.

La conseguenza principale nell'ambito epistemologico della legge delle proporzioni definite di Proust è che essa configura definitivamente i composti chimici come entità individuali da ricercare e determinare. Il problema della nomenclatura n'è una normale conseguenza. Se i composti chimici fossero stati infiniti avrebbe avuto poco senso ricercare per loro un nome che non fosse una pura etichetta, ma che fosse, per così dire, "naturale". Ora, invece, che ogni composto chimico è "a proporzioni definite" vale la pena di determinarne la formula e di legarla alle sue caratteristiche fisiche e chimiche. Ovviamente le circostanze di laboratorio, ora come allora, determinano la realizzazione o meno di un determinato composto, ma nessuna circostanza può generale le proporzioni non frazionarie (diverse cioè da  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $2/3$ , ecc.) e condizioni differenti possono dare lo stesso composto che è identico, per esempio, sia che venga ottenuto per sintesi in laboratorio sia che venga estratto da un prodotto naturale. Questo è oggi ritenuto più che ovvio, quasi naturale e, di conseguenza, non ci si riflette e non si fa apprezzare all'allievo in ambito didattico lo sforzo per giungere a questa conclusione tutt'altro che ovvia e banale.

Passiamo adesso a considerare il livello microscopico utilizzato dalla chimica ed il suo fondamentale concetto di molecola. Il concetto di molecola è relativamente moderno, anche se può fare sfoggio d'antenati importanti, e questo non è strano in un'ottica riduzionista. Che la materia fosse formata da aggregati (formati in maniera più o meno casuale) d'atomi era un'idea presente già in Democrito, padre dell'atomismo greco, come abbiamo detto. Tuttavia, a lungo nessuno si era occupato di evidenziare e studiare questi aggregati, che restavano, quindi, gruppi d'atomi le cui proprietà erano quelle medie degli atomi costituenti, né di attribuire loro un nome. È, infatti, con l'attribuzione di un nome che si evidenzia un nuovo *status* ontologico di questi enti che passano da aggregati (insieme d'atomi) a molecole (sistema d'atomi). Quando una porzione di materia ha un suo nome specifico significa che si vuole mettere in evidenza la sua individualità (proprietà specifiche) e tale molecola si può usare come un soggetto d'azione. La visione del mondo microscopico fatta d'aggregati senza particolari sistemi da evidenziare trovava la sua controparte nel mondo macroscopico delle sostanze chimiche nell'idea che le sostanze semplici fossero poche (si pensi alle quattro sostanze d'Aristotele) ed era solo la loro combinazione che creava una materia dall'apparenza così varia.

Nell'atomismo classico, esisteva sia un ostacolo epistemologico sia un ostacolo scientifico alla definizione di un concetto analogo all'attuale concetto di molecola. Da un punto di vista epistemologico, come abbiamo già detto, l'atomismo classico è stato probabilmente la prima coerente filosofia riduzionista. In quest'ottica, la molecola come ente strutturato (sistema) distinto dall'insieme degli atomi era incomprendibile. Dal punto di vista scientifico, per Democrito, gli atomi non perdevano la loro identità nel processo di aggregazione e restavano in contatto, giustapposti. Aristotele criticò l'atomismo perché questi atomi non potevano nelle aggregazioni formare nuove entità. Da questo punto di vista, gli atomisti negavano l'individualità delle sostanze composte. Aristotele era su questo punto più consono

con la visione chimica moderna: i costituenti nel formare i composti danno vita a sostanze nuove e non a semplici giustapposizioni di elementi preesistenti. L'impenetrabilità e l'eternità degli atomi democritei rendevano la visione odierna delle molecole impossibile. Nello stesso quadro filosofico-scientifico si muove la fisica odierna con la meccanica quantistica: l'insieme di enti atomici è per essa un aggregato non un sistema e niente di nuovo si genera mettendo insieme un gruppetto di atomi.

Nel XIX secolo il concetto di molecola a lungo è stato confuso con il concetto d'atomo. Alla fine del XVIII secolo e agli inizi del XIX i chimici francesi assegnavano il termine *molécule* al limite di divisibilità delle sostanze, mentre i chimici inglesi usavano con lo stesso significato il termine *atom*. Questa confusione ha, come abbiamo visto, radici filosofiche. Da un punto di vista più strettamente scientifico, parte della confusione veniva dal fatto che i chimici non riuscivano ad immaginare che le molecole d'alcuni elementi (idrogeno, ossigeno, ecc.) fossero formate da più atomi ( $H_2$ ,  $O_2$ , ecc.). Dalton aveva escluso che potesse esistere un legame tra due atomi uguali. In conseguenza del fatto che con l'espressione "particella" una volta s'intendeva l'atomo e un'altra volta la molecola si manifestò un'evidente contraddizione tra le ipotesi di Dalton e quelle di Gay-Lussac. Avogadro, nel 1811, cercò di rimuovere queste contraddizioni ed iniziò a distinguere questi due concetti di particella elementare, ma il suo lavoro fu a lungo sconosciuto. Uno dei primi ad aver chiaramente capito l'indispensabilità di una chiara delimitazione dei concetti d'atomo e di molecola fu M.A.A. Gaudin. Avendo nettamente definito tali concetti, Gaudin introdusse per i gas elementari la distinzione in molecole monoatomiche, biatomiche e poliatomiche. Egli scriveva che una molecola di gas idrogeno combinandosi con una molecola di gas cloro dava due molecole di gas acido cloridrico; affinché ciò avvenisse era necessario che le molecole originali si dividessero in due parti e poiché queste due mezze molecole non potevano più ulteriormente dividersi noi le consideravamo degli atomi. Tale autore, per primo, scrisse correttamente la sintesi dell'acqua  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ , in cui appare chiara la biatomicità della molecola dell'ossigeno e dell'idrogeno, ma neanche questo lavoro chiarì definitivamente la situazione. Nel 1848 ci provò Gerhardt a chiarire la differenza tra atomo e molecola. Egli diceva che l'atomo era indivisibile, ma esso non esisteva allo stato libero isolato e la molecola era il raggruppamento d'atomi tenuti insieme dell'attrazione della materia divisibile con i normali mezzi chimici.

Fu il lavoro di Cannizzaro a risolvere definitivamente la questione della differenza tra atomo e molecola. Basandosi sulla misura della densità di vapore delle sostanze elementari e dei composti, utilizzando i calori specifici per il controllo dei pesi atomici, come pure il criterio dell'isomorfismo per rivelare le anomalie nella "costituzione molecolare", Cannizzaro diede un nuovo sistema di pesi atomici per 21 elementi, risultati poi tutti sostanzialmente corretti. A seguito della relazione di Cannizzaro a Karlsruhe del 1860 fu accettata la seguente proposta: "si propone di adottare concetti diversi per molecola e atomo, considerando molecola la quantità più piccola di sostanza che entra in reazione e che ne conserva le caratteristiche

fisiche e intendendo per atomo la più piccola quantità di un corpo che entra nella molecola dei suoi composti”.

Il concetto di molecola svolge un ruolo fondamentale nella scienza attuale e non solo. Il sottotitolo del mio libro *La chiave del mondo* recita “dalla filosofia alla scienza: l’onnipotenza delle molecole”. Tale concetto può essere utilizzato per tutti gli enti materiali, costituendo un particolare approccio scientifico allo studio della materia (approccio chimico per composizione). È tale concetto, infatti, che ci consente di padroneggiare la complessità qualitativa e quantitativa del mondo macroscopico trasportandola in parte nel mondo microscopico. È in questo modo che si evita l’alternativa tra la semplicità (uno o pochi elementi microscopici) o la completa complessità (infinite sostanze microscopiche, tante quante sono le sostanze macroscopiche uniformi come il vino, il legno, ecc.). L’universo molecolare con milioni d’individui differenti, ognuno con un nome proprio, può rappresentare inoltre il collegamento tra il “semplice” mondo della fisica e il “complesso” mondo biologico e fare anche da prototipo di spiegazione per branche scientifiche (come le scienze umane) difficilmente strutturabili intorno al concetto di legge, tipico dell’approccio fisico [10].

Confrontiamo adesso il concetto di molecola e quello di sistema meccanico. Consideriamo il seguente sistema meccanico: un gruppo di palle in movimento su di un tavolo da biliardo. L’unica interazione meccanica possibile tra i costituenti del sistema è l’urto, cioè un’interazione istantanea e a contatto, trascurando ovviamente l’attrazione di gravità. Tale interazione modifica solamente le velocità delle palle in un sistema ideale (urto elastico). Questo sistema meccanico rappresenta bene l’idea della materia degli atomisti classici: gli atomi erano pezzi di materia perfettamente elastici che si urtavano in uno spazio vuoto. Non v’è dubbio che le velocità di due sfere che siano entrate in collisione in un dato istante rimangono fra loro *correlate* dopo l’urto a causa della legge di conservazione della quantità di moto (o se si vuole dell’energia). Precisando meglio il concetto di correlazione, possiamo dire che due grandezze  $v_A$  e  $v_B$  (e con loro i sistemi fisici e cioè le due sfere A e B) non sono correlate quando la probabilità *congiunta* di trovare la sfera A alla velocità  $v_A$  e la sfera B alla velocità  $v_B$  è uguale al prodotto delle probabilità  $P(v_A)P(v_B)$ . Se la velocità di una pallina dipende da quella di un’altra con cui ha colliso ovviamente la probabilità congiunta non può essere il semplice prodotto delle probabilità. Nel caso più semplice di due palline uguali che si urtano di cui la prima, A, in moto a velocità  $v_A$  e la seconda, B, ferma si ottiene dopo l’urto A ferma e B con velocità  $v_A$ . In generale, quando due corpi, A e B, con velocità  $v_A$  e  $v_B$  collidono, le velocità risultanti saranno funzione di entrambe le velocità iniziali.

L’istaurarsi di una correlazione dopo un’interazione non è specifica solamente dell’urto, ma è valida per due qualunque sistemi che siano stati in muta interazione nel passato, anche se al presente non lo sono più. La correlazione fra gli eventi appare, quindi, come una *memoria* di fatti accaduti nel passato. In questo contesto possiamo tradurre la proprietà di omogeneità del tempo asserendo che la memoria

di un fatto permane inalterata finché non accade qualche nuovo evento: il puro e semplice scorrere del tempo non altera il ricordo, che continua ad essere presente in termini di correlazioni, e la misura dell'effettivo *isolamento* di un sistema potrà essere vista come maggiore o minor durata della memoria. Se ora una sfera A, dopo avere urtato la sfera B, urterà una nuova sfera C, la correlazione tra A e B si trasferisce anche a C che “ricorderà” anche l'urto A-B. Come è facile intuire, a causa dei successivi urti si ha una crescita delle correlazioni che però divengono singolarmente sempre più deboli. Dopo un certo tempo la velocità di una qualunque sfera sarà determinata da tutte le miriadi di urti precedentemente subiti, mentre l'influenza di un singolo urto accaduto nel passato diventerà sempre più piccolo, al limite trascurabile. La stessa diffusione delle correlazioni accade per un insieme qualunque di oggetti che siano stati “uniti” da qualunque interazione, anche diversa dall'urto. Secondo Prigogine è proprio questa diffusione e crescita delle correlazioni che rappresenta fisicamente la freccia del tempo, ossia la sua *unidirezionalità*. La grandezza teorica deputata a quantificare la *direzionalità* del tempo è l'*entropia*, mentre l'energia (o meglio la sua conservazione) ne riflette la sua *omogeneità*.

Poniamoci ora la domanda se il nostro insieme di palle disposte in un certo modo su di un tavolo da biliardo costituisca o no un ente strutturato, un sistema. Certo ogni insieme di oggetti fermi ha una determinata posizione relativa e se per struttura s'intende solo la disposizione spaziale quest'insieme ha una determinata struttura. Io credo, come dovrebbe essere a questo punto evidente, che il concetto di struttura, nel caso di enti materiali, implichi senz'altro una disposizione spaziale delle parti costituenti, ma non si esaurisca in essa. Credo che più rispondente all'uso che la scienza fa del concetto di struttura sia l'evidenziare le seguenti proprietà. Si dice che una sistema è dotato di struttura quando l'insieme delle parti costituenti presenta due caratteristiche: tali parti sono in certe relazioni stabilite, e per un tempo sufficientemente lungo rispetto ai fenomeni che si stanno considerando, e tali relazioni modificano i componenti rendendo specifica ed unica quest'aggregazione, trasformano cioè un aggregato in un sistema. Una volta che il concetto di struttura è definito in questi termini possiamo senz'altro affermare che un insieme di palle da biliardo non costituisce una struttura ed un insieme di atomi sì. Tutto ciò si riconnette alla difficoltà, già evidenziata, per l'atomismo classico di concepire il concetto di struttura e di spiegare, quindi, l'insorgere delle proprietà nuove in un composto. La mancanza del concetto di struttura ha sempre resa l'aggregazione atomica qualcosa di *puramente meccanica* e non in grado di spiegare il *nuovo* che emergeva nel momento in cui si andava a formare una vera e propria molecola.

Dal punto di vista scientifico odierno è evidente che gli atomi all'interno di una molecola sono *particolari*: essi non sono uguali a quelli isolati e si parla di atomi *in situ*. Consideriamo, per esempio, quattro molecole che contengono atomi d'idrogeno:  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_5OH$ ,  $C_6H_6$ . Ogni chimico sa bene che l'idrogeno dell'acqua è diverso (per esempio è più acido) di quello del metano, che nell'alcol etilico vi sono due tipi differenti di idrogeni e ambedue differenti da quelli dell'acqua e

del metano e lo stesso dicasi per il benzene. Ovviamente se indichiamo con lo stesso simbolo (H) questi atomi qualcosa devono pure avere di simile e tuttavia non sono identici. Potremmo dire con Morin, che le proprietà di eguaglianza e di diversità sono ambedue presenti.

Vorrei accennare ad un ultimo punto riguardante il concetto di struttura molecolare e di struttura in generale. Ha senso parlare di struttura di un sistema quando esso è in grado di opporsi alla sua variazione dovuta ad una piccola perturbazione esterna. Se, infatti, qualunque perturbazione piccola a piacere modifica la struttura del sistema, il sistema stesso è in balia del caso. È ben nota la resistenza che i sistemi viventi oppongono ai piccoli cambiamenti ambientali. Qui vogliamo evidenziare la “stabilità” della struttura molecolare. La meccanica quantistica ha, infatti, senza volere fornito una potente arma al concetto di struttura atomica e molecolare e una convincente spiegazione del perché gli individui chimici posseggono proprietà costanti in differenti condizioni ambientali e di sintesi. La discontinuità dell’energia a livello microscopico giustifica, infatti, queste essenziali proprietà [9, Cap. 6].

Chiudiamo questo discorso guardando alle definizioni chimiche standard della struttura molecolare. Le definizioni classiche della struttura molecolare in termini di costituzione, configurazione e conformazione possono andare bene se, definita la costituzione come la sequenza dei legami, si metta poi in evidenza la modifica che tali legami generano sugli atomi costituenti. È questa modifica, dovuta all’interazione specifica ed unica tra gli atomi, che costituisce il sistema molecolare, che crea un ente unico e nuovo. È in questo senso, come visto, che si può affermare che un gruppo di palle da biliardo, disposte in un certo modo su di un tavolo, non costituisce una struttura perché le palle continuano ad essere identiche alle stesse palle separate. È in questo senso che si afferma che il concetto di struttura molecolare è un concetto recente e che quindi, tanto gli atomisti classici quanto i primi atomisti moderni non possedevano un tale concetto. Invece, in senso generale, come abbiamo già detto, l’importanza del problema delle parti e delle loro qualità all’interno del tutto era stato intuito da Aristotele ed era fondamentale per i filosofi medievali.

#### 2d. *Sistemi in biologia*

Dopo aver trattato nei paragrafi precedenti i sistemi materiali inanimati, ora spendiamo qualche parola sui sistemi viventi. Gli organismi viventi, più delle molecole, si differenziano dai sistemi fisici e, quindi, esiste tutto un ambito filosofico che li ha da sempre differenziati. Il rapporto parte-tutto è estremamente complesso nei sistemi viventi: le parti viventi sono dei “tutti” e i “tutti” viventi sono delle parti. Per dirla con Koestler: “Nel campo della vita, non esistono né parti né totalità in senso assoluto” [3] e anche all’occhio inesperto di questioni filosofiche, appare subito evidente che una caratteristica essenziale del vivente è quella di sottrarsi alla scomposizione. Un organismo è vivente solo fin quanto è “tutto intero”; qualunque divisione sostanziale “uccide” l’organismo. Come già detto, uno degli scopi di

questo lavoro è di evidenziare l'impossibilità concettuale, e non solo pratica, del riduzionismo e, quindi, della riduzione della biologia a chimica e della chimica alla fisica. Tuttavia, altrettanto importante per il lavoro è di evitare la dicotomia inanimato-animato che porta a due riduzionismi distinti per i due ambiti. Nella rimozione della dicotomia animato-inanimato, un ruolo chiave è svolto dalla chimica. La sua autonomia, la sua irriducibilità, moltiplica le differenze e le stempera. L'idea che sorregge questo lavoro è che gli enti strutturati od organizzati, i sistemi, sono presenti in molti ambiti e, quindi, creano differenze epistemologiche e non dicotomie. La molecola, come abbiamo visto, è da questo punto di vista paradigmatica. Ciò premesso, non staremo qui a mostrare in dettaglio l'importanza del concetto di sistema in biologia. Esso è fin troppo evidente. Ci occuperemo esclusivamente di due problemi connessi: la possibilità o meno di un riduzionismo informazionale in biologia e il rapporto ecologico tra i sistemi viventi e l'ambiente in cui vivono.

Secondo alcuni, vi è una nuova forma di riduzionismo in biologia, non più fiscalista e meccanicista, ma informazionale, legata alla decodifica del DNA. Monod dopo aver definito gli esseri viventi "macchine chimiche" aggiunge: "Come ogni macchina, ogni organismo, anche il più semplice, rappresenta un'unità funzionale coerente e integrata. È ovvio che la coerenza funzionale di una macchina chimica tanto complessa, e per di più autonoma, esige l'intervento di un sistema ciberneticico che controlli in più punti la sua attività" [4]. È infatti evidente che, anche se gli enzimi svolgessero alla perfezione il loro compito reazione per reazione, il metabolismo cellulare finirebbe inevitabilmente nel caos se tali reazioni non fossero subordinate le une alle altre. In realtà, l'aspetto informazionale può essere inglobato tanto nel contesto riduzionista quanto in quello olistico. Infatti, la genetica molecolare è una forma di riduzione *sui generis* (non più fisico-chimica, ma basata sulle scienze della comunicazione). Più che di riduzionismo in senso classico, qui si deve parlare di un "prestito metaforico" che, tra l'altro, non lascia invariato il linguaggio tratto dalla teoria delle comunicazioni: codice, traduzione, errore di copiatura ecc. sono altrettanti termini teorici costitutivi dei dizionari della genetica, che si applicano alla interpretazione e spiegazione del significato del DNA e del suo funzionamento in maniera diversa dagli omologhi termini della scienza delle comunicazioni. È sicuramente vero che per cogliere il significato e la portata della decodifica del DNA ad opera di Watson e Crick, non si può non avere presente ciò che in quegli stessi anni avviene nel mondo delle scienze delle comunicazioni (con l'elaborazione del concetto di "informazione" di Shannon e Weaver), tuttavia, bisogna anche vedere come tale concetto, esportato in genetica, è stato modificato da quello ciberneticico.

Chiuderei questo paragrafo rifacendomi a Morin, la cui posizione sul problema apertura-chiusura dei sistemi viventi è da me condivisa. Il concetto di ambiente deve diventare ecosistema, cioè un ambiente naturale unitario (un sistema appunto) costituito dagli esseri viventi che vivono in quella "nicchia" (biocenosi), dall'ambiente inorganico (biotopo) e da tutte le interazioni. Per ogni essere vivente



l'ecosistema è assai più di una riserva di cibo o di una fonte di entropia negativa da cui l'essere ricava organizzazione, complessità, informazione. È una delle dimensioni della vita, non meno fondamentale dell'individualità, della società, del ciclo delle riproduzioni. L'ambiente coopera, infatti, in permanenza con l'organizzazione degli esseri viventi che sono, quindi, in permanenza eco-dipendenti. Gli esseri eco-dipendenti hanno una doppia identità: un'identità propria che li distingue e un'identità di appartenenza ecologica che li collega al loro ambiente. Dice Morin: "*Tali esseri possono costruire e mantenere la loro esistenza, la loro autonomia, la loro individualità, la loro originalità, solo nel rapporto ecologico, cioè in e attraverso la dipendenza nei confronti del loro ambiente. Nasce di qui l'idea alfa di ogni pensiero ecologizzato: l'indipendenza di un essere vivente ne richiede la dipendenza nei confronti dell'ambiente che lo circonda*" [5]. L'apertura ecologica garantisce al sistema un rapporto insieme energetico, materiale, organizzazionale ed esistenziale con l'ambiente. Vediamo, quindi, che l'apertura ecologica non è una finestra sull'ambiente: l'organizzazione così aperta non si inserisce nell'ambiente come la semplice parte di un tutto. L'organizzazione e l'ambiente sono, pur rimanendo distinti l'una dall'altro, *l'una nell'altro*. L'esistenza è contemporaneamente immersione in un ambiente e distacco rispetto a tale ambiente. Da un lato "non si dà alcuna possibilità di esistenza distaccata e autonoma", dall'altro ci vuole un certo distacco, una certa autonomia, cioè un minimo di individualità, per esistere. L'apertura del sistema vivente è, quindi, assai più radicale di quella termodinamica. Essa è ancor più profonda di quanto avessero pensato gli scopritori del "sistema aperto", i quali avevano colto solo i caratteri esterni del fenomeno (input/output, stato stazionario). Essi avevano certo svelato l'importanza capitale del rapporto ecologico, ma senza trarne tutte le conseguenze. L'apertura è una nozione ad un tempo organizzazionale, ecologica, ontologica, esistenziale. Questa nozione di portata polidimensionale richiede una completa riorganizzazione intellettuale.

### 3. CONCLUSIONE

Da quanto detto, dovrebbe trasparire evidente l'importanza del concetto di sistema in scienza. Eppure esso è così ben nascosto in fisica e in chimica che sembra proprio tale concetto la base della dicotomia animato-inanimato: il sistema vivente contrapposto alle entità fisiche e chimiche. L'indivisibilità del primo contrapposto all'analisi delle seconde. Se poi ci si sposta sul piano delle scienze umane, nelle discipline sociali e antropologiche, si vede crescere ancora l'importanza del concetto di sistema fino all'individualità di ogni singolo sistema vivente umano, la singola persona.

In questo lavoro si è cercato di far vedere che il concetto di sistema, pur nella differenza d'importanza, svolge un ruolo sia nelle scienze naturali dell'inanimato, sia in quelle dell'animato, oltre che in quelle umane. Esso può essere, quindi, un concetto unificante e la Teoria dei Sistemi, con tutti i suoi limiti, ne rappresenta

una controprova. Un ruolo centrale per il concetto di sistema è svolto dalla chimica che, come detto, è la prima vera scienza sistemica.

Nel pensiero meccanicista-riduzionista, come abbiamo visto, si tende a considerare ogni sistema come isolato – privo di interrelazioni significative con altri sistemi-ambiente o con sottosistemi – e a ricercare al suo interno relazioni causali lineari, monodirezionali. Il mondo come viene visto dal paradigma sistemico è, invece, radicalmente diverso, più ricco, caratterizzato da un intreccio fittissimo di interrelazioni. Naturalmente è necessario orientarsi in tale intreccio, stabilendo punti di riferimento e individuando aspetti-chiave. Anche qui la differenza col meccanicismo è radicale: per quest'ultimo la chiave va ricercata nelle cause (passate) che hanno generato un certo stato/fenomeno, assumendo una prospettiva diacronica che considera il presente come frutto del passato. Nell'approccio sistemico, viceversa, si tende a attribuire maggiore importanza ai fattori *attuali* che contribuiscono a mantenere in essere quel certo stato/fenomeno, più che a quelli che lo originarono; la prospettiva è dunque centrata sul presente e, quindi, sincronica e più che spezzettare il processo in fasi e ruoli distinti è necessario considerarlo nella sua interezza e circolarità, ponendo i soggetti in gioco tutti sullo stesso piano e cercando di capire come ognuno, a suo modo, contribuisce al permanere di un certo stato di fatto: fattori che svolgono funzioni *omeostatiche* (dal greco *Hômoios* = simile e *stâsis* = stare; dunque: non cambiare, rimanere uguale). Nell'approccio sistemico una delle chiavi di volta è, dunque, rappresentata dall'individuazione dei processi omeostatici più che dei fattori generatori iniziali. Lo stato stazionario di un sistema aperto è in certa misura indipendente dal suo stato iniziale, ed è determinato principalmente tanto dalla natura del processo in atto quanto dai parametri del sistema. I processi omeostatici, oltre ad operare dall'interno del sistema, sono spesso presenti anche ad altri livelli, vale a dire in alcuni dei sovra- e sotto-sistemi con cui tale sistema è in relazione. Ogni sistema possiede, infatti, non solo omeostati interni ma è inserito in ambienti omeostatici, che limitano, nel bene e nel male, le possibilità di oscillazione del proprio stato d'essere.

Come applicare queste nozioni nell'ambito della didattica scientifica e chimica in particolare? È fuori dallo scopo di questo lavoro e dalle competenze dell'autore, dare "ricette" specifiche per portare nella maniera più opportuna in ambito didattico il concetto di sistema chimico. Tuttavia, abbiamo visto che la chimica rappresenta una fondamentale scienza sistemica per l'importanza che in essa assume il concetto di molecola (sistema di atomi) e di composto chimico (sistema di elementi) e questa "verità scientifica" va sottolineata sul piano filosofico, rivendicata su quello culturale ed integrata in quello didattico. Ancora una volta appare fondamentale il ruolo culturale della chimica, snodo essenziale tra la fisica e la biologia, tra il "semplice" (ma abbiamo visto che anche in fisica esistono sistemi complessi) del fisico e il "complesso" traboccante della biologia. Non più ponte tra fisica e biologia, perché per sua tipologia il ponte è qualcosa di piccolo tra due territori grandi, ma qualcosa di concettualmente simile alle altre due discipline. Inoltre, in

questa differenziazione “alla pari” tra fisica, chimica e biologia ne resta stritolato tanto il riduzionismo quanto la dicotomia inanimato-animato.

**Riassunto** – In questo lavoro è stato studiato il fondamentale concetto di sistema in chimica. In questa disciplina questo concetto è strettamente legato a quello di struttura, come in biologia, ma non in meccanica. Entrambi i concetti di molecola e composto chimico sono stati identificati come concetti sistemici e il loro uso in ogni spiegazione chimica (dalla scuola alla ricerca) può essere giustificato solo in questo approccio. Due conseguenze generali sono state mostrate in questo lavoro: la prima riguardo alla relazione tra la chimica, la fisica e la biologia e la seconda sulle dicotomie inanimato-animato e animale-uomo.

**Parole chiave:** sistema, struttura, molecola, composto chimico, inanimato-animato, animale-uomo.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Galilei G., 1968. *Il Saggiatore*, Edizione nazionale delle opere, Barbera, Firenze, 6, 350, in E. Bellone, 1999. *I nomi del tempo*, Bollati Boringhieri, Torino, 43.
- [2] Homberg W., *Suite de l'article trois des Essays de chimie*, in A. Di Meo. In *Riflessioni sulla Chimica: radici, specificità, attualità e prospettive* (G. Villani, ed.), 2004, Nuova Civiltà delle Macchine, Rai-Eri, 3, 26-39.
- [3] Koestler A., 1971. *Il fantasma dentro la macchina*, SEI, Torino, 317.
- [4] Monod J., 1997. *Il caso e la necessità*, Mondadori, Milano, 45-46.
- [5] Morin E., 2001. *Il metodo 1. La natura della natura*, Raffaello Cortina, Milano, 235.
- [6] Nagel E., 1971. *Somme, totalità e unità organiche*, in *Qualità e quantità e altre categorie della scienza* (D. Lerner, ed.), Boringhieri, Torino, 140-163.
- [7] Simon H.A., 1956. *Rational choice and the structure of the environment*, *Psychological Review*, 63, 129-138, in *Teoria dei sistemi* (F.E. Emery, ed.), 1994, FrancoAngeli, Milano, 241.
- [8] Toraldo di Francia G., 1994. *Tempo Cambiamento Invarianza*, Einaudi, Torino, 33-40.
- [9] Villani G., 2001. *La Chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*, CUEN, Napoli.
- [10] Villani G., 2002. *A lezione dalle molecole*, KOS (nuova serie), 203-204, 34-39.
- [11] Villani G., 2005. *È la molecola un sistema meccanico?*, in *Storie di chimica e oltre* (V. Villani, ed.), Aracne, Roma.