Evoluzione dei sistemi: modelli e rappresentazioni

Ezio Roletto♦ Alberto Regis, **Marco Ghirardi•**, **Cecilia Giordano**

SENDS - Storia ed Epistemologia per una Nuova Didattica delle Scienze - Università di Torino

1. Sistemi e trasformazioni

Il complesso di proprietà definite per studiare un insieme limitato di fenomeni, ossia una porzione di realtà, viene chiamato *sistema*. In ogni particolare momento, lo *stato del sistema* è individuato dai valori assunti dalle grandezze fisiche che costituiscono le *variabili di stato* del sistema. Se i valori di una o più grandezze fisiche del sistema mutano nel corso del tempo, allora cambia lo stato del sistema che passa da uno *stato iniziale* a uno *stato finale***:** è avvenuta una "evoluzione del sistema".

Si possono individuare porzioni di materia che vengono definiti "corpi puri" o "sostanze". Ogni sostanza, così come si presenta in condizioni stabilite (di temperatura e di pressione), è dotata di proprietà fisiche e chimiche peculiari che ne definiscono l'identità (per esempio la composizione chimica, la densità e l'indice di rifrazione, la durezza e la solubilità). Altre caratteristiche che consentono di individuare l'identità di una sostanza fanno riferimento a valori costanti che assumono certe grandezze in opportune condizioni di cambiamento, per esempio le temperature di fusione e di ebollizione. Sulla base di ciò che cambia (*variante*) e ciò che non cambia (*invariante*) nel corso dell'evoluzione di un sistema, è possibile stabilire la seguente distinzione:

1. L'evoluzione di un sistema in cui l'identità delle sostanze coinvolte si conserva prende il nome di *trasformazione fisica*. Per esempio, nel corso del processo di fusione in cui il ghiaccio (corpo solido; stato iniziale) si trasforma in acqua liquida (corpo liquido; stato finale), la sostanza "acqua" che costituisce il sistema conserva la propria identità. Il variante è lo *stato fisico*1 della sostanza, mentre l'invariante è l'*identità* della sostanza.
2. L'evoluzione di un sistema nel corso della quale vengono generate una o più sostanze che prima non erano presenti prende il nome di *trasformazione chimica*. Lo stato iniziale è caratterizzato dalla presenza di sostanze dette "reagenti", mentre lo stato finale è caratterizzato dalla presenza di altre sostanze dette "prodotti"*;* le sostanze iniziali interagiscono dando origine ai prodotti. Il variante è l'*identità delle sostanze*, mentre l'invariante è l'*identità degli elementi*.

L'evoluzione di qualsiasi sistema può essere descritta come una successione di stati per i quali esso passa nel corso della sua trasformazione dallo stato iniziale a quello finale, ogni stato essendo caratterizzato dai valori di alcune variabili. In particolare, per i sistemi nei quali avvengono trasformazioni chimiche, sono importanti le quantità delle sostanze reagenti e di quelle prodotte.

2. Campi e livelli di interpretazione

I sistemi, così come le procedure operative, appartengono al *campo empirico* al quale afferiscono i *fatti* che la scienza descrive e interpreta, gli *apparati sperimentali* che essa progetta e utilizza e le *operazioni* che essa compie. I modelli e i concetti – necessari per descrivere e interpretare il mondo della natura – appartengono al *campo teorico*, all'interno del quale coesistono sia i modelli macroscopici sia quelli microscopici. La rappresentazione del mondo della natura tramite i modelli, sia macroscopici sia microscopici, si avvale di *segni grafici*, mediante i quali si possono produrre rappresentazioni *verbali* (in cui i fenomeni vengono descritti utilizzando le parole del linguaggio comune o dei linguaggi settoriali), rappresentazioni *iconiche* (in cui si utilizzano segni di varie forme e dimensioni) e rappresentazioni *simboliche* (in cui si utilizzano, per esempio, simboli chimici per rappresentare sostanze, atomi, molecole, ioni, elementi, ecc).

Le trasformazioni di un sistema – di per sé appartenenti al campo empirico – possono essere descritte e interpretate utilizzando sia modelli macroscopici sia modelli microscopici. Il concetto di *sostanza* appartiene al livello macroscopico; quindi l'uso di tale concetto per distinguere le trasformazioni fisiche da quelle chimiche implica il ricorso a un modello macroscopico. Ma per interpretare le trasformazioni fisiche e chimiche è possibile utilizzare i concetti di atomo e molecola che implicano il ricorso a un modello microscopico. La singolarità del "modo di pensare del chimico" è data dal continuo va-e-vieni tra i due livelli di descrizione e interpretazione della realtà; sfortunatamente questo continuo passaggio costituisce una delle maggiori difficoltà incontrate dagli studenti nell'apprendimento della chimica.

♦ ezio.roletto@unito.it

• Istituto Tecnico Industriale Statale "Quintino Sella". Biella.

1. Il riconoscimento dello *stato fisico* di un sistema – da non confondere con il concetto di *stato del sistema* – dipende da proprietà quali *forma*, *volume* e *comprimibilità* di un corpo, al quale potrà essere attribuito lo stato solido, liquido o aeriforme. Se cambia il valore di una o più grandezze che caratterizzano il sistema (ad esempio pressione o temperatura), cambia lo stato del sistema, ma non è detto che muti lo stato fisico del corpo.

3. Le trasformazioni chimiche

Per introdurre il concetto di trasformazione chimica, si può proporre agli studenti il sistema costituito da cloruro di piombo (II) e ioduro di potassio. Quando queste due sostanze vengono fatte interagire tra loro a secco in modo opportuno, per esempio mescolandole in un mortaio con un pestello, si percepisce visivamente la formazione di una nuova sostanza di colore giallo, assente dal sistema iniziale, che risulta essere ioduro di piombo (II). Il fenomeno può essere descritto e interpretato in modi diversi a seconda che ci si limiti al campo empirico oppure si passi al campo teorico.

Campo empirico – Nell'ambito del campo empirico, constatando la comparsa di qualche cosa di colore giallo, si può ammettere che sia avvenuta una trasformazione. In questa sede, ci si deve riferire unicamente ai fatti senza caratterizzarli con ulteriori descrizioni che possano sconfinare nel campo teorico. Quindi, una prima descrizione dei fatti potrebbe essere la seguente:

Due polveri di colore bianco sono mescolate a secco in un mortaio con un pestello. In seguito a questa operazione, fa la sua comparsa una polvere di colore giallo.

In questa descrizione del processo si ricorre alle sole nozioni di polvere e colore che non sono specifiche della chimica o delle scienze in generale; quindi, una descrizione così poco *intrisa di teoria* può essere ritenuta una semplice descrizione di un fatto e non una rappresentazione mediante un modello scientifico. Infatti, un modello è costituito da un insieme di proposizioni che indicano come gli scienziati si rappresentano sia la realtà, e ha alle spalle una teoria scientifica strutturata che lo rende possibile e intelligibile.

Campo teorico: livello macroscopico – Nell'ambito del campo teorico, è necessario utilizzare il concetto di sostanza per descrivere la trasformazione e offrirne una prima interpretazione. Quindi, ci si potrà esprimere come segue:

Una piccola quantità della sostanza cloruro di piombo è mescolata, in un mortaio e usando un pestello, con una piccola quantità della sostanza ioduro di potassio. Si formano la sostanza ioduro di piombo, di colore giallo, e la sostanza cloruro di potassio, di colore bianco. La trasformazione è di tipo chimico perché le sostanze inizialmente presenti nel sistema interagiscono dando origine a nuove sostanze.

Il passaggio dallo stato iniziale allo stato finale del sistema è chiamato *trasformazione chimica* perché, essendo comparsa almeno una sostanza che prima non era presente, si constata la modificazione dell'identità delle sostanze costituenti inizialmente il sistema. Mediante il linguaggio chimico si può fare un resoconto qualitativo delle sostanze presenti inizialmente e di quelle presenti dopo che si è prodotto il cambiamento. La trasformazione chimica può essere rappresentata con simboli verbali:

cloruro di piombo + ioduro di potassio → ioduro di piombo + cloruro di potassio

La descrizione e l'interpretazione della trasformazione chimica si basano su saperi chimici che sono lo sbocco di processi di concettualizzazione e di astrazione precedenti (sostanze, miscele, termini chimici, ecc.); si tratta di saperi che sono ormai entrati a far parte delle conoscenze quotidiane e quindi non sono più percepiti come costruzioni mentali, ma vengono utilizzati come se si trattasse della realtà.

Campo teorico: livello microscopico – Per descrivere e interpretare le trasformazioni chimiche a livello microscopico si ricorre al modello di *reazione chimica*. Questo implica [1] che si distingua fra trasformazione chimica, che è il fenomeno, e reazione chimica che è il modello mediante il quale di tale fenomeno si producono rappresentazioni chiamate *schemi di reazione*[2]. Le specie chimiche coinvolte nel processo vengono rappresentate mediante il linguaggio simbolico chimico e le trasformazioni chimiche vengono interpretate come processi di riorganizzazione degli atomi; ciò spiegherebbe come mai – a livello macroscopico – le sostanze di partenza interagiscano dando origine a nuove sostanze. In tali processi, sono gli elementi a conservare la propria identità. Lo schema di reazione che rappresenta la trasformazione chimica è:

$$PbCl_2(s) + 2KI(s) \rightarrow PbI_2(s) + 2KCl(s)$$

Affinché la scrittura di questo schema di reazione sia compresa, è necessario che sia già acquisita l'idea di discontinuità della materia. Per esempio, i cambiamenti di stato fisico possono essere modellizzati con un modello particellare semplice nel quale si postula che le particelle siano indivisibili e indeformabili. Il modello è costituito da una serie di regole, applicando le quali è possibile produrre, usando opportuni simboli, rappresentazioni iconiche dei sistemi studiati. Però il modello risulta inadeguato per interpretare le trasformazioni chimiche. Nel sistema che è stato preso in

2. Spesso si usa l'espressione inappropriata «equazione chimica».

considerazione, a seguito dell'interazione tra cloruro di piombo (II) e ioduro di potassio, si ha la percezione visiva della formazione di una nuova sostanza, assente dal sistema iniziale, che risulta essere ioduro di piombo (II).
Questa nuova sostanza di colore giallo che si è formata è costituita da due specie chimiche presenti nelle due sostanze reagenti: la specie chimica *ioduro*, presente nello ioduro di potassio; la specie chimica *piombo (II)*, presente nel cloruro di piombo (II). Quindi la nuova sostanza che si forma nella trasformazione chimica non è una sostanza qualsiasi, ma una sostanza costituita da due specie chimiche già presenti nelle sostanze iniziali del sistema. Dal punto di vista del modello particellare, questo significa che l'assioma "le particelle sono indivisibili" non è più accettabile come regola del modello e deve essere sostituito con un nuovo assioma: "le particelle che costituiscono le sostanze sono divisibili, poiché sono costituite da altre particelle". Questa modifica non inficia l'uso del modello particellare per interpretare le trasformazioni fisiche. Infatti la regola non impone che le particelle si dividano in tutte le trasformazioni, ma riconosce la possibilità di ammettere la divisione per interpretare certe trasformazioni della materia.
Per interpretare, a livello microscopico, le trasformazioni chimiche occorre dunque postulare la divisibilità delle particelle: solo così si riesce a spiegare la formazione di nuove sostanze con l'accorpamento di "parti" provenienti dalle sostanze di partenza. Si dovrebbe allora distinguere tra le particelle più grandi (quelle che restano inalterate e indivisibili nelle trasformazioni fisiche) e le particelle più piccole (quelle che costituiscono le particelle più grandi e che si separano nei processi chimici per ricombinarsi in nuove sostanze, ossia in nuove particelle più grandi). Per uscire da queste difficoltà interpretative, i chimici indicano con il termine *molecola* le particelle più grandi e con il termine *atomo* le particelle più piccole che costituiscono le molecole.
Una modellizzazione è possibile allora mediante il modello particellare. Facendo ricorso a una simbologia di tipo iconico, si può stabilire che:

o: piombo ◆: cloruro ●: potassio Δ: ioduro

Di conseguenza, si può rappresentare l'evoluzione del sistema in questo modo.

$$o◆ + ●Δ \rightarrow oΔ + ●◆$$

Quando poi si modellizza la trasformazione chimica mediante la reazione chimica, nello schema di reazione i simboli iconici vengono sostituiti dai simboli chimici. L'interpretazione della trasformazione chimica tramite gli schemi di reazione può dunque essere introdotta in classe anche senza aver affrontato il modello dell'atomo e i legami chimici, ma già subito dopo che gli allievi si sono impadroniti dei concetti di atomo e molecola e dei rapporti di combinazione nelle sostanze composte, in modo da rendere più rigoroso e appropriato il linguaggio chimico utilizzato. Si rimanderà la giustificazione della riorganizzazione degli atomi a un momento successivo, vale a dire dopo avere affrontato la struttura dell'atomo e i legami chimici.
Le idee espresse in precedenza possono essere sintetizzate nelle seguenti formulazioni di riferimento:

- *I sistemi sono soggetti a cambiamenti, denominati trasformazioni, che implicano il passaggio del sistema da uno stato iniziale a uno stato finale.*
- *Una trasformazione può essere fisica o chimica.*
- *In una trasformazione fisica, le sostanze costituenti il sistema conservano la propria identità.*
- *In una trasformazione chimica, il sistema evolve dalle sostanze iniziali (reagenti) alle sostanze finali (prodotti); le sostanze iniziali interagiscono dando origine a nuove sostanze.*
- *Occorre distinguere fra trasformazione chimica e reazione chimica.*
- *La trasformazione chimica è il fenomeno che si produce a livello macroscopico.*
- *A livello microscopico, la trasformazione chimica può essere modellizzata mediante la reazione chimica.*
- *Utilizzando il linguaggio simbolico della chimica, le trasformazioni chimiche sono rappresentate a livello microscopico tramite gli schemi di reazione*.

Si potrebbe pensare che la distinzione fra *trasformazione chimica* e *reazione chimica* sia una sottigliezza filosofica, nata dal piacere di "spaccare il capello in quattro", ma non è così. In primo luogo, la distinzione permette di trattare in modo omogeneo le trasformazioni fisiche e quelle chimiche: in entrambi i casi il termine trasformazione fa riferimento a un "cambiamento" che si produce nel campo empirico. L'uso di modelli macroscopici consente di distinguere le trasformazioni fisiche (mutamenti dello *stato fisico* delle sostanze) dalle trasformazioni chimiche (mutamenti dell'*identità* delle sostanze e delle loro quantità). Si deve però tenere presente [2] che la differenza tra trasformazioni fisiche e trasformazioni chimiche ha senso soltanto a determinati livelli di concettualizzazione, ossia se si considerano il registro macroscopico (quello delle sostanze) o quello microscopico degli atomi e delle molecole. Se però si passa al registro nucleo/elettronico, tale distinzione perde di significato, in quanto entrambi i tipi di trasformazioni vengono interpretati come fenomeni in cui si verifica una qualche variazione nella natura dei legami chimici intramolecolari o intermolecolari.