

## La struttura gerarchica della chimica di base

EZIO ROLETTO\*  
ALBERTO REGIS\*\*  
MARCO GHIRARDI<sup>°</sup>

### Riassunto

In questo articolo, la struttura gerarchica della chimica di base viene considerata alla luce dell'idea di rivoluzione scientifica di Kuhn. Ammettendo che la chimica sia passata attraverso tre grandi fasi rivoluzionarie, vengono individuati tre diversi registri di concettualizzazione: quello macroscopico, quello microscopico atomico/molecolare e quello nucleoelettronico. Si discute poi l'attribuzione ai diversi registri dei concetti di sostanza, atomo/molecola ed elemento al fine di segnalare le palesi inesattezze concettuali che portano a confondere il concetto di elemento con quello di sostanza semplice o con quello di atomo, inesattezze che contribuiscono ad ingenerare negli studenti pericolose confusioni.

### Abstract

In this article the hierarchical logic of the concepts of substance, molecule, atom and element is discussed. According to Kuhn's idea of «scientific revolution», three chemical revolutions are identified and related to three conceptual level: macroscopic (substances), microscopic (molecules and atoms) and submacroscopic (electrons and nuclei). The pervasive use of the term «element» as both a synonym for the term «simple substance» and «atom» is discussed and the learning difficulties caused by this confusion are pointed out.

### 1 INTRODUZIONE

In tutti i libri di testo per l'insegnamento della chimica di base vengono introdotte le entità fondamentali della disciplina: sostanze (semplici e composte), molecole, atomi, elementi, elettroni, nuclei, protoni, neutroni. Tali entità sono organizzate, in modo esplicito o in modo implicito, in una struttura gerarchica [1] che comporta tre livelli o registri: quello macroscopico delle sostanze, quello microscopico atomico/molecolare delle molecole e degli atomi, quello microscopico subatomico dei componenti dell'atomo. (Figura 1).

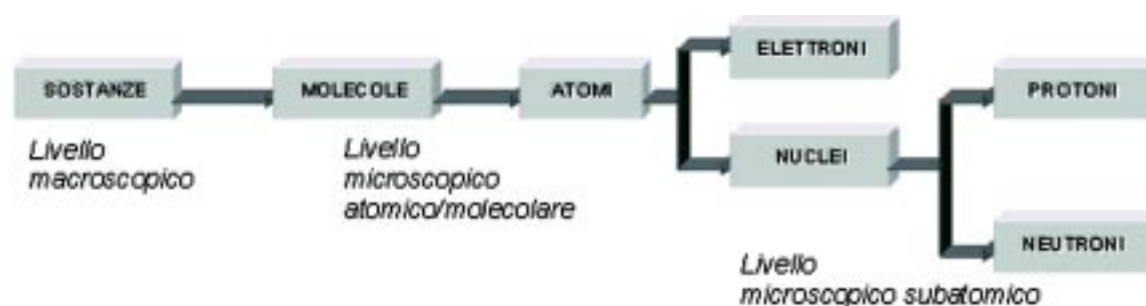


Figura 1 - La struttura gerarchica delle specie chimiche normalmente adottata dai libri di testo

Gruppo IRiDiS (Innovazione e Ricerca per la Didattica delle Scienze) - Università di Torino

\*Dipartimento di Chimica Analitica.

E-mail: ezio.roletto@unito.it

\*\*Istituto Tecnico Industriale Statale "Q.Sella" di Biella.

E-mail: reg.al@aliceposta.it

<sup>°</sup> Istituto Tecnico Industriale Statale "Q.Sella" di Biella.

E-mail: marco150@supereva.it

Le sostanze sono costituite di molecole; le molecole, a loro volta, sono costituite di atomi; gli atomi sono costituiti di particelle subatomiche: elettroni, protoni e neutroni; le ultime due costituiscono il nucleo dell'atomo. Come è facile notare, nella struttura gerarchica della figura 1 manca una delle entità chimiche fondamentali: l'elemento. Ciò dipende dal fatto che il concetto di elemento assume nei libri di testo, e nel pensiero della stragrande maggioranza degli insegnanti, uno statuto ambiguo, non ben definito. Per alcuni, elemento e sostanza semplice sono sinonimi, tanto è vero che nella maggior parte dei libri si trova un capitolo

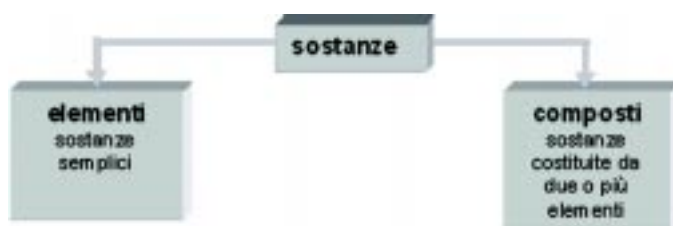
o un sottocapitolo intitolato: *Elementi e composti*. Questa è la concezione che risulta evidente nelle citazioni che seguono, tratte da testi pubblicati negli ultimi quindici anni:

*Dobbiamo ammettere allora che esistono due tipi di sostanze pure: quelle che si lasciano ulteriormente decomporre e quelle che invece non lo fanno. Le prime si chiamano **composti**, le seconde **elementi**.* [2]

*Quando si porta all'incandescenza dell'ossido di mercurio, una polvere di color rosso, si ottengono delle gocce lucenti, di aspetto metallico, e un gas capace di mantenere la combustione, che non si riescono a scindere ulteriormente. Queste sostanze sono **elementi**: il gas che si libera è l'elemento chimico ossigeno, la sostanza che forma goccioline lucenti è l'elemento chimico mercurio. **In generale, si chiamano elementi chimici o semplicemente elementi, le sostanze più semplici che non si possono ulteriormente scindere.*** [3]

*Un **composto** è una sostanza che, sottoposta a particolari trattamenti chimici, si può decomporre in due o più sostanze più semplici. Un **elemento** è una sostanza che non può essere decomposta in sostanze più semplici, qualunque sia il trattamento chimico a cui venga sottoposta.* [4]

*Le sostanze che sono scomponibili in altre sostanze si chiamano **composti**, mentre quelle che non sono scomponibili in altre sostanze sono chiamate **elementi**.* [5]



*Pertanto, se una sostanza pura è decomponibile in sostanze più semplici è un **composto**.*

*Si definisce **composto** una sostanza pura che può essere scomposta in due o più sostanze più semplici.*

*Quando, invece, una sostanza pura non è in alcun modo decomponibile in sostanze più semplici è un **elemento**.*

*Si definisce **elemento** una sostanza pura che non può essere scomposta in sostanze più semplici.* [6]

Per altri, sono sinonimi elemento e atomo:

*Il numero di **atomi di tipo diverso** che si conoscono non è affatto grande: se ne conoscono a tutt'oggi 109, ognuno contraddistinto da un nome ben preciso. Ogni distinto tipo di atomo corrisponde, in termini chimici, ad un **elemento**.* [7]

**78** *Una sostanza pura viene detta **semplice** se gli atomi che concorrono a formare ciascuna molecola sono uguali fra loro; per esempio, l'ossigeno, l'ozono, lo zolfo ecc., sono sostanze semplici perché sono formate da aggregati di molecole a loro volta costituite da atomi uguali fra loro; una sostanza pura viene invece detta **composta** se gli atomi che concorrono a formare ciascuna molecola sono diversi fra loro; per esempio, l'acqua, lo zucchero,*

*l'ammoniaca, l'acido solforico ecc., sono sostanze composte perché formate da aggregati di molecole che a loro volta sono costituite da atomi diversi fra loro.* [8]

Possiamo legittimamente chiederci chi fornisca informazioni corrette; chi ritiene elemento sinonimo di sostanza semplice, chi afferma che elemento è sinonimo di atomo, entrambi o nessuno dei due? Per rispondere a questi interrogativi dovremo prendere in considerazione la storia della chimica e analizzare l'evoluzione di alcuni concetti nel corso di circa due secoli. Per ora limitiamoci a constatare che, nella gerarchia rappresentata in figura 1, la relazione tra sostanza semplice, molecola e atomo è quella introdotta da Stanislao Cannizzaro verso il 1860 e così esposta da Mendeleev [9] nel 1871:

*Anche se, fino a Laurent e Gerhardt, i termini molecola, atomo, equivalente sono stati usati indifferentemente uno al posto dell'altro, e anche se oggi confondiamo spesso le espressioni sostanza semplice ed elemento, tuttavia, ciascuna di esse ha un significato ben preciso, che è importante precisare per evitare confusioni tra i termini usati in filosofia chimica. Una sostanza semplice è qualcosa di materiale, metallo o metalloide, dotato di proprietà fisiche e che mostra determinate proprietà chimiche. All'espressione sostanza semplice corrisponde l'idea di molecola. (...) Bisogna riservare, al contrario, il termine elemento per caratterizzare le particelle materiali che formano le sostanze, e che determinano il loro comportamento dal punto di vista chimico e fisico. Il termine elemento richiama l'idea di atomo.*

Mendeleev postula chiaramente due livelli o registri di concettualizzazione per descrivere la materia: quello macroscopico, al quale appartengono le sostanze, e quello microscopico al quale assegna molecole e atomi. Egli distingue nettamente non soltanto l'idea di sostanza semplice da quella di elemento, ma anche il concetto di elemento da quello di atomo, tanto è vero che nel 1898, scriveva: [10]

*La denominazione di sostanze semplici deve essere riservata a quelle contenenti soltanto un elemento qualunque, mentre composte devono essere chiamate quelle che ne contengono due o più...Le sostanze semplici, come tutti i corpi in natura, sono formate di particelle: tutta la loro differenza rispetto alle sostanze composte consiste unicamente nel fatto che le particelle di queste ultime contengono atomi eterogenei di due o più elementi, mentre quelle delle sostanze semplici soltanto atomi omogenei di un dato elemento... L'idea principale, con la quale si può giungere a spiegare la legge della periodicità, consiste proprio nella differenza radicale dei concetti di elemento e di sostanza semplice.*

*... [gli elementi] non vanno soggetti a varietà e trasformazioni reciproche e appaiono, stando almeno alle attuali risultanze, l'essenza immutabile di una sostanza che invece muta (sotto il profilo chimico, fisico e meccanico), essenza che entra a far parte sia dei corpi semplici sia di quelli composti. Questa concezione ci presenta gli elementi chimici come qualcosa di astratto, dato che non siamo in grado in particolare né di vederli, né di sapere alcunché relativamente ad essi."*

Mendeleev non aveva alcuna idea della struttura dell'atomo; per distinguere l'elemento sia dalla sostanza semplice sia dagli «atomi omogenei» che la costituiscono, si richiama ad un concetto filosofico, quello di «essenza». Quando afferma che si deve considerare l'elemento come «l'essenza immutabile di una sostanza» usa un'espressione che richiama il titolo di un'opera di Tommaso D'Aquino (1221-1274) «*De ente et essentia*<sup>1</sup> (Dell'ente e dell'essenza)» dove, per un chimico, l'ente (ossia l'essere) sarebbe la sostanza e l'essenza sarebbe l'elemento.

L'evoluzione delle conoscenze che si è prodotta nel corso del XX secolo permette di attribuire al concetto di elemento un significato coerente con il paradigma oggi dominante nei saperi relativi alla struttura della materia. L'analisi dei diversi significati assunti nel corso del tempo dalla nozione di elemento risulta particolarmente interessante alla luce dell'idea di «rivoluzione scientifica» proposta da Kuhn. [11]

## 2 LE RIVOLUZIONI SCIENTIFICHE

Thomas Kuhn sostiene che per comprendere la natura e lo statuto della scienza occorre richiamarsi alla storia delle scienze. Secondo Kuhn, ogni teoria scientifica contiene un nocciolo duro, ossia una parte che non può essere rimessa in discussione senza rinunciare alla teoria stessa: egli usa il termine «paradigma» e afferma che ogni scienza lavora, più o meno implicitamente, nel quadro di un certo paradigma. Il paradigma nel quale lavorano gli scienziati influenza anche il loro modo di percepire la natura. I sostenitori di paradigmi diversi vivono, in un certo qual senso, in mondi diversi. Kuhn cita come prova il fatto che gli astronomi europei cominciarono a notare, catalogare e discutere alcuni fenomeni celesti soltanto dopo avere preso conoscenza della teoria di Copernico. In precedenza, il paradigma aristotelico postulava che nessun mutamento potesse prodursi nel mondo sopralunare, ritenuto immutabile: di conseguenza, nessun cambiamento era stato notato. Gli astronomi delle civiltà precolombiane e cinesi avevano osservato la supernova del 4 luglio 1054, della quale gli studiosi europei non fanno alcun cenno. La supernova del 11 novembre 1572, successiva alla teoria di Copernico, fu invece notata da Tycho Brahe e da altri astronomi: era cambiato il paradigma. La supernova del 23 febbraio 1987 è stata osservata in tutto il mondo e ha permesso di confermare la presenza dei neutrini, particelle di cui i fisici avevano previsto l'esistenza.

Lo schema che Kuhn propone per l'evoluzione delle scienze è il seguente:

*prescienza* → *scienza normale* → *crisi* → *rivoluzione* →  
→ *nuova scienza normale* → *nuova crisi* → *ecc.*

Kuhn parte da una constatazione storica. Quando un paradigma è dominante, come lo fu nel corso di due secoli il paradigma di Newton in fisica, è molto difficile che venga confutato e respinto. I fatti che contraddicono il paradigma non sono considerati come confutazioni che lo mettono in crisi, ma come anomalie. La scienza è costruita dagli esseri umani, dice Kuhn, i quali non sono disposti a cambiare idea tutte le volte che un esperimento fornisce un risultato strano, non previsto e non prevedibile nel contesto del

paradigma. Ciò anche perché potrebbe accadere che, in alcuni casi, l'anomalia rilevata non sia un'effettiva evidenza sperimentale in disaccordo con il paradigma dominante, ma un artefatto imputabile all'apparato strumentale utilizzato oppure un banale errore del ricercatore. Se, nell'ambito delle discussioni tra scienziati, è possibile inquadrare il nuovo evento in un modello, ulteriore o più avanzato, che ne renda intelligibile il significato, allora è probabile che si realizzino le condizioni per l'avvio di una crisi della «scienza normale». Inoltre, Kuhn sostiene l'importanza del contesto sociale nel quale la scienza evolve. Per esempio, spesso uno scienziato non ha alcun interesse, dal punto di vista della propria carriera, ad opporsi al paradigma dominante; si tratta infatti di un complesso di idee che raccoglie il consenso di membri influenti della comunità scientifica. Per mettere in discussione il paradigma dominante, l'elenco delle anomalie deve essere lungo; quando queste cominciano ad essere troppo numerose e non è più possibile fare finta di niente, la scienza normale (quella del paradigma dominante) entra in crisi. Sovente, è uno scienziato giovane a prendere l'iniziativa di proporre un nuovo paradigma: si veda l'esempio di Einstein. Questi incontra resistenze anche notevoli, perché la comunità scientifica non cambia idea dalla sera al mattino, anche perché, secondo Kuhn, quando due paradigmi entrano in competizione la discussione non si colloca soltanto al livello degli esperimenti e dei risultati, ma anche al livello della «credenza» in un paradigma. La maggior parte dei sostenitori del vecchio paradigma non cambia facilmente idea; ciò non dipende dal fatto che essi rifiutano di riconoscere le prove sperimentali che vengono portate a sostegno del nuovo paradigma, ma dal fatto che le prove non sono tali se non associate al nuovo paradigma. Nel contesto del vecchio paradigma, le prove non sono affatto leggibili: si parla allora di paradigmi incommensurabili e si sostiene che è come se i sostenitori dei due paradigmi a confronto vivessero in due mondi diversi.

Kuhn ha aperto la strada ad una dimensione sociologica dei saperi scientifici, ma la sua idea della loro evoluzione per «rivoluzioni» lascia insoddisfatti gli storici della scienza che, come scrive Stephen Shapiro [12], si sentono sempre più a disagio di fronte alla categoria di rivoluzione scientifica così come viene solitamente intesa. Essi ritengono che vi siano sempre nella scienza tentativi di mutare le opinioni e le modalità di legittimare queste opinioni sulla realtà, ma sono pure dell'avviso che non si può sostenere che il mutamento si produca in un determinato momento. Le teorie e le pratiche nuove vengono prese in considerazione soltanto quando diventano significative per un gruppo particolare di ricercatori. Contrariamente a quanto sostiene Kuhn, le teorie scientifiche possono sovrapporsi, tanto è vero che all'inizio del XX secolo la fisica si sviluppa in base a due paradigmi completamente differenti: da una parte, Einstein con le idee sulla relatività e, dall'altra, Planck e la meccanica quantistica. Si ritiene oggi che i cambiamenti di paradigma che si verificano nell'ambito delle scienze siano la conclusione rapida di un periodo di lunga incubazione delle nuove idee, durante il quale teorie diverse convivono l'una a fianco dell'altra. Questo significa che, quando si parla di rivoluzione scientifica, si intende un fenomeno sociale di lunga gestazione che è caratterizzato da almeno uno dei seguenti eventi:

1. Una reinterpretazione radicale delle idee esistenti.
2. La conclusione di una lunga discussione con la propo-

<sup>1</sup> Breve trattato che uno degli autori (E.R.) portò all'esame di maturità del 1957 per discuterne il contenuto con il commissario di filosofia.

sta di una soluzione che mette gli scienziati in condizione di porsi problemi di tipo nuovo rispetto a quelli affrontati in precedenza.

3. Il passaggio a un livello concettuale di comprensione superiore al precedente; nel nuovo contesto concettuale, le vecchie teorie costituiscono casi particolari di quelle nuove e più ampie.

Nel complesso le affermazioni precedenti indicano che, nel passaggio da un paradigma all'altro, si producono, ad un tempo, soluzioni di continuità nette rispetto alla tradizione (*rottura epistemologica*) e mutazioni lente che assomigliano ad un «processo evolutivo» (*accomodamento epistemologico*) di tipo biologico. L'interpretazione del modo con cui si passa da un paradigma scientifico ad un altro deve tener conto di un complesso di eventi ed idee che interagiscono, anche in modo marcatamente conflittuale, fino a quando non si integrano tra loro in una struttura omogenea per coerenza e rigore, dotata di un potere interpretativo e soprattutto di un potere previsionale superiore a quello del paradigma precedente. In altre parole, il nuovo paradigma non soltanto deve permettere di interpretare i fenomeni non spiegati dal precedente, ma soprattutto deve aprire nuovi campi di ricerca e quindi permettere di costruire nuovi saperi.

### 3 LE RIVOLUZIONI DELLA CHIMICA E I REGISTRI DI CONCETTUALIZZAZIONE

Con questi punti di riferimento a disposizione, Jensen [13] propone di identificare nel corso dell'evoluzione della chimica, tre rivoluzioni scientifiche.

#### 3.1 - La prima rivoluzione della chimica

La prima rivoluzione della chimica moderna viene unanimemente attribuita alle ricerche di Lavoisier sulla combustione. La spiegazione che egli propose, basata sul ruolo del gas che denominò *ossigeno*, ebbe come conseguenza l'abbandono della teoria del flogisto che venne sostituita da quella dell'ossigeno. Tuttavia, il vero significato

della rivoluzione di Lavoisier non sta tanto nella revisione del modello esplicativo della combustione e della respirazione - che egli assimilò ad una combustione lenta - quanto piuttosto nelle implicazioni generali del suo lavoro e cioè sul concetto di composizione chimica delle sostanze a livello macroscopico. Jensen riassume nello schema di figura 2 i fattori che contribuirono alla prima rivoluzione chimica.

Si tratta di idee che furono proposte in un arco di tempo abbastanza ampio e che già nella seconda metà del XVII secolo produssero un cambiamento significativo nell'atteggiamento dei chimici nei confronti della natura e della funzione della chimica. Si può infatti ritenere che la pubblicazione del libro di Boyle *The Sceptical Chymist* (1662) segni il passaggio da una concezione della chimica come pratica esoterica (come nel caso dell'alchimia) o come complemento pratico all'esercizio della medicina, ad una concezione come scienza formale della materia e delle sue trasformazioni.

Quindi, la prima rivoluzione chimica riguarda il livello di concettualizzazione macroscopico, ossia la spiegazione empirica dei fenomeni: si prendono in considerazione le sostanze (i corpi, come li chiama Lavoisier) e si studiano le loro trasformazioni chimiche. In questo contesto, il termine «elemento» viene usato come sinonimo di «sostanza semplice» (corpo semplice). Ecco cosa scrive Lavoisier nel suo *Traité de Chimie Élémentaire* (1789):

*Se, con il termine elementi, intendiamo designare le molecole semplici e indivisibili che compongono i corpi, è probabile che non li conosciamo: se, al contrario, noi attacchiamo al nome di elementi o di principi dei corpi l'idea del termine ultimo al quale perviene l'analisi, tutte le sostanze che non siamo ancora riusciti a decomporre con alcun mezzo, sono per noi degli elementi; questo però non significa che noi abbiamo la certezza che tali corpi, che noi consideriamo semplici, non siano composti essi stessi di due o anche più principi;...*

Se si fa riferimento ai tre eventi, citati in precedenza, che possono caratterizzare le rivoluzioni scientifiche, quello



Figura 2 - I fattori più importanti che contribuirono alla prima rivoluzione della chimica

indicato con il numero 1 risulta essere il più adatto per caratterizzare la prima rivoluzione della chimica.

Vale la pena di sottolineare che la maggior parte delle definizioni di elemento presenti nei libri di testo, come si evince dalle citazioni precedenti, fanno riferimento alle idee che Lavoisier esprimeva nel 1789 e non tengono alcun conto neppure delle precisazioni successive di Mendeleev.

### 3.2 - La seconda rivoluzione della chimica

A differenza della prima rivoluzione chimica, collegata essenzialmente a un'unica persona (Lavoisier), la seconda rimanda ad un gruppo di chimici che contribuirono a costruire i nuovi concetti di valenza e di struttura molecolare ed a risolvere i problemi relativi alla determinazione delle masse atomiche e molecolari relative. L'avvio della seconda rivoluzione chimica viene fatto coincidere con la proposta dell'**ipotesi atomica** da parte di Dalton (1808). Mediante il concetto di peso atomico egli cercò di stabilire un collegamento tra l'atomismo filosofico dei secoli precedenti e i dati sperimentali quantitativi resi disponibili dalla prima rivoluzione. Tuttavia, le regole postulate da Dalton per assegnare le formule alle sostanze composte generarono una grande confusione che durò fino al 1860, anno in cui si tenne il famoso Congresso di Karlsruhe. La figura simbolo della seconda rivoluzione scientifica della chimica è Stanislao Cannizzaro che pervenne infine a proporre una scala autoconsistente di masse atomiche relative (pesi atomici, come si diceva allora). La soluzione proposta da Cannizzaro era in accordo con le soluzioni parziali elaborate da numerosi chimici del 1800: quelle formulate da

Gerhardt, in base alla composizione delle sostanze organiche; da Avogadro, in base alle densità dei gas; da Dulong e Petit, sulla base dei calori specifici delle sostanze semplici metalliche. La soluzione proposta da Cannizzaro al problema della determinazione dei pesi atomici pose fine ad una discussione protrattasi per oltre sessanta anni e permise ai chimici di affrontare nuovi problemi relativi alla composizione e alla struttura delle sostanze. L'evento caratteristico della seconda rivoluzione della chimica è dunque quello che corrisponde al numero 2 dell'elenco riportato in precedenza. Nello schema di figura 3 sono raccolti i fattori che contribuirono a questa seconda rivoluzione.

### 3.3 - La terza rivoluzione della chimica

La prima e la seconda rivoluzione della chimica furono quasi esclusivamente interne alla disciplina, mentre la terza coinvolse anche la fisica. Il suo inizio viene fatto coincidere con la proposta, da parte di Richard Abegg (1904) di una correlazione tra la tavola periodica di Mendeleev, costruita sulla base di dati empirici relativi alle sostanze, e la struttura elettronica degli atomi e, in particolare, il numero degli elettroni di valenza. Il suo culmine viene fatto coincidere con la pubblicazione (1923) da parte di Gilbert Newton Lewis del trattato *Valence and the Structure of Atoms and Molecules*. La terza rivoluzione della chimica è caratterizzata dallo sviluppo di un punto di vista elettrico della materia. Se si fa riferimento ai tratti caratteristici delle rivoluzioni scientifiche esposti in precedenza, è il tratto n.3 quello che meglio caratterizza la terza rivoluzione chimica. I fattori che contribuirono a questa rivoluzione sono riassunti nello schema di figura 4.



Figura 3 - I fattori più importanti che contribuirono alla seconda rivoluzione della chimica



Figura 4 - I fattori più importanti che contribuirono alla terza rivoluzione della chimica

#### 4 CONCETTI E LIVELLI DI CONCETTUALIZZAZIONE

##### 4.1 - I livelli di concettualizzazione della chimica

Se si accetta la lettura della storia dell'evoluzione della chimica proposta da Jensen, risulta che ai due registri di concettualizzazione che già Mendeleev segnalava se ne deve aggiungere un terzo, successivo alla seconda rivoluzione chimica, quella che è personificata da Cannizzaro. In altre parole, al registro macroscopico e a quello microscopico atomico/molecolare si deve aggiungere il **registro nucleoelettronico** necessario per interpretare i fenomeni elettrici della materia. Al primo registro appartengono le sostanze chimiche e la loro composizione relativa, le soluzioni e le miscele, le entalpie di formazione e le costanti di equilibrio, le descrizioni e interpretazioni empiriche dei fenomeni chimici. Al secondo livello, trovano posto le formule empiriche o grezze e quelle di struttura, l'interpretazione delle entalpie di formazione in termini di entalpie di atomizzazione, le energie medie di legame, i meccanismi molecolari di reazione, ecc. Al terzo livello, vengono collocate le interpretazioni dei fenomeni elettrici; le formule elettroniche (strutture di Lewis e configurazioni elettroniche); le variazioni nella composizione elettronica o nucleare (ioni e isotopi) e il concetto di elemento; i calcoli energetici basati sulla struttura elettronica; l'interpretazione degli spettri; i meccanismi delle reazioni ioniche e fotochimiche; gli effetti isotopici, ecc.

##### 4.2 - Il concetto di atomo

Nell'introduzione abbiamo schematizzato la struttura gerarchica abitualmente adottata, in modo esplicito o implicito, dai libri di testo di chimica della scuola secondaria. Come già abbiamo segnalato, in tale gerarchia la relazione tra sostanza semplice, molecola e atomo è quella introdotta da Stanislao Cannizzaro verso il 1860; però nel corso di

quasi centocinquanta anni il sapere chimico si è sviluppato e nuove conoscenze sono venute ad integrare quelle di cui disponeva Cannizzaro. Oggi, ad esempio, sappiamo che esistono sostanze le quali sono composte non di molecole diatomiche o poliatomiche, ma di atomi: ad esempio, i gas nobili e buona parte dei metalli allo stato gassoso. Inoltre, si ammette oggi che **la struttura elettronica di un atomo isolato non si conserva come tale quando gli atomi entrano a far parte delle molecole**. Per atomo si intende una entità chimica isolata, composta di un nucleo e di un numero di elettroni tale da conferire all'intera struttura una carica elettrica nulla. Quando gli atomi formano ioni o interagiscono formando molecole, non conservano il numero degli elettroni o la loro **configurazione elettronica**; per contro, il termine «nucleo» indica, per quanto ne sappiamo oggi, una delle parti invarianti di ciò che prima era identificato con il termine atomo. In effetti, l'essenza di una reazione chimica, quando questa non viene considerata a livello macroscopico, è proprio il ristrutturarsi della disposizione degli elettroni. Ne segue che non è possibile affermare che gli atomi neutri sono le unità strutturali delle molecole e degli ioni; le molecole sono costituite di nuclei e di elettroni e non di atomi neutri.

Questa affermazione ha due importanti conseguenze:

**1.** La relazione tra molecole e atomi ammessa nella struttura gerarchica proposta da Cannizzaro (figura 1) dovrebbe essere abbandonata. Per indicare le unità strutturali della chimica a livello microscopico si dovrebbe usare unicamente il termine molecola.

**2.** Se non si considera più l'atomo come unità strutturale indipendente della gerarchia chimica, non si dovrebbe più parlare di molecole diatomiche e poliatomiche, ma di molecole mononucleari (gli atomi) e polinucleari. La composizione e la struttura delle molecole dovrebbe allora essere espressa facendo riferimento al tipo, al numero e alla di-

sposizione spaziale dei nuclei e non degli atomi che le compongono.

Se si tiene conto delle precedenti considerazioni, la struttura gerarchica della chimica di base può essere rappresentata in un altro modo (figura 5).

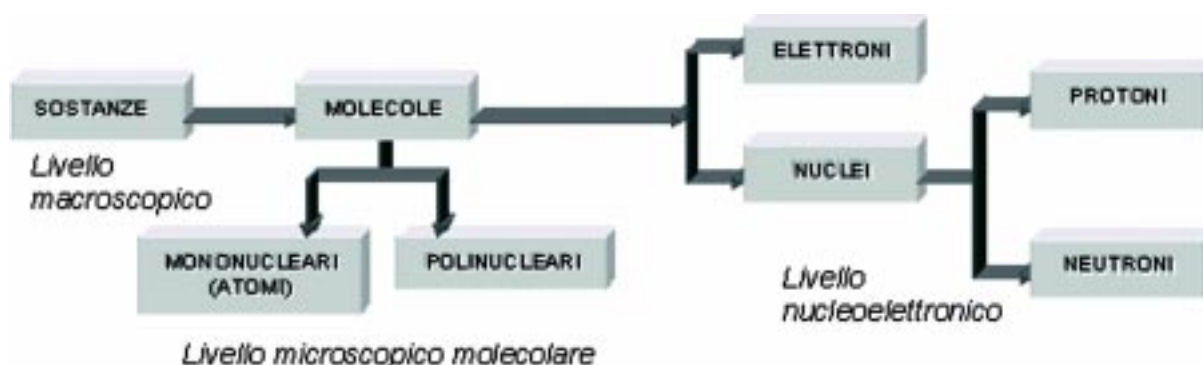


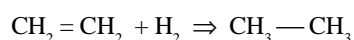
Figura 5 - La struttura gerarchica della chimica di base rivista

Questo significa forse ritenere che gli atomi non abbiano più alcuna importanza per i chimici e per lo studio della chimica? Niente affatto. Come sottolinea Jensen [14], il fatto di considerarli come molecole mononucleari, non significa che non si possa più parlare di atomi o negare ogni importanza alle loro proprietà che mostrano un andamento periodico, quali il raggio atomico, il potenziale di ionizzazione, l'affinità elettronica, la polarizzabilità, ecc. In effetti, una parte consistente dei corsi di chimica consiste nel guidare gli studenti a stabilire relazioni tra le proprietà degli atomi e quelle delle molecole polinucleari o delle strutture reticolari. Tuttavia, l'importanza che viene attribuita agli atomi e alle loro proprietà periodiche per spiegare le relazioni tra proprietà e composizione dei sistemi più complessi andrebbe invece attribuita all'insieme di nucleo ed elettroni con cui ogni **elemento** partecipa alla struttura delle molecole polinucleari o dei reticoli; altra cosa è lo statuto attribuito (o non attribuito) agli atomi nella struttura gerarchica delle entità chimiche.

#### 4.3 - Il concetto di elemento

Nell'introduzione abbiamo segnalato che quasi sempre nei libri di testo il termine elemento è usato come sinonimo o di sostanza semplice [15] (livello macroscopico) o di atomo (livello microscopico). Tuttavia, come si è visto parlando di rivoluzioni chimiche e di livelli di concettualizzazione, il concetto di elemento non appartiene né al livello macroscopico (e quindi non è sinonimo di sostanza), né al livello microscopico (e quindi non è sinonimo di atomo). Per rendersene conto, è sufficiente prendere in considerazione alcune situazioni di natura chimica.

**Situazione 1** - Consideriamo la reazione chimica:



In questa reazione:

- 1) La sostanza diidrogeno si conserva?
- 2) L'elemento idrogeno si conserva?

Siamo in presenza di una reazione chimica nella quale le sostanze reagenti interagiscono producendo nuove so-

stanze: i prodotti della reazione. Quindi la sostanza semplice diidrogeno non si conserva. Per contro, l'elemento idrogeno è presente sia nelle sostanze reagenti sia nella sostanza che prende origine dalla reazione: quindi l'elemento idrogeno si conserva.

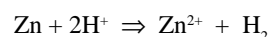
Non si può quindi usare il termine elemento per indicare una sostanza semplice: in questo caso, si sarebbe obbligati a sostenere che l'elemento si conserva, mentre la sostanza semplice non si conserva. Che senso avrebbe dire che, nella stessa situazione, la stessa entità chimica si conserva e non si conserva?

**Situazione 2** - Consideriamo la sostanza composta metano:



- 1) Quanti atomi concorrono a costituire la molecola  $\text{CH}_4$ ?
  - 2) Quanti elementi concorrono a costituire la molecola  $\text{CH}_4$ ?
- Gli atomi che concorrono a costituire la molecola  $\text{CH}_4$  sono cinque, ma gli elementi sono solo due, il carbonio e l'idrogeno. Evidentemente, elemento e atomo non sono sinonimi.

**Situazione 3** - Consideriamo la reazione chimica:



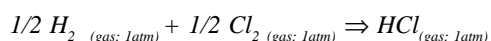
- 1) Cosa hanno in comune la sostanza semplice zinco ( $\text{Zn}$ ) e lo ione zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ )?
- 2) Cosa hanno in comune lo ione idrogeno ( $\text{H}^+$ ) e la sostanza semplice diidrogeno ( $\text{H}_2$ )?

In entrambi i casi, è l'elemento ciò che hanno in comune le due coppie considerate: l'elemento zinco nel primo caso e l'elemento idrogeno nel secondo.

Nessuno può negare che l'elemento idrogeno sia presente nel metano, nell'etano, nella sostanza semplice diidrogeno e nello ione idrogeno. In tutte queste specie chimiche, gli **interni elettronici** sono molto diversi; l'unica caratteristica che hanno in comune, in base alla quale possiamo affermare che in esse è presente l'elemento idrogeno, è la **presenza del nucleo dell'atomo di idrogeno**.

**Situazione 4** - Se, come abbiamo appena affermato, gli interni elettronici delle specie chimiche diidrogeno (molecola) e idrogeno (atomo) sono diverse, diversa è la loro situazione energetica. La confusione tra i concetti di so-

stanza semplice e di elemento genera anche da questo punto di vista una confusione. In termochimica, le entalpie di formazione delle sostanze vengono riferite ad uno stato standard e “..... per convenzione, a ciascun **elemento** nel suo **stato standard** viene assegnato il valore di entalpia uguale a zero. Per esempio lo stato standard dell'ossigeno è quello gassoso, lo stato standard del mercurio è quello liquido, ..... Pertanto, considerando la reazione di sintesi di una mole di acido cloridrico (gas a  $P = 1\text{atm}$ ) a partire dagli elementi idrogeno (gas a  $P = 1\text{atm}$ ) e cloro (gas a  $P = 1\text{atm}$ ), e cioè con i reagenti ed i prodotti nei rispettivi stati standard:



essendo  $\Delta H^\circ = H^\circ_{\text{prodotti}} - H^\circ_{\text{reagenti}}$

poiché  $H^\circ_{\text{H}_2} = H^\circ_{\text{Cl}_2} = 0$  in quanto elementi nei rispettivi stati standard

$$\Delta H^\circ = H^\circ_{\text{HCl}} - (H^\circ_{\text{H}_2} + H^\circ_{\text{Cl}_2}) = H^\circ_{\text{HCl}} - (0+0) \quad [14]$$

Il testo citato, come quello di molti altri in adozione nelle scuole italiane, attribuisce chiaramente entalpia zero al gas diidrogeno chiamandolo elemento. Sorge spontaneo chiedersi: nella seguente reazione  $\text{H}_2(\text{g}) \Rightarrow 2\text{H}(\text{g})$ , dove possiamo prendere in considerazione l'energia potenziale implicata nel legame tra due atomi di idrogeno, quale specie deve essere considerata un «elemento»?

Anche la specie H rappresenta l'elemento idrogeno, ma la sua entalpia di formazione non può essere zero, poiché tale valore è stato assegnato alla specie  $\text{H}_2$ .

La determinazione delle entalpie (standard o no) delle sostanze semplici e composte è propria del livello macroscopico e quindi andrebbe affermato che, per convenzione, si è deciso di assegnare a ciascuna **sostanza semplice nella forma allotropica più stabile** il valore di entalpia uguale a zero alla temperatura di 298 K e alla pressione di 101 kPa.

Le considerazioni evidenziate nelle quattro situazioni, ci portano a concludere che con il termine elemento non si può indicare né la sostanza semplice diidrogeno né l'atomo di idrogeno. Il suo significato è un altro ed è legato al nucleo. Gli **attributi essenziali** del concetto di elemento sono quindi i seguenti:

1. Un nome
2. Un simbolo
3. Una posizione nella Tavola Periodica
4. Un numero atomico

Sappiamo che i nuclei si differenziano per il numero atomico e per il numero di massa; nuclei aventi lo stesso numero atomico e diverso numero di massa occupano lo stesso posto nella Tavola Periodica. Quindi in una stessa casella possono trovarsi varietà diverse dello stesso elemento, varietà chiamate isotopi (termine derivato dal greco dove ha il significato di «stesso luogo»); ciò che li differenzia è il numero di massa. In conclusione quindi si può affermare [14] che **con il termine elemento si designa una classe di nuclei aventi tutti lo stesso numero atomico.**

A questo punto è evidente l'assurdità della posizione di quanti identificano elemento e sostanza semplice: se così fosse, una sostanza semplice (ossia un elemento) sarebbe un **corpo puro** costituito da una **miscela** di isotopi. Se que-

sta non è una contraddizione...

## 5 CONCLUSIONE

La classificazione dei concetti e dei modelli della chimica in tre livelli (macroscopico, microscopico molecolare e nucleoelettronico) è importante non solo per meglio comprendere le loro interrelazioni e le assunzioni su cui poggiano, ma anche per migliorarne l'insegnamento e favorirne quindi un apprendimento significativo. In effetti, se un insegnante (o l'autore di un libro di testo) non è consapevole dell'esistenza di questi tre livelli, non si curerà di segnalarli in modo esplicito agli studenti. In questo modo, li priverà di uno strumento potente di comprensione della organizzazione logica della chimica di base, ossia impedirà loro di rendersi conto che è possibile collegare in modo logico i numerosi concetti e i modelli parziali e approssimativi che si incontrano nei corsi di base di chimica. Inoltre, cosa ben peggiore, nella propria esposizione delle conoscenze chimiche, mescolerà in modo del tutto casuale i tre registri di concettualizzazione contribuendo così a rendere la chimica incomprensibile e illogica: una materia, come dice la stragrande maggioranza degli studenti, da studiare a memoria perché non si capisce niente.

Con ogni probabilità, le considerazioni esposte in questo articolo a proposito del concetto di elemento e della sua costruzione nel corso delle rivoluzioni della chimica saranno accolte con stupore dalla maggior parte dei lettori. È una previsione fondata sulle reazioni dei laureati che frequentano la Scuola di Specializzazione per Insegnanti della Scuola Secondaria (SISS) dell'Università di Torino quando vengono portati a riflettere su queste idee<sup>2</sup>. Nel loro caso, lo sconcerto di trovarsi di fronte ad una concezione di elemento del tutto nuova si accompagna con lo stupore di non avere mai incontrato, nel corso degli studi universitari, un professore che non veicolasse, esplicitamente o implicitamente, una concezione difforme rispetto alle conoscenze attuali.

Al fine di eliminare, per quanto è possibile, la confusione tra i concetti, sarebbe opportuno adeguare anche il linguaggio parlato e scritto, utilizzando termini diversi per i due significati. Già Mendeleev faceva presente che i termini usati per indicare l'elemento e la sostanza semplice (anzi, le sostanze semplici) erano diversi nel caso di carbonio (elemento) e carbone, diamante e grafite (sostanze semplici costituite di carbonio). Oggi tale distinzione è possibile in altri casi: se con idrogeno si indica l'elemento, diidrogeno ( $\text{H}_2$ ) è la sostanza semplice; azoto, ossigeno e cloro sono gli elementi, mentre diazoto, diossigeno e dicloro sono le sostanze semplici.

Forse non è da escludere che se la chimica è una disciplina poco amata, ciò dipenda anche dal fatto che nei libri di testo si trovano idee alquanto confuse, per non dire distorte, a proposito dei concetti fondamentali della chimica di base, il che rende arduo, se non impossibile, insegnare i fondamenti della disciplina mettendone in risalto la logica intrinseca. Per gli allievi può essere difficile appropriarsi delle spiegazioni logiche che i chimici propongono per una ampia serie di fenomeni, ma è sicuramente impossibile che in questo possano essere aiutati da libri di testo nei quali questa logica risulta ermetica, se non travisata. Appare anche evidente che la storia della chimica e la sua

<sup>2</sup> Corso di Didattica della Chimica di Base (E. Roletto) e Laboratorio sui concetti strutturanti della chimica (A. Regis)



epistemologia possono essere di grande aiuto agli autori dei libri di testo nell'operazione di trasposizione didattica che porta dal sapere scientifico formalizzato al sapere scientifico da insegnare. Non si può che condividere l'opinione di chi sostiene [16] che grazie ad esse può essere favorita la comprensione dei concetti di base e che sarebbe quanto mai opportuno inserire tali argomenti nel curriculum della formazione iniziale degli insegnanti.

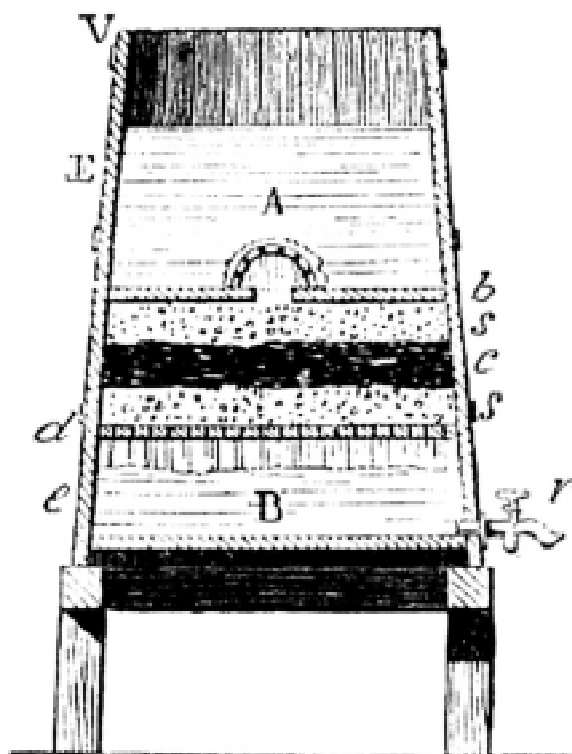
### Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Prof. Paolo Lubini per gli utili suggerimenti e gli stimolanti commenti.

### BIBLIOGRAFIA

[1] Jensen W., Does Chemistry Have a Logical Structure? *J. Chem. Educ.*, **75**, 1998, pp. 679-687  
 [2] Olmi F., Pera T., *Alchimia 2000*. La Nuova Italia, Firenze, 1990, p. 18  
 [3] Demaldé V., Speciani M.C., Vitale A., *Chimica di base*. McGraw-Hill, Milano, 1995, p. 36  
 [4] Bargellini A., *Chimica Società Ambiente*. Signorelli, Milano, 2001, p. 37  
 [5] Bagatti F., Corradi E., Desco A., Ropa C., *Chimica*.

Zanichelli, Bologna, 2003, p.88  
 [6] Passannanti S., Sbriziolo C., *Il nuovo alla scoperta della chimica*, Tramontana, Milano, 2005, p. 35  
 [7] Giamello E. et al., *Atomi molecole materiali*. Loescher, Torino, 2001, p.4  
 [8] Paschetto S., Patrone L., *Chimica fisica*. Zanichelli, Bologna, 2004, vol.1, p. 6  
 [9] Mendeleev D., La legge della periodicità degli elementi chimici (1871). In: *Il sistema periodico degli elementi* (a cura di Tagliagambe S.), Teknos Edizioni, Roma, 1994, p. 27  
 [10] Ibidem, p. 129  
 [11] Kuhn T., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Einaudi, Torino, 1979  
 [12] Shapiro S., *La rivoluzione scientifica*. Torino, Einaudi, 2003, pp. xiv – xxi  
 [13] Jensen W., One Chemical Revolution or Three? *J. Chem. Educ.*, **75**, 1998, pp. 961-969  
 [14] Jensen W., Can We Unmuddle The Chemistry Textbook? *J. Chem. Educ.*, **75**, 1998, pp. 817-828  
 [15] Roundy W., What is an element? *J. Chem. Educ.*, **66**, 1989, pp. 729-730  
 [16] Matthews M., *Science Teaching*. Routledge, New York - London, 1994



Filtre au charbon de bois.