

# LE MOLECOLE

Vincenzo Balzani e Margherita Venturi

*Dipartimento di Chimica "G. Ciamician", Università di Bologna  
via Selmi 2, 40126 Bologna*

## 1. IL PROFUMO DI UNA ROSA

◆ *Meraviglia e stupore* ◆ *Curiosità*

## 2. DI CHE COSA È FATTO IL MONDO?

◆ *Elementi* ◆ *Atomi* ◆ *Molecole*

## 3. PARAGONE FRA MATERIA E LINGUAGGIO

◆ *Gli atomi e le lettere* ◆ *Le molecole e le parole*

## 4. LE DIMENSIONI DELLE MOLECOLE

◆ *I chimici "ciechi"*

## 5. IL LEGAME CHIMICO

◆ *Aggancio fra atomi*

## 6. I NOMI DELLE MOLECOLE

◆ *Nomi, cognomi e indirizzi*

## 7. LE FORMULE DELLE MOLECOLE

◆ *Le formule brute* ◆ *Le formule di struttura* ◆ *La disposizione spaziale*  
◆ *Uguali o diverse?*

## 8. I MODELLI MOLECOLARI

◆ *Il "Lego" delle molecole*

## 9. LE MOLECOLE IN AZIONE

◆ *Rosso e blu* ◆ *Maschile e femminile* ◆ *L'occhio e la luce* ◆ *Benefico e tossico*

## 10. OLTRE LA PAROLA...OLTRE LA MOLECOLA

◆ *Frafi della materia...* ◆ *Chiave e serratura* ◆ *Molecole programmate*  
◆ *La biblioteca e l'uomo*

## 11. UN LIBRO DA LEGGERE E DA SCRIVERE

◆ *Le molecole nella vita di tutti i giorni* ◆ *La responsabilità*

## 12. LETTURE CONSIGLIATE

BOX 1

BOX 2

APPENDICE: UN PO' DI STORIA

## 1. IL PROFUMO DI UNA ROSA

Le cose che tutti ammiriamo, quali ad esempio un cielo stellato o un fiore, sono ancora più belle e addirittura stupefacenti se la nostra mente, con l'aiuto della scienza, riesce a penetrare nella profonda intimità della Natura.

Un fiore piace a tutti per il suo aspetto elegante, il colore stupendo, il profumo soave; ma chi ha conoscenze scientifiche, chi conosce i "perché", i motivi nascosti di quell'aspetto, di quel colore e di quel profumo, oltre che ammirato è anche stupefatto.

*Meraviglia e  
stupore*

Per quando riguarda il profumo, ad esempio, sa che i fiori spargono nell'aria entità materiali così piccole che non si vedono neppure al microscopio, perché hanno dimensioni minori di un milionesimo di metro, sono cioè centomila volte più piccole dello spessore di un capello. Pur essendo così piccole, queste entità, che il chimico chiama *molecole*, hanno forme e proprietà molto specifiche. Le molecole rilasciate nell'aria da una rosa, ad esempio, sono molto diverse da quelle emesse da un ciclamino. Quando le molecole emanate da una rosa raggiungono il naso, trovano nelle cavità della mucosa, nei cosiddetti recettori nasali, altre molecole che hanno forma e proprietà adatte per "riconoscerle" e combinarsi con esse, inglobandole, come avviene fra una serratura e la sua chiave. A seguito di questa combinazione, dai recettori del naso parte un segnale che, attraverso le terminazioni nervose del nostro organismo, raggiunge il cervello e suscita quella sensazione piacevole che chiamiamo "profumo di rosa".

Le molecole emanate da un altro fiore, ad esempio da un ciclamino, avendo forma e proprietà diverse, si combinano con recettori nasali diversi da quelli che riconoscono le molecole emesse dalla rosa e generano un impulso nervoso diverso, che il nostro cervello legge come "profumo di ciclamino" (Figura 1).

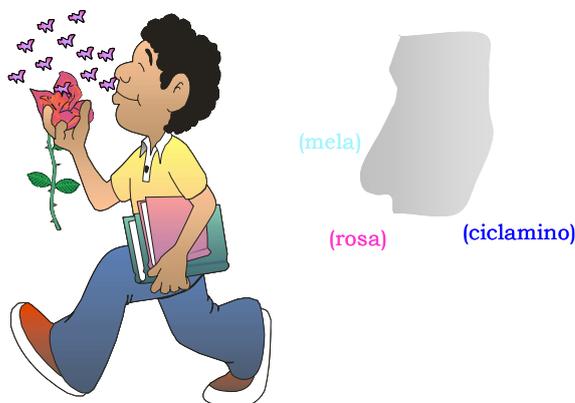


Figura 1. Ad ogni profumo corrisponde un tipo specifico di molecola.

## Curiosità

In queste pagine i lettori, proiettati nel mondo nascosto ed affascinante delle molecole, troveranno alcuni concetti fondamentali della scienza, ma, soprattutto, avranno modo di meravigliarsi e di stupirsi scoprendo i segreti della materia che ci circonda e del nostro stesso corpo. Alla fine, oltre a veder soddisfatta la loro curiosità, si accorgeranno che chi non conosce le molecole non soltanto ha una profonda lacuna scientifica, ma ha perso anche una grande occasione di contemplare la complessità e l'ordine del creato, di cogliere il bello e di emozionarsi. Al giorno d'oggi, non conoscere il mondo delle molecole è un "peccato" altrettanto "grave" quanto non aver mai letto la Divina Commedia.

## 2. DI CHE COSA È FATTO IL MONDO?

Anche se i concetti di elemento, atomo e molecola sono ormai diventati, nella loro forma più semplice, patrimonio della cultura comune, è importante chiarire bene il diverso significato di questi termini.

## Elementi

In tutte le sostanze esistenti in Natura o prodotte artificialmente dall'uomo si trovano uno o più costituenti fondamentali chiamati *elementi*. Gli elementi sono circa un centinaio e i loro nomi in molti casi ci sono familiari: idrogeno, ossigeno, azoto, carbonio, sodio, potassio, ferro, ecc. Ogni elemento ha proprietà diverse dagli altri ed è identificato dall'iniziale o dalle due prime lettere del nome, spesso in latino, che gli è stato attribuito al momento della scoperta: H per l'idrogeno, O per l'ossigeno, N per l'azoto, C per il carbonio, Na per il sodio, K per il potassio, Fe per il ferro, ecc. (vedi anche Box 1).

In base alle loro proprietà, gli elementi sono stati ordinati in una tabella chiamata *Tavola Periodica* (Figura 2), o anche *Sistema Periodico*, termine che Primo Levi ha usato come titolo di un suo celebre libro.

1																	18															
H																	He															
1,008																	4,003															
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne															
6,94	9,012											10,81	12,01	14,01	16,00	19,00	20,18															
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar															
22,99	24,30											26,98	28,09	30,97	32,07	35,45	39,95															
K	Ca											Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
39,10	40,08											88,91	91,22	92,91	95,94	98	101,07	102,91	106,42	107,87	112,41	114,82	118,71	121,76	127,60	129,91	131,29					
Rb	Sr											Lantanidi																				
85,47	87,62																															
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
132,91	137,33	138,91	140,12	140,91	144,2	144,91	150,36	151,96	157,2	158,93	162,5	164,93	167,26	168,93	173,04	174,97	178,49	180,95	183,8	186,21	188,91	191,22	193,08	196,97	199,08	200,59	204,38	207	208,98	209	210	222
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
223	226	227	232,04	231	237,04	237	244	244	247	247	251	254	257	258	260	261	262	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263
																Attinidi																

Figura 2. La Tavola Periodica, icona della Chimica.

La Tavola Periodica è nata nel 1869 ad opera di Mendeleev, un monaco russo che per primo mise in evidenza, pur senza capirne i motivi, le similitudini esistenti fra le proprietà degli elementi (Figura 3); secondo molti scienziati, quella di Mendeleev è stata l'idea più brillante degli ultimi dieci secoli. Per parecchi anni la

Tavola Periodica è stata guardata come un qualcosa di magico ed è stata circondata da un alone quasi mistico. Anche se oggi i motivi delle similitudini fra i vari elementi sono noti, la Tavola Periodica conserva inalterato tutto il suo fascino, dal momento che nell'ordine palese degli elementi si può intravedere l'ordine intrinseco e profondo della Natura. La Tavola Periodica racchiude in sé, in maniera concisa e unitaria, buona parte della Chimica: nessun'altra disciplina scientifica può vantare una simile tavola iconografica.

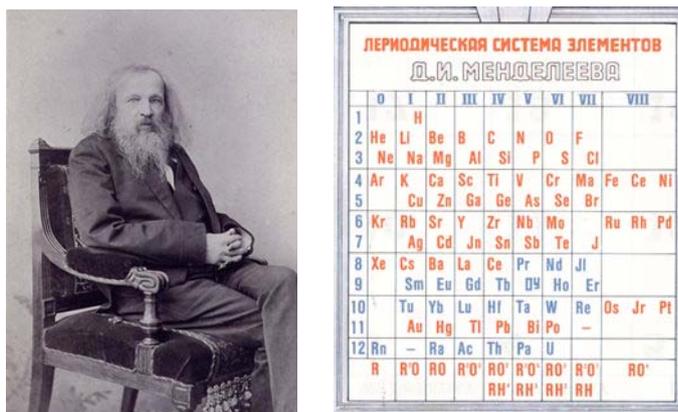


Figura 3. Il chimico russo Dimitri Mendeleev (1834–1907) e la primitiva versione della Tavola Periodica da lui inventata.

### Atomi

La più piccola particella di un elemento che può esistere è il suo *atomo* (dal greco  $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ , non divisibile). Oggi sappiamo che in realtà l'atomo ha una sua intima struttura. Senza entrare in dettaglio, in questo contesto basta ricordare che le caratteristiche chimiche di un atomo sono fondamentalmente legate al numero degli elettroni che esso contiene. Gli atomi di uno stesso elemento, ad esempio quelli che costituiscono un pezzo d'oro puro, avendo tutti lo stesso numero di elettroni, hanno le stesse proprietà, mentre gli atomi di elementi diversi, per esempio gli atomi d'oro e quelli di ferro, hanno proprietà diverse perché contengono un diverso numero di elettroni.

Gli atomi sono particelle a forma sferica di grandezza leggermente diversa a seconda dell'elemento, ma sempre molto piccole. Ad esempio, il raggio di un atomo di carbonio è di circa 0,0000000008 metri e quello di un atomo di ferro è di 0,0000000012 metri; per esprimere le dimensioni di oggetti così piccoli, si usa come unità di misura il *nanometro*, nm, che è la miliardesima parte del metro: il raggio dell'atomo di carbonio è quindi di 0,08 nm e quello dell'atomo di ferro è di circa 0,12 nm. Per riuscire a comprendere quanto sono piccoli gli atomi è utile fare alcuni esempi che, se da una parte ci aiutano a chiarire questo aspetto, dall'altra non fanno altro che aumentare il nostro stupore e la nostra meraviglia. In una matita la punta è di grafite, un solido formato da atomi di carbonio; quando tracciamo con la

matita una riga lunga circa 3 centimetri e spessa circa 0,2 mm, più o meno come questa —————, lasciamo sul foglio un “maxi-esercito” di atomi di carbonio: circa un milione di file, allineate le une vicino alle altre e formate, ciascuna, da circa un centinaio di milioni di questi “soldatini” invisibili.

Se ancora questo non basta, per aggiungere stupore a stupore e meraviglia a meraviglia, si può far notare che se l’atomo avesse le dimensioni di un punto, la statura degli uomini supererebbe il chilometro e mezzo e, infine, che ogni porzione di materia appena visibile, ad esempio un granello di sabbia, contiene più atomi di quante sono le stelle della nostra galassia.

### **Molecole**

Gli atomi in generale non se ne stanno isolati, ma tendono a combinarsi fra loro dando origine alle *molecole*. Si possono avere molecole costituite da atomi uguali (le molecole degli *elementi*) o da atomi diversi (le molecole dei *composti*). Il numero di atomi dello stesso tipo che sono in una molecola si indica con un numerino in basso (pedice), così la molecola dell’elemento ossigeno, formata semplicemente da due atomi, si rappresenta come  $O_2$ , mentre quella del composto acqua, costituita da due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno, si indica come  $H_2O$ . Altre molecole sono costituite da un numero molto maggiore di atomi; ad esempio, la molecola del glucosio è formata da 24 atomi, sei di carbonio, dodici di idrogeno e sei di ossigeno, e si rappresenta come  $C_6H_{12}O_6$ , ma, come si vedrà in seguito, esistono molecole di gran lunga più complesse.

Essendo fatte di un numero piccolo, o relativamente piccolo, di atomi, le molecole hanno dimensioni del miliardesimo di metro e costituiscono un mondo misterioso e affascinante, prima di addentrarsi nel quale può essere utile ripercorrere le principali e faticose tappe, che hanno permesso agli scienziati di dimostrare l’esistenza di questi costituenti fondamentali della realtà materiale (vedi Appendice).

Il concetto di molecola, infatti, è emerso con grande difficoltà nella storia della scienza, anche perché è stato spesso confuso, prima dai filosofi e poi dagli scienziati, con i concetti di elemento e di atomo. Molecola è un termine che deriva dalla parola latina *molecula*, diminutivo di *moles* (massa), ma oggi, come vedremo, il suo significato è molto più ricco e complesso di quanto possa apparire dalla semplice derivazione etimologica.

### **3. PARAGONE FRA MATERIA E LINGUAGGIO**

Per meglio capire cosa siano gli atomi e le molecole e come sia complessa la realtà del mondo che ci circonda si può ricorrere ad un paragone fra la materia e linguaggio (Figura 4). La profonda analogia fra il mondo delle parole e il mondo delle cose era già stata, in qualche misura, intuita e descritta da Lucrezio più di duemila anni fa nel suo famoso poema *De rerum natura*.



Figura 4. Il paragone fra struttura del linguaggio e struttura della materia è molto utile per comprendere la complessità del mondo materiale.

### **Gli atomi e le lettere**

Ogni linguaggio è basato su unità grafiche elementari, quelle che noi chiamiamo *lettere*. Nella lingua italiana le lettere sono una ventina (a, b, c, ecc.), raccolte nell'alfabeto. Analogamente, le unità elementari della materia sono gli *atomi*, circa un centinaio, raccolti nella Tavola Periodica. L'analogia diviene ancora più serrata se consideriamo, come già visto, che per rappresentare gli atomi dei vari elementi si usano convenzionalmente delle lettere (H per l'idrogeno, O per l'ossigeno, C per il carbonio, ecc.). Tutto, nel linguaggio, è fatto di lettere, così come tutto, nella materia, è fatto di atomi.

### **Le molecole e le parole**

Nel linguaggio, le lettere dell'alfabeto non si usano isolate, ma combinate in gruppi, secondo una logica inventata dall'uomo: questi gruppi di lettere sono le *parole*. Ad esempio, combinando le lettere *a, c, q, u, a* si ottiene la parola *acqua*. Una cosa analoga accade per la materia dal momento che nella realtà materiale, anziché atomi isolati, si trovano loro combinazioni formate secondo regole imposte dalle leggi della Natura: queste combinazioni di atomi sono le *molecole*. Le molecole sono combinazioni di atomi come le parole sono combinazioni di lettere; le molecole, quindi possono essere considerate, a buona ragione, *le parole della materia* (Figura 4).

Nel linguaggio, il "legame" fra le lettere che costituiscono una parola è espresso semplicemente dal fatto che esse vengono scritte (e pronunciate) una vicina all'altra. Nel caso delle molecole, la situazione è molto più complessa. Per il momento, limitandoci a casi semplici, possiamo dire che il legame fra due atomi presenti in una molecola viene generalmente indicato con un trattino che unisce i simboli dei due atomi: la molecola dell'acqua, che abbiamo scritta prima in modo riassuntivo con la formula H<sub>2</sub>O per indicare che è costituita da due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno, è rappresentata in modo più corretto dalla formula H–O–H, cioè da un atomo di ossigeno

legato a due atomi di idrogeno.

Le combinazioni degli atomi per dare molecole e delle lettere per dare parole sono in teoria infinite. In realtà non tutte le combinazioni hanno significato. Per averlo, le combinazioni debbono obbedire a regole ben definite. Nel caso delle lettere, ad esempio, *acqua* è una combinazione giusta di lettere, mentre *aqcau* è una combinazione sbagliata, dove “giusto” e “sbagliato” si giudicano in base a convenzioni che sono state stabilite nella formulazione del linguaggio. Anche nel caso degli atomi possiamo avere combinazioni giuste e sbagliate: H–O–H è una combinazione giusta, mentre O–H–H è sbagliata. In questo caso, però, “giusto” e “sbagliato” significano semplicemente che la combinazione H–O–H esiste nella realtà materiale, mentre quella O–H–H non esiste. Ciò è dovuto alle leggi della Natura, alle proprietà intrinseche degli atomi: l’atomo di idrogeno, H, non può mai essere legato ad altri due atomi, in altre parole, non può mai stare in mezzo. La combinazione O–H–H non solo non esiste in Natura, ma non è possibile mettere assieme, in tal modo, questi tre atomi neppure in laboratorio, cioè artificialmente.

Ogni parola è un aggregato di lettere che ha una sua struttura, nel senso che in essa i componenti (le lettere) sono in relazioni stabilite che danno significato unico e specifico all’aggregato stesso. Ugualmente, una molecola è un aggregato di atomi che ha una sua struttura: le relazioni fra gli atomi (loro posizioni relative e loro interazioni) danno all’aggregato proprietà uniche e specifiche. In altri termini, non si può fare del riduzionismo: una parola è molto più delle lettere che la costituiscono e allo stesso modo una molecola è molto più degli atomi da cui è formata.

Le molecole, dunque, sono le parole della Chimica, cioè le parole della materia, le parole delle cose. Come ci sono parole corte (cioè fatte di poche lettere) e parole lunghe, ci sono molecole fatte di pochi atomi (come la molecola d’acqua, H<sub>2</sub>O, che è costituita da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno) e molecole più grandi (come quella dell’alcool etilico, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, formata da due atomi di carbonio, sei di idrogeno e uno di ossigeno). Però, mentre le parole contengono raramente più di 10-15 lettere (in italiano la parola più lunga, *precipitevolissimamente*, ne ha 26), le molecole possono avere anche un numero molto grande di atomi: ad esempio, la molecola di emoglobina, C<sub>2954</sub>H<sub>4516</sub>N<sub>780</sub>O<sub>806</sub>S<sub>12</sub>Fe<sub>4</sub>, è costituita da 9072 atomi.

#### 4. LE DIMENSIONI DELLE MOLECOLE

Le molecole sono "oggetti" che hanno dimensioni dell'ordine del nanometro, cioè del milionesimo di metro. La molecola d’acqua, ad esempio, ha un diametro di circa 0,2 nm ed è così piccola che una goccia d’acqua ne contiene circa 10<sup>21</sup> (mille miliardi di miliardi); talmente tante, cioè, che se le potessimo distribuire fra tutti gli uomini della terra, ciascuno ne riceverebbe circa 200 miliardi; oppure, se le contassimo al ritmo di una al secondo,

***I chimici  
"ciechi"***

impiegheremmo trentamila miliardi di anni per contarle tutte. Oggetti di così piccole dimensioni sfuggono alla nostra quotidiana esperienza e alle comuni indagini sperimentali; infatti le molecole, prese singolarmente, non possono essere né viste, né pesate, né misurate.

I chimici, nonostante queste difficoltà, hanno imparato ugualmente a distinguerle, a determinarne il peso, a stabilire la loro composizione atomica, a valutarne le dimensioni, ad intuirne le forme, a caratterizzarne le proprietà. Questo concetto è espresso in maniera mirabile da Primo Levi quando, nel suo libro "La chiave a stella", dà la definizione del mestiere del chimico, paragonandolo a quello di un ingegnere. Noi chimici, dice Levi *"montiamo e smontiamo delle costruzioni molto piccole. Ci dividiamo in due rami principali, quelli che montano e quelli che smontano, e gli uni e gli altri siamo come dei ciechi con le dita sensibili. Dico come dei ciechi, perché appunto, le cose che noi manipoliamo sono troppo piccole per essere viste; e allora abbiamo inventato diversi trucchi intelligenti per riconoscerle senza vederle."*

Anche se "alla cieca", i chimici hanno potuto dimostrare che in Natura esiste una grande varietà di molecole, da quelle più semplici come le già menzionate molecole di ossigeno (O<sub>2</sub>) e di acqua (H<sub>2</sub>O), alle complicatissime molecole che si trovano negli organismi. Si stima che finora siano state scoperte circa 5 milioni di molecole diverse presenti in Natura, e non sono certamente tutte! Nel frattempo, a mano a mano che venivano svelati i segreti delle molecole naturali, i chimici si sono accorti che era possibile sintetizzare molecole che non esistono in Natura e che quindi vengono chiamate artificiali. Così, al gran numero di molecole che esistono in Natura, si sono aggiunti circa 15 milioni di nuove molecole.

I chimici, però, non hanno mai abbandonato l'idea di riuscire a vedere le molecole, nonostante molte persone autorevoli, soprattutto in passato, non condividessero questa aspirazione. Goethe, ad esempio, diceva che la scienza deve essere a scala umana e si opponeva all'uso del microscopio affermando che ciò che non si può vedere ad occhio nudo non deve essere cercato, perché evidentemente è nascosto all'occhio umano per qualche buona ragione. Questa affermazione è contraria alla logica della scienza che, particolarmente negli ultimi anni, ha spinto le sue indagini sempre più verso "il piccolo", non solo per conoscere meglio la Natura, ma anche per sfruttare, da un punto di vista tecnologico, i vantaggi che da questa conoscenza possono derivare.

Oggi, il sogno dei chimici si è finalmente realizzato; con i più recenti progressi della scienza, è infatti possibile "vedere" (non direttamente, ma tramite immagini al computer ottenute con dispositivi elettronici, Figura 5) e persino "toccare" (con punte ultrasottili) singole molecole, tanto da riuscire ad utilizzarle, ad

esempio come mezzo per una scrittura ultraminiaturizzata (Figura 6). In realtà, tuttavia, il mondo delle molecole rimane ancora essenzialmente una rappresentazione mentale.

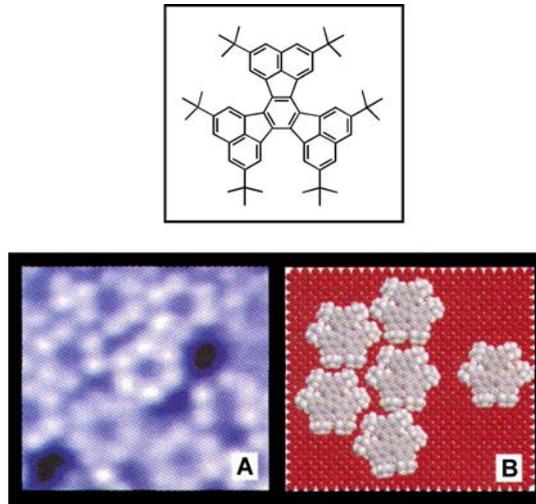


Figura 5. In alto: rappresentazione schematica (formula di struttura semplificata, vedi più avanti) della molecola di esa-*tert*-butildecaciclene. In basso: (A) Immagine di molecole di questo tipo ottenute con una sofisticata tecnica di microscopia e (B) rielaborazione al computer delle immagini che meglio evidenzia la forma delle molecole (*Science*, **281**, 1998, pag. 531).

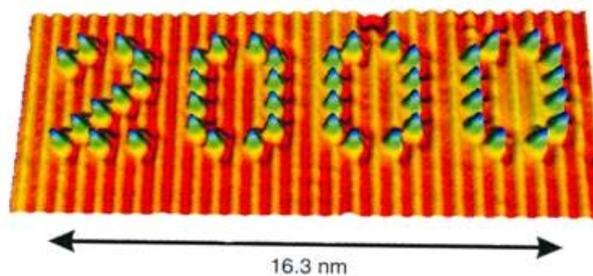


Figura 6. La data celebrativa del nuovo millennio ottenuta posizionando 47 molecole di ossido di carbonio, CO, su una superficie di rame, mediante tecniche di microscopia a sonda (*ChemPhysChem*, **2**, 2001, pag. 362). Si noti che la lunghezza di questa "scrittura" è di 16,3 miliardesimi di metro.

## 5. IL LEGAME CHIMICO

Come si è già visto, la proprietà più importante degli atomi è la loro capacità di "combinarsi", cioè di legarsi ad altri atomi, secondo schemi ben definiti, per formare le molecole. La specificità del legame chimico è collegata al numero di elettroni che contiene ogni atomo e al modo in cui essi sono disposti all'interno dell'atomo. Per gli scopi che questa trattazione si prefigge, basta sapere che il legame fra due atomi, la "colla" che

### Aggancio fra atomi

li tiene assieme, deriva dalla condivisione di coppie di elettroni. Nella maggior parte dei casi, i legami che tengono assieme gli atomi di una molecola, genericamente chiamati "legami covalenti", sono forti e possono essere spezzati solo se viene fornita energia sotto forma di calore, luce, potenziale elettrico, ecc.

Il numero di legami che ogni atomo può fare dipende dal numero di elettroni che può condividere con gli atomi suoi vicini; in una rappresentazione pittorica questi elettroni possono essere visti come "uncini": ad esempio, l'atomo di idrogeno, H, ha un solo "uncino", mentre l'atomo di ossigeno, O, ne ha due e, ancora, l'atomo di azoto, N, possiede tre "uncini", mentre l'atomo di carbonio, C, ne ha quattro (Figura 7). È allora facile capire come si formano le molecole: ogni atomo utilizza i suoi "uncini" per "agganciare" gli "uncini" di altri atomi; così, ad esempio, l'atomo di ossigeno, O, con i suoi due uncini, può agganciare due atomi di idrogeno H, ciascuno dei quali ha un solo uncino, per dare la molecola  $H_2O$ , che è la molecola dell'acqua; analogamente, l'atomo di azoto, con i suoi tre uncini, aggancia tre atomi di idrogeno per dare la molecola  $NH_3$ , che è la molecola dell'ammoniaca, e l'atomo di carbonio, con i suoi quattro uncini, si può combinare con quattro atomi di idrogeno per dare la molecola  $CH_4$ , che è la molecola del metano (l'ordine in cui si scrivono gli atomi nella formula di un composto è fissato da regole che per semplicità non riportiamo).

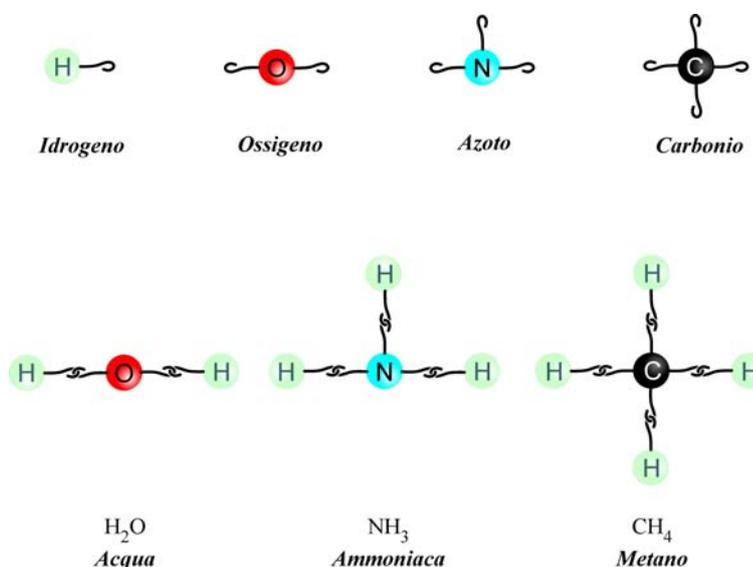


Figura 7. Una rappresentazione pittorica del legame fra atomi. Ogni atomo (in alto) è supposto avere "uncini" con i quali (in basso) può agganciare altri atomi dando origine alle molecole.

I chimici oggi, per indicare i legami, usano dei trattini che, come già visto, uniscono i simboli degli atomi collegati e allora le molecole  $H_2O$ ,  $NH_3$  e  $CH_4$ , riportate in Figura 7, vengono

semplicemente rappresentate come mostrato in Figura 8a. Certi atomi, come ad esempio l'atomo di H, danno solo legami semplici, rappresentati con un trattino, mentre altri possono dare anche legami doppi o tripli, rappresentati con due o tre trattini; così, ad esempio, i due atomi di ossigeno che costituiscono la molecola O<sub>2</sub> sono uniti da un legame doppio, mentre i due atomi di azoto che costituiscono la molecola N<sub>2</sub>, sono legati da un legame triplo (Figura 8b). L'atomo di carbonio, che è uno degli atomi più comuni in Natura e che è presente in tutte le molecole degli organismi viventi, ha la peculiarità di poter formare legami singoli, doppi e tripli con un altro atomo di carbonio o con certi altri atomi (Figura 8c). Un legame semplice è evidentemente più debole di un legame doppio, che è a sua volta più debole di un legame triplo; ad esempio la molecola d'azoto, in virtù del triplo legame che lega i due atomi, è molto difficile da spezzare.

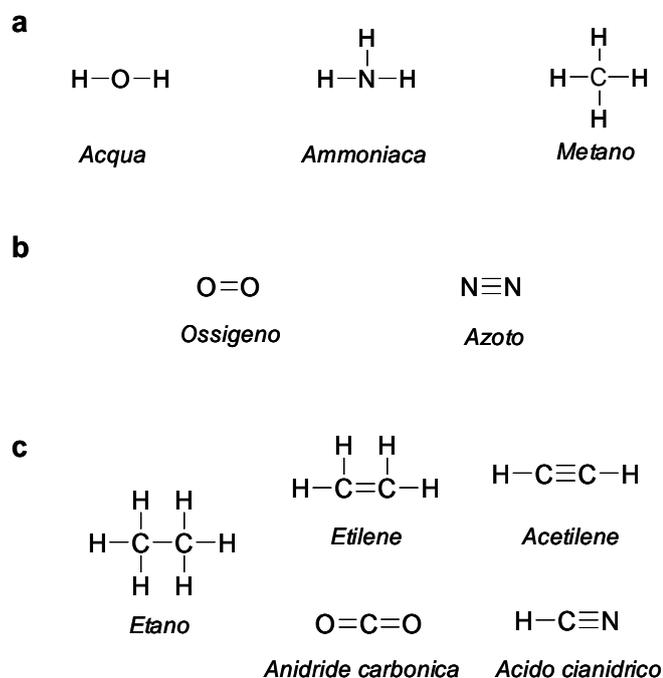


Figura 8. Per indicare i legami fra gli atomi che costituiscono una molecola si usano dei trattini. Se due atomi sono congiunti da due o tre trattini, il legame è molto forte. Le formule che rappresentano le molecole, mostrando come sono legati fra loro i vari atomi, si chiamano formule di struttura.

Nelle molecole costituite da pochi atomi ci sono pochi legami, ma è ovvio che, all'aumentare del numero degli atomi, aumenta anche il numero di legami: nella molecola dell'alcool etilico, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, ad esempio, ci sono 8 legami. Vedremo che il problema di rappresentare i legami è di fondamentale importanza per riuscire ad interpretare il mondo delle molecole.

## 6. I NOMI DELLE MOLECOLE

È chiaro che con il centinaio di specie atomiche a disposizione (Figura 2) e i vari modi con cui gli atomi possono legarsi (Figura 8) è possibile ottenere un numero enorme, praticamente infinito, di molecole. Si rivela, quindi, ai nostri occhi un mondo nuovo, costituito da “oggetti” estremamente piccoli (dimensioni dell'ordine del milionesimo di metro), incredibilmente numerosi (in una goccia d'acqua ci sono tante molecole da poterne distribuire 200 miliardi ad ogni abitante della Terra) e infinitamente diversificati. Come gli animali e le piante, molte molecole hanno nomi comuni (acqua, glucosio, emoglobina, ammoniaca), ma, per muoversi senza perdersi in un mondo così vario e complesso, è necessario “etichettare” gli oggetti nel modo più semplice e rigoroso possibile.

*Nomi,  
cognomi e  
indirizzi*

È necessario, cioè, dare loro un nome non arbitrario, ma fondato su un sistema logico che esprima, per quanto possibile, i gradi di parentela delle varie molecole e le loro principali proprietà. È quello che hanno cercato di fare i chimici, classificando le molecole secondo la loro composizione e le loro proprietà (ossidi, idruri, acidi, basi, alcoli, eteri, idrocarburi, proteine, ecc.), assegnando “cognomi” e “nomi” (es.: alcool metilico,  $\text{CH}_4\text{O}$ ; alcool etilico,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ; acido fluoridrico, HF; acido cloridrico, HCl; acido bromidrico, HBr), cercando di esplicitare “parentele” con prefissi e suffissi (acido *perclorico*,  $\text{HClO}_4$ ; acido *ipocloroso*, HClO) ed anche di specificare “indirizzi” e “numeri civici” (2-cloro-1-propanolo,  $\text{C}_3\text{H}_7\text{ClO}$ ). Si è cercato, insomma, di racchiudere per quanto è possibile, in una o poche parole, la “sostanza” della molecola considerata. Ma la grande varietà delle molecole conosciute e le centinaia o migliaia di nuove molecole che ogni giorno vengono scoperte in Natura o sintetizzate in laboratorio rendono questo lavoro di classificazione sempre più complesso e difficile. La ricchezza straordinaria del mondo molecolare appare difficilmente contenibile in un qualsiasi tipo di organizzazione linguistica. Per questo motivo e, in particolare, per le molecole più complesse, c'è oggi la tendenza ad abbandonare la razionale nomenclatura ufficiale, ormai insopportabilmente farraginoso, per usare nomi di fantasia mutuati da quelli di oggetti che si incontrano nella vita di tutti i giorni. Tanto è vero che oggi, anche negli articoli riportati nelle riviste scientifiche più qualificate, si parla di molecole a pinza, farfalla, ponte, scatola, collare, gondola, filo, catena, ecc., identificando il nome della molecola con la sua forma.

## 7. LE FORMULE DELLE MOLECOLE

Poiché non è possibile esprimere tutte le proprietà di una molecola con un nome, si deve ricorrere ad altri modi più adeguati per rappresentarle. Questi altri modi sono quelli delle

**Le formule  
brute**

formule.

$\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  sono, rispettivamente, le cosiddette *formule brute* delle molecole d'acqua, ammoniacca, metano e alcool etilico. La formula bruta è facile da scrivere ed è il più semplice documento di identità di una molecola, in quanto ci dice da quali e quanti atomi essa è composta. Ad esempio, la formula bruta dell'alcool etilico, la ben nota sostanza liquida, infiammabile, presente nel vino e nelle altre bevande, chiamate appunto alcoliche, è  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  e indica che questa molecola è costituita da due atomi di carbonio, sei di idrogeno e uno di ossigeno. La formula bruta, però, riguardo agli atomi che compongono la molecola, non dice né chi-è-legato-a-chi né, tanto meno, quale è la loro disposizione spaziale. La formula bruta, quindi, dà informazioni molto limitate, soprattutto perché i chimici si sono accorti da molto tempo che le proprietà di una molecola dipendono non solo da quali e quanti atomi la costituiscono, ma anche (anzi, ancor più) da come gli atomi sono legati fra loro e da come sono disposti nello spazio.

**Le formule di  
struttura**

Le formule che evidenziano i legami a cui partecipano i vari atomi si chiamano *formule di struttura*. Nella Figura 8 sono mostrate, le formule di struttura di alcune semplici molecole, mentre nella Figura 9 è mostrata quella della molecola dell'alcool etilico,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ , che contiene una rete più complessa di legami. I chimici sanno che le proprietà dell'alcool etilico, ad esempio il fatto che sia liquido a temperatura ambiente, sono proprio dovute al modo in cui sono legati gli atomi della sua molecola, in particolare al fatto che essa contiene un gruppo  $-\text{O}-\text{H}$ , cioè un atomo di ossigeno legato ad un atomo di idrogeno.

I chimici, poi, si sono anche accorti che c'è un'altra sostanza che, come l'alcool etilico, ha la sua molecola formata da due atomi di carbonio, sei di idrogeno e uno di ossigeno: si tratta dell'etere dimetilico, una sostanza gassosa, con un forte odore e azione anestetica, quindi con proprietà del tutto diverse da quelle della molecola di alcool etilico. La differenza di proprietà fra le due sostanze, che hanno la stessa formula bruta  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ , è proprio dovuta al modo diverso in cui sono legati gli atomi nelle rispettive molecole, cioè ad una diversa formula di struttura (Figura 9).

Una cosa analoga succede nel linguaggio; infatti, esattamente come appena visto per le molecole, il significato di una parola non dipende solo da quali e quante lettere è formata, ma anche dall'ordine con cui esse si succedono: *giravolta* e *travaglio* sono, ad esempio, due parole formate dalle stesse lettere; il loro significato, però, è molto diverso e lo è proprio in virtù del fatto che le lettere costituenti sono state ordinate in due differenti modi.

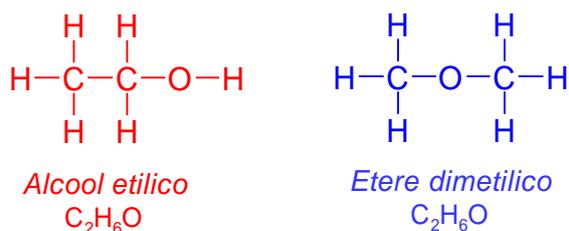


Figura 9. Le proprietà di una molecola dipendono non solo da quali e quanti atomi è costituita, ma anche da come gli atomi sono legati fra loro. Le molecole dell'alcool etilico e dell'etere dimetilico, sostanze che hanno proprietà molto diverse, sono costituite dagli stessi atomi, che però sono legati fra loro in modo diverso. In altre parole, le due molecole hanno la stessa formula bruta,  $C_2H_6O$ , ma diversa formula di struttura.

### La disposizione spaziale

Le proprietà di una molecola sono determinate non solo dalla composizione e dai legami fra gli atomi che la costituiscono, ma anche dalla disposizione spaziale degli atomi. Questo fattore entra in gioco già per le molecole tri-atomiche, in quanto i tre atomi possono giacere tutti lungo la stessa linea, oppure secondo una struttura ad angolo. Se la struttura della molecola d'acqua,  $H_2O$ , fosse lineare, l'acqua non avrebbe le proprietà che ha, dal momento che esse derivano proprio dalla sua struttura angolare (Figura 10); questo non è affatto un problema da poco perché gli scienziati hanno dimostrato che, se la molecola d'acqua avesse struttura lineare, sulla Terra non ci sarebbe né ghiaccio, né acqua liquida, ma solo vapor d'acqua, e quindi non si sarebbe potuta sviluppare la vita!

Per ogni molecola con più di tre atomi, poi, si pone un altro problema strutturale: gli atomi che la costituiscono giacciono sullo stesso piano, oppure sono sistemati secondo una struttura tridimensionale? I chimici hanno dimostrato, ad esempio, che le molecole di ammoniaca,  $NH_3$ , e di metano,  $CH_4$ , non sono planari, ma hanno rispettivamente una forma piramidale e tetraedrica (Figura 10); strutture che in qualche modo si riescono a rappresentare usando gli schemi utilizzati per i solidi geometrici.

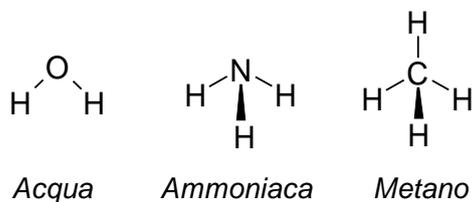
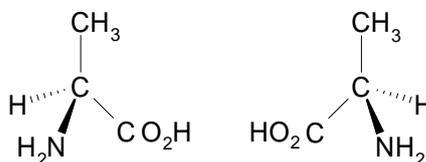


Figura 10. Gli atomi che costituiscono una molecola sono disposti in posizioni fisse nello spazio. La molecola d'acqua ha una struttura angolare, quella di ammoniaca una struttura piramidale, quella di metano una struttura tetraedrica.

*Uguali o diverse?*

Naturalmente il problema diventa sempre più complesso a mano a mano che le molecole contengono un numero maggiore di atomi, anche perché alla disposizione spaziale degli atomi nella molecola è legata un'altra interessante e importante particolarità.

La Figura 11 mostra il caso della sostanza chiamata alanina, che appartiene alla famiglia degli amminoacidi; in questa molecola, l'atomo di carbonio centrale è legato ad un atomo di azoto, ad un atomo di idrogeno, e ad altri due atomi di carbonio che non sono fra loro equivalenti, in quanto sono legati a loro volta ad atomi diversi. Questa situazione comporta che la molecola di alanina possa esistere in due forme, apparentemente identiche, ma, in realtà, spazialmente diverse. E' esattamente quanto si verifica per le nostre mani che sono una l'immagine speculare dell'altra, ma non sono identiche: che siano diverse lo dimostra il fatto che non possiamo mettere il guanto della mano sinistra nella mano destra, e viceversa.



*Alanina*

*Figura 11. Un esempio di molecola (alanina) che può esistere in due forme, apparentemente identiche, ma, in realtà, spazialmente diverse, come lo sono le nostre due mani. Le due forme delle molecole di questo tipo possono avere proprietà drasticamente diverse.*

Differenze strutturali di questo tipo, che saremmo portati a catalogare fra i dettagli inutili, sono invece di fondamentale importanza nel mondo delle molecole biologiche. Ad esempio, le molecole di molti farmaci presentano lo stesso problema strutturale evidenziato per l'alanina e può succedere che una delle due strutture molecolari risulti benefica, mentre l'altra sia addirittura velenosa. I più anziani ricorderanno, a questo proposito, il caso del farmaco chiamato talidomide, che nei primi anni Sessanta causò la nascita di molti bambini focomelici. Il farmaco era stato messo in commercio come miscela delle sue due forme e, solo dopo qualche anno, ci si accorse che, quando

ingerito da un donna incinta, una delle due forme aveva effetti devastanti sullo sviluppo dell'embrione.

## 8. I MODELLI MOLECOLARI

Le formule brute e le formule di struttura sono molto utili agli scienziati, ma non si può certo dire che siano attraenti. Esse, infatti, costituiscono spesso un incubo per gli studenti, particolarmente quando vengono presentate in modo arido e meccanico, senza collegamenti alla meravigliosa realtà del mondo delle molecole che cercano di rappresentare. Solo chi ha superato una certa soglia di conoscenza della chimica può entusiasinarsi di fronte alla formula di struttura di una nuova molecola, appena scoperta o appena sintetizzata; osservando attentamente la formula, infatti, è in grado di “leggere” molte proprietà della sostanza che la formula rappresenta: se è solubile in acqua, se è acida o basica, se è potenzialmente esplosiva, se è colorata, ecc.

Per le molecole piccole, o relativamente piccole, le formule di struttura sono semplici e, oltre ad indicare chiaramente come sono legati gli atomi, riescono anche a dare gran parte delle informazioni che servono al chimico; a mano a mano che si passa a molecole grandi, però, la situazione diventa più complessa e le formule di struttura finiscono per sembrare un'intricata ragnatela di segni. Si cerca, allora, di semplificare queste formule; ad esempio, gli atomi di carbonio, C, che sono molto comuni specialmente nelle molecole degli organismi viventi, non vengono più indicati esplicitamente, sottintendendo che occupino le posizioni di intersezione fra i trattini che indicano i legami. Anche gli atomi di idrogeno, H, legati agli atomi di carbonio non vengono indicati e non viene neppure riportato il trattino che rappresenta il loro legame (Figura 12).

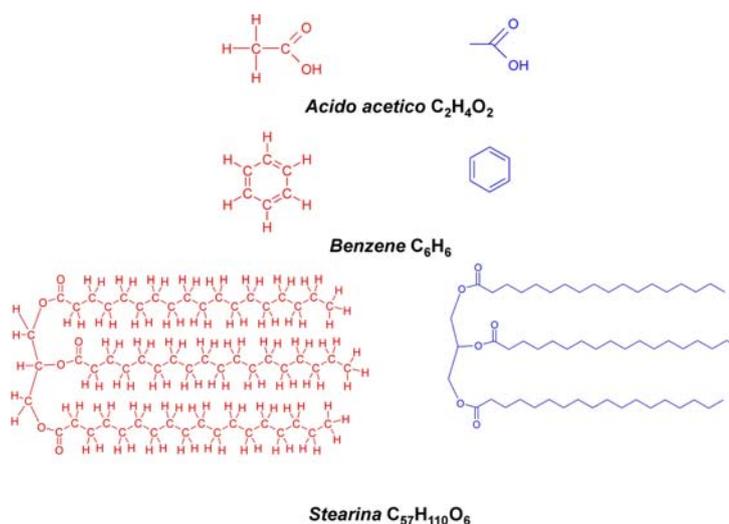


Figura 12. Spesso i chimici, particolarmente nel caso di molecole complesse, al posto delle formule di struttura intere (a sinistra) usano rappresentazioni semplificate (a destra).

### *Il “Lego” delle molecole*

Nonostante queste semplificazioni, la formula di struttura di una molecola complessa non riesce, però, a dare un’idea corretta delle dimensioni, della forma e, tanto meno, di come sono disposti nello spazio i vari atomi che la costituiscono.

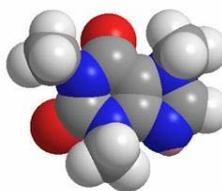
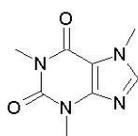
La duplice lacuna, dovuta all’aspetto poco piacevole delle formule e alla loro incapacità di rappresentare dimensioni e forme delle molecole, viene superata dall’uso di modelli tridimensionali. Questi modelli si costruiscono col meccanismo dell’incastro usato nel ben noto gioco del LEGO, partendo da sferette di plastica rigida che rappresentano i vari tipi di atomi, dotate di piccole cavità nelle quali si possono inserire giunzioni che rappresentano i legami chimici (Figura 13). Ogni sferetta rappresentante un atomo è cento milioni di volte più grande della dimensione reale dell’atomo corrispondente, così che il modello è in scala e rappresenta quindi fedelmente le dimensioni relative delle varie molecole e delle parti che le costituiscono. Per distinguere i vari tipi di atomi, o meglio quelli più ricorrenti nelle molecole importanti, si usano colori convenzionali: bianco per l’idrogeno (H), nero per il carbonio (C), rosso per l’ossigeno (O), azzurro per l’azoto (N), giallo per lo zolfo (S), verde per il cloro (Cl).



*Figura 13. Un kit tipo LEGO per costruire i modelli delle molecole.*

Così rappresentate, le molecole acquistano parte del fascino che avrebbero se potessimo vederle nella loro realtà. Nelle Figure 14 e 15 sono mostrati i modelli molecolari di alcune sostanze molto note: la caffeina, che è presente nel caffè, l’aspirina, che usiamo per combattere la febbre, la saccarina, il dolcificante artificiale che usano i diabetici, e il colesterolo, che crea non pochi problemi quando si accumula nelle nostre arterie.

Caffeina  $C_8H_{10}O_2N_4$



Acido acetilsalicilico (aspirina)  $C_9H_8O_4$

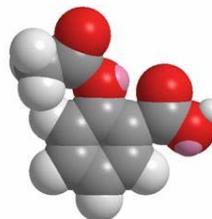
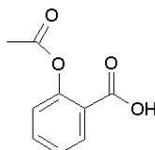
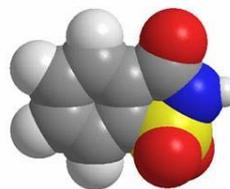
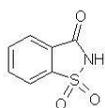


Figura 14. Formula bruta, formula di struttura semplificata e modello tridimensionale delle molecole di caffeina e di aspirina.

Saccarina  $C_7H_5O_3NS$



Colesterolo  $C_{27}H_{46}O$

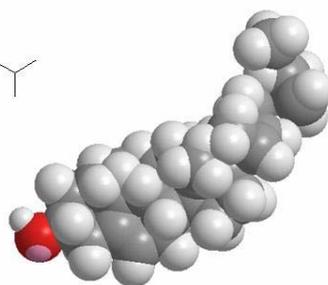
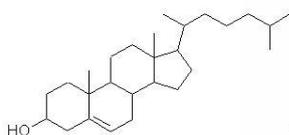


Figura 15. Formula bruta, formula di struttura semplificata e modello tridimensionale delle molecole di saccarina e di colesterolo.

## 9. LE MOLECOLE IN AZIONE

Abbiamo visto che ogni molecola, pur essendo un oggetto di

dimensioni nanometriche, ha una caratteristica composizione, dimensione, struttura e forma. Inoltre, in ogni molecola i vari atomi sono legati fra loro in modo da costituire una rete di relazioni molto specifica. Da tutto ciò deriva che ogni tipo di molecola ha proprietà definite e specifiche e che le molecole dello stesso tipo hanno proprietà simili.

In molti casi, tuttavia, basta una piccola differenza nella composizione, nella dimensione, nella forma e nella disposizione degli atomi o dei legami, per modificare radicalmente le proprietà di una molecola. Ecco alcuni esempi (vedi anche Box 2).

### **Rosso e blu**

Il colore rosso del papavero e il colore blu del fiordaliso (Figura 16) sono dovuti alla stessa molecola che appartiene alla famiglia delle antocianine; la diversità nel colore si deve semplicemente al fatto che la molecola può perdere o acquistare uno ione idrogeno,  $H^+$ ; in ambiente acido la molecola contiene l' $H^+$  ed è di colore rosso, mentre in ambiente basico non contiene l' $H^+$  ed è di colore blu. I papaveri, che hanno la linfa acida, sono pertanto rossi, mentre i fiordalisi, avendo la linfa basica, sono blu. È anche interessante notare che, mettendo in infusione con alcool etilico i petali dei papaveri, la soluzione rossa così ottenuta, se viene trattata con una base, diventa blu, cioè assume il colore dei fiordalisi.

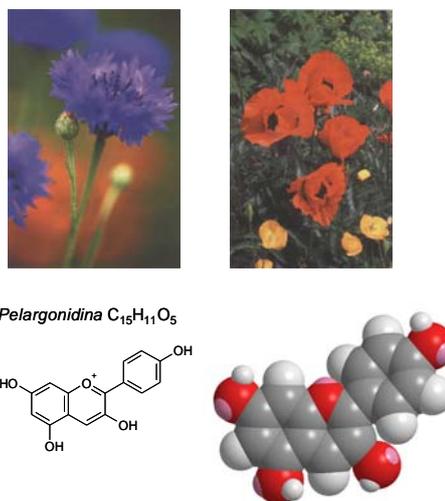
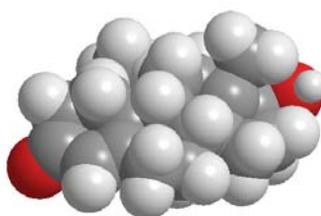
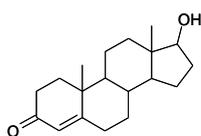


Figura 16. Il colore blu del fiordaliso ed il colore rosso del papavero sono dovuti a due diverse forme (con  $H^+$  e senza  $H^+$ ) della stessa molecola: la pelargonidina.

### **Maschile e femminile**

La molecola del testosterone, ormone sessuale maschile, e quella dell'estradiolo, ormone sessuale femminile, hanno struttura quasi identica (Figura 17); differiscono per dettagli così piccoli che solo un osservatore attento è capace di notare (potrebbe essere un caso da settimana enigmistica!).

Testosterone  $C_{19}H_{28}O_2$



Estradiolo  $C_{18}H_{24}O_2$

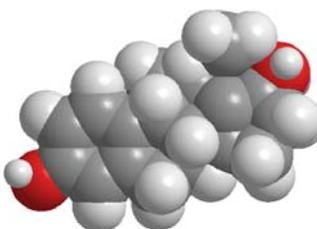
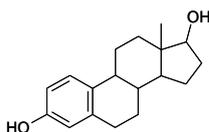
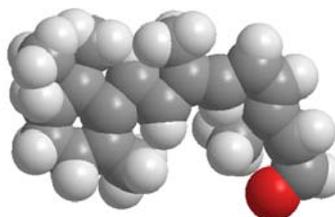
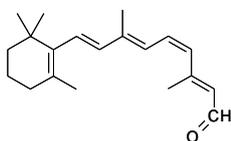


Figura 17. Formula bruta, formula di struttura semplificata e modello molecolare dell'ormone sessuale maschile (testosterone) e femminile (estradiolo).

### L'occhio e la luce

Il modo in cui il nostro occhio vede è dovuto alla trasformazione, causata dalla luce, nella struttura geometrica della molecola di retinale (Figura 18) che passa dalla sua forma piegata (detta *cis*) alla sua forma allungata (detta *trans*).

11-*cis*-retinale  $C_{20}H_{28}O$



*trans*-retinale  $C_{20}H_{28}O$

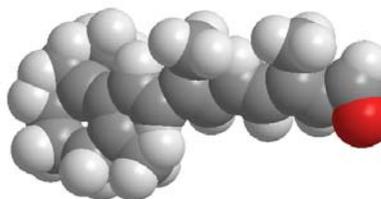
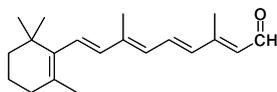


Figura 18. Le due forme *cis* e *trans* della molecola di retinale, protagoniste del fenomeno della visione.

### Benefico e tossico

Come già ricordato, le due forme del talidomide, leggermente diverse soltanto per l'orientazione di alcuni atomi, hanno effetti terribilmente diversi per gli organismi.

## 10. OLTRE LA PAROLA...OLTRE LA MOLECOLA

La complessità del mondo materiale non si ferma alle molecole, così come la complessità del linguaggio non si ferma alle parole (Figura 19). Con una sola parola (ad esempio, *bicicletta*) non è possibile esprimere un pensiero compiuto: per raggiungere questo risultato le parole devono essere combinate, secondo certe regole, per formare frasi; ad esempio: *il bambino va a scuola in bicicletta*.

LINGUAGGIO	MONDO MATERIALE
<b>Lettere</b> (a, b, c, ...)	<b>Atomi</b> (C, H, O, ...)
<b>Alfabeto</b>	<b>Tavola Periodica</b>
<b>Insieme di lettere</b>	<b>Insieme di atomi</b> (CHHHCNHHOO)
<b>Parole</b> (bicicletta)	<b>Molecole</b> (glicina, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ )
<b>Fraasi</b> (il bambino va a scuola in bicicletta)	<b>Sistemi supramolecolari</b> (associazioni fra molecole)

Figura 19. Estensione del confronto fra il linguaggio e il mondo materiale: i sistemi supramolecolari sono le “frasi della materia”.

### **Frasi della materia**

La stessa cosa avviene nella materia: le molecole da sole sono in grado di svolgere funzioni semplici; per avere proprietà più interessanti e funzioni più pregiate e utili, bisogna combinare fra loro le molecole in modo da ottenere sistemi più complessi, chiamati supramolecolari, che possono essere definiti le “frasi della materia”.

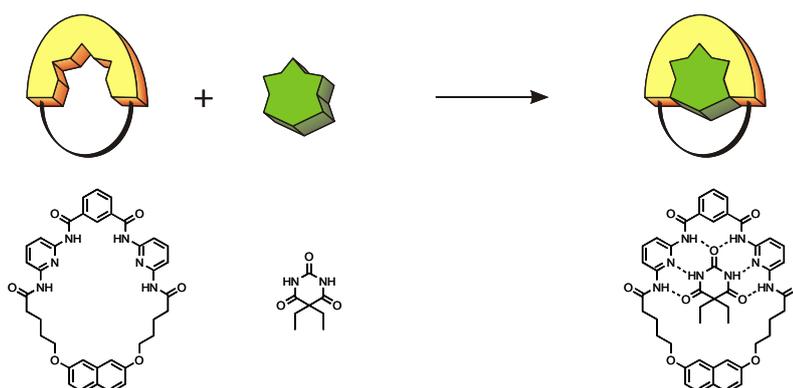
Di seguito sono brevemente descritti alcuni concetti necessari per capire come le molecole si riconoscono, si combinano e si organizzano nei sistemi supramolecolari, il cui mondo è ancora più affascinante di quello delle molecole.

### **Chiave e serratura**

Come appena visto, la complessità del mondo materiale non si ferma alle molecole, così come la complessità del linguaggio non si ferma alle parole (Figura 19).

Quando due molecole si incontrano, a seconda delle loro proprietà possono ignorarsi oppure interagire. Usando termini informatici, si può dire che ogni molecola contiene specifici “elementi di informazione”: esistenza di cavità o protuberanze, presenza di certi atomi o gruppi di atomi, ecc. L’insieme di questi elementi di informazione costituiscono un “programma” in quanto esprimono le potenzialità che la molecola ha di interagire con altre molecole, cioè col mondo circostante. Quando una molecola incontra (“conosce”) un’altra molecola, l’esito dell’incontro dipende dal “programma” di cui ogni molecola è

portatrice. Se i due “programmi” non sono compatibili, le due molecole si ignorano; se invece sono compatibili, cioè se le proprietà delle due molecole sono complementari, l’incontro può concludersi con una associazione. La caratteristica delle molecole di ricercarsi, riconoscersi e associarsi ha suggerito l’idea che anche per le molecole si possa in qualche modo parlare di sociologia (“sociologia molecolare”). Si associano facilmente molecole che hanno forme (cavità e protuberanze) complementari, oppure che hanno gruppi di atomi che possono dar luogo ad interazioni di vario tipo che qui non è possibile discutere (es.: legami ad idrogeno, forze elettrostatiche, interazioni elettrone donatore-elettone accettore). Il riconoscimento molecolare è un fenomeno altamente specifico, tanto che lo si paragona all’interazione fra una serratura e la sua chiave. Ad esempio, grazie alla complementarità della loro struttura la molecola di barbitale può essere inglobata in una molecola ciclica appropriata (Figura 20) ed è così che le molecole emanate da una rosa, e solo quelle, interagiscono con specifici recettori nasali, provocando la sensazione che chiamiamo “profumo di rosa” (Figura 1).

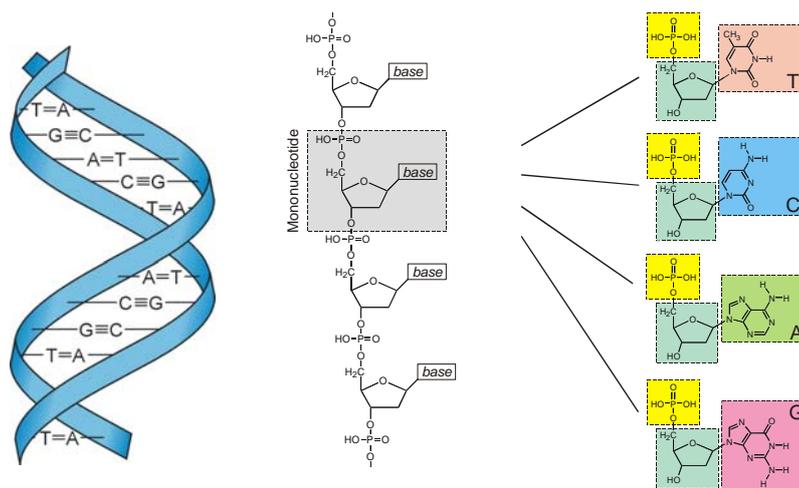


*Figura 20. Il riconoscimento molecolare è un fenomeno altamente specifico, paragonabile all’interazione fra una serratura e la sua chiave. Rappresentazione schematica (in alto) e basata sulle formule di struttura semplificate (in basso) del “riconoscimento” fra una molecola ciclica, appositamente programmata, e la piccola molecola di barbitale.*

### **Molecole programmate**

Il riconoscimento molecolare è un fenomeno di grande importanza in Natura in quanto può portare all’autoassemblaggio di molecole in strutture supramolecolari via via più complesse, spesso altamente organizzate e, quindi, capaci di svolgere funzioni specifiche. Con l’associazione fra molecole si sale infatti di un gradino la scala della complessità e si entra in un altro “mondo”: quello dei sistemi supramolecolari (Figura 19), caratterizzato dall’emergere di tutta una serie di nuove proprietà. Una volta associate in un sistema supramolecolare, infatti, le molecole componenti possono dar luogo a nuovi tipi di

interazioni che aumentano ulteriormente il contenuto di informazione del sistema e, grazie alle quali, un sistema supramolecolare può essere in grado di svolgere una grande varietà di funzioni. In Natura è presente un numero grandissimo di *molecole programmate*, sulle cui proprietà si basa la formazione dei sistemi supramolecolari e il verificarsi dei processi che stanno alla base della vita e dell'evoluzione. L'esempio più eclatante è quello del DNA, il portatore dell'informazione genetica (Figura 21): si tratta di un sistema supramolecolare che è formato da due molecole filiformi molto lunghe, programmate per associarsi. Ciascuna molecola, infatti, è formata da una sequenza di unità (mononucleotidi) che hanno proprietà complementari a quelle delle unità che costituiscono l'altra molecola. Grazie alle interazioni fra queste coppie complementari di mononucleotidi, le due molecole filiformi si avvolgono una attorno all'altra dando una struttura ad elica. Tutti i sistemi biologici, dai più semplici ai più complessi, si formano tramite l'autoassemblaggio (cioè l'assemblaggio spontaneo) di sistemi più semplici, dotati di proprietà complementari.



*Figura 21. Il DNA, il più noto ed importante esempio di sistema supramolecolare: esso è costituito da due lunghissime molecole filiformi (a sinistra), ciascuna formata da una sequenza di unità chiamate mononucleotidi (al centro) che possono essere di quattro tipi (a destra) e che si riconoscono reciprocamente grazie alla loro complementarietà (A si associa a T e G si associa a C).*

Lo sviluppo delle conoscenze nei vari campi della Chimica ha permesso di preparare una grande varietà di molecole artificiali programmate per svolgere funzioni utili all'uomo, il cui esempio più importante è rappresentato dai molti farmaci specifici che sono oggi a nostra disposizione. Il riconoscimento molecolare permette fra l'altro di rivelare la presenza di sostanze inquinanti nell'ambiente e di determinare la concentrazione dei vari

## **La biblioteca e l'uomo**

componenti nei liquidi biologici (analisi delle urine e del sangue).

Il paragone fra costituzione della materia e costruzione del linguaggio non si arresta neppure a livello delle frasi e dei sistemi supramolecolari. Proseguendo, in modo grossolano e quasi per gioco, si può passare ai sistemi via via più complessi della biologia (Figura 22) paragonando la pagina di un libro ad una cellula, un libro ad un organo (ad es., il cuore), una collana di libri a un apparato (ad esempio, l'apparato cardio-circolatorio) e, infine, una intera biblioteca ad un uomo.

LINGUAGGIO	MONDO MATERIALE
<b>Lettere</b>	<b>Atomi</b>
<b>Alfabeto</b>	<b>Tavola Periodica</b>
<b>Insieme di lettere</b>	<b>Insieme di atomi</b>
<b>Parole</b>	<b>Molecole</b>
<b>Frasi</b>	<b>Sistemi supramolecolari</b>
<b>Pagina di un libro</b>	<b>Cellula</b>
<b>Libro</b>	<b>Organo (es. Cuore)</b>
<b>Collana di libri</b>	<b>Apparato (es. Cardio-circolatorio)</b>
<b>Biblioteca</b>	<b>UOMO</b>

*Figura 22. Il confronto fra la struttura del linguaggio e quella del mondo materiale può essere esteso fino ad arrivare all'uomo.*

A questo punto può sorgere una curiosità: ci sono più lettere in una biblioteca o atomi in un uomo? La biblioteca di Parigi, che è forse la più grande del mondo, contiene circa 10 milioni di volumi, per un totale di circa  $10^{13}$  lettere (cioè diecimila miliardi di lettere). Un semplice calcolo approssimato permette di stabilire che il numero di atomi contenuto nel corpo di un uomo è dell'ordine di  $10^{27}$ , un numero che è centomila miliardi di volte più grande del numero di lettere che sono contenute nella biblioteca di Parigi. In altri termini, il numero di atomi contenuti nel corpo di un uomo è pari al numero di lettere che si trovano in centomila miliardi di biblioteche. Questo dà un'idea di quanto sia complesso un uomo dal punto di vista puramente materiale. Bisogna poi considerare che, come le lettere contenute nelle biblioteche non sono messe a caso, ma ordinate in parole, frasi, paragrafi, capitoli, volumi e collane allo scopo di esprimere informazioni e concetti, così i vari tipi di atomi contenuti nel corpo umano sono ordinati in molecole, sistemi supramolecolari, enzimi, cellule e organi per compiere le funzioni caratteristiche della vita.

Il paragone fra materia e linguaggio, pur nella sua limitatezza, ha il pregio di farci capire che le molecole sono le parole delle cose

e che gli organismi viventi sono sistemi chimici di incredibile complessità, costituiti da un grandissimo numero di molecole programmate, tutte disposte in modo estremamente ordinato.

## 11. UN LIBRO DA LEGGERE E DA SCRIVERE

Nel suolo, nei mari, nell'aria, negli organismi vegetali ed animali, si trovano non solo un gran numero, ma anche una grande varietà di molecole. Per lungo tempo il ruolo della Chimica è stato essenzialmente quello di scoprire come sono fatte le molecole che costituiscono le sostanze naturali e capire quali sono le loro proprietà. Però, a mano a mano che sono stati svelati i segreti della Natura, i chimici si sono accorti di poter sintetizzare molecole che non esistono in Natura e che, quindi, vengono chiamate artificiali. Pertanto, al chimico esploratore della Natura si è affiancato, sempre più frequentemente, il chimico inventore, il chimico ingegnere a livello molecolare. Alla grande varietà di molecole che esistono in Natura, i chimici hanno quindi aggiunto altri milioni di nuove molecole, di ogni foggia e dimensione. Accade dunque anche in Chimica quanto mirabilmente descritto da una celebre frase di Leonardo: *“Dove la Natura finisce di produrre le sue specie, comincia l'uomo, in armonia con le leggi della Natura, a creare una infinità di specie”*.

*Le molecole  
nella vita di  
tutti i giorni*

L'uomo “chimico” ha fatto, ad esempio, molecole belle, a forma di albero, nodo, catena, ponte e cupola (Figura 23).



Figura 23. Esempi di molecole belle, sintetizzate dai chimici, che ricordano per la loro forma simboli ed oggetti a noi familiari.

Ha saputo creare, inoltre, molecole per colorare i tessuti e gli oggetti usati nella vita di tutti i giorni (coloranti); molecole per

rendere più piacevoli i cibi e le bevande (additivi); molecole che proteggono gli occhi dalla luce troppo intensa (fotocromiche) e la pelle quando ci si espone al sole (creme solari); molecole che fanno crescere i raccolti più rigogliosi (fertilizzanti) e che li proteggono dai parassiti (anticrittogamici); molecole che ci proteggono dalle punture degli insetti (repellenti); molecole odorose, più gradevoli di quelle prodotte dai fiori (aromi artificiali, profumi); molecole che ci riparano dal freddo e dal caldo (isolanti termici); molecole capaci di non farci sentire il dolore (anestetici) e, cosa ancor più importante, capaci persino di guarire molte malattie (farmaci).

Purtroppo, però, l'uomo ha anche prodotto molecole che sono in grado di dare la morte (veleni), di distruggere le case e i ponti (esplosivi), di provocare incendi devastanti (bombe incendiarie) e anche di sterminare intere popolazioni (armi chimiche).

Il meraviglioso mondo delle molecole, la Chimica, è un "libro" non soltanto da "leggere" (molecole e processi naturali), ma anche da "scrivere" (molecole e processi artificiali). Se la parte non ancora "letta" è molto vasta, quella da "scrivere" è praticamente infinita, sia come estensione che come complessità. E anche il chimico può dire, con Isaac Newton: *"A me sembra di essere come un bambino che gioca sulla riva del mare, divertendosi a raccogliere ora una pietra più levigata, ora una conchiglia più brillante delle solite, mentre l'oceano sconfinato della verità si estende inesplorato dinnanzi a me"*.

### **La responsabilità**

Ma né il chimico, né alcun altro scienziato, deve chiudersi nella torre d'avorio dei suoi studi e delle sue ricerche; con grande responsabilità e risolutezza deve opporsi alla realizzazione di tecnologie contrarie al benessere dell'umanità, come giustamente diceva Albert Einstein: *"La preoccupazione per l'uomo e il suo destino deve essere sempre il principale interesse di tutte le imprese ... affinché le creazioni della nostra mente siano sempre una benedizione e non una maledizione per l'umanità."* Anche i chimici devono ricordarselo, quando sono immersi nel meraviglioso mondo delle molecole.

## **12. LETTURE CONSIGLIATE**

1. P. Levi *"Il Sistema Periodico"*, Einaudi Editore, Torino, 1975.
2. P.W. Atkins *"Molecole"*, Zanichelli Editore, Bologna, 1992.
3. E. Vasco *"Chimica Oggi"*, Tessere – Testi di divulgazione, CUEN, Napoli, 1998.
4. V. Balzani, M. Venturi *"Chimica"*, Collana Professione Docente, Editrice La Scuola, Brescia, 2000.
5. L. Cerruti *"Bella e Potente"*, Editori Riuniti, Roma, 2003.
6. *"Riflessioni sulla Chimica: radici, specificità, attualità e prospettive"*, a cura di G. Villani, La Nuova Civiltà delle Macchine, Rai-Eri, in stampa.

## LO SAPEVATE CHE

**Nell'universo:**

- il primo elemento ad essersi formato è stato l'*idrogeno*
- gli elementi più abbondanti sono l'*idrogeno* e l'*elio*

**Sulla Terra:**

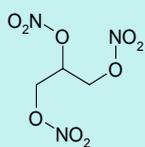
- gli elementi più abbondanti, facendo riferimento alla loro percentuale in peso, sono l'*ossigeno* (48,9), il *silicio* (26,3), l'*alluminio* (7,7), il *ferro* (4,7) e il *calcio* (3,4)
- l'elemento (non radioattivo) più raro è il *krypton*, presente con una percentuale in peso pari a  $1,9 \times 10^{-8}$

**Nel corpo umano:**

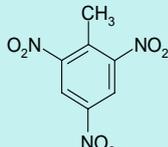
- gli elementi più abbondanti, facendo riferimento alla loro percentuale in peso, sono l'*ossigeno* (65,4), il *carbonio* (18,1), l'*idrogeno* (10,1), l'*azoto* (3,0), il *calcio* (1,5), il *fosforo* (1,0) e lo *zolfo* (0,25); questo significa che in un uomo di 70 kg ci sono circa 45,5 kg di ossigeno, 12,6 kg di carbonio, 7,0 kg di idrogeno, 2,1 kg di azoto, 1,1 kg di calcio, 0,7 kg di fosforo e 0,2 kg di zolfo
- gli elementi essenziali per la vita meno abbondanti sono il *cromo*, il *cobalto* e il *molibdeno*, ciascuno presente in quantità da 3 a 5 mg

## LO SAPEVATE CHE

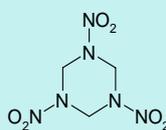
- ◆ Le molecole **più esplosive** sono:



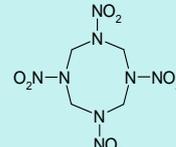
nitroglicerina



tritolo



RDX



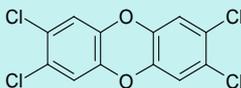
HMX

La nitroglicerina (detta anche dinamite), preparata da Alfred Nobel, è stato il primo esplosivo messo in commercio (1870) a cui è seguito (1910) il tritolo (TNT). L'RDX è l'esplosivo commerciale più economico, mentre l'HMX è il più potente esplosivo ad oggi messo in commercio (1955). L'airbag delle nostre automobili deve il suo funzionamento ad una reazione esplosiva:



(da 130 g di  $\text{NaN}_3$  solido, che occupano un volume di 0,07 litri, si sviluppano ca. 80 litri di gas)

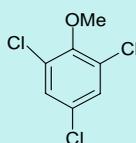
- ◆ La molecola **più tossica** ottenuta artificialmente è la **diossina**:



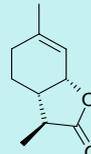
- ◆ Le molecole **più aromatiche** sono:



sapore di pompelmo



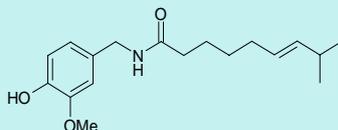
sapore di "tappo"



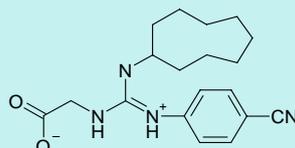
bouquet del vino

Il nostro gusto è in grado di percepire la presenza del composto che dà il sapore di pompelmo quando in 100.000.000 di litri d'acqua ne sono stati sciolti appena 2 mg, mentre per il composto responsabile del sapore di "tappo" è sufficiente che in una bottiglia di vino ce ne siano  $10^{-9}$  g per rimanerne disgustati; infine, il nostro olfatto è così sensibile al composto che conferisce al vino un bouquet dolce, misto di cocco e resina, da avvertirne la presenza di soli  $10^{-14}$  g per litro di aria.

- ◆ La molecola **più piccante** è la **caspicina** presente nel peperoncino:



- ◆ La molecola **più dolce** è l'**acido sucronico**:



Il suo potere dolcificante è 200.000 volte maggiore di quello del saccarosio (il comune zucchero da cucina) e 300 volte maggiore di quello della saccarina (il dolcificante artificiale usato dai diabetici)

## APPENDICE: UN PO' DI STORIA

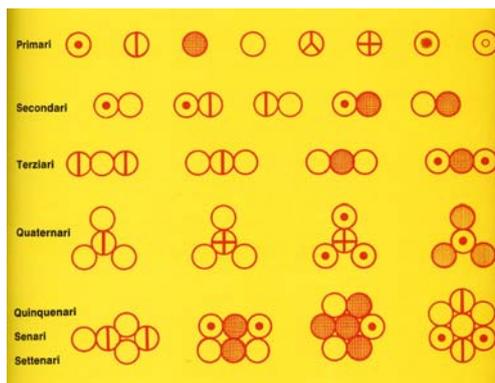
Per meglio capire come si è giunti a scoprire l'esistenza delle molecole è necessario considerare lo sviluppo storico delle teorie sulla costituzione della materia.

### *Dai filosofi greci a Lucrezio*

L'idea che la complessità della Natura sia riducibile a poche sostanze elementari è stata sviluppata da tutte le più antiche civiltà. Secondo Empedocle (ca. 483–ca. 423 a.C.) gli elementi fondamentali erano quattro: aria, fuoco, acqua e terra. Il concetto che la materia sia discontinua, cioè che non sia suddivisibile all'infinito in parti sempre più piccole, si può far risalire al filosofo ionico Leucippo (seconda metà del V secolo a.C.). L'idea che tutte le cose siano costituite dall'aggregazione di particelle indivisibili, dette *atomi*, fu successivamente sviluppata da Democrito (ca. 460–370 a.C.), allievo di Leucippo, e poi rielaborata da Epicuro (341–270 a.C.). Secondo quest'ultimo studioso la materia, anche quella che costituisce l'uomo, è formata da atomi che hanno forme di ogni genere e sono in eterno movimento; urtandosi, gli atomi possono unirsi in modi diversi, dando così origine a tutte le forme possibili della realtà. Il poeta latino Lucrezio (ca. 98–55 a.C.) nel suo poema filosofico *De rerum natura* ha esposto in dettaglio la dottrina atomistica di Epicuro sulla natura del mondo e degli uomini. Questo poema, riscoperto nel Rinascimento, ebbe una grande influenza sul pensiero scientifico così che nel Seicento si affermò la convinzione che la materia fosse realmente di natura corpuscolare, al contrario di quanto si era comunemente creduto fino ad allora, seguendo le idee di Aristotele.

### *Da Dalton a Canizzarro*

Si dovette però arrivare al 1807, anno in cui Dalton (1766–1844) diede una base scientifica ed un significato chimico ben preciso all'ipotesi atomica: 1) tutti i materiali sono costituiti da atomi indivisibili e non trasformabili; 2) esistono tanti tipi differenti di atomi quanti sono gli elementi chimici; 3) i composti si ottengono combinando tra loro atomi di elementi diversi, secondo ben definiti rapporti numerici.



*Con questi cerchietti contenenti lineeette, asterischi, reticoli o altro, Dalton indicava i vari atomi ed i loro composti, suddivisi in binari, ternari, e così via, a seconda di quanti "atomi primi", come li chiamava lui, entravano a far parte nei vari composti (tratto da Giancarlo Masini "Gli architetti delle molecole" Editore Giunti, Firenze, 1972).*

E' stato poi necessario quasi un secolo di ricerche sperimentali e di elaborazioni di pensiero perché la teoria atomica venisse pienamente accettata e i vari tipi di atomi fossero caratterizzati in modo soddisfacente e ordinati definitivamente nella Tavola Periodica di Mendeleev.

Parallelamente alle discussioni sulla teoria atomica si poneva il problema di quale fosse la più piccola quantità di una sostanza in grado di esistere allo stato libero e di possedere le proprietà della sostanza stessa. Questa quantità fu variamente chiamata particella, elemento, molecola

integrante o anche semplicemente molecola. Nello stesso periodo in cui Dalton portava avanti le sue ricerche sull'ipotesi atomica, Gay-Lussac (1778–1850) dimostrò, mediante una serie di esperimenti fra sostanze gassose, che in uguali volumi di gas, nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione, è contenuto lo stesso numero di particelle, o un suo semplice multiplo. Intanto nel 1781, prima ancora che Dalton formulasse la sua teoria atomica, Lavoisier (1743–1794) aveva scoperto che l'acqua, fino allora considerata un elemento, è in realtà un composto formato da due sostanze più semplici, l'idrogeno e l'ossigeno. Dalton propose allora che la più piccola quantità di acqua capace di esistere allo stato libero e di possedere le proprietà della sostanza stessa, cioè la molecola d'acqua, fosse la combinazione di un atomo di idrogeno e un atomo di ossigeno e, usando i simboli chimici nel frattempo introdotti da Berzelius (1779–1848), rappresentò la molecola d'acqua come OH. Questo però era in contraddizione con il risultato trovato da Gay-Lussac e cioè che due volumi di idrogeno reagiscono con un volume di ossigeno per dar luogo a due volumi di vapore acqueo. Nel 1811 il chimico italiano Amedeo Avogadro (1776–1856) capì che questa contraddizione poteva essere risolta assumendo che in un eguale volume di gas vi fosse un uguale numero di molecole e non di atomi, in quanto una molecola può essere costituita da più atomi. Per spiegare i risultati di Gay Lussac, mediante la teoria atomica di Dalton, bastava quindi ammettere che le molecole di idrogeno e di ossigeno fossero formate da due atomi ciascuna,  $H_2$  e  $O_2$ , e che la molecola d'acqua fosse formata da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno:  $H_2O$ . Questa idea di Avogadro, tuttavia, venne rifiutata dalla maggior parte dei chimici dell'epoca. Berzelius, ad esempio, il più influente chimico della prima metà dell'Ottocento, continuò a credere che volumi uguali di gas non contenessero lo stesso numero di molecole, ma di atomi. Solo molti anni dopo, l'ipotesi di Avogadro fu riproposta con successo da un altro chimico italiano, Stanislao Cannizzaro (1826–1910). Nel primo congresso di Chimica tenutosi a Karlsruhe nel 1860, Cannizzaro riuscì a convincere i colleghi che era necessario distinguere il concetto di molecola da quello di atomo; per molecola si doveva, infatti, intendere la più piccola quantità di un sostanza che ne conserva le caratteristiche e che partecipa alle reazioni, mentre l'atomo doveva essere considerato come la più piccola quantità di un elemento presente nella molecola dei suoi composti. Quindi, sono ormai trascorsi quasi 150 anni da quando i chimici sono riusciti a dimostrare l'esistenza delle invisibili e misteriose entità che ancor oggi chiamiamo atomi e molecole.



Amedeo Avogadro (1776–1856)



Stanislao Cannizzaro (1826–1910)

#### *Gli ultimi 150 anni*

Con l'avanzare delle ricerche, particolarmente sulle sostanze derivate dagli organismi vegetali ed animali, si sono poi sviluppati i concetti di affinità chimica (la tendenza che hanno certi

atomi di unirsi ad altri), di valenza (il numero di altri atomi con cui un atomo può combinarsi) e di legame chimico (il legame fra atomi). E' apparso sempre più chiaramente che se è vero che tutto è fatto da atomi, è anche vero che gli atomi sono specie molto reattive e quindi non stanno isolati, ma si uniscono di regola ad altri atomi secondo leggi ben precise, derivanti dalla specifica struttura elettronica di ciascun atomo, per formare le molecole. Facendo esperimenti su quantità macroscopiche di materia e utilizzando una grande varietà di tecniche sperimentali, i chimici hanno a mano a mano tolto il velo al mondo delle molecole.