

Le origini, l'ambito, l'organizzazione

Gli atomi sono la moneta corrente della chimica moderna e il tema di ogni discussione attuale sulla materia. Questo capitolo si concentra su di loro, dopo un breve accenno alle origini dall'alchimia. La chimica moderna si è via via suddivisa in un certo numero di discipline collegate: le principali, di cui descriverò gli ambiti, sono la chimica organica e inorganica, e la chimica fisica. Ma la chimica è una scienza al centro di altre scienze, dato che deriva i suoi concetti dalla fisica e illumina la biologia. Questo capitolo introduttivo si conclude con una discussione sull'attuale posto della chimica nel panorama scientifico.

Avidità. È stata l'avidità a spingere gli esseri umani a imbarcarsi per una rotta straordinaria che oggi riguarda tutti. Un particolare tipo di avidità, che era insieme desiderio di immortalità e brama di ricchezze sconfinite. Si credeva che per ottenere entrambe sarebbe bastato manipolare la materia creando elisir che avrebbero sconfitto le malattie, donato l'immortalità, e convertito in oro qualunque sostanza gli somigliasse: nel colore, come la sabbia e l'urina, o nella densità, come il piombo. Gli alchimisti non raggiunsero mai né l'uno né l'altro obiettivo, ma a forza di maneggiare costantemente la materia impararono a conoscerla molto

bene, e il risultato fece da fertilizzante – spesso in senso letterale – per lo sbocciare di una scienza vera e propria: la chimica.

Lo strumento principale della transizione dall'alchimia alla chimica fu la bilancia. La possibilità di pesare gli oggetti con precisione ha consentito agli esseri umani di associare dei numeri alla materia. Un risultato la cui importanza non è da sottovalutare: è davvero straordinario poter associare numeri pieni di informazioni all'aria, all'acqua, all'oro e a qualsiasi altro tipo di sostanza. Così, attraverso l'uso dei numeri, lo studio della materia e delle sue possibili trasformazioni (di questo la chimica si occupa oggi) è entrato nell'ambito delle scienze fisiche, dove concetti qualitativi si possono esprimere in maniera quantitativa, e testare rigorosamente rispetto alle teorie che li inquadrano e li spiegano.

Pesare la materia prima e dopo che si è trasformata da una sostanza in un'altra ha portato al concetto che si trova alla base di ogni spiegazione chimica: l'atomo. L'idea di «atomo» aveva fluttuato, priva di fondamento, nella coscienza umana per più di due millenni, da quando gli antichi Greci avevano immaginato, senza l'ombra di una prova, una specie di granularità ultima e indivisibile e particellare del mondo. Quell'idea è scesa sul terreno della scienza grazie a John Dalton (1766-1844) che, analizzando il peso delle sostanze prima e dopo le reazioni, concluse che gli elementi chimici, i mattoncini fondamentali della materia, erano composti di atomi immutabili. Di quegli atomi si poteva tenere traccia

con il semplice espediente della pesatura mentre una sostanza si trasformava in un'altra.

Oggi gli atomi sono la moneta di scambio della chimica. Quasi ogni spiegazione vi fa riferimento, che si tratti di atomi singoli o tenuti insieme in quelle combinazioni che chiamiamo *molecole*. Gli atomi sono i costituenti della materia nella sua interezza: tutto ciò che possiamo vedere o toccare è fatto di atomi. Per quanto siano piccoli, non si può proprio dire che siano invisibili a occhio nudo. Se guardate un albero, una sedia, o questa pagina, state guardando atomi (anche se leggete su uno schermo elettronico). Se vi toccate il viso o sfiorate un tessuto, state toccando atomi. Ovviamente il singolo atomo è troppo piccolo per essere visibile, ma la materia è costituita da sterminati eserciti di atomi. E gli sterminati eserciti di atomi sono visibili a occhio nudo, perché sono le sostanze che ci circondano. Più avanti, nel capitolo 5, spiegherò come i chimici di oggi riescano addirittura a vedere immagini di *singoli* atomi.

I tipi diversi di atomi sono poco più di cento. Spiegherò meglio cosa intendo per «tipo» nel prossimo capitolo, quando guarderemo insieme dentro gli atomi e identificheremo le varie strutture interne che li contraddistinguono. Ogni diverso tipo di atomo corrisponde a un diverso elemento. In altri termini, se esistono vari elementi, come l'idrogeno, il carbonio, il ferro e così via, esistono anche gli atomi di idrogeno, di carbonio, di ferro e via dicendo, fino all'elemento scoperto più di recente, che a oggi (2014) è il livermorio, centoquattordicesimo ele-

mento del tutto inutile e dalla vita cortissima. (Per essere precisi è l'elemento numero 116, ma i due che lo precedono non sono ancora stati scoperti). L'idea centrale della chimica è che, quando una sostanza si trasforma in un'altra, gli atomi stessi non cambiano: si limitano a scambiare partner o ad adottare nuove disposizioni. La chimica è tutta una sequela di divorzi e seconde nozze.

Benché «atomo» significhi indivisibile, gli atomi si possono dividere, e anche un ragionamento a tavolino porta a questa conclusione. Se gli atomi esistono di vari tipi, significa che posseggono strutture diverse, quindi è probabile che con un po' di ingegno si riesca a mandare l'atomo in pezzi e a identificare le cosiddette *particelle subatomiche* di cui è composto. Gli esperimenti confermano l'illazione e nel capitolo 2 vedremo qualcosa dell'interno degli atomi, e sull'origine delle loro varie personalità. È qui che la chimica ha il debito maggiore nei confronti della fisica, perché sono stati i fisici a dipanare la struttura degli atomi. I chimici usano queste informazioni per comprendere le molecole che gli atomi formano e le reazioni a cui partecipano.

Prestiti dalla fisica

Quest'ultima osservazione suggerisce quale sia l'ambito della chimica. E ci dice anche che per capirla è necessario prendere a prestito alcuni concetti dalla fisica. Le cose stanno proprio così; la chimi-

ca attinge da numerosi concetti sviluppati dai fisici (in cambio, noi chimici forniamo ai fisici la materia per i loro giochi di prestigio). In tutti questi scambi ci sono due prestiti straordinariamente importanti: uno riguarda il comportamento dei singoli atomi e delle loro componenti subatomiche; l'altro, il comportamento in blocco di quantità grandi e tangibili di materia, come una brocca d'acqua o un blocco di ferro. Per usare dei termini tecnici, si tratta rispettivamente del mondo *microscopico* e *macroscopico*.

Il concetto fisico cruciale che dà conto delle proprietà del mondo microscopico, cioè dei singoli atomi e delle molecole, è la *meccanica quantistica*. Benché gran parte della chimica sia stata sviluppata nell'Ottocento, non si capiva bene perché alcune cose accadessero e altre no. All'epoca regnava incontrastata la "meccanica classica" di Isaac Newton, cioè le procedure matematiche per calcolare il moto dei corpi macroscopici. La ragione di tanto successo è che spiegava perfettamente le orbite planetarie e le traiettorie dei proiettili, e per questo ci si aspettava che, riducendo i pianeti e le pallottole alle dimensioni degli atomi, nel regno di Newton si sarebbe trovata anche la spiegazione della chimica. Lo sforzo, seppure infruttuoso, con cui Newton si dedicò alle manipolazioni alchemiche è forse un segno che anch'egli la pensava così. Ma a cavallo tra Ottocento e Novecento si scoprì che, rimpicciolendo i pianeti e le pallottole alle dimensioni atomiche, la meccanica classica falliva completamente e perfino i concetti base della meccanica newtoniana andavano in

briciole se applicati agli atomi. Ecco i pericoli delle estrapolazioni incaute.

Poi, a inizio Novecento, verso il 1927, nacque una nuova meccanica che si dimostrò estremamente efficace nello spiegare come gli atomi e le particelle subatomiche conducano le loro faccende. Questa teoria, la meccanica quantistica, continua a non avere rivali quanto a capacità predittive e precisione numerica. Il fatto che rimanga in larga parte incomprensibile è, ammettiamolo, un difetto irritante, ma a tempo debito farò del mio meglio per distillarne il minimo indispensabile a capire il comportamento degli atomi, e quindi tutta la chimica. Vedremo che, nel mescolare e far bollire intrugli, i chimici persuadono gli atomi a comportarsi secondo le bizzarre leggi della meccanica quantistica.

L'altro concetto fondamentale preso a prestito dalla fisica, per dare conto stavolta del mondo macroscopico, cioè delle proprietà di grandi quantità di materia, è la *termodinamica*. La termodinamica è la scienza dell'energia e delle sue possibili trasformazioni. È nata in gran parte dalle macchine a vapore, che in epoca vittoriana mandavano letteralmente ed economicamente avanti le società. Presto però la termodinamica si dimostrò una parte essenziale del tessuto della chimica. Se la stoffa della disciplina è costituita materialmente dagli atomi, le trasformazioni che essi subiscono sono sotto il controllo e l'impeto dell'energia. Quando un combustibile brucia si libera energia, e questa è una maniera ovvia e utile, seppure primitiva, di manifestare il coinvolgimento dell'energia nella

chimica. Ma l'energia fa ben altro: governa come gli atomi si comportano in generale, quali strutture possono formare, quali cambiamenti di organizzazione possono subire e a che velocità. L'energia è ciò che manda avanti la chimica, nel senso che le reazioni sono costrette a procedere in una maniera che spiegherò nel capitolo 3. Poiché l'energia è avvolta così intimamente nella struttura profonda della chimica, non dovrebbe sorprendere che la termodinamica svolga un ruolo così importante, nonostante le sue origini ingegneristiche.

Se la chimica affonda le radici nella fisica per le spiegazioni (e, tramite la fisica, si spinge ancora più in giù, fino alla matematica, per le formulazioni quantitative), molte sue applicazioni trovano la fioritura più straordinaria nella biologia. Non c'è da sorprendersi: la biologia non è altro che un'elaborazione della chimica. Prima che i biologi si indignino a morte per un'osservazione che a prima vista può sembrare folle, come sostenere che la sociologia sia un'elaborazione della fisica delle particelle, lasciatemi essere più preciso. Gli organismi sono costituiti da atomi e molecole, strutture ben comprese dalla chimica. Gli organismi funzionano, cioè si mantengono in vita, grazie a una complessa rete di reazioni interne, pure ben comprese dalla chimica. Gli organismi si riproducono sfruttando strutture e reazioni molecolari che fanno entrambe parte della chimica. Gli organismi rispondono al loro ambiente, per esempio tramite la vista e l'olfatto, con cambiamenti in certe strutture molecolari, e quindi le risposte dei nostri sensi – più o meno

cinque, a seconda di come li contiamo – sono elaborazioni della chimica. Perfino l'evoluzione e l'origine delle specie, due fenomeni più che macroscopici, possono essere considerati un'elaborata conseguenza del secondo principio della termodinamica, e quindi rientrare nella chimica. Alcuni organismi, ho in mente in particolare gli esseri umani, meditano sulla natura del mondo, e i processi mentali che sono all'origine di quelle meditazioni e in esse si manifestano sono dovuti a una rete assai elaborata di reazioni chimiche. La biologia, quindi, è davvero un'elaborazione della chimica. Qualunque cosa pensi davvero sul tema, non mi spingerò fino a sostenere che ogni argomento di interesse dei biologi, compreso il comportamento degli animali, sia chimica applicata. Mi limiterò ad affermare che tutte le strutture, le reazioni e i processi degli organismi viventi fanno parte della chimica. La chimica, dunque, pervade la biologia e ha contribuito in modo incommensurabile alla comprensione degli organismi viventi.

Noi organismi dalla vita sociale elaborata, noi esseri umani, costruiamo cose e fabbrichiamo artefatti. Estraiamo pietre dal ventre della terra, pompiamo fluidi dalle profondità del suolo, catturiamo gas dal cielo, e cerchiamo di trasformare tutta questa materia grezza in qualunque cosa desideriamo. La conversione di tali materiali in sostanze che si possono plasmare, sagomare, filare, incollare, mangiare o semplicemente bruciare fa parte della chimica. I chimici potrebbero farsi da parte e lasciare che siano i sagomatori a sagomare, i filatori a filare e in generale

gli artigiani a fabbricare il prodotto finale, ma sono stati i chimici a fornire la materia grezza, l'infrastruttura della nostra moderna società tecnologica, contribuendo così enormemente all'economia mondiale e al benessere degli individui e delle nazioni.

Come ho sottolineato nella prefazione, tutta questa luce è ovviamente chiazata di ombre scure. La chimica ha senza dubbio contribuito alla capacità umana di mutilare e uccidere. Perciò, in questa rassegna su che cosa è la chimica, sarebbe inappropriato nascondere sotto il tappeto delle pagine la provvista di esplosivi e gas nervini, e i tributi accidentali e intenzionali fatti pagare al nostro fragile ecosistema. Affronterò questi problemi più avanti, ma fin da ora, per dirvi quanto considero importante che giudichiate con la vostra testa, vi invito a eliminare tutti i contributi della chimica al mondo moderno, in modo da tornare a quel tempo doloroso, pericoloso, scomodo e limitante per le aspirazioni umane che era l'Età della pietra. E vi invito allora a chiedervi: l'oscurità attuale è davvero più forte della luce?

Le suddivisioni della chimica

L'ambito della chimica è talmente vasto che la mia piccola introduzione, e la disciplina stessa, sarebbero informi come una balena spiaggiata a mollo nel fango, se non si fosse imposta una qualche struttura logica. I chimici hanno finito per adottare una struttura logica che li aiuta a svolgere le loro attività, a

riunirsi in congregazioni di persone che la pensano in modo simile, e a sviluppare le loro procedure, un po' come fanno i singoli stati con le loro politiche ed economie. A differenza degli stati, però, qui i confini sono incerti, e alcuni dei progressi più impressionanti avvengono spesso nelle zone dove due culture si incontrano. Questo è vero soprattutto quando la disciplina è matura, come lo è attualmente la chimica, e ogni campo di attività è già stato esplorato a fondo. L'ispirazione più fruttuosa emerge allora, come per l'arte, nelle fertili zone di frontiera dove la chimica incrocia le altre discipline.

Per i nostri scopi, e per capire la struttura generale della chimica, è utile farsi un'idea delle varie branche in cui è suddivisa e del tema di cui ciascuna si occupa. Le suddivisioni della chimica pervadono ancora oggi i dipartimenti, i corsi universitari e le riviste che pubblicano le scoperte, quindi una "guida turistica" alla disciplina è ancora tenuta a descriverle. Ma vi avverto: le frontiere, intellettuali e universitarie, si stanno sciogliendo.

La suddivisione più ampia, formale e importante, e tuttora ampiamente seguita, ripartisce la chimica in tre branche: la chimica organica, la chimica inorganica e la chimica fisica.

La *chimica fisica*, come dice il nome, si trova all'intersezione tra la fisica e la chimica, e si occupa dei principi della chimica che, come abbiamo visto, si rifanno ampiamente alla meccanica quantistica per spiegare la struttura degli atomi e delle molecole, e alla termodinamica per valutare il ruolo e l'uti-

lizzo dell'energia. La chimica fisica si occupa anche delle velocità alle quali avvengono le reazioni, sia a livello macroscopico sia microscopico. Nel secondo caso, cerca di seguire da vicino l'intimo destino delle singole molecole mentre sono fatte a pezzi e poi ricomposte in sostanze diverse nel corso delle reazioni. Un aspetto importante della fisica chimica è il suo contributo allo sviluppo delle tecniche sperimentali e all'interpretazione dei loro dati, in particolare della cosiddetta «spettroscopia».

Come vedremo nel capitolo 5, la spettroscopia usa vari tipi di luce per portare l'informazione contenuta all'interno delle molecole fino agli occhi, sempre più artificiali, dell'osservatore. Tale è infatti la complessità attuale di queste tecniche che i chimici fisici devono munirsi di tutto il loro armamentario, in particolare della meccanica quantistica, per riuscire a interpretare i dati. I contorni delle attività dei chimici e dei fisici in questo campo sono talmente incerti che la denominazione di chimica fisica spesso si trasforma in *fisica chimica*, per indicare per esempio lo studio del comportamento delle singole molecole con un approccio simile a quello usato da un fisico.

La *chimica organica* è la parte della chimica che si occupa dei composti del carbonio. Il fatto che un singolo elemento, che in sé non ha nulla di speciale, riesca a dominare una suddivisione intera della chimica, è un indizio delle sue fertili proprietà. Il carbonio si trova a metà della tavola periodica, la mappa delle proprietà chimiche degli elementi, ed è quasi del tutto indifferente alle relazioni che stringe. Al

punto che si accontenta pure di legarsi con sé stesso. Come conseguenza del suo carattere mite e poco aggressivo, il carbonio può formare catene e anelli di straordinaria complessità. Ed è proprio una complessità straordinaria ciò di cui ha bisogno un organismo per essere considerato vivente: i composti del carbonio sono perciò l'infrastruttura della vita, e l'elemento fondamentale delle sue reazioni. Sono anche numerosissimi, se ne contano svariati milioni. Non sorprende, dunque, che un'intera branca della chimica sia nata per studiarli, e che abbia sviluppato tecniche, nomenclature, attitudini.

Ma perché è chiamata "organica"? A eccezione di poche anomalie, come il semplice biossido di carbonio, o anidride carbonica, le molecole cui prende parte il carbonio sono talmente aggrovigliate che in origine soltanto la natura era ritenuta capace di formarle. Ciò equivale a dire che, secondo questa concezione "vitalistica", esse sono il prodotto degli organismi viventi. L'inizio della fine del vitalismo fu il 1828, quando fu dimostrato che un semplice minerale poteva essere convertito in un tipico composto "organico" (l'urea). Benché la disputa abbia infuriato per qualche tempo ancora, da quel momento l'aggettivo "organico" è diventato un arcaismo in relazione alla chimica organica. Degli arcaismi utili è però difficile disfarsi, perciò il termine sopravvive tuttora, anche se non significa niente altro che "composto del carbonio".

Rimane il resto, quel centinaio circa di elementi che non sono il carbonio, di cui si occupa la *chimi-*

ca inorganica. Come si può sospettare di una branca che si occupa di oltre cento elementi dalle personalità diversissime, la chimica inorganica è un campo di studi vitale, ma cresciuto disordinatamente. Tale disordine è stato in parte arginato dall'adozione di varie suddivisioni. La principale è la *chimica dello stato solido*, che studia i solidi inorganici, come i materiali che agiscono da superconduttori, o i semiconduttori che hanno reso i computer accessibili a tutti. È difficile resistere all'analogia tra la chimica inorganica e un'orchestra di cento musicisti, in cui il chimico è insieme un compositore e un direttore d'orchestra, che dando ordine agli strumenti estrae sinfonie di combinazioni.

Il carbonio non è al riparo dallo sguardo indagatore con cui il chimico inorganico setaccia la tavola periodica. Il biossido di carbonio che ho già citato, il monossido di carbonio che è un gas noto per la sua letalità, il gesso e il calcare che formano i nostri paesaggi, sono alcuni dei più semplici composti del carbonio, lasciati da parte dalla chimica organica che se ne interessa poco e considerati inorganici per convenzione. Al confine tra la chimica organica e inorganica, però, si trovano composti che sono intricatissimi assemblaggi di atomi di carbonio, ma includono anche atomi di vari metalli. Alcuni sono catalizzatori essenziali per l'industria chimica; altri sono cruciali per la vita degli organismi. Qui si trova il campo interdisciplinare della *chimica organometallica*, che nei casi migliori dà luogo a collaborazioni assai fruttuose tra chimici organici e inorganici.

Gli altri rami della chimica

Queste sono le tre principali suddivisioni della chimica. Una lista breve, che non esaurisce affatto tutti i modi in cui i chimici sminuzzano la loro disciplina per digerirla meglio. Ma è da queste branche che le altre derivano tecniche, concetti e spunti in proporzioni variabili, e condiscono il miscuglio con un pizzico di altre materie. Sarebbe una bell'impresa elencare tutte le suddivisioni della chimica, ma almeno delle più comuni è bene essere consapevoli.

La *chimica analitica* è la moderna discendente di quella curiosità senza tempo che spinge a chiedersi come siano fatte le cose. Cosa c'è in un minerale? Oro o afnio? Cosa c'è nel petrolio? Quali idrocarburi, e poi, cos'altro? Cos'è quel composto che hai ottenuto? Riesci a capire come sono disposti lì dentro gli atomi? Queste sono tutte domande a cui i chimici analitici potrebbero tentare di rispondere. Provette, storte e beute fanno ancora parte del loro armamentario, ma molti esperimenti avvengono ora in macchinari sofisticati, che a volte sfruttano la spettroscopia e altre tecniche sviluppate dai chimici fisici e inorganici, e io ve ne parlerò nel capitolo 4. Dalla chimica analitica si è originato il ramo della *chimica forense*, in cui le tecniche della prima sono usate a scopi legali: smascherare o scagionare gli indiziati, e analizzare le scene dei crimini.

La *biochimica* è la retrodonazione della chimica organica alla biologia, a volte con un pizzico di

chimica inorganica. La biochimica si occupa esclusivamente delle strutture e delle reazioni che costituiscono gli esseri viventi, studiando i percorsi metabolici che trasformano il cibo in azioni (inclusa quell'azione confinata al cervello che è il pensiero). Gli organismi sono tuttora un serbatoio importantissimo di molecole organiche, dato che la natura ha avuto miliardi di anni a disposizione per esplorarne le numerose possibilità strutturali in tante nicchie ecologiche diverse. I biochimici svolgono quindi un ruolo cruciale per scoprire che cosa c'è là dentro e come sono state fabbricate, sotto il controllo delle api operaie del corpo, le proteine chiamate enzimi. Le estinzioni, che insieme alle specie fanno sparire fonti di molecole complesse che hanno impiegato milioni di anni a emergere, sono una preoccupazione importante, seppure antropocentrica.

Il nome *chimica industriale* parla da solo. Qui il chimico incontra l'ingegnere, e le reazioni che hanno funzionato in provetta o in qualche altro contenitore di laboratorio sono portate a scale enormi, e adattate a fini commerciali. I chimici industriali contribuiscono grandemente all'economia e al commercio tra le nazioni. Nel solo Regno Unito le sostanze chimiche rappresentano il 20% del prodotto interno lordo, e negli Stati Uniti oltre il 96% di tutti i beni prodotti ha direttamente a che fare con la chimica. Queste cifre, relative alle sostanze chimiche prodotte, non devono però farci arricciare il naso (letteralmente). Uno degli interessi maggiori dell'attuale chimica industriale è la *chimica verde*, ovvero

l'intento di diminuire il volume dei rifiuti, rinforzando così l'economia, e di minimizzare l'impatto sull'ambiente, in modo da rendere il comparto più accettabile e sostenibile.

Rapporti con le altre discipline

La chimica ha molti debiti di riconoscenza verso le materie limitrofe nel panorama intellettuale, ma anche queste a loro volta sono indebitate con la chimica.

La fisica ha debiti in particolare nel campo dell'elettronica e sempre più in quello della fotonica (l'uso della luce, anziché degli elettroni, per trasmettere informazioni e manipolare dati). I chimici creano i semiconduttori, senza i quali i computer sarebbero confinati alla scala industriale dove sono nati. Inoltre formulano la composizione dei materiali vetrosi usati nelle fibre ottiche, senza le quali la trasmissione di informazioni sarebbe impedita.

La biologia ha un enorme debito verso la chimica, specie da quando è emersa la *biologia molecolare*, che è balzata fuori soprattutto dalla scoperta della struttura del DNA e dall'interpretazione di questa molecola quale trasportatore dell'informazione genetica da una generazione all'altra. Forse non è esagerato dire che la biologia è diventata una parte delle scienze fisiche dopo che è stata identificata la componente chimica della sua caratteristica principale, la riproduzione. La biologia molecolare è davvero una versione della chimica, e la maturità

raggiunta dalla chimica ha permesso alla biologia di diventare vivace come mai è stata prima. La collaborazione tra biologia e chimica, chiamata *chimica medica*, è uno dei maggiori contributi della chimica alla società, e fra i più accettabili.

Anche la società ha un enorme debito nei confronti della chimica, di cui applica ovunque i contributi materiali, nella medicina, nell'agricoltura, nelle comunicazioni, nei trasporti e in ogni forma di costruzione, fabbricazione e decoro, come dicevo nella prefazione. Tutti abbiamo poi un debito personale verso la chimica, che, come ho detto, offre a ciascuno di noi un occhio interiore per godere del mondo.

E siccome tutto ciò ha origine da una buona comprensione della chimica, io ora mi accingo a spiegarvela.