

ANNA MURELLO

Acqua

Dalla goccia alla vita

prefazione di Francesco Stellacci

SAGGI

Indice

- p. 7 Prefazione di Francesco Stellacci
11 Una breve introduzione (e una lunga dedica)
- 15 Capitolo 1
La molecola d'acqua
1.1. Il legame idrogeno: un collante tra molecole, 25
1.2. Ghiacci non convenzionali, 35
1.3. Acqua liquida, 38
1.4. Vitali differenze di densità, 40
- 45 Capitolo 2
L'acqua all'interfaccia
2.1. Uguali come due gocce d'acqua, 49
2.2. L'interfaccia ordinata, 56
2.3. Il sale si scioglie, e il metano?, 63
2.4. Capillarità: c'è chi scende e c'è chi sale, 71
2.5. Superfici reali: complessità nascosta, 73
2.6. È tutta questione di curiosità, 83
- 87 Capitolo 3
L'organizzazione spontanea
3.1. Il nobile e la casalinga, 90
3.2. L'approccio rigoroso di Langmuir, 93

- 3.3. Quando la superficie non basta: le micelle, 100
 - 3.4. Gran varietà di forme e dimensioni, 103
 - 3.5. Miscugli di lecitina e acqua, 105
- p. 109 Capitolo 4
- La vita*
 - 4.1. Le proteine, 112
 - 4.2. Le membrane biologiche, 118
 - 4.3. L'interno della cellula, 124
 - 4.4. Vita in ambienti estremi, 132
- 139 Capitolo 5
- Tecnologie per la vita*
 - 5.1. Molecole tensioattive, 140
 - 5.2. Le micelle: applicazioni farmaceutiche, 143
 - 5.3. Lo sviluppo di nuovi farmaci, 145
 - 5.4. La crioconservazione, 152
- 159 Per approfondire
- 161 Bibliografia sintetica

Prefazione

Immaginate l'uomo primitivo che si guarda intorno e scopre un mondo bellissimo, fatto di colori, odori, sapori e oggetti di tutte le forme. Chissà quante migliaia di anni saranno state necessarie perché piano piano l'uomo iniziasse a conoscere tutte queste cose. Possiamo solo immaginare il fascino che tutto il mondo intorno abbia esercitato. A un certo punto l'uomo ha iniziato a conoscere la materia, a distinguerne le proprietà ed è così che ha realizzato i primi utensili, le famose punte delle lance che usava per cacciare, per esempio. Ha anche iniziato a conoscere la natura, per capire, per esempio, quali frutti potesse mangiare e quali non dovesse toccare. È grazie proprio alla conquista di tutto questo sapere che iniziano le prime società, e, con loro, il primo sapere complesso, e poi quello filosofico. Ed è proprio in questo contesto, che in varie culture, nasce l'idea che esistano quattro forme di materia, la terra, l'acqua, il fuoco, e l'aria. Oggi diremmo che gli uomini avevano già allora intuito le forme della materia, quella solida (la terra), quella liquida (l'acqua), e quella gassosa (l'aria), e se mi posso permettere di estrapolare anche lo stato di plasma (il fuoco).

Continuando a ragionare, la terra doveva sembrare a questi uomini l'elemento più complesso, così ricco di sapori, di colori, di proprietà così varie. L'acqua d'altro canto possedeva la proprietà quasi magica di venire dal cielo, ed era chiaro già da allora che era un elemento che donava la vita. Fatemi ora fare un salto di migliaia di anni, arriviamo ai giorni nostri. Oggi sappiamo che tutto è fatto di atomi e di molecole (che sono gruppi di atomi). Quando questi costituenti vibrano solo intorno a posizioni fisse, parliamo di solidi. Se possono cambiare posizione, scambiandosi di posto facilmente allora abbiamo liquidi e gas, che si distinguono a seconda della forza della tensione superficiale. Per i liquidi, quest'ultima è abbastanza grande da imporre un volume fisso, per i gas questo non succede e il loro volume è quello del contenitore. Sappiamo anche che quasi tutti i materiali puri possono esistere in tutti e tre gli stati.

Oggi, tanti miei colleghi scienziati della materia, senza mai ammetterlo pubblicamente, pensano che le proprietà più complesse, più interessanti, derivano dallo stato solido cristallino. Lo stereotipo è che quando gli atomi sono ordinati e formano delle strutture simmetriche e complesse, è allora che le funzioni d'onda dei loro elettroni interagiscono in modi complessi donandoci interazioni meravigliose.

Io personalmente non condivido questa visione perché, sebbene di solito giusta, ha una grande eccezione, l'acqua. Questo magico liquido anche quando non si trova nello stato solido cristallino, ha proprietà complessissime che non sono ancora pienamente comprese. Si tratta di un liquido che contiene delle cariche, in equilibrio tra di loro, in cui le molecole, sebbene liquide, sono legate tra loro da legami a idrogeno, che continuano a scambiarsi come fossero delle patate bollenti.

Lascio al lettore il piacere di immergersi nel mondo complesso e bellissimo di questa sostanza, che è alla base della nostra vita. È veramente difficile immaginare la vita senza l'acqua, nessun altro liquido permette la complessità di interazioni che l'acqua permette. Lascio i lettori con una piccola considerazione. L'acqua ha, come liquido, una proprietà molto unica: a temperature vicine alla transizione di fase solido liquido, lo stato liquido è più denso dello stato solido. In parole semplici quando l'acqua passa da liquido a solido, il liquido è più pesante. Conosciamo benissimo questa proprietà, sappiamo bene che gli iceberg galleggiano sul mare, e che le lastre di ghiaccio rimangono comodamente sulla superficie dei laghi. Sappiamo anche che una bottiglia piena d'acqua lasciata in freezer può rompersi perché il ghiaccio ha bisogno di più volume dell'acqua libera. Ci sono ben pochi materiali con i quali l'acqua condivide questa proprietà all'apparenza innocente, me ne viene in mente solo uno: il silicio, un altro elemento molto importante al giorno d'oggi perché è alla base di tutta l'elettronica. Ebbene questa proprietà è fondamentale per lo sviluppo della vita. Immaginate se il ghiaccio sprofondasse sul fondo dei laghi, alla superficie di quest'ultimi l'acqua continuerebbe a gelare e il processo si fermerebbe solamente quando tutta la massa d'acqua diviene solida. Questo ucciderebbe tutta la vita lacustre e potrebbe anche bloccare fiumi interi. Invece il ghiaccio non solo si instaura alla superficie dei laghi, ma l'acqua solida è anche un ottimo isolante termico, per cui lo strato di ghiaccio protegge la vita che esiste sotto! Chissà cosa succederebbe in un mondo in cui gli iceberg sono montagne di ghiaccio che esistono solo in profondità e i poli sono crocevia di liquidi freddissimi.

Invece viviamo in un mondo in cui il liquido principale, l'acqua, permette la vita. Abbiamo quindi il dovere di comprendere tutta la bellezza e la complessità di questo liquido magico. A me sembra che il libro della professoressa Murello sia un ottimo inizio.

Francesco Stellacci
Politecnico Federale di Losanna (EPFL)

Una breve introduzione (e una lunga dedica)

Vorrei esser come l'acqua [...]
Che scivola su tutto, che si fa assorbire
[...] finché non raggiunge il mare
E lì si ferma a meditare

Per scegliere se esser ghiaccio o vapore.

E. Finardi, *La canzone dell'acqua*, 1979

Quando ascolto la voce di Eugenio Finardi che canta questa canzone accompagnata dalle dolci note della sua chitarra, la mia immaginazione corre e visualizza un limpido ruscello di montagna, con i ciottoli umidi al suo fianco e qualche legnetto trasportato dalla corrente. Solo pochi versi più tardi immagino il luccichio del mare, il suo colore blu intenso, il rumore dello scroscio delle onde. Un'immagine che dura poco, perché in breve deve avvenire la scelta: ghiaccio o vapore? Dipende dal giorno e dall'ora.

L'acqua ci accompagna, da ben prima del momento in cui abbiamo imparato a pronunciare il suo nome, che peraltro è spesso una delle prime parole apprese da un bambino. Oltre al suo valore materiale, la sua valenza simbolica travalica i confini delle culture e delle religioni di tutto il mondo. Senz'acqua noi non viviamo.

È lei la protagonista indiscussa di questo libro: inizieremo parlando della sua molecola e di come tante di queste

molecole interagiscano diversamente nel caso del liquido, del ghiaccio e del vapore. La scelta metaforica della canzone è determinata, nel mondo reale, da variabili chimico-fisiche ben precise, che provocano come conseguenza non solo il fenomeno del galleggiamento del ghiaccio sull'acqua liquida, ma anche la formazione di svariate tipologie di ghiaccio.

Ci occuperemo in seguito di come le superfici vengano bagnate, del perché l'acqua scivoli o si faccia assorbire e di cosa accada in prossimità delle superfici sia a livello macroscopico che a livello molecolare. Ripercorreremo le vicende di diversi scienziati che nel corso di secoli hanno cercato di comprendere i misteri del comportamento di questo fondamentale liquido fino a capire come avvenga l'organizzazione spontanea di determinate molecole in strutture complesse e come tale fenomeno sia legato alla vita.

Nell'ultimo capitolo vi racconterò di come tutte queste scoperte abbiano influito su applicazioni tecnologiche che già adoperiamo o che sono attualmente in fase di studio.

Forse avrete notato che non ho inserito una dedica nelle primissime facciate di questo libro, non perché non volessi dedicarlo a nessuno, ma perché avevo bisogno di uno spazio decisamente più ampio di quello comunemente riservato alla dedica per spiegare la sua motivazione.

L'idea di questo testo è nata quando stavo scrivendo la mia tesi di dottorato, intitola *Water interactions with complex surfaces* (ovvero *Le interazioni dell'acqua con superfici complesse*), alla quale ho lavorato per cinque anni nel laboratorio SuNMIL del politecnico federale di Losanna, sotto la guida del professor Francesco Stellacci. Mentre lavoravo alla sua stesura, nella primavera 2020, mi sono resa conto che avevo approfondito molti aspetti interessanti nel corso delle mie

ricerche e che avrei voluto condividere le mie conoscenze con un pubblico molto più vasto rispetto ai lettori della mia tesi. Certo, la tesi è necessariamente un testo specialistico e altamente tecnico, ma i concetti della scienza su cui essa si fonda sono applicabili alla vita di tutti i giorni e, a mio avviso, potrebbero interessare un gran numero di persone. Mi sono resa conto, scrivendo la mia tesi, che se avevo avuto l'opportunità di affrontare un dottorato di ricerca in uno dei dipartimenti di scienze dei materiali più prestigiosi al mondo, era anche grazie al sistema pubblico d'istruzione italiana. Mentre digitavo le lettere che componevano le didascalie dei miei grafici tecnici e rivolti a un lettore specialista ho capito che avrei voluto scrivere un volume rivolto al lettore non specialista, che grazie al pagamento delle tasse aveva sostenuto la mia formazione e mi aveva permesso di affrontare un dottorato in un dipartimento di altissimo livello. La vedevo come una sorta di giusta restituzione.

Questo libro è dunque dedicato a tutti coloro che, pagando le tasse, hanno permesso allo stato di fornire a me e a tantissimi altri giovani un'istruzione di qualità.

Capitolo 1

La molecola d'acqua

Water is H₂O, hydrogen two parts, oxygen one, but there is also a third thing, that makes it water and nobody knows what it is.

D.H. Laurence, *Pansies*, 1929

Acqua purificante, acqua limpida, acqua cristallina.

Acqua benefica, acqua rinfrescante, acqua dissetante.

Acqua naturale, acqua potabile, acqua pulita.

Acqua e pur sempre acqua: H₂O.

Una formula semplice e snella, due sole lettere e un numero per descrivere la chimica di una sostanza così fondamentale. Due elementi che se uniti costituiscono una molecola necessaria e insostituibile perché ci possa essere vita, almeno come noi la conosciamo.

H: idrogeno. L'elemento più piccolo che esista e il più diffuso nell'Universo.

O: ossigeno. L'elemento dal quale siamo dipendenti in ogni nostro respiro e che è il terzo in termini di abbondanza nell'Universo.

Prima di addentrarci oltre, sapreste immaginare quale elemento occupa il secondo gradino del podio dell'abbondanza nell'Universo? Guardando la materia che ci circonda saremmo tentati di indicare l'azoto, così diffuso nella nostra atmosfera, o forse il silicio, componente essenziale delle nostre rocce, o ancora il carbonio, che costituisce l'elemento di base di tutta la chimica organica, ma in realtà il secondo

atomo più diffuso nell'Universo è molto più piccolo di questi appena nominati e poco presente nella nostra vita quotidiana: l'elio. Tale elemento, essendo più leggero dell'aria che ci circonda, è estremamente noto in quanto viene usato per riempire palloncini e farli volare verso l'alto. Nonostante la sua notorietà, anche se decidessimo di sforzarci a lungo non riusciremmo a farci venire in mente nessun materiale composto da elio: esso è infatti particolarmente stabile e non può legarsi a nessun altro elemento per formare una molecola, motivo per cui esso rientra nel gruppo dei cosiddetti gas nobili.

Se l'atomo più diffuso nell'Universo è l'idrogeno, seguito da un gas nobile che non può prender parte alla formazione di molecole e successivamente dall'ossigeno, è abbastanza ragionevole aspettarsi che la molecola più diffusa nell'Universo sia quella composta da due atomi di idrogeno (H_2), seguita dalla molecola composta da una combinazione di atomi di idrogeno e ossigeno. In effetti questo è esattamente quello che si verifica: la molecola d'acqua è la seconda molecola in termini di abbondanza nell'Universo, preceduta solo dall'idrogeno molecolare. Una tale constatazione potrebbe stupirci in quanto fanno spesso notizia missioni spaziali finalizzate alla scoperta della presenza dell'acqua su un determinato pianeta e a volte abbiamo la sensazione che essa sia una molecola rara, mentre in realtà è la seconda per abbondanza nell'Universo. Questo è dovuto al fatto che, come per tutti gli elementi e le molecole, la sua concentrazione varia molto da un punto all'altro dello spazio astrale e le missioni spaziali sono proprio volte a capire se in un determinato punto dell'Universo essa sia presente o meno. Inoltre, nell'Universo la temperatura varia dai $-270^\circ C$ dello

spazio interstellare a centinaia di migliaia di gradi misurabili nelle stelle. Su questa scala di temperature, l'intervallo di esistenza dell'acqua liquida è molto limitato (solo da 0 a 100°C) e quindi è estremamente più facile trovare acqua allo stato solido (ghiaccio) o allo stato gassoso (vapore acqueo).

Consideriamo, ad esempio, l'ambiente extraterrestre che conosciamo meglio: la Luna. Nell'immaginario collettivo la sua superficie è estremamente arida ed effettivamente la missione della NASA SOFIA, nel 2020, ha misurato per la prima volta l'umidità del suolo lunare nelle zone illuminate dal sole e ha rilevato che la concentrazione di acqua è un centinaio di volte inferiore a quella rilevabile nel deserto del Sahara. Esistono però dei punti particolari della superficie che non vengono mai illuminati dai raggi solari e hanno quindi una temperatura costantemente inferiore ai -150°C. Si tratta dei punti più profondi dei crateri lunari, dove l'acqua si trova intrappolata in ingenti quantità sotto forma di ghiaccio, visto che le temperature non ne permettono la fusione. La superficie lunare è quindi un luogo arido solo nei punti che vengono illuminati dal Sole.

All'estremo opposto si trova quello che a oggi è il più grande deposito d'acqua mai osservato: un ammasso di vapore acqueo scoperto nel 2011 da due gruppi di ricercatori della NASA e del California Institute of Technology, che hanno condotto le loro osservazioni da tre osservatori, il primo situato alle Hawaii, il secondo nel sud della California e il terzo sulle Alpi francesi¹. Tale concentrato di vapore

1. D.C. Lis *et al.* (2011), *Discovery of water vapor in the high-redshift quasar APM 08279 + 5255 at $z = 3.91$* , in «The Astrophysical Journal Letters», 738, L6. C.M. Bradford *et al.* (2011), *The water vapor spectrum of APM 08279 + 5255: X-ray heating*

si trova a 12 miliardi di anni luce dalla Terra e contiene una quantità di acqua pari a 140 milioni di miliardi quella che si trova negli oceani del nostro pianeta, tutta in forma gassosa. Questa riserva d'acqua non è solo la più grande mai rilevata nell'Universo, ma è anche la più distante mai osservata. In astrofisica osservare eventi più distanti equivale a osservare eventi che sono avvenuti più lontano nel passato in quanto la luce deve aver avuto il tempo di raggiungere noi osservatori viaggiando a circa 300.000 km/s. In questo caso alla luce sono serviti 12 miliardi di anni per raggiungere la Terra. Considerando che attualmente l'età dell'Universo è stimata di poco inferiore ai 14 miliardi di anni, questa osservazione è cruciale perché dimostra la presenza di vapore acqueo già in epoche estremamente remote. Alcune simulazioni pubblicate nel 2025 prevedono, in effetti, che le molecole d'acqua fossero già presenti nell'Universo poche centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang².

Ora che abbiamo appurato la grande presenza di acqua nell'Universo dobbiamo necessariamente soffermarci sulle sue caratteristiche chimiche, iniziando dall'analisi degli atomi che la compongono e arrivando alla struttura della sua molecola. Non possiamo, infatti, esimerci dal discutere le peculiarità degli atomi che compongono una molecola se vogliamo comprendere le sue proprietà: sarebbe come cercare di analizzare le caratteristiche nutrizionali di una pietanza senza conoscerne gli ingredienti. Non spaventatevi se alcuni passaggi vi sembrano complessi: di tanto in tanto

and infrared pumping over hundreds of parsecs, in «The Astrophysical Journal Letters», 741, L37.

2. D.J. Whalen *et al.* (2025), *Abundant water from primordial supernovae at cosmic dawn*, in «Nature Astronomy», 9.

porterò la vostra attenzione sugli aspetti più importanti da tenere a mente per affrontare i prossimi capitoli del libro.

Iniziamo, dunque, considerando l'atomo di idrogeno: il più piccolo atomo esistente. Un solo elettrone che ruota attorno a un singolo protone.

Ricordiamo che per tutti gli elementi presenti nell'Universo la struttura dell'atomo si assomiglia: particelle puntiformi cariche negativamente, chiamate elettroni, ruotano attorno a un nucleo con carica positiva formato da una combinazione di particelle neutre, chiamate neutroni, e particelle cariche positivamente, chiamate protoni. Il numero di protoni che un atomo possiede uguaglia il numero dei suoi elettroni in modo che la carica totale sia nulla. Esso è chiamato numero atomico in quanto ci permette di distinguere i diversi elementi. Se nella vostra mente state ora immaginando delle palline che ruotano attorno al nucleo su orbite sferiche, un po' come accade per i pianeti intorno al Sole, significa che il modello atomico a cui vi state riferendo non è aggiornato all'ultima versione. Per quanto esso sia facile da immaginare e sufficientemente accurato in molti contesti, non permette di descrivere nel dettaglio il comportamento degli elettroni. Essi infatti, secondo la meccanica quantistica, non vanno concepiti come sferette rotanti, ma sono da considerarsi delocalizzati (in qualche modo distribuiti) attorno al nucleo. In questo contesto il concetto di orbita va sostituito con quello di orbitale, inteso come una specie di nuvola che si estende attorno al nucleo e che determina la zona in cui si ha la massima probabilità di trovare gli elettroni.

Sempre secondo le regole della meccanica quantistica, tutti gli orbitali vengono raggruppati in livelli energetici e ciascuno di essi può contenere al massimo due elettroni:

il primo livello, quello meno energetico, è costituito da un solo orbitale e può ospitare al massimo due elettroni, il secondo e il terzo livello sono costituiti da quattro orbitali ciascuno e di conseguenza possono ospitare fino a otto elettroni, dal quarto livello in poi la situazione si fa molto più complessa, ma non è necessario discuterla per comprendere la struttura di una molecola d'acqua. Gli orbitali, infatti, vengono riempiti dagli elettroni in modo progressivo, partendo dal livello meno energetico: il caso dell'idrogeno è dunque il più semplice da analizzare in quanto esso ha numero atomico uno e il suo unico elettrone si trova nel primo livello energetico. L'ossigeno ha invece numero atomico otto: due dei suoi elettroni riempiono il primo livello energetico, mentre gli altri sei si dispongono nel secondo livello (in cui rimangono due posti liberi). Se avete familiarità con la chimica trovate probabilmente banale questa spiegazione, se invece la chimica è per voi un ricordo lontano lo schemino di Figura 1 dovrebbe chiarirvi le idee.

Anche dei ricordi più lontani rimane di solito una traccia nella nostra memoria, e se c'è una regola alla base della chimica che molto probabilmente vi è rimasta impressa è che le configurazioni elettroniche più stabili sono quelle in cui l'ultimo livello energetico contiene il numero massimo possibile di elettroni, di conseguenza gli atomi che non rispettano questa condizione tendono a condividere i loro elettroni in modo da ottimizzare il riempimento di tale livello. L'ossigeno tende quindi ad attrarre due elettroni per riempire il suo secondo livello energetico. L'idrogeno, dal canto suo, si trova anch'esso in una situazione instabile: il primo livello energetico infatti può ospitare fino a due elet-

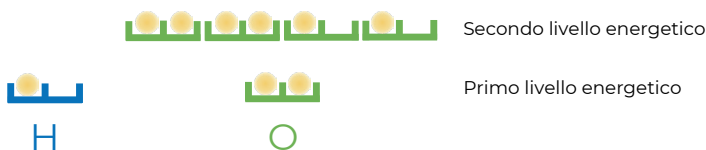


Figura 1. Schema degli orbitali degli atomi di idrogeno e di ossigeno, divisi nei due livelli energetici. Ogni orbitale può ospitare al massimo due elettroni, raffigurati come delle sferette gialle.

troni, ma l'idrogeno ne possiede solo uno ed è quindi ben disponibile a dividerlo con l'ossigeno.

Eccoci giunti a un concetto importante da ricordare: ogni atomo di idrogeno desidera disperatamente condividere il suo unico elettrone, ogni atomo di ossigeno vorrebbe riceverne due in condivisione. La conseguenza è che ogni atomo di ossigeno va a braccetto con due atomi di idrogeno, in modo che ciascun atomo abbia in totale, grazie alla condivisione, il numero ottimale di elettroni (ogni atomo di idrogeno condivide un elettrone e così l'ossigeno ne riceve due). In caso di dubbi, Figura 2 dovrebbe aiutarvi a chiarire le idee tramite una raffigurazione schematica geometrica, nella quale gli atomi di idrogeno e quello di ossigeno, rappresentati come in Figura 1, si incastrano per ottimizzare il riempimento degli orbitali. La magnifica tripletta di atomi incastrati è proprio la molecola d'acqua. Per quanto evocativo, il termine *incastrato* non appartiene al linguaggio della chimica: per essere un po' più rigorosi, si dice che tra un atomo di ossigeno e un atomo di idrogeno si forma un legame covalente.