

IL POTENZIALE CHIMICO COME STRUMENTO DI MODELLIZZAZIONE: IL CASO DELLA CHIMICA

Paolo Lubini

Liceo Lugano 2, Savosa, Svizzera

Ufficio Insegnamento Medio, Bellinzona, Svizzera

Abstract

Contrariamente a quanto si pensa, il concetto di potenziale chimico (μ) non è difficile, può essere introdotto sin dall'inizio e il suo esplicito utilizzo permette di descrivere in maniera semplice, coerente, sistemica e sistematica tutti i fenomeni che coinvolgono trasformazioni e trasporti di sostanze. Esso offre inoltre la possibilità di cogliere parecchie analogie a livello strutturale con altri campi delle scienze naturali quali l'idraulica, la termologia, l'elettricità e la meccanica in termini di un modello basato sui concetti di spinte, correnti e resistenze. Nel presente contributo tipiche situazioni, facilmente riscontrabili nella vita di tutti i giorni e che vedono coinvolta la sostanza acqua, verranno descritte, analizzate e modellizzate tramite il concetto di potenziale chimico.

1. Introduzione

Per raccontare storie di carattere chimico può essere utile disporre di strumenti adeguati. Questi stessi strumenti dovrebbero anche consentirci di osservare e comprendere il mondo che ci circonda. Ma, come ci insegna A. de Saint-Exupéry (Fig. 1), osservare non è sempre così semplice come forse si potrebbe pensare. In effetti, per dirla con le parole di W. Gibbs, potrebbe proprio essere considerato uno dei compiti della ricerca didattica e non solo, quello di trovare *"... il punto di vista dal quale l'argomento oggetto di studio appare nella sua massima semplicità"* (Fig. 2).



Fig. 1 - Per poter osservare bisogna disporre di "occhiali appropriati": *"Mostrai il mio capolavoro alle persone grandi, domandando se il disegno li spaventava. Ma mi risposero: "Spaventare? Perché mai, uno dovrebbe essere spaventato da un cappello?". Il mio disegno non era il disegno di un cappello. Era il disegno di un boa che digeriva un elefante. Affinché vedessero chiaramente che cos'era, disegnai l'interno del boa. Bisogna sempre spiegargliele le cose, ai grandi."* (De Saint-Exupérie, 1984)

Come vedremo, in chimica, i concetti di equazione di bilancio e soprattutto di potenziale chimico giocano un ruolo molto importante e possono contribuire a "semplificare" la descrizione dei processi che coinvolgono trasformazioni di sostanze.

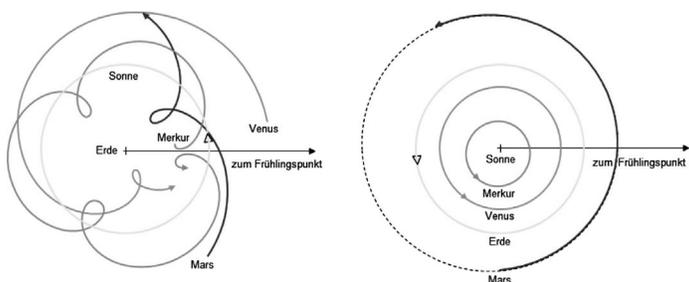


Fig. 2 - Moto del Sole e dei vari pianeti (nel periodo aprile 2005-aprile 2006) da una prospettiva rispettivamente geocentrica (sinistra) e eliocentrica (destra): un punto di osservazione appropriato può contribuire a semplificare la descrizione di un particolare fenomeno (immagine di G. Job).

2. Gli strumenti

L'equazione di bilancio

Il primo strumento che vogliamo considerare è quello dell'*equazione di bilancio*. Si tratta di un'idea già presente nei bambini, che deve comunque essere strutturata ed affinata e che può trovare una sua semplice esemplificazione pensando ad un pollaio ed alla quantità di galline che lo popolano (Fig. 3): la popolazione di galline può variare a seguito di entrate, uscite, nascite o morti. Questa situazione è del tutto analoga a quella che troviamo quando descriviamo dei processi che coinvolgono una trasformazione di sostanze: la quantità chimica, come il numero di galline, non è infatti conservata.

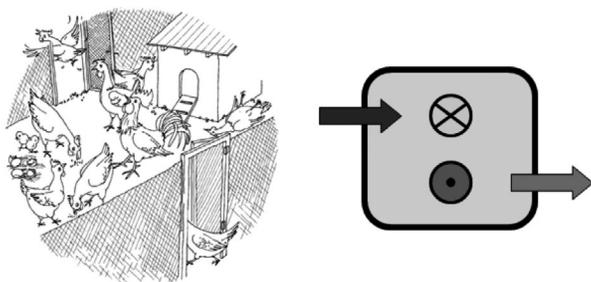


Fig. 3 - La popolazione di galline in un pollaio può variare in più modi: con l'entrata o l'uscita di galline e con la nascita o con la morte. A destra una rappresentazione più formale: il simbolo \odot sta per produzione e quello \otimes per distruzione (disegno di G. Chiesi).

Il potenziale chimico

Consideriamo alcune semplici situazioni facilmente riscontrabili nella vita di tutti i giorni (Fig. 4): abbiamo il bucato che asciuga con l'acqua che abbandona il panno per passare all'ambiente, una candela che brucia dove la cera

reagisce con il diossigeno presente nell'aria per dare diossido di carbonio ed acqua, una pasticca effervescente che in acqua dà una produzione di gas, il sale o lo zucchero che vengono sciolti dall'acqua, il latte che reagisce con il limone dando un precipitato bianco, l'auto che arrugginisce o, ancora, la mela che, all'aria, assume una colorazione brunastra.



Fig. 4 - Alcune semplici situazioni della vita di tutti i giorni ci suggeriscono che le sostanze sono soggette ad una "spinta al cambiamento" (disegno di G. Chiesi).

Queste, e molte altre osservazioni analoghe, ci permettono di ipotizzare che ogni sostanza sia soggetta ad una "spinta al cambiamento", cioè a:

- reagire con altre sostanze;
- cambiare fase;
- diffondere nell'ambiente circostante.

Il *potenziale chimico* μ permette di descrivere queste trasformazioni sia a livello qualitativo che quantitativo. Il suo valore (espresso in kJ mol^{-1}) è determinato:

- dalla natura della sostanza;
- dall'ambiente in cui la sostanza in questione si trova (temperatura, pressione, concentrazione, solvente, ...);
- ma *non* dalla natura dei partner o dei prodotti di reazione.

Per rappresentare graficamente questa idea può essere utile ricorrere a dei diagrammi come quelli riportati nella Fig. 5.

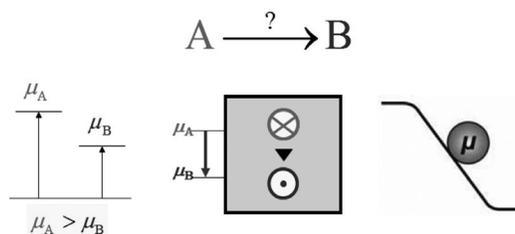


Fig. 5 - Tre modi differenti per rappresentare graficamente un processo spontaneo nel quale si ha una diminuzione del potenziale chimico (il simbolo \otimes sta per distruzione e quello \odot per produzione).

In questo contesto val forse la pena sottolineare il fatto che l'idea di una spinta (intesa come differenza di potenziale), quale "forza motrice" per un cambiamento, è un potente strumento di analisi per la razionalizzazione dei fenomeni naturali: in elettricità abbiamo infatti una differenza di potenziale elettrico quale spinta per una corrente elettrica, in termologia abbiamo una differenza di potenziale termico (differenza di temperatura) quale spinta per un flusso di calore (entropia), in idraulica abbiamo una differenza di pressione quale spinta per una corrente di un volume di acqua.

La misura del potenziale chimico

Prima di procedere con la discussione di alcuni semplici esempi, è opportuno spendere alcune parole a proposito della misura dei potenziali chimici.

Va subito detto che è difficile fornire una procedura generale e questo non tanto perché non ci sono metodi sufficientemente semplici, quanto piuttosto perché ve ne sono moltissimi. In definitiva la situazione non è molto differente da quella che si riscontra per la determinazione delle altre grandezze fisiche: a dipendenza dell'ordine di grandezza, della precisione, dell'accuratezza, del tipo di oggetto, ecc. si utilizzerà una procedura piuttosto di un'altra. Si pensi, ad esempio, alla massa. La determinazione della massa di un pianeta utilizza procedure e strumenti differenti rispetto a quelli impiegati per stabilire la massa di una persona o quella di un atomo.

Inoltre, ogni grandezza fisica di cui si conosca l'esatta relazione con il potenziale chimico può essere utilizzata per determinare il valore di quest'ultimo. Alcuni strumenti d'uso comune, quali ad esempio, un termometro, un manometro, un igrometro o un pH-metro, se provvisti di un'opportuna scala di lettura, potrebbero servire allo scopo.

3. Alcuni esempi

Gli stati fisici dell'acqua

Partiamo da una semplice constatazione: in condizioni di pressione normali, l'acqua, a dipendenza dalla temperatura, può presentarsi allo stato solido, liquido o aeriforme (Fig. 6).

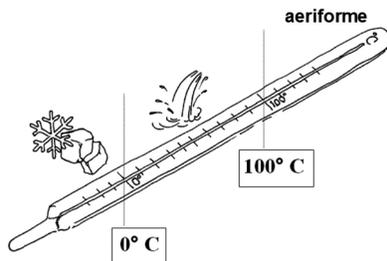


Fig. 6 - In condizioni di pressione normali, l'acqua, a dipendenza dalla temperatura, può presentarsi allo stato solido, liquido o aeriforme (disegno di G. Chiesi).

Da questi semplici fatti possiamo immediatamente dedurre che il potenziale chimico dell'acqua (al pari di quello di tutte le sostanze in generale) dipende dalla temperatura. In particolare possiamo distinguere tre differenti situazioni:

- per $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'acqua allo stato solido ha un potenziale chimico minore rispetto a quella allo stato liquido: l'acqua allo stato liquido è soggetta ad una spinta a diventare solida (ghiacciare);
- per $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'acqua allo stato solido ha un potenziale chimico uguale a quella allo stato liquido: l'acqua allo stato liquido è in equilibrio con quella solida. Questa è la temperatura normale di fusione dell'acqua;
- per $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'acqua allo stato solido ha un potenziale chimico maggiore rispetto a quella allo stato liquido: l'acqua allo stato solido è soggetta ad una spinta a fondere (diventare liquida).

Può essere utile ed istruttivo rappresentare la situazione utilizzando un grafico (Fig. 7). Come si vede, la temperatura di fusione T_{fus} corrisponde al punto di intersezione tra le rette $\mu_{\text{H}_2\text{O(s)}}(T)$ (in verde) e $\mu_{\text{H}_2\text{O(l)}}(T)$ (in blu). Riflessioni analoghe possono essere proposte per l'acqua allo stato liquido e aeriforme e per la determinazione della temperatura normale di ebollizione.

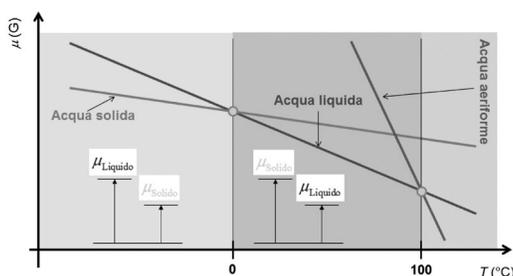


Fig. 7 - Rappresentazione grafica della dipendenza del potenziale chimico dalla temperatura per l'acqua solida (linea verde), liquida (linea blu) e gassosa (linea rossa) in condizioni di pressione normale. I punti di intersezione delle rette rappresentano le temperature normali di fusione e di ebollizione. Indicati sono anche gli intervalli di temperatura entro i quali la fase solida, liquida e gassosa mostra, di volta in volta, il potenziale chimico minore ($G = \text{J mol}^{-1}$).

Evaporazione e condensazione

Nella Fig. 8 sono riportate altre situazioni che coinvolgono altre trasformazioni dell'acqua: si tratta di fenomeni di evaporazione o di condensazione. La spinta al passaggio dallo stato liquido a quello di vapore (la "differenza di potenziale chimico") in questi casi può essere misurata con un semplice igrometro: affinché il bucato o la lavagna asciughino, l'umidità relativa dell'aria deve essere infatti inferiore al 100 %. Volendo, è possibile sostituire la scala dell'umidità relativa con una che quantifichi la differenza di potenziale chimico tra l'acqua allo stato liquido e quella allo stato di vapore nelle condizioni di temperatura e pressione parziale considerate.

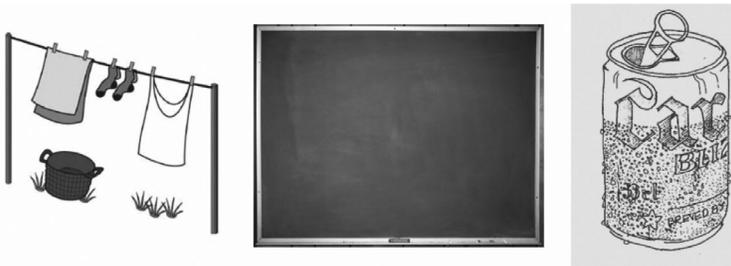


Fig. 8 - Il bucato così come la lavagna bagnati asciugano, sulle pareti di una lattina fredda compaiono goccioline d'acqua: in questi processi l'acqua è soggetta ad una spinta a passare dallo stato liquido a quello di vapore o viceversa.

Acqua e sale

È risaputo che l'aggiunta di sale all'acqua ne modifica le proprietà. In particolare si osserva che l'acqua di una soluzione di acqua e sale cristallizza, in condizioni normali di pressione, a temperature inferiori ai 0 °C, rispettivamente bolle a temperature superiori ai 100 °C. È possibile proporre una spiegazione a questi fenomeni modificando la Fig. 7 e assumendo che l'aggiunta di sale provoca un abbassamento del potenziale chimico dell'acqua liquida. La situazione è riportata nella Fig. 9. Di seguito verranno descritti alcuni semplici esperimenti che possono essere spiegati ricorrendo a questo fatto.

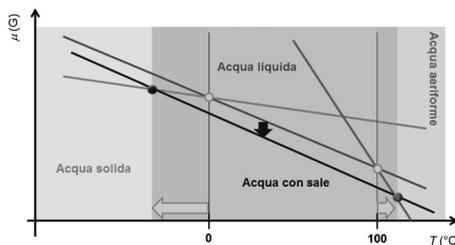


Fig. 9 - L'aggiunta di soluto *abbassa* il potenziale chimico dell'acqua liquida. Di conseguenza si ha un abbassamento della temperatura di solidificazione e un innalzamento di quella di ebollizione.

L'uovo

Per il primo esperimento è necessario disporre di un uovo fresco senza guscio in modo da avere un sistema provvisto da una membrana permeabile all'acqua. A tale scopo è sufficiente immergere per alcuni giorni un uovo in aceto¹ (Fig. 10). L'uovo, così ottenuto, viene immerso in un bicchiere contenente acqua (possibilmente deionizzata). Dopo alcune ore è possibile constatare che l'uovo ha aumentato il proprio volume. Alternativamente (o anche successivamente) l'uovo può essere immerso in acqua salata: in questo caso, sempre dopo alcune ore, possiamo osservare che il volume dell'uovo è considerevolmente diminuito.

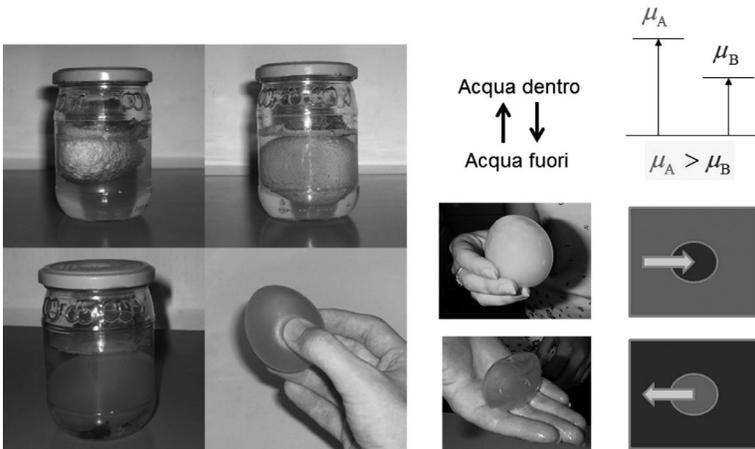


Fig. 10 - Un uovo immerso nell'aceto perde il suo guscio. Successivamente viene immerso in acqua distillata, rispettivamente in acqua salata (nella Fig. non è riportato il recipiente): dopo qualche ora si osserva un aumento, rispettivamente una diminuzione del volume dell'uovo.

Una possibile spiegazione di questi fenomeni può essere fornita pensando al potenziale chimico dell'acqua liquida e all'idea che l'acqua liquida è soggetta ad una spinta a passare da una zona dove il valore del suo potenziale chimico è alto ad una dove è più basso². Nel primo caso, la concentrazione dei soluti all'interno dell'uovo era maggiore rispetto all'esterno: l'acqua aveva una spinta ad entrare nell'uovo. Nel secondo caso, la situazione era opposta e l'acqua è stata spinta fuori dall'uovo³.

¹ Il guscio dell'uovo è formato essenzialmente da carbonato di calcio. Quest'ultimo reagisce con l'acido acetico presente nell'aceto dando acetato di calcio che risulta solubile in acqua e diossido di carbonio gassoso.

² Ovviamente, in questo caso, si assume che la membrana dell'uovo permetta solo il passaggio dell'acqua e non delle altre specie chimiche.

³ Volendo si potrebbero svolgere dei semplici esperimenti per scoprire quale debba essere la concentrazione dell'acqua salata affinché l'uovo non cambi di volume – affinché cioè il potenziale chimico dell'acqua abbia il medesimo valore dentro e fuori dell'uovo.

L'orsetto

Un altro esperimento, simile al precedente, anche se forse più appariscente, può essere svolto utilizzando delle comuni caramelline a forma di orsetto (Fig. 11). Anche in questo caso la caramellina viene immersa in un bicchiere contenente dell'acqua (possibilmente deionizzata): dopo parecchie ore si può notare un considerevole aumento del volume dell'orsetto. È poi possibile far diminuire il volume dell'orsetto immergendo lo stesso in una soluzione di acqua e sale.

Ancora una volta il fenomeno può essere modellizzato pensando al potenziale chimico dell'acqua che, all'interno dell'orsetto, in virtù dello zucchero presente, ha un valore minore rispetto a quello dell'acqua deionizzata che si trova all'esterno. Risultato: l'acqua è soggetta ad una spinta ad entrare nell'orsetto, processo accompagnato da un visibile aumento di volume dello stesso orsetto.

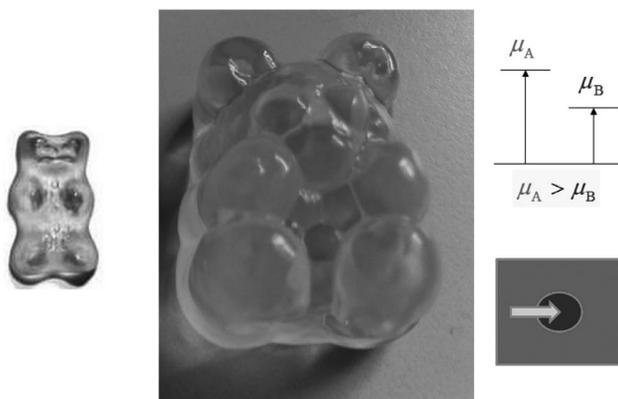


Fig. 11 - Un orsetto (immagine di sinistra) viene immerso in un bicchiere di acqua deionizzata. Dopo parecchie ore si nota che le sue dimensioni sono notevolmente aumentate (immagine centrale). Nelle immagini l'orsetto è stato tolto dall'acqua per permetterne una migliore visione.

Il cubetto di ghiaccio

In quest'ultimo esperimento vogliamo prendere in considerazione la rapidità con la quale un dato processo avviene. A tale scopo prendiamo due cubetti di ghiaccio delle medesime dimensioni e alla medesima temperatura e immergiamoli in due bicchieri contenenti volumi uguali di acqua deionizzata, rispettivamente salata, sempre alla medesima temperatura (Fig. 12). Ci aspettiamo che i due cubetti di ghiaccio fondano: infatti, nelle condizioni alle quali si svolge l'esperimento, il valore del potenziale chimico dell'acqua liquida è inferiore rispetto a quello dell'acqua solida (Fig. 7). Inoltre, poiché il valore del potenziale chimico dell'acqua liquida diminuisce in presenza di sale sciolto (Fig. 9), ci aspettiamo anche che il cubetto immerso nell'acqua salata sia soggetto ad una spinta maggiore a fondere e quindi che fonda più rapidamente.

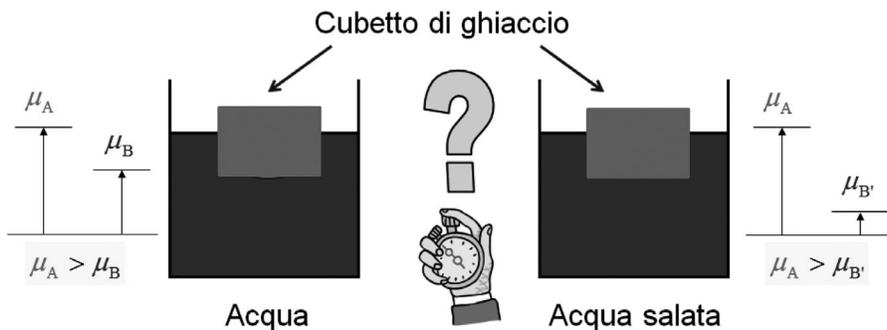


Fig. 12 - Due cubetti di ghiaccio delle medesime dimensioni vengono posti in due bicchieri contenenti volumi uguali di acqua deionizzata, rispettivamente salata, alla medesima temperatura. Si osserva che, malgrado la minore spinta, il cubetto nel bicchiere con acqua distillata fonde molto più rapidamente.

L'esperimento, però, ci dice esattamente il contrario: il cubetto di ghiaccio immerso nell'acqua deionizzata impiega molto meno tempo a fondere! Il problema è che fino a questo punto non abbiamo considerato un aspetto importante per descrivere la dinamica di un processo e cioè qualche cosa che potremmo chiamare *resistenza* alla trasformazione. Nel caso dell'acqua salata, pur essendo la spinta maggiore, anche la resistenza al processo di fusione del cubetto di ghiaccio è maggiore. L'acqua salata in definitiva impedisce il mescolamento e rallenta il processo di fusione agendo da isolante termico. Ciò può essere messo in evidenza utilizzando dei cubetti di ghiaccio colorati (per esempio con dello sciroppo) o rimestando l'acqua durante l'esperimento (Hapkiewicz, 1999).

È quindi importante sottolineare che la sola conoscenza della spinta (intesa come differenza di potenziale chimico) non ci permette di effettuare delle previsioni accurate circa la rapidità di un dato processo.

La solubilità

Lo zucchero *si* scioglie in acqua. Questo modo di dire è molto diffuso ma ostacola la possibilità di cogliere l'idea che dietro questo processo vi sia una spinta dovuta ad una differenza di potenziale chimico tra lo zucchero allo stato solido e quello in soluzione acquosa.

Può essere istruttivo considerare come varia il potenziale chimico dello zucchero in soluzione acquosa al variare della sua concentrazione. La situazione è riportata nella Fig. 13 in forma di un diagramma di potenziale.

Visivamente la situazione può essere paragonata al riempimento di un calice con dell'acqua: la forma del calice (la sua "riempibilità") determina di quanto varia il livello (potenziale) a seguito dell'aggiunta di un dato volume di liquido (quantità di zucchero). In merito val la pena evidenziare almeno i seguenti due aspetti:

- esiste un valore massimo per il potenziale chimico dello zucchero in soluzione acquosa in corrispondenza del valore del potenziale chimico dello zucchero solido. Quando questa condizione viene raggiunta, la soluzione è detta *satura*: lo zucchero non *si* scioglie più – lo zucchero non ha più una spinta a passare in soluzione;
- all’inizio, quando nell’acqua non vi è ancora zucchero, una piccola aggiunta provoca una grande variazione di potenziale (livello). Poi, in prossimità della situazione di saturazione, per ottenere una piccola variazione di livello è necessaria una grande quantità di zucchero⁴.

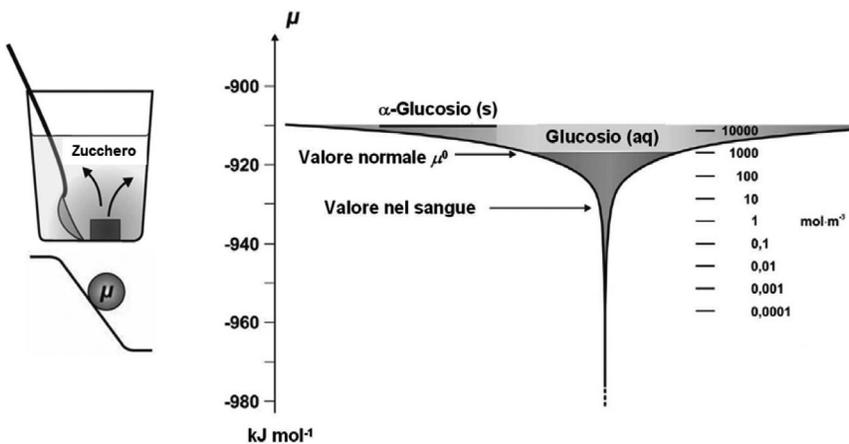


Fig. 13 - Diagramma di potenziale per lo zucchero in acqua. Esso mette in evidenza la relazione tra il valore del potenziale chimico dello zucchero in soluzione acquosa e la quantità di zucchero presente in un dato volume di soluzione. All'aumentare della concentrazione, aumenta anche il potenziale chimico fino al raggiungimento di un valore massimo in corrispondenza della situazione di saturazione: qui il potenziale chimico dello zucchero solido è uguale a quello dello zucchero in soluzione (in queste condizioni lo zucchero "non si scioglie più" - immagine tratta da D'Anna, 2011).

⁴ Questo andamento, di tipo "logaritmico", è riscontrato anche in molti altri ambiti: si pensi, ad esempio, alla sensibilità percettiva dei nostri apparati sensoriali (Plappert, 2003).

4. Combustione e fotosintesi

Da ultimo, ma non per questo per ultimo, prendiamo in considerazione due processi chimici assai noti: quello della combustione e quello della fotosintesi. Come ben si sa, il processo di combustione è spontaneo: una volta acceso, un cubetto di zucchero posto all'aria brucia⁵. La descrizione del processo tramite il potenziale chimico, potrebbe essere la seguente (Fig. 14): durante il processo, le sostanze diossigeno⁶ dell'aria e zucchero vengono distrutte, mentre le sostanze acqua e diossido di carbonio, che si trovano ad un potenziale chimico minore, vengono prodotte. La reazione, una volta avviata, "va in discesa" e non necessita di interventi esterni per poter avvenire.

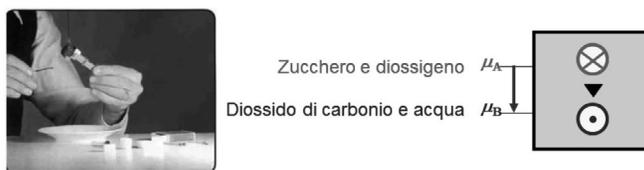


Fig. 14 - Reazione di combustione tra zucchero e diossigeno per dare acqua e diossido di carbonio e sua modellizzazione tramite il concetto di potenziale chimico. Il simbolo \otimes sta per distruzione e quello \odot per produzione.

Nel processo fotosintetico (Fig. 15) la situazione è opposta: qui abbiamo all'entrata diossido di carbonio ed acqua e all'uscita zucchero e diossigeno. In questo caso il processo "va in salita" e per essere sostenuto necessita di un intervento esterno, di qualche cosa che potremmo chiamare una "pompa chimica".

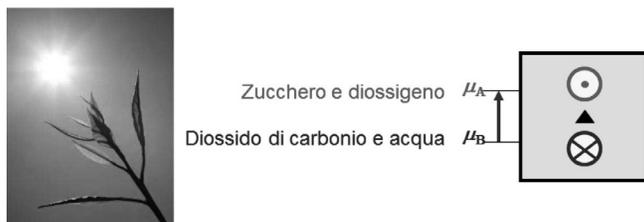


Fig. 15 - Nel processo fotosintetico, alimentato dalla luce del Sole, dal diossido di carbonio e dall'acqua si ottiene zucchero e diossigeno. Il simbolo \otimes sta per distruzione e quello \odot per produzione.

In effetti, la fotosintesi può essere vista come un processo nel quale interviene

⁵ Se si desidera svolgere l'esperimento, sarà necessario porre sullo zucchero un po' di cenere per catalizzare la reazione.

⁶ Il termine diossigeno è preferito a quello di ossigeno. Ciò permette di meglio distinguere l'elemento dalla sostanza semplice.

una pompa chimica che permette di creare una differenza di potenziale chimico grazie all'energia messa a disposizione dalla luce del Sole⁷.

5. Considerazioni conclusive

Con gli esempi precedenti si è cercato di mostrare come sia possibile introdurre il concetto di potenziale chimico quale *grandezza primaria* in maniera essenzialmente fenomenologica partendo da situazioni sperimentali semplici, alla stessa stregua di quanto avviene abitualmente con altre grandezze fisiche, quali, ad esempio, la temperatura o la massa. Per motivi di tempo la trattazione è stata limitata. Val forse però la pena sottolineare che il concetto di potenziale chimico gioca un ruolo centrale in moltissimi altri ambiti (Fig. 16) e può essere oggetto di approfondimenti successivi lungo tutto l'arco della scolarità, dalla scuola primaria fino... all'università.

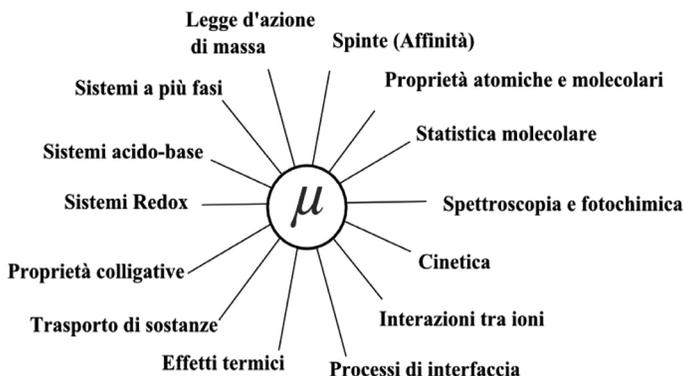


Fig. 16 - Il concetto di potenziale chimico μ è centrale per rapporto a svariati ambiti oggetto di studio nelle discipline chimiche, fisiche e biologiche (Job, 1991).

È anche interessante notare che, per ragioni essenzialmente di carattere storico (Herrmann, 2002), il concetto di potenziale chimico non viene purtroppo esplicitamente utilizzato nelle proposte didattiche attualmente in vigore, anche se, come illustrato nel caso dell'igrometro, le occasioni non mancherebbero. L'introduzione di questo potente strumento, se da un lato potrebbe semplificare la descrizione dei processi che vedono coinvolte trasformazioni e trasporti di sostanze, dall'altro richiede una rivisitazione delle attuali pratiche didattiche, aspetto, quest'ultimo, che, a volte, può essere fonte di incomprensioni e che deve essere gestito con la dovuta sensibilità per evitare sterili conflitti. Il lettore interessato ad approfondire il concetto di potenziale chimico potrà trovare ulteriori informazioni sul sito della Job-Stiftung (<http://www.job-stiftung.de>) o nelle recenti pubblicazioni di G. Job e R. Ruffeler (Job, 2010), di M.

⁷ Volendo andare oltre, potrebbe essere interessante guardare al fenomeno Vita in termini di "dispositivi atti a gestire differenze".

D'Anna, G. Laffranchi e P. Lubini (D'Anna, 2011) e di H.U. Fuchs (Fuchs, 2010).

6. Bibliografia

- D'Anna, M., Laffranchi, G. e Lubini, P. (in press). *Strumenti per l'insegnamento interdisciplinare della termodinamica nelle scienze sperimentali – Volume I – Il quadro concettuale*.
- De Saint-Exupéry, A. (1984). *Il piccolo principe*. XI Edizione. Milano, Bompiani.
- Fuchs, H. U. (2010). *The Dynamics of Heat: A Unified Approach to Thermodynamics and Heat Transfer*. 2nd Edition. New York, Springer.
- Hapkiewicz, A. (1999). Authentic research within the grasp of high school students. *J. Chem. Educ.* 76 (9), 1212-1215.
- Herrmann, F. e Job, G. (2002). *Altlasten der Physik*. Aulis, Köln.
- Job, G. (1991). *Thermodynamik im Unterricht: Chemisches Potential von Anfang an*. http://www.job-stiftung.de/pdf/artikel/Taormina_060329.pdf
- Job, G. e Ruffeler, R. (2010). *Physikalische Chemie – Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten*. Vieweg + Teubner, Stuttgart.
- Plappert, J. (2003). *“Unsere Sinne logarithmieren” zur Mathematik der Sinneswahrnehmung*. <http://www.plappert-freiburg.de/physik/Math-Kolloquiumn.PDF>