

# Il potenziale chimico: potenzialità didattiche di una grandezza poco conosciuta ma di grande attualità

MICHELE D'ANNA,  
URS KOCHER,  
PAOLO LUBINI,  
SILVANO SCIARINI\*

## Riassunto

L'esplicito utilizzo del concetto di potenziale chimico ( $\mu$ ) permette di descrivere in maniera più coerente, sistemica e sistematica i fenomeni che coinvolgono trasformazioni di sostanze senza dover ricorrere esplicitamente ai concetti di energia e di entropia. 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 in termini di spinte, correnti e resistenze.

## Abstract

The explicit use of the concept of chemical potential allows to describe the phenomena related to the transformations of substances at a first and phenomenological level, as well as in a coherent, systemic, and systematic way without the need of the concepts of energy and entropy. Additionally, such an approach offers the opportunity to exploit the analogies with other branches of the natural sciences, such as hydraulics, thermodynamics, or electricity, in terms of driving forces, currents, and resistances.

Uno degli obiettivi principali dell'insegnamento delle scienze naturali dovrebbe essere quello di dotare gli studenti, e quindi i futuri cittadini, di strumenti che permettano loro di guardare con consapevolezza e spirito critico al mondo naturale cui intimamente appartengono.

Di fronte allo sterminato pluralismo dei fenomeni naturali l'uomo ha da sempre cercato di trovare una spiegazione coerente da condividere socialmente e, a tale scopo, ha proposto teorie di vario genere che hanno avuto più o meno fortuna e che si sono evolute negli anni, non sempre in modo indolore, grazie ad una continua dialettica tra mondo empirico, mondo sociale e mondo formale.

Se pensiamo alla Chimica, questa necessità di trovare degli organizzatori cognitivi [1] [2] a fronte di una mole non indifferente di dati sperimentali, risulta essere particolarmente sentita [3] e ha trovato parziale coronamento e sintesi nella formulazione della teoria particellare della materia e, nella seconda metà del XIX° secolo, nella proposta del sistema periodico degli elementi. Questi due

risultati, che permettono una descrizione estremamente coerente della materia a livello di composizione e di struttura [4], hanno ormai trovato diritto di cittadinanza in tutti i corsi di Chimica, e nessuno, allo stato attuale delle conoscenze, osa metterli in discussione. La Chimica, infatti, è spesso associata alle formule chimiche e ai simboli degli elementi: *chi non conosce la famosa formula della sostanza che al mondo trovasi più in abbondanza*<sup>1</sup>, o non ha mai sentito parlare di Mendeleev e del suo sistema periodico?

Vi sono però, almeno stando ai manuali scolastici attualmente in uso, altri aspetti relativi alla varietà dei fenomeni chimici che faticano a trovare una loro descrizione coerente, facilmente accessibile e convincente. Se consideriamo, ad esempio, un legno che brucia, del ghiaccio che fonde, una ringhiera che arrugginisce o del profumo che diffonde in un locale e cerchiamo, sempre nei libri di testo, un singolo modello che permetta di render conto dei motivi del verificarsi di questi fenomeni, nella quasi totalità dei casi ci imbattemmo nel secondo principio della termodinamica, nei concetti di energia (spesso semplicisticamente definita come "capacità di compiere lavoro") e di entropia (quasi sempre associata ad un non meglio definito "disordine molecolare"). Molto diffuse sono anche le trattazioni incentrate sull'energia libera  $G$  e sulla relazione  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ : in tale contesto si afferma che una trasformazione è spontanea quando l'energia libera del sistema diminuisce ( $\Delta G$  è cioè negativo) [5]. In sostanza la spiegazione del perché accade ciò che accade è condensata nell'affermazione che ogni trasformazione spontanea implica un aumento dell'entropia dell'universo [6] [7].

Di seguito vorremmo mostrare come, utilizzando il concetto di potenziale chimico, sia possibile dotarsi di uno strumento in grado di render conto del perché alcuni fenomeni chimici accadono ed altri no, senza dover necessariamente ricorrere ai concetti di energia e di entropia [8] [9] [10] [11] [12].

## Il potenziale chimico

Il concetto di potenziale chimico  $\mu_i$ , per una sostanza pura, introdotto da W. Gibbs alla fine del XIX° secolo, è generalmente presentato nei libri di termodinamica [13] [14] [15] [16] come la derivata parziale dell'energia libera ( $G$ ) rispetto alla quantità di sostanza a pressione e temperatura costanti e come tale ha la dimensione di  $J mol^{-1}$ :

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{p, T, n_j}$$

È soprattutto a tale definizione, benché sicuramente rigorosa da un punto di vista formale, che il concetto di potenziale chimico deve la sua fama di grandezza difficile,

12 \*Alta Scuola Pedagogica, Piazza San Francesco 19, CH-6600 Locarno

michele.danna@aspti.ch; paolo.lubini@aspti.ch;  
urs.kocher@aspti.ch; silvano.sciarini@aspti.ch;

<sup>1</sup> Si veda il simpatico testo di Achille Cavaliere, *Chimica in versi, in rime distillate per chi a scuola fra atomi e elementi studiò la chimica con pianti e con lamenti*, Mursia, Milano 1989 (prima edizione 1926).

misteriosa e improponibile in un corso di chimica per principianti. Come sarà illustrato di seguito, è tuttavia possibile utilizzare il concetto di potenziale chimico senza dover conoscere nel dettaglio le argomentazioni termodinamiche che hanno portato alla sua definizione. D'altra parte la quasi totalità delle persone è in grado di utilizzare un calcolatore elettronico, un televisore o un telefonino pur essendo completamente ignara dei principi elettrotecnici che ne permettono il funzionamento. Si noti inoltre come a nessun insegnante passerebbe per la testa, in un corso introduttivo, di proporre e utilizzare, ad esempio, il concetto di temperatura quale derivata parziale dell'energia interna ( $U$ ) rispetto all'entropia a volume e quantità di sostanza costanti:

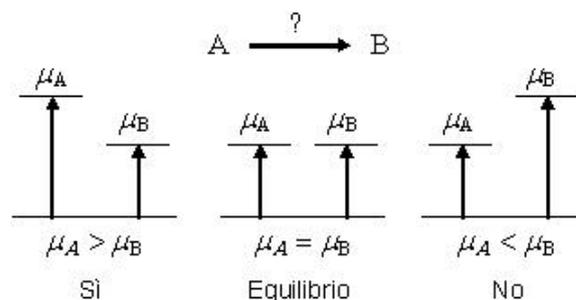
$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V,n}$$

Benché tale definizione sia ineccepibile da un punto di vista formale, essa non permette di cogliere gli aspetti fenomenologici più immediati, operativi e direttamente accessibili del concetto di temperatura. Di fatto, però, la temperatura è considerata una grandezza fondamentale e irrinunciabile per una descrizione coerente dei fenomeni termici e come tale è introdotta sin dall'inizio.

### Potenziale chimico e spinta per una trasformazione

Così come una differenza di temperatura è considerata la spinta che fa fluire calore (entropia) tra due corpi, oppure così come una differenza di potenziale elettrico può essere considerata come la spinta che fa scorrere una corrente elettrica in un circuito, allo stesso modo, per analogia, una differenza di potenziale chimico può essere considerata come la spinta per un cambiamento chimico-fisico. Detto in altri termini, per stabilire se il passaggio di un determinato sistema da una situazione A ad una situazione B avvenga o meno in modo spontaneo<sup>2</sup>, basta confrontare il potenziale chimico della situazione iniziale con quello della situazione finale: se il potenziale chimico  $\mu$  diminuisce, allora la trasformazione sarà possibile, se  $\mu$  rimane uguale, si

avrà una situazione di equilibrio chimico, mentre se  $\mu$  aumenta, la trasformazione, così come descritta, non potrà avvenire spontaneamente (figura 1). In quest'ultimo caso, per permettere alla trasformazione di avvenire sarà necessario ricorrere ad un intervento esterno: a qualche cosa che potremmo chiamare una "pompa chimica"<sup>3</sup>.



**Figura 1.** Per stabilire se una trasformazione da A a B possa o meno avvenire spontaneamente basta confrontare i rispettivi potenziali chimici. Nel caso in cui le situazioni A e B sono caratterizzate dal medesimo valore del potenziale chimico si ha uno stato di equilibrio chimico.

L'applicazione di questo semplice criterio permette di rispondere assai velocemente a domande del tipo: determinate sostanze reagiranno chimicamente tra di loro? Quale stato di aggregazione assumerà una data sostanza in determinate condizioni di temperatura e pressione? Che tendenza avrà una certa sostanza a diffondere in certo ambiente? L'idea di una spinta (intesa come differenza di potenziale) quale "motore" per un cambiamento è un potente strumento di analisi<sup>4</sup> per la razionalizzazione dei fenomeni naturali<sup>5</sup>: 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 una corrente di calore (entropia), in idraulica abbiamo una differenza di pressione quale spinta per una corrente di un volume di acqua. Queste analogie sono evidenziate nella tabella 1.

**Tabella 1** - Uno sguardo d'assieme: per ciascun ambito vengono indicate di volta in volta le spinte (differenze tra potenziali) e le rispettive correnti. Il termine  $I_x$  rappresenta l'intensità del flusso che descrive lo scambio della rispettiva grandezza estensiva (carica elettrica, entropia, volume d'acqua) tra l'interno del sistema considerato e l'ambiente circostante. Per il concetto di corrente chimica, si veda il testo.

Spinta			Corrente	
Chimica	Differenza di potenziale chimico	$\Delta\mu_{\text{Reazione}}$	Corrente chimica	$I_{n(\text{Reazione})}$
Elettricità	Differenza di potenziale elettrico	$\Delta\phi$	Corrente elettrica	$I_Q$
Termologia	Differenza di potenziale termico	$\Delta T$	Corrente di entropia	$I_S$
Idraulica	Differenza di pressione	$\Delta P$	Corrente d'acqua	$I_V$

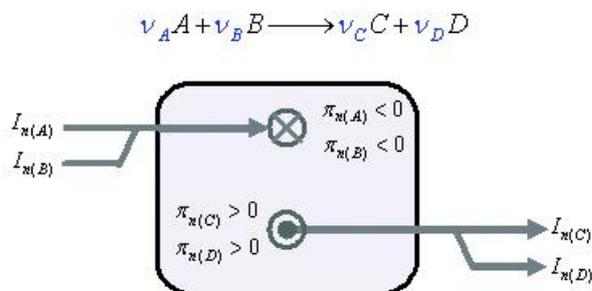
<sup>2</sup> Questo criterio, in realtà, è valido unicamente quando la trasformazione avviene per via "puramente chimica", ossia senza interventi di altri tipi di spinta. In questi casi per determinare la direzione della trasformazione sarà necessario tenere in considerazione l'insieme delle varie spinte coinvolte.

<sup>3</sup> Si pensi ad esempio ai processi di elettrolisi oppure, nei sistemi biologici, a quelli relativi all'anabolismo e alla fotosintesi. La descrizione di queste "pompe di reazione" sarà oggetto di una prossima pubblicazione. Sempre per analogia, si noti che per far fluire del calore da un corpo freddo ad uno caldo si utilizza una "pompa di calore", così come per far fluire dell'acqua da una zona a bassa pressione ad una ad alta pressione abbiamo bisogno di una "pompa d'acqua".

<sup>4</sup> Un altro potente strumento di analisi è quello della ricerca degli invarianti, cioè di ciò che non cambia in una trasformazione (gli elementi sono, ad esempio, gli invarianti delle reazioni chimiche). Si noti anche che il concetto di invariante è alla base di numerose classificazioni.

<sup>5</sup> Molto spesso il ruolo di "motore" per un cambiamento è attribuito all'energia. L'energia tuttavia entra in gioco solo quale principio regolatore: la sua proprietà di essere una grandezza estensiva e conservata, cioè di essere un invariante, fissa i limiti per le variazioni delle altre grandezze estensive. A fungere da spinta per le correnti di energia e le altre grandezze estensive coinvolte sono invece le varie differenze di potenziale (termico, chimico, elettrico o idraulico, ad esempio).

Qualche parola di commento merita il concetto di corrente chimica ( $I_{n(\text{Reazione})}$ ): per illustrarne il significato consideriamo un esempio semplificato, ossia quello di una reazione che avviene a regime stazionario. In questa situazione la relazione di bilancio completa che lega per le varie sostanze le variazioni temporali ( $\frac{dn_i}{dt}$ ) delle quantità  $n_i$ , l'intensità ( $I_{n(i)}$ ) degli scambi con l'ambiente circostante e il tasso di produzione/distruzione ( $\pi_{n(i)}$ ) si riduce alla formula  $I_{n(i)} + \pi_{n(i)} = 0$ <sup>6</sup>. Ciò permette di riconoscere che in questa situazione il tasso di trasformazione chimica della reazione può essere determinato direttamente misurando le correnti chimiche delle rispettive sostanze in entrata ed in uscita dal "reattore chimico". Nelle figura 2 viene riportata una descrizione schematica di un tale reattore nel caso di un'ipotetica reazione.



**Figura 2.** Schema di una reazione chimica a regime stazionario. I reagenti vengono continuamente introdotti nel reattore ove scompaiono nel corso della reazione chimica, mentre i prodotti della reazione ne vengono allontanati [17].

I tassi di produzione ( $\pi_{n(i)} > 0$ ) e di distruzione ( $\pi_{n(i)} < 0$ ) delle varie sostanze coinvolte sono rigorosamente accoppiati tra loro dai rispettivi coefficienti stechiometrici ( $v_i$ ) che compaiono nell'equazione chimica bilanciata. Ciò permette di descrivere con un'unica grandezza il grado di avanzamento di una reazione chimica all'interno del reattore. Tale grandezza viene generalmente chiamata *grado di avanzamento della reazione*  $\xi$  [18] ed è espressa in moli<sup>7</sup>; essa permette di definire l'intensità della corrente chimica di reazione  $I_{n(\text{Reazione})}$  (in seguito indicata semplicemente come corrente chimica) attraverso la relazione:

$$I_{n(\text{Reazione})} = \frac{d\xi}{dt} = \frac{|I_{n(A)}|}{|v_A|} = \frac{|I_{n(B)}|}{|v_B|} = \frac{|I_{n(C)}|}{|v_C|} = \frac{|I_{n(D)}|}{|v_D|}$$

La corrente chimica di reazione  $I_{n(\text{Reazione})}$  (rispettivamente, nell'esempio scelto, il tasso di trasformazione della reazione chimica) corrisponde così alla variazione di  $\xi$  in funzione del tempo (Figura 3).

### I valori del potenziale chimico per le sostanze semplici

Così come la temperatura di ebollizione, la densità, la capacità termica, la massa molare e molte altre proprietà delle varie sostanze possono essere determinate sperimentalmente e sono raccolte in apposite tabelle, allo stesso modo anche i valori del potenziale chimico delle varie sostanze sono stati misurati e tabulati. Per avvicinarci al concetto di potenziale chimico<sup>8</sup>, consideriamo i valori relativi ad alcune sostanze semplici riportati nella tabella 2<sup>9</sup>.

Poiché durante le trasformazioni chimiche, che avvengono in condizioni abituali, il numero degli atomi dei singoli elementi viene conservato, per la determinazione dei potenziali chimici si dispone di tanti gradi di libertà quanti

sono gli elementi chimici<sup>10</sup>. Così, per convenzione, si è deciso di assegnare il valore di 0 kJ mol<sup>-1</sup> alla sostanza semplice del rispettivo elemento nella forma allotropica più stabile alla temperatura di 298 K e alla pressione di 101 kPa. Il grado di libertà messo a disposizione dall'elemento Carbonio<sup>11</sup>, ad esempio, viene utilizzato assegnando il valore del potenziale chimico di 0 kJ mol<sup>-1</sup> alla grafite. Il diamante, un'altra forma allotropica del Carbonio, ha per

<sup>10</sup> Generalmente infatti, per le grandezze *non conservate*, il potenziale associato ha carattere *assoluto* (si veda ad esempio il caso termico in cui compare la temperatura assoluta). Di per sé anche la quantità di sostanza,  $n$ , non è una grandezza conservata e quindi sarebbe lecito aspettarsi che i valori di  $\mu$  debbano riferirsi ad uno specifico zero assoluto. Tuttavia è proprio l'invarianza degli elementi e del numero dei rispettivi atomi durante le trasformazioni chimiche che permette l'adozione arbitraria di uno zero di riferimento per ciascun elemento.

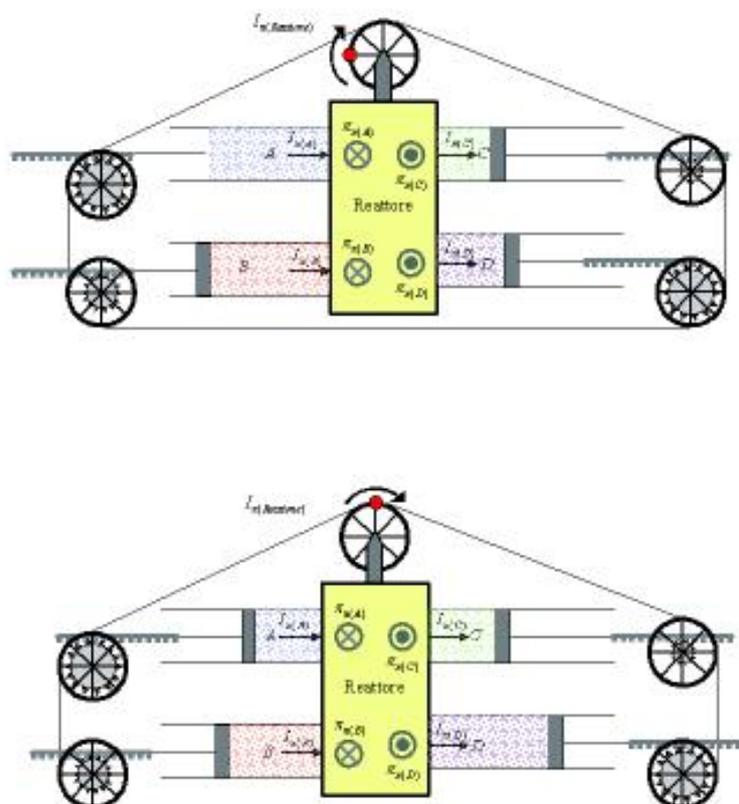
<sup>11</sup> Purtroppo il linguaggio dei chimici in questo contesto è assai carente ed ambiguo: l'elemento e la rispettiva sostanza semplice vengono quasi sempre designati con lo stesso nome (si pensi ad esempio alle tavole periodiche ove le proprietà dell'elemento sono elencate, senza alcuna distinzione, assieme a quelle riferite alla rispettiva sostanza semplice nello stato allotropico più stabile nelle condizioni standard)! Questo fatto, da un punto di vista didattico, rappresenta un grosso problema poiché può ingenerare negli studenti non poche confusioni. È interessante notare come già nel 1898 Mendeleev aveva esplicitamente sollevato a più riprese la questione [24].

<sup>6</sup> Una discussione più dettagliata dell'equazione di bilancio e del suo utilizzo nella descrizione dei fenomeni naturali sarà oggetto di una prossima pubblicazione.

<sup>7</sup> La descrizione dei problemi stechiometrici per mezzo del grado di avanzamento della reazione  $\xi$  offre parecchi vantaggi nella trattazione di quesiti relativi al raggiungimento di equilibri chimici [19].

<sup>8</sup> Nel presente articolo non affronteremo il tema riguardante le procedure per la determinazione sperimentale dei potenziali chimici. Il lettore interessato potrà in ogni caso ottenere indicazioni in merito negli articoli di G. Job citati nella bibliografia [21] [22].

<sup>9</sup> Alcune tabelle dei potenziali chimici sono reperibili sul sito web della Job-Stiftung [23].



**Figura 3.** Analogia meccanica per illustrare il concetto di corrente chimica  $I_{n(Reazione)}$  e l'intimo grado di accoppiamento, espresso dai coefficienti stechiometrici, tra i vari tassi di distruzione ( $\pi_{n(A)}$ ,  $\pi_{n(B)}$ ) e di produzione ( $\pi_{n(C)}$ ,  $\pi_{n(D)}$ ) delle sostanze coinvolte in una reazione chimica. Gli ingranaggi di diverso raggio corrispondono a differenti coefficienti stechiometrici [20]. I due disegni ritraggono due momenti successivi del grado di avanzamento della reazione.

**Tabella 2** - Confronto tra i potenziali chimici di alcune sostanze semplici<sup>12</sup>. I valori si riferiscono alle rispettive sostanze pure alla temperatura di 298 K e alla pressione di 101 kPa. I dati corrispondono ai valori dell'energia libera molare di formazione ( $\Delta G_f^0$ ) riportati nelle abituali tabelle termodinamiche.

Elemento	Sostanza semplice	Formula chimica	$\mu$ [kJ mol <sup>-1</sup> ]
Carbonio	Diamante	C	+3
	Grafite	C	0
Iodio	Diiodio (solido)	I <sub>2</sub>	0
	Diiodio (liquido)	I <sub>2</sub>	+3
	Diiodio (gassoso)	I <sub>2</sub>	+19
Ossigeno	Ossigeno monoatomico	O	+232
	Diossigeno	O <sub>2</sub>	0
	Ozono	O <sub>3</sub>	+163

<sup>12</sup> Si noti che anche per i valori delle densità, delle temperature di ebollizione, ecc. i dati riportati nelle varie tabelle si riferiscono sempre a determinate condizioni sperimentali.

contro un potenziale chimico di  $+3 \text{ kJ mol}^{-1}$ : da ciò si può immediatamente dedurre che il diamante tenderà a trasformarsi spontaneamente in grafite. Osservazioni analoghe valgono anche per l'elemento Ossigeno: il potenziale di  $0 \text{ kJ mol}^{-1}$  viene assegnato alla sostanza semplice diossigeno ( $\text{O}_2$ ) poiché risulta essere la più stabile nelle condizioni di temperatura e pressione considerate. Anche qui si noti come sia l'ossigeno monoatomico che l'ozono tendono, nelle condizioni di pressione e temperatura considerate, a trasformarsi in diossigeno. Interessante anche, a titolo esemplificativo, il caso dello Iodio: qui il potenziale chimico permette di stabilire in quale stato di aggregazione la sostanza semplice diiodio ( $\text{I}_2$ ) si presenterà nelle condizioni di riferimento. In conclusione possiamo affermare che la modificazione con il potenziale chimico minore risulta essere la più stabile nelle condizioni di temperatura e pressione indicate.

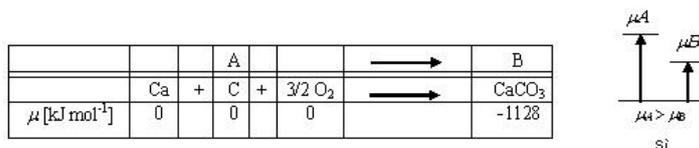
**I valori del potenziale chimico per le sostanze composte**

Altre considerazioni di carattere generale possono essere ricavate considerando i potenziali chimici di alcune sostanze composte riportati nella tabella 3.

**Tabella 3** - Potenziali chimici di alcune sostanze composte comuni. I valori si riferiscono alle rispettive sostanze pure, alla temperatura di 298 K e alla pressione di 101 kPa.

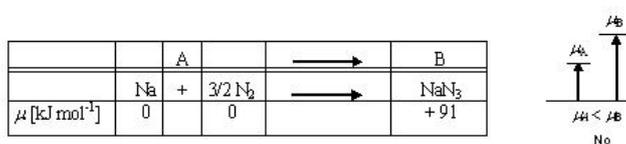
Sostanza composta	Formula chimica	$\mu$ [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ]
Carbonato di calcio	$\text{CaCO}_3$	-1128
Quarzo	$\text{SiO}_2$	-805
Sale	$\text{NaCl}$	-384
Saccarosio	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	-1544
Glucosio	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	-2743
Alcool	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	-175
Acqua	$\text{H}_2\text{O}$	-237
Diossido di carbonio	$\text{CO}_2$	-394
Acetilene	$\text{C}_2\text{H}_2$	+209
Azoturo di sodio	$\text{NaN}_3$	+91

La stragrande maggioranza delle sostanze composte ha un potenziale chimico negativo. Ciò significa che queste sostanze composte, nelle condizioni di temperatura e pressione indicate, non mostrano alcuna tendenza a decomporsi nelle rispettive sostanze semplici degli elementi che le compongono: acqua, sale, carbonato di calcio e quarzo, come ben si sa, possono essere tranquillamente conservati in un barattolo chiuso (figura 4).



**Figura 4.** Un valore **negativo** del potenziale chimico indica che la sostanza composta può essere prodotta partendo dalle sostanze semplici degli elementi che la compongono, rispettivamente che la sostanza composta non mostra alcuna tendenza a scomporsi spontaneamente nelle sostanze semplici degli elementi che la compongono.

Altre sostanze composte, invece, denotano un potenziale chimico positivo. Ciò significa che queste sostanze composte tendono a decomporsi nelle sostanze semplici dei rispettivi elementi di cui esse sono costituite. A questa classe di sostanze composte appartiene ad esempio l'azoturo di sodio, sostanza che, tra l'altro, trova interessanti applicazioni tecniche nei dispositivi di air-bag [25] (figura 5).



**Figura 5.** Un valore **negativo** del potenziale chimico indica che la sostanza composta può essere prodotta partendo dalle sostanze semplici degli elementi che la compongono senza un intervento esterno, rispettivamente che la sostanza composta mostra una tendenza a decomporsi nelle sostanze semplici degli elementi che la compongono.



Una descrizione delle trasformazioni chimiche incentrata sui concetti di corrente (intesa come tasso di trasformazione di sostanze), di spinta (dovuta ad una differenza di potenziale chimico) e di resistenza permette di cogliere a livello strutturale numerose analogie con altri campi di studio dei fenomeni naturali che nella trattazione classica possono sembrare, almeno agli occhi degli studenti, molto discosti gli uni dagli altri (figura 8).

$$\begin{array}{c}
 \text{Intensità di corrente} \longrightarrow I_{n(\text{Reazione})} = \frac{|\Delta\mu|}{R_{\text{chimica}}} \longleftarrow \begin{array}{l} \text{Spinta} \\ \text{Resistenza} \end{array} \\
 \\
 I_{\text{el}} = \frac{|\Delta\varphi|}{R_{\text{elettrica}}} \qquad I_{\text{S}} = \frac{|\Delta T|}{R_{\text{termica}}} \qquad I_{\text{V}} = \frac{|\Delta P|}{R_{\text{idraulica}}}
 \end{array}$$

**Figura 8.** Relazione tra i concetti di (intensità di) corrente, spinta e resistenza. Si noti l'analogia con l'elettricità (corrente elettrica  $I_{\text{el}}$ , tensione elettrica  $\Delta\varphi$  e resistenza elettrica  $R_{\text{elettrica}}$ ), la termologia (corrente di entropia  $I_{\text{S}}$ , differenza di temperatura  $\Delta T$  e resistenza termica  $R_{\text{termica}}$ ) e l'idraulica (corrente di liquido  $I_{\text{V}}$ , differenza di pressione  $\Delta P$  e resistenza idraulica  $R_{\text{idraulica}}$ ).

### Conclusioni

L'esplicito utilizzo del concetto di potenziale chimico permette di descrivere in maniera più coerente, sistemica e sistematica i fenomeni che coinvolgono trasformazioni di sostanze senza dover ricorrere esplicitamente ai concetti di energia e di entropia. Esso offre inoltre la possibilità di cogliere parecchie analogie a livello strutturale con altri campi delle scienze naturali.

Nel presente articolo, per ovvie ragioni di spazio, non si è potuto descrivere la dipendenza del potenziale chimico dalla temperatura, dalla pressione e dalla concentrazione di una sostanza. Questo tema, che nelle nostre intenzioni sarà oggetto di prossime pubblicazioni, permette di considerare, ad esempio, tutto il capitolo relativo all'equilibrio chimico sotto un'ottica nuova per rapporto alla trattazione abituale. Ad esempio vale forse la pena accennare al fatto che il valore di pH, a meno di un fattore costante, corrisponde al potenziale chimico dello ione  $\text{H}^+$ . Il potenziale chimico risulta quindi essere una grandezza centrale e trasversale a tutta la Chimica e più in generale a tutti i campi di studio confrontati con trasformazioni di sostanze. Rifacendoci al gioco delle analogie, rinunciare all'utilizzo del potenziale chimico nella presentazione della Chimica è come voler parlare di termologia senza servirsi del concetto di temperatura, oppure disquisire di elettricità senza accennare al potenziale elettrico, oppure ancora discutere di idraulica senza considerare la pressione...

### Ringraziamenti

Si ringrazia il Prof. Dr. A. Togni dell'ETH di Zurigo per la preziosa disponibilità dimostrata nella lettura e nella discussione del manoscritto.

### Bibliografia

[1] Per quanto riguarda il Canton Ticino da ricordare il documento *L'energia nel corso di base delle scienze sperimentali del liceo: riflessioni e proposte* elaborato nella primavera 2003 dall'apposito Gruppo per il coordinamento degli insegnamenti di biologia, chimica e fisica e approvato dall'UIMS/DECS. I documenti possono essere ottenuti ai seguenti indirizzi web: <http://www.gesn.ch/TD/0/organizzatori%20cognitivi%20IV-03.pdf> e <http://www.gesn.ch/TD/0/energia%20IV-03.pdf> (maggio 2005)

[2] Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V., *Naturwissenschaften besser verstehen, Lernhindernisse vermeiden – Anregung zum gemeinsamen Nutzen von Begriffen und Sprechweisen in Biologie, Chemie und Physik (Sekundarbereich I)*, Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU), inserto speciale Aprile 2004

[3] G. Bachelard, *Le pluralisme cohérent de la Chimie moderne*, Vrin, Paris, 2003

[4] W.B. Jensen, *J. Chem. Educ.*, 1998, **75**, 679-687

[5] J.E. Brady, J.R. Holum, *Chimica*, Zanichelli, Bologna, 1996, pp. 366-370

[6] F. Rouquerol, M. Laffitte, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1988, **704**, 559-565

[7] T.H. Bindel, *J. Chem. Educ.*, 2004, **81**, 1585-1594

[8] G. Job, *Chemische Reaktionen physikalisch beschrieben*, in G. Falk und F. Herrmann, *Konzepte eines zeitgemässen Physikunterrichts – Heft 4 – Reaktionen in Physik, Chemie und Biologie*, Schroedel, Hannover, 1981, pp. 14-31

[9] G. Job, *Das chemische Potential im Physik- und Chemie-Elementarunterricht*, in G. Falk und F. Herrmann, *Konzepte eines zeitgemässen Physikunterrichts – Heft 2 – Teil 2: Das Grössenpaar Menge und chemisches Potential*, Schroedel, Hannover, 1978, pp. 67-78

[10] F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs – Sek. I – Teil 3 – Reaktionen Wellen Atomen*, Aulis, Köln, 1995, pp. 9-25, (una traduzione in italiano è reperibile sul sito <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/> (maggio 2005))

F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs – Sek. II – Teil 2 – Thermodynamik*, Aulis, Köln, 2000

[11] S.J. Gill, *J. Chem. Educ.*, 1962, **39**, 506-510

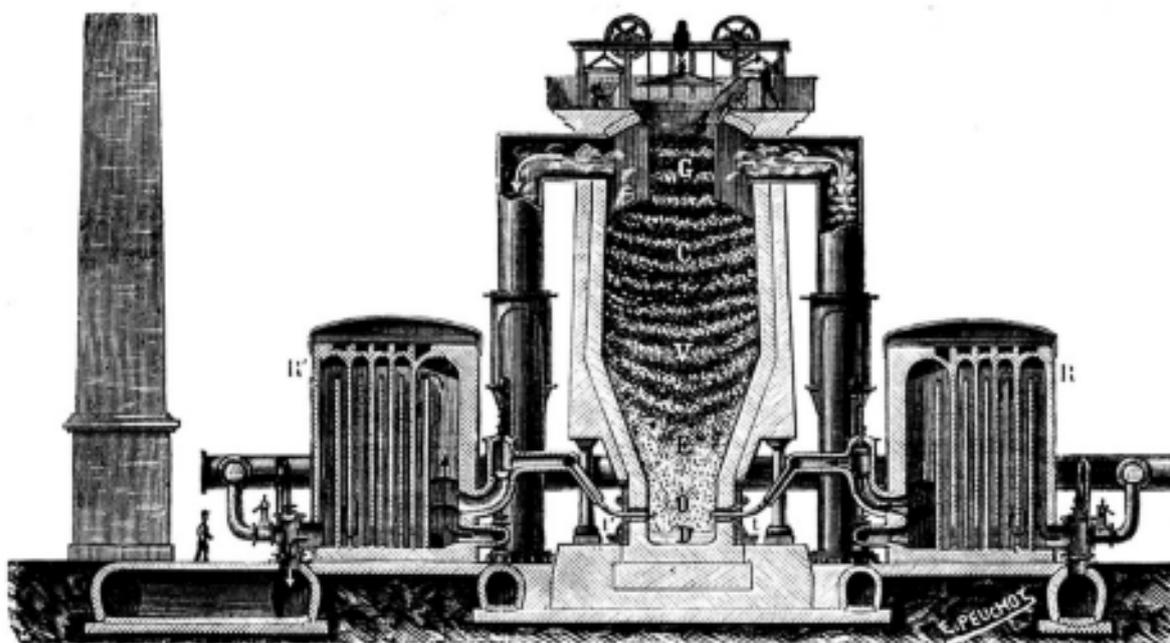
[12] H.U. Fuchs, *The Dynamics of Heat*, Springer, New York, 1996, capitolo 4

[13] P.W. Atkins, J. De Paula, *Chimica Fisica*, Zanichelli, Bologna, 2004

[14] K. Denbigh, *Prinzipien des chemischen Gleichgewichts*, Steinkopff, Darmstadt, 1974

[15] D.A. McQuarrie, J.D. Simon, *Chimica fisica – Un approccio molecolare*, Zanichelli, Bologna, 2002

- [16] R. Chang, *Physical Chemistry for the Chemical and the Biological Sciences*, University Science Books, Sausalito, 2000
- [17] T. Borer et al., *Physik – Ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II*, Sauerländer, Aarau, 2000, p.72
- [18] D.A. McQuarrie, J.D. Simon, *Chimica fisica – Un approccio molecolare*, Zanichelli, Bologna, 2002, p. 883
- [19] P.S. Matsumoto, *J. Chem. Educ.*, 2005, **82**, 406-407
- [20] N. Hauf, *Corso di Chimica liceale* (manoscritto in pubblicazione, postumo), Karlsruhe
- [21] G. Job, *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 2004, **57/4**, 223-230
- [22] G. Job, *Die Werte des chemischen Potentials*, in G. Falk und F. Herrmann, *Konzepte eines zeitgemässen Physikunterrichts – Heft 4 – Reaktionen in Physik, Chemie und Biologie*, Schroedel, Hannover, 1981, pp. 95-110
- [23] Una raccolta di potenziali chimici può essere reperita sul sito [www.job-stiftung.de](http://www.job-stiftung.de): [http://www.job-stiftung.de/pdf/datensammlung/chem\\_pot.pdf](http://www.job-stiftung.de/pdf/datensammlung/chem_pot.pdf) (aprile 2006)
- [24] D.I. Mendeleev, *Il sistema periodico degli elementi – a cura di Silvano Tagliabue*, Edizioni Teknos, Roma, 1994, pp. 131-133
- [25] A. Madlung, *J. Chem. Educ.*, 1996, **73**, 347-348
- [26] G. Bertini, P. Danise, E. Franchini, *Scienze per temi e moduli*, Mursia, Milano, 2000, p. 301
- [27] G. Job, *Reaktionen in der Biologie*, in G. Falk und F. Herrmann, *Konzepte eines zeitgemässen Physikunterrichts – Heft 4 – Reaktionen in Physik, Chemie und Biologie*, Schroedel, Hannover, 1981, pp. 84-94
- [28] F. Herrmann, *Der Karlsruher Physikkurs – Teil 3 – Reaktionen Wellen Atomen*, Aulis, Köln, 1995, p. 18



Haut fourneau.