

SI PUO' PARTIRE DALL'ESPERIMENTO PER ARRIVARE AI PRINCIPI ?

*OVVERO*

E' POSSIBILE UN APPROCCIO "PRATICO" ALLA CHIMICA SENZA  
L'USO MASSICCIO DI UN VERO LABORATORIO ?

IL CASO DEI CONCETTI DI ENERGIA, CALORE E TEMPERATURA NELLE  
TRASFORMAZIONI (REAZIONI, TRANSIZIONI DI FASE, ETC.)

## INTRODUZIONE

Tutte le scienze possono essere considerate come diversi approcci al sapere, spesso riguardanti il medesimo oggetto. Ogni disciplina scientifica si è evoluta sviluppando i propri metodi ed un proprio linguaggio, insieme ad un corpo di conoscenze che oggi la identifica e la distingue dalle altre, almeno nella visione dei non addetti ai lavori. In realtà, la tendenza più recente nella ricerca (che è ciò che costruisce le scienze) vede una progressiva perdita di identificazione dei ricercatori con una specifica disciplina (biologia, chimica, etc.) ed un parallelo ridefinirsi all'interno di quelle che potremmo chiamare le "nuove scienze", come ad esempio le biotecnologie o le nanotecnologie. Oggi non si è tanto fisici o biologi quanto piuttosto ricercatori all'interno di uno dei settori delle "nuove scienze", dove solo dall'interazione fra collaboratori con differenti retroterra possono derivare risultati innovativi. Tuttavia, rimane ancora una forte appartenenza alle discipline più classiche quando si considerano gli approcci metodologici, come le tecniche di indagine sperimentale e di modellizzazione.

Quale valenza didattica può avere tutto questo ? A mio avviso essa può essere individuata soprattutto in due aspetti.

1 - INTERDISCIPLINARITA'. Anche da un punto di vista didattico è spesso difficile separare le varie discipline. Ciò che rientra nei programmi di fisica è spesso propedeutico a molti argomenti catalogati come 'chimica', che a loro volta sono indispensabili per la comprensione di concetti che rientrano nel settore naturalistico-biologico. Per non parlare degli strumenti matematici.

2 - APPROCCIO SPERIMENTALE. Indipendentemente da quale settore scientifico si voglia considerare, classico o "nuovo", l'equazione Scienza = Sperimentazione rimane sempre valida. Tutto ciò che non può essere verificato sperimentalmente sta al di fuori dell'ambito scientifico. Quanto sta scritto in ogni rigo di ogni pagina di un

qualsiasi testo scientifico, anche dei più "teorici", trova validità solo in quanto supportato da evidenze sperimentali. Non esiste scienza senza osservazione e sperimentazione.

Sia l'interdisciplinarietà che l'approccio sperimentale dovrebbero essere, secondo me, due pilastri della didattica delle scienze, a qualsiasi livello ed anche nella scuola secondaria: nel seguito cercherò brevemente di illustrare i motivi su cui si basa questa tesi. Per quanto riguarda l'interdisciplinarietà questo è piuttosto semplice. Qualsiasi insegnante di qualsiasi disciplina scientifica si trova spesso in situazioni in cui è costretto/a a dire agli studenti: "questo lo avrete certamente studiato in ..." oppure "questo lo studierete certamente in ...". Ma lo hanno veramente studiato e capito ? O lo faranno davvero in futuro ? La frammentazione dell'insegnamento scientifico in varie discipline (veicolate da insegnanti diversi), anche se necessaria per ovvi motivi, ha come conseguenze indesiderabili la frammentazione dell'apprendimento di argomenti che pure avrebbero una loro "unitarietà" e spesso l'introduzione di concetti a cui gli studenti devono credere per fede ("perché è così, lo vedrete nel corso di ..."), senza che siano messi in grado di capirne l'origine ed il senso. Oltre ad essere antiscientifico, questo certamente induce un calo di interesse negli studenti.

Credo che qualsiasi strada che possa portare ad un miglioramento da questo punto di vista, non possa non prevedere un coordinamento fra insegnanti di diverse discipline. Che si tratti di una ridistribuzione dei programmi didattici che, per una parte ovviamente non dominante, vada al di là di quella classica o di un semplice coordinamento sulla tempistica o di altro ancora, soltanto dall'accordo fra diversi insegnanti può derivare quello che potremmo chiamare un approccio interdisciplinare alle scienze, con un conseguente innalzamento del livello di "gradimento" per le scienze da parte degli studenti. Ovviamente ciò non può essere imposto, e la possibilità di procedere in questo senso va verificata caso per caso.

Una prima indicazione circa l'opportunità, ed a mio avviso la necessità, di un approccio sperimentale alla didattica della chimica, e delle scienze in generale, viene dal considerare quale sia il ruolo dell'insegnamento delle scienze nella scuola secondaria. Oltre agli obiettivi cognitivi riguardanti questo o quell'argomento specifico (vogliamo chiamarle nozioni ?), certamente importanti per studenti in questa fascia di età, la valenza formativa delle scienze va ricercata, insieme ad altri, negli aspetti che elenco di sotto:

- Se scegliessimo a caso 100 persone per la strada, quanti di questi sarebbero in grado di cercare e comprendere informazioni scientifiche riguardanti alcuni temi socialmente "caldi", in modo da farsene una opinione indipendente ? Pensate ad esempio all'energia nucleare, agli organismi geneticamente modificati o alla ricerca sulle cellule staminali. Questi argomenti, così come le scienze in generale, vengono generalmente classificati come "difficili", anche se poi siamo chiamati ad esprimerci al riguardo in referendum o elezioni. E la nostra opinione viene forgiata e manipolata da

giornalisti e politici i quali si dichiarano favorevoli o contrari sulla base di considerazioni che generalmente nulla hanno a che fare con l'argomento in oggetto, la cui vera natura rimane al di fuori della discussione. Ritengo che uno dei compiti principali della scuola secondaria sia quello di formare giovani che non si sentano inadeguati alla comprensione di argomenti di carattere scientifico e non li ritengano distanti o difficili. Non si tratta tanto di accumulare nozioni ma di sviluppare un approccio che evidenzia la sostanziale semplicità delle conoscenze scientifiche e la loro vicinanza alle esperienze quotidiane, in modo da far apprezzare e "godere" le scienze pur non essendo scienziati, così come per apprezzare la buona musica non è necessario essere musicisti. Per raggiungere questo obiettivo un approccio sperimentale è fondamentale.

- All'interno di qualunque processo di ricerca di conoscenza che si voglia definire scientifico bisogna individuare, definire, affrontare e risolvere problemi. Ma questo modo di procedere non è forse importante anche per qualunque altra attività umana? Persone che siano in qualche modo "allenate" alla sequenza che dall'individuazione puntuale porta alla risoluzione di situazioni problematiche riusciranno certamente meglio in qualunque attività lavorativa. Oltre alle ovvie ricadute sociali, la valenza di questo aspetto della cultura scientifica è particolarmente rilevante nell'età adolescenziale, durante la quale i ragazzi cercano se stessi spesso senza essere in grado di definire o razionalizzare alcunchè.

Tutto ciò è perso se si parte dal libro. Quello che generalmente si definisce come 'metodo sperimentale scientifico' viene completamente ignorato dalla stragrande maggioranza degli studenti che, nella migliore delle ipotesi, conosceranno molti "fatti" riguardanti le scienze ma ignoreranno come a questi fatti si sia arrivati. In questo caso il "viaggio" vale almeno quanto la meta.

- Se scegliessimo a caso le stesse 100 persone di cui sopra e dessimo loro in mano un oggetto qualsiasi come una palla, una forchetta o una penna, quanti saprebbero parlare per più di quindici secondi con l'intenzione di descriverlo? E quanti sarebbero in grado di trovare argomenti a sostegno di una ipotesi ed argomentare efficacemente un punto di vista? E quanti ancora accetterebbero facilmente, di fronte ad evidenze incontrovertibili, di riconoscere come errate le ipotesi precedentemente sostenute? L'abitudine all'osservazione ed alla descrizione (che le scienze condividono con le discipline artistiche), alla formulazione di ipotesi sulla base di valutazioni concrete, alla loro verifica ed all'abbandono di "credenze", magari coltivate e difese con ardore ma che non trovano riscontro nei fatti, costituiscono obiettivi formativi raggiungibili nelle scienze soltanto attraverso un approccio di tipo sperimentale.

Oltre alla valenza formativa appena descritta, un approccio alle scienze che parta dagli esperimenti offre un altro vantaggio. E' infatti opinione pressochè unanime fra i docenti che il compito più arduo, ma anche il più importante dal punto di vista del "ritorni", sia quello di suscitare l'attenzione e l'interesse dei discenti. Accanto a discussioni su argomenti scientifici di attualità e ad altre tecniche di

aggancio dell'attenzione, vedere e toccare con mano le scienze, attraverso esperimenti semplici, non lontani dalle esperienze quotidiane e magari con risultati inattesi o comunque non ovvi, può certamente rappresentare una risorsa in più per insegnanti che hanno a che fare con studenti sempre più demotivati.

Sono due le motivazioni contrarie ad un approccio sperimentale alle scienze spesso citate dagli insegnanti: la mancanza, o la difficile agibilità, di laboratori attrezzati ed il poco tempo a disposizione per poter condurre esperimenti. Queste obiezioni vengono da operatori che, a differenza dello scrivente, hanno una esperienza spesso pluridecennale nella pratica dell'insegnamento nelle scuole secondarie e quindi sono certamente fondate. Nel seguito cercherò pertanto di presentare esempi (centrati intorno ai concetti di calore, temperatura ed energia nelle trasformazioni) di esperimenti semplici, che per lo più non richiedono l'uso di un laboratorio ma possono essere condotti in classe, che spesso durano non più di 10-15 minuti e che quindi possono costituire una introduzione al resto della lezione. L'interdisciplinarietà è ovvia sin dal titolo: le reazioni chimiche sono certamente un argomento chimico ma l'energia ? E' fisica o chimica ? O forse non è anche un concetto fondamentale nelle scienze della vita ? E temperatura e calore come le classifichiamo ?

## Postilla

Al di là di quanto scritto sopra, ritengo che gli insegnanti di chimica abbiano un compito particolare, che consiste nel dover sfatare miti e credenze popolari. Mi riferisco al concetto stesso di cosa sia la chimica ed all'immagine della chimica nella società. Immagine spesso alimentata da ignoranza (nel senso etimologico di mancanza di conoscenza), brutali generalizzazioni, scarsa capacità di razionalizzazione nonché da certa stampa e dalla incapacità di alcuni giornalisti che pure, a volte, osano autodefinirsi "divulgatori di scienza".

La chimica è associata nell'immaginario dei più ai veleni ed all'inquinamento. E' innegabile che questi problemi esistano. Ma quando c'è da disinquinare a chi ci si rivolge se non ai chimici ? Questo però purtroppo non viene percepito dalle masse. Se la chimica si occupa di veleni e porta alla sintesi di materiali "artificiali", come mai tanti (bio)chimici studiano la struttura ed i meccanismi di funzionamento di organismi viventi, tra cui l'homo sapiens ? E perché si definiscono artificiali, e quindi dannose, le sostanze preparate dai chimici, fra le quali rientrano tanti farmaci salvavita, mentre le sostanze "naturali" sono viste come sane e benefiche soltanto perché già disponibili nell'ambiente ? Provate a chiederlo a chi è morso da una vipera o punto da uno scorpione, a chi entra in contatto con meduse oppure semplicemente mangia il fungo sbagliato.

Come al solito, è difficile comunicare qualcosa che viene razionalizzato con superficialità. Nessuno credo potrebbe negare l'utilità dei coltelli ed a nessuno

verrebbe in mente di prendersela con chi ha costruito un coltello se esso venisse usato per commettere un omicidio. Le "cose", compresa la chimica, non contengono una valenza positiva o negativa in se, ma possono essere usate in tanti modi. Se esiste inquinamento le colpe non possono che ricadere su chi (e di solito non sono chimici) ha usato nel modo sbagliato le conoscenze accumulate negli ultimi secoli. Ma forse è più facile prendersela con il primo che viene in mente e continuare tranquillamente, nel nostro piccolo, a buttare per strada cicche di sigaretta e carta straccia.

## 1 - CHE COS'E' L'ENERGIA ?

Basta fare questa domanda per rendersi conto, dalle risposte, che per la grande maggioranza degli studenti questo concetto è qualcosa di confuso, fumoso e poco chiaro. Eppure a causa dell'energia si scatenano guerre, le aziende che operano nel settore energetico sono fra le maggiori del pianeta e per trovare fonti alternative lavorano quasi ovunque moltissimi ricercatori. E poi, inesorabile, periodicamente ci arriva la comunicazione dell'azienda fornitrice di energia che ci fa sapere quanta ce ne ha fornita, ed a quale costo, per i nostri usi domestici. Ma che cosa stiamo pagando ? Se vogliamo comprendere il ruolo dell'energia all'interno delle trasformazioni (reazioni ma non solo) dobbiamo prima chiarirci le idee su cosa sia l'energia.

### ESPERIENZA N. 1

**Descrizione:** Con semplici osservazioni si conducono gli studenti verso l'idea che le trasformazioni spontanee sono razionalizzate attraverso il concetto di energia.

**Concetto:** Che cosa è l'energia ? Che relazione esiste fra energia e forza ? Esistono diverse forme di energia ?

**Materiali:** Qualsiasi oggetto (un pezzo di gesso, una matita, un foglio di carta appallottolato, ...) che possa essere fatto cadere senza problemi.

**Procedimento:** Si prende un oggetto e lo si lascia cadere sul pavimento. Si chiede agli studenti perché sia caduto. Poi lo stesso oggetto viene sollevato dal pavimento e si chiede agli studenti perché si solleva. Infine, l'oggetto viene fatto cadere su un banco e si chiede agli studenti perché questa volta non sia caduto sul pavimento.

**Laboratorio:** Non necessario

**Tempo di Preparazione:** 0

**Tempo di Esecuzione:** 3 - 10 minuti, incluso il tempo dedicato allo scambio verbale innescato dalle risposte degli studenti.

Il pezzo di gesso cade perché esiste una attrazione (gravitazionale) fra due qualsiasi oggetti, in questo caso il gesso ed un pianeta. Che c'entra questo con l'energia ? Le attrazioni gravitazionali esistevano, e la pioggia ed i sassi cadevano, ben prima che il primo umanoide uscisse da una caverna con l'intenzione di costruirsi una casa e quindi ben prima che si parlasse di energia. Tuttavia, il bisogno di comprendere e razionalizzare gli eventi che accadono nel mondo fisico ci ha spinto a definire alcuni

utili concetti. Uno di questi è l'energia. Si dice pertanto che all'attrazione gravitazionale sono associate una energia gravitazionale ed una forza gravitazionale. La forza è ciò che spinge i due oggetti l'uno verso l'altro e l'energia ciò che diminuisce quando gli oggetti si avvicinano. Le trasformazioni "spontanee" procedono nella direzione verso la quale l'energia diminuisce.

Questo è un concetto di validità generale, non limitato all'attrazione gravitazionale. Se una trasformazione (nel nostro caso la variazione di posizione del pezzo di gesso) è associata ad un aumento di energia, essa non accadrà spontaneamente (ma posso sempre indurla andando ad alzare il pezzo di gesso con le mani). E se diverse "situazioni" non hanno la stessa energia, ci sarà sempre una forza che spingerà verso la situazione a minore energia, che sarà raggiunta a meno che non ci sia un vincolo (banco) che lo impedisca.

Quanto è intuitivo che una maggiore distanza del gesso dalla terra corrisponda a maggiore energia? Basta pensare ad un sassolino che ci cade in testa. Se cade da pochi centimetri non ci farà certo male ma se cade da molto in alto (se siamo alla base di un dirupo) allora anche un piccolo sasso può essere pericoloso. In questo caso infatti una parte della sua energia legata alla distanza dalla terra (energia potenziale) si sarà trasformata in energia di movimento (energia cinetica) che può essere usata per romperci il cranio. Da questo esempio impariamo tre cose: a) esistono diverse forme di energia, b) l'energia può trasformarsi da una forma all'altra e c) l'energia può essere usata. Questo concetto è alla base dell'uso dell'energia cinetica dell'acqua che cade dall'alto, nel passato per far girare le ruote dei mulini e più di recente per la produzione di energia elettrica nelle dighe. Ma come ha fatto l'acqua a salire così in alto prima di cadere? Chi o cosa le ha dato questa energia? L'acqua viene in ultima analisi dalle nuvole e l'energia necessaria a farla salire fin lassù è fornita dal sole.

Quando sollevo il gesso da terra verso l'alto, io sto trasferendo energia al gesso: da dove la prendo? L'energia necessaria per flettere i miei muscoli, ma più in generale per qualsiasi attività fisiologica e quindi anche per mantenere in vita il mio organismo, viene dalla "trasformazione" del cibo mangiato in altre sostanze a più basso contenuto energetico: una parte della differenza viene usata dal nostro organismo. Non a caso si parla di "calorie" in relazione al cibo: la caloria è una delle unità di misura con cui si quantifica l'energia (l'ENEL preferisce i KiloWatt ora). Ma che tipo di energia è mai questa contenuta nelle sostanze di cui ci nutriamo? In fondo è la stessa che viene usata dai motori delle nostre automobili o quando riscaldiamo le nostre case. Ogni sostanza è formata da atomi che si uniscono ad altri per formare molecole, che si aggregano per formare materiali più o meno complessi. Essendo gli atomi formati da cariche di diverso segno, l'energia delle molecole è legata al modo in cui gli atomi si aggregano perché le cariche possono attrarsi o respingersi (energia Coulombiana, un'altra forma di energia potenziale). Quando avviene una trasformazione (reazione in

questo caso) le molecole risultanti possono avere una minore energia rispetto a quelle di partenza. Una parte della differenza può quindi essere usata dagli organismi viventi o per far muovere bielle e pistoni in un motore (reazione fra benzina ed ossigeno) o per riscaldare l'ambiente (reazione fra legno, o metano, ed ossigeno). Ma da dove viene l'energia che è accumulata nella benzina, nel metano, nel nostro cibo o nel legno? In ultima analisi sempre dal sole, sotto forma di luce usata come fonte di energia dalle piante, che si sono trasformate in petrolio nel passato o che oggi vengono a loro volta usate come fonte di energia dagli erbivori.

In realtà esiste un'altra forma di energia posseduta da ogni molecola, che è legata al suo movimento, l'energia cinetica. La sua esistenza è evidente quando si consideri con attenzione l'esperimento del gesso che cade. Ci si potrebbe chiedere: dato che le molecole dell'aria (ossigeno, azoto ed altro) sono anch'esse degli oggetti, anche se molto piccoli, perché non cadono, ammassandosi sulla terra? La risposta sta nel fatto che le molecole dell'aria possiedono una energia cinetica superiore all'energia gravitazionale, per cui continuano a muoversi senza cadere. O meglio, senza cadere del tutto. Infatti, mano a mano che ci si allontana dalla superficie terrestre, la densità dell'aria diminuisce: è sempre grazie all'attrazione gravitazionale che la nostra atmosfera rimane intorno al pianeta.

Il prossimo esperimento ci aiuterà a "vedere" il movimento delle molecole.

## 2 - CALORE COME ENERGIA; TEMPERATURA; CAPACITA' TERMICA; CALORE LATENTE; ENERGIA INTERNA.

Raramente ho incontrato concetti così apparentemente semplici ed intuitivi come quello di calore, e ancor più quello di temperatura, ma allo stesso tempo così elusivi e di difficile definizione. Probabilmente il numero di coloro in grado di rispondere adeguatamente alla domanda "che cos'è la temperatura?" è inferiore al numero di coloro che saprebbero definire l'energia.

### ESPERIENZA N. 2

**Descrizione:** Attraverso l'osservazione della diffusione di un colorante si chiariscono i concetti di calore e temperatura.

**Concetto:** Che cosa è il calore? e la temperatura?

**Materiali:** Due contenitori di vetro da 200-500 ml  
Acqua molto calda  
Acqua fredda



Inchiostro

Una pipetta o contagocce o cannucchia

**Procedimento:** Si riempiono i due contenitori, uno con l'acqua calda e l'altro con l'acqua fredda, e si lasciano fermi per un paio di minuti. Poi si fanno cadere alcune gocce di inchiostro nell'acqua fredda senza mescolare o toccare l'acqua e si osserva cosa avviene. Dopo 30 secondi si versa la stessa quantità di inchiostro nell'acqua calda senza mescolare o toccare l'acqua e si osserva cosa avviene. Si chiede agli studenti quale differenza abbiano notato ed a che cosa possa essere dovuta.

**Laboratorio:** Non necessario. Si può portare tutto il materiale in classe, compresa l'acqua calda in un termos.

**Tempo di Preparazione:** 10 minuti, per trovare i recipienti e riscaldare l'acqua.

**Tempo di Esecuzione:** 10 minuti, incluso il tempo dedicato allo scambio verbale innescato dalle risposte degli studenti.

L'inchiostro si scioglie (diffonde) molto più rapidamente nell'acqua calda che in quella fredda, ma perché? L'inchiostro è fatto di molecole ed il suo mescolarsi all'acqua deve essere visto, a livello molecolare, come un progressivo aumento della distanza media fra le sue molecole. All'inizio, appena la goccia è caduta nell'acqua, le molecole di inchiostro sono una vicina all'altra, ma a poco a poco esse si allontaneranno una dall'altra. Alla fine, ogni molecola di inchiostro sarà circondata quasi esclusivamente da molecole di acqua. Un primo risultato evidenziato dall'esperimento è: in un liquido le molecole non stanno ferme, ma cambiano continuamente posizione. A questo punto si può chiedere agli studenti di svolgere a casa (non subito, altrimenti si rischia di spezzare il filo della loro attenzione sui concetti da comunicare) un semplice esercizio, calcolando la distanza media fra le molecole di inchiostro alla fine del processo di soluzione. Per semplificare i calcoli si può assumere che una goccia di inchiostro abbia un volume di 0.05 ml e che l'inchiostro abbia densità 1 g/ml e peso molecolare 200, tutti dati probabilmente non lontanissimi dalla realtà (svolgimento in Appendice 1).

Un secondo risultato è che l'inchiostro diffonde più rapidamente nell'acqua calda. Ciò ci fa vedere direttamente che nell'acqua calda le molecole si muovono più rapidamente. Qual' è allora la differenza fra una sostanza più calda (cioè a temperatura più alta) ed una più fredda (cioè a temperatura più bassa)? Le molecole sono sempre le stesse ma esse si muoveranno diversamente. Ciò che chiamiamo temperatura è quindi in qualche modo una misura del movimento delle particelle che compongono la materia. Nell'esperimento appena visto abbiamo evidenziato il movimento di spostamento da una posizione all'altra (gradi di libertà traslazionali) ma le particelle a diversa temperatura hanno anche altri gradi di libertà (vibrazionali e rotazionali) e quindi ruoteranno e vibreranno di più o di meno a seconda della temperatura.

Le molecole dell'acqua calda quindi si muovono più velocemente: è intuitivo che ciò corrisponda a dire che esse hanno una maggiore energia (in questo caso cinetica =  $\frac{1}{2} m v^2$ ). Ma da dove gli è arrivata questa energia ? Per riscaldare l'acqua disponiamo di varie possibilità: possiamo metterla sotto il sole, in un forno, in una pentola su un fuoco o altro ancora. In ogni caso, trasferiamo dell'energia all'acqua, che la acquista distribuendola sui suoi "gradi di libertà" di movimento: traslazionali, rotazionali e vibrazionali. Consideriamo il caso dell'acqua nella pentola sul fuoco acceso e cerchiamo di stabilire l'origine e la catena di trasferimento dell'energia. All'inizio esiste il metano, che si combina con l'ossigeno (reazione di combustione) liberando "energia termica" (oltre che luminosa: le fiamme sono colorate). Che significa questo ? Che le molecole prodotte della reazione sono "calde" cioè si muovono molto. Queste molecole colpiscono la pentola ed in questo modo cedono alla pentola una parte della loro energia di movimento: la pentola si scalda, cioè la sua temperatura aumenta, cioè le particelle che costituiscono il materiale di cui la pentola è fatta si muovono di più. Si dice che alla pentola è stato trasferito del "calore", che altro non è se non energia termica, cioè di movimento. Lo stesso calore trasferito all'aria, e dall'aria al nostro corpo, quando siamo davanti ad un caminetto acceso. La pentola, sempre attraverso urti molecolari, trasferisce poi una parte del calore ricevuto all'acqua. Il calore quindi non è altro che una forma di energia, legata al movimento a livello atomico e molecolare. Quando tocchiamo qualcosa di molto caldo e ci bruciamo, quello che accade è che l'energia di movimento trasferita alla nostra pelle è così alta da alterare i processi biochimici e danneggiare, se non addirittura distruggere, i tessuti cutanei. Il mondo, per un chimico, è fatto di particelle (atomi, ioni, molecole) in continuo e frenetico movimento, anche quando sono "attaccate" le une alle altre come nei solidi, dove comunque le particelle continuano a vibrare ed, in parte, a ruotare.

Quanta energia termica possiede ogni singola molecola ? Per rispondere bisognerebbe considerare tutti i gradi di libertà, ma limitiamoci alle traslazioni. Ovviamente non tutte le molecole viaggiano alla stessa velocità, alcune saranno più lente ed altre più veloci, ma si può parlare di una velocità media. Ed altrettanto ovviamente, l'energia media aumenterà all'aumentare della temperatura. E' possibile calcolare l'energia cinetica traslazionale media per una molecola in fase gassosa in modo non troppo complicato, come illustrato nell'Appendice 2.

Visto che l'energia cinetica media delle molecole di un gas dipende dalla temperatura, ci si potrebbe chiedere quale relazione esista fra calore (cioè energia) e temperatura. In termini più precisi ci si potrebbe chiedere: se fornisco la stessa quantità di calore a due sostanze diverse, otterrò la stessa variazione di temperatura ? La medesima domanda può poi essere posta in modo diverso: se voglio far aumentare di 5 gradi la temperatura di due diverse sostanze, dovrò fornire la stessa quantità di calore (energia) oppure no ? La quantità di energia (calore) necessaria per un aumento di temperatura unitario (1 °C oppure 1 °K) di una unità di quantità di sostanza (1 mole oppure 1 grammo) è detta capacità termica, o calore specifico. La capacità termica si misura quindi in unità del tipo joule/(grammo °C) ed è diversa da sostanza a sostanza.

E' persino diversa per la stessa sostanza se viene misurata a temperatura diversa. Ma perché ? Prima però accertiamoci che sia veramente così.

### ESPERIENZA N. 3

**Descrizione:** Quattro bastoncini di diversi metalli (piombo, ferro, rame, alluminio) sono scaldati e poi posti su un blocco di cera.

**Concetto:** Poiché i diversi metalli hanno diverso calore specifico, essi fonderanno più o meno cera.

**Materiali:** Quattro pezzetti di metallo (Pb, Fe, Cu, Al) di peso (circa 50 - 100 grammi) il più possibile uguale e di diametro simile (ovviamente avranno diversa lunghezza)  
Blocco di cera (potrebbe andare bene una candela ma meglio se il blocco è squadrato)  
Acqua molto calda (si porta in un thermos o si scalda in laboratorio)  
Bastoncini (tipo spiedini) di legno (4)

**Procedimento:** Legare i pezzetti di metallo ai bastoncini di legno ed immergerli nell'acqua molto calda per almeno 1 minuto. Togliere i metalli dall'acqua e porli immediatamente sulla cera. Assicurarsi che a) il supporto di legno faccia rimanere fermo il pezzetto di metallo e b) ciascun pezzetto di metallo tocchi la cera al centro del metallo. La cera fonderà. Rimuovere il metallo quando non c'è più fusione ma la cera è ancora soffice (è più facile). Per pulire il metallo, si può riimmergerlo nell'acqua calda. Appena rimosso il metallo dalla cera, etichettare gli spazi nella cera con il simbolo del metallo che ha prodotto la fusione.

**Laboratorio:** Non necessario. Si può portare tutto il materiale in classe, compresa l'acqua molto calda in un thermos.

**Tempo di Preparazione:** 10 minuti, per riscaldare l'acqua. Ma occorre tempo per procurarsi i metalli, i bastoncini di legno e la cera la prima volta che si prepara l'esperimento.

**Tempo di Esecuzione:** 10 minuti.

Il piombo sarà il primo metallo a raffreddarsi e non fondere più cera, seguito da rame e ferro e poi dall'alluminio. La quantità di cera sciolta sarà diversa per i diversi metalli e, se il blocco di cera è squadrato, proporzionale all'altezza del "buco". E' evidente che i 4 metalli, pur avendo la stessa massa e partendo ed arrivando alle stesse temperature, hanno ceduto alla cera diverse quantità di energia (calore). I

dati necessari alla comprensione dell'esperimento sono contenuti nella seguente tabella:

| Elemento | Densità (g/cm <sup>3</sup> ) | Calore Specifico (J/g °C) |
|----------|------------------------------|---------------------------|
| Pb       | 11.3                         | 0.130                     |
| Al       | 2.7                          | 0.901                     |
| Cu       | 8.9                          | 0.384                     |
| Fe       | 7.8                          | 0.449                     |

La relativa semplicità con cui si misurano temperatura e calore ha fatto della capacità termica una delle grandezze più studiate sin dal XIX secolo. Ma cosa possiamo imparare dal punto di vista microscopico misurando calori specifici? In altri termini perché la stessa quantità di calore fa aumentare la temperatura di più o di meno a seconda del materiale. In termini semplici si può affermare che tutto dipende da quante "cose" possono muoversi e da quanti modi (gradi di libertà) di muoversi esistono. Per quanto riguarda i metalli, per esempio, la capacità termica è associata a due diversi "componenti" del materiale:

- gli ioni positivi presenti nel reticolo cristallino metallico, che possono solo vibrare ma non hanno gradi di libertà traslazionali;
- gli elettroni di valenza, che si trovano più o meno liberi di muoversi attraverso il metallo (tra l'altro sono questi elettroni che rendono i metalli buoni conduttori di elettricità).

In questo caso, una misura di capacità termica dipenderà da (e ci darà pertanto informazioni su):

- quanti gradi di libertà vibrazionali esistono per gli ioni;
- quanti elettroni "liberi" esistono per ogni ione del reticolo cristallino;
- quali sono i possibili "stati" energetici disponibili per gli elettroni;
- quanti elettroni sono "eccitabili" termicamente e quanti invece no.

Attenzione a non confondere la capacità termica con la conducibilità termica.

Capacità = calore che occorre per far aumentare la temperatura di una sostanza = quantità di energia che può essere "immagazzinata" in un materiale facendo aumentare la sua temperatura.

Conducibilità = velocità con cui il calore (energia) si sposta da una zona più calda ad una più fredda di un materiale.

L'esempio precedente ci fa capire come sia importante il calore specifico come indicatore della struttura più intima dei materiali. Ma c'è un altro aspetto legato all'assorbimento di calore da parte dei materiali che merita una riflessione. In alcune condizioni particolari una sostanza può assorbire (o cedere) calore senza che la sua temperatura aumenti (o diminuisca). Anche se questo può sembrare a prima vista

strano (dove va a finire l'energia ?), in realtà non lo è. Basta pensare a quello che accade con una pentola di acqua che bolle: il fuoco è acceso, del calore viene assorbito dall'acqua, ma la sua temperatura è ferma a 100 °C (se la pressione è di 1 atm). La stessa cosa accade per l'acqua a 0 °C.

#### ESPERIENZA N. 4

**Descrizione:** Acqua liquida e solida sono mescolate e si misura la temperatura della miscela.

**Concetto:** Calore latente.

**Materiali:** Un contenitore non isolato da 200-500 ml  
Acqua a temperatura ambiente  
Ghiaccio  
Un termometro con scala che comprenda l'intervallo -10 +30 °C.

**Procedimento:** Si mescolano l'acqua ed il ghiaccio e si misura la temperatura della miscela. Si agita periodicamente e si continua a seguire la temperatura della miscela (ogni 5 - 10 minuti) fino a quando tutto il ghiaccio non si sia sciolto. Si continua a misurare la temperatura anche dopo lo scioglimento del ghiaccio.

**Laboratorio:** Non necessario. Si può portare tutto il materiale in classe, compresa l'acqua ed il ghiaccio.

**Tempo di Preparazione:** 5 minuti, per procurarsi acqua e ghiaccio.

**Tempo di Esecuzione:** pochi minuti. Le misure di temperatura possono essere effettuate periodicamente mentre in classe si svolgono altre attività.

Mentre il ghiaccio fonde, la miscela acqua-ghiaccio continua a ricevere energia (calore) dall'ambiente circostante a temperatura superiore, dato che il contenitore non è isolato termicamente. Però la temperatura non si alza: allora, dove va a finire il calore ? La risposta è semplice se si considera quello che accade: serve a trasformare il ghiaccio in acqua. Ma perché serve energia per questa trasformazione ? Essenzialmente per due motivi:

a) la struttura cristallina dell'acqua solida è tenuta insieme da un particolare tipo di legame chimico, il legame idrogeno, che è anche estremamente importante nel determinare la struttura (questa volta molecolare e non cristallina) di molte molecole di grande interesse biologico. Nell'acqua liquida il numero di questi legami idrogeno è ridotto rispetto al ghiaccio. Ma per rompere dei legami occorre energia;

b) nella struttura cristallina dell'acqua solida le molecole sono distribuite in posizioni fisse e non possono pertanto traslare. Anche i gradi di libertà rotazionali sono molto ridotti. Nel liquido invece, le molecole sono libere di spostarsi e ruotare. Come abbiamo imparato nell'Appendice 2, ogni grado di libertà di movimento corrisponde ad una energia media  $\frac{1}{2} k_B T$ . Poiché quando il ghiaccio si trasforma in acqua compaiono questi nuovi gradi di libertà (traslazionale e rotazionale), allora bisognerà fornire l'energia corrispondente.

Il calore necessario a trasformare una unità di quantità (mole o grammo) di sostanza da una fase ad un'altra è detto calore latente (di evaporazione, di fusione etc.). A questo è legato il senso di refrigerio che proviamo d'estate quando ci bagnamo: l'acqua evapora, ma per far questo ha bisogno di calore (che prende dal nostro corpo, raffreddandoci) per rompere le interazioni fra le molecole, presenti nel liquido ma non nel vapore. La stessa cosa avviene se ci teniamo addosso il sudore, con conseguenze questa volta spesso meno piacevoli.

L'esperienza precedente ci indica come le molecole interagiscano fra loro e come a queste interazioni sia associata una energia. Una chiara evidenza sperimentale dell'esistenza di queste interazioni è contenuta nella esperienza seguente.

#### ESPERIENZA N. 5

**Descrizione:** Acqua ed alcool sono mescolati e si osserva la temperatura della miscela.

**Concetto:** Energia interna.

**Materiali:** Due contenitori da circa 200 ml (bicchieri)  
Acqua a temperatura ambiente  
Alcool etilico a temperatura ambiente  
Un termometro con scala che comprenda l'intervallo +10 +50 °C.

**Procedimento:** Si riempiono a metà i due contenitori, uno con l'acqua e l'altro con l'alcool. Si misura con il termometro la loro temperatura. Si versa il contenuto di uno dei contenitori nell'altro. Si misura immediatamente la temperatura della miscela.

**Laboratorio:** Non necessario. Si può portare tutto il materiale in classe.

**Tempo di Preparazione:** 5 minuti, per procurarsi contenitori, acqua e alcool.

**Tempo di Esecuzione:** 5 minuti.

Non appena l'acqua e l'alcool vengono mescolati, la temperatura della miscela aumenta. Per verificarlo non serve neanche il termometro, basta toccare l'esterno del

contenitore, che si è riscaldato, oppure immergere un dito nella miscela. Ma da dove è venuta l'energia necessaria a far aumentare la temperatura? Consideriamo quello che accade a livello microscopico quando mescoliamo due sostanze, in questo caso in quantità circa uguale. Prima del mescolamento ogni molecola di acqua era circondata da altre molecole di acqua e fra queste molecole esistevano delle interazioni che le tenevano vicine. Queste interazioni non sono dei veri legami chimici e sono riconducibili all'esistenza nelle molecole di particelle cariche (nuclei ed elettroni). In media, queste interazioni sono attrattive, nel senso che alle molecole "piace" stare vicine, cioè per allontanare le molecole l'una dall'altra occorre energia, così come occorre energia per allontanare una carica positiva da una negativa oppure un oggetto dalla superficie terrestre. La stessa cosa si può dire per le molecole di alcool. Quando acqua ed alcool vengono mescolati, intorno ad una molecola di acqua una parte (nel nostro caso circa la metà) delle altre molecole di acqua è stata sostituita da molecole di alcool. Così anche intorno ad ogni molecola di alcool ora non ci sono soltanto molecole di alcool ma anche molecole di acqua. Ciò significa che una parte delle interazioni acqua-acqua ed alcool-alcool sono state sostituite da interazioni acqua-alcool. Da un punto di vista energetico cosa è cambiato? L'energia dell'interazione acqua-alcool è maggiore o minore della media delle interazioni acqua-acqua ed alcool-alcool? Il nostro esperimento ci dà la risposta. Poiché osserviamo un aumento di temperatura, cioè il sistema acquista energia di movimento, questa energia non può che derivare dal fatto che le nuove interazioni sono più "forti" rispetto alle precedenti. L'energia (interna, dovuta alle interazioni) del sistema è diminuita e la differenza riappare come energia termica.

### 3 -ENERGIA E TRASFORMAZIONI.

Da quanto visto in precedenza si capisce come nelle trasformazioni, che implicano il passaggio da una situazione ad un'altra, sia coinvolta anche una variazione di energia. Le trasformazioni che abbiamo preso in esame sono la fusione (acqua solida - acqua liquida) ed il processo di soluzione (acqua - alcool etilico). In questi casi l'energia di cui parliamo è quella delle interazioni intermolecolari (fra molecola e molecola), oltre a quella dei diversi gradi di libertà rotazionale e traslazionale disponibili in fasi diverse (liquida e solida). Tuttavia da un punto di vista chimico le trasformazioni forse più interessanti sono quelle che coinvolgono la comparsa di nuove sostanze (prodotti) a partire da sostanze di partenza (reagenti): le cosiddette reazioni chimiche. È intuitivo che le "interazioni" (legami chimici) fra i vari atomi nei prodotti e nei reagenti saranno diverse e diversa sarà la loro energia. Ogni reazione chimica è associata pertanto ad una variazione di energia del "sistema chimico" (reagenti + prodotti). I prodotti possono avere energia più bassa dei reagenti, cioè essere più stabili, nel qual caso la reazione produce una certa quantità di energia in qualche forma. Viceversa, se i reagenti hanno energia più bassa, per far avvenire la

reazione occorre fornire energia. Quali forme di energia è possibile ottenere da una reazione chimica? È possibile usare questa energia per scopi pratici? Una prima risposta a questi quesiti può venire da considerazioni su aspetti di vita quotidiana come:

a) la vita di piante ed animali (inclusi i leggenti) è possibile grazie all'energia ricavata da reazioni biochimiche;

b) il legno che brucia nel camino è un esempio delle prime conquiste tecnologiche dell'umanità, con cui si è ricavata energia termica da una reazione (di combustione);

c) la benzina che brucia nel cilindro di un motore (anche qui una combustione) è un esempio di trasformazione di energia chimica in energia meccanica.

Di seguito vedremo un esempio di un altro tipo di energia che può essere fornito da una reazione.

## ESPERIENZA N. 6

**Descrizione:** Rame e zinco reagiscono con sviluppo di energia.

**Concetto:** Reazioni di ossido-riduzione. Pile.

**Materiali:** Un limone oppure un pomodoro  
Una barretta di zinco ed una di rame  
Due fili di rame con alle estremità dei piccoli morsetti  
Una sveglia portatile funzionante con una pila da 1.5 volts.

**Procedimento:** Si schiaccia il limone in modo da rompere le separazioni interne fra gli spicchi. Se si usa un pomodoro si fa lo stesso cercando di non rompere la pelle esterna. Si infilano le due barrette metalliche nel limone, bene in profondità. Si connettono le barrette metalliche agli elettrodi della sveglia (nello scomparto riservato alla batteria) attraverso i fili con i morsetti.

**Laboratorio:** Non necessario. Si può portare tutto il materiale in classe.

**Tempo di Preparazione:** Occorre del tempo solo la prima volta, per procurarsi il materiale necessario.

**Tempo di Esecuzione:** 10-15 minuti.

Anche senza batteria l'orologio della sveglietta funzionerà. Da chi viene fornita l'energia necessaria? Spesso, senza pensarci molto prima, la risposta immediata sarà: "dal limone"! In realtà basterà usare due barrette dello stesso metallo per verificare che non è così. La spiegazione viene dal considerare l'energia associata agli elettroni "liberi" che circolano nel reticolo cristallino formato dagli ioni dei metalli. Sia nel



rame che nello zinco esistono ioni bivalenti ( $\text{Cu}^{++}$  e  $\text{Zn}^{++}$ ) e, per ogni ione, due elettroni più o meno liberi di spostarsi. Agli elettroni però "piace" di più stare nel rame, nel senso che un elettrone ha una energia più bassa quando sta nel rame rispetto a quando sta nello zinco. Di conseguenza gli elettroni tenderanno (spinti da una forza "elettromotrice" - ricordate: variazione di energia corrisponde a forza) a spostarsi dallo zinco al rame. Per far questo essi dovranno attraversare i meccanismi della sveglia: ci sarà una corrente di elettroni, cioè una corrente elettrica. Il sistema filo-rame-limone-zinco-filo ha preso il posto della batteria a bottoncino: abbiamo creato in casa una batteria. Ed il limone a cosa serve? Man mano che gli elettroni vanno dallo zinco al rame, la barretta di rame diventa sempre più negativa e quella di zinco positiva. Se queste cariche non venissero neutralizzate il flusso di elettroni si fermerebbe presto. Il limone serve a fornire gli ioni positivi (che vanno verso il rame) e quelli negativi (che vanno verso lo zinco) necessari a mantenere neutre le barrette di metallo.

Abbiamo visto come da una reazione chimica si possa ottenere energia di un tipo che noi chiamiamo elettrico, cioè legata al movimento di cariche in un materiale conduttore. Partendo da reagenti a più alta energia rispetto ai prodotti si può ricavare una energia utile. Nel seguito vedremo come è possibile fare anche il contrario: se forniamo energia possiamo passare da reagenti a più bassa energia a prodotti ad energia più alta.

## ESPERIENZA N. 7

**Descrizione:** Fornendo energia si può scindere l'acqua nei suoi due componenti, ossigeno ed idrogeno (elettrolisi).

**Concetto:** Reazioni di ossido-riduzione. Pile.

**Materiali:** Un contenitore con acqua salata  
Due provettine  
Due fili di platino  
Una batteria da 4.5 volts (di quelle piatte e voluminose).

**Procedimento:** Si collegano i fili di platino ai due elettrodi della batteria e si infilano gli altri capi nelle provettine, che vanno tenute capovolte (e piene di acqua) nel contenitore. (Se non si usano fili di platino, invece di ossidare l'acqua si ossiderà il filo).

**Laboratorio:** Non necessario.

**Tempo di Preparazione:** 5 minuti per fare i collegamenti.

**Tempo di Esecuzione:** 10-15 minuti.

Man mano che passa il tempo, si vedrà il fondo (che sta su) delle due provette riempirsi di gas. In particolare, il volume del gas prodotto in una delle due provette sarà il doppio dell'altro. Ciò che avviene sono le seguenti reazioni:

$4 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2 + 4 \text{OH}^-$       riduzione; sviluppo di idrogeno all'elettrodo negativo

$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$       ossidazione; sviluppo di ossigeno all'elettrodo positivo

$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{H}_2$       reazione totale

Poiché per ogni molecola di ossigeno se ne producono due di idrogeno, la provetta con il filo collegato all'elettrodo negativo sarà quella con il volume di gas più grande. Abbiamo usato l'energia della batteria per fare avvenire una reazione: se si stacca uno dei fili la produzione di gas si interrompe immediatamente. I legami chimici presenti nell'acqua sono estremamente stabili (cioè ad energia più bassa) rispetto a quelli dell'idrogeno e dell'ossigeno. La reazione inversa in cui si forma acqua da idrogeno ed ossigeno libera così tanta energia da essere esplosiva: è questo il motivo della pericolosità dell'idrogeno.

Fino ad ora abbiamo visto come una reazione in cui si libera energia avvenga spontaneamente (ossidazione dello zinco e riduzione dello ione rame) e l'energia in eccesso possa essere usata. Abbiamo anche visto come, se si fornisce energia, possa avvenire una reazione in cui l'energia dei prodotti è superiore a quella dei reagenti (elettrolisi dell'acqua). Ci potremmo chiedere: è sempre vero che una reazione (o trasformazione) per avvenire "spontaneamente" debba corrispondere ad una diminuzione di energia, in questo caso interna? In altri termini, fino a che punto possiamo applicare le leggi della meccanica quando abbiamo un numero enorme di particelle, dell'ordine del numero di Avogadro ( $10^{24}$ )? Nulla di meglio che un esempio che possa rispondere a queste domande con la forza dell'evidenza sperimentale.

## ESPERIENZA N. 8

**Descrizione:** Si fa sciogliere in acqua 1 mole di diversi sali e si misura la differenza di temperatura.

**Concetto:** I calori di soluzione possono essere esotermici o endotermici.

**Materiali:** Una bilancia  
Un contenitore isolato (thermos)  
Una mole di LiCl  
Una mole di KNO<sub>3</sub>  
Una mole di NaCl  
Acqua a T ambiente (circa 200 ml)  
Un cilindro graduato  
Un termometro  
Una barretta per mescolare  
Un secchio per raccogliere i rifiuti (se non si va in laboratorio)

**Procedimento:** Si pesa in anticipo una mole di ciascun sale. Si pone il primo sale (solido) nel thermos. Si misurano 50 ml di acqua nel cilindro e se ne misura la temperatura. Si pone poi il termometro nel sale solido e si versa l'acqua (50 ml) nel thermos. Si agita un po' e si misura la temperatura fino a quando non si sia stabilizzata. Si pulisce il thermos buttando via la soluzione e si ripete il tutto per gli altri due sali.

**Laboratorio:** Non necessario.

**Tempo di Preparazione:** 10 minuti per pesare 1 mole di ciascun sale.

**Tempo di Esecuzione:** 15-20 minuti.

Si noterà che la temperatura della soluzione (rispetto a quella dell'acqua di partenza) diminuisce di poco per aggiunta di NaCl, diminuisce più sensibilmente per aggiunta di KNO<sub>3</sub> ed aumenta moltissimo per aggiunta di LiCl. Si dice che la dissoluzione dei primi due sali è un processo endotermico, che cioè richiede energia, sotto forma di calore, per cui la temperatura del sistema diminuisce. Se si aspetta abbastanza però, sarà l'ambiente circostante a fornire calore alla soluzione che ritornerà a temperatura ambiente: in totale sarà "spontaneamente" avvenuto un processo (la soluzione dei sali) che ha richiesto energia, fornita dall'ambiente sotto forma di calore. La soluzione del LiCl è invece un processo esotermico: il sistema in esame cede energia (calore) dapprima riscaldandosi per poi cedere calore all'ambiente circostante ritornando a temperatura ambiente.

Questo esperimento ci indica in modo chiaro che le trasformazioni "spontanee", cioè quelle che avvengono senza bisogno di una "spinta" esterna (come l'energia della batteria per l'elettrolisi dell'acqua) possono avvenire sia che l'energia interna aumenti sia che essa diminuisca. Ciò sembra a prima vista in contrasto con l'esperienza quotidiana, secondo la quale un processo avviene spontaneamente se corrisponde ad una diminuzione di energia (gesso che cade). In realtà questo principio (quello delle trasformazioni spontanee associate ad una diminuzione di energia) rimane ancora vero

se riusciamo a scegliere la "giusta" definizione di energia. Per descrivere il comportamento di sistemi formati da un numero molto grande di particelle si usa infatti la termodinamica e non la meccanica. E per trovare la "giusta" definizione di energia bisogna introdurre una grandezza importantissima ma che nello stesso tempo corrisponde ad un concetto sfuggente ed elusivo: l'entropia. Ma questa è un'altra storia ed un approccio all'entropia può essere lasciato ad un momento successivo. In ogni caso, con un semplice esperimento è possibile vedere praticamente quali siano i suoi effetti.

## ESPERIENZA N. 9

**Descrizione:** Un elastico sotto tensione si allunga o si accorcia se viene scaldato ?.

**Concetto:** Introduzione all'entropia.

**Materiali:** Un elastico non troppo sottile  
Un peso (mazzo di chiavi o altro) per allungare l'elastico  
Un supporto dove poter reggere l'elastico allungato (chiodo ?)  
Un phon

**Procedimento:** Si prenda l'elastico e, con le labbra, si valuti la temperatura. Si allunghi l'elastico repentinamente e si valuti la variazione di temperatura, sempre con le labbra. Si faccia lo stesso per il processo di accorciamento: si allunghi l'elastico, lo si tenga allungato per alcuni secondi e poi si valuti la temperatura prima e dopo l'accorciamento. Si faccia ora allungare l'elastico appeso ad un supporto per mezzo di un peso. Provare a predire, sulla base di quanto osservato precedentemente se l'elastico si allungherà o accorcerà per riscaldamento. Riscaldare l'elastico con il phon e verificare.

**Laboratorio:** Non necessario.

**Tempo di Preparazione:** 0.

**Tempo di Esecuzione:** 10 minuti.

Quando viene allungato, l'elastico si riscalda, mentre si raffredda quando si riaccorcia. Il processo di accorciamento è quindi endotermico e dovrebbe essere favorito da un aumento di temperatura, secondo il principio di Le Chatelier. Ciò è effettivamente quello che si osserva, contrariamente a quanto ci si aspetta, perché solitamente ad un aumento della temperatura corrisponde a) un aumento di volume e b) un aumento della facilità di deformazione.

Ma perché il ritorno dell'elastico stirato alle dimensioni originali è un processo spontaneo anche se endotermico? Consideriamo prima come è fatto un elastico. È un polimero, cioè contiene molecole molto lunghe e raggomitolate, come un piatto di spaghetti in cui ogni spaghetti rappresenta una molecola. Quando lo allunghiamo, a livello microscopico stiamo facendo diventare sempre più dritti gli spaghetti, in un certo senso stiamo "ordinando" le molecole una accanto all'altra. L'entropia è una grandezza collegata all'ordine ed aumenta con il disordine. Nel nostro caso quindi l'entropia è più grande per l'elastico non stirato. Quando allunghiamo l'elastico, sia la variazione di volume che quella di energia interna (collegata in questo caso alle interazioni intermolecolari) sono pressoché nulle. Tutta l'energia necessaria per allungare l'elastico è stata pertanto impiegata per far diminuire l'entropia. Questo significa due cose:

- a) una diminuzione dell'entropia non corrisponde ad un processo spontaneo, che è invece collegato ad un suo aumento (l'elastico si riaccorcia spontaneamente);
- b) una variazione di entropia corrisponde ad uno scambio di calore (energia termica): quando l'entropia di un sistema (elastico) aumenta ciò avviene con un assorbimento di calore da parte del sistema stesso, e viceversa.

## APPENDICE 0

Gli esperimenti ed i concetti introdotti sono stati volutamente trattati in modo semplice, evitando sia terminologie che equazioni complicate, con lo scopo di non distogliere e distrarre lo studente dalla comprensione del senso di ciò di cui si parla. Questo non vuol dire certamente che equazioni e terminologie specifiche non siano importanti. Al contrario esse costituiscono una parte fondamentale del "bagaglio scientifico" che uno studente dovrebbe acquisire. Sta all'insegnante però trovare il momento opportuno per introdurle perché, se ciò è fatto con la giusta tempistica, esse costituiscono un mezzo per una comprensione ancora più profonda delle scienze mentre se viene fatto nel modo e/o nel momento sbagliato si rischia di indurre quella "paura" per le formule che si riflette in una immancabile avversione per le scienze.

Attilio Golemme

## APPENDICE 1

Svolgimento: se abbiamo aggiunto 3 goccioline = 0.15 ml = 0.15 g, avremo un numero di moli di inchiostro = massa / PM = 0.15 / 200. Il numero di molecole di inchiostro aggiunto sarà pertanto = (numero di moli) (numero di Avogadro) = (0.15/200) (6.02  $10^{23}$ )  $\cong$  4.5  $10^{20}$ . Questo enorme numero di molecole sarà contenuto, alla fine, nel volume totale, per esempio 500  $\text{cm}^3$ . Volume medio per molecola = 500 / 4.5  $10^{20}$   $\cong$  1.1  $10^{-18}$   $\text{cm}^3$ . Assumendo che questo volume sia un cubo, esso avrà uno spigolo =  $\sqrt[3]{\text{Volume}}$  =  $\sqrt[3]{(1.1 \cdot 10^{-18})}$   $\cong$  1  $10^{-6}$  cm = 100 Å, che può essere considerata come la distanza media fra le molecole di inchiostro a diffusione ultimata.

## APPENDICE 2

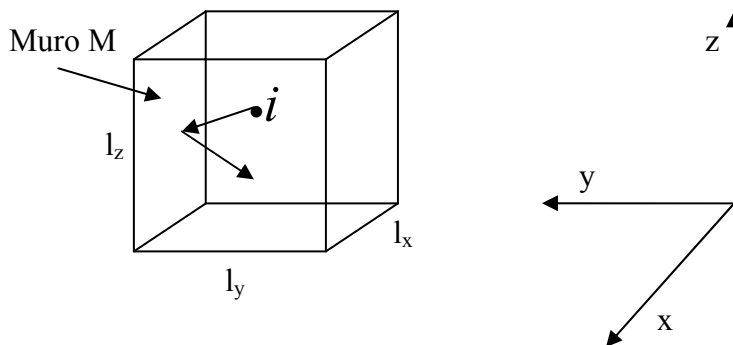
Prima di entrare nello specifico, è opportuno richiamare i concetti di velocità ed accelerazione. La velocità ( $v$ ) è un vettore con tre componenti ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) ed è legata alla variazione della posizione ( $Pos$ ) di un oggetto nel tempo:

$$v = \frac{Pos(t_2) - Pos(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (1)$$

L'accelerazione ( $a$ ), analogamente, ci dà la variazione della velocità nel tempo:

$$a = \frac{v(t_2) - v(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (2)$$

Il nostro scopo è quello di arrivare all'energia traslazionale media di una molecola di un gas a temperatura  $T$ . Consideriamo che il gas sia contenuto in una scatola di dimensioni  $l_x$ ,  $l_y$  ed  $l_z$ ,



ed inizialmente cerchiamo di ottenere la pressione  $P$  sul muro  $M$ . Poiché la pressione è connessa alla forza  $F$  (dovuta agli urti delle particelle di gas) che agisce sulla superficie  $S$  del muro dalla relazione

$$P = F / S \quad (3)$$

dobbiamo trovare la forza  $F$ . Consideriamo dapprima una singola molecola di gas, una generica molecola contrassegnata dall'indice  $i$ , come in figura. L'indice  $i$  può essere un qualsiasi numero e serve soltanto ad etichettare ogni singola molecola per distinguerla dalle altre. Esiste una legge fondamentale della meccanica:

$$F_i = m a_i \quad (4)$$

dove  $m$  è la massa della particella,  $a$  è l'accelerazione della particella e l'indice  $i$  identifica una specifica particella. Sia la forza che l'accelerazione sono vettori e

pertanto l' equazione (4) corrisponde in realtà a tre distinte equazioni, una per ogni componente dei vettori. Consideriamone una, per esempio quella sulla coordinata y:

$$F_{i,y} = m a_{i,y} \quad (5)$$

L'accelerazione che vogliamo considerare è quella relativa all'urto della particella con la parete della scatola. Anche se la velocità prima e dopo l'urto conserva lo stesso modulo (nel caso di un urto che consideriamo elastico) la sua direzione sarà cambiata e pertanto la velocità dopo l'urto sarà diversa da quella prima dell'urto. Da ciò discende che la particella avrà subito una accelerazione (vedi equazione (2), dove  $t_1$  e  $t_2$  sono 2 istanti prima e dopo l'urto). Per un urto elastico come quello descritto in figura, l'unica variazione di velocità consiste nel fatto che la sua componente y cambia di segno,

$$v_{i,y}(t_1) = + v_{i,y} \quad v_{i,y}(t_2) = - v_{i,y} \quad (6)$$

per cui l'accelerazione della particella in seguito all'urto sarà (vedi equazione (2)):

$$a_{i,y} = \frac{-v_{i,y} - (+v_{i,y})}{t_2 - t_1} = \frac{-2v_{i,y}}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

Per avere la forza sulla particella (la forza che le fa cambiare direzione) basta moltiplicare questa accelerazione per m. Ma a noi interessa la forza che la particella esercita sul muro. Poiché l'urto è elastico:

$$\text{Forza del muro sulla particella} = - \text{Forza della particella sul muro} \quad (8)$$

cioè,

$$F_{i,y} = \frac{2mv_{i,y}}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

Abbiamo raggiunto un primo risultato, calcolando la forza con cui una particella (molecola) che sbatte sul muro spinge il muro stesso. Questo tuttavia non ci basta, perché per i nostri scopi ci serve la media nel tempo di questa forza. In altre parole: ogni volta che la particella sbatte sul muro, la forza con cui spinge è quella dell'Equazione (9), ma quanto spesso ci sbatte? Una volta al secondo, una volta ogni microsecondo o una volta al mese? Se vogliamo la forza media, il tempo fra due urti ( $t_2 - t_1$ ) dovrà essere considerato come il tempo che la particella impiega ad andare via dal e a tornare al muro M, cioè il tempo che la particella impiega a coprire la distanza  $2l_y$ :



$$v_{i,y} = \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}} = \frac{2l_y}{t_2 - t_1} \qquad t_2 - t_1 = \frac{2l_y}{v_{i,y}} \qquad (10)$$

Sostituendo questo risultato nell'equazione (9) otteniamo la forza media (nel tempo) sulla parete dovuta agli urti della particella  $i$ -esima:

$$\langle F_{i,y} \rangle = \frac{2mv_{i,y}}{t_2 - t_1} = \frac{2mv_{i,y}}{\frac{2l_y}{v_{i,y}}} = \frac{mv_{i,y}^2}{l_y}. \qquad (11)$$

Le parentesi intorno alla forza stanno ad indicare una media.

Poiché le particelle sono tutte uguali, la forza dovuta a tutte le particelle contenute nella scatola sarà la somma di tanti termini tutti uguali all'equazione (11), uno per ogni particella:

$$\langle F_y \rangle = \sum_i \frac{mv_{i,y}^2}{l_y} = \frac{m}{l_y} \sum_i v_{i,y}^2. \qquad (12)$$

Poiché il valore medio di una qualsiasi proprietà di tante ( $N$ ) particelle è definito come:

$$\langle \text{proprietà} \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \text{proprietà}_i \qquad (13)$$

avremo, considerando la velocità:

$$\langle v_y^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_i v_{i,y}^2 \qquad (14)$$

per cui l'equazione (12) può essere riscritta come:

$$\langle F_y \rangle = \frac{m}{l_y} \sum_i v_{i,y}^2 = \frac{mN \langle v_y^2 \rangle}{l_y} \qquad (15)$$

Abbiamo quindi raggiunto il nostro primo (e più complicato) obiettivo, calcolare la pressione sulla parete della scatola di volume  $V$  dovuta agli urti delle  $N$  molecole (di massa  $m$ ) del gas in essa contenuto:

$$P = \frac{\langle F_y \rangle}{S} = \frac{mN\langle v_y^2 \rangle}{l_x l_y l_z} = \frac{mN\langle v_y^2 \rangle}{V}, \quad (16)$$

dove  $V$  è il volume della scatola.

Cerchiamo ora di manipolare questa equazione. Il quadrato di qualsiasi vettore è dato dal prodotto scalare del vettore per se stesso e quindi dalla somma dei quadrati delle sue componenti, per cui:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle \quad (17)$$

Inoltre, poiché non esiste alcun motivo per cui la velocità media di una particella in una direzione debba essere diversa da quella in un'altra direzione, abbiamo:

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle \quad (18)$$

Dalle ultime due equazioni si ricava:

$$\langle v_y^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle \quad (19)$$

che, sostituito nell'equazione (16) ci da:

$$P = \frac{mN\langle v_y^2 \rangle}{V} = \frac{mN\langle v^2 \rangle}{3V} \quad PV = \frac{mN\langle v^2 \rangle}{3} \quad (20)$$

Consideriamo ora il gas come un gas ideale (o perfetto), di cui conosciamo l'equazione di stato:

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT \quad (21)$$

Dove  $T$  è la temperatura,  $n$  è il numero di moli,  $N_A$  il numero di Avogadro ( $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$ ) ed  $R$  la cosiddetta costante dei gas ideali ( $R = 8.3 \text{ J/moli } ^\circ\text{K}$ ). Uguagliando i membri a destra delle equazioni (20) e (21) otteniamo:

$$\frac{mN\langle v^2 \rangle}{3} = \frac{N}{N_A} RT \qquad m\langle v^2 \rangle = 3 \frac{R}{N_A} T \qquad (22)$$

Abbiamo quasi concluso. Infatti sappiamo che l'energia cinetica di traslazione (cioè legata al suo spostamento nello spazio) di una particella di massa  $m$  che viaggia a velocità  $v$  è data da:

$$\varepsilon_{tr} = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (23)$$

e se vogliamo l'energia traslazionale media, dovuta cioè al fatto che diverse molecole hanno diverse velocità:

$$\langle \varepsilon_{tr} \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \qquad 2 \langle \varepsilon_{tr} \rangle = m \langle v^2 \rangle \qquad (24)$$

Sostituendo questo risultato nell'equazione (22) otteniamo:

$$\langle \varepsilon_{tr} \rangle = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} k_B T \qquad (25)$$

dove  $k_B = R/N_A = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$  è stato assegnato il nome di costante di Boltzmann. Abbiamo davvero concluso: abbiamo trovato l'energia traslazionale media di una molecola di gas a temperatura  $T$ . Si noti che questa energia non dipende dalla massa delle molecole ma solo dalla temperatura: evidentemente (si confronti con l'equazione (24)), a parità di temperatura, molecole più pesanti "viaggeranno" a velocità media più bassa.

Ogni molecola è libera di muoversi in tre dimensioni ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Più formalmente si dice che ogni molecola ha 3 gradi di libertà traslazionali. L'energia traslazionale media per ogni grado di libertà traslazionale sarà pertanto:

$$\boxed{\langle \varepsilon_{tr} \rangle_g = \frac{1}{2} k_B T} \qquad (26)$$

Questo risultato, ricavato per le traslazioni, è in realtà del tutto generale e rimane valido anche per gradi di libertà diversi, come le rotazioni o le vibrazioni.