



Associazione per
l'Insegnamento
della Fisica
Sezione di Mantova

ITIS "E. FERMI"
MANTOVA

**LABORATORIO
DI FISICA-CHIMICA
NEL BIENNIO**

Prima parte

Corso di aggiornamento
A.S. 1994/95

Indice

La conservazione della massa	pag. 1
Prof. Maurizio Francesio ITIS "E. Fermi" Mantova	
Solubilità della CO ₂ nella "Coca-Cola"	pag. 6
Prof. Claudia Bortolotti Liceo "Ricci Curbastro" di Lugo di Romagna	
Distillazione frazionata	pag. 10
Prof. Paolo Saccani ITIS "E. Fermi" Mantova	
Solidificazione e fusione	pag. 14
Prof. Giorgio De Vincenzi ITIS "E. Fermi" Mantova	
Introduzione operativa al concetto di pressione atmosferica e alla determinazione della legge di Boyle	pag. 19
Prof. Francesco Dalla Valle Ispettore ministeriale	

LA CONSERVAZIONE DELLA MASSA

(a cura di Maurizio Francesio)

1. Introduzione

Il Laboratorio di Fisica e Chimica non ha come finalità l'insegnamento delle due discipline agli studenti che frequentano il biennio della scuola secondaria superiore, come qualcuno potrebbe essere indotto a pensare; esso si propone di fornire un primo approccio alle scienze sperimentali adeguato a quella fascia di età, fatto in termini concreti e con attività di laboratorio, attento ad affrontare in modo razionale i problemi e a dare, in definitiva, un contributo efficace alla formazione dei ragazzi.

Da questo punto di vista, infatti, grande rilievo viene dato al metodo di lavoro e di analisi, per fornire agli studenti strumenti critici e abilità utili ad affrontare i corsi successivi: in questo senso il Laboratorio di Fisica e Chimica ha una funzione propedeutica alle due discipline, che verranno trattate separatamente nel triennio.

L'articolazione dei temi proposti per i due anni di corso permette di farsi un'idea sullo sviluppo degli argomenti. Essi sono:

1. Proprietà fisiche dei corpi e loro misura
2. Dai materiali alle sostanze pure
3. Dalle sostanze pure alle soluzioni
4. Proprietà elettriche dei corpi, delle sostanze e delle soluzioni
5. Trasformazioni e conservazione della materia
6. Movimento ed energia
7. Energia e ambiente
8. La progettazione di un esperimento

2. La massa e la sua conservazione

Fa parte delle attività previste per lo svolgimento del primo tema l'introduzione e l'uso della bilancia a bracci uguali come strumento indispensabile per misurare la massa dei corpi.

I ragazzi imparano a conoscere la bilancia attraverso una serie di attività specifiche che consentono loro di acquistare familiarità con lo strumento, che verrà poi utilizzato in diversi esperimenti per analizzare il comportamento della materia nelle trasformazioni chimiche.

Tra questi esperimenti si collocano certamente anche quelli che introducono alla legge di conservazione della massa. Si tratta di una serie di esperienze, proposte dal noto corso IPS (*), che sono state inserite nel programma del corso di Laboratorio di Fisica e Chimica attualmente in sperimentazione presso il Liceo Scientifico Tecnologico di Mantova.

(*) L'IPS (Introductory Physical Science) è un corso integrato di Fisica e Chimica messo a punto negli Stati Uniti fin dagli anni '60 e successivamente più volte rivisto e aggiornato. Attualmente è in uso la sesta versione.

Esse sono:

- a) la massa di acqua e sale (dove si misura la massa dell'acqua e del cloruro di sodio prima che vengano mescolati e dopo, quando il sale si è sciolto);
- b) la massa del ghiaccio che fonde (dove si misura la massa dell'acqua prima e dopo il cambiamento di stato);
- c) la massa di un miscuglio di soluzioni (dove si misura la massa di due soluzioni, una di ioduro di sodio e l'altra di nitrato di piombo, prima di venire mescolate e dopo, con formazione di un precipitato giallo come prodotto della reazione);
- d) la massa del rame e dello zolfo (dove si misura la massa di rame granulare e zolfo mescolati assieme in una provetta chiusa all'estremità con una tela elastica, prima e dopo l'energica reazione provocata dal riscaldamento);
- e) la massa di acqua e Alka Seltzer (dove si misura la massa dell'acqua e di un pezzetto di pastiglia, prima di essere mescolati e dopo, quando si produce il gas di biossido di carbonio).

In tutti gli esperimenti, le misurazioni effettuate con la bilancia (*) consentono di confrontare le masse dei corpi presi in considerazione, prima che abbia luogo la trasformazione e subito dopo. A titolo di esempio, esaminiamo i risultati ottenuti da una scolaresca suddivisa in otto gruppi di lavoro, nel caso degli esperimenti c) e d). Le tabelle riportano i dati ottenuti dai vari gruppi in due prove.

Tabella 1: miscuglio di soluzioni

gruppo	massa totale soluzioni separate (g)	massa totale soluzioni mescolate (g)	variazione di massa (g)
1	32,20	32,20	0,00
	36,14	36,12	- 0,02
2	32,19	32,19	0,00
	38,24	38,22	- 0,02
3	39,63	39,63	0,00
	34,21	34,19	- 0,02
4	33,07	33,07	0,00
	38,63	38,63	0,00
5	36,90	37,04	0,14
	39,66	39,63	- 0,03
6	34,58	34,56	- 0,02
	38,59	38,59	0,00
7	28,71	28,70	- 0,01
	37,10	37,08	- 0,02
8	33,96	33,96	0,00
	32,37	32,37	0,00

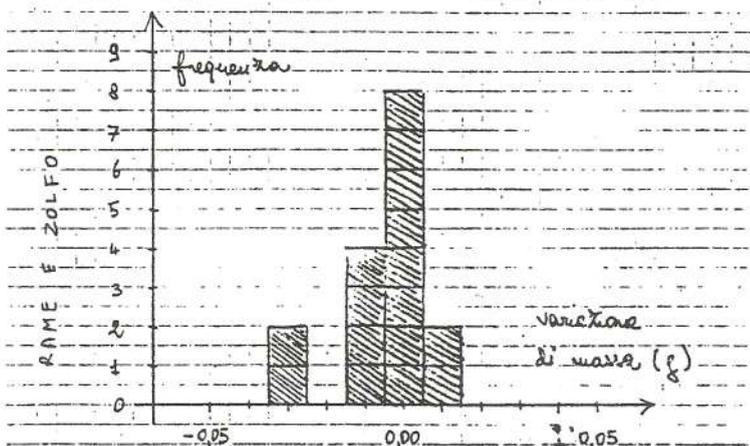
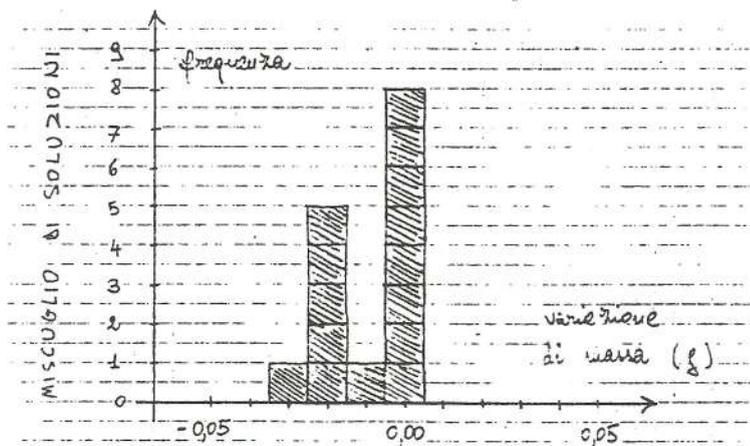
(*) Il corso IPS è corredato da una serie di semplici apparecchiature appositamente progettate per le attività di laboratorio: una di queste è la bilancia a bracci uguali, di portata 100 g e sensibilità 10 mg, particolarmente studiata per l'uso da parte dei ragazzi.

Tabella 2: rame e zolfo

gruppo	massa totale prima della reazione (g)	massa totale dopo la reazione (g)	variazione di massa (g)
1	16,47	16,48	0,01
2	16,29	16,26	- 0,03
	17,52	17,51	- 0,01
3	16,23	16,23	0,00
	17,04	17,03	- 0,01
4	17,66	17,66	0,00
	17,52	17,49	- 0,03
5	17,13	17,12	- 0,01
	16,52	16,52	0,00
6	16,92	16,92	0,00
	16,65	16,65	0,00
7	16,81	16,81	0,00
	16,34	16,34	0,00
8	16,57	16,58	0,01
	13,74	13,73	- 0,01
	13,71	13,71	0,00

Dopo avere compilato la tabella dei dati, ogni studente viene invitato a costruire un istogramma che rappresenti le variazioni di massa verificatesi nell'esperimento considerato.

Gli istogrammi relativi ai due casi esaminati sono presentati nelle figure seguenti.



3. Discussione dei risultati ottenuti

Solo dopo avere raccolto i dati di tutti e cinque gli esperimenti si affronta una discussione con i ragazzi sulla interpretazione da dare ai risultati ottenuti. Esaminando i cinque istogrammi sulle variazioni di massa, del tipo di quelli mostrati nella figura 1, gli studenti fanno le loro osservazioni. Ecco, per esempio, alcune considerazioni fatte in una prima classe dell'anno scolastico 1994-95.

- 1) Molti dati indicano che non c'è variazione di massa.
- 2) Non tutti gli esperimenti danno l'indicazione precedente con la stessa evidenza, perché in alcuni i dati sono più dispersi.
- 3) Bisogna tenere in considerazione le imprecisioni nelle misure.
- 4) Per essere sicuri che c'è stata variazione di massa bisognerebbe che la colonna dei dati fosse spostata rispetto allo zero, per esempio di 0,05 g, e i dati non fossero troppo dispersi.
- 5) Nonostante siano stati usati materiali diversi in situazioni diverse, gli istogrammi risultano simili in quasi tutti gli esperimenti.

Dopo avere registrato le osservazioni e i commenti fatti dagli alunni, si perviene, in sintesi, alla seguente conclusione:

considerando l'incertezza delle misure di massa, pari a uno o due centigrammi, non si può essere sicuri che in qualche esperimento vi sia stata variazione di massa, perché:

- a) non si è trovata una evidente variazione superiore a due centigrammi,
- b) non sono accertabili variazioni più piccole di due centigrammi, a causa dei limiti dello strumento usato.

L'impossibilità di dare una risposta certa, al quesito sulla conservazione della massa nelle trasformazioni fisiche o chimiche, dopo settimane di lavoro, lascia per un attimo perplessi i ragazzi e un po' disorientati. Il loro atteggiamento abituale è quello di chi si aspetta una risposta sicura, qualunque essa sia, al problema posto, soprattutto dopo avere svolto una indagine conoscitiva rigorosa: essi non sono psicologicamente preparati ad affrontare una situazione tuttora incerta, di dubbio sul comportamento della natura.

E' un momento importante dal punto di vista didattico, sia perché offre la possibilità di sottolineare un aspetto nuovo del metodo di indagine della scienza, sia perché costituisce un'occasione di educare la mente alla riflessione critica.

Si tratterà di fare riflettere i ragazzi sul fatto che il loro lavoro non è stato inutile, perché la mancata risposta al quesito non è dipesa da loro, ma dai limiti dello strumento usato: per decidere come stanno le cose, bisognerebbe ripetere le misurazioni nei vari esperimenti con bilance più precise. In tal caso, o si evidenzerebbero le variazioni di massa, oppure ci si ritroverebbe nella stessa situazione di dubbio precedente.

A questo punto non ci vorrà molto a informare i ragazzi che ciò è già stato fatto molte volte, ritrovando sempre la stessa

situazione di dubbio da essi incontrata, anche quando si opera con le bilance più precise oggi esistenti.

In questo senso, e solo in tal senso, si può affermare che la massa si conservi nelle trasformazioni: tale affermazione è nota come "legge di conservazione della massa".

Non si tratta di una legge di validità assoluta, perché essa è garantita solo entro i limiti di precisione degli strumenti più sensibili oggi esistenti.

SOLUBILITA' DELLA CO₂ NELLA COCA-COLA

(a cura di Claudia Bartolotti)

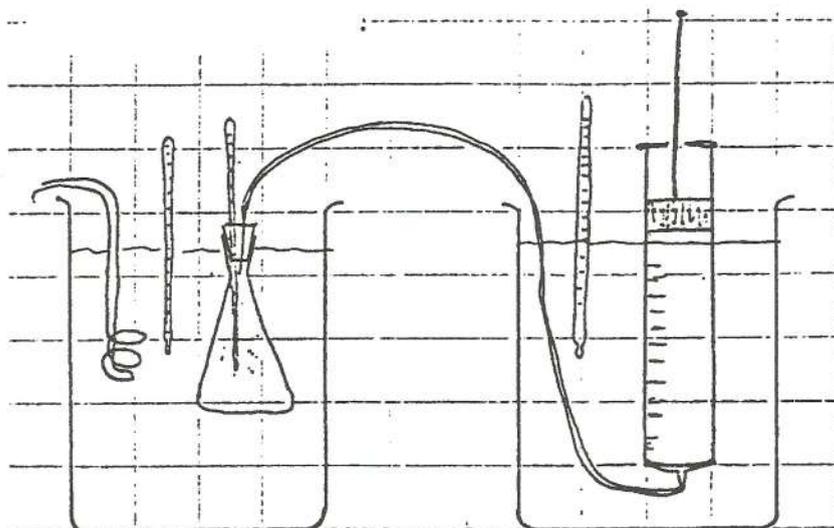
L'esperienza è stata eseguita nel gruppo delle esperienze che riguardano il comportamento delle varie sostanze in soluzioni liquide. Dopo aver osservato che la solubilità di alcuni sali dipende dalla temperatura in modo diverso per ciascuno di essi, si è parlato di solubilità di un gas in un liquido. Un esempio lo si può avere in un prodotto di largo uso come l'acqua gasata e le bibite gasate in genere.

L'esperienza consiste nel misurare l'anidride carbonica che esce da una certa quantità di bibita gasata, al variare della temperatura della bibita stessa.

Materiale :

- beuta da 50 cm³ con tappo di gomma forato per poter introdurre un termometro;
- 3 termometri al °C con scala 0 - 110 °C (uno dei tre può avere la scala anche fino a 50°C);
- 2 becher da 1000 cm³;
- 2 bacchette di vetro;
- siringa da 100 cm³ a tenuta con pistone sufficientemente scorrevole;
- sostegno per pinza da sorreggere la siringa;
- tubicino di gomma, di raccordo tra l'ago e la siringa, lungo circa 30 cm;
- riscaldatore elettrico da 300 - 500 W;
- ghiaccio per raffreddare l'acqua dei 2 becher;
- coca-cola raffreddata alla temperatura di qualche °C, ancora sigillata.

SCHEMA DI MONTAGGIO:



COME OPERARE:

* Versare in entrambi i becher acqua fredda e ghiaccio fino a che la temperatura dell'acqua diventa vicina a 0 °C.

* Immergere la beuta vuota, senza far entrare l'acqua, in un becher, in modo da raffreddarla; sistemare nello stesso becher il riscaldatore (spento), una bacchetta di vetro e un termometro che arriva a 100 °C.

* Collegare la siringa al tubicino e al tappo della beuta, il quale contiene un termometro che arriva a 100 C; sistemare la siringa nell'altro becher in posizione verticale in modo che sia immersa nell'acqua, ma senza che l'acqua entri; porre nello stesso becher una bacchetta di vetro e un termometro. Il pistone della siringa deve essere abbassato (siringa vuota).

* Prendere la coca-cola dal frigorifero, facendo molta attenzione a non scuoterla, aprire delicatamente il contenitore, bottiglia o lattina, (naturalmente uscirà un po' di gas) e versarla nella beuta riempiendola fino a qualche mm dal tappo.

* Mettere il tappo nella beuta facendo attenzione che la coca-cola non tocchi la punta dell'ago della siringa che sporge leggermente sotto il tappo.

* Iniziare il rilevamento dei dati.

* Accendere il riscaldatore elettrico (eventualmente togliere il ghiaccio rimasto) e agitare in continuazione. Se la temperatura dell'acqua cresce troppo in fretta rispetto a quella della coca-cola spegnere il riscaldatore e sempre agitando attendere che la temperatura della coca-cola sia quasi uguale a quella dell'acqua.

* Rilevare i dati del gas contenuto nella siringa quando la temperatura della coca-cola è circa uguale a quella dell'acqua ogni 5 - 8 °C di variazione.

* Controllare che il bagno della siringa si mantenga a temperatura pressoché costante (eventualmente aggiungere ghiaccio).

OSSERVAZIONI e NOTE:

- E' conveniente fare in modo che la temperatura dell'acqua aumenti in modo sufficientemente lento e regolare: questo lo si osserva dalla differenza tra la temperatura del bagno e quella della coca-cola, che deve essere di pochi gradi. Il riscaldatore elettrico ha questo scopo. In commercio si trovano facilmente da 350 o 500 W, ma sarebbe più utile che la potenza fosse inferiore, così si potrebbe usare meno acqua. Si potrebbe usare un variatore di tensione, ma non si

vuole complicare l'esperienza. E' sufficiente allora spegnere il riscaldatore all'occorrenza.

- Il montaggio dell'apparecchiatura è più semplificato alla vista dell'alunno se, invece del becher che contiene la siringa, si usa un recipiente più largo e più basso del becher, il quale contenga la siringa inclinata, senza necessità di supporti: l'acqua avvolge la siringa non completamente, ma ai fini dell'esperienza, se si mantiene l'acqua mescolata, si ottengono gli stessi risultati.

- Lo scopo dell'immersione della siringa nel bagno a temperatura costante è quello di non dover tener conto della legge di Charles e Gay-Lussac per poter affermare che l'aumento di volume del gas è dovuto al gas uscito dalla bibita e per poter considerare il volume di biossido di carbonio come misura della "quantità".

- La bibita versata nella beuta deve riempirla il più possibile, per poter considerare trascurabile la quantità di aria contenuta tra la bibita e il tappo: questa aria, infatti, aumenta il suo volume all'aumentare della temperatura della bibita; deve però rimanere qualche mm al di sotto della punta dell'ago che sporge sotto al tappo, altrimenti, quando la temperatura aumenta, la bibita risale il tubicino e arriva nella siringa.

- L'esperienza deve comunque considerarsi semi qualitativa perché il gas esce dalla bibita, pur in quantità notevolmente minore, anche se la temperatura non aumenta: si osserva che le bollicine che salgono in superficie sono in quantità molto maggiore quando la temperatura sta aumentando, ma non cessano del tutto a temperatura costante: si osserva che il volume del gas uscito resta pressoché costante quando si interrompe l'aumento di temperatura ad un livello già alto, cioè dopo i 50 - 60°C.

- Se la siringa si riempie e continua ad uscire gas, la si estrae un attimo dal bagno, si toglie il tubicino, si abbassa il pistone, poi si rimette il tutto come era e si continua, ricordando di addizionare il volume letto nella siringa a quello raggiunto in precedenza con la siringa piena. La quantità di gas che si misura dipende naturalmente dalle condizioni iniziali della bibita, anche da quanto gas esce al momento dell'apertura per la variazione di pressione alla quale viene sottoposta e per il miscelamento nel momento in cui si versa.

- Il rilevamento dei dati si interrompe quando il volume del gas nella siringa non aumenta più: ciò si verifica quando l'acqua del bagno bolle e la temperatura della bibita è anch'essa vicina al punto di ebollizione; se la bibita inizia a bollire è facile che una parte di essa salga per il tubicino e arrivi alla siringa. Quando non esce più gas, si può anche assaggiare la bibita per avere conferma che in essa non è più rilevabile la presenza del gas che la rende

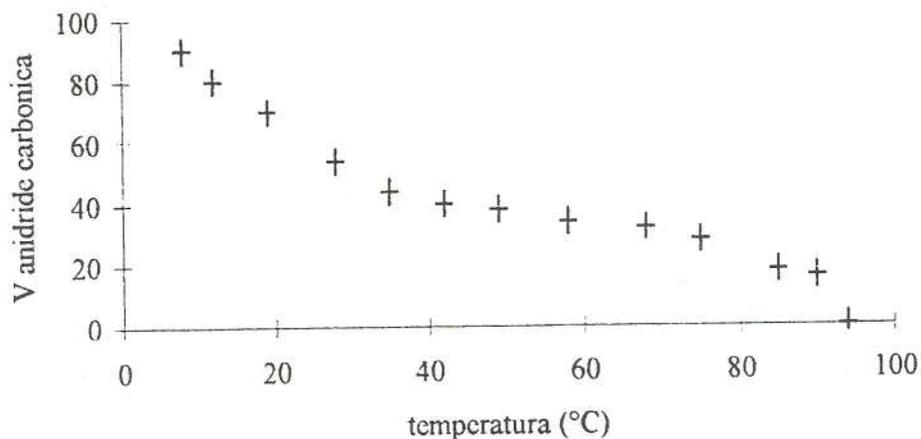
"frizzante". Allora la quantità totale di gas uscito fornisce la misura della quantità di gas presente inizialmente nella soluzione. Si può far precedere l'esperienza da osservazioni puramente qualitative: immergendo una beuta contenente una bibita gassata in un bagno a temperatura via via crescente si osserva che molte bollicine salgono in superficie, immergendo poi la beuta nell'acqua fredda si osserva la brusca interruzione delle bollicine. Non è conveniente eseguire questa operazione durante il rilevamento dei dati perché si interrompe la regolarità dell'uscita del gas (come già detto, la quantità di gas presente in soluzione non dipende solo dalla temperatura).

DATI RILEVATI IN UNA ESPERIENZA.

(I dati di questa esperienza sono stati rilevati in circa 40 minuti)

Temperatura coca-cola (°C)	Volume CO ₂ uscita (cm ³)	Volume CO ₂ in soluz. (cm ³)
8 ± 1		90 ± 4
12 ± 1	10 ± 2	80 ± 4
19 ± 1	20 ± 2	70 ± 4
28 ± 1	36 ± 2	54 ± 4
35 ± 1	46 ± 2	44 ± 4
42 ± 1	50 ± 2	40 ± 4
49 ± 1	52 ± 2	38 ± 4
58 ± 1	56 ± 2	34 ± 4
68 ± 1	58 ± 2	32 ± 4
75 ± 1	62 ± 2	28 ± 4
85 ± 1	72 ± 2	18 ± 4
90 ± 1	84 ± 2	16 ± 4
94 ± 1	90 ± 2	

Curva di solubilità dell'anidride carbonica nella coca cola



DISTILLAZIONE FRAZIONATA

(a cura di Paolo Sacconi)

L'esperienza che verrà illustrata di seguito riguarda un sistema costituito da due liquidi miscibili in tutti i rapporti.

Per rappresentare completamente il sistema, occorre ricorrere ad un diagramma tridimensionale sui cui assi coordinati sono riportate le tre variabili: pressione temperatura e composizione. Tuttavia, essendo l'uso di questi diagrammi scomodo, si preferisce rappresentare in diagrammi bidimensionali la variazione di due delle tre variabili, mentre la terza è tenuta costante.

Per tali sistemi è conveniente considerare, specialmente per i problemi di distillazione frazionata, i diagrammi temperatura di ebollizione - composizione a pressione costante (1 atm). In questi diagrammi si riportano, in corrispondenza della temperatura di ebollizione di ciascuna miscela, la composizione della fase liquida e quella del vapore con essa in equilibrio. Si hanno cioè due curve, una relativa al liquido, l'altra al vapore. La curva superiore rappresenta la composizione della fase vapore, quella inferiore la composizione del liquido.

Queste curve vengono ricavate determinando sperimentalmente la composizione della fase liquida e di quella vapore in equilibrio alle diverse temperature. La regione del diagramma che si trova al di sopra della curva del vapore rappresenta il sistema in una unica fase, quella gassosa. Quella al di sotto la curva del liquido rappresenta il sistema in una unica fase, quella liquida. La regione compresa fra le due curve rappresenta stati in cui le due fasi liquida e gassosa coesistono in equilibrio. Il diagramma riportato in figura 1 è a pressione costante; variando la pressione si ottengono, per ogni valore di questa, diagrammi dello stesso tipo; però varia la posizione delle due curve e precisamente l'area racchiusa fra di esse diminuisce al crescere della pressione.

La miscela liquida di composizione X_l comincia a bollire alla temperatura t ; la composizione del

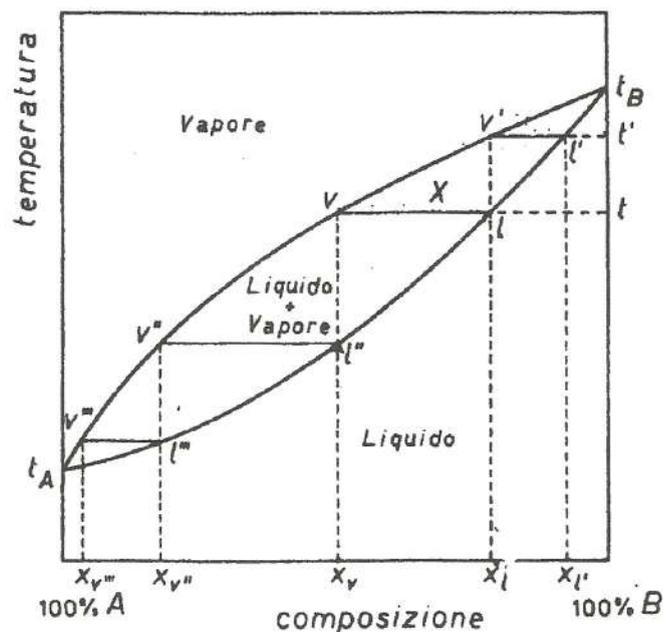


Figura 1 - Diagramma temperatura di ebollizione in funzione della composizione per un sistema a comportamento ideale.

vapore in equilibrio con il liquido a tale temperatura è data dalla ascissa X_v del punto v . Il vapore è più ricco del componente più volatile A, che bolle a temperatura inferiore. Se il vapore viene mantenuto a contatto con il liquido durante l'ebollizione, il liquido si arricchisce sempre più del componente meno volatile B ed il punto rappresentativo della fase liquida si sposta da l a l' , mentre quello del vapore si sposta da v a v' : la temperatura di ebollizione aumenta da t a t' . Quest'ultima temperatura è raggiunta appena tutto il liquido è trasformato in vapore.

Nei processi di distillazione non ci si trova in queste condizioni, perché il vapore viene continuamente sottratto dal sistema e condensato, perciò non si raggiunge mai l'equilibrio.

Se il vapore di composizione X_v viene sottratto e condensato si ottiene un liquido che, portato successivamente all'ebollizione, dà un vapore di composizione $X_{v'}$, questo, sottratto e condensato, produce un liquido che all'ebollizione dà un vapore di composizione $X_{v''}$ e così via fino a che il vapore è costituito dal solo componente A, mentre il liquido residuo è costituito dal solo componente B.

Con questo processo di successive condensazioni e vaporizzazioni è possibile separare i due liquidi A e B allo stato di purezza. Il processo, che prende il nome di distillazione frazionata, è tanto più efficiente quanto maggiore è la differenza di volatilità, e quindi dei punti di ebollizione dei due componenti la miscela liquida, e quanto più i punti di ebollizione sono bassi.

In pratica la separazione mediante distillazione frazionata viene compiuta in colonne, dette di frazionamento o di rettifica, nelle quali le successive vaporizzazioni e condensazioni avvengono automaticamente. Una colonna di frazionamento è essenzialmente costituita da una serie di piatti sovrapposti, comunicanti l'un l'altro come mostrato nella figura 2. Il liquido che si condensa scende dall'alto sulle guglie di vetro mentre i vapori che salgono in tal modo vengono in contatto intimo con il liquido ed essendo questo più freddo, cedono ad esso parte del componente meno volatile. In questo modo i vapori che salgono si arricchiscono sempre più del componente più volatile, mentre il liquido nella caldaia si arricchisce sempre più del componente meno volatile. Il componente più volatile può quindi essere ottenuto in forma pura condensando con un opportuno refrigerante i vapori in cima alla colonna, mentre il componente meno volatile rimane nella caldaia.

Le colonne di frazionamento di tipo di



Figura 2 - Colonna di Vigreux

quella illustrata nella figura 2 non sono convenienti per lavori raffinati di laboratorio, per i quali è meglio usare colonne nelle quali sono impacchettati anelli, o palline, o eliche di vetro ecc. vedi figura 3.

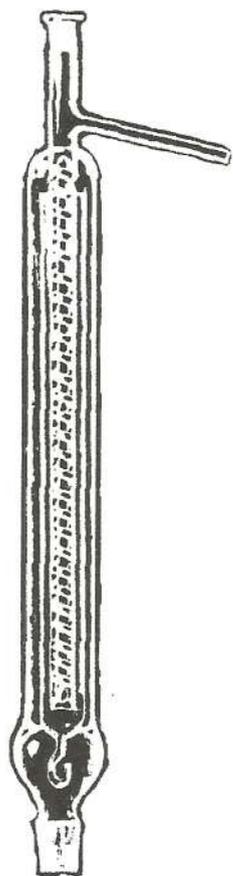


Figura 3 - Colonna di Widmer

Anche se queste colonne non contengono piatti, il materiale contenuto in esse determina la comparsa durante la distillazione di innumerevoli punti in cui il liquido e vapore sono in equilibrio a temperatura via via decrescente dal basso verso l'alto della colonna, in ciascuno di questi punti è come se si avesse una singola distillazione.

L'efficienza della colonna è indicata dal cosiddetto numero di piatti teorici; questo corrisponde al numero di vaporizzazioni e condensazioni successive che sarebbero necessarie in una colonna a piatti ideale per dare la separazione osservata. Ciascun piatto teorico corrisponde ad uno stadio in cui il vapore è in equilibrio con la miscela liquida.

La figura 4 mostra il corretto montaggio dell'apparecchio per la distillazione costituito dalla colonna di frazionamento A, dal dispositivo di raffreddamento B e dall'ampolla di raccolta C.

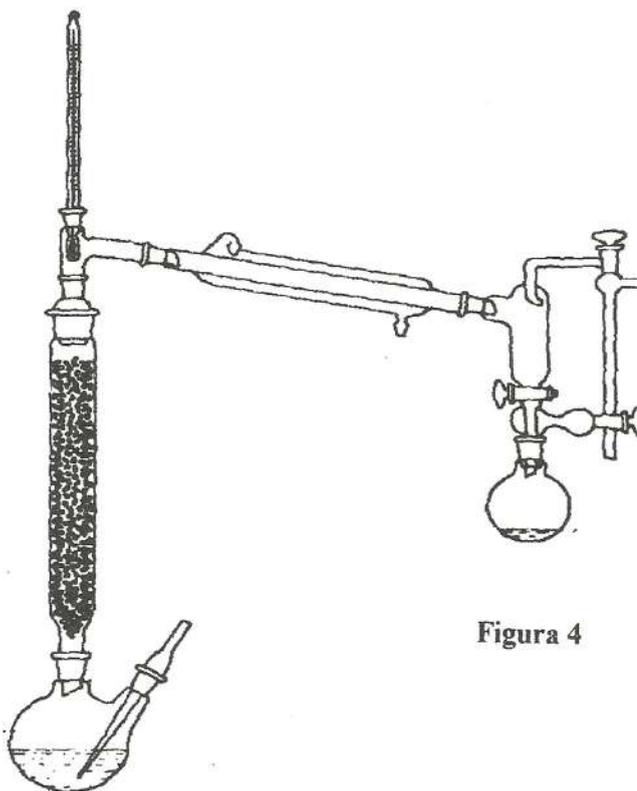


Figura 4

L'apparecchio utilizzato per distillare la miscela nell'esperimento svolto dai docenti che hanno seguito il corso è invece illustrato nella foto di figura 5.

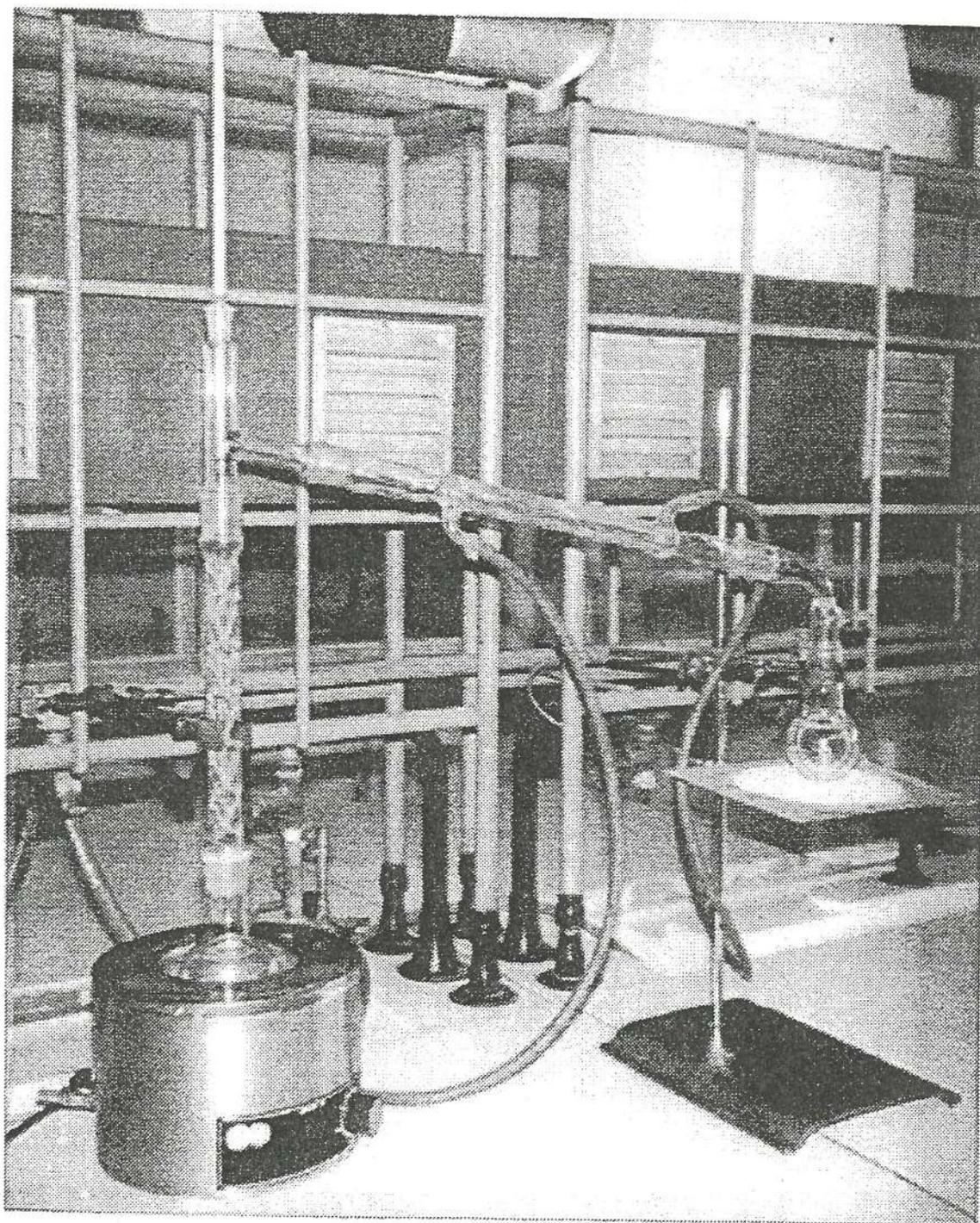


Figura 5

SOLIDIFICAZIONE E FUSIONE

(a cura di Giorgio De Vincenzi)

1. Introduzione

L' esperimento proposto appartiene al gruppo di prove sperimentali su cui è stato costruito il modello sulla costituzione della materia, di fondamentale importanza sia per il chimico, sia per il fisico. E' opportuno chiarire il significato di alcuni termini.

MATERIA: tutto ciò che ha estensione nello spazio e possiede massa.

SOSTANZA: è un tipo particolare di materia caratterizzata da determinate proprietà fisiche intrinseche (o specifiche), le quali si ritrovano in tutti i campioni, in tutti i corpi costituiti da quella sostanza.

Sono proprietà fisiche specifiche: la lucentezza, la trasparenza, la struttura cristallina, la densità, la durezza, il colore, l' odore, il sapore, la conducibilità elettrica, la temperatura di fusione. Le proprietà fisiche possono variare con le condizioni in cui accidentalmente la sostanza si trova (temperatura, pressione, stato di suddivisione). Esempi:

- a) L' acciaio ha proprietà magnetiche che variano con la temperatura;
- b) Il punto di fusione del ghiaccio varia con la pressione;
- c) Una lastra di zinco perde la sua lucentezza quando lo zinco è ridotto a polvere fine.

E' chiaro, perciò, che un confronto tra le proprietà di due o più sostanze ha senso soltanto se si opera nelle stesse condizioni perchè, variando queste, una stessa sostanza presenta in genere proprietà diverse. Le sostanze cambiano anche di proprietà con le trasformazioni.

TRASFORMAZIONI FISICHE: comportano modificazioni temporanee dello stato o delle proprietà di una sostanza.

Ad esempio, l'acqua pura riscaldata fino a 100 °C si trasforma in vapore, che può essere ricondensato allo stato liquido per raffreddamento, ridiventando acqua del tutto identica a quella di partenza.

TRASFORMAZIONI CHIMICHE: comportano modificazioni permanenti ed essenziali nelle proprietà delle sostanze.

Ad esempio, un filo di magnesio portato su una fiamma, a differenza di un filo di platino, si accende di luce viva e si trasforma in una polvere bianca di ossido di magnesio molto diversa dal magnesio originario.

Il chimico non è soltanto interessato allo studio delle trasformazioni chimiche, ma anche a quelle fisiche. Con le trasformazioni fisiche le caratteristiche e quindi anche le condizioni di una reazione chimica, variano. Compito del

chimico è di individuare le situazioni adatte a effettuare le reazioni in genere o a prevenirne o impedirne di dannose. Questa intersezione tra fisica e chimica a livello macroscopico non è casuale, ma un effetto della intersezione tra le due scienze a livello microscopico.

Per completare un breve cenno ai vari sistemi, facciamo le seguenti distinzioni:

a) SISTEMA FISICAMENTE ETEROGENEO: non è uguale in ogni sua parte per quanto riguarda le caratteristiche specifiche (ad esempio, solido + liquido nel cambiamento di stato dell'acqua e il granito).

b) SISTEMA FISICAMENTE OMOGENEO: è uniforme in ogni sua parte nel senso che un qualunque elemento di volume è indistinguibile dagli altri.

Ad esempio, l'ottone (lega di rame e zinco) è fisicamente omogeneo.

L'omogeneità fisica è chiamata anche fase.

c) SISTEMA CHIMICAMENTE ETEROGENEO: un sistema fisicamente omogeneo, se sottoposto ad un cambiamento di stato di aggregazione, rivela la sua eterogeneità, sarà chimicamente fatto di costituenti diversi (ad esempio, l'acqua marina quando viene distillata).

d) SISTEMA CHIMICAMENTE OMOGENEO: si ha quando passando da uno stato di aggregazione all'altro i caratteri rimangono inalterati (come nell'acqua pura). Ci sono tuttavia dei casi di miscele in cui il cambiamento di stato avviene a temperatura costante, ma basta variare la pressione per evidenziare la differenza dei costituenti. Un sistema di questo tipo è detto "specie chimica" (può essere composta).

2. Descrizione esperimento e modalità di esecuzione

Esamineremo la solidificazione di due sostanze: naftalene e paradichlorobenzene, che indicheremo rispettivamente come sostanza A e sostanza B (per i lavori di gruppo).

Il processo di solidificazione è preferibile a quello di fusione in quanto è possibile, con il termometro immerso nel liquido, dare indicazioni uguali per tutta la massa, diversamente da quanto avverrebbe se si dovesse partire dalla fase solida.

Si potrebbe proporre l'esperimento anche con acqua.

AVVERTENZA: i vapori sono infiammabili e tossici. I vapori di benzene, se inalati per lunghi periodi, danneggiano il midollo osseo e inibiscono la formazione dei globuli rossi. I sintomi del danno sono analoghi a quelli della leucemia. Per questo l'uso del benzene, come solvente, è vietato. Anche il naftalene richiede qualche precauzione.

OPERAZIONI:

a) scaldare a bagnomaria, fino a completa fusione, la provetta contenente la sostanza;

b) trasferire la provetta su un sostegno a parte con un termometro immerso nella sostanza liquefatta (il termometro non dovrebbe toccare il fondo);

c) leggere la temperatura ogni 30 secondi e agitare ogni tanto con il termometro (sensibilità di lettura: 0,1 °C);

d) continuare la lettura fino a completa fusione e oltre, quando la temperatura riprende a diminuire;

e) trasferire i grafici ottenuti dai gruppi su lucidi. Al fine di facilitare il confronto tra essi, si consiglia di uniformare i rapporti di scala e di operare una traslazione dell'asse dei tempi. I risultati delle prove, quando sono numerose, potrebbero essere riportati in istogramma.

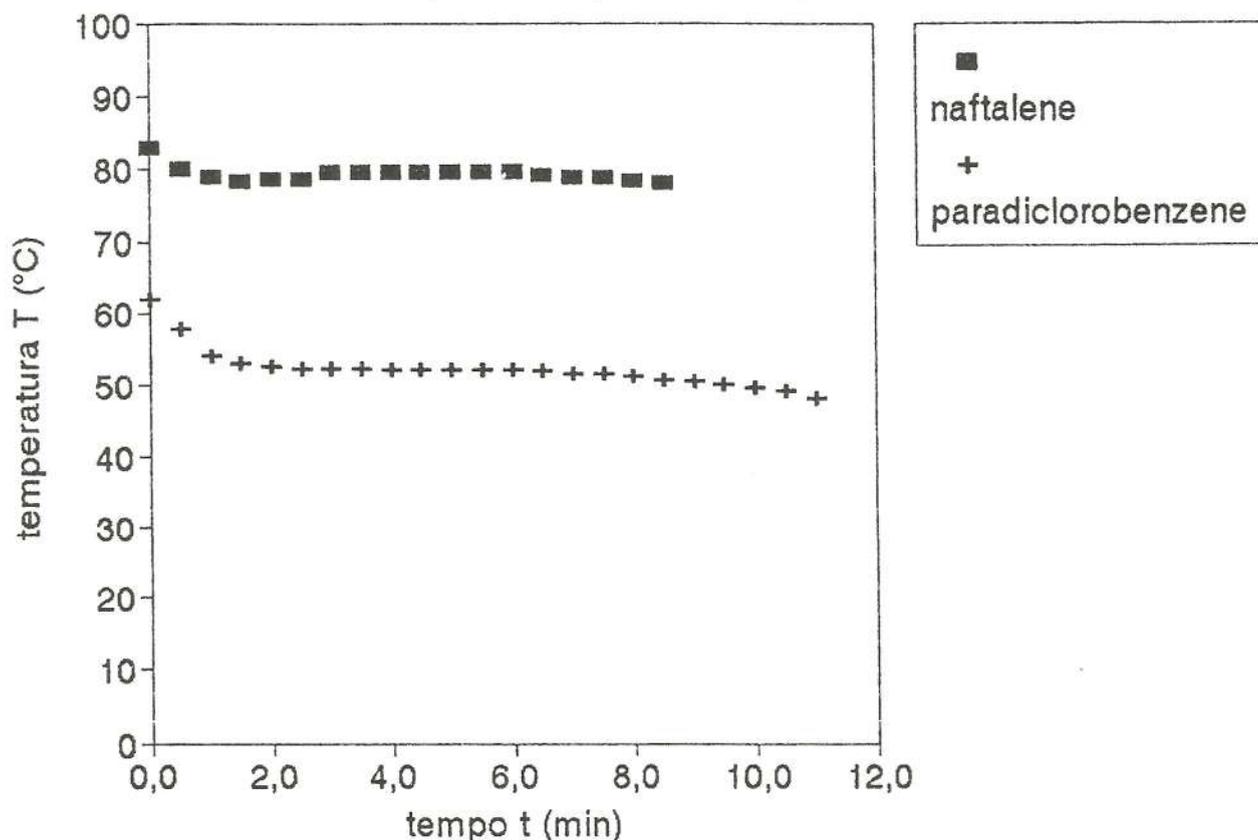
La tabella seguente riporta i dati relativi a naftalene e paradichlorobenzene ottenuti da due diversi gruppi di lavoro e la figura successiva mostra la loro rappresentazione grafica.

TEMPERATURA DI SOLIDIFICAZIONE

t : tempo
Tn: temperatura naftalene
Tp: temperatura paradichlorobenzene

t (min)	Tn (°C)	Tp (°C)
0,0	83,0 ± 0,1	62,0 ± 0,1
0,5	80,0 ± 0,1	58,0 ± 0,1
1,0	79,0 ± 0,1	54,0 ± 0,1
1,5	78,4 ± 0,1	53,0 ± 0,1
2,0	78,6 ± 0,1	52,5 ± 0,1
2,5	78,6 ± 0,1	52,2 ± 0,1
3,0	79,5 ± 0,1	52,2 ± 0,1
3,5	79,5 ± 0,1	52,2 ± 0,1
4,0	79,5 ± 0,1	52,0 ± 0,1
4,5	79,5 ± 0,1	52,0 ± 0,1
5,0	79,5 ± 0,1	52,0 ± 0,1
5,5	79,5 ± 0,1	52,0 ± 0,1
6,0	79,5 ± 0,1	52,0 ± 0,1
6,5	79,2 ± 0,1	51,8 ± 0,1
7,0	78,9 ± 0,1	51,5 ± 0,1
7,5	78,9 ± 0,1	51,4 ± 0,1
8,0	78,4 ± 0,1	51,0 ± 0,1
8,5	78,0 ± 0,1	50,5 ± 0,1
9,0		50,2 ± 0,1
9,5		50,0 ± 0,1
10,0		49,5 ± 0,1
10,5		49,0 ± 0,1
11,0		48,0 ± 0,1

PUNTO DI SOLIDIFICAZIONE grafici temperatura-tempo



3. Osservazioni finali

Dai risultati delle prove si osserva che:

- il punto di fusione non dipende dalla quantità di sostanza, ma dal tipo (ai vari gruppi vanno assegnate quantità diverse). La quantità di sostanza influisce solo sulla velocità di solidificazione. Il processo avviene ad una temperatura ben precisa e non per semplice raffreddamento. Il confronto può essere fatto con la temperatura rilevata del bagnomaria che si raffredda, ma non cambia di stato. Il pianerottolo è una caratteristica della sostanza che solidifica.
- Prima del pianerottolo si può avere una inflessione. Il liquido è sottoraffreddato: basta una agitazione per fare innalzare la temperatura al punto di solidificazione. Anche immettendo un piccolo cristallino si ottiene lo stesso risultato. Quando è sottoraffreddato il liquido non può mai essere in equilibrio con la fase solida (equilibrio metastabile).

c) Il pianerottolo esiste per le sostanze chimicamente pure (specie chimica). Per le altre sostanze il pianerottolo è meno distinguibile e non perfettamente orizzontale. Alcune sostanze (dette amorfe) come la cera, il catrame, il vetro, non presentano pianerottolo.

d) Il punto di fusione può variare con la pressione. In genere un aumento di pressione fa aumentare il punto di fusione per le sostanze che fondendo si dilatano e lo fa abbassare per quelle che fondendo si riducono di volume (ad esempio l'acqua).

Alcune possibili domande:

■ Perché alcune sostanze non presentano pianerottolo?

I solidi amorfi derivano, nella maggior parte dei casi, dal raffreddamento di liquidi ad altissima viscosità. In questi, infatti, proprio per la viscosità molto forte, le molecole hanno poca libertà di movimento e la loro orientazione, richiesta per la formazione dei cristalli, è resa impossibile.

■ Perché nel cambiamento di stato la temperatura rimane costante?

Nella solidificazione il calore che viene ceduto all'ambiente viene equilibrato dal calore emesso nella formazione dei legami coi quali è costruito l'edificio cristallino.

BIBLIOGRAFIA:

- 1) IPS, Introduzione alla Scienza Fisica, Bologna, Zanichelli
- 2) V. Carassiti e P. Chiorboli, Chimica Generale e Inorganica, Bologna
- 3) V. Zanetti, Percorsi di Fisica, Bologna, Zanichelli

INTRODUZIONE OPERATIVA AL CONCETTO DI PRESSIONE
ATMOSFERICA E DETERMINAZIONE DELLA LEGGE DI BOYLE

(a cura di Francesco Dalla Valle)

Premessa

Desidero fare, in premessa, qualche considerazione riguardante, in generale, l'insegnamento delle discipline scientifiche.

Sugli esperimenti e sulla loro importanza nell'insegnamento della fisica sono già state espresse molte opinioni, tutte importanti. A tale proposito, perciò, mi limito a sottolineare che l'esperimento, sia esso quantitativo sia esso qualitativo, possiede una spiccata valenza educativa quando è strettamente integrato nell'attività intellettuale svolta per "costruire" i concetti; l'esperimento avulso da un tale contesto è fortemente sterile.

Mi soffermo, invece, brevemente sull'insegnamento delle discipline scientifiche ed in particolare della fisica, considerato nella sua globalità.

Inizio con l'osservare che, a tutti i livelli scolastici, l'insegnamento delle discipline scientifiche, fatte naturalmente le dovute eccezioni, viene realizzato mediante il puro e semplice trasferimento del "sapere" già ben strutturato, razionalmente coerente e totalmente formalizzato, attraverso le "spiegazioni" che possono anche risultare di buon livello, possono essere esaurienti, comprensibili e non di rado, sostenute anche da un'adeguata attività sperimentale.

Ma, di certo, fatte sempre le dovute eccezioni, esso viene attuato trascurando (o quasi del tutto trascurando) di porre la necessaria attenzione sul come il "sapere" scientifico è stato (e viene) "costruito", privando, in tal modo, gli allievi di un contributo, a mio parere, di fondamentale importanza per il conseguimento di una buona "formazione" scientifica ed anche generale.

I temi non vengono proposti in maniera problematica, ma vengono svolti presentandoli già ben sistemati in un quadro organicamente logico che, limitando enormemente il contributo di elaborazione personale e l'intervento attivo dell'allievo nell'attività educativa, non consente a quest'ultimo di contribuire, in qualche modo, alla "costruzione" del proprio "sapere" e, quindi, non gli consente di acquisire una qualche diretta conoscenza di ciò che è stata (e che è) l'attività intellettuale che sta alla base di ogni conoscenza scientifica.

Anche il ricorso alla storia della scienza, sempre sporadico o assente, rimanendo limitato ad alcuni episodi proposti, assai di frequente, in maniera tale da indurre l'allievo a considerare, con l'altera presunzione di chi possiede la "verità" attuale, la concezione del passato soltanto come "grossolani" errori commessi da persone famose, ma ancora molto sprovvedute, non aiuta l'allievo stesso a comprendere, come è stato "costruito" e come viene "costruito" il sapere scientifico, non avendo egli avuto la possibilità di conoscere quale è stato (ed è) il lungo, intelligente e faticoso lavoro svolto dall'uomo per giungere, con continua gradualità, ed arricchendosi incessantemente nelle varie epoche storiche di contributi in intuizioni, in inventiva, in analisi critiche e risistemazioni, in nuove strumentazioni e nuovi risultati sperimentali, in nuove metodologie operative, ecc., al livello attuale della conoscenza scientifica.

E' evidente, allora, che al termine di un intero corso di studi, a qualsiasi livello scolastico, gli allievi, pur risultando in possesso anche di un buon grado di conoscenza della disciplina, in generale, non conoscono (o conoscono soltanto vagamente) il modo con cui viene "costruito" (ed è stato "costruito") il "sapere" scientifico.

A me sembra giusto che a ciò venga posto un qualche rimedio ed io penso che possa essere considerato un intervento positivo in tal senso la realizzazione dei suggerimenti che qui di seguito indico, e che, tuttavia, a mio parere, non apportano modifiche importanti ai piani di studio che

ogni docente è abituato a seguire.

Infatti, si tratta soltanto di introdurre la trattazione di qualche tema di storia della scienza proposto e sviluppato in maniera tale da far risaltare, con storico rispetto, la qualità positiva di alcune concezioni che, in passato, in base alle conoscenze ed ai dati posseduti allora dagli studiosi, erano state considerate le "verità" della loro epoca, cioè erano considerate i "modelli" interpretativi più ragionevoli della natura. Si tratta di presentare i temi in modo tale da far risaltare che tali "modelli", seguendo un processo che, attraverso le varie epoche, è continuato fino ad oggi e continua tuttora, alla luce di nuove conoscenze sperimentali e concettuali, hanno dovuto subire convenienti adattamenti per risultare capaci di spiegazioni adeguate all'evolversi dell'approfondimento dell'indagine scientifica, oppure hanno dovuto essere sostituiti con altri di più ampia portata sia nei contenuti, sia nelle capacità interpretative. Inoltre si tratta soltanto di prevedere alcuni periodi, anche brevi, in cui i temi vengono proposti in maniera problematica e vengono sviluppati con l'intervento attivo degli allievi, che impegnandosi in un lavoro "autonomo" di "ricerca" (naturalmente guidata dall'insegnante) riescono a pervenire gradualmente alla "costruzione" (logica e coerente con le conoscenze possedute) di un "Modello" interpretativo ragionevolmente corretto dei fenomeni in studio.

Penso che la realizzazione del lavoro previsto da tali suggerimenti sia sufficiente a fornire agli allievi, oltre che la comprensione di come il "sapere" si "costruisce" e è stato "costruito", un patrimonio di esempi personali a cui fare riferimento per riconoscere immediatamente che, quando viene affrontato lo studio di un argomento presentato in maniera già ben strutturata e formalizzata, la ben organizzata strutturazione con cui l'argomento viene proposto è, di certo, il risultato finale di un lungo, laborioso e taciuto lavoro di ricerca.

La realizzazione di tale lavoro contribuisce inoltre, a rendere gli allievi sempre più consapevoli che le conoscenze scientifiche non sono le "verità" sulla natura, ma sono soltanto "Modelli" (costruiti dall'attività intellettuale dell'uomo) che ne interpretano, nel modo migliore, le caratteristiche.

A rafforzare tale consapevolezza può fortemente contribuire anche l'attenzione che l'insegnante pone, quando fornisce normali spiegazioni, nell'evitare di indurre in chi ascolta la convinzione che ciò che sta dicendo deriva direttamente da una verità universale assoluta, e nel sottolineare, invece, sempre ed in modo esplicito, che deriva direttamente, come logica conseguenza, dal "Modello" interpretativo dei fenomeni naturali a cui si fa riferimento, perché è quello accettato come valido.

1.

Il lavoro che ora presento, finalizzato a guidare gli allievi all'acquisizione operativa del concetto di pressione atmosferica ed alla determinazione della legge di Boyle, a me pare che possa essere considerato un esempio concreto di realizzazione delle idee che poco fa ho esposto. A me pare, inoltre, che possa essere considerato un esempio di "costruzione" operativa di conoscenza scientifica, in cui gli esperimenti, quantitativi e qualitativi, sono sempre fortemente e sostanzialmente integrati con le altre attività intellettuali.

Esso è stato pensato per essere realizzato in un biennio liceale ed è stato, ed è, effettivamente realizzato nelle prime classi del liceo scientifico di Lugo, dove ho insegnato per molti anni, nell'ambito di una sperimentazione impostata su principi e su contenuti analoghi a quelli

tipici dell'IPS e del PSSC ed ispirata ai risultati dei lavori svolti nella "sessione di lavoro per un insegnamento coordinato della fisica e delle scienze nel biennio liceale", tenutasi a Castel S. Pietro (Bo) nel maggio del 1973 (1) e diretta dalla professoressa Nella Grimellini Tomasini.

La sperimentazione, che non comprende un capitolo specifico riguardante lo studio della meccanica e si propone tra i suoi obiettivi principali proprio anche quello di realizzare un insegnamento conforme alle idee precedentemente esposte, prevede l'insegnamento della fisica, svolto quasi per intero in laboratorio, per due ore settimanali sia nella prima, sia nella seconda classe, e colloca l'inizio dell'esecuzione del lavoro in questione dopo l'introduzione del concetto di temperatura e subito dopo lo studio di alcuni fenomeni ad essa connessi come, ad esempio, i cambiamenti di stato e le dilatazioni dei solidi e dei liquidi.

Il passaggio da questi ultimi temi a quello qui di seguito trattato avviene, infatti, in modo abbastanza spontaneo, quando gli allievi, dopo aver constatato che le dimensioni dei corpi variano al variare della temperatura, si pongono con molta naturalezza la domanda: "esiste un altro mezzo con cui possono essere variate le dimensioni dei corpi?"

E quando a tale domanda essi rispondono senza difficoltà con l'ammettere che le dimensioni dei corpi possono essere variate anche sottoponendo i corpi stessi a compressioni eseguite con forze opportune.

2.

Si inizia, seguendo proprio l'indicazione degli allievi, indagando sul comportamento dei corpi liquidi (acqua, alcool, olio, etc.).

Si riempie, parzialmente, una siringa con un liquido (ad esempio con acqua). Se ne chiude a tenuta il beccuccio (2) (il conetto porta aghi) e si preme sul pistoncino. Anche variando la forza premente non si notano variazioni apprezzabili di volume. Capita, invece, che quando la forza raggiunge un valore troppo elevato, la siringa si rompe.

La prova prosegue con lo stesso risultato per altri liquidi, e successivamente con l'introduzione di corpi solidi, non solubili, nel liquido contenuto nella siringa. Anche in questi ultimi casi, premendo sul pistoncino a beccuccio chiuso, non si notano variazioni apprezzabili di volume. E' evidente, quindi, che non variando il volume del liquido non varia il volume del solido.

Si può dunque affermare che, operando con la strumentazione esistente in un comune laboratorio scolastico, le prove sperimentali forniscono il seguente risultato: i corpi solidi ed i corpi liquidi non variano le loro dimensioni (il loro volume) quando sono soggetti a forze che li comprimono.

3.

E' abbastanza logico proseguire l'indagine rivolgendo l'attenzione ai corpi gassosi. Ma, a questo punto, assai di frequente sono parecchi gli allievi che debbono ancora, con qualche prova concreta, consolidare la

1 Per una maggiore precisione, il riferimento va fatto al piano B realizzato dal gruppo di lavoro costituito da Bancia, Dalla Valle, Gabanino, Marchetti, Renzetti, Vitaletti, che operò nell'ambito di tale sessione di lavoro.

2 Un tappo di gomma, in cui sia stato praticato con un ago lungo l'asse un foro non passante da parte a parte, costituisce un buon mezzo per turare il beccuccio. Infatti, quando quest'ultimo viene introdotto con forza nel foro, la chiusura è a perfetta tenuta.

completa consapevolezza dell'esistenza di corpi allo stato gassoso, che debbono, cioè, prendere ancora piena coscienza del fatto che i gas siano corpi.

Allo scopo di fornire una di queste prove, viene eseguita la seguente esperienza (fig. 1). Un flaconcino, riempito per circa la metà di acqua, entro cui si introduce un quarto di una pastiglia di Alka Seltzer, viene chiuso con un tappo di gomma attraversato, lungo l'asse, da un tubo di vetro sporgente da entrambi i lati.

Un tubetto di gomma (o di plastica), inserito a tenuta nella parte sporgente di quello di vetro e nel beccuccio di una siringa (scelta abbastanza grande, ad esempio, con un volume di 50 - 100 cm³), il cui pistoncino sia, inizialmente, appoggiato al fondo, mette ovviamente in comunicazione l'interno del flaconcino con l'interno della siringa.

Il gas (la CO₂), che si sviluppa nella reazione dell'Alka Seltzer con l'acqua, si raccoglie nella parte superiore del flaconcino, giunge attraverso il tubetto di gomma alla siringa e preme sul pistoncino che, lentamente ma progressivamente si sposta.

Quando il gas occupa quasi tutto il volume della siringa, il tubetto viene staccato dal beccuccio, che viene chiuso, inserendolo, ad esempio, nel foro di un tappo di gomma analogo a quello descritto nella nota 2 (fig. 2).

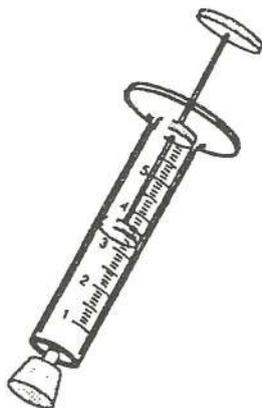


Figura 2

di gas occupa un ben determinato volume, fornisce agli studenti una prova effettiva a sostegno del fatto che i gas sono concretamente corpi. Fornisce, inoltre, la prova sperimentale che i corpi gassosi variano il loro volume quando sono sottoposti a forze che spingono o tirano sulle pareti mobili (il pistoncino nel caso della siringa) del recipiente che li contiene.

Sempre utilizzando il gas contenuto nella siringa, è possibile inoltre



Figura 1

provare che il volume dei gas varia anche con il variare della temperatura, così come avviene per i corpi liquidi ed i corpi solidi. Dopo aver preso nota dell'altezza a cui si trova il pistoncino rispetto alla base della siringa, si immerge quest'ultima a bagnomaria nell'acqua di una vaschetta avente la temperatura diversa da quella ambiente (il fenomeno è ben evidente quando la differenza delle temperature è di almeno una decina di gradi centigradi) e, immediatamente, si nota che il pistoncino lentamente si sposta e si ferma in una posizione chiaramente distinta da quella in cui inizialmente si trovava.

Dunque anche i gas, come i liquidi ed i solidi, variano le loro dimensioni con il variare della temperatura. Quindi anche questa proprietà indica che i gas sono corpi.

4.

Il lavoro prosegue con la ripetizione della precedente prova sperimentale utilizzando una siringa del tutto uguale riempita di un identico volume di aria. Su di essa vengono ripetute le stesse precedenti operazioni compresa l'immersione a bagnomaria nell'acqua di una vaschetta a temperatura diversa da quella dell'ambiente, con risultati del tutto analoghi a quelli precedenti.

Con ciò, non solo resta provato che anche l'aria è un corpo allo stato gassoso, ma dall'andamento delle due prove eseguite, osservate con qualche attenzione, sembra emergere anche il forte sospetto che i due gas rispondano con variazioni di volume uguali a sollecitazioni uguali.

Vale dunque la pena di eseguire un'ulteriore prova sperimentale per verificare se tale identità di comportamento sia vera o, comunque, per confrontare i comportamenti dei due gas quando sono soggetti alle stesse sollecitazioni.

Le due siringhe vengono sistemate, mediante opportuni sostegni, in posizione verticale con i tappi di gomma che ne turano il beccuccio, appoggiati al piano del tavolo (fig. 3).

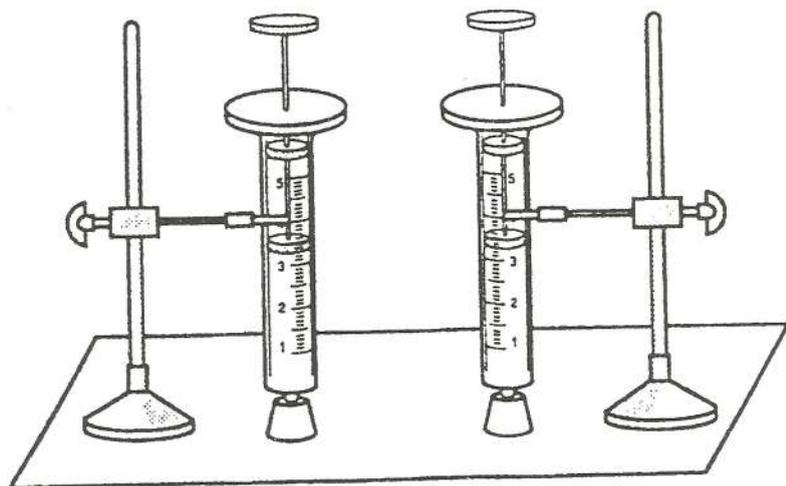


Figura 3

Si pone sul pistoncino della prima siringa e poi sul pistoncino della seconda uno stesso corpo, che in tal modo preme con la stessa forza (il suo peso) sia sul gas contenuto nella prima sia sul gas contenuto nella seconda, e si nota che le variazioni di volume subite dai due gas sono uguali. Vengono, poi, effettuate altre prove ponendo, per comodità, contemporaneamente, su

ciascun pistoncino due corpi identici, scelti opportunamente tra i pesi contenuti in due comuni pesiere, ed, ogni volta, si constata che i volumi dei due gas subiscono le stesse variazioni. Si constata, inoltre, che al crescere della forza premente, il corrispondente volume del gas decresce, e viceversa. Si constata cioè che, tra la forza che preme ed il corrispondente volume occupato dal gas, esiste una relazione del tipo indiretto, e che al variare del volume occupato, il gas agisce sul pistoncino con una forza variabile, che, quando il sistema è in

equilibrio, risulta uguale e contraria a quella con cui i pesi agiscono sul pistoncino.

Da tutto ciò si ricava che i due gas si comportano, (proprio come si era sospettato) in maniera del tutto identica. (3)

5.

Gli allievi che, ormai, hanno capito che esiste una relazione tra il volume occupato dal gas e la corrispondente forza premente sul pistoncino, pensano che sia importante iniziare subito una ricerca rivolta alla determinazione di tale relazione e, nello stesso tempo, notano che le operazioni sperimentali necessarie possono essere eseguite usando soltanto il gas aria, più facile da reperire della CO₂, che si comporta come l'aria.

Prima di iniziare la ricerca, però, è importante che gli allievi, smorzando un poco il loro desiderio di passare subito alla fase operativa, riescano a capire che è necessario eseguire un attento esame critico delle modalità e dei mezzi con cui sono state realizzate le prove sperimentali precedenti.

L'esame, pur considerato inutile da qualche allievo che ritiene già tutto chiaro, mette in evidenza che l'uguaglianza delle due siringhe, con cui sono state eseguite le prove, potrebbe nascondere qualche particolare significativo riguardante il legame esistente tra il volume del gas e la forza agente sul pistoncino. In conseguenza di ciò alla maggior parte degli studenti appare chiara la necessità di eseguire ulteriori prove sperimentali usando due siringhe differenti.

Si prendono, allora, due siringhe diverse, ad esempio, una avente la capacità di 50 cm³ (diametro interno di 2,72 cm) ed una avente la capacità di 100 cm³ (diametro interno di 3,28 cm), (4) e si riempiono parzialmente con lo stesso volume, V, di aria.

Si tura il loro beccuccio con un tappo di gomma analogo a quelli usati in precedenza e si sistemano in posizione verticale sul piano del tavolo così come si è fatto nel caso precedente illustrato in figura 3.

Sul pistoncino di ciascuna siringa vengono posti due corpi uguali (scelti tra i pesi delle due precedenti pesiere). Si ripete tale operazione più volte, cambiando, naturalmente, ogni volta, la coppia dei pesi prescelti.

In corrispondenza ad ogni prova eseguita, vengono misurate le variazioni di volume subite dal gas (l'aria) contenute in ciascuna siringa. Il risultato che si ottiene (sorprendente per parecchi allievi) mostra chiaramente che *forze identiche* (il peso dei due corpi uguali) esercitate sui due pistoncini, *determinano variazioni disuguali di volume*, e, precisamente, si constata che *le variazioni di volume sono maggiori nella siringa che ha il diametro minore*.

Una delle prove effettivamente eseguite con le due predette siringhe contenenti un identico volume iniziale di aria, $V = 50,8 \text{ cm}^3$, ha fornito i risultati riportati nella seguente tabella 1 della pagina seguente.

3 Eseguendo prove sperimentali del tutto analoghe su altri gas si troverebbero gli stessi risultati, cioè si mostrerebbe che tutti i gas si comportano allo stesso modo.

4 Le siringhe utilizzate sono di vetro ed hanno il pistoncino metallico nella cui superficie laterale è stata praticata una lievissima scanalatura parallela alle circonferenze di base. La buona tenuta del gas e l'attrito quasi del tutto trascurabile si ottengono lubrificandole, ad esempio, con olio di vaselina, dopo averne accuratamente pulite le parti interne e lo stantuffo con una qualunque sostanza sgrassante (benzina, trielina, ecc.).

Pesi posti sui pistoncini (Kg)	Diametro siringa d (cm)	Area della sezione $S = \pi d^2/4$ (cm ²)	Altezza iniziale h_0 (cm)	Volume iniziale V_0 (cm ³)	Altezza finale h (cm)	Volume finale V (cm ³)	Variation di altezza $\Delta h = h_0 - h$ (cm)	Variation di volume $\Delta V = V_0 - V$ (cm ³)
0	2,72	5,81	8,75	50,8				
	3,28	8,45	6,00	50,7				
0,500	2,72	5,81	8,75	50,8	7,90	45,9	0,85	4,9
	3,28	8,45	6,00	50,7	5,65	47,7	0,35	3,0
1,000	2,72	5,81	8,75	50,8	7,35	42,7	1,40	8,1
	3,28	8,45	6,00	50,7	5,35	45,2	0,65	5,5
1,495	2,72	5,81	8,75	50,8	6,90	40,1	1,85	10,7
	3,28	8,45	6,00	50,7	5,10	43,1	0,90	7,6

Le prove sperimentali eseguite mostrano, dunque, chiaramente che anche il tipo di siringa utilizzata gioca un ruolo importante sul risultato: continua a valere il fatto che la relazione esistente tra la forza premente ed il volume occupato dal gas è del tipo indiretto, ma è vero anche che le variazioni subite dallo stesso volume di gas contenuto in due siringhe diverse sono differenti, quando sui pistoncini agisce la stessa forza.

Si tratta, ora, di individuare quali siano gli elementi caratteristici delle siringhe che influiscono, in maniera così determinante, sul risultato.

Non occorrono indagini approfondite per porre immediatamente l'attenzione sulle differenti dimensioni dei due diametri e per domandarsi, quindi, "in quale modo tale differenza può influire sul risultato?"

La domanda potrebbe ricevere anche una immediata risposta: basterebbe notare che le forze uguali (i pesi uguali), prementi sui due pistoncini agiscono, in realtà, sulle aree differenti delle sezioni delle due siringhe.

E preferibile, però, per fissare operativamente meglio le idee, rispondere alla domanda mediante il risultato della seguente prova sperimentale.

Su un mucchietto di sabbia, resa soffice rimescolandola con adeguati movimenti, viene appoggiato con una certa delicatezza un mattone: dapprima con la faccia maggiore, poi con quella intermedia ed infine con la minore, constatando, in modo molto evidente, che l'affondamento nella sabbia è, nel primo caso, minore che nel secondo e nel secondo caso è minore che nel terzo.

Dopo questa constatazione, tra gli allievi, tutti chiaramente convinti che la forza che spinge il mattone verso il basso (il suo peso) non si modifica cambiando la faccia di appoggio, ve ne è sempre qualcuno che, notando che la stessa forza, nei tre casi, agisce su tre superfici differenti, riesce a capire che quella stessa forza si distribuisce in modo tale che la "quantità" di forza che "tocca ad ogni cm²", nel primo caso, in cui la superficie di appoggio è quella maggiore, è minore della "quantità" di forza che "tocca ad ogni " nel secondo caso, in cui la

superficie di appoggio è quella intermedia, e che quest'ultima "quantità", a sua volta, è minore della "quantità" di forza che "tocca ad ogni cm²" nel terzo caso, in cui la superficie di appoggio è la più piccola.

Dopo di che, anche tutti gli altri allievi non tardano a rendersi conto che ciò che è importante, una volta che si conosca la forza che agisce, è la determinazione della "quantità" di forza che "tocca" all'unità di superficie.

Indicate, allora, con F la forza agente e con S la superficie sulla quale la forza stessa si distribuisce, si capisce facilmente che la "quantità" di forza, p , che "tocca" all'unità di superficie è data da:

$$p = \frac{F}{S}$$

A p , "quantità" di forza che tocca all'unità di superficie, viene dato, per definizione, il nome di *pressione*.

6.

Impossessatisi, in tal modo, del concetto di pressione, gli allievi non tardano a capire che, anche per quanto riguarda il gas contenuto nelle due siringhe differenti, è la pressione che gioca il ruolo importante (non la forza); riescono, cioè, a capire che le forze uguali agenti su ognuno dei due pistoncini, distribuendosi su sezioni aventi aree differenti (in quanto le siringhe hanno diametri diversi), *provocano sul gas pressioni differenti*.

Riescono a capire, inoltre, che la pressione sul gas è determinata sia dai pesi posti sui pistoncini sia dal peso dei pistoncini stessi.

Pesi sui pistoncini F_1 (kg)	Peso del pistoncino F_2 (kg)	Peso Tot. $F = F_1 + F_2$ (kg)	Diametro siringa d (cm)	Area sezione $S = \pi d^2/4$ (cm ²)	Altezza iniziale h_0 (cm)	Volume iniziale V_0 (cm ³)	Altezza finale h (cm)	Volume finale V (cm ³)	Pressione $p = F/S$ (kg/cm ²)	Variaz. di alt. $\Delta h = h_0 - h$ (cm)	Variaz. di volume $\Delta V = V_0 - V$ (cm ³)
0	0	0	2,72	5,81	8,75	50,8			0		
0	0	0	3,28	8,45	6,00	50,7			0		
0	0,136	0,136	2,72	5,81	8,75	50,8	8,55	49,7	0,023	0,20	1,1
0	0,071	0,071	3,28	8,45	6,00	50,7	5,95	50,2	0,008	0,05	0,5
0,306	0,136	0,442	2,72	5,81	8,75	50,8	8,15	47,3	0,076	0,60	3,5
0,306	0,071	0,377	3,28	8,45	6,00	50,7	5,80	49,0	0,045	0,20	1,7
0,500	0,136	0,636	2,72	5,81	8,75	50,8	7,90	45,9	0,110	0,85	4,9
0,500	0,071	0,571	3,28	8,45	6,00	50,7	5,65	47,7	0,068	0,35	3,0
0,806	0,136	0,942	2,72	5,81	8,75	50,8	7,55	43,8	0,162	1,20	7,0
0,806	0,071	0,877	3,28	8,45	6,00	50,7	5,45	46,0	0,104	0,55	4,7
1,000	0,136	1,136	2,72	5,81	8,75	50,8	7,35	42,7	0,196	1,40	8,1
1,000	0,071	1,071	3,28	8,45	6,00	50,7	5,35	45,2	0,127	0,65	5,5
1,306	0,136	1,442	2,72	5,81	8,75	50,8	7,05	40,9	0,248	1,70	9,9
1,306	0,071	1,377	3,28	8,45	6,00	50,7	5,20	43,9	0,163	0,80	6,8
1,495	0,136	1,631	2,72	5,81	8,75	50,8	6,90	40,1	0,281	1,85	10,7
1,495	0,071	1,566	3,28	8,45	6,00	50,7	5,10	43,1	0,185	0,90	7,6
1,801	0,136	1,937	2,72	5,81	8,75	50,8	6,60	38,3	0,334	2,15	12,5
1,801	0,071	1,872	3,28	8,45	6,00	50,7	4,95	41,8	0,222	1,05	8,9

Tenuto conto di tutto ciò, e tenuto conto del fatto che il pistoncino della siringa da 50 cm³ pesa 0,136 kg e quello della siringa da 100 cm³ pesa 0,071 kg, e del fatto che l' altezza iniziale h₀ e per conseguenza anche il volume iniziale V₀ sono stati misurati tenendo le siringhe in posizione orizzontale, cioè anche in assenza della pressione dovuta ai soli pistoncini, utilizzando i dati contenuti nella tabella 1 e qualche altro dato ricavato da ulteriori prove sperimentali, è stata costruita la tabella 2 riportata nella pagina precedente.

Dalla tabella, emerge con chiarezza che il volume di un gas, indipendentemente dal recipiente (la siringa) in cui è contenuto, varia quando varia la pressione a cui è sottoposto.

Si riconosce, perciò, che la relazione importante da ricercare è quella che intercorre tra la pressione a cui il gas è sottoposto ed il suo volume e non, come si era pensato, quella esistente tra il volume e la forza.

Per realizzare tale ricerca, conviene dapprima costruire la seguente tabella 3, riportando nella prima colonna, in ordine crescente, i dati relativi alla pressione che compaiono nella terzultima colonna della tabella 2 e nella seconda colonna i corrispondenti valori del volume che figurano nella quartultima colonna della stessa tabella 3.

La nuova tabella mette subito in evidenza che la relazione che intercorre tra la pressione, p , ed il volume, V , è di tipo inverso (al crescere della pressione il volume diminuisce). Conviene quindi iniziare con l'indagare se si tratti, eventualmente, di una proporzionalità inversa, verificando se il prodotto, $p \cdot V$, della pressione p , per il corrispondente volume V , sia costante.

I valori di tale prodotto, riportati nella terza colonna della tabella, risultano, però, senza ombra di dubbio, non costanti.

L'indagine può, allora, proseguire riportando i dati a disposizione sul diagramma cartesiano ortogonale (p , V) di figura 4, in cui si è scelto di fissare l'origine coincidente, in ascisse, con lo zero della pressione e, in ordinate, con il valore di

Pressione p (kg/cm ²)	Volume V (cm ³)	$p \cdot V$ (kg·cm)
0	50,8	0
0	50,7	0
0,008	50,2	0,40
0,023	49,7	1,14
0,045	49,0	2,21
0,068	47,7	3,24
0,076	47,3	3,59
0,104	46,0	4,78
0,110	45,9	5,05
0,127	45,2	5,74
0,162	43,8	7,10
0,163	43,9	7,16
0,185	43,1	7,97
0,196	42,7	8,37
0,222	41,8	9,28
0,248	40,9	10,1
0,281	40,1	11,3
0,334	38,3	12,8

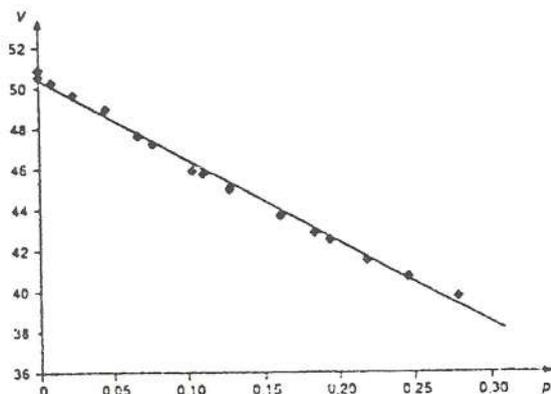


Figura 4

36 cm³ del volume, allo scopo di poter usufruire su ciascun asse, di unità di misura sufficientemente ampie per rendere convenientemente distanziati tra loro i punti rappresentativi dei dati stessi e trarne in tal modo qualche vantaggioso suggerimento nella determinazione della relazione che lega tra loro p e V .

Da tale diagramma, però, l'unica immediata indicazione che si ricava è che tali punti sembrano ragionevolmente appartenere ad una

A questo punto, quindi, ogni possibilità di continuare l'indagine sembra ormai preclusa. Tuttavia prima di abbandonare del tutto ogni speranza, conviene fissare ancora l'attenzione sui dati disponibili nella tabella 3 per ricercare qualche eventuale elemento di regolarità che in precedenza potrebbe essere sfuggito.

Dopo alcune proposte seguite da tentativi infruttuosi ed eseguiti un po' alla cieca, affiora sempre il suggerimento di riportare in un sistema di coordinate cartesiane ortogonali i valori di V e di $p \cdot V$ (in ascisse V ed in ordinate $p \cdot V$).

Si esegue l'operazione (fig. 6), che appare subito molto interessante, in quanto si constata che i punti, le cui coordinate sono V e $p \cdot V$, risultano, con molta evidenza, ben allineati: sembra proprio che questa sia la strada buona che porta alla risoluzione del problema.

Si traccia, perciò, la retta che approssima meglio i punti e su di essa vengono presi due punti di coordinate note, ad esempio il punto A ($V_1, p_1 V_1$), ed il punto B ($V_2, p_2 V_2$), con:

$$\begin{aligned} V_1 &= 49,7 \text{ cm}^3; \\ p_1 V_1 &= 1,14 \text{ kg} \cdot \text{cm}; \\ V_2 &= 41,8 \text{ cm}^3; \\ p_2 V_2 &= 9,28 \text{ kg} \cdot \text{cm}. \end{aligned}$$

Preso, poi, sulla stessa retta un generico punto P di coordinate V e $p \cdot V$, si tracciano per A la parallela all'asse delle ascisse e per B e per P le parallele all'asse delle ordinate, ottenendo in tal modo i due triangoli rettangoli ACB e ADP, aventi, rispettivamente, per cateti i segmenti:

$$\begin{aligned} AC &= V_1 - V_2; \\ BC &= p_2 V_2 - p_1 V_1; \\ AD &= V_1 - V; \\ PD &= pV - p_1 V_1. \end{aligned}$$

I due triangoli sono evidentemente simili. Perciò si ha:

$$\frac{pV - p_1 V_1}{V_1 - V} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2}$$

da cui

$$pV - p_1 V_1 = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} V_1 - \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} V$$

cioè

$$pV + \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} V = p_1 V_1 + \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} V_1$$

ed infine

$$\left(p + \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} \right) V = \left(p_1 + \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} \right) V_1$$

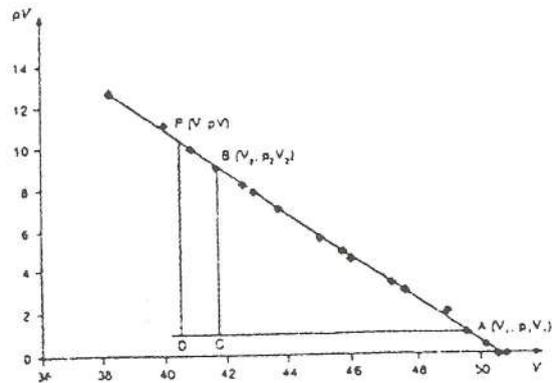


Figura 6

retta. Si traccia, perciò, la retta che li approssima meglio, anche se le conoscenze già acquisite sperimentalmente sul fenomeno provocano la nascita di qualche dubbio sulla sua capacità di rappresentare veramente il legame cercato.

Per dissipare i dubbi si riportano gli stessi dati nel nuovo sistema di coordinate ortogonali di figura 5, sui cui assi, che, questa volta, hanno l'origine coincidente con lo zero della pressione e con lo zero del volume, le unità di misura sono state scelte convenientemente adatte a rappresentare anche il punto di intersezione tra l'asse delle ascisse (pressione) e la retta che approssima meglio i punti rappresentativi dei dati stessi.

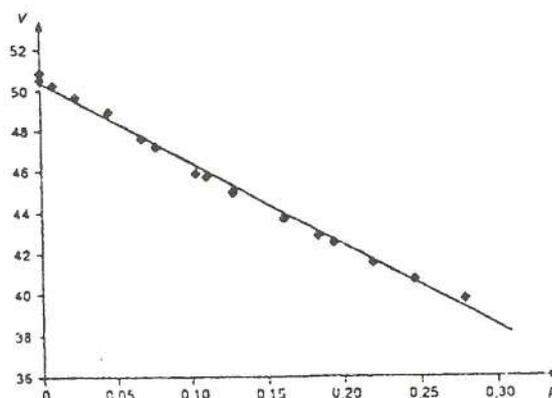


Figura 5

Dal fatto che le coordinate di tale punto di intersezione sono $p = 1,32 \text{ kg/cm}^2$ e $V = 0$ emerge immediatamente che alla pressione $p = 1,32 \text{ kg/cm}^2$ il volume del gas dovrebbe essere nullo, in netto contrasto con quanto ci si aspetterebbe da ciò che già ci è noto. Per confermare che il volume del gas non può essere nullo alla pressione di $1,32 \text{ kg/cm}^2$, si può ricorrere, ad esempio, alla seguente prova sperimentale. Una siringa di plastica⁽⁵⁾ della capacità di 5 cm^3 (diametro interno di $1,2 \text{ cm}$), riempita quasi per intero di aria e con il beccuccio turato, viene sistemata in posizione verticale e sul suo pistoncino viene posto un peso di 2 kg . Il volume dell'aria in tal modo si riduce ad un po' meno della metà di quello iniziale, ma, di certo, non si annulla, nonostante che la pressione a cui il gas è sottoposto sia di $1,77 \text{ kg/cm}^2$ ⁽⁶⁾ chiaramente maggiore di quella $1,32 \text{ kg/cm}^2$ a cui avrebbe dovuto annullarsi.

Dunque, la curva che approssima meglio l'andamento dei punti rappresentativi dei dati disponibili non è una retta. Ma altre indicazioni, suscettibili di un qualche sicuro sviluppo, dalla distribuzione dei punti stessi non si ricavano, anche facendo riferimento al diagramma di figura 4, in cui essi (i punti) sono più distanziati tra loro: l'insieme dei punti costituisce un intervallo troppo ridotto rispetto all'intero campo in cui il fenomeno ha luogo per poter fornire una qualche buona informazione sulla natura della curva che esprime il legame esistente tra p e V .

Si può, allora, pensare di seguire la strada più ovvia, quella di allargare l'intervallo dei dati a disposizione con ulteriori prove sperimentali. Ma si constata immediatamente che il materiale sperimentale a disposizione (le siringhe) non consente, in pratica, la realizzazione di ciò: quando i pesi posti sui pistoncini superano, anche di poco, i 2 kg , la tenuta stagna del gas entro le siringhe viene fortemente compromessa.

⁵ Le pressioni a cui le siringhe di plastica resistono senza rompersi sono, in generale, maggiori di quelle a cui resistono le siringhe di vetro. Le siringhe di plastica aventi il pistoncino di gomma posseggono una buona tenuta del gas ed hanno un attrito abbastanza basso: sono, perciò, adatte per l'esecuzione della prova.

⁶ L'area della sezione della siringa è $S = \pi d^2/4 = \pi(1,2)^2/4 = 1,13 \text{ cm}^2$ e la forza che agisce sul pistoncino, è $F = 2 \text{ kg}$. Perciò la pressione a cui il gas è sottoposto è $p = F/S = 2 \text{ kg}/1,13 \text{ cm}^2 = 1,77 \text{ kg/cm}^2$.

Poiché il termine

$$\frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2}$$

in cui compaiono soltanto i valori noti di V_1 , $p_1 V_1$, V_2 , $p_2 V_2$ (le coordinate dei punti A e B), assume il valore costante

$$\frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2} = \frac{9,28 \text{ kg} \cdot \text{cm} - 1,14 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{49,7 \text{ cm}^3 - 41,8 \text{ cm}^3} = 1,03 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

l'ultima relazione, che esprime proprio il legame esistente tra le variabili p e V , che compaiono soltanto nel primo membro (il secondo è costante), si può anche scrivere:

$$(p + 1,03 \text{ kg/cm}^2) V = (p_1 + 1,03 \text{ kg/cm}^2) V_1 \quad (7)$$

In definitiva, dopo aver eseguito qualche altra prova con volumi iniziali differenti di gas, ma con gli stessi risultati, si può dire che la relazione esistente tra il volume V e la pressione p a cui il gas è sottoposto, è, in generale

$$(p + 1,03 \text{ kg/cm}^2) V = K$$

dove K è una costante il cui valore dipende soltanto dalla quantità di gas con cui è stata eseguita ogni prova.

7.

Ora si tratta soltanto di avviare una nuova ricerca per capire qual è il *significato fisico* della costante $1,03 \text{ kg/cm}^2$. La ricerca appare, dapprincipio, facile, in quanto risulta immediatamente evidente che essa (la costante) ha le dimensioni di una pressione; anzi che essa è una pressione, il cui valore va aggiunto a quello della pressione esercitata sul gas contenuto nelle siringhe dal peso dei pistoncini e dai pesi posti sui pistoncini stessi per ottenere il prodotto

$$(p + 1,03 \text{ kg/cm}^2) V = \text{costante} .$$

In effetti, invece, quando si tratta di capire in che modo e da che cosa tale pressione costante è determinata, le cose si complicano. Si complicano talmente che, dopo parecchi tentativi eseguiti tutti con risultati negativi, inizia a serpeggiare tra gli allievi la sensazione di incertezza e di scoraggiamento sulla possibilità di raggiungere un qualche traguardo positivo che prelude il sopraggiungere dello stato d'animo tipico di chi, ormai sfiduciato, si vede costretto all'abbandono

7 Sostituendo i valori noti di $p_1 V_1$ e di V_1 nel secondo membro, che può essere scritto anche nella forma $p_1 V_1 + V_1 \cdot 1,03 \text{ kg/cm}^2$ si ottiene:

$$(p_1 + 1,03 \text{ kg/cm}^2) V_1 = 1,14 \text{ kg} \cdot \text{cm} + 49,7 \text{ cm}^3 \cdot 1,03 \text{ kg/cm}^2 = 1,14 \text{ kg} \cdot \text{cm} + 51,2 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 52,3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

del lavoro intrapreso.⁽⁸⁾

È questo, perciò, il momento in cui è necessario un intervento sostanziale dell'insegnante, il quale può contribuire alla prosecuzione del lavoro con l'avvio della seguente nuova indagine, che, pur apparendo, per le sue caratteristiche iniziali, *non connessa* con il tema trattato, presenta, abbastanza presto, spunti che destano l'interesse e l'attenzione degli allievi. L'indagine può iniziare con la seguente prova sperimentale: in una vaschetta piena d'acqua viene completamente immerso un bicchiere (fig. 7), e si invitano gli allievi a prevedere ciò che accade quando il bicchiere, che è pieno di acqua, viene preso per il fondo e tirato in su fino a farlo emergere ma senza farne uscire il bordo, dalla superficie libera dell'acqua.

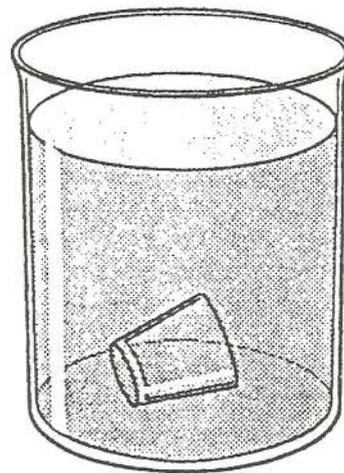


Figura 7

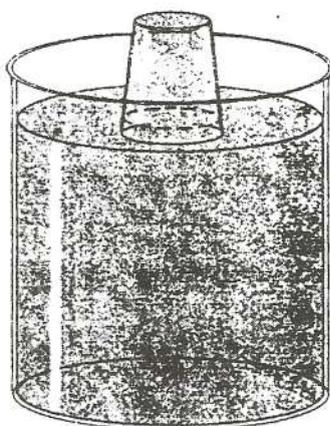


Figura 8

Le previsioni degli allievi risultano incerte od errate, anche se quasi tutti nella scuola media hanno già "studiato" l'esperimento di Torricelli.

Viene allora eseguita la prova e, di fronte al risultato evidente, ma inaspettato, gli allievi manifestano una notevole meraviglia: non si aspettano proprio di vedere che il bicchiere resta pieno finché il suo bordo rimane immerso nell'acqua (fig. 8).

Con un ulteriore sollevamento, che determina la fuoriuscita del bordo dall'acqua, il bicchiere si vuota con il caratteristico gorgoglio bene notato dagli allievi.

Si eseguono altre prove con risultati identici usando vari tipi di bicchieri. Successivamente si eseguono ulteriori prove utilizzando

bottiglie, tra loro diverse per forma e per lunghezza, con risultati del tutto identici a quelli descritti: finché la bocca della bottiglia resta immersa nell'acqua, la bottiglia rimane piena. È interessante, in queste ultime prove, l'osservazione del fenomeno dello svuotamento che avviene in maniera, per così dire, "rallentata", quando la bocca della bottiglia, ulteriormente sollevata, esce dall'acqua. Si nota, infatti, che l'acqua esce con un flusso non continuo, ma interrotto ad intervalli abbastanza regolari di tempo, e che, ad ogni interruzione, la ripresa del flusso avviene soltanto dopo che nella bottiglia è entrata una bolla d'aria.

Si nota, inoltre, che la durata dello svuotamento è più lunga quando il collo della bottiglia è più stretto. Per conoscere poi quale ruolo possa giocare la lunghezza del recipiente sul fenomeno, vengono eseguite altre prove sperimentali con tubi (naturalmente chiusi ad una estremità) di varia lunghezza e di vario diametro, con risultati del tutto identici ai precedenti, anche per quanto riguarda lo svuotamento, che, in particolare, nei tubi stretti dura più a lungo, manifestando bene la caratteristica, già osservata, dell'acqua che esce mentre l'aria entra. A questo punto, gli allievi, che seguono tutte le prove con molta attenzione e partecipazione attiva, sono in grado di fornire la loro "spiegazione

⁸ Quando si pensi che l'uomo ha dato una risposta chiara alla questione trattata soltanto nel 1600 con Evangelista Torricelli, appare del tutto evidente che dagli allievi non si possono attendere suggerimenti risolutivi.

interpretativa" del fenomeno che, in maniera unanime, risulta essere: "il recipiente (bicchiere, bottiglia, tubo, ecc.) si può vuotare soltanto quando il posto dell'acqua che esce viene occupato dall'aria che entra", in sintesi essi affermano: "se non entra l'aria l'acqua non esce".

Tale "spiegazione" del fenomeno, che è del tutto logicamente coerente con le conoscenze attuali da essi possedute, può essere ritenuta valida senza difficoltà: del resto nella storia delle conoscenze umane, fino al 1600, era, praticamente, quella accettata da tutti.

Anzi, dal punto di vista didattico, metodologico e formativo, conviene fornire qualche ulteriore prova a sostegno di tale interpretazione. Si può, ad esempio, eseguire il seguente esperimento, utilizzando una bottiglia a due colli: uno situato nella posizione normale ed uno situato vicino al fondo (tali bottiglie sono molto comuni nei laboratori di chimica). Mediante un tappo di gomma, attraversato lungo l'asse da un tubetto di vetro recante all'estremo un rubinetto, viene chiuso il collo situato vicino al fondo.

A rubinetto chiuso, la bottiglia viene riempita di acqua e, tenendo chiusa la bocca "normale" con una mano, viene capovolta in modo che il suo collo "normale" risulti parzialmente immerso nell'acqua della vaschetta, quando si toglie la mano (fig. 9).

Come nei casi precedenti, finché il rubinetto resta chiuso, la bottiglia rimane piena. Quando, invece, il rubinetto viene aperto e l'aria può entrare, l'acqua scende. Se il rubinetto viene richiuso l'acqua cessa di scendere; se lo si riapre appena un poco, l'acqua ricomincia a discendere lentamente, se lo si apre di più l'acqua discende più rapidamente, ecc.

Resta in tal modo confermato che "se non entra l'aria, l'acqua non esce".

Tenuto conto di ciò e del fatto che ogni prova eseguita, ed eseguibile, con acqua, in laboratorio, ha mostrato che tutti i recipienti, tubi compresi di qualunque lunghezza, restano pieni finché la loro imboccatura rimane entro l'acqua della vaschetta, gli allievi, forse estrapolando troppo facilmente, ma non avendo a disposizione elementi sperimentali per pensare

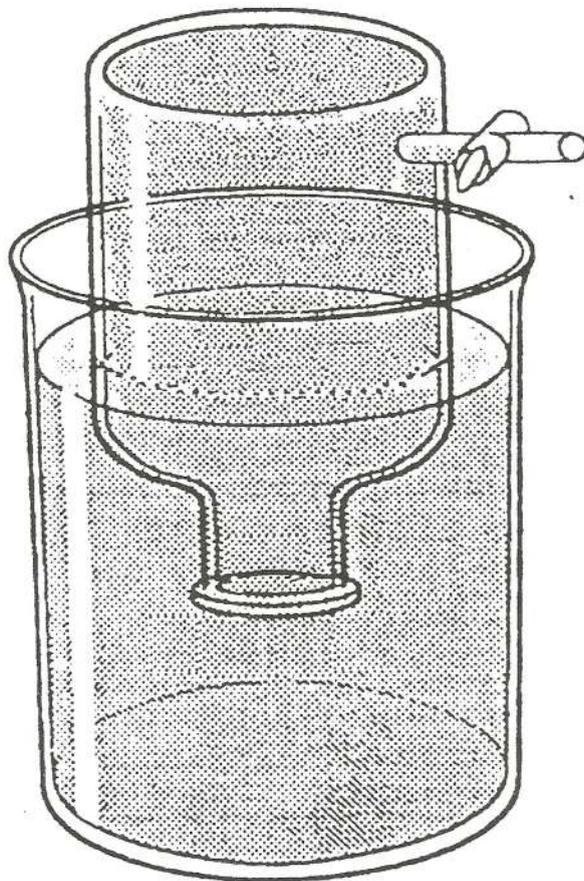


Figura 9

in altro modo, risultano, a questo punto, completamente convinti che, se non entra l'aria, i tubi (o altri recipienti) restano pieni, qualunque sia la loro lunghezza (10 metri, 100metri, ecc.).

Ormai in possesso di tali idee, si può continuare l'indagine per controllare se ciò che vale per l'acqua vale anche per gli altri liquidi: il motivo di tale indagine è evidente per chi già conosce il tema, ma per gli allievi appare soltanto un semplice e inutile controllo di ciò che a loro parere è già noto.

Si eseguono, perciò, altre prove sperimentali usando alcool denaturato e mercurio (almeno per quest'ultimo è necessario utilizzare tubi di lunghezza inferiore a 76 cm, per evitare di imbattersi subito nella

"sorpresa" che il mercurio riserverà).

I risultati, proprio identici a quelli attesi, rafforzano ulteriormente la convinzione, già decisamente salda, che la "spiegazione interpretativa" del fenomeno, riassumibile, ora, in "se non entra l'aria il liquido non esce", è di sicura validità.

8.

Ad ulteriore sostegno di tale convinzione e per provare se possa avere qualche influenza sul fenomeno il riempimento dei tubi con liquidi di natura diversa di quella dei liquidi contenuti nella vaschetta, vengono eseguite le seguenti prove sperimentali.

Si riempie un tubo di alcool, se ne chiude con un dito o con una mano l'imboccatura, e si capovolge in modo che, quando si toglie la mano, il bordo dell'imboccatura risulti immerso nell'acqua, oppure risulti immerso nel mercurio: in ognuno dei due casi il tubo resta pieno.

Vengono ripetute le stesse operazioni con il tubo riempito di acqua capovolto in alcool ed in mercurio; il risultato è il medesimo: il tubo resta pieno, come nel caso precedente.

È, allora, naturale ripetere le prove con il tubo pieno di mercurio. Ma, contrariamente alle attese, quando il tubo viene capovolto con l'imboccatura aperta immersa nell'acqua, accade un fenomeno nuovo: mentre molto rapidamente il mercurio scende nella vaschetta, l'acqua con altrettanta rapidità sale ad occupare il posto da esso lasciato libero nel tubo. Un fenomeno del tutto uguale si verifica quando il tubo, pieno di mercurio, viene capovolto in alcool: il mercurio discende e l'alcool va ad occupare il posto da esso lasciato libero nel tubo.

Non è più valido il "Modello" (cioè non è più valida la "spiegazione interpretativa" precedente): "se non entra l'aria il liquido non esce".

È un momento di crisi: gli allievi appaiono disorientati e per qualche tempo non sanno come muoversi. È una crisi salutare, però, che li porta a capire che il cammino da percorrere per giungere a risultati in qualche modo sicuri è arduo e faticoso, e che le generalizzazioni vanno fatte con molta cautela.

Comunque, appena le idee iniziano a riordinarsi, appare abbastanza naturale proporre la ripetizione delle ultime prove eseguite con i tubi pieni di alcool e di acqua, avendo cura di tingere quest'ultima con blu di metilene per poter osservare meglio i particolari.

Si ripetono, perciò, tali prove, ottenendo un risultato del tutto identico a quello precedente quando si opera con il tubo pieno di alcool capovolto con l'imboccatura aperta entro l'acqua ed entro il mercurio, rispettivamente contenuti nella vaschetta, ma ottenendo un risultato diverso quando si opera con il tubo pieno d'acqua capovolto con l'imboccatura aperta entro l'alcool contenuto nella vaschetta. In quest'ultimo caso, infatti, con l'aiuto della colorazione dell'acqua che favorisce l'osservazione anche di minuscoli particolari, si nota una lenta, continua discesa dell'acqua dal tubo alla vaschetta ed una contemporanea salita dell'alcool all'interno del tubo. Si nota, inoltre, che il fenomeno termina soltanto quando il tubo è totalmente pieno di alcool.

In seguito a quest'ultimo risultato e ad impegnate riflessioni, dapprima un po' vaghe, ma poi sempre più circostanziate e rigorose, si riesce, con soddisfazione, a trovare il modo di porre rimedio all'insuccesso del "Modello", con la formulazione di un nuovo "Modello", che sostanzialmente può considerarsi un'estensione perfezionata del precedente, capace di allargarne la portata fino a spiegare in modo soddisfacente anche il nuovo fenomeno.

In pratica il nuovo "Modello" può essere così sintetizzato: "I recipienti non possono mai essere vuoti. Un liquido (o un gas) in essi

contenuto, può uscire soltanto se il posto lasciato libero viene contemporaneamente occupato da un altro liquido o gas che entra".

E', sostanzialmente, "il vuoto non può esistere". E', sostanzialmente, "la paura del vuoto" con cui, prima di Torricelli, venivano spiegati i fenomeni del tipo di quelli che ora sono stati studiati.

Come conseguenza di tutto ciò, tenuto conto che l'acqua e l'alcool nelle ultime prove sperimentali hanno occupato, all'interno del tubo, il posto lasciato libero dal mercurio, che usciva; che l'alcool ha occupato all'interno del tubo il posto lasciato libero dall'acqua, e che, negli esperimenti precedenti, l'aria andava ad occupare il posto lasciato libero dall'acqua, dall'alcool e dal mercurio, viene, inoltre, abbastanza logico pensare che sia possibile costruire una graduatoria contenente, in una successione ordinata, i gas e i liquidi che hanno, per così dire, la "tendenza" ad andare ad occupare il posto lasciato libero dai gas e dai liquidi che li seguono nella graduatoria stessa.

Si pensa che potrebbero proprio essere eseguite opportune prove sperimentali per costruire una tale graduatoria, ma si pensa anche che è meglio non avviare un tale lavoro, sia perché nel normale laboratorio scolastico non si troverebbero tutti materiali necessari, sia, e soprattutto, perché le prove non aggiungerebbero probabilmente risultati nuovi e sostanziali alle conoscenze già note.

9.

Abbandonata l'idea di passare alla determinazione effettiva sperimentale della citata graduatoria e considerato che il nuovo "Modello" enunciato è ampiamente soddisfacente, ciò che ora conviene fare è la ripetizione dell'esecuzione di alcune precedenti prove sperimentali, sia per verificare osservandole con rinnovata attenzione, se esse evidenzino qualche particolare che, a suo tempo, potrebbe non essere stato osservato, sia per sottolineare con i loro risultati la validità delle conclusioni a cui si è pervenuti.

Si ripetono, dunque, alcune delle prove eseguite in precedenza utilizzando, ora, tubi aventi la lunghezza di almeno un metro. I tubi, riempiti con acqua e alcool e capovolti rispettivamente, con l'imboccatura aperta, entro l'acqua e l'alcool contenuti nella vaschetta, non manifestano particolarità diverse da quelle già note nelle precedenti prove e forniscono risultati del tutto identici a quelli previsti dal "Modello". Quando, invece, il tubo, riempito con mercurio, viene capovolto con l'imboccatura aperta entro il mercurio contenuto nella vaschetta, contrariamente alle attese previste dal "Modello", non rimane del tutto pieno (fig. 10).

Agli allievi il risultato sembra impossibile: pensano che, durante l'operazione sperimentale sia entrata, all'insaputa di tutti, dell'aria. Si rende perciò necessario ripetere la prova con molta cura e con tutti gli allievi che osservano con estrema

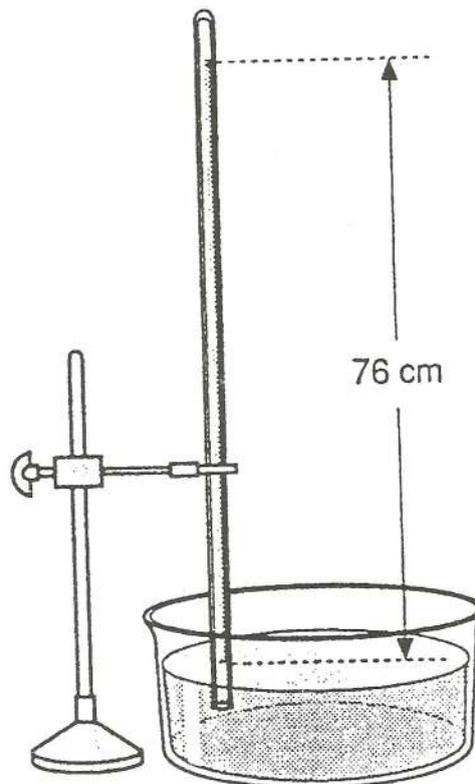


Figura 10

attenzione, cosicché, alla fine, tutti possano essere certi che l'aria non è entrata all'interno del tubo. Ma il risultato è sempre uguale: il tubo non resta del tutto pieno e l'altezza a cui arriva il mercurio è identica a quella notata nel caso precedente ed è circa di 76 cm.

Per avere una conferma che l'aria non è entrata all'interno si può inclinare lentamente il tubo, (naturalmente mantenendone costantemente l'imboccatura all'interno del mercurio della vaschetta) e constatare che il volume non occupato dal liquido *diminuisce progressivamente fino ad annullarsi del tutto* quando viene superata una certa inclinazione.

Se la parte del tubo situata al di sopra del liquido fosse stata occupata dall'aria, il volume di quest'ultima *non si sarebbe mai potuto annullare* (è sufficiente ricordare i primi esperimenti eseguiti con le siringhe, attraverso i quali si è visto che il volume del gas diminuisce col crescere della pressione, *ma non si annulla*, addirittura si è visto che, a pressioni anche non molto elevate, le siringhe si spaccano, ma il volume non si annulla).

Un'ulteriore conferma del fatto che la parte del tubo situata al di sopra del liquido non è occupata dall'aria può aversi ripetendo, con molta rapidità, l'operazione precedente e constatando che, alla rapida inclinazione del tubo, corrisponde un rapido movimento del mercurio, che va così ad urtare il fondo con elevata velocità, provocando il rumore tipico di un colpo di martello: ciò non avverrebbe di certo se entro il tubo vi fosse dell'aria, che comprimendosi attutirebbe il colpo.

Dunque il volume situato al di sopra dei 76 cm di mercurio è occupato da "niente", è vuoto. Dunque esiste il vuoto. Il "Modello" crolla.

Il momento è importante, è un momento di crisi violenta: il contrasto tra il "Modello" e l'esistenza del vuoto è insanabile. Ma è anche uno di quei momenti in cui l'intuizione, la creatività e la fantasia, fortemente stimolate, sono feconde di spunti, freschi ed originali, suscettibili di interessanti sviluppi.

Anche in questo caso, perciò, passata la fase della delusione e del disorientamento, gli allievi si impegnano in numerosi tentativi di elaborazione di nuove, convincenti e logiche interpretazioni dei fenomeni, ma con risultati pressoché nulli, anche in termini di proposte sperimentali (del resto, ciò non può meravigliare, perché non è facile riuscire ad intuire la causa determinante del risultato dell'esperimento illustrato in fig. 10).

Ciò che di certo avviene sempre è che gli allievi si suddividono in due gruppi, uno dei quali sostiene che il "Modello" è ancora "valido" in generale e che soltanto il mercurio fa eccezione (alla prova dei dati sperimentali noti agli allievi, la posizione non può considerarsi del tutto insostenibile), e l'altro, costituito, forse, da ragazzi un po' più maturi e dotati di maggior spirito critico, sostiene invece, che il "Modello" è ormai insoddisfacente e superato, e che è necessario avviare una nuova indagine per raccogliere ulteriori dati sperimentali che consentano di "costruirne" uno nuovo, capace di più ampie interpretazioni.

Normalmente tra i due gruppi si accendono discussioni molto vivaci ma, come si è già detto, con risultati non significativi. Occorre, quindi, un nuovo intervento sostanziale dell'insegnante, che può concretarsi nella seguente prova sperimentale.

Si preparano due tubetti di vetro uguali, chiusi ad un'estremità, di lunghezza abbastanza piccola (non superiore a 15-20 cm) e si riempiono rispettivamente di mercurio e di acqua (possibilmente bollita). E con gli stessi liquidi si riempiono, ordinatamente, anche due becherini.

I due tubetti vengono poi capovolti, operando in maniera tale che, a capovolgimento avvenuto, risultino ancora del tutto pieni e con l'imboccatura aperta immersa nel liquido contenuto nei due becherini, precisamente in maniera tale che l'imboccatura del tubetto pieno di mercurio risulti immersa nel mercurio e quella del tubetto pieno d'acqua

risultati immersa nell'acqua.

I due becherini con i rispettivi tubetti capovolti vengono posti, sotto una campana di vetro, sulla piastra di una pompa pneumatica (fig. 11).

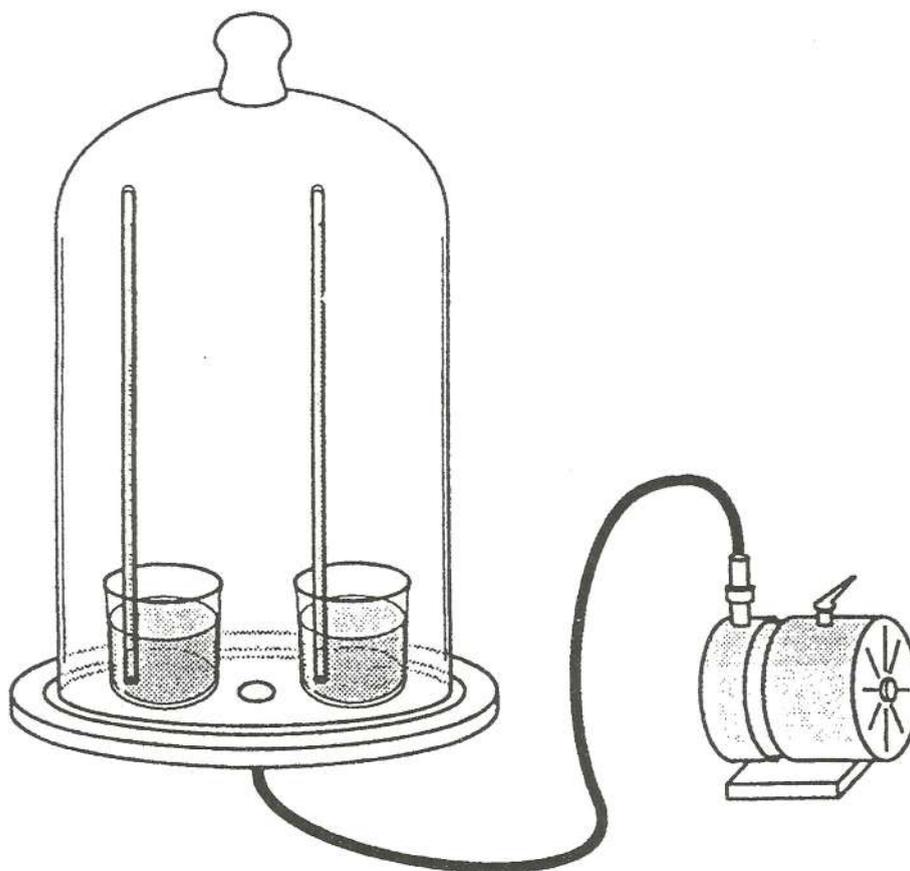


Figura 11

Si mette poi in funzione la pompa, che sottrae aria all'interno della campana, e si attende.

Passato un certo tempo, con qualche sorpresa per gli allievi, si nota che il mercurio inizia a discendere all'interno del suo tubetto, mentre l'acqua no.

Si ferma la pompa per osservare meglio: l'altezza a cui arriva il mercurio resta fissa ed il tubetto contenente l'acqua resta pieno.

I fatti sembrano confermare la posizione assunta dal primo gruppo che, in qualche modo, sembra compiacersi del proprio successo: 'il mercurio fa eccezione, ma il "Modello" è valido in generale'.

La pausa, però, dura poco: la pompa viene rimessa in funzione (vi è sempre qualche allievo che lo suggerisce) ed il mercurio ricomincia a discendere, mentre il tubetto con l'acqua continua a restare pieno. Ma non tarda molto a verificarsi che anche l'acqua nel suo tubetto inizia a discendere. Dunque il mercurio non è un'eccezione: il fenomeno è generale.

È necessario riflettere ancora per capire di più, per capire, ad esempio, in che modo l'aria riesca ad influire sul livello raggiunto dai liquidi all'interno dei tubetti.

10.

Si ricorre ancora all'esperimento. Si apre, appena un poco, la valvola che mette in comunicazione l'interno della campana con l'ambiente esterno: l'aria entra lentamente all'interno della campana e corrispondentemente con uguale lentezza aumenta il livello dei liquidi fino a quando i due tubetti ritornano ad essere (prima quello dell'acqua e poi quello del mercurio) del tutto pieni.

Si richiude la valvola e si rimette in funzione la pompa: il livello dei liquidi ritorna a discendere. Si riapre la valvola, l'aria rientra ed i due tubetti tornano a riempirsi.

Dopo aver osservato alcune volte l'andamento di tali prove, oltre a constatare che il livello nei tubetti dipende dalla maggiore o minore quantità di aria contenuta nella campana, si riconosce, con sicurezza, che l'aria contenuta nella campana è unicamente a contatto con la superficie libera dei liquidi contenuti nei becherini, cioè si riconosce che essa non ha alcun contatto diretto con il liquido contenuto nei tubetti. Quindi si riconosce che l'aria stessa può influire sul livello dei liquidi nei tubetti soltanto attraverso il contatto che essa ha con la superficie libera dei liquidi contenuti nei becherini.

11.

Per cercare di capire in che modo l'aria riesca ad influire sul livello dei liquidi nei tubetti, si può eseguire la seguente esperienza che è del tutto uguale a quella illustrata in figura 11, con un'unica aggiunta: all'interno della campana vengono introdotte anche alcune siringhe, una delle quali sistemata in posizione verticale ad altre sistemate in posizioni varie (oblique ed orizzontali), tutte con il beccuccio tappato e con il pistoncino quasi del tutto a contatto con il fondo. Si mette in funzione la pompa e si osserva: mentre i liquidi nei due tubetti si comportano come nei casi precedenti, i pistoncini delle siringhe si alzano, raggiungendo, istante per istante, innalzamenti praticamente identici, e, quando si ferma la pompa, restano fermi nella posizione in cui si trovano. Quando, poi, viene aperta la valvola e l'aria rifluisce all'interno della campana, i pistoncini si riabbassano fino a tornare nella posizione iniziale, quando attraverso la valvola non entra più aria.

Ciò significa che la quantità di aria esistente inizialmente all'interno delle siringhe, pur restando, durante tutta la prova, costantemente la stessa, ha variato il suo volume, che, come è noto fin dai primi esperimenti, varia soltanto se varia la pressione a cui essa è sottoposta.

È evidente, quindi, che sui pistoncini è stata esercitata una forza variabile e che tale forza è strettamente dipendente dalla quantità di aria contenuta nella campana. Analizzando un po' meglio la situazione, si può notare che sia all'interno delle siringhe e sia all'esterno di esse, entro la campana, c'è aria, e che, quindi, i pistoncini sono a contatto con l'aria da entrambe le parti. Perciò, quando l'aria all'interno della campana diminuisce, ed i pistoncini si alzano, è evidente che l'aria dell'interno della siringa spinge su di essi più di quanto spinge l'aria dall'esterno; quando l'aria all'interno della campana aumenta, ed i pistoncini si abbassano, è evidente che l'aria dall'interno delle siringhe spinge su di essi meno di quanto spinge l'aria dall'esterno. Quando, infine, la quantità di aria all'interno della campana non varia, i pistoncini restano fermi ed è evidente che ciò si può verificare soltanto se l'aria dall'interno delle siringhe spinge su di essi così come spinge l'aria dall'esterno, cioè, in definitiva, è evidente che la pressione a cui si trova l'aria all'interno delle siringhe è identica alla pressione a cui si trova l'aria nella campana.

L'identico comportamento delle siringhe, pur con la loro sistemazione differente (una è, come si è detto, in posizione verticale e le altre in una qualunque posizione non verticale), consente di riconoscere che la pressione dell'aria all'interno della campana è identica in tutte le direzioni.

Da quanto precede appare, dunque, evidente che la pressione, a cui si trova l'aria all'interno della campana, si esercita anche con la stessa intensità sulla superficie libera dei due liquidi contenuti nei becherini. Perciò, si riconosce facilmente che il livello a cui si trovano i liquidi nei due tubetti è strettamente correlato a tale pressione.

Con la seguente prova sperimentale, è possibile determinare le modalità di tale correlazione.

Alcune siringhe, una parte delle quali immerse nell'acqua di una vaschetta (o di un becher avente le capacità di almeno mezzo litro), tutte sistemate in posizioni varie (verticali, orizzontali, oblique) e con i pistoncini quasi a contatto con il fondo ed il beccuccio tappato, vengono poste sulla piastra della pompa pneumatica, sotto la campana di vetro (fig. 12).

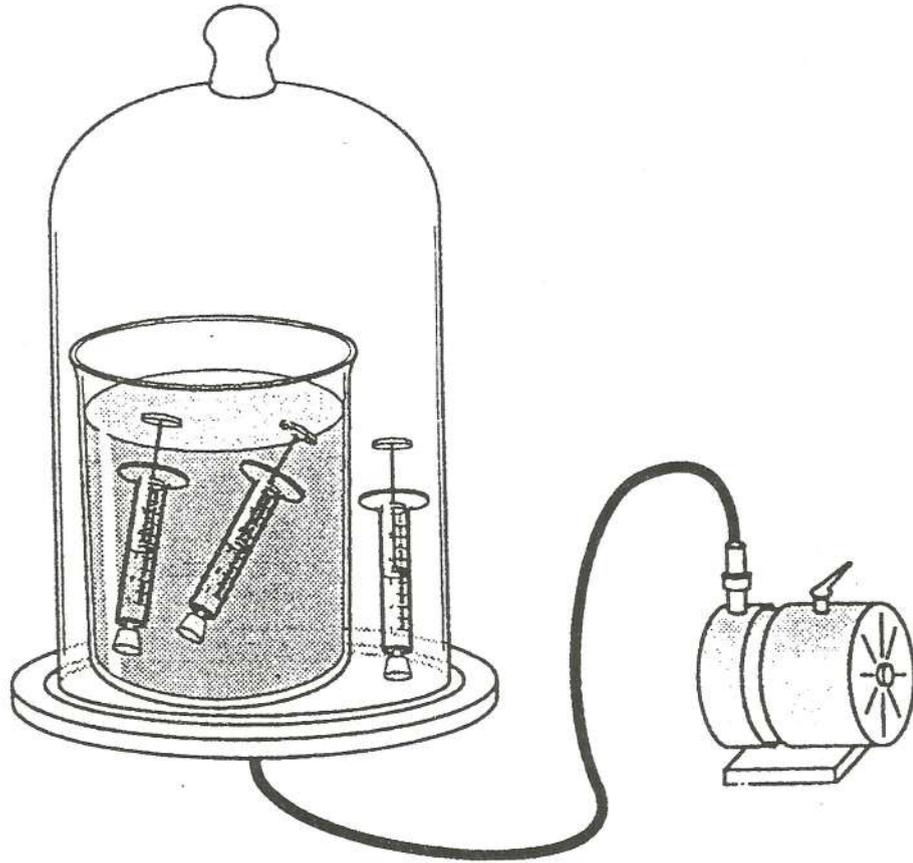


Figura 12

Si mette in funzione la pompa e non solo, come è già noto, si alzano i pistoncini delle siringhe situate al di fuori della vaschetta, ma si alzano anche quelli delle siringhe immerse nell'acqua. Anzi si nota che, praticamente, gli innalzamenti sono identici. Si ferma la pompa e, come negli esperimenti precedenti, si apre la valvola. Nella campana entra l'aria ed i pistoncini si abbassano contemporaneamente sia nelle siringhe situate all'esterno della vaschetta, sia in quelle immerse nell'acqua. Quando, poi, l'aria cessa di entrare, tutti i pistoncini si ritrovano nella posizione iniziale.

Da ciò segue che la pressione esercitata dall'aria sulla superficie libera dell'acqua, si trasmette in tutte le direzioni anche all'interno dell'acqua stessa con identica intensità.

È evidente che dalle prove sperimentali e dai ragionamenti precedenti che ciò che vale per l'acqua, vale anche per ogni altro liquido. È evidente, perciò, che, anche nel caso degli esperimenti di figura 11, la pressione, esercitata dall'aria sulla superficie libera dei becherini, si esercita pure all'interno dei liquidi, con identica intensità, in tutte le direzioni, e quindi anche verso l'alto contro il liquido contenuto nei tubetti.

Ma il liquido contenuto nei tubetti pesa, ed il suo peso sull'area della sezione del tubetto, appartenente al piano della superficie libera nel

becherino, esercita una pressione verso il basso, che, in condizioni di equilibrio, cioè quando il suo livello è costante, è uguale a quella esercitata verso l'alto, attraverso il liquido del becherino, dall'aria contenuta nella campana. Se ciò non fosse il sistema non si troverebbe in equilibrio.

È evidente che ciò vale qualunque sia la condizione in cui si realizza l'equilibrio e quindi vale anche quando, a valvola aperta, non entra più aria nella campana (l'aria entra nella campana finché la pressione all'interno è minore di quella all'esterno). In questa ultima situazione la pressione esercitata dall'aria sulla superficie libera dei liquidi contenuti nei becherini è, ovviamente, la stessa che si esercita quando si toglie la campana.

Dunque l'aria esercita una pressione, che viene denominata pressione atmosferica. Dunque anche l'esperimento descritto nel paragrafo 9 ed illustrato in figura 10, trova la sua ragionevole spiegazione: la pressione esercitata dall'aria sulla superficie libera del mercurio, e la pressione esercitata dal peso del mercurio contenuto nel tubo sulla superficie della sezione di quest'ultimo appartenente al piano della superficie libera, sono identiche.

Basta, quindi, misurare la pressione esercitata dal mercurio sulla sezione per avere la misura della pressione esercitata dall'aria, cioè per avere la pressione atmosferica. Concretamente misurato il peso P (in kg), del mercurio contenuto nel tubo e trovata l'area, S (in cm^2), della sezione del tubo stesso, la pressione, p , esercitata sul liquido contenuto nella vaschetta, identica a quella esercitata dall'atmosfera, è data da

$$p = \frac{P}{S} \text{ in kg/cm}^2.$$

Eseguendo più prove in tempi diversi in uno stesso luogo, si trova che i valori della pressione, p , oscillano, al variare delle condizioni atmosferiche, intorno ad un determinato valore, detto pressione atmosferica normale, che al livello del mare ed in condizioni di tempo normali, vale:

$$p = 1,033 \text{ kg/cm}^2.$$

Eseguendo, invece, più prove, nello stesso tempo ed in tempi immediatamente consecutivi, in luoghi diversi, si trova che i valori della pressione atmosferica variano al variare dell'altezza rispetto al livello del mare.

13.

Si ritorni, ora, a considerare il problema rimasto aperto nelle conclusioni del paragrafo 6 a proposito del significato fisico della costante,

$$\frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_2 - V_1} = 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

che compare nella relazione

$$(p + 1,03 \text{ kg/cm}^2) V = \text{costante},$$

esprime il legame esistente tra il volume V del gas e la pressione p a cui il gas è sottoposto, e si faccia riferimento, in particolare, alle conclusioni del paragrafo precedente.

Si riconsiderino, poi, le situazioni sperimentali descritte nei paragrafi 5 e 6 ed, in special modo, quella in cui i pistoncini delle siringhe si trovano fermi in condizioni di equilibrio, e si tenga ben presente che, come si è visto nel paragrafo precedente, su di essi dall'esterno si esercita sempre la pressione atmosferica.

È evidente, allora, che, in tali condizioni di equilibrio, la pressione, a cui il gas all'interno delle siringhe si trova sottoposto, è data dalla

somma di quella dovuta alla pressione atmosferica, e di quella dovuta al peso dei pistoncini ed ai pesi che di volta in volta vengono posti sui pistoncini stessi. È evidente, cioè, che, contrariamente, a quanto si era supposto nei paragrafi 5 e 6, non è sottoposto soltanto a quest'ultima pressione. Appare, perciò, logico e naturale identificare la costante

$$\frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_2 - V_1} = 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

(già riconosciuta come una pressione costante all'inizio del paragrafo 7) con la pressione atmosferica che, nella giornata in cui è stato concretamente eseguito l'esperimento descritto nel paragrafo 5, si esercitava sui pistoncini delle siringhe in aggiunta alla pressione esercitata dal peso dei pistoncini stessi e dai pesi posti su di essi.

Nella giornata in cui è stato effettivamente eseguito il citato esperimento del paragrafo 5, il valore della pressione atmosferica, allora opportunamente registrato, era di 1,036 kg/cm², che, come si vede, risulta proprio un buonissimo accordo con il valore della costante.

Per completare il lavoro, conviene, perciò, ricorrendo al citato valore della pressione atmosferica ed ai dati relativi ai valori della pressione, p , e del volume, V , figuranti nelle tabelle 2 e 3, costruire la seguente tabella 4.

L'andamento dei dati, che compaiono nella terza e nella quarta colonna della tabella, mostra immediatamente che la relazione che lega tra loro

la pressione p ed il volume V è del tipo inverso. Osservando poi che i valori dei prodotti $p \cdot V$, che compaiono nell'ultima colonna, risultano, costantemente ed in buonissimo accordo, uguali tra loro, appare assai chiaro che la relazione è una proporzionalità inversa.

Dopo aver eseguito qualche altra prova sperimentale utilizzando volumi iniziali

differenti di gas, e dopo aver constatato che per ognuna delle prove eseguite i valori dei prodotti $p \cdot V$ risultano tra loro uguali, appare naturalmente lecito affermare che la legge che lega tra loro la pressione p ed il volume V di un gas è sintetizzabile in

$$p \cdot V = K$$

dove K è una costante, il cui valore dipende dalla quantità di gas considerato.

A quest'ultima relazione viene dato il nome di legge di Boyle.

Pressione pesi e dei pistoncini P_1 (Kg/cm ²)	Pressione atmosferica P_2 (Kg/cm ²)	Pressione totale $P = P_1 + P_2$ (Kg/cm ²)	Volume V (cm ³)	$p \cdot V$ (Kg-cm)
0	1,036	1,036	50,8	52,6
0	1,036	1,036	50,7	52,5
0,008	1,036	1,044	50,2	52,5
0,023	1,036	1,059	49,7	52,6
0,045	1,036	1,081	49,0	52,9
0,068	1,036	1,104	47,7	52,7
0,076	1,036	1,112	47,3	52,6
0,104	1,036	1,140	46,0	52,5
0,110	1,036	1,146	45,9	52,6
0,127	1,036	1,163	45,2	52,5
0,162	1,036	1,198	43,8	52,5
0,163	1,036	1,199	43,9	52,7
0,185	1,036	1,221	43,1	52,6
0,196	1,036	1,232	42,7	52,6
0,222	1,036	1,258	41,8	52,6
0,248	1,036	1,284	40,9	52,6
0,281	1,036	1,317	40,1	52,8
0,334	1,036	1,370	38,3	52,5