

Alcune proprietà dei fluidi con particolare riferimento alle leggi dei gas

Sul sistematico ricorso all'attività sperimentale nell'insegnamento della fisica, è in atto, da tempo, un'interessante ed approfondita indagine da parte di coloro che si occupano di didattica e di formazione scientifica dei giovani. E, da tempo, è unanime la concordanza nel riconoscere la fondamentale e vigorosa azione educativa che scaturisce da tale attività.

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.

Ciò premesso, credo che sia utile soffermarsi brevemente a parlare di come viene realizzato, in genere, l'insegnamento delle discipline scientifiche ed in particolare della fisica.

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". Si privano, 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 dell'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". Quindi, non consente ad esso 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, quasi 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, le concezioni 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.

Egli in tal modo non ha 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.

È 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.

È evidente che a ciò va posto un qualche rimedio, ed io penso che un risultato positivo in tal senso possa essere ottenuto seguendo i suggerimenti che qui di seguito indico. Suggerimenti che, a

mio parere, non apportano modifiche importanti ai piani di studio che ogni docente è abituato a seguire.

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, le qualità positive 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 di progressivo continuo arricchimento, dovuto alle nuove conoscenze sperimentali e concettuali delle varie epoche, hanno dovuto evolversi attraverso convenienti adattamenti per essere idonei a fornire soddisfacenti spiegazioni al progredire del "sapere" scientifico, oppure hanno dovuto essere sostituiti con altri di più ampia portata sia nei contenuti, sia nelle capacità interpretative, quando ogni tentativo di aggiustamento si rivelava vano.

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 istudio.

Penso che un insegnamento eseguito seguendo tali suggerimenti aiuti a comprendere "il come" avviene (e "il come" è avvenuta) la "costruzione" del "sapere" scientifico. Penso che fornisca agli allievi un patrimonio di esempi a cui fare riferimento e gli strumenti intellettuali per essere sempre in grado di rendersi immediatamente conto che, per ogni argomento presentato loro in maniera del tutto strutturata e formalizzata, la ben organizzata strutturazione è il risultato finale di un lungo, laborioso e taciuto lavoro di ricerca.

In altre parole, penso che riesca a rendere gli allievi pienamente consapevoli del fatto che la scienza è stata "costruita" dall'uomo, è una "costruzione" mentale operata dall'intelletto umano che cerca di interpretare nel miglior modo possibile la natura ed i suoi fenomeni. Penso che renda gli allievi consapevoli che il "sapere scientifico" non è costituito di "verità" esprimenti l'insita realtà della natura, ma soltanto di "modelli" (evolventisi nel tempo e costruiti, come si è detto, dall'attività intellettuale dell'uomo) che l'interpretano.

A rafforzare tale consapevolezza può fortemente contribuire anche il modo con cui l'insegnante risponde alle richieste di normali spiegazioni: ai "perché" assai spesso proposti dagli allievi. Egli deve prestare molta attenzione a ciò che dice per evitare di indurre in chi ascolta la **convizione** che ciò che sta dicendo deriva direttamente da una "verità universale assoluta", ma deve, invece, sottolineare, sempre ed in modo esplicito, che ciò che sta dicendo deriva direttamente, come logica conseguenza, dal "**Modello**" ("teoria") interpretativo dei fenomeni naturali a cui si fa riferimento. "Modello" che, tra tutti quelli possibili viene considerato il migliore.

1).

Il lavoro che ora presento, finalizzato a guidare gli allievi alla determinazione sperimentale della legge di Boyle e all'acquisizione operativa di alcune proprietà dei fluidi, in particolare dei gas e del concetto di pressione atmosferica, a me pare che possa essere considerato un esempio concreto di realizzazione delle idee che poco fa ho esposto. A me sembra, in particolare, 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, in gran parte, 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 1973¹, 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. Essa colloca l'inizio dell'esecuzione del lavoro in questione dopo l'introduzione operativa del concetto di temperatura e lo studio di alcuni fenomeni ad essa connessi come, ad esempio, i cambiamenti di stato e le dilatazioni dei solidi e dei liquidi, e dopo l'introduzione, sempre operativa, del concetto di massa e della sua invarianza.

Il passaggio da questi ultimi temi a quello qui di seguito trattato avviene in modo abbastanza spontaneo, quando gli allievi, dopo aver constatato che i corpi solidi ed i corpi liquidi possiedono le "proprietà" di "occupare spazio" (volume), di "possedere una massa" (peso), di variare il volume al variare della temperatura (dilatazione termica), si pongono le domande: i "gas" sono "corpi"? Hanno gli attributi "corporei" dei solidi e dei liquidi?

2)

Si inizia proprio con il ricercare qualche prova concreta idonea a consolidare la completa consapevolezza dell'esistenza di "corpi allo stato gassoso", cioè, del fatto che i gas sono corpi.

Allo scopo di fornire queste prove, vengono eseguite le seguenti esperienze.

a)

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. (fig. 1)

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.

L'attenta osservazione del graduale evolversi di questa parte dell'esperimento mostra già abbastanza bene che i gas "occupano spazio", e, meglio ancora, che, a parità di condizioni, quantità maggiori di gas occupano spazi maggiori e quantità minori occupano spazi minori.

A sostegno di questo risultato, l'esperimento viene proseguito.

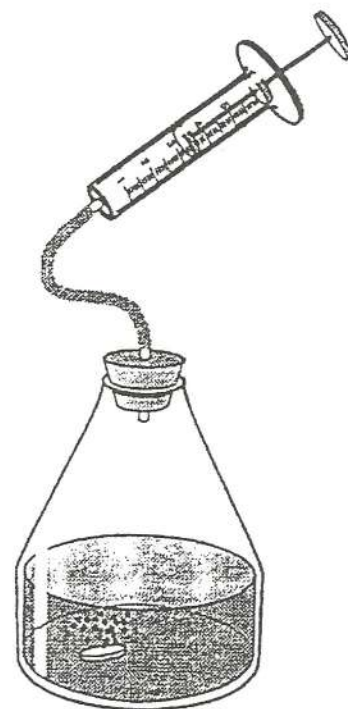


Figura 1

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.

Quando il gas occupa quasi tutto il volume della siringa, il tubetto di gomma viene staccato da quello di vetro e viene inserito nel beccuccio di un'altra siringa avente il pistoncino appoggiato al fondo (fig 2).

Viene poi esercitata una debole, ma duratura, spinta sul pistoncino della prima siringa ed il gas passa, lentamente, tramite il tubetto, nella seconda.

È facile osservare che, durante ogni fase di quest'ultima operazione, la somma dei volumi occupati dal gas nelle due siringhe si mantiene costantemente identica al volume occupato, inizialmente, dal gas stesso nella prima. Tale identità risulta di immediata evidenza nel momento in cui il pistoncino della prima siringa giunge a contatto con il fondo ed il gas si trova tutto nella seconda.

È ovvio che, premendo, in modo analogo, sul pistoncino della seconda siringa la prova si ripete con le stesse caratteristiche e con identico risultato.

Per accrescere l'efficacia didattica, è bene ripetere la prova più volte, premendo alternativamente sul pistoncino dell'una o dell'altra siringa.

È bene, inoltre, ripetere la prova dopo aver sostituito il gas contenuto nella prima siringa con un uguale volume di aria, per poter agevolmente constatare che il risultato è del tutto identico a quello precedente: anche l'aria è un gas che "occupa spazio".

Per rendere più completa l'indagine è bene eseguire anche la seguente prova sperimentale tendente a dimostrare, concretamente, che l'aria ed il gas ottenuto sciogliendo l'Alka-Seltzer nell'acqua sono di natura diversa.

Si preparano due provette contenenti ognuna poco più di un dito di acqua, ed in una di esse si immerge un quarto di una pastiglia di Alka-Seltzer.

Quando, all'interno dell'acqua di quest'ultima, non si avvertono più bollicine, le provette, che agli studenti si presentano di analogo aspetto, sono pronte per poter eseguire la prova.

Un fiammifero acceso, tenuto con un pinza, viene introdotto all'interno di ognuna delle due provette: in una di esse (quella in cui si era immersa la pastiglia di Alka-Seltzer) la fiamma si spegne immediatamente, mentre nell'altra non si spegne subito: la natura diversa dei due gas risulta provata.

La concretezza delle osservazioni fatte costituisce, quindi, una prova tangibile che rende gli allievi consapevoli del fatto che i gas "occupano spazio" e che l'aria è un gas che "occupa spazio".

b)

Per eseguire la seconda prova, occorre poter disporre di una bottiglietta di plastica con tappo a vite a tenuta (ad esempio: serve bene allo scopo una di quelle da 330 cm³ messe in commercio piene di bibite gassate).

All'interno del tappo, con una goccia di colla, viene fissata l'estremità di un filo (lunghezza 5-6 cm) a cui è appeso all'altra estremità una graffetta opportunamente allargata (fig. 3).

Le due parti di una pastiglia di Alka-Seltzer, spezzata a metà, vengono inserite nella graffetta.

Dopo aver versato nella bottiglietta 25-30 g. di acqua, e dopo aver introdotto al suo interno la graffetta con l'Alka-Seltzer, si chiude bene il tappo e si pone il tutto su un piatto di una bilancia avente la capacità di apprezzare variazioni di massa non superiori a 10 mg.

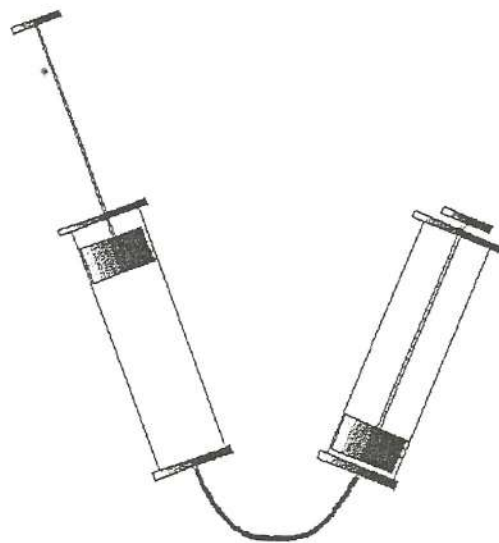


Figura 2

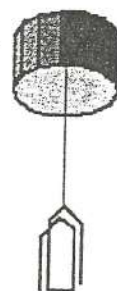


Figura 3

Sull'altro piatto vengono posti pesi (o zavorra) in modo da portare la bilancia in equilibrio (fig. 4).

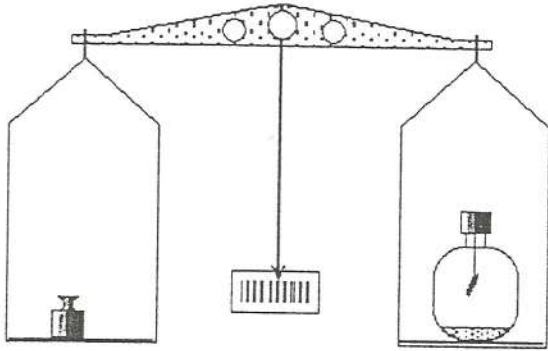


Figura 4

A questo punto è tutto pronto per mostrare che anche i gas hanno una massa.

Si toglie la bottiglietta dal piatto e la si inclina in modo tale che l'Alka-Seltzer si immerga del tutto nell'acqua senza, però, che si bagni il tappo.

Si aspetta che la reazione sia finita (cioè che la pastiglia si sia sciolta per intero e siano cessate in tal modo le bollicine nell'acqua) e si ripone la bottiglietta sul piatto, riottenendo l'equilibrio nella bilancia.

Già questo è un risultato importante: all'interno della bottiglietta si è avuta una reazione chimica con

una trasformazione evidente delle sostanze presenti, ma la massa totale della bottiglietta e del suo contenuto non è variata (è un'altra prova che nelle trasformazioni chimiche la massa non varia).

Per il nostro scopo, però, la prova sperimentale deve proseguire.

Si svita appena un poco il tappo, la tenuta non è più perfetta, il gas dall'interno della bottiglietta fuoriesce lentamente, e lentamente la bilancia si squilibra: il piatto su cui è posta la bottiglietta si alza e l'altro si abbassa.

Dunque il gas ottenuto nella reazione Alka Seltzer-Acqua pesa; tale gas possiede una massa.

Osservazione - La stessa prova sperimentale, forse con qualche maggiore efficacia didattica, può essere eseguita nella seguente versione.

La bottiglietta, preparata come nel caso descritto, viene appesa ad una molla abbastanza sensibile (cioè ad una molla con coefficiente di elasticità abbastanza piccolo, vale a dire ad una molla costituita da un filo di acciaio a sezione piccola e con un buon numero di spire di diametro abbastanza grande).

La molla si allunga fino a fermarsi nella posizione in cui la forza esercitata dalla molla stessa è identica e contraria al peso della bottiglietta e del suo contenuto.

Una lampada accesa, distante circa 10 cm dalla molla, proietta l'ombra di un indice su uno schermo distante circa 50 cm dalla molla stessa (fig. 5).

Con un pennarello si segna sullo schermo la posizione dell'ombra.

Si inclina la bottiglietta in modo tale che, come nel caso precedente, l'Alka Seltzer si emerga nell'acqua.

Al termine della reazione, e a bottiglietta lasciata liberamente appesa alla molla, si constata che l'ombra dell'indice sullo schermo coincide esattamente con il segno tracciato in precedenza.

Si svita, appena un poco, il tappo e si nota che, mentre il gas esce lentamente, l'ombra dell'indice sale lentamente: la bottiglietta "pesa" sempre di meno. Infine, quando il gas cessa di uscire, l'ombra si ferma e la differenza tra le due posizioni dell'ombra fornisce una misura del peso del gas fuoriuscito.

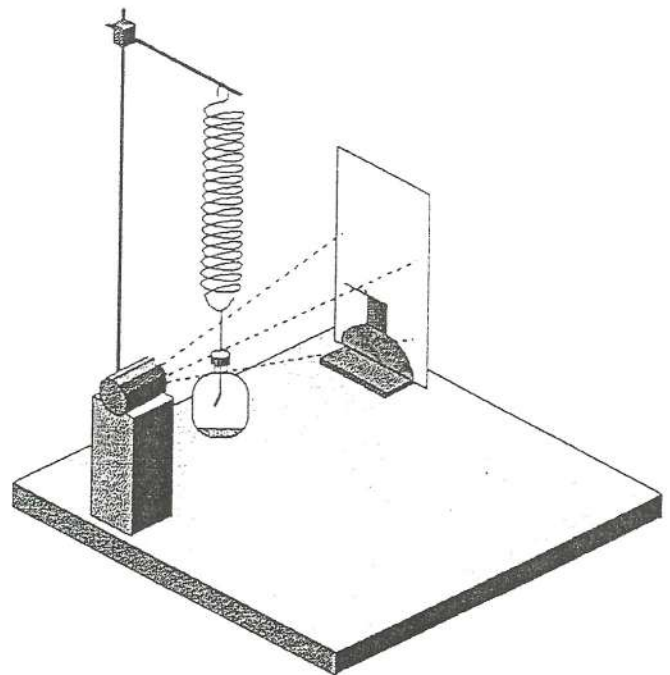


Figura 5

Dunque, il gas ottenuto dalla reazione Alka Seltzer-acqua pesa; quel gas ha una massa.

Per giungere ad una conclusione generale più convincente, conviene eseguire anche il seguente esperimento.

Nel tappo a vite di una bottiglietta analoga a quella precedente viene praticato un foro del diametro di circa 9 mm.

Il foro viene chiuso a tenuta con un tappo di gomma attraversato da un ago di siringa sporgente da entrambi i lati (fig. 6).

Si avvita il tappo e si pone la bottiglietta su un piatto di una bilancia, che, con opportuni pesi (o zavorra) posti sull'altro piatto, viene portata in condizione di equilibrio.

Si toglie, poi, la bottiglietta dal piatto e si innesta nell'ago il beccuccio di una siringa di plastica piena di aria (il volume della siringa deve essere di almeno 100 cm^3).

Si preme sullo stelo collegato al pistoncino, e, quando questo ultimo giunge a contatto con la base, tutta l'aria, che era contenuta nel siringa, è passata all'interno della bottiglietta, e vi resta anche dopo che, mantenendo il beccuccio innestato nell'ago, quest'ultimo viene estratto dal tappo di gomma, che essendo elastico chiude ermeticamente il foro.

Si ripongono sul piatto della bilancia la bottiglietta e l'ago, ed il piatto si abbassa: l'equilibrio si è rotto: l'aria iniettata nella bottiglietta pesa.

Infatti, quando si svita il tappo, l'aria in eccesso esce dalla bottiglia e l'equilibrio ritorna².

Dunque anche l'aria pesa, anche l'aria ha una massa.

Appare dunque ragionevole ammettere che i gas pesano, che i gas hanno una massa.

È interessante ripetere, in una qualunque delle due versioni descritte, il primo dei due precedenti esperimenti (quello con il gas ottenuto dalla reazione Alka Seltzer-acqua) aggiungendo soltanto un palloncino gonfiabile al materiale allora utilizzato.

Scegliendo, ad esempio, di operare con la bilancia, si pone, come nel caso precedente, su un piatto la bottiglietta (preparata secondo le modalità prima descritte) insieme con il palloncino, e con opportuni pesi posti sullo altro piatto si porta la bilancia nelle condizioni di equilibrio.

Si continua ad operare seguendo sempre le modalità del precedente esperimento, e, una volta che sia terminata la reazione tra l'Alka Seltzer e l'acqua, si introduce (e l'introduzione è a tenuta) il collo della bottiglietta nell'imboccatura del palloncino.

La bottiglietta così sistemata, riposta sul piatto, riporta la bilancia nelle condizioni di equilibrio, confermando, come si è visto nell'esperimento precedente, che le reazioni chimiche non determinano variazioni di massa (confermando, cioè che la massa si conserva nelle reazioni chimiche).

Osservato ciò, si svita il tappo, appena un poco, dall'esterno del palloncino. Il gas esce lentamente dalla bottiglietta ed entra nel palloncino gonfiandolo.

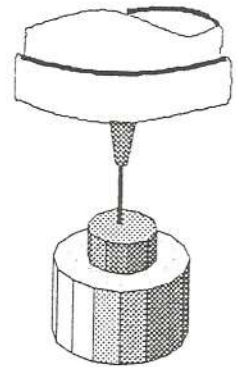


Figura 6

² Se invece di operare in questo modo, vengono posti sull'altro piatto i pesi necessari per ripristinare l'equilibrio, si può conoscere, quantitativamente, qual è, in condizioni normali, il peso dell'intero volume di aria contenuta nella siringa, e quindi, si può conoscere qual è, ad esempio, in condizioni normali, il peso di un metro cubo di aria

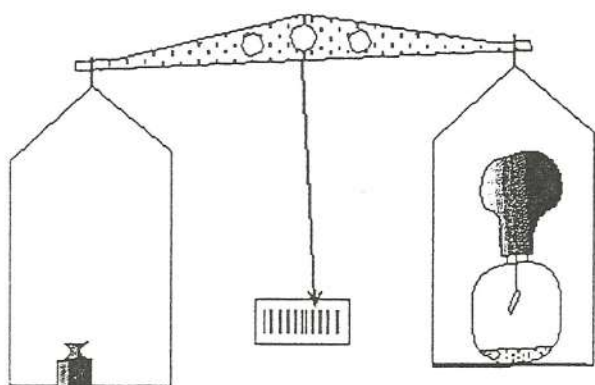


Figura 7

In corrispondenza all'evolversi di tale fenomeno, la bilancia si squilibra lentamente con l'innalzamento del piatto sul quale è posta la bottiglietta e con l'abbassamento dell'altro (fig. 7).

Si osservi che il gas non si è disperso nell'aria così come è avvenuto nell'esperienza precedente, ma è rimasto all'interno del sistema bottiglietta-palloncino, cioè si osservi che tutto ciò che è stato prodotto dalla reazione chimica Alka Seltzer-acqua è ancora contenuto all'interno del sistema bottiglietta-palloncino. Quindi si osservi che, sul piatto su cui si trova la bottiglietta, la massa totale non è variata (ciò si è constatato anche poco più

sopra, prima di svitare il tappo).

Viene, allora, spontaneo porsi la seguente domanda: *“Non essendovi dubbi sul fatto che la massa si conserva nelle reazioni chimiche, come mai la bilancia non è più in equilibrio? Cosa è successo?”*

È un nuovo problema, a cui verrà data una risposta solo più avanti.

Per il momento conviene proseguire nell'indagine sulle proprietà dei gas che ne manifestano la consistenza corporea.

c)

Un'altra prova sperimentale interessante è la seguente.

Si riempiono due siringhe uguali con uguali volumi di aria e di anidride carbonica (il gas prodotto dalla reazione dell'Alka Seltzer con l'acqua).

Osservato che le altezze a cui si trovano i pistoncini rispetto alle basi sono uguali, entrambe le siringhe vengono immerse a bagno maria nell'acqua di alcune vaschette aventi tra loro temperature diverse e diversa da quella ambiente (il fenomeno è ben evidente quando le differenze delle temperature sono di almeno una decina di gradi centigradi).

Ad ogni immersione, si nota, immediatamente, che i pistoncini lentamente si spostano e si fermano in una posizione chiaramente distinta da quella in cui si trovavano inizialmente. Anzi, in più, si nota che, in ogni immersione, le nuove altezze raggiunte dai pistoncini in ogni siringa sono tra loro uguali.

Dunque si può dire che anche i gas, come i liquidi ed i solidi, variano le loro dimensioni con il variare della temperatura, ma, in più, si può dire che le stesse variazioni di temperatura determinano in volumi uguali di gas differenti, le stesse variazioni di volume.

Quest'ultima è un'importante proprietà caratteristica dei gas da tenere sempre ben presente.

d)

Si riprende in considerazione la parte iniziale dell'esperimento descritto nel punto a), e, seguendo le modalità allora descritte, quando il gas occupa quasi tutto il volume della siringa, il tubetto viene staccato dal beccuccio, che viene, subito dopo, chiuso a tenuta³ (fig. 8)

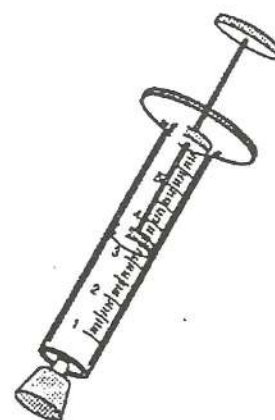


Figura 8

³ 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.

Si agisce, poi, sul pistoncino con una forza anche debole (ad esempio, premendo anche leggermente con un dito) ed il volume varia in maniera evidente. Precisamente diminuisce quando la forza spinge ed aumenta quando la forza tira, ma, in ogni caso, quando la forza cessa il volume riassume il valore iniziale.

Dunque, la prova sperimentale eseguita, oltre a confermare che, come si è già visto nelle conclusioni del precedente punto a), i gas occupano spazio e che, più precisamente, a parità di condizioni, una determinata quantità di gas occupa un ben determinato volume, fornisce la prova sperimentale che i gas 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.

Si ripete, ora, la prova sperimentale con un'altra siringa uguale riempita di un volume uguale di aria e si ottengono risultati del tutto analoghi a quelli precedenti.

Si sistemano, poi, le due siringhe (riempite di volumi uguali di aria e di anidride carbonica), mediante opportuni sostegni, in posizione verticale con i tappi di gomma, che turano i loro beccucci, appoggiati sul piano di lavoro (fig. 9).

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.

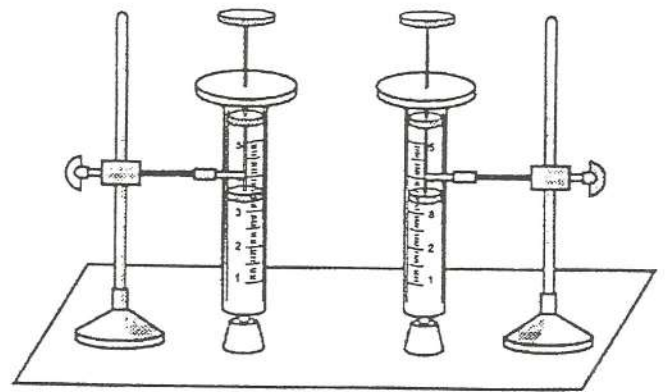


Figura 9

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 di tipo *indiretto*, e che, al variare del volume occupato, il gas agisce sul pistoncino con una forza variabile; forza che, quando il sistema è in equilibrio, risulta uguale e contraria a quella con cui i pesi agiscono sul pistoncino stesso.

Da tutto ciò si ricava che i due gas si comportano in maniera del tutto identica.⁽⁴⁾

La prova può essere completata sospendendo le siringhe come in fig. 10 ed appendendo agli steli, collegati con i pistoncini, corpi identici scelti opportunamente tra i pesi delle due citate pesiere, e constatando, ogni volta, che i volumi dei due gas subiscono identici aumenti ed inoltre che, al crescere della forza che tira sui pistoncini, crescono i corrispondenti volumi occupati dal gas, e viceversa.

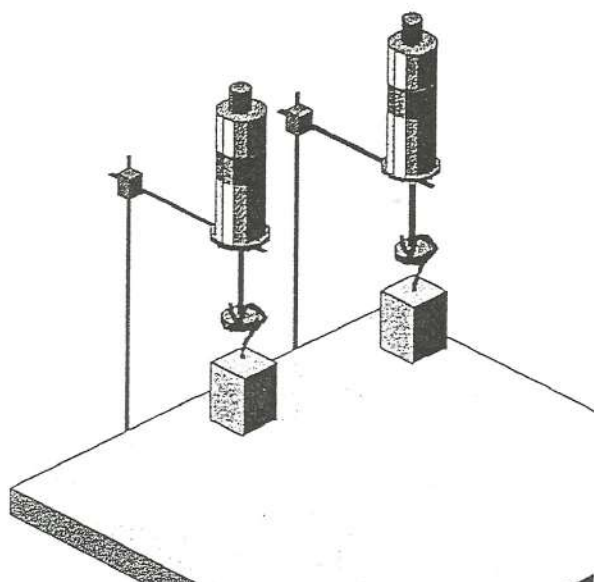


Figura 10

Anche questa prova conferma 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 tirano sul pistoncino.

In ogni caso, però, sia con le siringhe sistemate come in fig. 9, sia con le siringhe sistemate come in fig. 10, quando si tolgono i pesi che agiscono sui pistoncini, il gas contenuto in ognuno di esse (escludendo le irrilevanti differenze dovute al peso dei pistoncini) riassume il valore iniziale.

Da tutto ciò resta confermato che, nelle normali condizioni in cui si opera, i due gas tendono a mantenere costante il loro volume iniziale, ed inoltre si ricava che i due gas si comportano in maniera del tutto identica⁴.

Tutto ciò constatato, si aprono, naturalmente, i due seguenti nuovi problemi, a cui più avanti si

cercherà di dare una soddisfacente risposta sperimentale.

Problema 1- qual è il motivo per cui il gas, all'interno della siringa, tende a mantenere costante il suo volume?

Problema 2- qual è la relazione che intercorre tra il volume occupato dal gas all'interno della siringhe e la forza che agisce sui pistoncini?

3)

Sono tre i problemi enunciati a cui deve essere data una soluzione.

Procedendo con lo stesso ordine con cui si sono incontrati, viene illustrata una possibile soluzione del primo (incontrato nella conclusione del punto b) del paragrafo precedente), il cui enunciato, per comodità, qui di seguito viene ripetuto:

"Come mai nell'esperimento, descritto nell'ultima parte del punto b) del paragrafo precedente, la bilancia *non* resta in equilibrio (fig. 7), nonostante che tutte le sostanze prodotte nella reazione Alka Seltzer-acqua si trovino ancora sul piatto all'interno della bottiglietta e del palloncino?"

La soluzione è, come sempre, di tipo sperimentale.

Ad un sostegno opportunamente alto (almeno 1 metro) viene appesa l'estremità di una molla avente caratteristiche analoghe a quella descritta nella Osservazione inserita nel punto b) del precedente paragrafo.

⁴ 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.

All'altra estremità viene appeso un secchiello (ottenuto costruendo un manico con un filo metallico ad un bicchiere di plastica per caffè. Va bene anche un leggero flaconcino sempre di plastica) ed un anello di filo metallico, così come illustra la fig. 11.

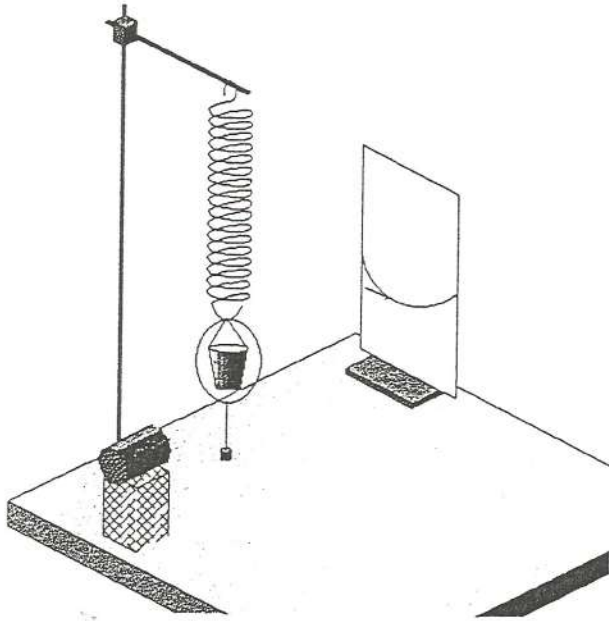


Figura 11

la molla si accorcia (il corpo immerso nell'acqua appare meno pesante: l'acqua lo spinge verso l'alto) fino al raggiungimento di una nuova posizione di equilibrio a cui corrisponde l'ombra della stessa parte dell'anello in posizione più elevata. Col pennarello si segna sullo schermo la nuova posizione dell'ombra (fig. 12).

A questo punto, con una siringa riempita di un volume noto di acqua (è bene che il volume dell'acqua contenuta nella siringa sia maggiore di

All'anello, tramite un filo lungo circa 20 cm, viene appeso un corpo di volume noto (ad esempio un cilindro di diametro e altezza noti).

Con ciò la molla si allunga fino a raggiungere la posizione di equilibrio.

Una lampada accesa posta su un sostegno proietta l'ombra dell'anello su uno schermo verticale (fig. 11) e con un pennarello si segna la posizione di tale ombra sullo schermo stesso.

Si immerge il corpo appeso al filo in un recipiente⁵ contenente acqua e (fig. 12) si trova che

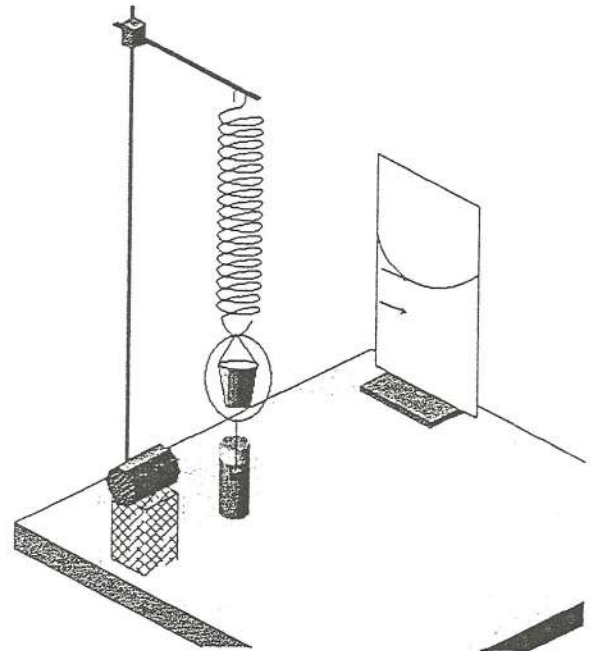


Figura 12

quello del corpo immerso), si immette lentamente dell'acqua nel secchiello ed, in corrispondenza a ciò, si nota che sullo schermo l'ombra si abbassa.

L'operazione prosegue fino a quando (fig. 13) l'ombra va a coincidere con quella iniziale (cioè con il segno tracciato inizialmente sullo schermo).

Il peso dell'acqua versata nel secchiello ha compensato esattamente la spinta verso l'alto ricevuta dal corpo immerso nell'acqua del recipiente.

Si misura, poi (per differenza tra i volumi, iniziale e finale, dell'acqua contenuta nella siringa) il volume

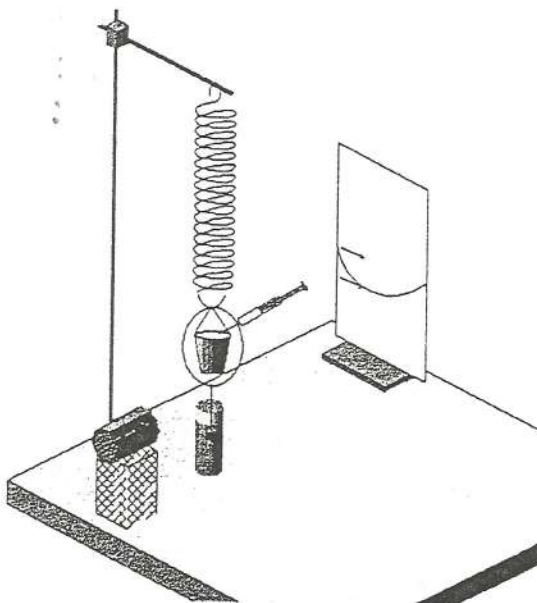


Figura 13

⁵ Se il recipiente è un cilindro graduato, l'innalzamento del livello dell'acqua consente la misura del volume del corpo immerso. In tal caso può essere utilizzato anche un corpo avente una forma geometrica inadatta a calcolarne elementarmente il volume.

dell'acqua versata nel secchiello, con il risultato di constatare che il volume trovato coincide con quello del corpo immerso⁶.

Dunque, si è trovato che la spinta verso l'alto ricevuta dal corpo immerso nell'acqua è uguale al peso di una quantità di acqua avente un volume uguale a quello del corpo stesso.

L'esperimento, or ora descritto, viene identicamente ripetuto sostituendo soltanto l'acqua con un altro liquido (ad esempio con diluente per vernici ed acqua salata).

I)- Quando il corpo appeso alla molla viene immerso in diluente per vernici, il suo innalzamento è minore di quello precedente: l'ombra (segnata di nuovo sullo schermo) risulta più bassa.

Quando, poi, è stata immessa nel secchiello una quantità di diluente sufficiente a far ritornare l'ombra nella posizione iniziale (indicata sullo schermo con il segno tracciato in precedenza), si nota che, anche questa volta, il volume del liquido immesso nel secchiello è identico a quello del corpo.

II)- Quando il corpo viene immerso in acqua salata, invece, l'innalzamento dell'ombra risulta maggiore di quello che si era ottenuto con l'acqua normale.

Di nuovo, però, quando nel secchiello è stata immessa acqua salata in quantità tale da far ritornare l'ombra nella posizione iniziale, si nota che il volume delle acqua salata versata è identico a quello del corpo.

Dunque, nei tre casi esaminati, ciò che non cambia è il volume (sempre identico a quello del corpo immerso) del liquido che occorre versare nel secchiello per riportare l'ombra nella posizione iniziale.

Dunque si può affermare che *la spinta verso l'alto ricevuta dal corpo immerso in un liquido è uguale al peso di una quantità di quel liquido avente il volume uguale a quello del corpo stesso* (principio di Archimede).

Ritornando ai dati ricavati dai tre esperimenti eseguiti, ciò che cambia, invece, è l'innalzamento dell'ombra dovuto all'immersione del corpo nei tre liquidi differenti. Innalzamento che, per chiarezza, è :

maggiore con l'acqua salata;
intermedio con l'acqua normale;
minore con il diluente per vernici.

Ci si può, allora, porre la domanda: "in che relazione sta questo fenomeno con le caratteristiche dei liquidi utilizzati?"

La seguente prova sperimentale consente una risposta esauriente alla domanda.

Alla molla utilizzata nel precedente esperimento viene appeso un flaconcino ed usando la stessa lampada e lo stesso schermo, si segna su quest'ultimo con un pennarello, la posizione iniziale dell'ombra (fig. 14).

Si riempire il flaconcino di diluente per vernici. La

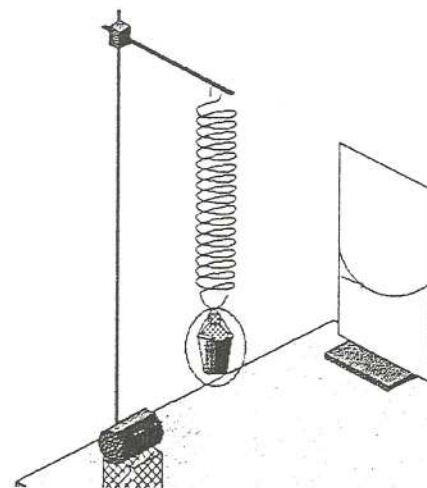


Figura 14

⁶ Se il recipiente, in cui il corpo è immerso, è un cilindro graduato, l'esperimento può essere realizzato come segue. Si aspira con la siringa dal cilindro graduato una certa quantità di acqua, che viene totalmente immessa nel secchiello. Si ripete questa operazione più volte e via via che l'acqua passa dal cilindro al secchiello l'ombra sullo schermo si abbassa. Quando l'ombra va a coincidere con quella iniziale si interrompe l'operazione e si nota che il livello dell'acqua nel cilindro coincide con quello che l'acqua aveva prima dell'immersione del corpo. Dunque l'acqua contenuta nel secchiello ha lo stesso volume del corpo.

molla si allunga e l'ombra si ferma più in basso. Sullo schermo viene segnata quest'ultima posizione dell'ombra.

Si riempie il flaconcino di acqua naturale e si segna sullo schermo la posizione (che è più in basso di quella precedente) in cui si ferma l'ombra.

Si ripete la prova con acqua salata e si segna sullo schermo la posizione finale dell'ombra, che è di nuovo più in basso di quella precedente.

Appare perciò chiaro che volumi uguali di liquidi diversi pesano in maniera diversa. In altre parole, appare chiaro che, ad esempio, un cm^3 di acqua salata pesa di più di cm^3 di acqua normale e che quest'ultimo pesa di più di un cm^3 di diluente per vernici.

Ciò basta per una prima introduzione operativa al concetto di densità (di peso specifico).

Dunque si può dire che il peso specifico dell'acqua salata è maggiore di quello dell'acqua normale e che quest'ultimo è maggiore di quello del diluente per vernici.

Dunque, confrontando questo risultato con il risultato del precedente esperimento, si può affermare che gli innalzamenti, subiti dal corpo appeso alla molla quando viene immerso in liquidi diversi, stanno in relazione diretta con i pesi specifici dei liquidi stessi.

Ciò significa che, quanto minore è il peso specifico del liquido, tanto minore è l'innalzamento. Ciò significa che a peso specifico nullo corrisponde innalzamento nullo.

Anche i gas pesano ed, in "condizioni normali", occupano "spazio", cioè hanno un volume. Perciò anche i gas in condizioni normali hanno un peso specifico, più piccolo di quello dei liquidi, ma non nullo.

Perciò, anche un corpo immerso in un gas riceve una spinta verso l'alto uguale al peso di un volume di gas uguale al volume del corpo stesso.

Più precisamente, allora, la spinta verso l'alto è maggiore se il volume del corpo è maggiore.

Quindi, se il corpo, mentre è immerso nel gas, varia il suo volume, la spinta verso l'alto varia, e, per essere un po' più precisi, varia in relazione diretta con il valore assunto dal suo volume.

Alla luce di tutto ciò che è stato detto, è possibile, quindi, fornire la soluzione al primo dei tre problemi incontrati: quello enunciato all'inizio di questo paragrafo.

Prima di aprire il tappo della bottiglietta, a palloncino sgonfio, la bilancia era in equilibrio con il sistema bottiglietta-palloncino avente un determinato volume, a cui corrispondeva una certa spinta esercitata dall'aria verso l'alto.

Una volta che è stato aperto il tappo della bottiglietta ed il gas ha gonfiato il palloncino, il sistema bottiglietta-palloncino ha aumentato notevolmente il suo volume. Perciò è notevolmente aumentata la spinta verso l'alto dell'aria, determinando lo squilibrio osservato allora nella bilancia.

4)

Si riconsiderino gli altri due problemi, incontrati alla fine del paragrafo 2), per ricercarne, sempre sperimentalmente, la soluzione.

Conviene partire dal secondo dei due, in quanto si vedrà che il primo trova soluzione attraverso risultati sperimentali incontrati durante la ricerca della risoluzione del secondo.

Per comodità ne viene ripetuto qui di seguito il testo:

"Qual è la relazione che intercorre tra il volume occupato dal gas all'interno della siringa e la forza che agisce sul pistoncino?"

Le prove sperimentali, eseguite nel punto d) del paragrafo 2, hanno mostrato che volumi uguali di gas diversi contenuti in siringhe uguali subiscono le stesse variazioni quando sui pistoncini agiscono forze uguali.

Ciò consente di procedere, con tranquillità, alla soluzione sperimentale del problema utilizzando l'aria, il gas più facilmente reperibile, essendo certi che i risultati che si troveranno sono estensibili a tutti i gas.

Per iniziare ci si può chiedere: “Cosa succede a volumi uguali di gas contenuti in siringhe diverse (a sezioni differenti), quando sui pistoncini di ognuna di esse agiscono pesi uguali?”, ed eseguire la seguente esperienza.

Si prendono 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)⁷, 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 9.

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) contenuto 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, $V = 50,8$ cm³, ha fornito i risultati riportati nella *tabella 1*.

TABELLA 1

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)	Variaz. di alt. $\Delta h = h_0 - h$ (cm)	Variaz. di volume $\Delta V = V_0 - V$ (cm ³)
0	2,72	5,81	8,75	50,8				
0	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
0,500	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
1,000	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
1,495	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.

⁷ 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.).

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.

È 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 cm^2 ", nel primo caso, in cui la superficie di appoggio è quella maggiore, è minore della "quantità" di forza che "tocca ad ogni cm^2 " 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 cm^2 " 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*.

5)

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.

Tenuto conto di tutto ciò, quindi, tenuto conto del fatto che il pistoncino della siringa da 50 cm^3 pesa $0,136 \text{ kg}$ e quello della siringa da 100 cm^3 pesa $0,071 \text{ kg}$, e del fatto che l'altezza iniziale h_0 e (per conseguenza) anche il volume iniziale V_0 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 seguente *tabella 2*.

Da quest'ultima, 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 2*.

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, andando a verificare se il prodotto, pV , 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*.

Tabella 2

Pesi posti sui pistoncini F_1 (Kg)	Peso del pistoncino F_2 (Kg)	Peso Totale $F=F_1+F_2$ (Kg)	Diametro siringa d (cm)	Area della sezione $S=pa^2/4$ (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)	Variation di alt. $\Delta h=h_0-h$ (cm)	Variation 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	1,2
0	0,071	0,071	3,28	8,45	6,00	50,7	5,95	50,2	0,008	0,05	0,4
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	4,6
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

Tabella 3

Pressione p (Kg/cm ²)	Volume V (cm ³)	$P * V$ (Kg*cm ²)
0	50,8	
0	50,7	
0,008	50,2	0,4
0,023	49,7	1,2
0,045	49,0	2,2
0,068	47,7	3,2
0,076	47,3	3,6
0,104	46,0	4,8
0,110	45,9	5,0
0,127	45,2	5,7
0,162	43,8	7,1
0,163	43,9	7,2
0,185	43,1	8,0
0,196	42,7	8,3
0,222	41,8	9,3
0,248	40,9	10,2
0,281	40,1	11,3
0,334	38,3	12,8

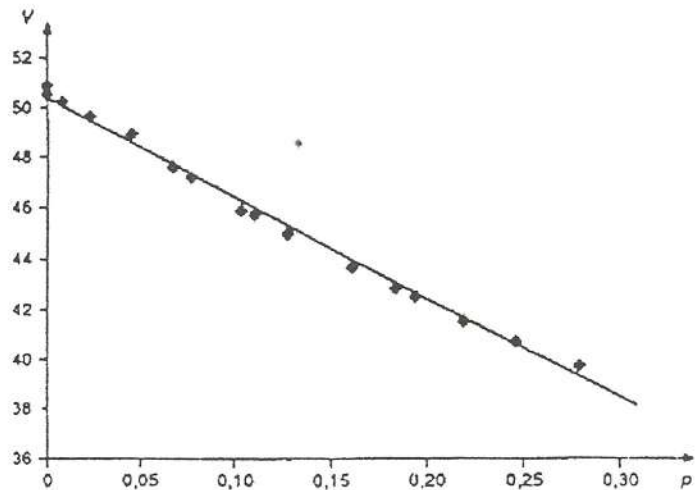


Figura 15

L'indagine, allora, prosegue riportando i dati a disposizione sul diagramma cartesiano ortogonale (p, V) di fig. 15, in cui si è scelto di fissare l'origine coincidente, in ascisse, con lo zero della pressione e, in ordinate, con il valore di 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 trame 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 retta. Si traccia, perciò, la retta che li approssima meglio, anche se le conoscenze già acquisite sperimentalmente sul fenomeno provocano 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 16, 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.

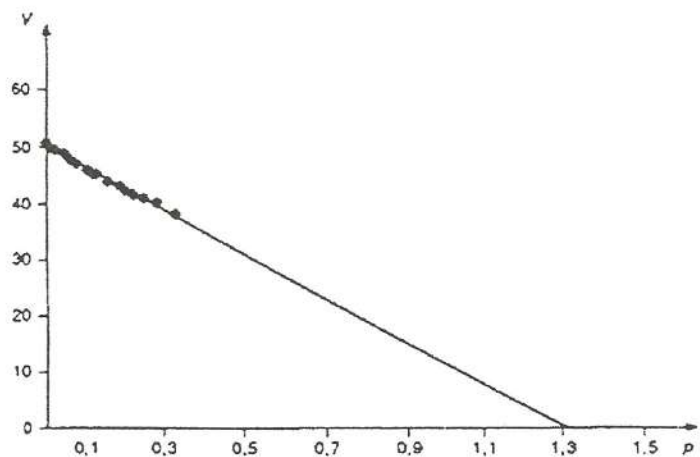


Figura 16

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 il risultato della seguente prova sperimentale.

Una siringa di plastica⁸ della capacità di 5 cm³ (diametro interno di 1,2 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 2,5 kg. Il volume dell'aria in tal modo si riduce a meno della metà di quello iniziale, ma, di certo, non si annulla, nonostante che la pressione a cui il gas è sottoposto sia di 2,21 kg/cm²⁹ chiaramente maggiore di quella (1,32 kg/cm²) 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 15, in cui essi (i punti) sono più distanziati tra loro: l'insieme dei punti è distribuito su 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 sui pistoncini superano, anche di poco, i 2 kg, la tenuta stagna del gas entro le siringhe viene fortemente compromessa.

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 pV (in ascisse V ed in ordinate pV).

Si esegue l'operazione (fig. 17), che appare subito molto interessante, in quanto si constata che i punti, le cui coordinate sono V e pV , risultano, con abbastanza evidenza, 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_1V_1) ed il punto B (V_2, p_2V_2), con:

$$V_1 = 49,7 \text{ cm}^3;$$

$$p_1V_1 = 1,14 \text{ kg cm};$$

$$V_2 = 41,8 \text{ cm}^3;$$

$$p_2V_2 = 9,28 \text{ kg. cm}.$$

Preso, poi, sulla stessa retta un generico punto P di coordinate V e pV , 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:

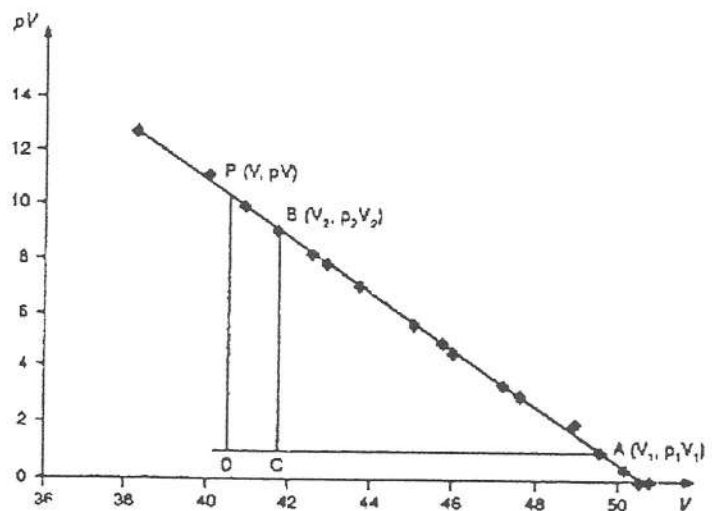


Figura 17

⁸ 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 possiedono una buona tenuta del gas ed hanno un attrito abbastanza basso, sono, perciò adatte per l'esecuzione della prova.

⁹ 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 $F = 2,5 \text{ kg}$. Perciò la pressione a cui il gas è sottoposto è $p = F/S = 2,5 \text{ kg} / 1,13 \text{ cm}^2 = 2,21 \text{ kg/cm}^2$.

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

Essendo i due triangoli evidentemente simili, è chiaro che vale la relazione:

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

L'espressione al secondo membro, i cui termini sono soltanto i valori noti delle coordinate dei punti A e B, ha un valore noto, che, come è facile riconoscere, ha le dimensioni di una pressione.

Indicato, allora, con p_0 il valore noto di tale espressione¹⁰, la relazione si può scrivere:

$$\frac{pV - p_1 V_1}{V_1 - V} = p_0$$

da cui si ha:

$$pV - p_1 V_1 = p_0 V_1 - p_0 V$$

ed anche:

$$(p + p_0)V = (p_1 + p_0)V_1$$

Come si vede, il secondo membro di quest'ultima relazione (relazione esprime proprio il legame esistente tra le variabili p e V relative alla quantità di gas con cui è stata eseguita la prova) è una costante nota, il cui valore dipende soltanto dai valori noti di V_1 e $p_1 V_1$ (le coordinate del punto A) e di p_0 .

Indicata, quindi, con k tale costante¹¹, la relazione cercata è:

$$(p + p_0)V = k$$

con k avente un valore che dipende (in condizioni normali) dal volume iniziale della quantità di gas considerata.

Per rendere di validità generale il risultato, vengono eseguite altre prove sperimentali, utilizzando quantità di gas differenti, cioè volumi iniziali di gas differenti.

I dati ricavati da ogni prova vengono elaborati in modo del tutto analogo a quello descritto ed i valori del volume V e del corrispondente prodotto pV riportati su un diagramma cartesiano ortogonale (p, pV).

¹⁰ Essendosi posto $p_0 = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2}$, in cui compaiono soltanto i valori noti di V_1 , $p_1 V_1$ e V_2 , $p_2 V_2$ (le coordinate dei punti A e B), risulta $p_0 = \frac{9,28 \text{ Kg cm} - 1,14 \text{ Kg cm}}{49,7 \text{ cm}^3 - 41,8 \text{ cm}^3} = 1,03 \text{ Kg/cm}^2$

¹¹ Essendo $k = (p_1 + p_0)V_1$, ed essendo noti i valori di p_1 , $p_1 V_1$ e di p_0 , risulta:
 $k = 1,14 \text{ Kg cm} + 49,7 \text{ cm}^3 \cdot 1,03 \text{ Kg/cm}^2 = 52,3 \text{ Kg cm}$

La figura 18 rappresenta, insieme ai punti corrispondenti ai dati ottenuti nella prova precedentemente descritta (già comparsi in figura 17), i punti relativi ai dati ottenuti in altre tre prove effettivamente eseguite.

Da essa emerge che i punti rappresentativi dei dati ottenuti in ogni prova appaiono allineati. Emerge, inoltre, che le rette, che approssimano meglio i punti relativi ad ogni prova, risultano, entro incertezze sperimentali ragionevoli, tra loro parallele.

L'importanza di tale proprietà è notevole. Infatti, da ciò risulta evidente che, entro le incertezze sperimentali, il valore di p_o è lo stesso in ogni prova. In altre parole, risulta evidente che p_o è indipendente dalla quantità di gas considerato e, quindi, che esprime il valore di "qualcosa" che entra sempre in gioco in ogni prova eseguita, ma in modo inavvertito,

Dalla stessa figura emerge anche che la costante k assume, invece, valori differenti da prova a prova e dipendenti dalla quantità di gas considerato, cioè dal volume iniziale.

Dunque, la relazione, che lega tra loro la pressione p ed il corrispondente volume V di un gas, è, in generale, la seguente:

$$(p + p_o)V = k,$$

con k dipendente dalla quantità di gas considerata e con p_o avente valore costante indipendentemente dalla quantità di gas preso in considerazione.

6)

Ora si tratta soltanto di avviare una nuova ricerca per capire qual è il *significato fisico* della costante p_o . La ricerca appare, dappprincipio, 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: $(p + p_o)V = k$.

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 che prelude il sopraggiungere dello stato d'animo tipico di chi, ormai sfiduciato, si vede costretto all'abbandono del lavoro intrapreso¹².

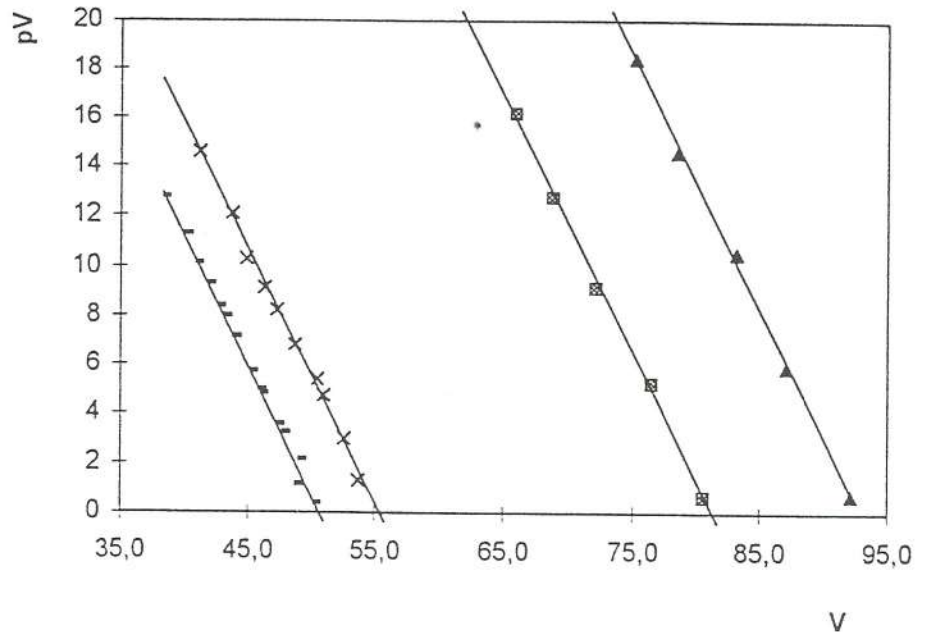


Figura 18

¹² 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.

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. 19), 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.

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. 20).

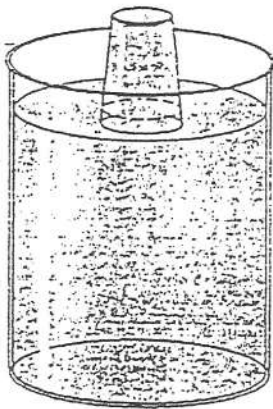


Figura 20

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

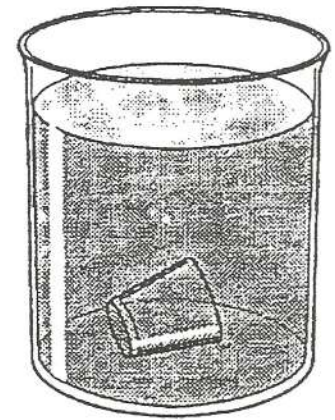


Figura 19

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'esterno 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. 21).

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 rinchiuso, 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 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, 100 metri, 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 non per gli allievi: agli 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.

7)

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.

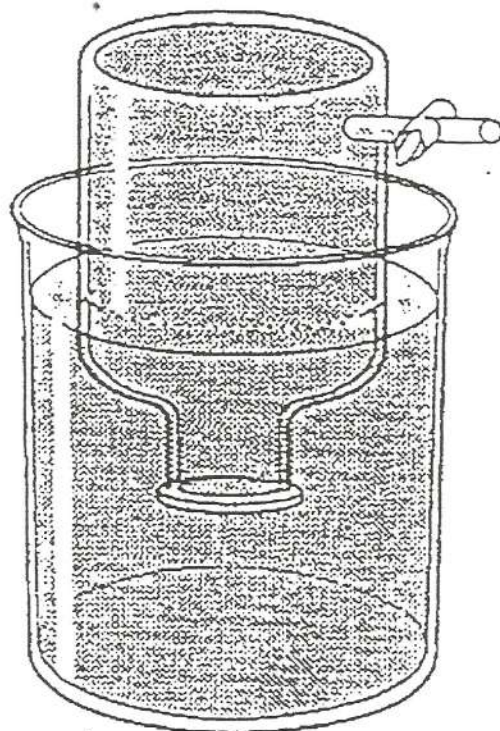


Figura 21

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".

E 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"*.

È, sostanzialmente, *"il vuoto non può esistere"*.

È, 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 un tale lavoro possa essere evitato facendo ricorso alle proprietà dei fluidi acquisite durante lo studio descritto nei paragrafi 2 e 3.

È proprio indagando in tal senso che vi è sempre qualche allievo che, dopo un periodo (più o meno lungo) di riflessioni, riesce, intuendone l'esistenza, ad intravedere una qualche correlazione tra la graduatoria esprime la "tendenza" che i fluidi hanno di andare ad occupare il posto lasciato libero da altri, che li seguono nella graduatoria stessa e la loro densità (peso specifico).

Lanciata l'idea, il lavoro di approfondimento viene subito intrapreso. E non si tarda molto a constatare che:

- l'aria, che ha la densità minore di quella dell'alcool, di quella dell'acqua e di quella del mercurio, va ad occupare il posto lasciato libero dall'alcool, dall'acqua e dal mercurio;
- l'alcool, che ha la densità minore di quella dell'acqua e di quella del mercurio, va ad occupare il posto lasciato libero dall'acqua e dal mercurio;
- l'acqua, che ha la densità minore di quella del mercurio, va ad occupare il posto lasciato libero dal mercurio;
- ecc.

La relazione esiste proprio: la graduatoria è strettamente legata alla densità del fluido e può essere così sintetizzata: "Il fluido avente la densità (peso specifico) minore va ad occupare il posto lasciato libero dal fluido avente la densità maggiore".

8)

Giustificata la 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 essere sfuggito, 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. 22)

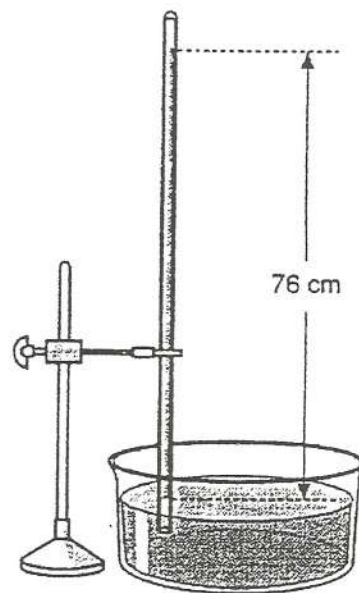


Figura 22

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 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. 22).

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 risulti 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. 23).

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

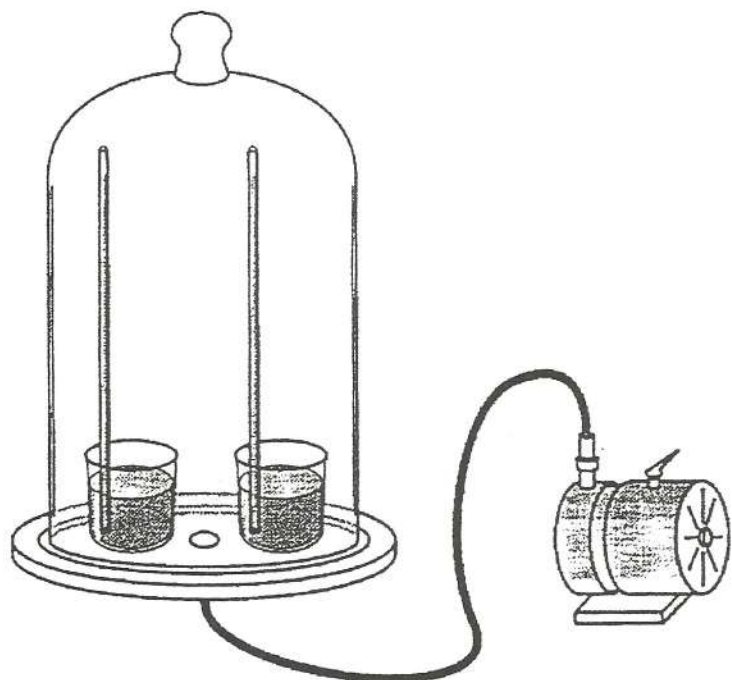


Figura 23

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.

9)

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 ugual 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 contenuta 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.

10)

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 23, 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 descritti in precedenza, 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 dall'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.

11)

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. 24).

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, dalle prove sperimentali e dai ragionamenti precedenti, che ciò che vale per l'acqua, vale anche per ogni altro liquido. E evidente, perciò, che, anche nel caso degli esperimenti di figura 23, 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,

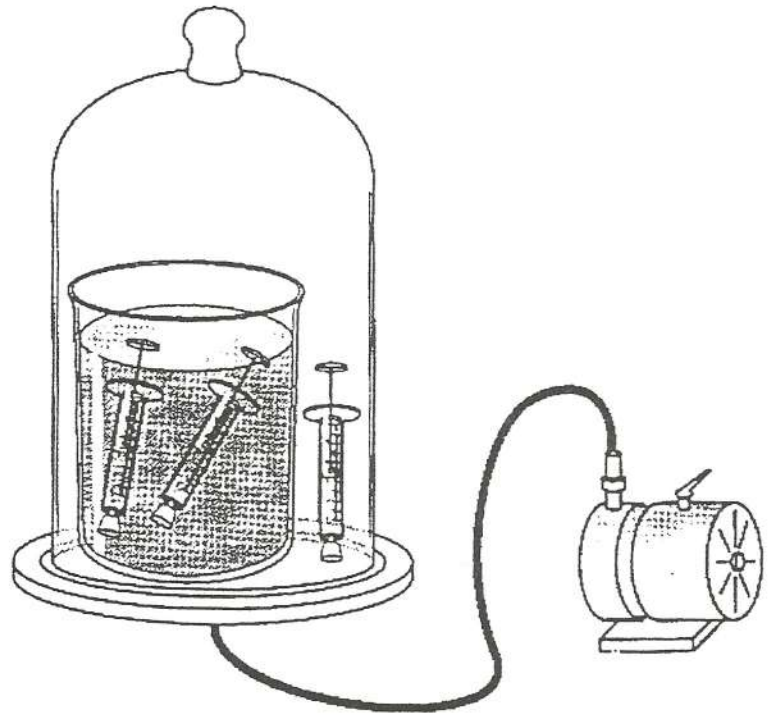


Figura 24

in condizioni di equilibrio, cioè quando il suo livello è costante, è, perciò, 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 bechecini 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 8 ed illustrato in figura 22, 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 misura della 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 dal mercurio contenuto nel tubo su quello contenuto nella vaschetta (identica alla pressione esercitata dall'atmosfera), è data da

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

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 od 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.

12)

Si ritorni, ora, a considerare il problema rimasto aperto nelle conclusioni del paragrafo 5 a proposito del significato fisico della costante, p_0 , che compare nella relazione

$$(p + p_0)V = k,$$

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

Si riconsiderino, poi, le situazioni sperimentali descritte nei paragrafi 4 e 5 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.

E' evidente, cioè, che, contrariamente, a quanto si era supposto nei paragrafi 4 e 5, il gas *non è sottoposto soltanto a quest'ultima pressione.*

Appare, perciò, logico e naturale identificare la costante:

$$p_0 = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{V_1 - V_2}$$

(già riconosciuta come una pressione costante all'inizio del paragrafo 6) con la pressione atmosferica, che, nella giornata in cui è stato concretamente eseguito l'esperimento descritto nel paragrafo 5, si esercitava sui pistoncini delle siringhe¹³ 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 buon accordo con il valore della costante calcolato in nota 10 a piè di pagina 18.

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.

Tabella 4

Pressione pesi e pist. 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)	$P * V$ (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

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 pV , che compaiono nell'ultima colonna, risultano, costantemente ed in buonissimo accordo, uguali tra loro, appare assai chiaro che *la relazione è una proporzionalità inversa.*

Il risultato trovato è generale. Infatti, riconsiderando le prove sperimentali effettivamente eseguite, i cui dati sono le coordinate dei punti rappresentati nei diagrammi (le rette) figuranti in figura 18, per ogni prova si ritrova $pV=k$, con k costante avente valori dipendenti dalla quantità di gas considerato, e

¹³ E' l'esistenza della pressione atmosferica che spiega il fatto che, in condizioni normali, il gas all'interno di una siringa tende a mantenere costante il suo volume. E', quindi, la pressione atmosferica che consente di dare la soluzione al problema 1 enunciato a pagina 9.

dove, in corrispondenza ad ogni valore di V , p esprime la somma della pressione allora trovata (determinata dai pesi posti sui pistoncini) e della pressione atmosferica.

Dunque, 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**.

La macchina di Atwood interfacciata al PC

Barbara Pecori, *Dipartimento di Fisica, Università di Bologna*

Giacomo Torzo, *Dipartimento di Fisica, Università di Padova*

Introduzione

La macchina di Atwood fu progettata nel 1784 dal Reverendo George Atwood allo scopo di condurre esperimenti di cinematica e dinamica con i quali illustrare le proprie lezioni di fisica. La caratteristica principale che ha reso famosa la macchina è la possibilità che essa offre di studiare il moto di un corpo al quale sia applicata una forza costante senza che siano raggiunte velocità troppo elevate, alle quali l'attrito dell'aria diventa non trascurabile, o debbano essere considerati intervalli di tempo così piccoli da essere difficilmente misurati (Greenslade, 1985).

Negli attuali libri di testo, invece, la macchina di Atwood, trasformata in un sistema estremamente semplificato e poco realistico, ha perso molte delle potenzialità didattiche per le quali era stata progettata.

In questo corso esploreremo le possibilità offerte dalle tecnologie di interfacciamento col calcolatore per sfruttare al meglio le caratteristiche del dispositivo originale, rendendolo al tempo stesso più flessibile e più ricco dal punto di vista didattico.

Mostreremo alcuni esempi delle possibilità offerte dalla macchina con l'intento di stimolare gli insegnanti a "giocare" con questo strumento e a sfruttarne le diverse potenzialità.

Il modello più semplice della macchina di Atwood (figura 1) è costituito da due masse appese alle estremità di un filo inestensibile e di massa trascurabile che passa sopra una puleggia libera di ruotare attorno al suo asse orizzontale con attrito trascurabile.

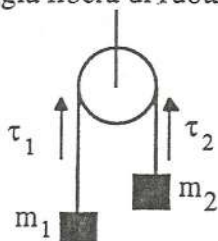


Figura 1

Se la puleggia ha momento di inerzia trascurabile e l'attrito non incide in modo rilevante, la tensione ai due capi del filo è la stessa ($\tau_1 = \tau_2 = \tau$) e l'accelerazione a delle due masse si può ottenere applicando la seconda legge di Newton ad entrambi i corpi. Usando un sistema di riferimento unidimensionale con asse verticale diretto verso il basso, si ha:

$$m_1 g - \tau_1 = m_1 a_1 \quad \text{e} \quad m_2 g - \tau_2 = m_2 a_2 \quad (1)$$

e posto $a = a_2 = -a_1$ si ottiene:

$$a = (m_2 - m_1)g / (m_1 + m_2) \quad (2)$$

Nel caso in cui l'inerzia della puleggia non sia trascurabile, possiamo calcolare l'accelerazione uguagliando il momento della forza agente sul sistema (masse + puleggia) $T = (m_2 - m_1)gR$ alla derivata del momento angolare totale rispetto al tempo dL/dt .

Il modulo del momento angolare della puleggia vale $L_p = I\omega = I\nu/R$ (ove $\nu = \omega R$ è la velocità tangenziale, I è il momento di inerzia¹ e R il raggio della puleggia), quello delle due masse vale rispettivamente $L_1 = m_1\nu R$ e $L_2 = m_2\nu R$ e quindi il momento angolare totale è $L = L_p + L_1 + L_2 = (I/R^2 + m_1 + m_2)\nu R$. Se si definisce come massa inerziale effettiva della puleggia la quantità $M = I/R^2$, si ha $T = (m_2 - m_1)gR = dL/dt = (M + m_1 + m_2)R d\nu/dt$, da cui :

$$a = (m_2 - m_1)g / (M + m_1 + m_2). \quad (3)$$

Questo è essenzialmente il modello utilizzato nella macchina originale di Atwood, in cui l'attrito era considerato trascurabile.

¹ Se la puleggia può essere approssimata da un disco omogeneo di massa m_p , il momento di inerzia vale $I = m_p (R^2)/2$, e quindi $M = m_p/2$.

Se si vuol tener conto delle forze dissipative, si può introdurre un momento resistente $T_f = R F_f$ (che descrive l'effetto dell'attrito del perno della puleggia e l'attrito viscoso sulle masse in moto) se con F_f indichiamo una forza d'attrito *efficace* applicata a distanza R dall'asse. In tal caso l'accelerazione delle due masse può essere espressa come

$$a' = a - F_f / (M + m_1 + m_2) = [(m_2 - m_1)g - F_f] / (M + m_1 + m_2). \quad (4)$$

Caratteristiche dell'apparato sperimentale

Per ottenere una macchina di Atwood adatta agli esperimenti qui descritti, senza dover affrontare costi elevati (figura 2), abbiamo utilizzato una normale morsa da tavolo avvitando alle ganasce due blocchetti metallici in cui si è fresata una scanalatura verticale a "V" nella quale si stringe una lunga asta rigida (un tubo di alluminio di diametro 25 mm e lunghezza 2 m).

Mediante un morsetto a croce si fissa orizzontalmente all'asta una bacchetta metallica che porta il sensore di forza.

La puleggia è costituita da un disco di alluminio o di ottone con una cava sul bordo per alloggiare il filo (lenza da pesca in dacron) montata sull'asse di un sensore di rotazione ("rotary encoder")

Le masse m_1 e m_2 sono cilindri metallici pieni, sull'asse dei quali è ricavato un foro filettato in cui si avvita una vite con sottile foro assiale (serve per attaccare il filo in assetto centrato).

Per evitare oscillazioni indesiderate delle masse all'inizio del moto si può usare un piccolo elettromagnete per trattenere uno dei cilindri (mediante una vite in ferro avvitata assialmente al fondo).

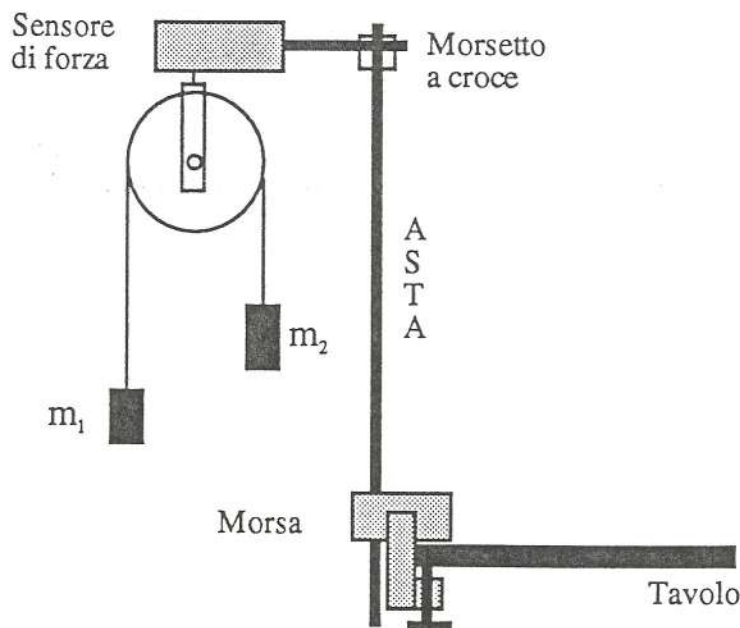


Figura 2

Il sistema di acquisizione dati è basato su una interfaccia (ULI, Vernier Software Co., Portland, USA) che collega un computer (Macintosh o PC) al set dei sensori utilizzati. Il microprocessore residente sulla ULI ha il compito di attivare le operazioni di misura seguendo le istruzioni che il software residente sul computer gli invia. La comunicazione fra la ULI e il computer avviene tramite una linea seriale RS232.

Una volta che il computer ha acquisito le misure delle grandezze che interessano, si può accedere, attraverso un apposito menù ad una serie di sofisticate elaborazioni grafiche dei dati. In tal modo è possibile ottenere una visualizzazione in tempo reale dell'andamento del fenomeno osservato.

Nel nostro caso le due variabili scelte per effettuare le misure sono la posizione di uno dei due corpi e la forza totale esercitata dal filo sulla puleggia (cioè la somma delle tensioni ai capi del filo).

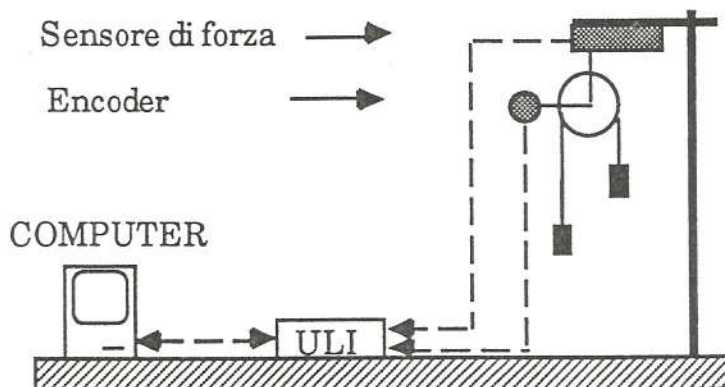


Figura 3

Il sensore di forza utilizzato è costituito da un estensimetro che misura la flessione di un braccio elastico cui è appesa la puleggia. Affinchè il valore della forza corrisponda effettivamente alla somma delle tensioni ai capi del filo, la calibrazione del sensore viene effettuata sottraendo il peso della carrucola.

Il sensore di posizione utilizzato è costituito da un *encoder* ottico solidale alla puleggia che ne misura l'angolo di rotazione in funzione del tempo.

Uno schema del sistema di acquisizione dei dati è riportato in figura 3.

Le misure di posizione possono essere effettuate anche con un sensore ad ultrasuoni (sonar), tenendo presente però che in questo caso lo spettro delle configurazioni del sistema che è possibile studiare è limitato da alcuni fattori: il moto di uno dei due corpi può disturbare le misure relative al moto dell'altro corpo, l'angolo di visuale del sensore è piuttosto ridotto (15 gradi), il corpo deve trovarsi ad una distanza dal sensore non inferiore a 40 cm. Un sensore di questo tipo può essere consigliabile in una fase introduttiva dello studio, soprattutto se gli studenti hanno già avuto occasione di usarlo per altri esperimenti, ma per poter effettuare indagini più sofisticate è necessario utilizzare uno strumento più flessibile e più preciso quale l'encoder ottico.

Date le caratteristiche del software utilizzato, è possibile rappresentare qualsiasi grandezza misurata (direttamente o indirettamente inserendo la formula corrispondente) in funzione di qualsiasi altra grandezza ed effettuare fit su porzioni selezionate dei grafici. La notevole flessibilità dello strumento grafico è una delle caratteristiche più interessanti dal punto di vista didattico in quanto permette di confrontare agevolmente approcci diversi alla descrizione del moto (ad esempio in termini di variabili cinematiche, di forze, di energia, di momento angolare), di valutarne le diverse potenzialità e di individuare criteri per la selezione dell'approccio più efficace in funzione dello specifico problema da risolvere.

L'esperimento originale di Atwood

Una caratteristica interessante dell'apparato originale di Atwood (figura 4) è il metodo usato per misurare la velocità del corpo in caduta quando questo aveva percorso una distanza prefissata sotto l'azione di una forza costante.

Lungo la scala graduata, utilizzata per misurare le distanze, veniva posta una forcina attraverso la quale veniva fatto passare il corpo. Questo era costituito di due parti delle quali quella superiore, di massa esattamente uguale alla differenza fra le masse dei due corpi, veniva trattenuta dalla forcina. Da quel momento in avanti il sistema era in equilibrio e il moto procedeva ad una velocità costante, uguale alla velocità istantanea del corpo nell'istante in cui la massa in eccedenza era stata trattenuta dalla forcina. La velocità veniva poi misurata facendo percorrere al corpo una distanza tale da

corrispondere ad un numero intero di secondi, misurati da un pendolo che batteva il secondo.

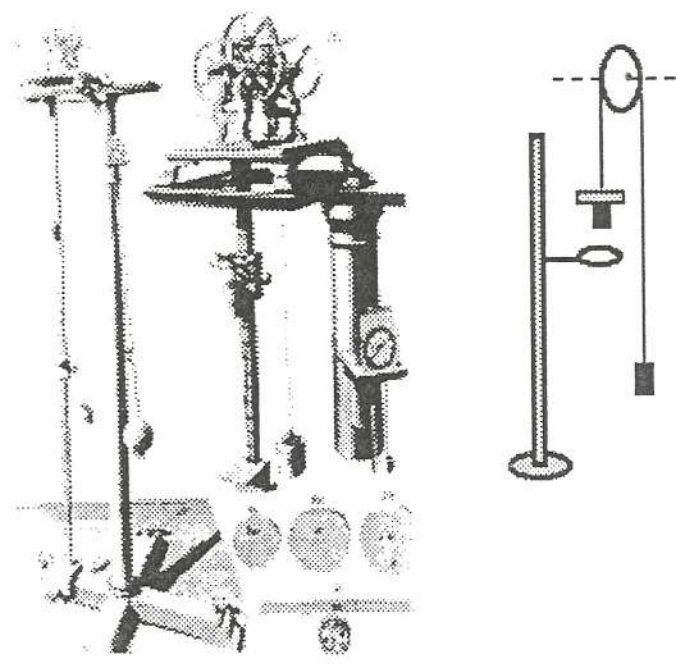


Figura 4

Interfaciando la macchina di Atwood con un calcolatore la velocità di caduta può ovviamente essere misurata senza bisogno di introdurre modifiche all'apparato sperimentale. Tuttavia l'esperimento di Atwood può essere didatticamente interessante in quanto rappresenta un esempio di passaggio praticamente istantaneo da un moto con accelerazione costante ad un moto a velocità costante e permette quindi di aprire con gli studenti una discussione sul concetto di velocità istantanea come quella velocità che il corpo avrebbe se in quell'istante venisse improvvisamente a mancare la forza che è causa del moto accelerato.

Una discussione dell'esperimento di Atwood potrebbe inoltre aiutare gli studenti a superare le difficoltà, riscontrate anche a livello universitario, nel differenziare i concetti di posizione, velocità e accelerazione, nonché la tendenza ad introdurre comunque una forza nella stessa direzione del moto (McDermott, 1986).

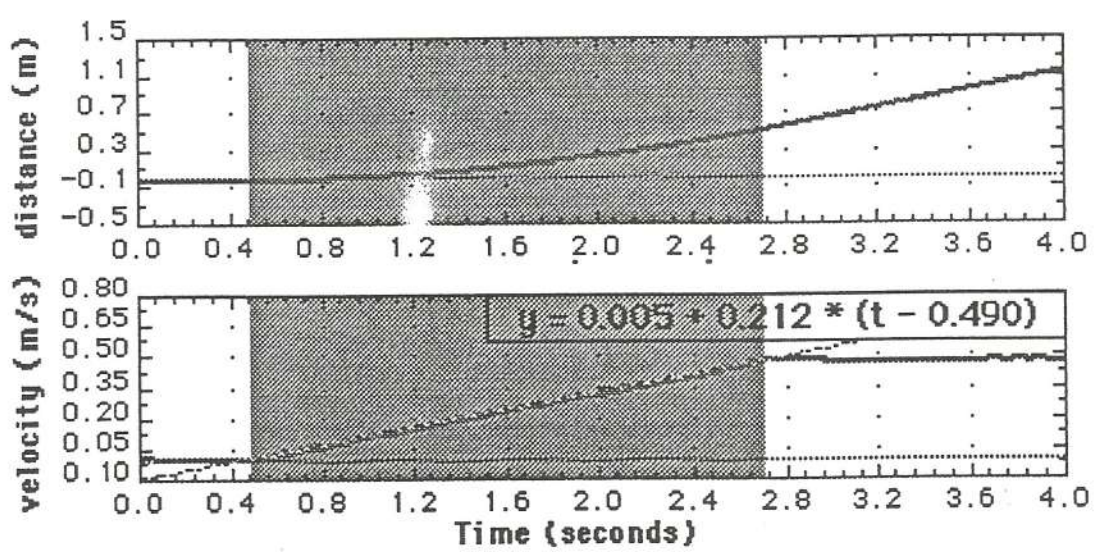


Figura 5

L'esperimento di cui riportiamo i dati sperimentali in figura 5 è stato effettuato con una massa inerziale totale $m_1+m_2+M = 0.216$ Kg e con una differenza di massa tra i due

corpi $\Delta m = 5.0$ g (costituita da un dischetto di plexiglass, di diametro maggiore dell'apertura della forcella, appoggiato sul corpo che scende). In queste condizioni il moto è caratterizzato da un tratto con accelerazione costante $a = 0.21$ m/s², quindi facilmente osservabile ad occhio nudo e sullo schermo.

I grafici mostrano l'andamento della posizione e della velocità in funzione del tempo. In essi è distinguibile un primo tratto in cui il sistema è mantenuto fermo trattenendo il corpo di massa minore, un secondo tratto in cui il corpo si muove con accelerazione costante e un terzo tratto in cui il moto avviene a velocità costante.

Il valore dell'accelerazione può essere ricavato effettuando un fit opportuno sui grafici, selezionando solo i punti che si vogliono includere nell'interpolazione (zona grigia in figura 5). Da un punto di vista didattico è interessante far notare che il grafico della velocità in funzione del tempo è quello che meglio si presta per questa operazione: rispetto al grafico posizione/tempo esso permette di individuare con maggiore precisione l'intervallo di tempo sul quale effettuare l'interpolazione.

L'accelerazione ricavata dal grafico è leggermente inferiore a quella calcolata teoricamente ($a = 0.23$ m/s²). Si può verificare, ripetendo la misura, che la differenza, pur essendo confrontabile con le incertezze sperimentali, ha sistematicamente lo stesso segno. Una analisi delle possibili cause può essere oggetto di una ricerca da parte degli studenti: una ipotesi ragionevole è supporre la presenza di una forza di attrito (dell'aria e/o dell'asse della puleggia) non del tutto trascurabile.

Una valutazione dell'entità di tale forza si può ottenere eseguendo una serie di misure dell'accelerazione del corpo al variare della forza agente sul sistema a parità di massa, cioè spostando via via una certa massa da un corpo all'altro. Le misure ottenute possono essere riportate in un grafico della forza agente sul sistema in funzione della accelerazione. Un esempio di tale grafico, ottenuto utilizzando due corpi di massa 80g e 4 coppie di masse aggiuntive da 1g ciascuna, è riportato in figura 6.

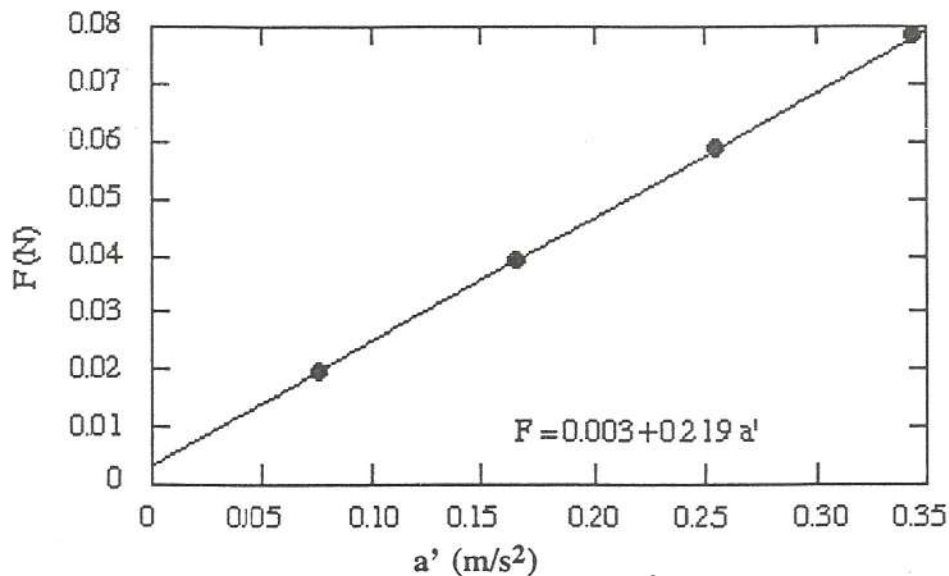


Figura 6

L'interpolazione lineare dei dati mostra che, nell'intervallo di valori dei parametri considerato, la forza incognita agente sul sistema può essere considerata costante. L'intercetta con l'asse delle ordinate fornisce il valore della forza di attrito, mentre il coefficiente angolare della retta rappresenta la massa inerziale totale del sistema e può quindi essere utilizzato per misurare indirettamente la massa efficace della puleggia (nel caso riportato in figura $F_a \approx 3 \cdot 10^{-3}$ N e $M = 51$ g).

È interessante inoltre analizzare il grafico della forza misurata dal sensore (cioè la somma delle tensioni ai capi del filo) in funzione del tempo (figura 7).

Quando il sistema è mantenuto fermo trattenendo la massa minore, la tensione è la stessa ai due capi del filo e la forza vale il doppio del peso della massa maggiore $F = 2\tau = 2m_2g$.

Quando il sistema è lasciato libero di muoversi si può mostrare facilmente che la forza vale $F = \tau_1 + \tau_2 = (m_1 + m_2)g - [(m_2 - m_1)^2 / (m_1 + m_2 + M)]g$, un valore inferiore al precedente e minore della somma dei pesi delle due masse.

Quando la massa in eccesso viene trattenuta dalla forcina il valore della forza diventa $F = 2\tau = 2m_1g$, esattamente lo stesso valore che si avrebbe se i due corpi fossero appesi al filo fermi.

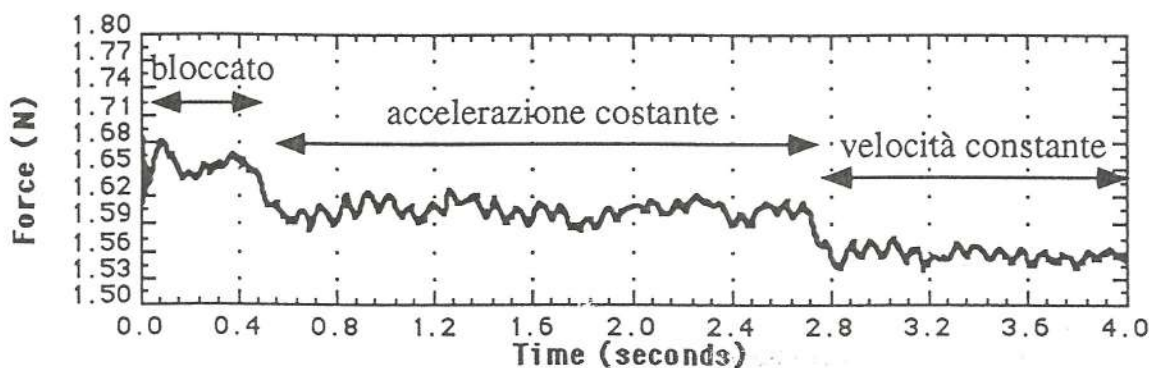


Figura 7

Il fatto che la forza totale agente sulla puleggia sia inferiore alla somma dei pesi dei due corpi quando il moto è accelerato e che risulti invece uguale ad esso nel caso del moto a velocità costante è di solito contrario all'intuizione degli studenti, e dunque può fornire lo spunto per una discussione interessante sulla interpretazione del moto in termini di seconda legge di Newton (McDermott, 1994).

Un esperimento tira l'altro

Una delle caratteristiche che rendono particolarmente stimolante l'uso della macchina di Atwood a scopi didattici è il fatto che con minime variazioni del sistema si possono ottenere moti con caratteristiche molto diverse.

Un esempio interessante è costituito dal moto che si ottiene quando la massa trattenuta dalla forcina è leggermente superiore alla differenza di massa tra i due corpi. In questo caso, dopo il passaggio attraverso la forcina, sul sistema agisce una forza contraria al moto di caduta del corpo il quale decelera fino a fermarsi e poi risale, riaggancia la massa appoggiata sulla forcina e prosegue generando così un moto di tipo oscillatorio.

Un grafico della posizione in funzione del tempo, caratteristico di questo moto, è riportato in figura 8.

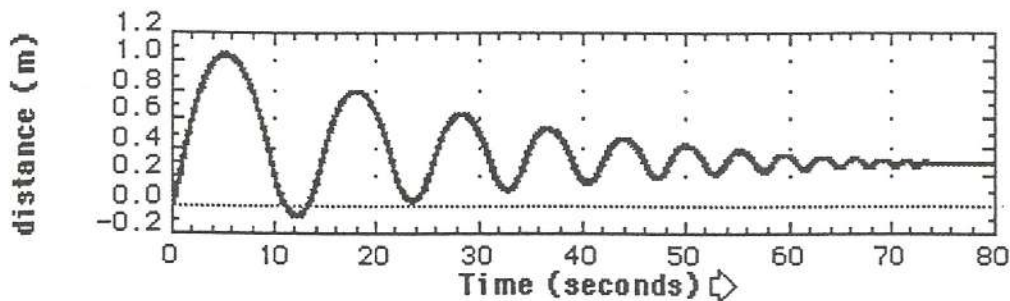


Figura 8

Quello che colpisce, a prima vista, è che il grafico appare molto simile a quello caratteristico di un moto armonico smorzato.

Questa impressione scompare tuttavia immediatamente se si osserva il grafico della velocità in funzione del tempo: la velocità, come era prevedibile, varia linearmente nel tempo, con discontinuità nel valore dell'accelerazione dovute alle due diverse forze agenti

Oscillazioni in acqua

Moti oscillatori del tipo sopra considerato non vengono di solito analizzati nell'insegnamento della fisica a livello secondario. Ci sembra invece che un confronto fra questo tipo di moto e quello, più frequentemente considerato, dell'oscillatore armonico possa essere didatticamente efficace proprio perchè dal confronto emergono in maniera più evidente le caratteristiche salienti di ciascun fenomeno.

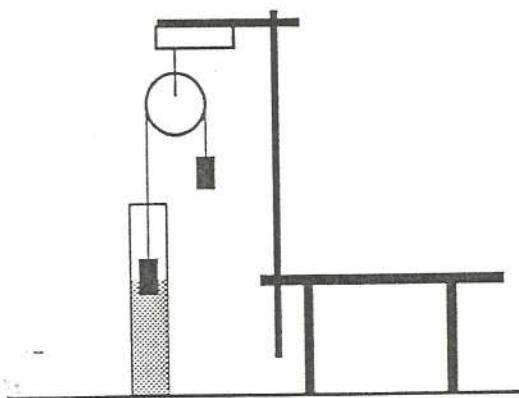


Figura 11

Può essere utile allora cercare altre situazioni nelle quali il moto del sistema presenti caratteristiche analoghe a quello sopra considerato. Un modo per creare una discontinuità nella forza agente sul sistema è quello di far immergere il corpo che scende in un vaso contenente un liquido, ad esempio acqua (figura 11). La forza di Archimede agente sul corpo che si immerge realizza una forza contraria al moto e, con una opportuna scelta dei valori delle masse e dei volumi, si può ottenere una situazione in cui la differenza fra le masse dei due corpi appesi al filo sia minore della massa di acqua corrispondente al volume del corpo.

Il corpo che scende, immergendosi nell'acqua, proseguirà quindi nel suo moto verso il basso con una velocità decrescente e risalirà verso l'alto per poi riaffondare, realizzando così un moto oscillatorio simile a quello discusso in precedenza.

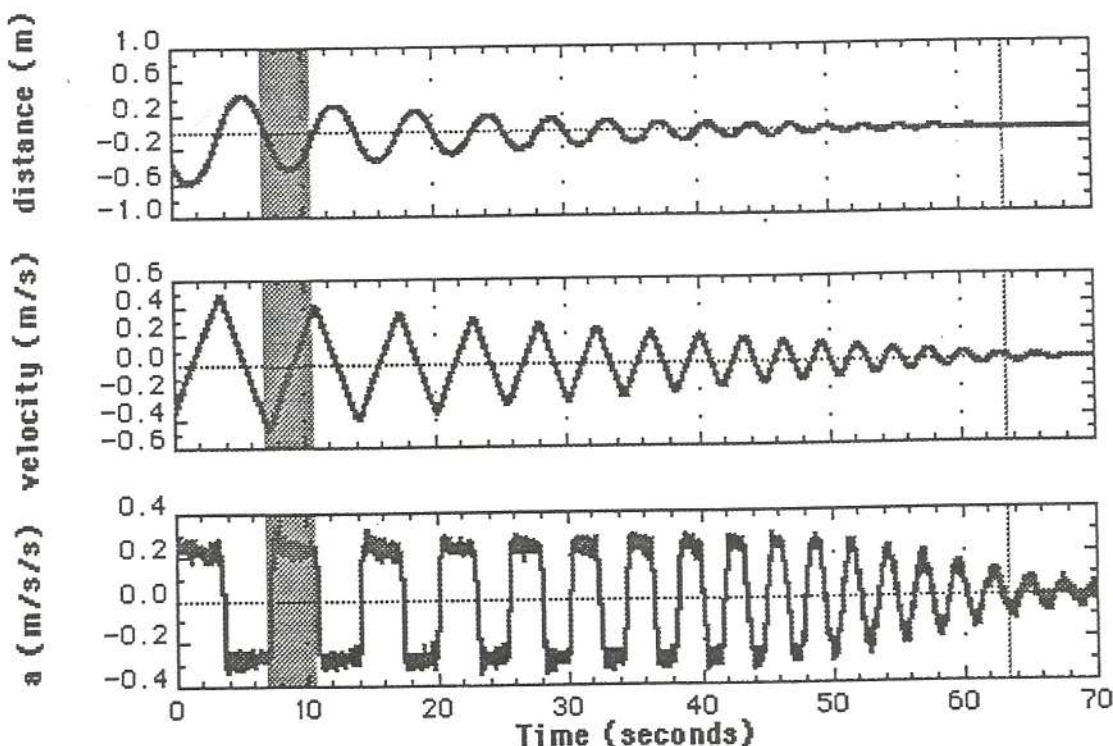


Figura 12

In figura 12 sono riportati i grafici della posizione, della velocità e della accelerazione in funzione del tempo, ottenuti con una scelta dei parametri tali che l'accelerazione fuori e dentro all'acqua assuma approssimativamente lo stesso valore assoluto ($m_1=113g$, $m_2=121g$, massa inerziale totale $285g$, volume del cilindro che si immerge $-m_2$ - circa 16 cm^3). In queste condizioni quando il sistema è all'equilibrio il cilindro è immerso

nell'acqua circa per metà del suo volume. In altri termini la differenza tra le due masse ($\Delta m = 8g$) è uguale alla massa dell'acqua spostata da mezzo cilindro. I grafici che si ottengono sono molto simili ai precedenti, ma vi sono anche differenze interessanti, che possono essere sfruttate dal punto di vista didattico. In questo caso, a differenza del precedente, nel passaggio da un valore della accelerazione all'altro è identificabile una fase di transizione in cui la forza cambia linearmente con la posizione del corpo (figura 13).

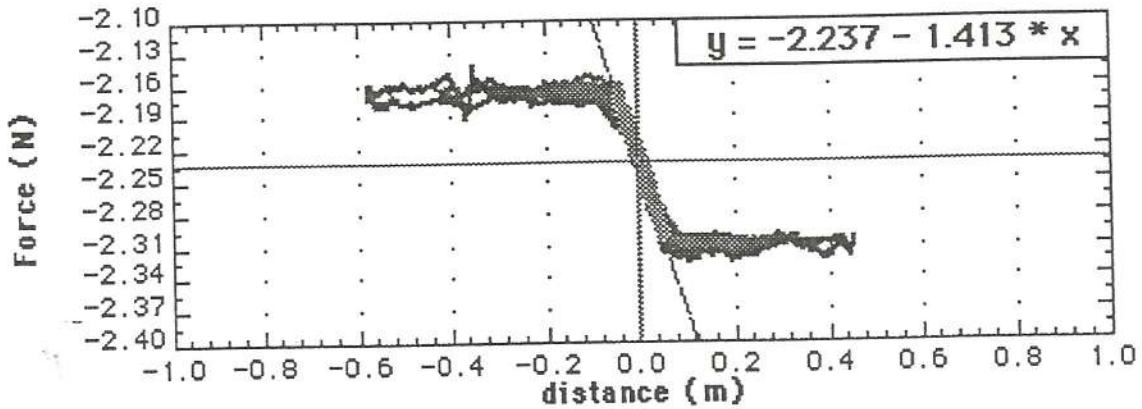


Figura 13

Questo corrisponde al fatto che, dopo un certo numero di oscillazioni, quando il cilindro non esce più completamente dall'acqua, il moto diventa armonico smorzato, come si può mettere in evidenza amplificando la porzione dei grafici che si riferisce alla parte finale del moto (figura 14). In questa fase del moto la forza agente sul cilindro che oscilla nell'acqua è la differenza fra la forza di Archimede e la forza di gravità dovuta alla differenza fra le masse dei due corpi appesi al filo: $F = F_A - \Delta mg = \pi r^2 x \rho g - \pi r^2 (h/2) \rho g$ dove x è l'altezza della parte immersa, h l'altezza del cilindro, r il suo raggio e ρ la densità dell'acqua).

Nella prima fase, se trascuriamo il breve transiente, il moto anarmonico è determinato dalla forza di richiamo $F = -k \operatorname{sgn}(x)$, ove $k = \Delta mg$. Il valore assoluto dell'accelerazione (il cui segno cambia quando il cilindro attraversa la superficie dell'acqua) è $a = k / (m_1 + m_2 + M)$.

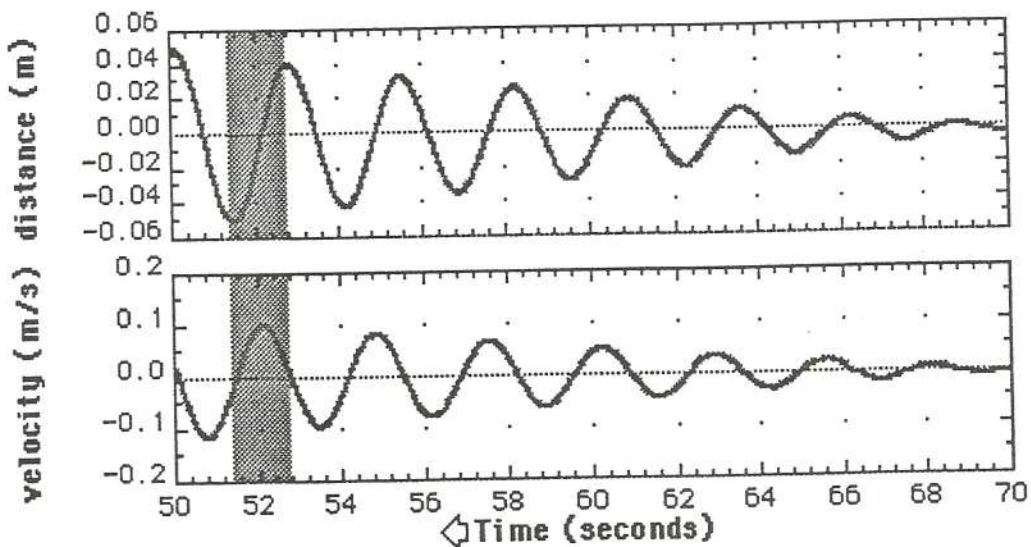


Figura 14

Nello stesso fenomeno è pertanto possibile mettere a confronto un moto oscillatorio non armonico (fase iniziale del moto) e un moto armonico smorzato (fase finale). La transizione da un tipo di moto all'altro può essere messa in evidenza anche dal confronto fra il grafico della velocità in funzione della distanza, relativo all'intero moto, e quello relativo alla sola fase finale (figura 15).

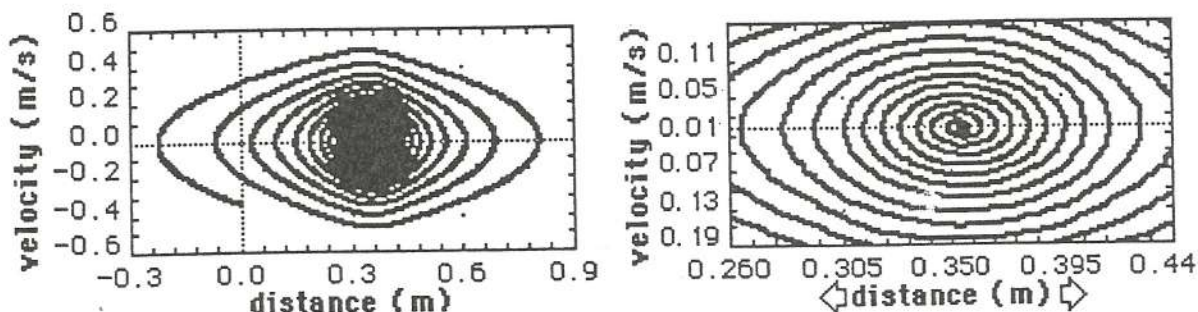


Figura 15

Conclusioni

Gli esempi sopra riportati mostrano come sia possibile utilizzare una macchina di Atwood interfacciata con il calcolatore per aiutare gli studenti nella comprensione della descrizione del moto in termini cinematici e dinamici.

Le potenzialità didattiche di tale apparecchiatura derivano da una combinazione delle caratteristiche della macchina originale con quelle del sistema di interfacciamento.

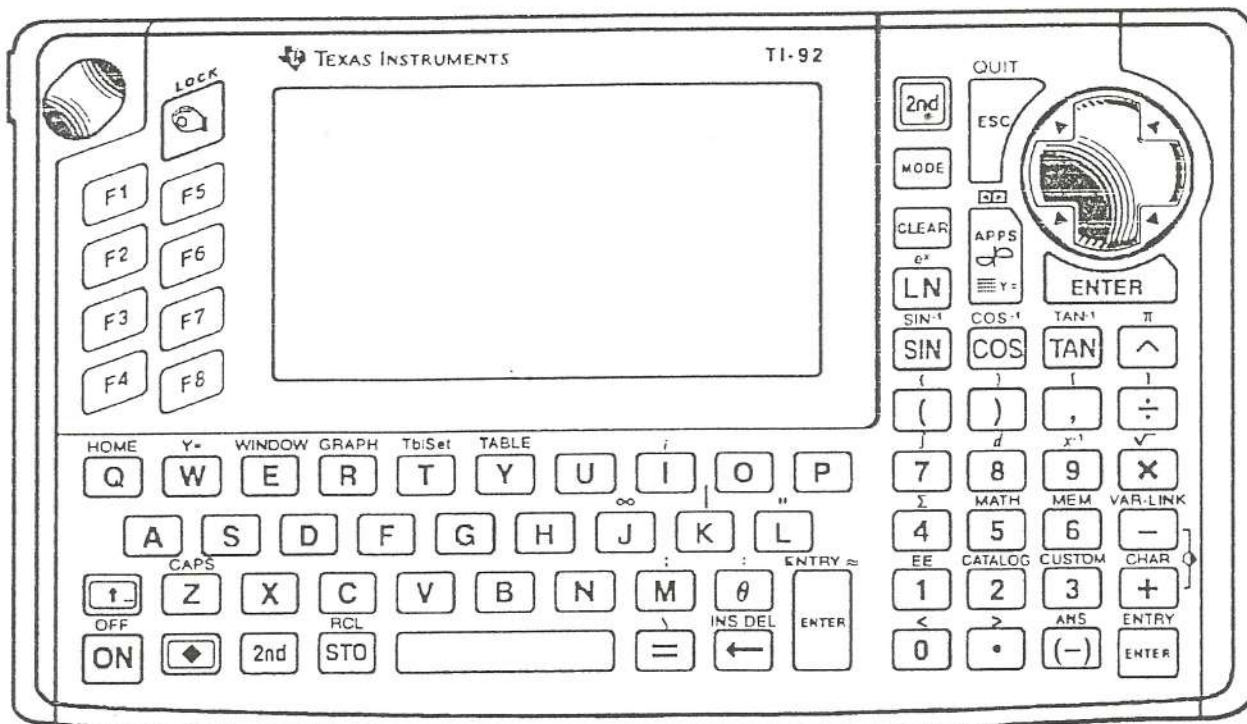
La macchina di Atwood è di per sé un sistema aperto, nel quale i parametri che determinano le caratteristiche del moto sono facilmente individuabili e modificabili anche da parte degli studenti.

L'interfacciamento con il calcolatore e, in particolare, la versatilità del sistema di elaborazione dei dati permettono di confrontare in tempo reale l'andamento del fenomeno e la sua rappresentazione in termini di grandezze fisiche, nonché di modificare a piacere le grandezze caratteristiche di tale rappresentazione.

Questa versione della macchina può quindi essere utilizzata per sollecitare gli studenti a formulare previsioni sull'andamento dei fenomeni e ipotesi sulla loro descrizione in base alle leggi della meccanica, a controllare la validità del modello utilizzato e ad indagare sulle eventuali discrepanze tra le previsioni formulate ed i dati ottenuti. In particolare con questo strumento è possibile studiare agevolmente l'effetto di forze di diversa natura e analizzare effetti, quali quelli dovuti all'attrito e alla resistenza del mezzo, solitamente trascurati nell'insegnamento nonostante la loro rilevanza nello studio dei fenomeni reali.

Riferimenti

- T.B. Greenslade: *Atwood's machine*, *Physics Teacher*, **23**, 24-28 (1985)
 L.C. McDermott, *Ricerche sulla comprensione dei concetti di meccanica*, *La Fisica nella Scuola*, **XIX**, n.2, 84-97 (1986)
 L.C. McDermott, P.S. Shaffer and M.D. Somers: *Research as a guide for teaching introductory mechanics: an illustration in the context of the Atwood's machine*, *American Journal of Physics*, **62**, 46-55 (1994)

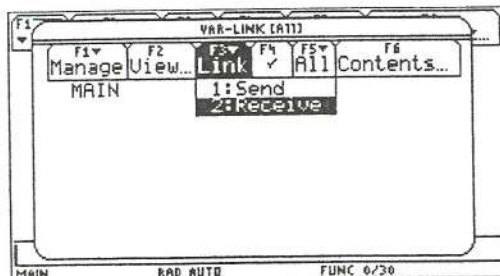


COLLEGAMENTO DI DUE UNITA' TI-92 E TRASMISSIONE DATI E PROGRAMMI

- Collegare le due unità TI-92 con il cavetto in dotazione
- Impostare la trasmissione dati dapprima sulla macchina ricevente, poi su quella di invio

Procedura per la **unità ricevente**:

- Visualizzare lo schermo VAR-LINK [premere: <2nd> <VAR-LINK>]
- Premere <F3> Link e selezionare 2: Receive e premere <ENTER>
- Nella riga di stato appaiono visualizzati i messaggi VAR-LINK: WAITING TO RECEIVE e BUSY



Procedura per la **unità di invio**:

- Visualizzare lo schermo VAR-LINK [premere: <2nd> <VAR-LINK>]
- Selezionare le variabili (files) da trasferire spostandosi con il cursore e premendo il tasto <F4> per marcarle; accanto appare il segno di spunta (✓). Se viene selezionata una cartella, vengono automaticamente selezionate tutte le variabili in essa contenute.
- Premere <F3> Link e selezionare 1: Send; la trasmissione ha inizio. Al termine dell'operazione, nell'ambiente VAR-LINK dell'unità ricevente appare l'elenco dei file ricevuti.

ELABORAZIONE DATI SPERIMENTALI

ESPERIMENTO: MISURA DELLA MASSA e DELLA DENSITA' DELL'ARIA

(metodo bottiglia e pompa da bicicletta)

Reset della TI-92 con <2nd> <MEM> <F1> <1> <E> <E>

Regolazione del contrasto con <0> <-> (rombo e segno meno o più)

Attivazione ambiente *Data/Matrix Editor*:

<APPS> <6> <3>

scrivere il nome *massaria* come titolo per la cartella, e premere <E>:

NEW

Type: Data
Folder: main
Variable: massaria
Row dimension: 1
Col dimension: 1

Enter=OK ESC=CANCEL

inserire i dati sperimentali nelle due colonne c1 e c2 e i titoli in testa come nell'esempio seguente (spostarsi con il cursore sulla cella, scrivere, premere <E> :

	c1	c2	c3	c4	c5
1	200.	.15			
2	400.	.35			
3	600.	.58			
4	800.	.82			
5	1000.	1.03			
6	1200.	1.24			
7					

c1, Title="v(cm^3)"

Impostazione del grafico con i dati sperimentali immessi:

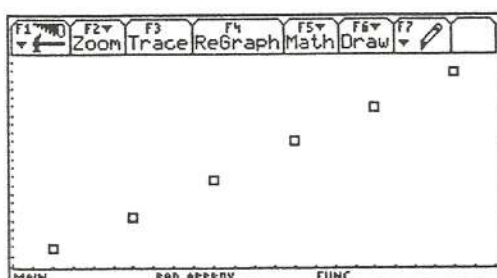
Premere <F2> , <F1>, muoversi con il cursore sulla riga x... e scrivere c1, sulla riga y... e scrivere c2, come nell'esempio; al termine <E> <E> per tornare all' ambiente *Data/Matrix Editor*

fisica\rompic Plot 1

Plot Type: Scatter
Mark: Box
X: c1
Y: c2
Hist. Graph: Off
Use Freq and Categories? NO
Pres: 1
Date: 1/1/92
File Name: Plot1

Enter=SAVE ESC=CANCEL

Per visualizzare il grafico, <APPS> <4>; eventualmente <F2> <9> (Zoom Data) per far apparire i punti:



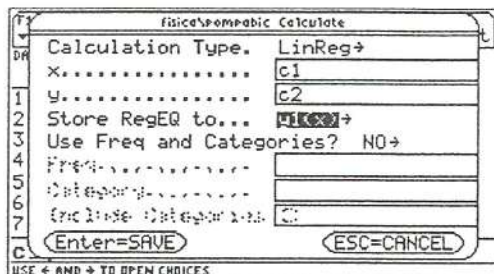
Procedimento di interpolazione:

<APPS> <6> <1> <F5>

Calculation type: <=>> (cursore a destra), scegliere <5> *Lin Reg*, <E>, *

indicare per le variabili x e y i valori delle colonne c1 e c2,

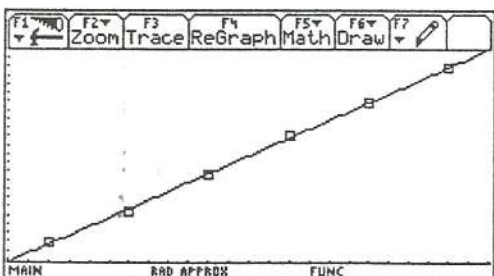
scegliere di far scrivere l' equazione della retta di regressione nell' editor come $y1(x)$:



premere <E>; appare:



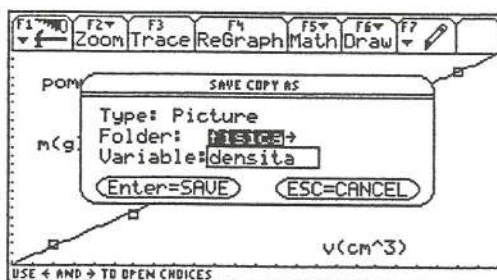
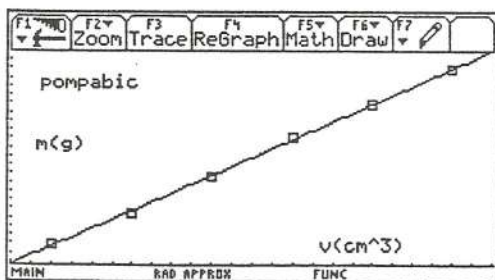
per visualizzare il grafico con la retta di interpolazione, premere <E>, <APPS> <4>



facoltativo:

<F1> <9> per modificare alcuni parametri del grafico (griglia, cursore di riferimento, etichette sugli assi, ecc);

<F7> <7> per scrivere dei testi sul grafico e <F7> <8> per salvare l'immagine (o una sua parte, indicando gli estremi del rettangolo), con un nome da assegnare:



ESPERIMENTO: MISURA DELLA VELOCITA' DEL SUONO

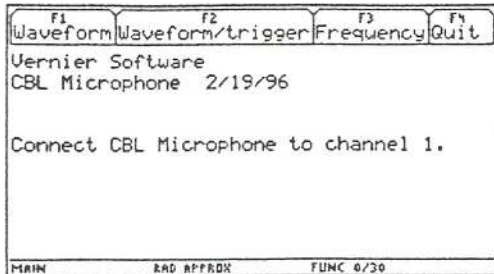
19/4/97

temperatura: 20°C

TI92 + CBL + sonda microfonica + "tubone" PVC chiuso a una estremità

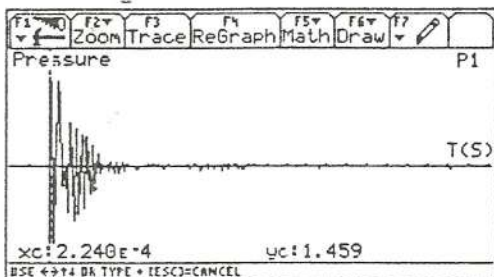
lunghezza "tubone" $l = 176,5 \text{ cm}$

programma: microphone

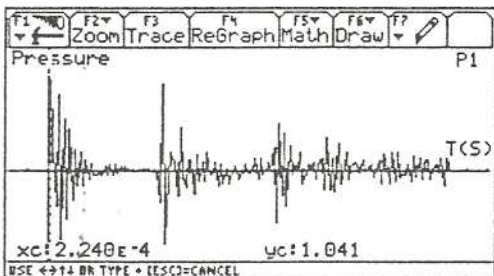


si preme <F2> per iniziare

grafico relativo allo schiocco delle dita davanti al microfono, senza il tubone:

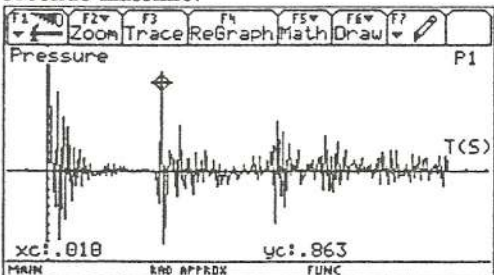


ripetizione con il microfono davanti al tubone:



istante di tempo rilevato dal cursore $t = 2,2e-4$

secondo massimo:



istante di tempo rilevato dal cursore $t = 0,010 \text{ s}$

(terzo massimo: $t = 0,020$)

calcolo della velocità del suono:

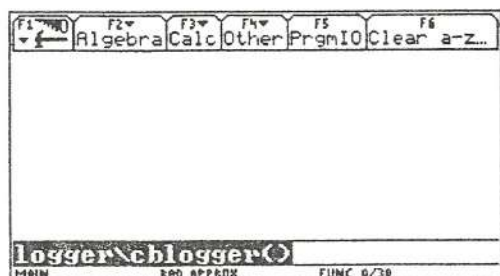
$v = 2d/t = 2 * 1,765 \text{ m} / 0,010 \text{ s} = 353 \text{ m/s}$ (343 m/s secondo *Le tavole Ma-F-BI-C*, Zanichelli)

ESPERIMENTO: LEGGE DI BOYLE

progr cblogger

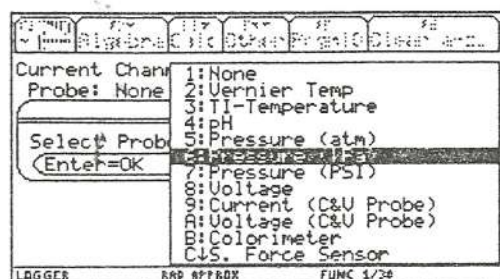
TI-92 + CBL + sensore di pressione con adattatore + siringa CBL

Comando per lanciare il programma, dall'ambiente HOME:

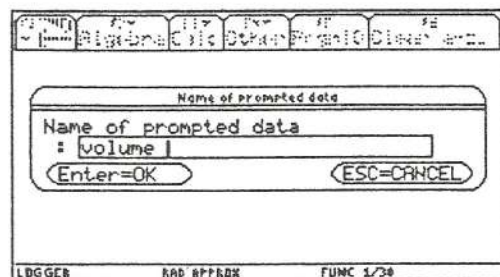
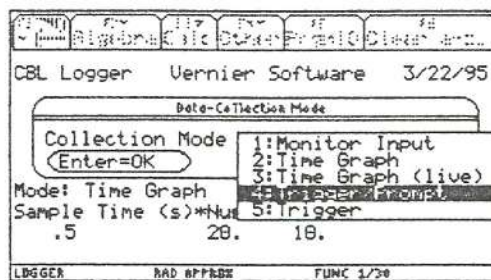
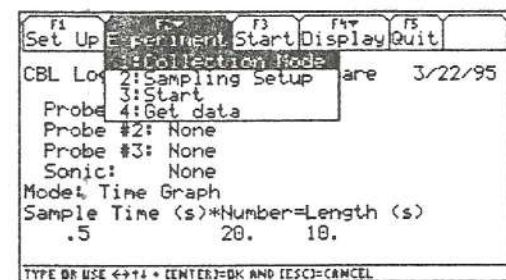


Configurazione iniziale:

scelta del sensore <F1>, <F2> :



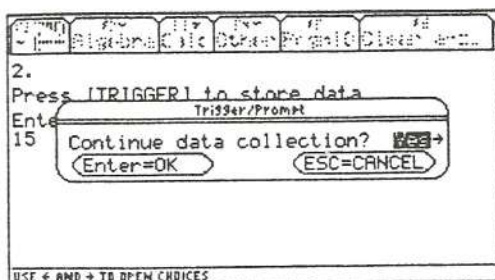
Configurazione acquisizione dati: <F2>: opzione con trigger per inserire manualmente i valori del volume letti sulla siringa



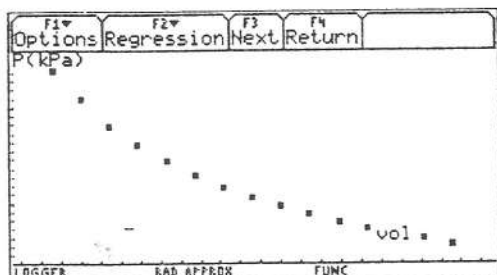
poi <F3> START

Si fissa la siringa al sensore; si regola il volume iniziale (20 cm^3), tenendo la levetta del rubinetto parallela al tubicino per collegare con l'ambiente esterno; poi si ruota la levetta escludendo l'ambiente esterno e si iniziano le misure.

Premendo il tasto <Trigger> sul CBL viene acquisito il valore della pressione e si chiede di immettere il valore del volume; poi è chiesta conferma per proseguire le misure.

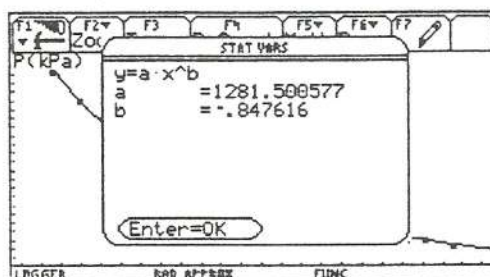
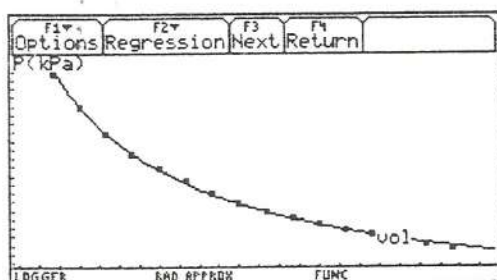
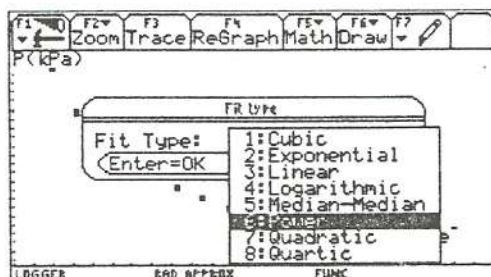
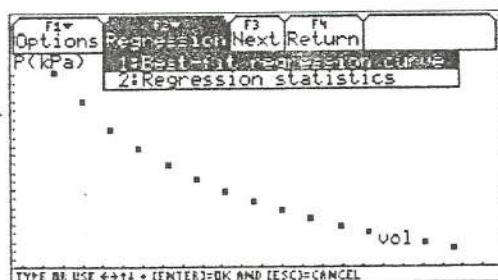


Al termine, rispondendo no alla richiesta di prosecuzione, viene visualizzato il grafico dei risultati, simile a quello riportato:



Si può ricavare la curva di interpolazione dei dati direttamente dal programma, o passare attraverso la linearizzazione del grafico; vediamo entrambi i procedimenti.

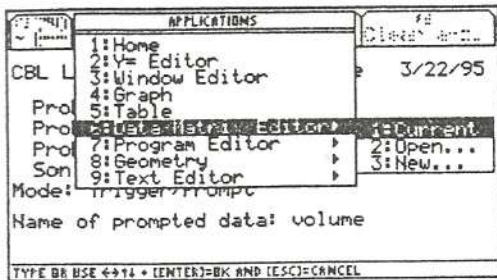
Si preme <F2> per ricercare la curva di interpolazione dei dati direttamente dal programma:



Dalla teoria ci saremmo aspettati come esponente -1 e non -0.85. Inoltre è accettabile il valore 1286 per il coefficiente a?

Per controllo procediamo a una interpolazione "manuale" per altra via, linearizzando il grafico. Si analizza, anziché il grafico $p(V)$, quello $p(1/V)$.

Premendo <F4>, <F5> si esce dal programma e si attiva poi l'ambiente Data/Matrix Editor in cui si recuperano i dati sperimentali::

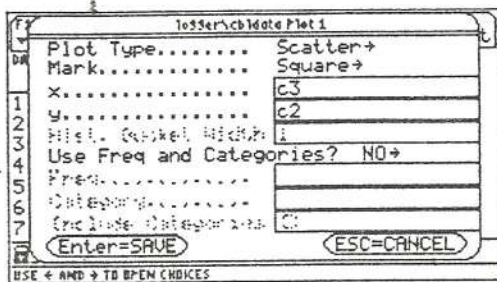


Si scrivono le intestazioni di colonna e le formule di calcolo del reciproco del volume per linearizzare il grafico

	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
	Plot	Setup	Cell	Header	Calc	Util	Stat
DATA	V	p	1/V				
	c1	c2	c3	c4	c5		
1	20.	99.93	.05	0.	0.		
2	19.	104.93	.05263				
3	18.	109.92	.05556				
4	17.	116.17	.05882				
5	16.	122.41	.0625				
6	15.	129.91	.06667				
7	14.	-137.4	.07143				

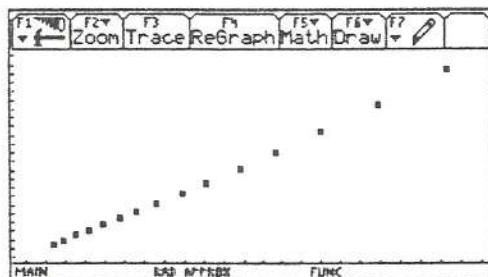
c3=1/c1

premendo <F2> PlotSetUp ed <F1> Define si imposta il grafico con i dati della pressione e del reciproco del volume:

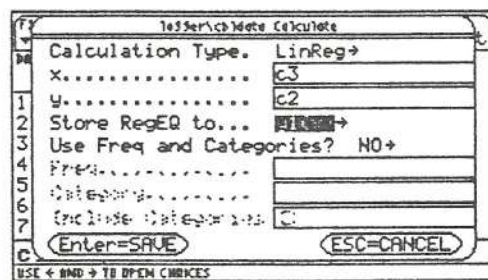
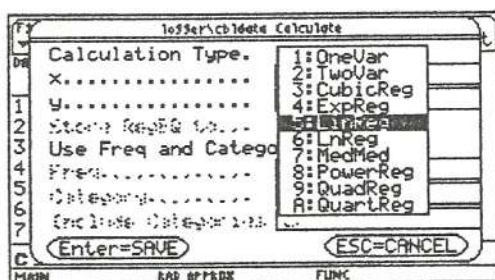


Si ritorna all'ambiente di partenza premendo <ENTER> due volte e si attiva l'ambiente GRAPH ottenendo il grafico $p(1/V)$:

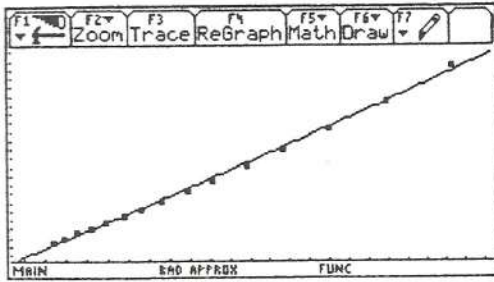
c3=1/c2



Per determinare la retta di interpolazione si ritorna all'ambiente Data/Matrix Editor e si preme <F5>:



E' visualizzato il grafico con i dati sperimentali e i parametri della retta di interpolazione:



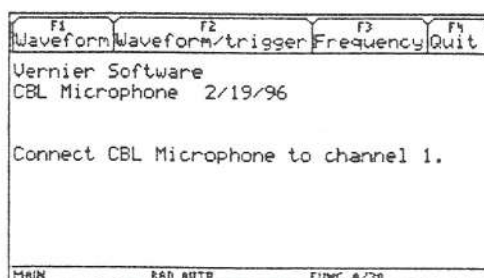
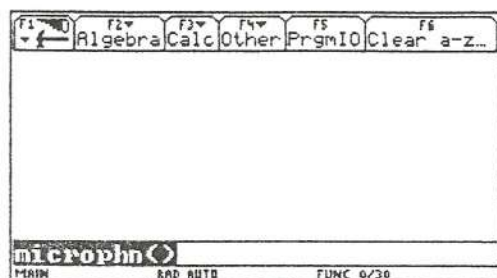
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Plot					.11	Stat
DATA	U	STAT VARS				
	c1	y=a·x+b				
1	20.	a	=6.520873E-4			
2	19.	b	=-.017502			
3	18.	corr	=.99874			
4	17.	R ²	=.997482			
5	16.					
6	15.					
7	14.	Enter=OK				
c3=1/c1						
MAIN	RAD	APPRX	FUNC			

ESPERIMENTO: STUDIO DEL SUONO DI UN DIAPASON E MODELLIZZAZIONE

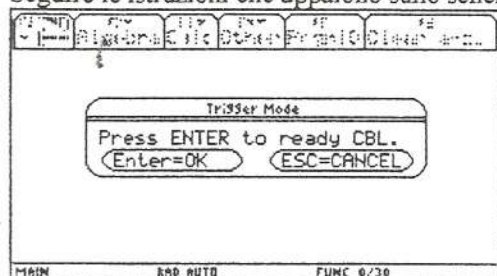
TI-92 + CBL + microfono (MCA-CBL) + diapason
programma microphn

I PARTE: ACQUISIZIONE DATI

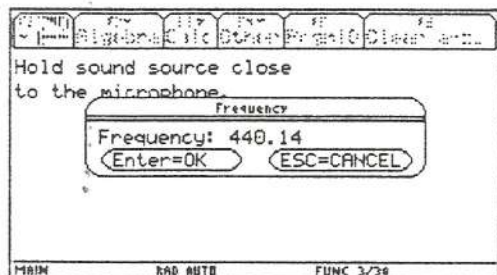
Comando per lanciare il programma, dall'ambiente HOME:



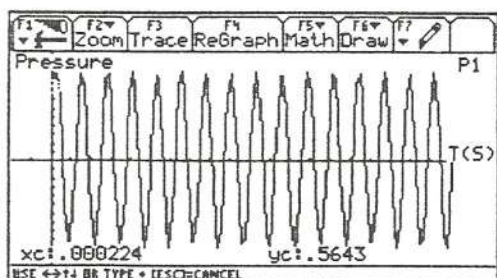
Nel menu principale le opzioni 1 e 2 consentono entrambe di analizzare l'onda in arrivo, ma la seconda ha un valore di soglia minimo al di sotto del quale non registra segnali (e quindi rumori di fondo). La terza opzione permette di misurare direttamente la frequenza di un suono. Si può iniziare con questa per misurare la frequenza del diapason. Seguire le istruzioni che appaiono sullo schermo:



al termine si ha una risposta come la seguente:



Tornati al menu principale, scegliere <F2> Waveform/trigger. Colpire il diapason con il martelletto e successivamente avviare l'acquisizione dati premendo <ENTER> e tenendo il diapason in prossimità del microfono. Al termine compare sullo schermo un grafico come il seguente; eventualmente ripetere l'acquisizione.

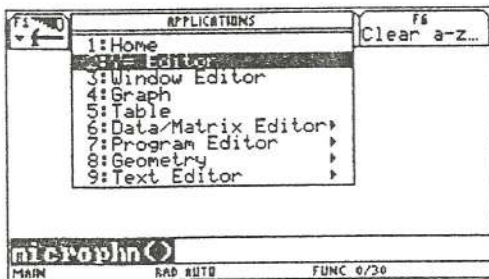


Premere il bottone verso destra per muovere il cursore sullo schermo; in questo modo, leggendo le coordinate dei punti, si può ricavare l'ampiezza massima e il periodo dell'oscillazione.

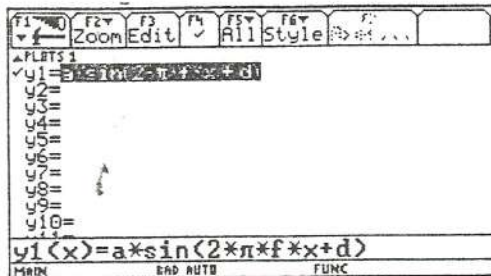
II PARTE: MODELLIZZAZIONE

Premere <ESC> per abbandonare il grafico, ed <ENTER> alla richiesta di non ripetere l'acquisizione. Premendo <F4> si esce dal programma *microphn*.

Attivare l'ambiente Y=Editor premendo il tasto <APPS> e selezionando l'opzione 2 *



Nell'ambiente attivato è predisposta una funzione $Y1(x)$ da adattare alla curva ottenuta in precedenza. Con il tasto <ENTER> spostarsi nella riga di introduzione e sostituire al posto di a, f, d i valori rispettivamente dell'ampiezza, frequenza e fase dell'onda.

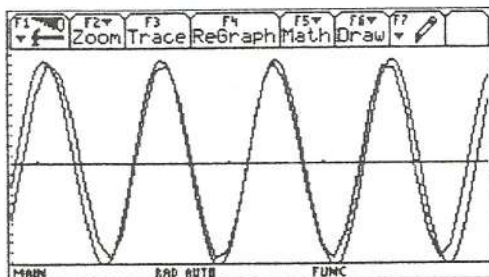


Premere <ENTER> al termine, poi <APPS> 4:Graph per attivare l'ambiente grafico. Verranno tracciate le curve corrispondenti ai dati sperimentali e all'equazione scritta. Se la curva della modellizzazione non corrisponde a quella sperimentale, ritornare all'equazione modificando i parametri. Procedere per tentativi fino a quando le due curve si sovrappongono.

Alcuni comandi nel menu <F2> Zoom possono facilitare l'attività richiesta:

- Per visualizzare una parte più ristretta del grafico: premendo <F2> Zoom e selezionando 1:ZoomBox si fissano sullo schermo due punti corrispondenti all'angolo superiore sinistro e inferiore destro di un riquadro rettangolare.
- <F2>Zoom, A:ZoomFit dimensiona la finestra sulla curva di massima ampiezza
- Per ritornare alle condizioni iniziali di visualizzazione, premere di nuovo <F2> Zoom e selezionare 9:ZoomData

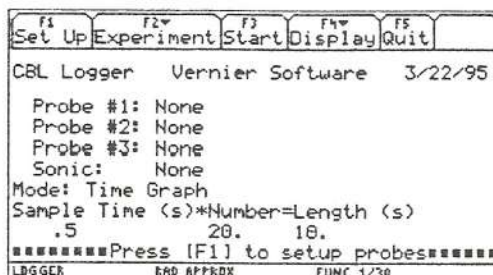
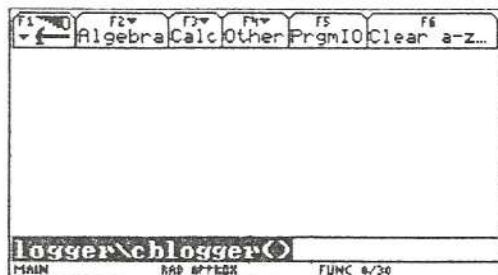
Il grafico seguente mostra una finestra contenente poche oscillazioni e un tentativo di curva di modellizzazione:



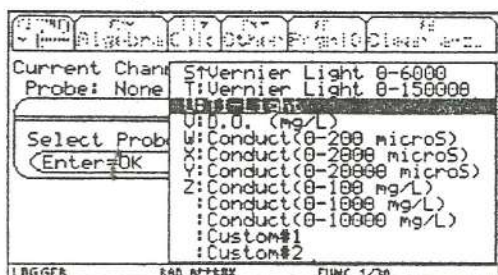
ESPERIMENTO: INTENSITA' LUMINOSA E DISTANZA

TI92 + CBL + sensore di luce
 banco ottico (o cordella metrica) e lampada 6V 5A
 programma: CBLOGGER

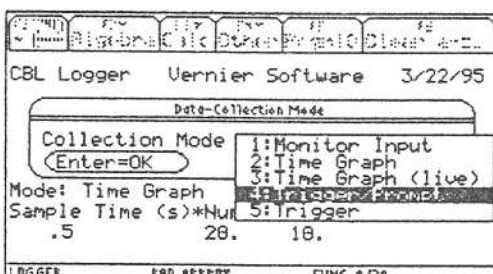
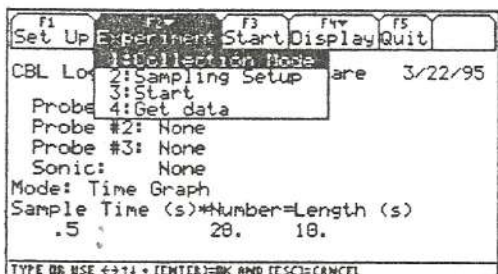
Comando per lanciare il programma, dall'ambiente HOME:



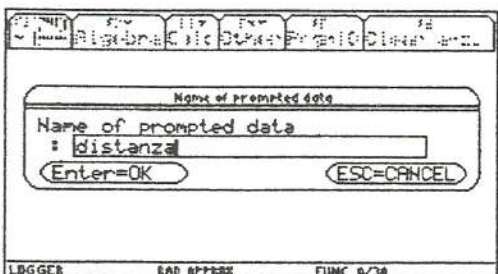
Per la configurazione del programma si preme <F1> Set Up e poi, se il sensore è già collegato al canale 1, <F2>Probe per selezionare il tipo di sonda (TI-Light):



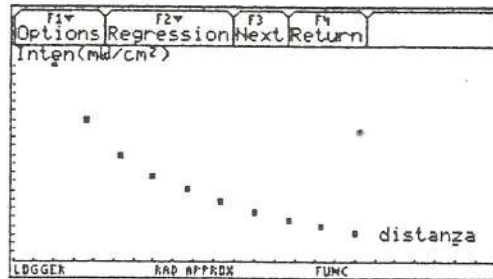
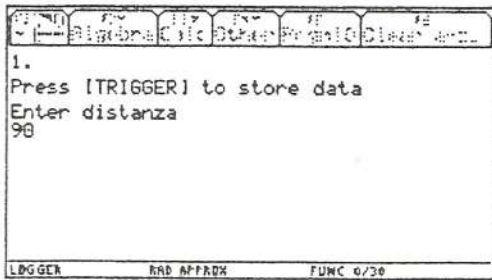
Tornati al menu principale, <F2> Esperiment per impostare il modo di raccolta dei dati:



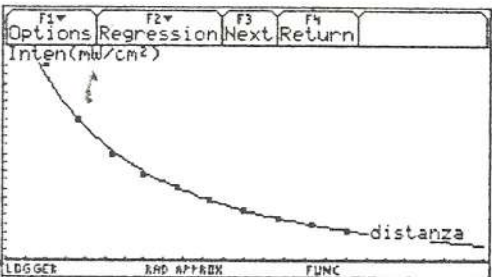
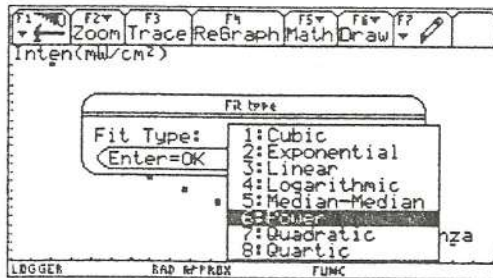
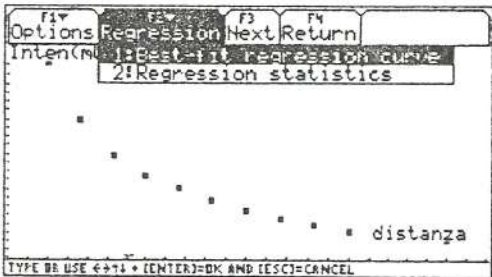
La modalità Trigger/Prompt consente di acquisire i dati sperimentali (intensità luminosa) a comando dell'utente, associandoli a quelli di un'altra grandezza, in questo caso la distanza:



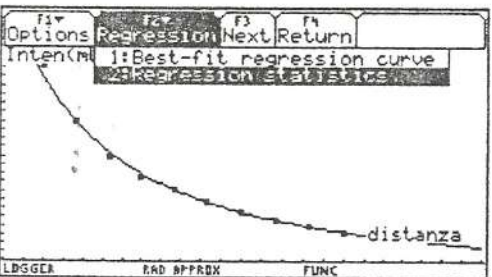
Con il tasto <F3> del menu principale si dà inizio alla acquisizione, che avviene premendo il tasto <TRIGGER> del CBL; subito dopo si richiede di immettere il valore della distanza tra sensore e lampadina. Si ripete il procedimento fino alla fine delle misure; al termine appare un grafico dell'intensità luminosa in funzione della distanza, simile al seguente:



Premendo <F2> si può andare alla ricerca di una curva di interpolazione:

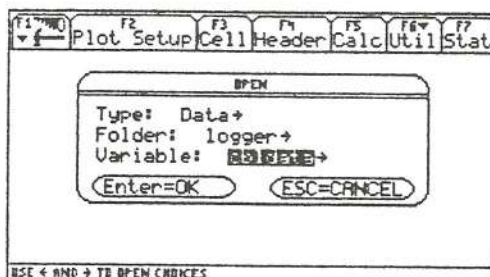
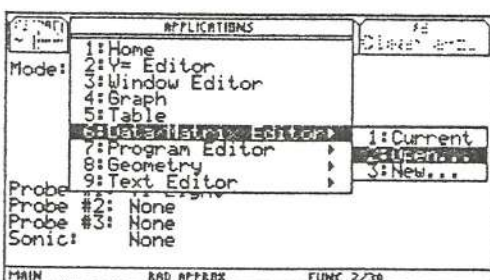


i cui parametri sono visualizzati:



Conviene effettuare un controllo dei risultati attraverso la linearizzazione del grafico.

Abbandonato il programma, premendo i tasti <APPS> e 6:Data/Matrix Editor si possono caricare nell'ambiente Data/Matrix Editor i dati sperimentali ottenuti, che sono automaticamente salvati nel file *cbldata*, nella cartella (folder) di nome *logger*:



Si mette un'intestazione alle colonne, e nella colonna C3 si calcola il reciproco della distanza al quadrato, scrivendo la formula come appare nella videata seguente:

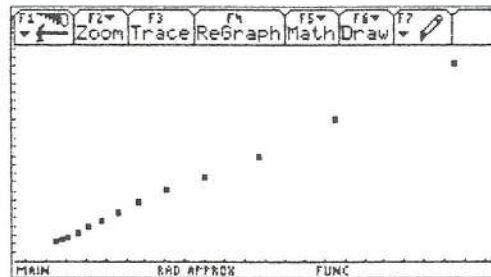
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Plot	Setup	Cell	Header	Calc	Util	Stat
DATA	d	i	1/d^2			
	c1	c2	c3	c4	c5	
1	30.	.19074	.00111	0.	0.	
2	35.	.14178	.00082			
3	40.	.11062	.00063			
4	45.	.09059	.00049			
5	50.	.08058	.0004			
6	55.	.06834	.00033			
7	60.	.05944	.00028			
c3=1/c1^2						
MAIN RAD APPROX FUNC						

premendo <F2> PlotSetUp ed <F1> Define si imposta il grafico con i dati della intensità luminosa in funzione dell'inverso del quadrato della distanza:

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Plot Type	Scatter					
Mark	Square					
X	c3					
Y	c2					
Plot	Graph					
Use Freq and Categories?	NO					
Enter=SAVE ESC=CANCEL						
MAIN RAD APPROX FUNC						

Si ritorna all'ambiente di partenza premendo <ENTER> due volte e si attiva l'ambiente GRAPH ottenendo il grafico richiesto:

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1: Home						
2: V= Editor						
3: Window Editor						
4: Graph						
5: Table						
6: Data/Matrix Editor						
7: Program Editor						
8: Geometry						
9: Text Editor						
15.	128.66	.00777				
14.	136.15	.00734				
c3=1/c2						
MAIN RAD APPROX FUNC						

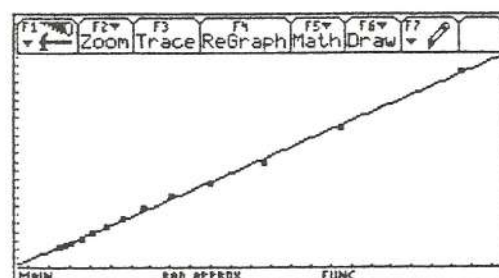


Per determinare la retta di interpolazione si ritorna all'ambiente Data/Matrix Editor e si preme <F5>:

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Calculation Type	1: OneVar					
X	2: TwoVar					
Y	3: CubicReg					
Store RegEQ to...	4: ExpReg					
Use Freq and Categories?	5: LinReg					
Freq	6: MedMed					
Category	7: PowerReg					
Include Categories?	8: QuadReg					
	9: QuartReg					
Enter=SAVE ESC=CANCEL						
MAIN RAD APPROX FUNC						

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Calculation Type	LinReg					
X	c3					
Y	c2					
Store RegEQ to...	Y1					
Use Freq and Categories?	NO					
Freq						
Category						
Include Categories?						
Enter=SAVE ESC=CANCEL						
MAIN RAD APPROX FUNC						

E' visualizzato il grafico con i dati sperimentali e i parametri della retta di interpolazione:



F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
STAT VARS						
y=a*x+b						
a	=158.040579					
b	=.014061					
corr	=.999452					
R^2	=.998904					
Enter=OK						
c3=1/c1^2						
MAIN RAD APPROX FUNC						