

Voglio provare anch'io!

Itinerari di laboratorio di Fisica
per le Scuole Secondarie di Secondo Grado
elaborati nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche

A.S. 2006-07

*Il mio personale interesse per la scienza riguarda solo la possibilità
di scoprire cose sul mondo, e più scopro, più aumenta il piacere
della scoperta.*

Richard P. Feynman

Il *Progetto Lauree Scientifiche* nasce dalla collaborazione tra Scuola e Università con l'obiettivo di unire le rispettive competenze didattiche al fine di diffondere tra gli studenti l'interesse verso le discipline scientifiche.

In quest'ottica il Collegio Didattico di Fisica dell'Università degli Studi di Roma Tre e un gruppo di docenti in servizio presso cinque Scuole dell'area romana che collaborano al Progetto hanno elaborato una serie di percorsi didattici di laboratorio da proporre agli studenti di altre Scuole Superiori di Roma e del Lazio durante l'A.S. 2006-07.

In queste pagine sono raccolte tutte le schede didattiche relative alle esperienze. Per ogni esperienza sono state preparate una scheda per il docente, necessaria per preparare gli studenti a svolgere l'attività in laboratorio, e una scheda per gli studenti, da utilizzarsi come riferimento durante gli esperimenti.

Le attività si svolgeranno presso i laboratori didattici dei cinque Istituti Scolastici:

- Liceo Scientifico "F.Enriques" (Ostia, Roma)
- Liceo Scientifico "A.Labriola" (Ostia, Roma)
- Liceo Scientifico "Democrito" (Roma)
- Liceo Scientifico "G.Peano" (Roma)
- ISS Piazza della Resistenza (Monterotondo, Roma)

INDICE

Liceo Scientifico “F. Enriques”

Descrizione dell'itinerario di laboratorio – Scheda docente	1
Densità dell'aria – Scheda docente	6
Densità e volume di un corpo solido – Scheda docente	13
– Scheda studente	25
Densità di un liquido tramite la legge di Stevino – Scheda docente	34
– Scheda studente	45
Densità di un liquido tramite il Principio di Archimede – Scheda docente	53
– Scheda studente	65
Calendario degli appuntamenti	74

Liceo Scientifico “Democrito”

Determinazione del coefficiente di dilatazione cubica dell'acqua – Scheda docente	76
– Scheda studente	80
Calendario degli appuntamenti	84

Liceo Scientifico “A. Labriola”

La forza elastica al Real Time Laboratory – Scheda docente	85
– Scheda studente	97
L'oscillatore armonico verticale al Real Time Laboratory – Scheda docente	107
– Scheda studente	120
La legge di Boyle al Real Time Laboratory – Scheda docente	130
– Scheda studente	140
Carica e scarica di un condensatore al Real Time Laboratory – Scheda docente	149
– Scheda studente	161
Calendario degli appuntamenti	171

Liceo Scientifico “Peano”

Il moto del pendolo – Scheda docente	172
– Scheda studente	175
Calendario degli appuntamenti	178

I.S.S. Piazza della Resistenza

Produzione di corrente elettrica mediante effetto fotovoltaico	
e di idrogeno e ossigeno attraverso elettrolisi dell'acqua – Scheda docente	179
– Scheda studente	198
Produzione di corrente elettrica tramite celle a combustibile alimentate	
da idrogeno e ossigeno prodotti attraverso elettrolisi dell'acqua – Scheda docente	209
– Scheda studente	223
Calendario degli appuntamenti	229

SCHEDA PER IL DOCENTE

DESCRIZIONE DELL'ITINERARIO DI LABORATORIO

I Titolo dell'esperienza

“Un itinerario di Laboratorio: LA DENSITÀ”

Esperienze di laboratorio per la misura della densità di una sostanza solida e di un fluido

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. “F. ENRIQUES” (Ostia, Roma)

II Breve descrizione dell'itinerario e sua finalità

Viene proposto un itinerario di laboratorio, articolato in più esperienze; esso si configura come un percorso formativo che, partendo da un contenuto didattico specifico, sviluppi negli studenti competenze laboratoriali applicabili anche a contesti diversi.

L'attività si svolge in due momenti diversi dell'anno scolastico:

Prima parte - (Ottobre-Novembre)

Sono svolte esperienze quantitative in cui si determina il valore della densità dell'aria e di alcuni corpi solidi.

Seconda parte - (Marzo-Aprile)

Sono svolte due esperienze per determinare il valore della densità dei liquidi applicando i Principi di Stevino e di Archimede.

Un'attività di laboratorio così strutturata permette agli studenti di applicare tecniche e metodi diversi di misura della densità, di riflettere sulla loro efficacia e di scegliere infine la procedura che, minimizzando gli errori sperimentali, risulti più adatta a determinare il valore della densità di un corpo.

III Classi a cui è rivolto l'itinerario

- Prime classi del Liceo Tecnologico, PNI, Linguistico, Istituti Tecnici
- Classi terze e quarte del Liceo Scientifico e classi quarte del Liceo Classico

IV Obiettivi generali

1. Avvicinare gli studenti alla pratica di laboratorio.
2. Chiarire il significato fisico della grandezza densità.
3. Valutare le “consistenze” rispettivamente di un corpo solido e di un fluido e di confrontarle tra di loro analizzandone l’ordine di grandezza.
4. Applicare, nella fase dell’analisi e dell’elaborazione dei dati, tutte le nozioni della Teoria della Misura, stabilire relazioni tra le grandezze e applicare le tecniche di costruzione e di interpretazione di un grafico.
5. Costruire tabelle, elaborare dati e costruire grafici con il foglio elettronico.

V Obiettivi specifici

<u>CONOSCENZE</u>	<u>COMPETENZE</u>	<u>CAPACITA'</u>
<p>1. <u>Gli strumenti di misura e le loro caratteristiche</u></p> <p>2. <u>Grandezze fisiche e loro misura</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Definizione operativa di grandezza fisica ○ Le grandezze fisiche fondamentali e derivate ○ Il S.I. di misura ○ Misura di una grandezza ○ Misura diretta e indiretta di una grandezza ○ Le possibili cause di errore in una misura ○ Incertezze accidentali e sistematiche ○ Incertezza assoluta e relativa ○ Incertezza in una sola misura ○ Misura più probabile ed incertezza su più misure ○ Incertezza nella somma, differenza, prodotto e quoziente di due misure <p>3. <u>Grandezze scalari e vettoriali</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Il volume e sua unità di misura; il volume di un litro di acqua ○ Densità e sua unità di misura; densità assoluta e relativa ○ La forza peso e sua unità di misura ○ Peso specifico e sua unità di misura ○ Relazione tra la densità e il peso specifico 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilizzare la notazione scientifica e i prefissi indicati dal S.I. 2. Utilizzare gli strumenti di misura e valutarne le caratteristiche. 3. Effettuare misure dirette. 4. Scrivere la misura di una grandezza nell’unità di misura del S.I. operando le opportune equivalenze. 5. Calcolare l’errore relativo. 6. Valutare la precisione di una misura. 7. Determinare la misura delle grandezze derivate. 8. Applicare le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette. 9. Effettuare l’arrotondamento dei risultati delle misure. 10. Individuare le cifre significative di una misura. 11. Esprimere l’ordine di grandezza di una misura. 12. Verificare algebricamente una proporzionalità tra due grandezze. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Leggere i valori delle grandezze su varie tipologie di strumenti. 2. Applicare le leggi di propagazione degli errori in qualunque contesto fisico. 3. Elaborare una serie di dati individuando le relazioni fra le grandezze che caratterizzano un fenomeno. 4. Determinare la misura di una grandezza (la densità) attraverso l’applicazione di leggi generali (principi di Stevino e di Archimede).

<p>4. Statica dei fluidi</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Proprietà di un fluido ○ Pressione e sue unità di misura ○ Principi di Stevino e di Archimede <p>5. Relazioni fra grandezze</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Definizione matematica di grandezze <i>direttamente</i> e <i>inversamente</i> proporzionali ○ Conoscere i grafici associati alla suddette proporzionalità ○ Individuare in un fenomeno quale grandezza è la variabile dipendente e quale è quella indipendente ○ Nota la relazione tra due grandezze $A = f(B)$ riconoscere qual è la variabile dipendente e quale quella indipendente 	<p>13. Realizzare un grafico sperimentale.</p> <p>14. Rappresentare le barre relative alle incertezze.</p> <p>15. Utilizzare il grafico per stabilire la relazione di proporzionalità esistente tra due grandezze e per calcolare il valore della costante.</p>	<p>5. Individuare e minimizzare, nella fase della raccolta dei dati, le cause di errori sistematici.</p> <p>6. Proporre modifiche che migliorino i risultati di un'esperienza.</p>
---	---	--

VI

Elenco delle esperienze dell'Itinerario di Laboratorio

Le seguenti esperienze, pur facendo parte di un modulo tematico sulla densità, sono strutturate in modo da poter essere utilizzate anche singolarmente.

1. Determinazione della densità dell'aria.
2. Determinazione del volume e della densità di un corpo solido irregolare.
3. Determinazione della densità di un liquido con il Principio di Stevino.
4. Determinazione della densità di un liquido con il Principio di Archimede.

VII

Materiale didattico prodotto

- Presentazione dell'Itinerario di Laboratorio e scheda teorica sulla densità.
- Schede di presentazione e di esecuzione delle esperienze per il docente.
- Schede di esecuzione delle esperienze per lo studente.
- Questionario, rivolto allo studente, con domande finalizzate alla verifica della comprensione dell'attività sperimentale svolta.
- Copia del questionario per il docente corredata delle risposte.
- Griglia di valutazione del questionario.
- Schema della relazione di laboratorio con le indicazioni per la sua compilazione.

VIII Scheda teorica

DAL CONCETTO DI DENSITÀ ALLA SUA DEFINIZIONE OPERATIVA

Tutta la materia è costituita da atomi. Una conseguenza della struttura discontinua sono i diversi stati di aggregazione della materia che dipendono dalle forze interne di coesione delle molecole.

Nello **stato aeriforme** gli spazi tra le molecole sono rilevanti. Le molecole non si toccano e si muovono fino ad occupare tutto il volume a disposizione. Gli aeriformi quindi si possono comprimere e non hanno né volume né forma propria.

Nello **stato liquido** le molecole sono accostate, ma gli spazi vuoti tra di esse cambiano continuamente di forma. Le molecole possono quindi scorrere le une sulle altre. I liquidi perciò hanno un volume proprio e non si possono comprimere, tuttavia non hanno forma propria.

Nello **stato solido** le molecole si toccano e non si muovono. Gli spazi vuoti sono generalmente ridotti al minimo. I solidi perciò non si possono comprimere e hanno forma e volume propri.

La grandezza fisica **densità** consente di mettere in evidenza la diversa “consistenza” di un corpo solido o di un fluido. Essa è una caratteristica che non dipende dalla forma e dalle dimensioni del corpo ma dalla sua struttura interna e dalle condizioni ambientali.

*La **densità assoluta** è una grandezza che dà un’informazione particolare su una certa sostanza, ovvero ci fornisce informazioni sulla quantità di materia di una determinata sostanza che occupa una ben precisa regione di spazio.*

➡ **Mi dice quanta massa, misurata in kg, è contenuta in un volume di 1 m³.**

- È definita attraverso due altre grandezze, la **massa** e il **volume**.

➡ **È una grandezza derivata.**

- È il rapporto tra la massa e il volume che tale massa occupa:

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

$$\text{unità di misura} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\text{dimensioni} [\mathcal{D}] = [m * l^3]$$

- La densità non dipende dalla quantità di materia, ma solo dalla *qualità* e dalle *condizioni* (quali temperatura e pressione) in cui la materia si trova.

➡ **La densità è una grandezza intensiva.**

Alcuni valori della densità utili per l'esecuzione delle esperienze proposte:

Materiale	Densità a 20°C (kg·m ⁻³)
Alluminio	2700
Ferro	7860
Rame	8960
Zinco	7100
Vetro	2400-2800
Acqua	1000
Alcol etilico	800
Petrolio	680
Olio	900
Anidride carbonica	1.9
Aria	1.29

Come si nota, l'ordine di grandezza della densità del rame e del ferro è di 10⁴ mentre quello dei liquidi considerati è di 10³. Non è un caso che i liquidi si dilatano 10 volte più dei corpi solidi.

*Si definisce **densità relativa** di una sostanza il rapporto tra la densità della sostanza e la densità dell'acqua.*

Ad esempio, il rame ha densità 8960 kg/m³ e densità relativa δ_r :

$$\delta_r = \frac{\delta_{rame}}{\delta_{acqua}} = \frac{8960 \frac{kg}{m^3}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 8,96$$

➡ **La densità relativa è una quantità adimensionale.**

Densità e temperatura

Indipendentemente dallo stato fisico in cui si trova una sostanza, la densità dipende dalla temperatura in quanto il volume varia al variare della temperatura.

Si ha pertanto una diminuzione della densità quando la temperatura aumenta.

Un'eccezione notevole è costituita dall'[acqua](#) a temperatura compresa tra [0°C](#) e circa [4°C](#); in questo intervallo un aumento di temperatura provoca una diminuzione del volume e quindi un aumento della densità.

➡ **La densità è legata ad altre due grandezze, la pressione e la temperatura.**

SCHEDA PER IL DOCENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DELL'ARIA

I Titolo dell'esperienza

DENSITÀ DELL'ARIA

Autori
Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

Tutta la materia è costituita da atomi.

Una conseguenza della struttura discontinua sono i diversi stati di aggregazione della materia che dipendono dalle forze interne di coesione delle molecole.

Nello **stato aeriforme** gli spazi tra le molecole sono rilevanti. Le molecole non si toccano e si muovono fino ad occupare tutto il volume a disposizione. Gli aeriformi quindi si possono comprimere e non hanno né volume né forma propria.

Per descrivere le proprietà dei fluidi massa e volume non sono sufficienti e soprattutto risultano poco opportuni. La grandezza che risulta utile per descrivere un fluido è la densità.

L'esperienza proposta, svolta dal docente, è la prima dell'Itinerario di Laboratorio.

Essa consente di introdurre il concetto di densità individuandone le caratteristiche in termini di grandezza fisica e di svolgere ed applicare le nozioni fondamentali di teoria della misura.

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza

- Prime classi del Liceo Tecnologico, PNI, Linguistico, Istituti Tecnici
- Classi terze e quarte del Liceo Scientifico e classi quarte del Liceo Classico

Prerequisiti

- Gli strumenti di misura e le loro caratteristiche.
- Le grandezze fisiche e la loro misura.
- Le incertezze sulle misure dirette ed indirette.
- Densità: definizione e sua unità di misura.

IV

Obiettivi generali

- Individuare una procedura che permetta di determinare in modo *diretto* il volume di un aeriforme.
- Dimostrare che l'aria ha una massa.
- Determinare la densità dell'aria.
- Confrontare il suo ordine di grandezza con quello di altre sostanze solide e liquide.

V

Obiettivi specifici

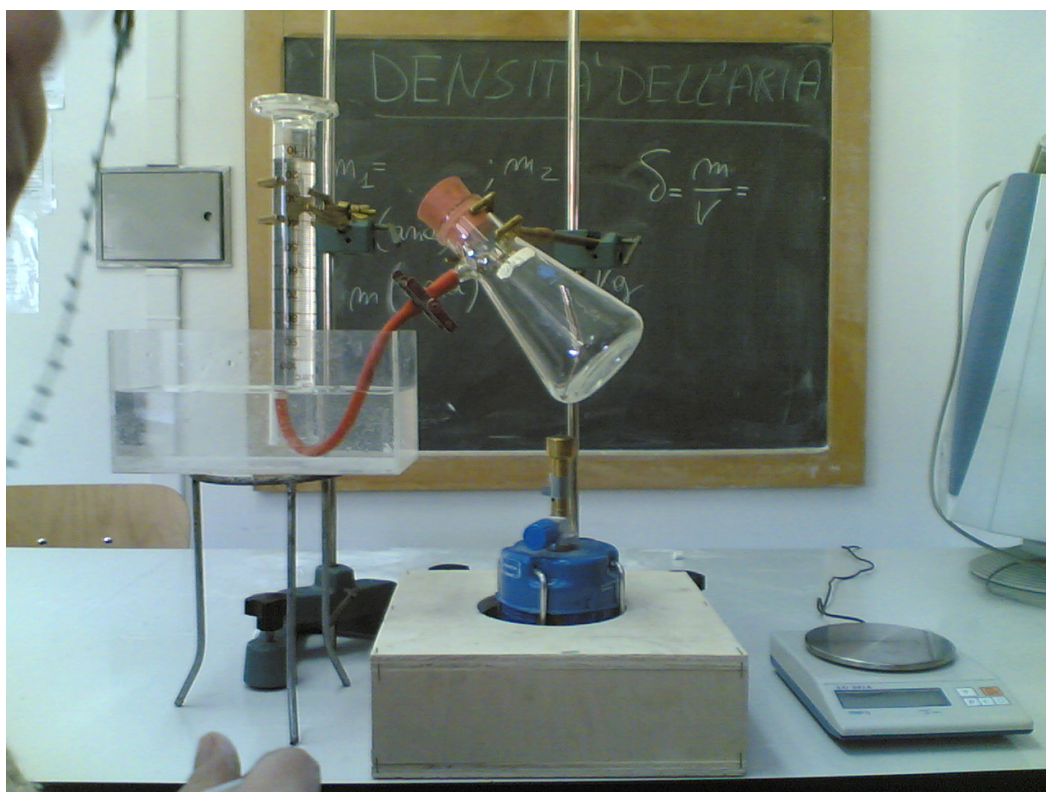
- Individuare le caratteristiche di uno strumento di misura.
- Effettuare misure dirette ed indirette.
- Usare le corrette unità di misura effettuando se necessario le opportune equivalenze.
- Determinare l'incertezza della misura diretta di una grandezza.
- Applicare le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette.
- Esprimere correttamente la misura di una grandezza.
- Gestire i calcoli numerici in notazione scientifica.
- Esprimere l'ordine di grandezza di una grandezza fisica.

VI

Materiale e strumentazione occorrente

- Matraccio con cannello laterale.
- Cilindro graduato (a 20 °C): portata = 100ml; risoluzione = 1ml.
- Tubo di gomma.
- Vaschetta.
- Bilancia digitale: portata = 500 g; risoluzione = 0.01g.
- Fornello a gas.
- due treppiedi con aste.
- due supporti con pinze.

Assemblaggio



VII

Descrizione generale del procedimento di misura Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

1. Registrare la temperatura **T** dell'ambiente in cui si esegue l'esperienza e si consideri **p₀** la pressione atmosferica.
2. Chiudere il matraccio con un tappo di gomma ed inserire nel cannello laterale un tubo di gomma che risulti chiuso da una molletta nella parte vicina al matraccio.

- Misurare con la bilancia di precisione la massa M_1 del matraccio, dei suoi accessori e dell'aria in esso contenuta.
- Riempire fino all'orlo con l'acqua il cilindro graduato e, valendosi di un foglio di carta, capovolgerlo nella vaschetta piena d'acqua.
- Dopo aver "tolto" l'aria dall'estremità del tubo rimasto aperto, lo si posiziona all'interno del cilindro graduato.
- Allentare la molletta e accendere il fornello a gas sotto il matraccio.
- L'aria al suo interno riscaldata si dilata e attraverso il tubo raggiunge il cilindro spingendo in basso l'acqua al suo interno.
- Quando non si nota più il passaggio dell'aria, spegnere il fornello, chiudere il tubo stringendo la molletta e prendere nota del livello raggiunto dall'acqua nel cilindro. Esso rappresenta il volume V dell'aria contenuta nel matraccio.
- Si misura di nuovo la massa M_2 del matraccio e dei suoi accessori. La differenza $M_1 - M_2$ rappresenta la massa (m) dell'aria.

VIII

Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire durante l'esecuzione dell'esperienza

- Il procedimento di svolgimento dell'esperienza presenta qualche difficoltà relativa all'eliminazione completa dell'aria contenuta nel tubo (punto 5); questo può essere risolto aspirando l'aria dal tubo con una pompa pneumatica.
- Nella determinazione della massa è indispensabile usare una bilancia di precisione che abbia una risoluzione di almeno 0.01 g.
- La densità di un aeriforme dipende dalla pressione e dalla temperatura; è quindi necessario operare in condizioni ambientali prossimi a $p_0 = 1.01 \cdot 10^5$ Pa e $T = 20^\circ\text{C}$.
- Il valore V del volume è ottenuto come differenza tra il livello iniziale dell'acqua nel cilindro e quello raggiunto da essa quando l'aria è interamente passata nel cilindro. Potendo, nella lettura di tali livelli, apprezzare la mezza divisione della scala, si è considerata come incertezza su V quella corrispondente ad una divisione.

Dati e risultati di riferimento

p_0 (Pa)	T ($^\circ\text{C}$)	$(M_1 \pm \Delta M_1)$ g	$(M_2 \pm \Delta M_2)$ g	$(V \pm \Delta V)$ cm^3
$1.01 \cdot 10^5$	$22,0 \pm 0.2$	348.60 ± 0.01	348.50 ± 0.01	90 ± 1

$$m = (M_1 - M_2) = (0.10 \pm 0.02)\text{g}$$

$$\delta = \frac{m}{V} = \frac{0.10 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{90 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 1.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \Delta\delta = \frac{m}{V} \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} \right) = 0.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\delta = (1.1 \pm 0.2) \text{ kg/m}^3$$

Il valore trovato della densità dell'aria, con un errore percentuale del 18%, può ritenersi compatibile con quello teorico dell'aria: $\delta = 1.29 \text{ kg m}^{-3}$ in considerazione della strumentazione usata e della procedura di misura "poco raffinata".

IX
Esempi di questionari e griglie per la valutazione

Alla fine dell'esperienza la verifica dell'attività svolta può avvenire attraverso:

- *una serie di domande rivolte agli studenti che:*
 1. stimolino la riflessione individuale sulle varie fasi sperimentali;
 2. consentano di confrontare i risultati ottenuti con quelli aspettati; a tale riguardo sarebbe opportuno fornire agli studenti la tabella con i valori della densità di alcune sostanze comuni chiedendo di confrontare l'ordine di grandezza della densità dell'aria con quella di altre sostanze solide e liquide.
 3. permettano di fare previsioni. Si può domandare agli studenti che cosa succede se variano le condizioni al contorno: ambientali (aumenta la pressione esterna o la temperatura), si cambia il liquido con il quale si esegue l'esperienza, etc.
- *la compilazione di una relazione individuale di laboratorio.*

Si allega di seguito una proposta di modello di relazione

RELAZIONE DELL'ATTIVITÀ' DI LABORATORIO

<i>ALUNNO/A</i>	<i>CLASSE</i>	<i>DATA</i>
GRUPPO		
TITOLO ESPERIENZA: Riassume sinteticamente l'argomento trattato		
OBIETTIVI	MATERIALE UTILIZZATO	
Indicano lo scopo o gli scopi dell'esperienza. Se questo non è ben chiaro, in laboratorio si rischia di perdere tempo. Saranno gli stessi alunni ad indicarli per poi discuterne collettivamente definendoli in modo corretto al termine dell'esercitazione.	È un elenco del materiale utilizzato e degli strumenti con l'indicazione delle caratteristiche; è quello fornito dall'insegnante con l'aggiunta di quello che l'alunno può richiedere per apportare modifiche all'esperienza al fine di migliorare la raccolta dei dati.	
SCHEMA DELL'ESPERIENZA		
<u>Riproduce visivamente l'apparato e i vari strumenti utilizzati nell'esperienza</u>		

TEMPO IMPIEGATO
MONTAGGIO ED ESECUZIONE DELL'ESPERIENZA
<p>È una descrizione dettagliata del procedimento seguito nel corso delle varie fasi dell'esperienza.</p> <p>Si descrivono gli eventuali problemi incontrati e gli accorgimenti da seguire nella fase di montaggio e nella raccolta dei dati.</p>
TABELLA DEI DATI RACCOLTI
<p>La costruzione della tabella deve rispondere ai seguenti requisiti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - indicare le grandezze misurate con il relativo errore ed unità di misura. - può contenere, se questo è ritenuto utile per la completezza della relazione, le misure delle grandezze derivate calcolate a partire da quelle misurate direttamente. - essere chiara e di facile "lettura".
ELABORAZIONE DEI DATI RACCOLTI
<ul style="list-style-type: none"> • Si riportano le formule che a partire dai valori delle grandezze sperimentali misurate, permettono di calcolare quelle oggetto di verifica. • Si controllano le approssimazioni che si devono fare nei calcoli (cifre significative). • Si elaborano gli errori delle misure indirette
CONSIDERAZIONI SUI GRAFICI
<p>Vengono indicate:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le grandezze rappresentate con le rispettive unità di misura e le motivazioni della scelta della scala. - Le eventuali osservazioni sui punti sperimentali. - La relazione fra le grandezze rappresentate. - Le grandezze che dal grafico possono essere derivate indicandone il loro significato e il loro accordo con quelle ricavate attraverso l'elaborazione dei dati.
CONSIDERAZIONI E RISULTATI DELL'ESPERIENZA DIFFICOLTÀ INCONTRATE
<p>Vengono esposti i problemi incontrati nell'esecuzione dell'esperienza.</p>
EVENTUALI OSSERVAZIONI E MODIFICHE PROPOSTE
<p>È la parte "creativa" della relazione. In essa gli alunni illustrano le modifiche sia nel metodo d'esecuzione che nella raccolta dei dati da loro apportate o proposte per migliorare i risultati ottenuti.</p>

X
Bibliografia e siti Web di interesse

1. J. S. Walker – Fisica – vol.1 Meccanica, Ed. Zanichelli
 2. E. Amaldi – Le idee della fisica – vol 1, Ed. Zanichelli
 3. M. Palladino Bosia – Da Galileo ad Einstein – vol 1, Ed. Petrini
 4. F. Bocci – Manuale per il laboratorio di fisica – Ed. Zanichelli
Il testo analizza le varie fasi di un'esperienza di laboratorio e guida all'analisi dei dati sperimentali.
 5. F. Tibone – Quattro.zero – vol 1 e 2, Ed. Zanichelli
Il testo consente di utilizzare il foglio elettronico per raccogliere ed elaborare i dati sperimentali, costruire grafici e tabelle.
-
1. <http://it.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A0>
Su Wikipedia, l'enciclopedia libera, è possibile trovare informazioni sulla densità di una sostanza e su altre grandezze ad essa correlate.
 2. <http://jumk.de/calcul/densita.shtml>
Consente di convertire automaticamente il valore della densità nelle diverse unità di misura.
 3. <http://costruire.altervista.org/libro/densita.htm>
Illustra diversi metodi di misurazione della densità: picnometro, pesata idrostatica, flottazione, ed altri.

SCHEDA PER IL DOCENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN CORPO SOLIDO

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DEL VOLUME E DELLA DENSITÀ DI UN CORPO SOLIDO IRREGOLARE

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Tutta la materia è costituita da atomi. Una conseguenza della struttura discontinua sono i diversi stati di aggregazione della materia che dipendono dalle forze interne di coesione delle molecole.

Nello **stato aeriforme** gli spazi tra le molecole sono rilevanti. Le molecole non si toccano e si muovono fino ad occupare tutto il volume a disposizione. Gli aeriformi quindi si possono comprimere e non hanno né volume né forma propria.

Nello **stato liquido** le molecole sono accostate, ma gli spazi vuoti tra di esse cambiano continuamente di forma. Le molecole possono quindi scorrere le une sulle altre. I liquidi perciò hanno un volume proprio e non si possono comprimere, tuttavia non hanno forma propria.

Nello **stato solido** le molecole si toccano e non si muovono. Gli spazi vuoti sono generalmente ridotti al minimo. I solidi perciò non si possono comprimere e hanno forma e volume propri.

La grandezza fisica che consente di mettere in evidenza la diversa "consistenza" di un corpo solido o di un fluido è la **densità**. Essa è una caratteristica che non dipende dalla forma e dalle dimensioni del corpo ma dalla sua struttura interna e dalle condizioni ambientali.

La **densità** è una grandezza che dà un'informazione particolare su una certa sostanza, ovvero ci fornisce informazioni sulla quantità di materia di una determinata sostanza che occupa una ben precisa regione di spazio.

Mi dice quanta massa, misurata in kg, è contenuta in un volume di 1 m³.

È definita attraverso due altre grandezze la massa e il volume.

E' una grandezza derivata

È il rapporto tra la massa e il volume che tale massa occupa:

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

unità di misura nel SI ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

dimensioni [δ] = [$m * l^{-3}$]

La **densità** non dipende dalla quantità di materia, ma solo dalla *qualità* e dalle *condizioni* (quali temperatura e pressione) in cui la materia si trova.

La densità è una grandezza intensiva.

Si definisce densità relativa di una sostanza il rapporto tra la densità della sostanza e la densità dell'acqua.

Ad esempio il rame ha densità 8960 kg/m³ e densità relativa:

$$\delta_r = \frac{\delta_{\text{rame}}}{\delta_{\text{acqua}}} = \frac{8960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 8,96$$

La densità relativa è una quantità adimensionale.

Indipendentemente dallo stato fisico in cui si trova una sostanza, la densità dipende dalla temperatura in quanto il volume varia al variare della temperatura.

Si ha pertanto una diminuzione della densità quando la temperatura aumenta.

Un'eccezione notevole è costituita dall'acqua a temperatura compresa tra 0°C e circa 4°C; in questo intervallo un aumento di temperatura provoca una diminuzione del volume e quindi un aumento della densità.

La densità è legata ad altre due grandezze, la pressione e la temperatura.

Finalità dell'esperienza

Viene proposta un'esperienza quantitativa che:

1. permette di chiarire il significato fisico della grandezza densità
2. permette di determinare la densità di alcune sostanze solide (alluminio, rame, ferro, stagno)
3. consente di confrontare i valori trovati, con la densità di altre sostanze liquide ed aeriformi stabilendone l'ordine di grandezza.
4. consente di applicare nella fase dell'analisi e dell'elaborazione dei dati, tutte le nozioni della Teoria della Misura, di ricavare la relazione tra le grandezze e applicare le tecniche di costruzione e di interpretazione di un grafico.

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza

- Prime classi del Liceo Tecnologico, PNI, Linguistico, Istituti Tecnici
- Classi terze e quarte del Liceo Scientifico e classi quarte del Liceo Classico

Prerequisiti

- Gli strumenti di misura e le loro caratteristiche
 - Definizione operativa di grandezza fisica
 - Le grandezze fisiche fondamentali e derivate
 - Il S.I. di misura
 - Misura di una grandezza
 - Misura diretta e indiretta di una grandezza
 - Le possibili cause di errore in una misura
 - Incertezze accidentali e sistematiche
 - Incertezza assoluta e relativa
 - Incertezza in una sola misura
 - Misura più probabile ed incertezza su più misure
 - Incertezza nella somma, differenza, prodotto e quoziente di due misure
 - Il volume e sua unità di misura; il volume di un litro di acqua
 - Densità e sua unità di misura, densità assoluta e relativa
- Definizione matematica di grandezze *direttamente* e *inversamente* proporzionali

IV

Obiettivi generali

- Individuare una procedura che permetta di determinare in modo *diretto* il volume di un corpo di forma irregolare.
- Individuare la relazione di proporzionalità diretta fra massa e volume di un corpo solido.
- Individuare la relazione di proporzionalità inversa fra volume e densità.
- Individuare la natura del corpo attraverso la determinazione della sua densità.
- Interpretare un grafico per ricavare la relazione di proporzionalità tra due grandezze.
- Ricavare da un grafico sperimentale la costante di proporzionalità tra due grandezze.

V

Obiettivi specifici

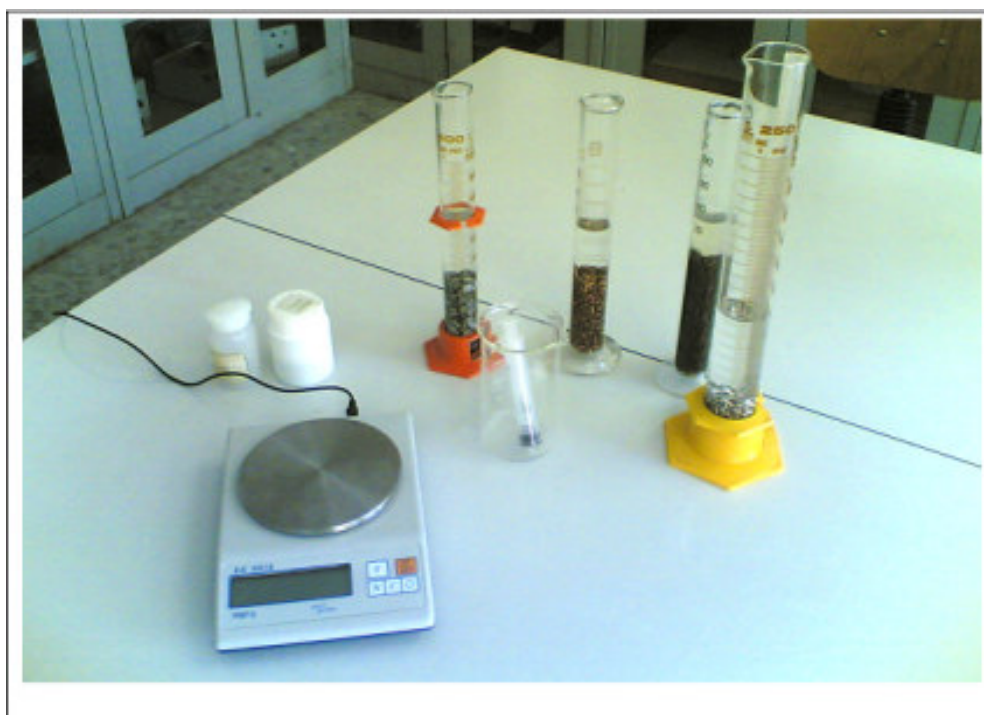
- Individuare le caratteristiche di uno strumento di misura
- Effettuare misure dirette ed indirette
- Esprimere correttamente la misura di una grandezza
- Usare le corrette unità di misura effettuando se necessario le opportune equivalenze
- Gestire i calcoli numerici in notazione scientifica
- Esprimere di una grandezza il suo ordine di grandezza
- Applicare le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette
- Costruire un grafico sperimentale e trarre da esso informazioni.
- Confrontare grafici sperimentali diversi ma riferiti alla stessa grandezza fisica.

VI

Materiale e strumentazione occorrente

- Cilindro graduato - caratteristiche: portata 250; risoluzione 1ml
- Bilancia digitale - caratteristiche: portata 500g; risoluzione 0.1g
- Ribattini di alluminio, ferro, rame, stagno.
- Acqua, siringa

Assemblaggio



VII
Descrizione generale del procedimento di misura
Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori
Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

L'esecuzione dell'esperienza avviene a gruppi di lavoro (massimo quattro alunni per gruppo). La prima parte dell'esperienza può essere realizzata dando a ciascun gruppo ribattini di diversa natura (rame, alluminio, ferro, stagno,...). La seconda parte dell'esperienza invece può essere realizzata utilizzando i dati raccolti singolarmente da ogni gruppo. Ciò permetterà di ridurre i tempi di realizzazione dell'esperienza stessa.

I PARTE

1. Porre dell'acqua in un cilindro graduato e fissare il valore di tale livello iniziale: onde evitare un errore sistematico non trascurabile, ricordare che la lettura del livello del liquido avviene considerando il menisco inferiore.
2. Determinare con la bilancia di precisione digitale la massa (50 gr) dei ribattini di rame.
3. Immergere i ribattini nel cilindro e determinare il corrispondente volume leggendo la variazione di volume da essi prodotta.
4. Procedere aggiungendo di volta in volta ribattini di massa 50 gr.
5. Registrare nella tabella i valori delle masse e dei corrispondenti volumi con le unità di misura e le incertezze.
6. Determinare la densità e il relativo errore assoluto per i diversi valori delle masse.
7. Calcolare, per ciascun materiale, il valor medio della densità confrontandolo con quello teorico indicato.
8. Procedere con altre sostanze: ribattini di ferro, alluminio, stagno.
9. Costruire il grafico cartesiano (sulla carta millimetrata o con il foglio elettronico) riportando in ascissa il volume e in ordinata la massa dei diversi materiali e per ciascuna retta calcolare il coefficiente angolare.
10. Per il calcolo di esso, si ricordi di considerare punti lontani dall'origine.

II PARTE

1. Completare la tabella registrando il volume relativo a masse uguali (150 g) di diverso materiale.
2. Costruire il grafico cartesiano riportando in ascissa il volume e in ordinata la densità dei diversi materiali.

Analisi dei dati e determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Raccolti i dati si procede alla loro analisi ed elaborazione

- Determinare, per ciascun valore della massa, il rapporto m/V e verificare che esso è pressoché costante. Tale rapporto costante evidenzia la proporzionalità diretta fra massa e volume e definisce la grandezza "densità".
- Determinare successivamente l'errore assoluto e percentuale di ciascun valore della densità.
- Calcolare, per ciascun materiale, il valor medio (media aritmetica) della densità.
- Completare con questi dati la tabella precedente.

- Confrontare ogni valor medio con quello teorico indicato.
- Qualora il valore della densità non concordi con quello aspettato:
 - a. controllare di aver usato correttamente gli strumenti a disposizione e di averne valutato nel modo giusto la risoluzione.
 - b. di avere espresso correttamente le incertezze sulle misure.

riflettere infine sulle modalità con le quali sono state raccolte le misure.

Si verifica graficamente la relazione di proporzionalità diretta tra massa e volume

Si può ottenere il grafico 1 con il foglio elettronico. Pare tuttavia più istruttivo per gli studenti disegnare il grafico utilizzando un foglio di carta millimetrata.

- Riportare, per ciascun materiale, i punti sperimentali sul grafico m-V senza dimenticare di tracciare per ciascuno di essi le barre di errore (la loro ampiezza è il doppio dell'errore assoluto commesso).
- Tracciare la semiretta uscente dall'origine che "meglio approssima" tali punti (è sufficiente che la retta passi per la regione di variabilità del valore numerico delle grandezze rappresentate).
- Ripetere le misure relative a quei punti che sono "troppo lontani" dalla retta.

È possibile calcolare ulteriormente dal grafico il valore della densità

- Determinare il coefficiente angolare di ciascuna semiretta prendendo punti lontani dall'origine (hanno incertezze relative minori). Esso rappresenta il valore della densità.
- Confrontare i valori dei coefficienti angolari delle quattro rette. Si dimostra che la pendenza delle rette cresce al crescere della densità: la pendenza della retta corrispondente al rame è maggiore di quella dell'alluminio così come le rispettive densità.

Si verifica graficamente la relazione di proporzionalità inversa tra densità e volume

- E' possibile verificare graficamente (grafico 2) la proporzionalità inversa tra densità e volume.

VIII

Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire durante l'esecuzione dell'esperienza

1. La lettura del livello raggiunto dal liquido nel cilindro graduato avviene considerando il menisco inferiore. Ciò evita un errore sistematico non trascurabile.
2. L'errore assoluto su ogni valore del volume è la somma degli errori assoluti in quanto esso è ottenuto come differenza tra il valore del livello finale raggiunto dal liquido dopo l'immersione dei ribattini e quello iniziale: poiché sulla scala del cilindro graduato è possibile apprezzare la mezza divisione, l'errore assoluto sulla differenza dei volumi risulta di 1 ml.
3. È necessario immergere in acqua i ribattini facendoli scivolare lungo le pareti per evitare che si formino delle bolle d'aria che possono alterare il valore del volume.

4. Per l'alluminio la cui densità apprezzabilmente inferiore rispetto agli altri corpi, è necessario aumentare la massa di 20 grammi per volta.
5. Il calcolo della densità come coefficiente angolare della retta ottenuta dal grafico m-V deve avvenire considerando punti della retta che si trovano lontani dall'origine. Per essi infatti l'errore relativo è più piccolo.
6. Nella parte finale dell'esperienza, quella relativa alla discussione finale e collettiva dell'analisi dei dati e dei risultati ottenuti, si riporteranno i dati raccolti da ciascun gruppo di lavoro sullo stesso grafico. Sarà così possibile confrontare i valori delle densità dei diversi corpi e stabilire che ha densità maggiore il corpo a cui corrisponde una retta di pendenza maggiore.
7. E' necessario precisare che il valore della densità dello **stagno** non corrisponde a quello teorico; quello utilizzato per l'esperienza è probabilmente stagno commerciale usato per eseguire le saldature.

Dati e risultati di riferimento

Alcuni valori della densità utili per l'esecuzione dell'esperienza proposta

Materiale	Densità a 20°C (kg·m⁻³)
Alluminio	2700
Ferro	7860
Rame	8960
Zinco	7100
Vetro	2400-2800
Acqua	1000
Alcol etilico	800
Petrolio	680
Olio	900
Anidride carbonica	1.9
Aria	1.29

I PARTE

Legenda

- Δm : errore assoluto di m;
- $\varepsilon_m\%$: errore percentuale di m
- $\delta = \frac{m}{V} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$: densità del corpo
- $\varepsilon_\delta\%$: errore percentuale della densità
- ΔV : errore assoluto di V
- $\varepsilon_v\%$: errore percentuale di V
- $\Delta\delta = \frac{m}{V} \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} \right)$ errore assoluto della densità

MATERIALE	m (g)	Δm (g)	$\epsilon_m\%$	$(V \pm 1.0)$ cm^3	$\epsilon_v\%$	$\delta \pm \Delta\delta$ (g / cm^3)	$\epsilon_\delta\%$
rame	50.0	0.1	0.2	5.0	20.0	9.0 ± 1.8	20.2
	100.0	0.2	0.2	12.0	8.3	8.9 ± 0.8	8.5
	150.0	0.2	0.1	17.0	5.8	8.8 ± 0.5	5.9
	200.0	0.2	0.1	23.0	4.3	8.7 ± 0.4	4.4
$\delta(\text{teorico}) = 8960 \text{ kg/m}^3$				$\delta(\text{media}) = 8.8 \text{ g/cm}^3$			
ferro	50.0	0.1	0.2	6.0	16.6	8.3 ± 1.4	16.8
	100.0	0.2	0.2	13.0	7.6	7.7 ± 0.6	7.8
	150.0	0.2	0.1	19.0	5.3	7.9 ± 0.4	5.4
	200.0	0.2	0.1	26.0	3.8	7.7 ± 0.3	3.9
$\delta(\text{teorico}) = 7860 \text{ kg/m}^3$				$\delta(\text{media}) = 7.9 \text{ g/cm}^3$			
alluminio	20.0	0.1	0.5	7.5	13.3	2.7 ± 0.4	13.8
	40.0	0.2	0.5	15.0	6.7	2.7 ± 0.2	7.2
	60.0	0.2	0.3	23.0	4.3	2.6 ± 0.1	4.6
	80.0	0.2	0.2	30.0	3.3	2.7 ± 0.1	3.5
$\delta(\text{teorico}) = 2700 \text{ kg/m}^3$				$\delta(\text{media}) = 2.7 \text{ g/cm}^3$			
stagno	50.0	0.1	0.2	5.0	20.0	10.0 ± 2.0	20.2
	100.0	0.2	0.2	10.0	10.0	10.0 ± 1.0	10.2
	150.0	0.2	0.1	16.0	6.2	9.4 ± 0.6	6.3
	200.0	0.2	0.1	21.0	4.8	9.5 ± 0.5	4.9
				$\delta(\text{media}) = 9.7 \text{ g/cm}^3$			

II PARTE

Materiale	$(m \pm 0.2) \text{ g}$	$(V \pm 1) \text{ cm}^3$	Densità (g/cm^3)
alluminio	150.0	55.5	2.7 ± 0.1
ferro	150.0	19.0	7.9 ± 0.4
rame	150.0	17.0	8.8 ± 0.5

grafico 1

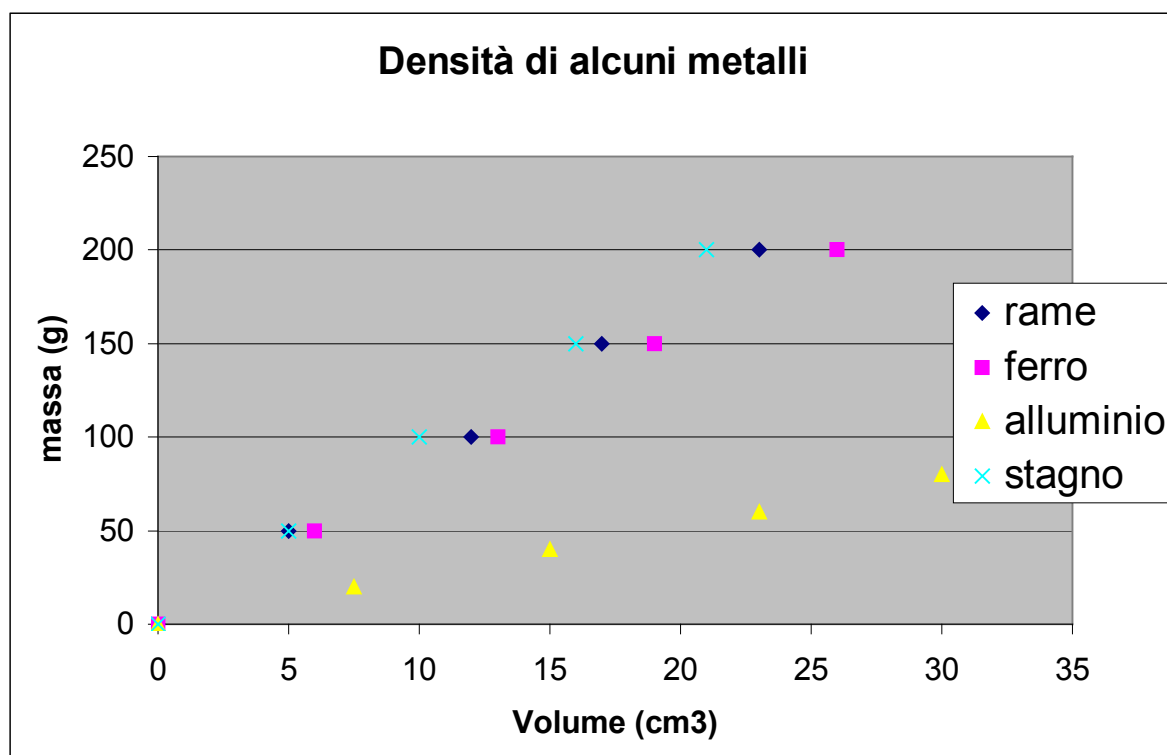
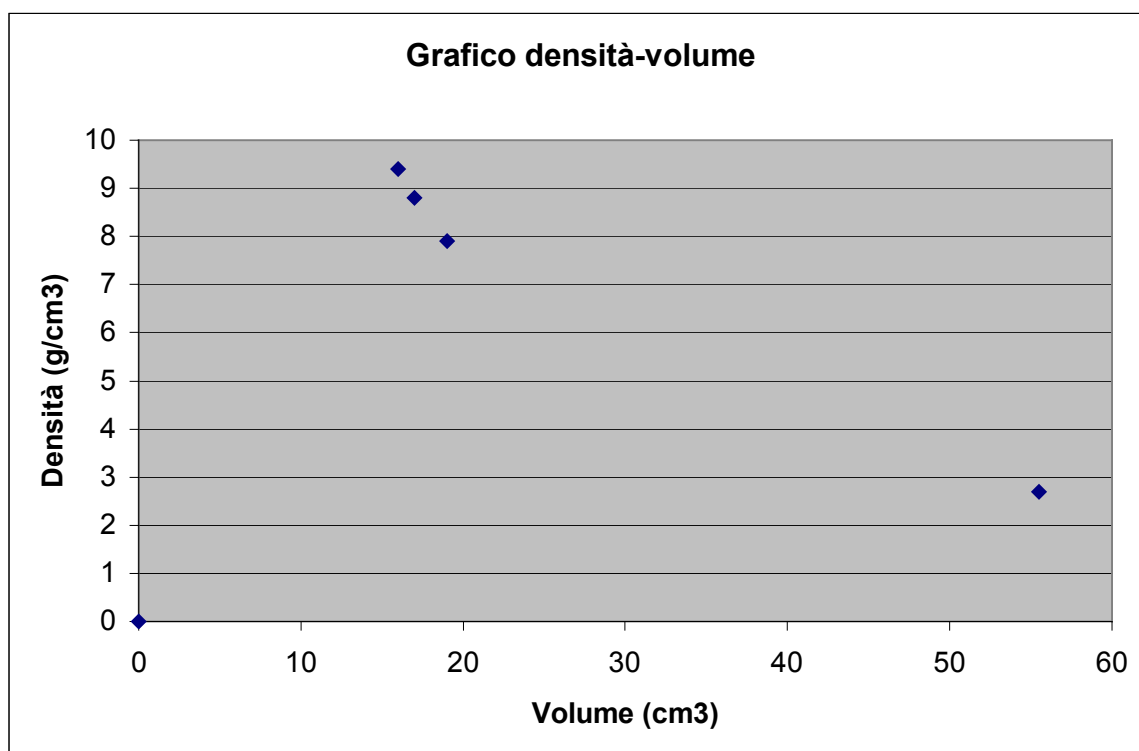


grafico 2



IX
Esempio di questionario

QUESTIONARIO E RISPOSTE ATTESE

I PARTE

1. Fornisci la definizione di densità di un corpo. Essa è una grandezza intensiva o estensiva?
Si definisce densità la grandezza (intensiva) espressa dal rapporto fra la massa di una sostanza e il volume da essa occupato.
2. Esprimi il valore trovato per le densità dei diversi materiali in unità del S.I.
 $\delta(\text{Al}) = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\delta(\text{Fe}) = 7900 \text{ kg/m}^3$, $\delta(\text{Cu}) = 8800 \text{ kg/m}^3$, $\delta(\text{Sn}) = 9700 \text{ kg/m}^3$
3. Indica l'ordine di grandezza per ogni valore trovato della densità.
L'ordine di grandezza della densità del ferro, rame e stagno è lo stesso, ossia 10^4 , mentre per l'alluminio è di 10^3 .
4. Scrivi la formula che ti ha permesso di calcolare l'errore assoluto della densità.

$$\Delta\delta = \frac{m}{V} \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} \right)$$

5. Confronta i diversi valori della densità trovati sperimentalmente con quelli teorici. Fai le tue considerazioni.
Le considerazioni dovrebbero esprimere quanto i valori delle densità delle sostanze determinati sperimentalmente sono in accordo con quelli teorici e contenere una riflessione sugli incertezze e sul grado di precisione delle misure.

OSSERVA IL GRAFICO E RISPONDI:

6. Individua quale relazione lega la massa al volume.
Le due grandezze sono legate da una relazione di proporzionalità diretta e quindi la loro rappresentazione grafica è una semiretta uscente dall'origine.
7. Quale proprietà del corpo rappresenta la pendenza delle varie rette? Confronta i diversi valori e dai una giustificazione.
La pendenza della retta (coefficiente angolare) rappresenta il valore della densità. Minore è la densità del corpo, minore è il valore della pendenza della retta che la rappresenta.
8. Se nel grafico si invertono le grandezze riportate in ascissa e in ordinata che cosa rappresenta la pendenza della retta?
La pendenza della retta esprime il valore di $1/\delta$.

II PARTE

9. Individua quale relazione lega la densità al volume.
La densità e il volume sono legati da una relazione di proporzionalità inversa.
10. Che tipo di curva si ottiene dal grafico δ -V?
Si ottiene un ramo di iperbole equilatera.
11. Come è possibile ridurre la rappresentazione grafica ad una semiretta uscente dall'origine?
Ponendo in ascissa $1/V$.

Griglia per la valutazione

-Determinazione del volume e della densità di un corpo solido irregolare-

Tale griglia potrà essere usata come strumento di valutazione qualitativo barrando le caselle SI-NO, oppure quantitativo dopo averla corredata dei criteri di attribuzione dei punteggi per le singole domande.

<u>DOMANDE</u>			
	SI	NO	PUNTI
DOMANDA 1 * Conosce la definizione di densità			
DOMANDA 2 Usa le corrette unità di misura ed effettua le opportune equivalenze.			
DOMANDA 3 Individua di una grandezza il suo ordine di grandezza			
DOMANDA 4 Applica le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette.			
DOMANDA 5 Analizza correttamente i dati della tabella e li interpreta.			
DOMANDA 6 Interpreta il grafico per ricavare la relazione di proporzionalità diretta tra due grandezze.			
DOMANDA 7 Ricava dal grafico sperimentale la costante di proporzionalità tra due grandezze.			
DOMANDA 8 Applica correttamente il significato di “pendenza della retta”.			
DOMANDA 9 E’ in grado di individuare la relazione di proporzionalità inversa tra due grandezze.			
DOMANDA 10 Individua il grafico che rappresenta la proporzionalità inversa tra due grandezze.			
DOMANDA 11 E’ in grado di ridurre la proporzionalità inversa ad una diretta.			
TABELLA			
Scrivo correttamente le unità di misura			
Scrivo correttamente le incertezze di misura			
Scrivo correttamente le cifre significative delle misure			
Calcolo correttamente il valore della densità			
Calcolo correttamente il valore medio delle densità			
Arrotondo correttamente il risultato, scrivendolo con le sole cifre significative			
Riporto ordinatamente le misure nella tabella			
GRAFICO			
Riporto correttamente le grandezze sugli assi cartesiani			
Riporto correttamente sul grafico le unità di misura delle grandezze rappresentate			
Riporto correttamente le incertezze di misura			
Calcolo correttamente la pendenza della retta del grafico			
PUNTEGGIO MASSIMO PUNTI			

*Per ogni domanda sono indicati gli obiettivi oggetto della verifica dell’attività sperimentale.

X
Bibliografia e siti Web di interesse

1. J. S. Walker – Fisica – vol.1 Meccanica, Ed. Zanichelli
2. E. Amaldi – Le idee della fisica – vol 1, Ed. Zanichelli
3. M. Palladino Bosia - Da Galileo ad Einstein – vol 1, Ed. Petrini
4. F. Bocci – Manuale per il laboratorio di fisica – Ed. Zanichelli
Il testo analizza le varie fasi di un'esperienza di laboratorio e guida all'analisi dei dati sperimentali.
4. F. Tibone – Quattro.zero – vol 1 e 2, Ed. Zanichelli
Il testo consente di utilizzare il foglio elettronico per raccogliere ed elaborare i dati sperimentali, costruire grafici e tabelle.
1. <http://it.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A0>
Su Wikipedia, l'enciclopedia libera, è possibile trovare informazioni sulla densità di una sostanza e su altre grandezze ad essa correlate.
2. <http://jumk.de/calc/densita.shtml>
Consente di convertire automaticamente il valore della densità nelle diverse unità di misura.
3. <http://costruire.altervista.org/libro/densita.htm>
Illustra diversi metodi di misurazione della densità: picnometro, pesata idrostatica, flottazione ed altri.

SCHEDA PER LO STUDENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN CORPO SOLIDO

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DEL VOLUME E DELLA DENSITÀ DI UN CORPO SOLIDO IRREGOLARE

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Tutta la materia è costituita da atomi.

Una conseguenza della struttura discontinua sono i diversi stati di aggregazione della materia che dipendono dalle forze interne di coesione delle molecole.

Nello **stato aeriforme** gli spazi tra le molecole sono rilevanti. Le molecole non si toccano e si muovono fino ad occupare tutto il volume a disposizione. Gli aeriformi quindi si possono comprimere e non hanno né volume né forma propria.

Nello **stato liquido** le molecole sono accostate, ma gli spazi vuoti tra di esse cambiano continuamente di forma. Le molecole possono quindi scorrere le une sulle altre. I liquidi perciò hanno un volume proprio e non si possono comprimere, tuttavia non hanno forma propria.

Nello **stato solido** le molecole si toccano e non si muovono. Gli spazi vuoti sono generalmente ridotti al minimo. I solidi perciò non si possono comprimere e hanno forma e volume propri.

La grandezza fisica che consente di mettere in evidenza la diversa "consistenza" di un corpo solido o di un fluido è la **densità**. Essa è una caratteristica che non dipende dalla forma e dalle dimensioni del corpo ma dalla sua struttura interna e dalle condizioni ambientali.

*La **densità** è una grandezza che dà un'informazione particolare su una certa sostanza, ovvero ci fornisce informazioni sulla quantità di materia di una determinata sostanza che occupa una ben precisa regione di spazio.*

Mi dice quanta massa, misurata in kg, è contenuta in un volume di 1 m^3

È definita attraverso due altre grandezze la massa e il volume.

E' una grandezza derivata

È il rapporto tra la massa e il volume che tale massa occupa:

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

unità di misura nel SI ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

dimensioni [δ] = [$m * l^3$]

La **densità** non dipende dalla quantità di materia, ma solo dalla *qualità* e dalle *condizioni* (quali temperatura e pressione) in cui la materia si trova.

La densità è una grandezza intensiva.

Si definisce densità relativa di una sostanza il rapporto tra la densità della sostanza e la densità dell'acqua.

Ad esempio il rame ha densità 8960 kg/m³ e densità relativa:

$$\delta_r = \frac{\delta_{\text{rame}}}{\delta_{\text{acqua}}} = \frac{8960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 8,96$$

La densità relativa è una quantità adimensionale

Indipendentemente dallo stato fisico in cui si trova una sostanza, la densità dipende dalla temperatura in quanto il volume varia al variare della temperatura.

Si ha pertanto una diminuzione della densità quando la temperatura aumenta.

Un'eccezione notevole è costituita dall'acqua a temperatura compresa tra 0°C e circa 4°C; in questo intervallo un aumento di temperatura provoca una diminuzione del volume e quindi un aumento della densità.

La densità è legata ad altre due grandezze, la pressione e la temperatura

III

Descrizione generale e finalità dell'esperienza

Ti viene proposta un'esperienza che ti permette di determinare le densità di alcune sostanze solide.

L'attività sperimentale svolta ti consente di:

1. chiarire il significato fisico della grandezza densità;
2. determinare la densità di alcune sostanze solide (alluminio, rame, ferro, stagno);
3. confrontare i valori trovati, con la densità di altre sostanze liquide ed aeriformi stabilendone l'ordine di grandezza;

4. applicare, nella fase dell'analisi e dell'elaborazione dei dati, tutte le nozioni della Teoria della Misura, di stabilire relazioni tra le grandezze e applicare le tecniche di costruzione e di interpretazione di un grafico;
5. conoscere ed utilizzare il foglio elettronico per raccogliere ed elaborare i dati, costruire tabelle e grafici.

IV

Materiale e strumentazione occorrente

- Cilindri graduati - caratteristiche: portata 250; risoluzione 1ml.
- Bilancia digitale - caratteristiche: portata 500g; risoluzione 0.1gr.
- Ribattini di alluminio, ferro, rame, stagno.
- Acqua, siringa .

V

Assemblaggio



VI
Descrizione generale del procedimento di misura e
grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

I PARTE

1. Poni dell'acqua in un cilindro graduato e registra il valore di tale livello iniziale: onde evitare un errore sistematico non trascurabile, ricorda che la lettura del livello del liquido avviene considerando il menisco inferiore.
2. Determina con la bilancia di precisione digitale la massa (50 gr) dei ribattini di rame o di altro materiale a tua disposizione.
3. Immergi i ribattini nel cilindro e determina il corrispondente volume leggendo la variazione di volume da essi prodotta.
4. Procedi aggiungendo di volta in volta ribattini di massa 50 gr.
5. Nella tabella registra le misure delle masse e dei corrispondenti volumi con le unità di misura e le incertezze assolute.
6. Procedi con le altre sostanze: ribattini di ferro, alluminio, stagno.

II PARTE

7. Nella tabella registra il volume relativo a masse uguali (150 g) di diverso materiale.

VII Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre						
MATERIALE	(m ±)	$\varepsilon_m\%$	(V ±)	$\varepsilon_V\%$	($\delta \pm \Delta\delta$)	$\varepsilon_\delta\%$
rame						
$\delta(\text{teorico}) = 8960 \text{ kg/m}^3$					$\delta(\text{media}) = \dots\dots\dots$	
ferro						
$\delta(\text{teorico}) = 7860 \text{ kg/m}^3$					$\delta(\text{media}) = \dots\dots\dots$	
alluminio						
$\delta(\text{teorico}) = 2700 \text{ kg/m}^3$					$\delta(\text{media}) = \dots\dots\dots$	
stagno						
					$\delta(\text{media}) = \dots\dots\dots$	
II PARTE						
materiale	Massa ±..... (.....)	Volume ±..... (.....)		Densità ±..... (.....)		
alluminio						
rame						
ferro						
stagno						
Legenda <ul style="list-style-type: none"> • Δm: errore assoluto di m; • ΔV: errore assoluto di V • $\varepsilon_m\%$: errore percentuale di m • $\varepsilon_V\%$: errore percentuale di V • δ: densità del corpo • $\Delta\delta$: errore assoluto della densità • $\varepsilon_\delta\%$: errore percentuale della densità 						

1. Costruisci su carta millimetrata il grafico sperimentale riportando in ascissa i valori del volume e in ordinata quelli della massa dei diversi materiali.
2. Traccia la retta che secondo te approssima meglio i punti sperimentali e determinane il coefficiente angolare considerando punti lontani dall'origine.
3. Costruisci un altro grafico sperimentale riportando in ascissa i valori del volume e in ordinata quelli della densità dei diversi materiali.
4. Se vuoi puoi costruire i grafici utilizzando il foglio elettronico.

VIII Guida all'analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

- Scrivi l'espressione della densità $\delta = \text{-----}$, dell'errore assoluto $\Delta\delta = \text{.....}$ dell'errore relativo $\varepsilon = \text{.....}$ e di quello percentuale $\varepsilon\% = \text{.....}$

Quindi:

- Per ciascun valore della massa determina la densità con il relativo errore assoluto e percentuale.
- Per ciascun materiale calcola il valor medio della densità e completa con questi dati la tabella precedente.
- Confronta ogni valor medio con quello teorico indicato.
- Qualora il valore della densità non concordi con quello aspettato:
 - a. controlla di aver usato correttamente gli strumenti a tua disposizione
 - b. di avere valutato correttamente le incertezze sulle misure
 - c. rifletti infine sulle modalità con le quali sono state raccolte le misure
- Per ciascun materiale, riporta i punti sperimentali sul grafico m-V e traccia le barre d'errore.
- Traccia la semiretta uscente dall'origine che "meglio approssima" tali punti.
- Completa la formula che esprime il coefficiente angolare della semiretta del tuo grafico

$$m = \frac{\Delta \text{.....}}{\Delta \text{.....}}$$

- Di ciascuna semiretta determina il coefficiente angolare prendendo punti lontani dall'origine (hanno incertezze percentuali minori)
- Pensa a quale grandezza da te misurata può corrispondere m .

IX
Indicazioni per confronto tra risultati ottenuti e aspettati

Ti viene fornita la tabella delle densità di alcune sostanze più comuni.

Confronta i valori da te ottenuti sperimentalmente con quelli teorici aspettati.

Alcuni valori della densità utili per l'esecuzione delle esperienze proposte

Materiale	Densità a 20°C (kg·m⁻³)
Alluminio	2700
Ferro	7860
Rame	8960
Zinco	7100
Vetro	2400-2800
Acqua	1000
Alcol etilico	800
Petrolio	680
Olio	900
Anidride carbonica	1.9
Aria	1.29

X
Esempio di questionario

QUESTIONARIO

RISPONDI ALLE SEGUENTI DOMANDE

1. Fornisci la definizione di densità di un corpo. Essa è una grandezza intensiva o estensiva?

.....

.....

2. Esprimi il valore trovato per le densità dei diversi materiali in unità del S.I.

.....

.....

3. Indica l'ordine di grandezza per ogni valore trovato della densità.

.....

.....

4. Scrivi la formula che ti ha permesso di calcolare l'errore assoluto della densità.

.....

5. Confronta i diversi valori della densità trovati sperimentalmente con quelli teorici. Fai le tue considerazioni.

.....

.....

OSSERVA IL GRAFICO E RISPONDI

6. Individua quale relazione lega la massa al volume.

.....

.....

7. Quale proprietà del corpo rappresenta la pendenza delle varie rette? Confronta i diversi valori e fornisci una giustificazione di essi.

.....
.....

8. Se nel grafico si invertono le grandezze riportate in ascissa e in ordinata che cosa rappresenta la pendenza della retta?

.....

9. Come è possibile ridurre la rappresentazione grafica ad una semiretta uscente dall'origine?

.....
.....

10. Individua quale relazione lega la densità al volume.

.....
.....

11. Che tipo di curva si ottiene dal grafico δ -V?

.....
.....

SCHEDA PER IL DOCENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO TRAMITE LA LEGGE DI STEVINO

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO ATTRAVERSO L'APPLICAZIONE DELLA LEGGE DI STEVINO

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

La **densità** è una grandezza che dà un'informazione particolare su una certa sostanza, ovvero ci fornisce informazioni sulla quantità di materia di una determinata sostanza che occupa una ben precisa regione di spazio.

Mi dice quanta massa, misurata in kg, è contenuta in un volume di 1 m³.

- È definita attraverso due altre grandezze la massa e il volume.

È una grandezza derivata

- È il rapporto tra la massa e il volume che tale massa occupa:

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

unità di misura $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$

dimensioni $[\delta] = [m * l^3]$

La **densità** non dipende dalla quantità di materia, ma solo dalla *qualità* e dalle *condizioni* (quali temperatura e pressione) in cui la materia si trova.

La densità è una grandezza intensiva.

La definizione appena fornita consente di determinare la densità di una qualunque sostanza. Nel caso dei liquidi è possibile ricavare questa fondamentale grandezza fisica applicando **la legge di Stevino**.

Essa stabilisce che la differenza tra la pressione alla quale sono soggetti i punti che si trovano sulla superficie del liquido (che corrisponde alla pressione atmosferica p_0) e quella alla quale sono soggetti i punti che si trovano a profondità h (dovuta anche alla pressione generata dal peso della colonna di liquido sovrastante) è direttamente proporzionale alla profondità, alla densità del liquido e all'accelerazione di gravità :

$$\Delta p = p - p_0 = \rho g h$$

È importante sottolineare che la pressione esercitata dal liquido **non dipende dalla forma del recipiente** nel quale esso è contenuto.

La legge di Stevino non è applicabile ai gas perché essi, essendo comprimibili, hanno una densità che aumenta all'aumentare della profondità.

L'esperienza ha quindi lo scopo di proporre una differente modalità per determinare il valore della densità di un liquido.

Preso un manometro ad aria libera agganciato ad un supporto fisso lo si riempie con l'acqua di rubinetto: la pressione esercitata sulla superficie del liquido nei due rami è quella atmosferica.

Successivamente si collega uno dei rami del manometro al tubo di gomma e quest'ultimo allo stelo di una campanella di vetro che viene immersa in un becher contenente il liquido di cui si vuole determinare la densità.

A questo punto sulla superficie dell'acqua contenuta nel ramo del manometro collegato alla campanella non agisce più soltanto la pressione atmosferica perché ad essa si aggiunge, trasmessa dall'aria rimasta intrappolata nel tubo di gomma, quella dovuta alla profondità raggiunta dalla campanella, come stabilisce la legge di Stevino.

Sulla superficie dell'acqua contenuta nell'altro ramo del manometro la pressione è sempre quella atmosferica.

Il risultato è che la variazione di pressione tra i due rami del manometro “ spinge ” l'acqua abbassando il livello nel ramo del manometro collegato al tubo di gomma.

Misurando quindi la variazione di pressione tra i due rami del manometro e la profondità ad essa relativa è possibile ricavare con la formula inversa della legge di Stevino la densità del liquido nel quale è stata immersa la campanella.

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza

- Prime classi del Liceo Tecnologico, PNI, Linguistico, Istituti Tecnici
- Classi terze e quarte del Liceo Scientifico e classi quarte del Liceo Classico

Prerequisiti

- Teoria della misura
- Costruzione ed interpretazione di un grafico sperimentale
- Le caratteristiche di un fluido
- Pressione e sue unità di misura
- Pressione atmosferica
- Legge dei vasi comunicanti
- Principio di Stevino

IV

Obiettivi generali

- Applicare per la determinazione di una grandezza una legge fisica e non la sua definizione
- Applicare il Principio di Stevino per la determinazione della densità di un liquido

V

Obiettivi specifici

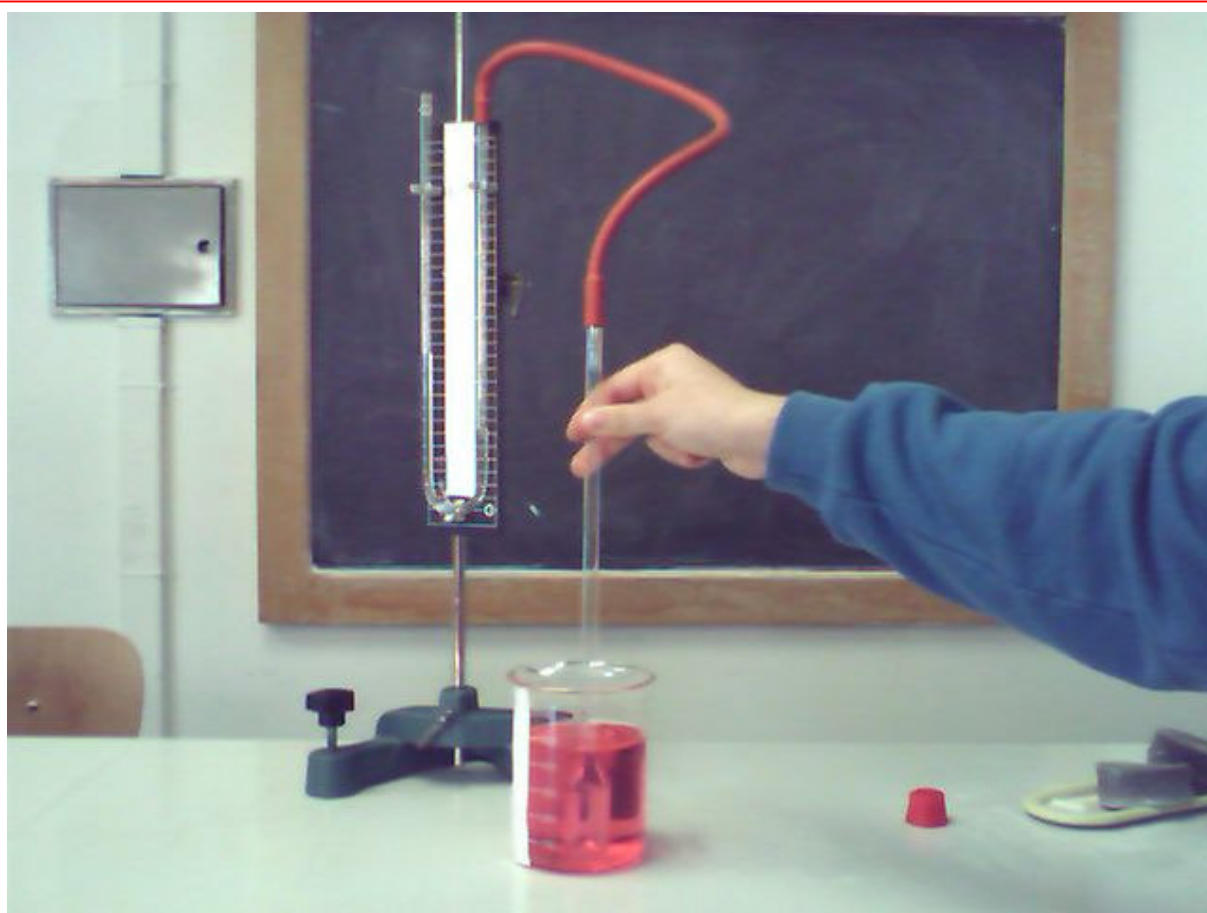
- Determinare la risoluzione di uno strumento di misura ed associare alla misura diretta con esso effettuata l'errore assoluto commesso.
- Effettuare misure dirette ed indirette.
- Usare le corrette unità di misura effettuando se necessario le opportune equivalenze.
- Gestire i calcoli numerici in notazione scientifica.
- Applicare le leggi di propagazione degli errori sulle misure indirette.
- Costruire un grafico sperimentale su carta millimetrata oppure usando il foglio elettronico e trarre da esso informazioni.
- Confrontare grafici sperimentali diversi ma riferiti alla stessa grandezza fisica.

VI

Materiale occorrente e assemblaggio

Strumentazione occorrente, con elenco dettagliato delle caratteristiche

- base con asta
- manometro ad U
- morsetto universale
- stelo filettato per manometro
- tubo di gomma
- campanella di vetro
- becher: portata 400 ml; risoluzione 1 cm
- n° 2 metri di carta : portata almeno 20 cm; risoluzione 1mm
- siringa
- acqua di rubinetto, acqua distillata , alcol etilico



- Fissare alla base l'asta e a questa lo stelo filettato usando il morsetto universale.
- Fissare il manometro allo stelo filettato e sovrapporre alla sua scala graduata, in posizione centrale, uno dei metri di carta.
- Usare la siringa per riempire il manometro con l'acqua di rubinetto in modo che essa risalga nei due rami raggiungendo un livello apprezzabile ma non eccessivo.
- Collegare una estremità del tubo di gomma alla campanella di vetro e l'altra ad un ramo del manometro.
- Sovrapporre alla scala graduata del becher l'altro metro di carta.
- Riempire il becher con il liquido del quale si vuole determinare la densità e immergere in esso la campanella con un movimento verticale, dall'alto verso il basso, che la mantenga costantemente parallela al fondo del becher.

VII

Descrizione generale del procedimento di misura Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

- Una volta immersa la campanella nel becher misurare il dislivello che si crea nei due rami del manometro: esso rappresenta la variazione di pressione Δp espressa in mm di acqua.
- Misurare la profondità h alla quale si trova la campanella rispetto alla superficie del liquido, partendo quasi dal fondo del becher.
- Ripetere l'esperienza più volte immergendo la campanella a profondità differenti (risalendo ad es. ogni volta di 1 cm); elaborare i dati raccolti secondo quanto indicato nella guida di seguito riportata e compilare con essi la tabella relativa al liquido esaminato.
- Successivamente ripetere l'esperienza inserendo nel becher un liquido diverso.
- Costruire su carta millimetrata oppure usando il foglio elettronico, in un unico piano cartesiano, i grafici sperimentali relativi ad ognuno dei liquidi esaminati riportando in ascissa la profondità ed in ordinata la variazione di pressione con le relative barre d'errore.
- Costruire su carta millimetrata oppure usando il foglio elettronico, in un unico piano cartesiano, i grafici sperimentali relativi ad ognuno dei liquidi esaminati riportando in ascissa la variazione di pressione ed in ordinata la profondità.

Guida all'elaborazione dei dati per la compilazione della tabella

- $\Delta p(mmH_2O)$: variazione della pressione subita dall'acqua nel manometro rispetto a quella atmosferica, espressa in millimetri di acqua;
- $\Delta p(Pa)$: variazione della pressione subita dall'acqua nel manometro rispetto a quella atmosferica, espressa in Pascal con buona approssimazione attraverso il fattore di conversione $1mmH_2O = 10Pa$ ottenuto tenendo conto che $1mmH_2O = \frac{1}{13,45} mmHg$; $760mmHg = 1,013 \cdot 10^5 Pa$; $1mmHg = 1,33 \cdot 10^2 Pa$;
- $\varepsilon_{\Delta p}$: errore assoluto commesso su Δp calcolato mediante la legge di propagazione degli errori sulla differenza ($\varepsilon_{\Delta p}$ è pertanto uguale al doppio della risoluzione del metro usato);
- $\varepsilon_{r_{\Delta p}}$: errore relativo commesso su Δp ;
- $h(m)$: profondità raggiunta dalla campanella nel becher rispetto alla superficie del liquido.

- ε_h : errore assoluto commesso su h calcolato mediante la legge di propagazione degli errori sulla differenza (ε_h è pertanto uguale al doppio della risoluzione del metro usato);
- ε_{r_h} : errore relativo commesso su h ;
- ρ : densità del liquido inserito nel becher ottenuta usando la legge di Stevino

$$\rho = \frac{\Delta p}{gh};$$
- $\bar{\rho}$: media aritmetica dei valori della densità ottenuti per il liquido esaminato;
- ε_ρ : errore assoluto commesso sulla densità calcolato mediante la legge di propagazione degli errori su un quoziente tenendo presente che il valore di g è una costante
$$\varepsilon_\rho = \frac{1}{g} \frac{\Delta p}{h} \left(\frac{\varepsilon_{\Delta p}}{\Delta p} + \frac{\varepsilon_h}{h} \right);$$
- $\varepsilon_{\%}$: errore percentuale commesso sulla densità.

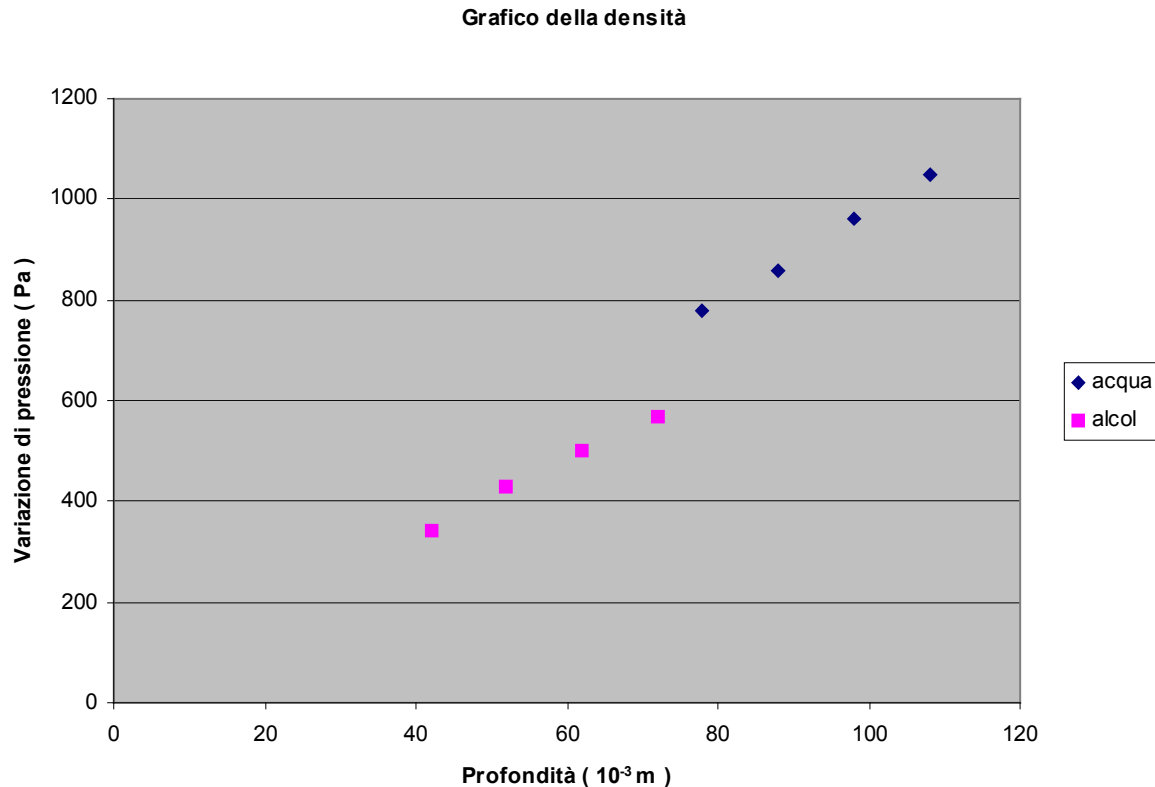
VIII Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire durante l'esecuzione dell'esperienza

- Eliminare le eventuali bolle d'aria formatesi durante l'inserimento dell'acqua nel manometro.
- Aumentare la risoluzione del manometro sovrapponendo alla scala graduata di entrambi i rami un righello o metro di carta di risoluzione 1 mm.
- Aumentare la risoluzione del becher sovrapponendo alla sua scala graduata un righello o metro di carta di risoluzione 1 mm.
- Usare una campanella di vetro con lo stelo lungo, in modo tale da irrigidire la parte di tubo nella quale viene inserita, facilitando così la sua discesa nel liquido.
- Se la campanella da inserire nel tubo di gomma non aderisce perfettamente alla sua sezione sigillarla ad esso con nastro isolante.
- Inserire la campanella nel becher con un movimento verticale, dall'alto verso il basso, che la mantenga costantemente parallela al fondo del becher e non generi bolle d'aria.
- Fare attenzione che il tubo di gomma collegato al manometro e alla campanella non subisca strozzature mentre si rileva il dislivello dell'acqua creatosi tra i due rami del manometro.
- Ridurre l'errore nella lettura del livello dell'acqua nei due rami del manometro riferendosi sempre al menisco inferiore.
- Ridurre l'errore di parallasse posizionando la "linea degli occhi" il più possibile alla stessa altezza del livello del liquido (manometro) o del bordo della campanella (becher).

VIII
Dati e risultati di riferimento

Acqua distillata $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$									
$\Delta p(\text{mmH}_2\text{O})$	$\Delta p(\text{Pa})$	$\varepsilon_{\Delta p}(\text{Pa})$	$\varepsilon_{r_{\Delta p}}$	$h(\text{m})$	$\varepsilon_h(\text{m})$	ε_{r_h}	$\rho\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$	$\varepsilon_\rho\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$	$\varepsilon_\%$
105	1050	20	0,02	$108 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,02	992	42	4
96	960	20	0,02	$98 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,02	999	38	4
86	860	20	0,02	$88 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,02	997	34	3
78	780	20	0,03	$78 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,03	1020	46	5
							$\bar{\rho}=1002$		

Alcol etilico $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$									
$\Delta p(\text{mmH}_2\text{O})$	$\Delta p(\text{Pa})$	$\varepsilon_{\Delta p}$	$\varepsilon_{r_{\Delta p}}$	$h(\text{m})$	ε_h	ε_{r_h}	$\rho\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$	ε_ρ	$\varepsilon_\%$
57	570	20	0,04	$72 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,03	808	57	7
50	500	20	0,04	$62 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,03	823	58	7
43	430	20	0,05	$52 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,04	844	76	9
34	340	20	0,06	$42 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,05	826	83	10
							$\bar{\rho}=825$		



Guida alla costruzione dei grafici per ciascun liquido esaminato

- Riportare sul piano cartesiano, scegliendo opportunamente la scala da usare, i punti sperimentali aventi come ascissa i valori della profondità e come ordinata i corrispondenti valori della variazione di pressione.
- Rispetto ad ognuno dei punti sperimentali così ottenuti tracciare le barre d'errore (la loro ampiezza è il doppio dell'errore assoluto commesso sulla grandezza considerata).
- Tracciare la semiretta passante per l'origine che meglio approssima tutti i punti sperimentali passando non necessariamente per i punti ma lambendo tutte le barre d'errore.
- Calcolare il coefficiente angolare di ciascuna retta prendendo due suoi punti lontani dall'origine.
- Ripetere quanto già fatto invertendo le grandezze fisiche da riportare sugli assi del piano cartesiano.

IX

Esempi di questionari e griglie per la valutazione

1. Spiega perché l'acqua raggiunge la stessa altezza nei due rami del manometro all'inizio dell'esperienza.
Perché vale la legge dei vasi comunicanti.
2. Spiega perché una volta inserita la campanella nel becher il livello dell'acqua nei due rami del manometro cambia.
Perché aumenta la pressione che agisce sull'acqua presente nel ramo del manometro collegato alla campanella immersa nel becher rispettando la legge di Stevino.
3. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla variazione di pressione Δp nel manometro?
Applicando la legge di propagazione degli errori sulla differenza.
4. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla profondità h ?
Applicando la legge di propagazione degli errori sulla differenza.
5. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla densità?
Applicando la legge di propagazione degli errori sul quoziente.
6. Confronta i diversi valori della densità trovati sperimentalmente con quelli teorici. Fai le tue considerazioni.
La risposta deve analizzare l'accordo tra i valori della densità trovati sperimentalmente e quelli teorici e quindi contenere una riflessione sul grado di precisione delle misure effettuate.
7. Dall'analisi del grafico ottenuto per ogni liquido con i dati sperimentali individua quale relazione di proporzionalità lega le grandezze Δp e h .
Poiché il grafico sperimentale è approssimabile ad una semiretta uscente dall'origine la relazione è di proporzionalità diretta.
8. Spiega come puoi ricavare dai singoli grafici che hai costruito la densità dei liquidi esaminati.
Si deve calcolare la pendenza della retta e dividere il valore ottenuto per il valore dell'accelerazione di gravità g .
9. Se nel grafico si invertissero le grandezze riportate in ascissa e in ordinata che cosa rappresenterebbe la pendenza della retta?
Rappresenterebbe il reciproco della densità diviso per l'accelerazione di gravità.

IX **GRIGLIA DI VALUTAZIONE**

Determinazione della densità di un liquido attraverso l'applicazione della legge di Stevino

Tale griglia potrà essere usata come strumento di valutazione qualitativo barrando le caselle SI-NO, oppure quantitativo dopo averla corredata dei criteri di attribuzione dei punteggi per le singole domande.

<u>DOMANDE</u>			
	Si	No	Punti
DOMANDA 1 *Associa la legge dei vasi comunicanti al fenomeno osservato			
DOMANDA 2 Determina la causa della variazione dei livelli dell'acqua nei due rami del manometro			
DOMANDA 3 Applica le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette			
DOMANDA 4 Applica le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette			
DOMANDA 5 Applica le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette			
DOMANDA 6 Analizza correttamente i dati della tabella e li interpreta			
DOMANDA 7 Interpreta il grafico per ricavare la relazione di proporzionalità diretta tra due grandezze			
DOMANDA 8 Ricava dal grafico sperimentale la costante di proporzionalità tra due grandezze			
DOMANDA 9 Applica correttamente il significato di “ pendenza della retta “			
<u>TABELLA</u>			
Scrivo correttamente le unità di misura			
Scrivo correttamente le incertezze di misura			
Scrivo correttamente le cifre significative delle misure			
Calcolo correttamente il valore della densità			
Calcolo correttamente il valore medio della densità			
Arrotondo correttamente il risultato, scrivendolo con le sole cifre significative			
Riporto ordinatamente le misure nella tabella			
<u>GRAFICO</u>			
Riporto correttamente le grandezze sugli assi cartesiani			
Riporto correttamente sul grafico le unità di misura delle grandezze rappresentate			
Riporto correttamente le incertezze di misura			
Calcolo correttamente la pendenza della retta del grafico			
PUNTEGGIO MASSIMO PUNTI			

*** Per ogni domanda sono indicati gli obiettivi oggetto della verifica dell'attività sperimentale.**

X
Bibliografia e siti Web di interesse

1. J. S. Walker – Fisica – vol.1 Meccanica, Ed. Zanichelli
 2. E. Amaldi – Le idee della fisica – vol1, Ed. Zanichelli
 3. M. Palladino Bosia – Da Galileo ad Einstein – vol 1, Ed. Petrini
 4. F. Bocci – Manuale per il laboratorio di fisica – Ed. Zanichelli
Il testo analizza le varie fasi di un'esperienza di laboratorio e guida all'analisi dei dati sperimentali.
 5. F. Tibone – Quattro.zero – vol 1 e 2, Ed. Zanichelli
Il testo consente di utilizzare il foglio elettronico per raccogliere ed elaborare i dati sperimentali, costruire grafici e tabelle.
-
1. <http://it.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A0>
Su Wikipedia, l'enciclopedia libera, è possibile trovare informazioni sulla densità di una sostanza e su altre grandezze ad essa correlate.
 2. <http://jumk.de/calc/densita.shtml>
Consente di convertire automaticamente il valore della densità nelle diverse unità di misura.
 3. <http://costruire.altervista.org/libro/densita.htm>
Illustra diversi metodi di misurazione della densità: picnometro, pesata idrostatica, flottazione ed altri.

SCHEDA PER LO STUDENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO TRAMITE LA LEGGE DI STEVINO

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO ATTRAVERSO L'APPLICAZIONE DELLA LEGGE DI STEVINO

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

La **densità** è una grandezza che dà un'informazione particolare su una certa sostanza, ovvero ci fornisce informazioni sulla quantità di materia di una determinata sostanza che occupa una ben precisa regione di spazio.

Mi dice quanta massa, misurata in kg, è contenuta in un volume di 1 m³.

- È definita attraverso due altre grandezze la massa e il volume.

È una grandezza derivata

- È il rapporto tra la massa e il volume che tale massa occupa:

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

unità di misura ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

dimensioni [ρ] = [$m * l^3$]

La **densità** non dipende dalla quantità di materia, ma solo dalla *qualità* e dalle *condizioni* (quali temperatura e pressione) in cui la materia si trova.

La densità è una grandezza intensiva.

La definizione appena fornita consente di determinare la densità di una qualunque sostanza. Nel caso dei liquidi è possibile ricavare questa fondamentale grandezza fisica applicando **la legge di Stevino**.

Essa stabilisce che la differenza tra la pressione alla quale sono soggetti i punti che si trovano sulla superficie del liquido (che corrisponde alla pressione atmosferica p_0) e quella alla quale sono soggetti i punti che si trovano a profondità h (dovuta anche alla pressione generata dal peso della colonna di liquido sovrastante) è direttamente proporzionale alla profondità, alla densità del liquido e all'accelerazione di gravità :

$$\Delta p = p - p_0 = \rho g h$$

È importante sottolineare che la pressione esercitata dal liquido **non dipende dalla forma del recipiente** nel quale esso è contenuto.

La legge di Stevino non è applicabile ai gas perché essi, essendo comprimibili, hanno una densità che aumenta all'aumentare della profondità.

III

Descrizione generale dell'esperienza

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

L'esperienza ha lo scopo di proporre una differente modalità per determinare il valore della densità di un liquido, applicando non la definizione ma la legge di Stevino.

Preso un manometro ad aria libera agganciato ad un supporto fisso lo si riempie con l'acqua di rubinetto: la pressione esercitata sulla superficie del liquido nei due rami è quella atmosferica.

Successivamente si collega uno dei rami del manometro al tubo di gomma e quest'ultimo allo stelo di una campanella di vetro che viene immersa in un becher contenente il liquido di cui si vuole determinare la densità.

A questo punto sulla superficie dell'acqua contenuta nel ramo del manometro collegato alla campanella non agisce più soltanto la pressione atmosferica mentre sulla superficie dell'acqua contenuta nell'altro ramo la pressione non subisce variazioni.

Ciò che si constata è che l'acqua contenuta nel ramo del manometro collegato al tubo di gomma viene “ spinta “ verso il basso.

Misurando quindi la variazione di pressione tra i due rami del manometro e la profondità alla quale è stata portata la campanella per ottenerla è possibile ricavare la densità del liquido contenuto nel becher applicando la legge di Stevino.

IV

Materiale occorrente

Strumentazione occorrente, con elenco dettagliato delle caratteristiche

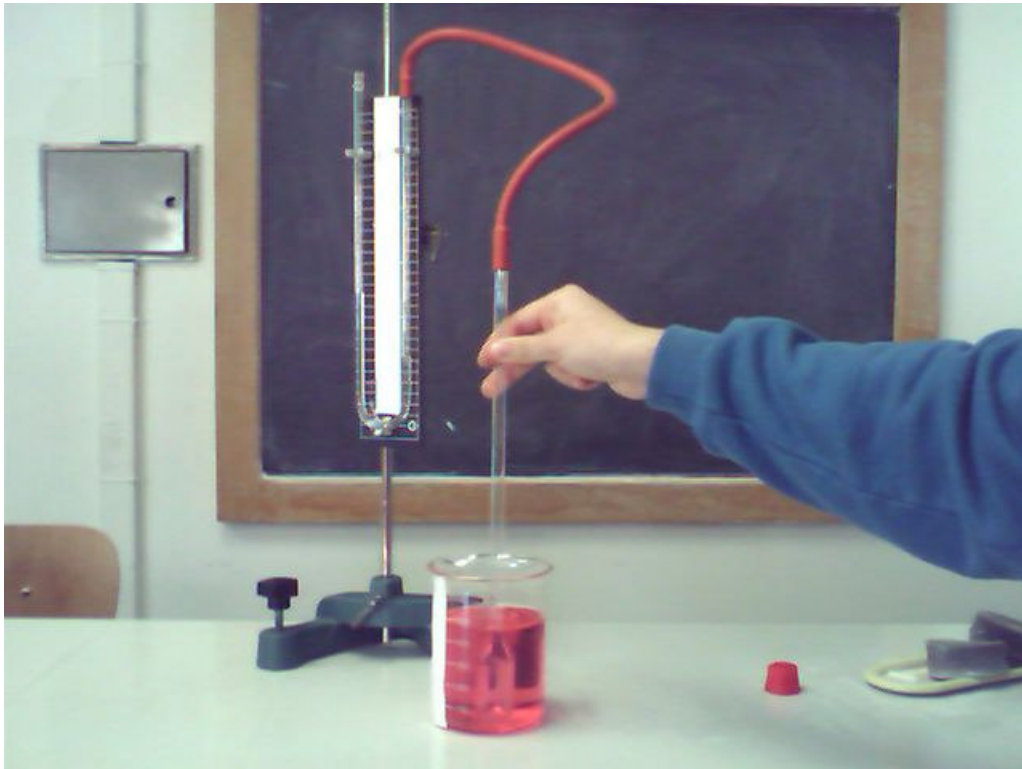
- base con asta
- manometro ad U
- morsetto universale
- stelo filettato per manometro
- tubo di gomma
- campanella di vetro

- becher: portata; risoluzione
- n° 2 metri di carta : portata; risoluzione
- siringa
- acqua di rubinetto, acqua distillata , alcol etilico

V

Istruzioni per l'assemblaggio

Descrizione della sequenza operativa per montare l'esperimento



- Fissa alla base l'asta e a questa lo stelo filettato usando il morsetto universale.
- Fissa il manometro allo stelo filettato e sovrapponi alla sua scala graduata, in posizione centrale, uno dei metri di carta in modo da aumentare la sua risoluzione.
- Usa la siringa per riempire il manometro con l'acqua di rubinetto in modo che essa risalga nei due rami raggiungendo un livello apprezzabile ma non eccessivo.
- Elimina le eventuali bolle d'aria formatesi durante l'inserimento dell'acqua nel manometro.
- Aumenta la risoluzione del becher sovrapponendo alla sua scala graduata l'altro metro di carta.
- Collega una estremità del tubo di gomma alla campanella di vetro e l'altra ad un ramo del manometro.
- Usa una campanella di vetro con lo stelo lungo, in modo tale da irrigidire la parte di tubo nella quale viene inserita, facilitando così la sua discesa nel liquido.

- Se la campanella da inserire nel tubo di gomma non aderisce perfettamente alla sua sezione sigillala ad esso con nastro isolante.
- Riempi il becher con il liquido del quale vuoi determinare la densità e immergi in esso la campanella con un movimento verticale, dall'alto verso il basso, che la mantenga costantemente parallela al fondo del becher e non generi bolle d'aria..
- Fai attenzione che il tubo di gomma collegato al manometro e alla campanella non subisca strozzature mentre si rileva il dislivello dell'acqua creatosi tra i due rami del manometro.
- Riduci l'errore nella lettura del livello dell'acqua nei due rami del manometro riferendoti sempre al menisco inferiore.
- Riduci l'errore di parallasse posizionando la “ linea degli occhi “ il più possibile alla stessa altezza del livello del liquido (manometro) o del bordo della campanella (becher).

VI

Descrizione generale del procedimento di misura e grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

- Una volta immersa la campanella nel becher misura il dislivello che si crea nei due rami del manometro: esso rappresenta la variazione di pressione Δp espressa in mm di acqua.
- Misura la profondità h alla quale si trova la campanella rispetto alla superficie del liquido, partendo quasi dal fondo del becher.
- Ripeti l'esperienza più volte immergendo la campanella a profondità differenti (risalendo ad es. ogni volta di 1 cm); elabora i dati raccolti secondo quanto indicato nella guida di seguito riportata e compila con essi la tabella relativa al liquido esaminato.
- Successivamente ripeti l'esperienza inserendo nel becher un liquido diverso.

VII
Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Acqua distillata $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$									
$\Delta p(\text{mmH}_2\text{O})$	$\Delta p(\text{Pa})$	$\varepsilon_{\Delta p}$	$\varepsilon_{r_{\Delta p}}$	h ()	ε_h	ε_{r_h}	ρ ()	ε_ρ	$\varepsilon_\%$
							$\bar{\rho} =$		

Alcol etilico $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$									
$\Delta p(\text{mmH}_2\text{O})$	$\Delta p(\text{Pa})$	$\varepsilon_{\Delta p}$	$\varepsilon_{r_{\Delta p}}$	h ()	ε_h	ε_{r_h}	ρ ()	ε_ρ	$\varepsilon_\%$
							$\bar{\rho} =$		

- Costruisci su carta millimetrata oppure usando il foglio elettronico, in un unico piano cartesiano, i grafici sperimentali relativi ad ognuno dei liquidi esaminati riportando in ascissa la profondità ed in ordinata la variazione di pressione.
- Costruisci su carta millimetrata oppure usando il foglio elettronico, in un unico piano cartesiano, i grafici sperimentali relativi ad ognuno dei liquidi esaminati riportando in ascissa la variazione di pressione ed in ordinata la profondità.

VIII

Guida all' Analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Guida all'elaborazione dei dati per la compilazione della tabella

- $\Delta p(mmH_2O)$: variazione della pressione subita dall'acqua nel manometro rispetto a quella atmosferica, espressa in millimetri di acqua;
- $\Delta p(Pa)$: variazione della pressione subita dall'acqua nel manometro rispetto a quella atmosferica, espressa in Pascal con buona approssimazione attraverso il fattore di conversione $1mmH_2O = 10Pa$ ottenuto tenendo conto che $1mmH_2O = \frac{1}{13,45}mmHg$; $760mmHg = 1,013 \cdot 10^5 Pa$; $1mmHg = 1,33 \cdot 10^2 Pa$;
- $\mathcal{E}_{\Delta p} = \dots\dots\dots$ errore assoluto commesso su Δp ;
- $\mathcal{E}_{r_{\Delta p}} = \dots\dots\dots$ errore relativo commesso su Δp ;
- $h(m)$: profondità raggiunta dalla campanella nel becher rispetto alla superficie del liquido.
- $\mathcal{E}_h = \dots\dots\dots$ errore assoluto commesso su h ;
- $\mathcal{E}_{r_h} = \dots\dots\dots$ errore relativo commesso su h ;
- $\rho = \dots\dots\dots$ densità del liquido inserito nel becher ottenuta usando la legge di Stevino ;
- $\bar{\rho} = \dots\dots\dots$ media aritmetica dei valori della densità ottenuti per il liquido esaminato;
- $\mathcal{E}_\rho = \dots\dots\dots$ errore assoluto commesso sulla densità ;
- $\mathcal{E}_\% = \dots\dots\dots$ errore percentuale commesso sulla densità.

Guida alla costruzione dei grafici per ciascun liquido esaminato

- Riporta sul piano cartesiano, scegliendo opportunamente la scala da usare, i punti sperimentali aventi come ascissa i valori della profondità e come ordinata i corrispondenti valori della variazione di pressione.
- Rispetto ad ognuno dei punti sperimentali così ottenuti traccia le barre d'errore (la loro ampiezza è il doppio dell'errore assoluto commesso sulla grandezza considerata).
- Traccia la semiretta passante per l'origine che meglio approssima tutti i punti sperimentali, passando non necessariamente per i punti ma lambendo tutte le barre d'errore.
- Calcola il coefficiente angolare di ciascuna retta prendendo due suoi punti lontani dall'origine.
- Ripeti quanto già fatto invertendo le grandezze fisiche da riportare sugli assi del piano cartesiano.

IX
Indicazioni per la relazione
Indicazioni per confronto tra risultati ottenuti e aspettati

Ti viene fornita la tabella delle densità di alcune sostanze più comuni.

Confronta i valori da te ottenuti sperimentalmente con quelli teorici aspettati.

Materiale	Densità a 20°C (kg·m⁻³)
Alluminio	2700
Ferro	7860
Rame	8960
zinco	7100
Vetro	2400-2800
Acqua	1000
Alcol etilico	800
Petrolio	680
Olio	900
Anidride carbonica	1.9
Aria	1.29

X
Eventuale proposta di questionario

1. Spiega perché l'acqua raggiunge la stessa altezza nei due rami del manometro all'inizio dell'esperienza.

2. Spiega perché una volta inserita la campanella nel becher il livello dell'acqua nei due rami del manometro cambia.

3. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla variazione di pressione Δp nel manometro?

4. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla profondità h ?

5. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla densità?

6. Confronta i diversi valori della densità trovati sperimentalmente con quelli teorici. Fai le tue considerazioni.

7. Dall'analisi del grafico ottenuto per ogni liquido con i dati sperimentali individua quale relazione di proporzionalità lega le grandezze Δp e h .

8. Spiega come puoi ricavare dai singoli grafici che hai costruito la densità dei liquidi esaminati.

9. Se nel grafico si invertissero le grandezze riportate in ascissa e in ordinata che cosa rappresenterebbe la pendenza della retta?

SCHEDA PER IL DOCENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO TRAMITE IL PRINCIPIO DI ARCHIMEDE

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO CON IL PRINCIPIO DI ARCHIMEDE

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

Principio di Archimede: un corpo immerso in un fluido riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del volume del liquido spostato: $S_A = mg = \rho V g$

Sia P il peso del corpo determinato con il dinamometro e P_a il suo peso apparente dopo averlo immerso nel liquido.

Il peso apparente è uguale alla differenza tra il peso del corpo nell'aria e la spinta di Archimede

$$S_A = \rho_{\text{acqua}} g V_c \quad \text{con} \quad V_c = \text{volume del corpo immerso}$$

$$P_a = P - S_A \quad \Rightarrow \quad S_A = P - P_a$$

Prima finalità

□ **Calcolo del volume del corpo:** $P_a = P - \rho_{\text{acqua}} g V_c$

applicando la formula inversa si può ricavare il volume del corpo

$$V_c = \frac{P - P_a}{\rho_{\text{acqua}} g} = \frac{S_A}{\rho_{\text{acqua}} g} \quad (1)$$

Seconda finalità

❑ **Calcolo della densità di un liquido incognito:**

immergendo ora il corpo in un liquido incognito la spinta S_A sarà diversa dalla precedente quindi, si può calcolare la densità del liquido applicando opportunamente il principio di Archimede:

$$\rho_l = \frac{S_A}{gV_c}$$

E' possibile facilitare l'esperienza utilizzando un dinamometro tarato in grammi.

Con esso infatti si può giungere al calcolo immediato del volume ricordando che la differenza tra i due pesi espressa in grammi rappresenta il volume del corpo espressi in cm^3

$$V \text{ cm}^3 = (P - P_a) \text{ grammi} \quad (2)$$

Infatti, indicando $P_a = m_x g$ il peso apparente e sostituendo tale valore nella (1) otteniamo:

$$V_c = \frac{mg - m_x g}{\rho_{acqua} g} \quad \text{semplificando ed essendo } \rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

si arriva alla relazione (2).

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza e prerequisiti

- Prime classi del Liceo Tecnologico, PNI, Linguistico, Istituti Tecnici
- Classi terze e quarte del Liceo Scientifico e classi quarte del Liceo Classico

Prerequisiti

- Teoria della misura
- Costruzione e interpretazione di un grafico sperimentale
- Densità e sua unità di misura
- Uso del dinamometro
- Misura della massa e del peso
- Spinta idrostatica
- Principio di Archimede

IV

Obbiettivi generali

Applicare il Principio di Archimede per:

- Calcolare il volume di un corpo V_c
- Determinare la densità di un liquido incognito
- Confrontare differenti modalità operative analizzando e valutando i risultati ottenuti
- Scegliere tra gli strumenti di misura disponibili quelli più adeguati

V

Obbiettivi specifici

- Effettuare misure dirette ed indirette
- Usare le corrette unità di misura e se necessario le opportune equivalenze
- Gestire i calcoli numerici in notazione scientifica
- Applicare le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette
- Costruire un grafico sperimentale e trarre da esso informazioni
- Confrontare grafici sperimentali diversi ma riferiti alla stessa grandezza fisica

VI

Materiale occorrente

Strumentazione occorrente , con elenco dettagliate delle caratteristiche

- Corpo di forma regolare (cilindro di rame)
- Dinamometro tarato in newton : portata 2 N; risoluzione 0.05N
- Dinamometro tarato in grammi: portata 100 g; risoluzione 1 g
- Metro di carta: portata 10 cm (minimo); risoluzione 1mm
- Acqua distillata, alcool
- Becher
- Supporto per appendere il dinamometro

Assemblaggio



VII

Descrizione generale del procedimento di misura

Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Analisi dei dati e determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

L'esecuzione dell'esperienza avviene a gruppi di lavoro (massimo quattro alunni per gruppo).

I PARTE

- Agganciare il corpo al dinamometro tarato in grammi e leggere il peso
- Immergere il corpo nell'acqua distillata e leggere il peso apparente
- Calcolare il volume del corpo tenendo presente che in questo caso esso equivale alla spinta di Archimede subita dal corpo
- Agganciare successivamente il corpo al dinamometro tarato in Newton e leggere il peso.
- Immergere il corpo nell'acqua distillata e leggere il peso apparente
- Calcolare il volume del corpo ricavandolo da $P_a = P - \rho_{\text{acqua}} g V_c$

II PARTE

- Agganciare il corpo di cui si è precedentemente calcolato il volume al dinamometro e leggere il peso del corpo
- Riempire il becher con il liquido incognito (alcool, benzina, olio.....)
- Immergere il corpo nell'alcool e leggere il peso apparente
- Calcolare la spinta di Archimede subita dal corpo

Calcolare la densità dell'alcool applicando il principio di Archimede

III PARTE

- Prendere il corpo di cui si è calcolato il volume e segnare con un pennarello le tacche che corrispondono ad $\frac{1}{2}$ e ai $\frac{3}{4}$ della sua altezza
- Appendere il corpo al dinamometro e leggere il suo peso P
- Riempire il becher con uno dei liquidi disponibili
- Immergere ora il corpo nel liquido fino alla tacca che indica la metà dell'altezza
- Calcolare il volume V_c del corpo immerso e leggere sul dinamometro il peso apparente
- Calcolare la spinta subita dal corpo S_A
- Calcolare il rapporto tra la spinta subita e il volume immerso
- Ripetere le precedenti operazioni immergendo il cilindro fino alla seconda tacca e successivamente immergendolo in modo completo
- Inserire i dati raccolti nella tabella
- Ripetere tutta l'esperienza inserendo nel becher un liquido diverso
- Inserire i dati raccolti nella tabella relativa

Costruire nello stesso piano cartesiano i grafici sperimentali ottenuti dai dati elaborati, riportando in ascissa il volume V e in ordinata la spinta S_A

VII

Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

- P : peso del corpo in aria misurato in newton (N) o in grammi (g) a seconda del dinamometro scelto
- P_a : peso apparente del corpo (corpo immerso nel liquido) misurato in N o in g
- $\epsilon_a(P)$: errore assoluto sul peso = risoluzione del dinamometro, misurato in N o in g
- $\epsilon_a(P_a)$: errore assoluto sul peso apparente = risoluzione del dinamometro, misurato in N o in g

Grandezze derivate con errori relativi

- S_A : spinta di Archimede misurata in N o in g
- $\varepsilon_a(S_A) = \varepsilon_a(P) + \varepsilon_a(P_a) = \text{il doppio della risoluzione, misurato in } N \text{ o in } g$
- $\varepsilon_r(S_A)$: errore relativo sulla spinta = $\frac{\varepsilon_a(S_A)}{S_A}$

Se si usa il dinamometro tarato in grammi, il Volume equivale alla spinta, quindi:

- $\varepsilon_a(V_c)$: errore assoluto sul volume = risoluzione del dinamometro, misurato in N o in g
- $\varepsilon_r(V_c)$: errore relativo sul Volume = $\frac{\varepsilon_a(V_c)}{V_c}$
- $S_A/V_c = \text{densità se si usa il dinamometro tarato in grammi}$
- $\varepsilon_a(S_A/V_c) = (S_A/V_c) \left(\frac{\varepsilon_a(S_A)}{S_A} + \frac{\varepsilon_a(V_c)}{V_c} \right)$
- $\overline{S_A/V_c} = \text{media dei valori}$

VIII

Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire durante l'esecuzione dell'esperienza

- Se si ha difficoltà nel reperire il corpo cilindrico lo si può sostituire con un qualsiasi contenitore di forma regolare (cilindro o parallelepipedo), munito di un piccolo gancio per poter essere appeso al dinamometro.
- Il contenitore potrà essere riempito con una qualsiasi sostanza, o con dei ribattini di rame o di ferro, perché la spinta di Archimede non dipende dalla qualità del corpo ma solo dal liquido in cui è immerso.
- E' importante che il contenitore così riempito non galleggi quando viene immerso nell'acqua o nel liquido incognito.
- Per l'esecuzione della I e della II parte si può comunque procedere come se stesse usando il corpo cilindrico, mentre per l'esecuzione della III occorre applicare con il nastro adesivo trasparente, esternamente al contenitore, un centimetro di carta per avere l'opportuna suddivisione dell'altezza.
- Se la risoluzione del dinamometro è apprezzabile conviene dividerla ulteriormente
- I valori medi trovati risentono dell'errore dovuto alla difficile lettura della parte immersa del corpo attraverso il liquido.

- Quando la parte immersa del corpo è molto piccola, l'errore che si commette nella misurazione risulta molto grande, quindi conviene iniziare le misure quando il corpo è immerso per metà. E' per questo che i valori della prima riga delle due tabelle allegate non sono stati considerati.
- Cercare di eliminare gli errori di parallasse durante la lettura del peso e nel valutare la posizione della parte immersa del corpo nel liquido.

Dati e risultati di riferimento

I PARTE

$$P = (1.00 \pm 0.05) N$$

$$P_a = (0.85 \pm 0.05) N$$

$$S_A = (1.00 - 0.85) N = 0.15 N$$

$$S_A = (0.15 \pm 0.10) N$$

$$\epsilon_{\%} = 66 \%$$

$$V_c = (0.01 \pm 0.01) 10^{-3} m^3$$

$$\epsilon_{\%} = 100 \%$$

Nonostante nei laboratori siano ormai presenti dinamometri tarati in newton, l'errore commesso sul volume è tale che è più conveniente utilizzare un dinamometro tarato in grammi. Inoltre tale metodo risulta più rapido, fornisce misure più precise ed è applicabile anche a corpi di forma irregolare.

E' preferibile lavorare usando *cm* e *g* e solo alla fine trasformare nelle unità di misura del S.I.; in tal modo la densità dell'acqua è $1 g/cm^3$ e $g = 980 cm/s^2$

Le stesse misurazioni vengono ripetute con il dinamometro tarato in grammi.

$$P = (100 \pm 1) g$$

$$P_a = (88 \pm 1) g$$

$$V_c = S_A = (100 - 88) g = 12 cm^3$$

$$V_c = (12 \pm 2) cm^3 = (12 \pm 2) 10^{-3} m^3$$

$$\epsilon_{\%} = 20 \%$$

II PARTE

Il liquido preso in considerazione è l'alcool.

E' preferibile lavorare usando *cm* e *g* e solo alla fine trasformare nelle unità di misura del S.I.; in tal modo la densità dell'acqua è $1 g/cm^3$ e $g = 980 cm/s^2$.

$$P = (100 \pm 1) g$$

$$P_a = (90 \pm 1) g$$

$$S_A = (100 - 90) g = (10 \pm 2) g$$

$$\epsilon_{\%} = 20 \%$$

$$\rho_l = \frac{S_A}{V_c} = \frac{10g}{12cm^3} = 0.8\bar{3} g/cm^3 = 833 kg/m^3$$

$$\epsilon_{\%} = 33 \%$$

III PARTE

Legenda

$V_c = 12 \text{ cm}^3$	Volume del corpo	$\epsilon_a(V)$	= errore assoluto del volume
$P = 100 \text{ g}$	Peso del corpo nell'aria	$\epsilon_r(V)$	= errore relativo del volume
$h_{\text{totale}} = 56 \text{ mm}$	Altezza del corpo	$\epsilon_a(S_A)$	= errore assoluto della spinta
$\frac{1}{4} h = 14 \text{ mm}$		$\epsilon_r(S_A)$	= errore relativo della spinta
P_a	= Peso apparente		

Tabella Acqua distillata : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

	h cm	V_c cm^3	$\epsilon_a(V)$ cm^3	$\epsilon_r(V)$	P_a g	S_A g	$\epsilon_a(S_A)$ g	$\epsilon_r(S_A)$	S_A/V_c g/cm^3	$\epsilon_a(S_A/V)$ g/cm^3
1	1,4	3	2	0,60	98	2	2	1,00	0,6	0,96
2	2,8	6	2	0,30	94	6	2	0,33	1,0	0,63
3	4,2	9	2	0,20	92	8	2	0,25	1,0	0,36
4	5,6	12	2	0,17	88	12	2	0,17	1,0	0,34

$$\overline{S_A/V_c} \cong 1,0 \text{ g/cm}^3$$

Tabella Alcool : $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$

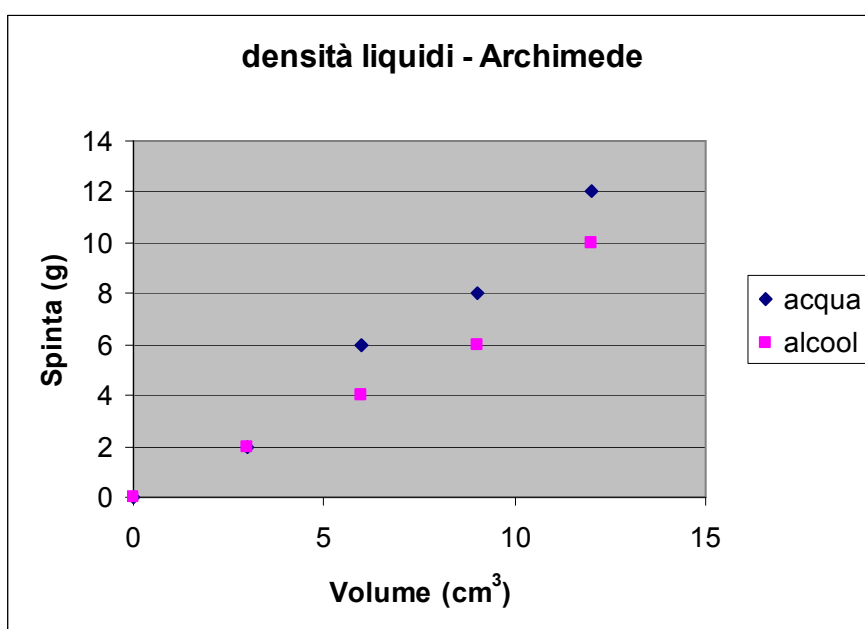
	h cm	V_c cm^3	$\epsilon_a(V)$ cm^3	$\epsilon_r(V)$	P_a g	S_A g	$\epsilon_a(S_A)$ g	$\epsilon_r(S_A)$	S_A/V_c g/cm^3	$\epsilon_a(S_A/V)$ g/cm^3
1	1,4	3	2	0,60	98	2,0	2,0	1,0	0,6	0,96
2	2,8	6	2	0,30	96	4,0	2,0	0,5	0,6	0,48
3	4,2	9	2	0,20	94	6,0	2,0	0,3	0,6	0,30
4	5,6	12	2	0,17	90	10,0	2,0	0,2	0,8	0,30

I valori della prima riga non sono stati conteggiati

$$\overline{S_A/V_c} \cong 0,7 \text{ g/cm}^3$$

Guida alla costruzione dei grafici per ciascun liquido esaminato

- Riportare sul piano cartesiano, scegliendo opportunamente la scala da usare, i punti sperimentali aventi come ascissa i valori del volume e come ordinata i corrispondenti valori della spinta.
- Rispetto ad ognuno dei punti sperimentali così ottenuti tracciare le barre d'errore (la loro ampiezza è il doppio dell'errore assoluto commesso sulla grandezza considerata).
- Tracciare la semiretta passante per l'origine che meglio approssima tutti i punti sperimentali; è sufficiente che la retta passi per la regione di variabilità del valore numerico delle grandezze rappresentate.
- Calcolare il coefficiente angolare di ciascuna retta prendendo due punti lontani dall'origine.



IX Esempi di questionari e griglie per la valutazione

I PARTE

1. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla spinta?
Applicando le leggi della propagazione degli errori della differenza.
2. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sul volume?
Dividendo il valore dell'errore assoluto sulla spinta per il prodotto ρg .
3. Spiega perché l'unità di misura del volume dipende dal dinamometro usato.
Il volume deve essere calcolato usando la formula inversa del principio di Archimede. Pertanto se la spinta è misurata in Newton il valore della densità è espresso nell'unità di misura del S.I. , mentre se è misurata in grammi tale valore risulta espresso in cm^3 .
4. Confronta i due valori del volume ottenuti e spiega come puoi decidere quale dei due è più preciso.
I valori del volume sono uguali se espressi in m^3 a causa degli arrotondamenti, mentre sono diversi se espressi in cm^3 e in m^3 . Per decidere quale dinamometro scegliere per migliorare la loro precisione si deve calcolare l'errore percentuale.

II PARTE

5. Indica gli ordini di grandezza per ogni valore trovato della densità e confrontali con quelli teorici.
L'ordine di grandezza sia per l'acqua distillata che per l'alcool è 10^3 e quindi corrispondente a quello teorico.
6. Ricava la densità dell'alcool applicando la formula inversa della spinta.
$$\rho_l = \frac{P - P_a}{gV_c} = \frac{S_A}{gV_c}$$
7. Confronta il valore della spinta subita dal corpo immerso nell'alcool in relazione con quella dell'acqua distillata e interpreta il risultato.
La spinta è minore perché la densità dell'alcool è minore.

III PARTE

8. Quale relazione esiste tra la parte del corpo immersa nei due liquidi considerati e la spinta subita dal corpo?
La spinta è direttamente proporzionale alla parte del corpo immerso.
9. La spinta dipende solo dalla parte di volume del corpo immerso?
No dipende anche dal liquido usato.
10. Da quale caratteristica del liquido dipende la spinta?
Dalla densità.
11. Interpreta, dalla pendenza delle rette ottenute nei grafici, l'andamento della spinta in funzione del volume e dei liquidi usati
A parità di volume la spinta maggiore è dovuta all'acqua poiché più "densa".
12. Quale valore ottieni calcolando sul grafico il rapporto S_A/V_c avendo usato il dinamometro tarato in grammi?
Il valore della densità del liquido.
13. Quale valore avresti ottenuto calcolando sul grafico il rapporto S_A/V_c usando il dinamometro tarato in newton?
Si ottiene il prodotto tra densità e accelerazione di gravità come da formula

GRIGLIA DI VALUTAZIONE

Determinazione della densità di un liquido con il Principio di Archimede

Tale griglia potrà essere usata come strumento di valutazione qualitativo barrando le caselle SI-NO, oppure quantitativo dopo averla corredata dei criteri di attribuzione dei punteggi per le singole domande.

<u>DOMANDE</u>			
	Si	No	Punti
DOMANDA 1: * Applica le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette			
DOMANDA 2: Applica le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette			
DOMANDA 3: Usa all'interno di una formula le unità di misura in modo coerente			
DOMANDA 4: Opera correttamente gli arrotondamenti e conosce l'uso dell'errore percentuale			
DOMANDA 5: E' capace di determinare l'ordine di grandezza e sa verificare la compatibilità tra i valori teorici e quelli sperimentali			
DOMANDA 6: E' capace di ricavare la formula inversa			
DOMANDA 7: Interpreta in modo corretto i valori trovati			
DOMANDA 8: Riconosce il tipo di relazione tra la spinta e la parte di volume immersa			
DOMANDA 9: Associa la spinta al liquido in cui il corpo è immerso			
DOMANDA 10: Associa la spinta alla densità del liquido			
DOMANDA 11: Analizza correttamente i grafici ottenuti e li interpreta			
DOMANDA 12: Analizza correttamente i grafici ottenuti			
DOMANDA 13: Analizza correttamente i grafici in funzione degli strumenti usati			
<u>TABELLA</u>			
Scrivo correttamente le unità di misura			
Scrivo correttamente le incertezze di misura			
Scrivo correttamente le cifre significative delle misure			
Calcolo correttamente il valore della densità			
Calcolo correttamente il valore medio della densità			
Arrotondo correttamente il risultato, scrivendolo con le sole cifre significative			
Riporto ordinatamente le misure nella tabella			
<u>GRAFICO</u>			
Riporto correttamente le grandezze sugli assi cartesiani			
Riporto correttamente sul grafico le unità di misura delle grandezze rappresentate			
Riporto correttamente le incertezze di misura			
Calcolo correttamente la pendenza della retta del grafico			
PUNTEGGIO MASSIMO PUNTI			

* Per ogni domanda sono indicati gli obiettivi oggetto della verifica dell'attività sperimentale.

X
Bibliografia e siti Web di interesse

1. J. S. Walker – Fisica – vol.1 Meccanica, Ed. Zanichelli
2. E. Amaldi – Le idee della fisica – vol1, Ed. Zanichelli
3. M. Palladino Bosia – Da Galileo ad Einstein – vol 1, Ed. Petrini
4. F. Bocci – Manuale per il laboratorio di fisica – Ed. Zanichelli
Il testo analizza le varie fasi di un'esperienza di laboratorio e guida all'analisi dei dati sperimentali.
5. F. Tibone – Quattro.zero – vol 1 e 2, Ed. Zanichelli
Il testo consente di utilizzare il foglio elettronico per raccogliere ed elaborare i dati sperimentali, costruire grafici e tabelle.

1. <http://it.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A0>
Su Wikipedia, l'enciclopedia libera, è possibile trovare informazioni sulla densità di una sostanza e su altre grandezze ad essa correlate.
2. <http://jumk.de/calc/densita.shtml>
Consente di convertire automaticamente il valore della densità nelle diverse unità di misura.
3. <http://costruire.altervista.org/libro/densita.htm>
Illustra diversi metodi di misurazione della densità: picnometro, pesata idrostatica, flottazione ed altri.

SCHEDA PER LO STUDENTE

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO TRAMITE IL PRINCIPIO DI ARCHIMEDE

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DELLA DENSITÀ DI UN LIQUIDO CON IL PRINCIPIO DI ARCHIMEDE

Autori

Prof.sse Fabbri Fiamma, Mancini Rossella, Proietti Orietta

Docenti del L.S.S. "F. ENRIQUES" (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Il **Principio di Archimede** afferma che un corpo immerso in un fluido riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del liquido spostato: $S_A = mg = \rho V g$

In particolare si dimostra che la spinta che un corpo subisce quando viene immerso in un liquido non dipende:

- dalla quantità del liquido
- dalla qualità del corpo

ma dipende:

- dalla qualità del liquido
- dal volume del corpo immerso

Ciò permette di applicare tale principio per determinare alcune grandezze caratteristiche sia del liquido che del corpo immerso.

III

Descrizione generale dell'esperienza Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

Ti viene proposta un'esperienza che ti permetterà di determinare le densità di alcuni liquidi. Leggi attentamente la scheda ed esegui le operazioni indicate valutando in modo critico i risultati ottenuti.

Nell'esperienza proposta il principio di Archimede viene applicato per determinare:

- ✓ Il volume di un corpo qualsiasi, utilizzando l'acqua distillata
- ✓ La densità di un liquido incognito in cui il corpo è immerso

IV

Materiale e strumentazione occorrente

- Corpo di forma regolare (cilindro di rame)
- Dinamometro tarato in newton: portata 2 N; risoluzione 0.05N
- Dinamometro tarato in grammi: portata 100 g; risoluzione 1 g
- Metro di carta: portata 10 cm (minimo); risoluzione 1mm
- Acqua distillata, alcool
- Becher
- Supporto per appendere il dinamometro

V

Istruzioni per l'assemblaggio Descrizione della sequenza operativa per montare l'esperimento

- Se la risoluzione del dinamometro è apprezzabile conviene dividerla ulteriormente.
- I valori medi trovati risentono dell'errore dovuto alla difficile lettura della parte immersa del corpo attraverso il liquido.
- Quando la parte immersa del corpo è molto piccola, l'errore che si commette nella misurazione risulta molto grande, quindi conviene iniziare le misure quando il corpo è immerso per metà di conseguenza i valori della prima riga delle due tabelle non sono stati conteggiati.
- Durante l'esecuzione della III parte dell'esperimento, fai in modo di essere allineato, con il tuo sguardo, con il livello dell'acqua mentre un tuo compagno prende i valori del peso sul dinamometro.



VI

Descrizione generale del procedimento di misura e grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

I PARTE

- Aggancia il corpo al dinamometro tarato in grammi e leggi il peso
 $P = (\quad \pm \quad) \dots$
- Immergi il corpo nell'acqua distillata e leggi il peso apparente
 $P_a = (\quad \pm \quad) \dots$
- Calcola il volume del corpo tenendo presente che in questo caso esso equivale alla spinta di Archimede subita dal corpo
 $V_c = S_A = (P - P_a) = (\quad \pm \quad) \text{ cm}^3$
- Aggancia successivamente il corpo al dinamometro tarato in Newton e leggi il peso
 $P = (\quad \pm \quad) \dots$
- Immergi il corpo nell'acqua distillata e leggi il peso apparente
 $P_a = (\quad \pm \quad) \dots$
- Calcola il volume del corpo ricavandolo ora dalla formula $P_a = P - \rho_{\text{acqua}} g V_c$

$$V_c = \dots\dots\dots = (\quad \pm \quad) \text{ m}^3$$

II PARTE

- Aggancia il corpo di cui hai precedentemente calcolato il volume al dinamometro e leggi il peso del corpo $P = (\quad \pm \quad) \dots$
- Riempi il becher con il liquido incognito
- Immergi il corpo nell'alcool e leggi il peso apparente $P_a = (\quad \pm \quad) \dots$
- Calcola la spinta di Archimede subita dal corpo $S_A = (P - P_a) = (\quad \pm \quad) \dots$
- Calcola la densità dell'alcool applicando il principio di Archimede

$$\rho_l = (\quad \pm \quad) \dots$$

III PARTE

- Prendi il corpo di cui hai calcolato il volume e segna con un pennarello le tacche che corrispondono ad $\frac{1}{2}$ e ai $\frac{3}{4}$ della sua altezza.
- Appendi il corpo al dinamometro e leggi il suo peso P .
- Riempi il becher con uno dei liquidi disponibili.
- Immergi ora il corpo nel liquido fino alla tacca che indica la metà dell'altezza.
- Calcola il volume del corpo immerso V e leggi sul dinamometro il peso apparente.
- Calcola la spinta subita dal corpo S .
- Calcola il rapporto tra la spinta subita e il volume immerso.
- Ripeti le precedenti operazioni immergendo il cilindro fino alla seconda tacca e successivamente immergendolo in modo completo.
- Inserisci i dati raccolti nella tabella.
- Ripeti tutta l'esperienza inserendo nel becher un liquido diverso.
- Costruisci nello stesso piano cartesiano i grafici sperimentali ottenuti dai dati elaborati, riportando in ascissa il volume V e in ordinata la spinta S .

VII
Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Tabella Acqua distillata : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

	h	V_c	$\epsilon_a(V)$	$\epsilon_r(V)$	S_A	$\epsilon_a(S_A)$	$\epsilon_r(S_A)$	S_A/V_c	$\epsilon_a(S_A/V)$
1									
2									
3									
4									

$$\overline{S_A/V_c} =$$

Tabella Alcool : $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$

	h	V_c	$\epsilon_a(V)$	$\epsilon_r(V)$	S_A	$\epsilon_a(S_A)$	$\epsilon_r(S_A)$	S_A/V_c	$\epsilon_a(S_A/V)$
1									
2									
3									
4									

$$\overline{S_A/V_c} =$$

Legenda

V_c = Volume del corpo
 P = Peso del corpo nell'aria
 h_{totale} = Altezza del corpo
 $\frac{1}{4} h$ =
 P_a = Peso apparente

$\epsilon_a(V)$ = errore assoluto del volume
 $\epsilon_r(V)$ = errore relativo del volume
 $\epsilon_a(S_A)$ = errore assoluto della spinta
 $\epsilon_r(S_A)$ = errore relativo della spinta
 $\overline{S_A/V_c}$ = media dei valori

Per il grafico:

1. Costruisci su carta millimetrata il grafico cartesiano riportando in ascissa il volume e in ordinata la spinta subita dal corpo.
2. Costruisci il grafico cartesiano riportando in ascissa il volume e in ordinata la spinta usando liquidi diversi.
3. Traccia la retta che secondo te approssima meglio i punti sperimentali e determinane il coefficiente angolare considerando punti lontani dall'origine.
4. Puoi costruire i grafici utilizzando il foglio elettronico.



IX
Indicazioni per la relazione
Indicazioni per confronto tra risultati ottenuti e aspettati

Confronta i valori da te ottenuti sperimentalmente con quelli teorici aspettati.

Alcuni valori della densità utili per l'esecuzione delle esperienze proposte

Materiale	Densità a 20°C (kg·m⁻³)
Alluminio	2700
Ferro	7860
Rame	8960
Zinco	7100
Vetro	2400-2800
Acqua	1000
Alcol etilico	800
Petrolio	680
Olio	900
Anidride carbonica	1.9
Aria	1.29

X
Eventuale proposta di questionario

¹RISPONDI ALLE SEGUENTI DOMANDE:

I PARTE

1. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sulla spinta?

.....

2. Come hai calcolato l'errore assoluto commesso sul volume?

.....

3. Spiega perché l'unità di misura del volume dipende dal dinamometro usato.

.....

.....

.....

4. Confronta i due valori del volume ottenuti e spiega come puoi decidere quale dei due è più preciso.

.....

.....

.....

II PARTE

5. Indica gli ordini di grandezza per ogni valore trovato della densità e confrontali con quelli teorici.

.....

.....

6. Ricava la densità dell'alcool applicando la formula inversa della spinta

.....

7. Confronta il valore della spinta subita dal corpo immerso nell'alcool in relazione con quella dell'acqua distillata e interpreta il risultato

.....

.....

III PARTE

8. Quale relazione esiste tra la parte del corpo immersa nell'alcool e la spinta subita dal corpo?

.....

9. La spinta dipende solo dalla parte di volume del corpo immerso?

.....

10. Da quale caratteristica del liquido dipende la spinta?

.....

11. Interpreta, dalla pendenza delle rette ottenute nei grafici , l'andamento della spinta in funzione del volume e dei liquidi usati.

.....

.....

12. Quale valore ottieni calcolando il rapporto S_A/V_c avendo usato il dinamometro tarato in grammi?

.....

.....

13. Quale valore avresti ottenuto calcolando il rapporto S_A/V_c usando il dinamometro tarato in newton?

.....

.....

Calendario degli incontri presso il L.S. “F. Enriques”

Indirizzo dell'Istituto: via F. Paolini, 196 - Ostia Lido

Recapiti: Tel. 06 56 85 007; liceo.enriques@libero.it

Docente di riferimento: prof.ssa Orietta Proietti

Dicembre 2006

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Febbraio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28				

Marzo 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Ogni attività si articola in due incontri secondo questo percorso didattico:

Primo incontro

- ❖ Introduzione al concetto di densità attraverso due esperienze dimostrative svolte dal docente:
 1. Determinazione della densità dell'aria
 2. Dipendenza della densità dalla temperatura: lo “strano” comportamento dell'acqua

Secondo incontro

- ❖ Gli studenti, suddivisi in gruppi di lavoro, eseguono una esperienza scelta dai loro docenti all'atto della prenotazione, tra quelle di seguito indicate:
 1. Densità di un solido irregolare
 2. Densità di un liquido con Stevino
 3. Densità di un liquido con Archimede

Gli studenti parteciperanno a due incontri settimanali nei giorni di Martedì e Giovedì dalle ore 15.00 alle 18.00.

Ad ogni incontro possono partecipare fino ad un massimo di 24 studenti. Gli studenti eseguono le esperienze suddivisi in gruppi di lavoro: ogni gruppo è composto da un massimo di quattro alunni.

Gli studenti saranno accompagnati da uno o più docenti che partecipano all'attività.

SCHEDA PER IL DOCENTE

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DILATAZIONE CUBICA DELL'ACQUA

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DILATAZIONE CUBICA DELL'ACQUA

Autori

Prof.sse Cesari Patrizia, Gulino Rosemaria, Pascale Emilia

Docenti del L.S.S. "DEMOCRITO" - Roma

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

In condizioni normali, escludendo cioè i casi in cui si verificano delle reazioni chimiche o cambiamenti di stato, quando un corpo viene riscaldato si verifica un aumento di volume. Il fenomeno prende il nome di **dilatazione** e trova una spiegazione a livello microscopico: l'aumento di volume è dovuto a un lieve allontanamento delle molecole le une dalle altre, provocato dall'aumentata agitazione termica.

Volendo quantificare il fenomeno, si nota che esso non si verifica in ugual misura per tutte le sostanze.

L'esperienza mostra che l'aumento di volume ΔV dipende dall'incremento di temperatura Δt e dal volume iniziale V_0 e che è direttamente proporzionale a tali grandezze. Si può scrivere:

$$\Delta V = k V_0 \Delta t$$

dove la costante k si chiama **coefficiente di dilatazione cubica** e dipende dal materiale considerato

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza

classi IV e V delle scuole medie superiori e le classi III del P.N.I.

Prerequisiti

- Gli strumenti di misura e le loro caratteristiche
- Definizione operativa di grandezza fisica
- Le grandezze fisiche fondamentali e derivate
- Il S.I. di misura
- Misura di una grandezza
- Misura diretta e indiretta di una grandezza
- Le possibili cause di errore in una misura
- Errori accidentali e sistematici
- Errori assoluti e relativi
- Incertezza in una sola misura
- Misura più probabile ed incertezza su più misure
- Incertezza nella somma, differenza, prodotto e quoziente di due misure
- Il volume e sua unità di misura
- Definizione di coefficiente di dilatazione
- Leggi di dilatazione lineare
- Definizione matematica di grandezze *direttamente* proporzionale

IV

Obiettivi generali

- Individuare una procedura che permetta di determinare in modo indiretto il volume di un corpo.
- Individuare la relazione di proporzionalità diretta tra volume e temperatura
- Ricavare il valore della grandezza “coefficiente di dilatazione cubica dell'acqua”tenendo conto delle leggi di propagazione degli errori.

V

Obiettivi specifici

- Determinare la sensibilità di uno strumento di misura ed associare alla misura diretta, con esso effettuata, l'errore assoluto commesso.
- Effettuare misure dirette ed indirette.
- Usare le corrette unità di misura effettuando se necessario le opportune equivalenze.
- Gestire i calcoli numerici in notazione scientifica.
- Esprimere l'ordine di grandezza di una misura.
- Applicare le leggi di propagazione degli errori nelle misure indirette.
- Confrontare tra di loro i risultati ottenuti.

VI

Materiale utilizzato e strumentazione occorrente, con elenco dettagliato delle caratteristiche

- treppiede
- base
- asta
- 2 morsetti universali
- pinza di fissaggio
- fornello
- matraccio con becco
- tappo forato con termometro ($100^{\circ} \pm 0.1^{\circ} \text{C}$)
- scala graduata del manometro con supporto
- tubo a L (sezione $d = 7 \pm 0.05 \text{ mm}$)
- tubo di connessione in gomma
- cilindro graduato ($250 \pm 2 \text{ ml}$)
- acqua distillata
- siringa ($60 \pm 2.0 \text{ ml}$)

VII

Istruzioni per l'assemblaggio

- Montare l'asta sulla base.
- Applicare all'asta i due morsetti bloccando con il primo lo stelo avvitato sulla scala del manometro e con il secondo la pinza di fissaggio.
- Regolare la posizione dei due morsetti in modo che il matraccio si adagi sulla reticella e i treppiedi.
- Riempire il matraccio fino al livello dell'apertura laterale utilizzando un cilindro graduato. Indicare con V_0 il volume.
- Inserire il tappo con il termometro. Indicare con t_0 la temperatura dell'acqua.
- Dall'apertura laterale inserire con la siringa acqua fino a riempire il matraccio evitando la formazione di bolle e la fuoriuscita di acqua.
- Agganciare il tubicino ad L con un raccordo di gomma che deve essere stretto per far uscire le bolle d'aria.
- Inserire l'acqua con la siringa dal tubo ad L.
- Fissare il matraccio e il tubo ad L al supporto graduato.
- Prendere nota del livello iniziale h_0 segnato dal liquido dentro al tubo piegato ad L.
- Riscaldare uniformemente il matraccio.
- Indicare con t_1 il valore indicato dal termometro.
- Prendere nota del livello h_1 raggiunto dall'acqua nel tubo piegato ad L.
- Indicare con \varnothing il diametro del tubo ad L.



VI

Accorgimenti da seguire durante l'esecuzione

- La lettura del livello raggiunto dal liquido nel cilindro graduato avviene considerando il menisco inferiore. Ciò evita un errore sistematico non trascurabile.
- Nel cilindro controllare il livello evitando errori di parallasse.
- Bisogna inserire il tappo in modo che spinga l'acqua e non ci sia aria tra tappo e acqua. Se c'è aria, inclinare il manometro per togliere la bolla d'aria.

SCHEDA PER LO STUDENTE

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DILATAZIONE CUBICA DELL'ACQUA

I

Titolo dell'esperienza

DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DILATAZIONE CUBICA DELL'ACQUA

Autori

Prof.sse Cesari Patrizia, Gulino Rosemaria, Pascale Emilia

Docenti del L.S.S. "DEMOCRITO" - Roma

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

In condizioni normali, escludendo cioè i casi in cui si verificano delle reazioni chimiche o cambiamenti di stato, quando un corpo viene riscaldato si verifica un aumento di volume. Il fenomeno prende il nome di **dilatazione** e trova una spiegazione a livello microscopico: l'aumento di volume è dovuto a un lieve allontanamento delle molecole le une dalle altre, provocato dall'aumentata agitazione termica.

Volendo quantificare il fenomeno, si nota che esso non si verifica in ugual misura per tutte le sostanze.

L'esperienza mostra che l'aumento di volume ΔV dipende dall'incremento di temperatura Δt e dal volume iniziale V_0 e che è direttamente proporzionale a tali grandezze. Si può scrivere:

$$\Delta V = k V_0 \Delta t$$

dove la costante k si chiama **coefficiente di dilatazione cubica** e dipende dal materiale considerato

III

Materiale utilizzato e strumentazione occorrente, con elenco dettagliato delle caratteristiche

- treppiede
- base
- asta
- 2 morsetti universali
- pinza di fissaggio
- fornello
- matraccio con becco
- tappo forato con termometro ($100^{\circ} \pm 0.1^{\circ} \text{C}$)
- scala graduata del manometro con supporto
- tubo a L (sezione $d = 7 \pm 0.05 \text{ mm}$)
- tubo di connessione in gomma
- cilindro graduato ($250 \pm 2 \text{ ml}$)
- acqua distillata
- siringa ($60 \pm 2.0 \text{ ml}$)

IV

Istruzioni per l'assemblaggio

- Montare l'asta sulla base.
- Applicare all'asta i due morsetti bloccando con il primo lo stelo avvitato sulla scala del manometro e con il secondo la pinza di fissaggio.
- Regolare la posizione dei due morsetti in modo che il matraccio si adagi sulla reticella e i treppiedi.
- Riempire il matraccio fino al livello dell'apertura laterale utilizzando un cilindro graduato. Indicare con V_0 il volume.
- Inserire il tappo con il termometro. Indicare con t_0 la temperatura dell'acqua.
- Dall'apertura laterale inserire con la siringa acqua fino a riempire il matraccio evitando la formazione di bolle e la fuoriuscita di acqua.
- Agganciare il tubicino ad L con un raccordo di gomma che deve essere stretto per far uscire le bolle d'aria.
- Inserire l'acqua con la siringa dal tubo ad L.
- Fissare il matraccio e il tubo ad L al supporto graduato.
- Prendere nota del livello iniziale h_0 segnato dal liquido dentro al tubo piegato ad L.
- Riscaldare uniformemente il matraccio.
- Indicare con t_1 il valore indicato dal termometro.
- Prendere nota del livello h_1 raggiunto dall'acqua nel tubo piegato ad L.
- Indicare con \varnothing il diametro del tubo ad L.



V

Grandezze da misurare direttamente e indirettamente, unità di misura, errori

Determinare:

$$\Delta h = h_1 - h_0$$

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

$$S = \pi r^2$$

$$\Delta V = S \Delta h$$

$$K = \Delta V / (V_0 \Delta t)$$

Eeguire la misura di ogni grandezza a_m . Calcolare l'incertezza per ogni misura e fornire il valore della misura nella forma $a = a_m \pm \varepsilon_m$.

Di seguito si riportano le più importanti relazioni da applicare per valutare gli errori assoluti delle grandezze derivate.

Grandezza	Errore assoluto
$a + b$	$\delta_a + \delta_b$
$a - b$	$\delta_a - \delta_b$
$a b$	$b \delta_a + a \delta_b$
a / b	$a / b \cdot (\delta_a / a + \delta_b / b)$

Tabella delle grandezze da misurare

Grandezza misurata a	V_0 cm^3	\varnothing mm	t_0 $^{\circ}\text{C}$	t_1 $^{\circ}\text{C}$	h_0 mm	h_1 mm	Δt $^{\circ}\text{C}$	Δh mm	S mm^2	ΔV mm^3	K $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Incertezza ε_a											
$a \pm \varepsilon_a$											

VI

Accorgimenti da seguire durante l'esecuzione

- La lettura del livello raggiunto dal liquido nel cilindro graduato avviene considerando il menisco inferiore. Ciò evita un errore sistematico non trascurabile.
- Nel cilindro controllare il livello evitando errori di parallasse.
- Bisogna inserire il tappo in modo che spinga l'acqua e non ci sia aria tra tappo e acqua. Se c'è aria, inclinare il manometro per togliere la bolla d'aria.

VI

Domande

- 1) Esprimi il valore trovato per il coefficiente di dilatazione dell'acqua nel S.I.

- 2) Indica quali sono le possibili cause di errore nella misurazione del coefficiente di dilatazione.

- 3) Confronta il valore ottenuto con i valori di riferimento.

Calendario degli incontri presso il L.S. "Democrito"

Indirizzo dell'Istituto: viale Prassilla, 79-81 - Roma

Docenti di riferimento: prof.sse Patrizia Cesari, Rosemaria Gulino, Emilia Pascale

Dicembre 2006

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Febbraio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28				

Marzo 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Aprile 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

- Ogni incontro si svolgerà nell'arco di un pomeriggio, inizierà alle ore 15 e avrà una durata di 3 ore.
- Numero massimo di alunni partecipanti all'attività di gruppo: 20 studenti. Gli studenti eseguono le esperienze suddivisi in gruppi di lavoro. Ogni gruppo è composto da un massimo di quattro alunni.
- Gli studenti sono accompagnati da uno o più docenti che partecipano all'attività.
- All'attività è presente l'assistente tecnico-pratico.

SCHEDA PER IL DOCENTE

LA FORZA ELASTICA

I

Titolo dell'esperienza

LA FORZA ELASTICA

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Se una molla viene allungata o compressa essa tende a ritornare alla lunghezza di riposo: la forza con cui reagisce la molla è direttamente proporzionale all'allungamento o alla compressione ed ha stessa direzione ma verso opposto rispetto alla forza che li ha prodotti.

$$\vec{F} = -k\Delta\vec{x}$$

k = coefficiente di elasticità della molla

III

Descrizione generale dell'esperienza

Si tratta della classica esperienza di verifica della legge di Hooke che può essere effettuata facilmente anche con attrezzatura di laboratorio tradizionale.

IV

Classi alle quali è rivolta l'esperienza

Classi III, IV e V delle Scuole Medie Superiori

V

Prerequisiti

- Conoscere il S.I.
- Conoscere le nozioni base della teoria degli errori
- Saper costruire e interpretare un grafico lineare
- Saper utilizzare le calcolatrici TI92 PLUS Texas Instruments per compiere semplici operazioni.

VI

Obiettivi generali

- Saper determinare i dati sperimentali con l'errore
- Saper costruire un grafico dei dati sperimentali
- Saper analizzare un grafico ed associare ad esso la migliore legge matematica

VII

Obiettivi specifici

- Verificare che esiste una relazione lineare tra la forza applicata ad una molla e il suo allungamento
- Trovare il valore della costante elastica della molla.

VIII

Materiali e strumenti occorrenti

- Molla
- Pesetti vari che si possano appendere facilmente
- Sostegno per la molla (fig. 4)
- Catetometro (fig. 5) [sensibilità 1mm, portata 750 mm]
- CBL (fig. 1)
- Calcolatrice TI92 PLUS Texas Instruments (fig. 2)
- Sensore di forza (fig. 3) [sensibilità 0,01 N; portata ± 10 N]

Foto dei materiali e dell'assemblaggio

fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4



fig. 5



IX

Descrizione dell'allestimento della prova

Di seguito è riportata la sequenza delle operazioni da eseguire per allestire l'esperimento.

1. Collegare il CBL ad un alimentatore di 6V, se sprovvisto di batterie (Fig. 6)
2. Collegare la sonda di forza al canale CH1 del CBL (Fig. 7)
3. Collegare il CBL alla calcolatrice grafica con l'apposito cavetto (Fig. 8)
4. La situazione finale dei collegamenti è riassunta nella foto seguente (Fig.9)



Fig. 6



Fig.7

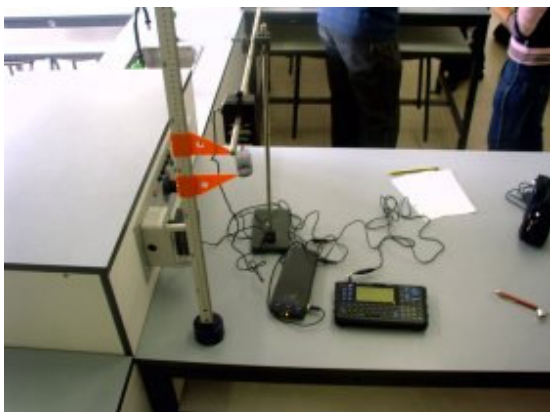


Fig. 8



Fig. 9

Posizioniamo il sostegno su un piano libero e affianchiamo ad esso un catetometro per misurare la variazione d'estensione della molla in tensione. Assicuriamo al sostegno il sensore di forza e appendiamo la molla al sensore stesso.



X

Descrizione generale del procedimento di misura ed eventuali accorgimenti

Con il catetometro misuriamo direttamente l'allungamento della molla x al quale associamo l'errore di lettura $\Delta x = 0,1$ cm.

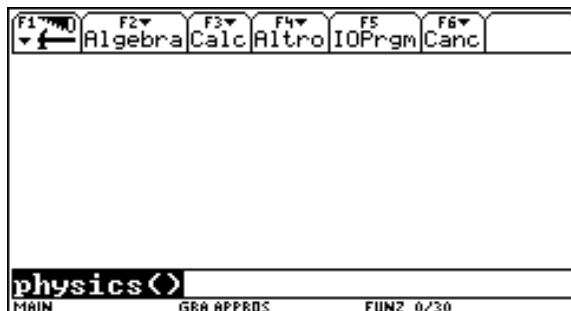
Attraverso il sensore di forza, al quale è appesa molla che verrà allungata dall'azione dei vari pesetti, misuriamo la forza ad esso applicata. È bene notare che anche quando non abbiamo alcun peso attaccato alla molla il sensore misura quello della molla stessa: prima di acquisire i dati sarà quindi opportuno utilizzare la funzione di azzeramento, come indicato nelle istruzioni: andremo così a sottrarre di volta in volta il peso della molla e otterremo quindi la forza di richiamo della molla F al variare dei pesetti ad essa attaccati; ad F associamo l'errore dovuto alla sensibilità dello strumento di misura $\Delta F = 0,01$ N.

Se la molla che abbiamo a disposizione è abbastanza rigida o se i pesetti che utilizziamo sono piccoli potremmo verificare un posizionamento anomalo del dato in corrispondenza del primo rispetto agli altri nel grafico: in effetti la legge di Hooke è verificata nelle fasi intermedie dell'allungamento della molla e si possono notare delle anomalie quando la molla inizia ad allungarsi o se poniamo un peso eccessivo attaccato ad essa. In tal caso possiamo ripetere le misure evitando di porre un unico pesetto.

Ricordiamoci comunque di non porre un peso eccessivo attaccato alla molla.

A questo punto tutto è pronto e passiamo alla fase di acquisizione dei dati.

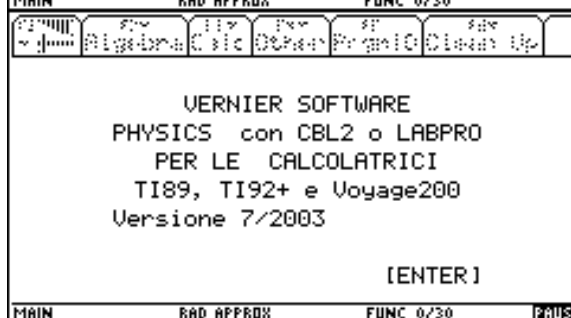
1. Accesa la calcolatrice, al prompt digitare physics() e premere <ENTER>



2. Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare TI92+ e premere <ENTER>



3. La schermata successiva dà informazioni sul software: premere <ENTER>



4. Comparare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda



5. Selezionare il numero (1) ...



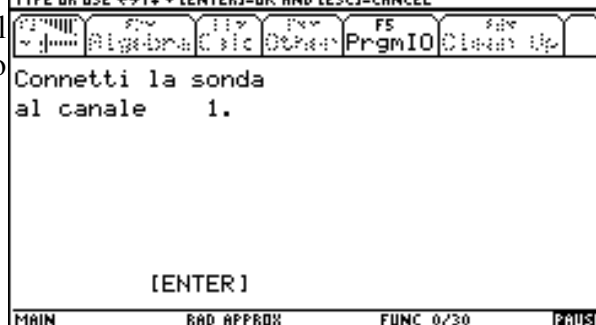
6. Dal menù dei sensori selezionare quello di forza come in figura e premere <ENTER>



7. Sono previste due configurazioni operative, diverse per portata e sensibilità (in figura sono mostrate le portate), del sensore di forza. Si passa da una portata all'altra con un selettore posto sulla sonda. In questo caso selezionare come in figura



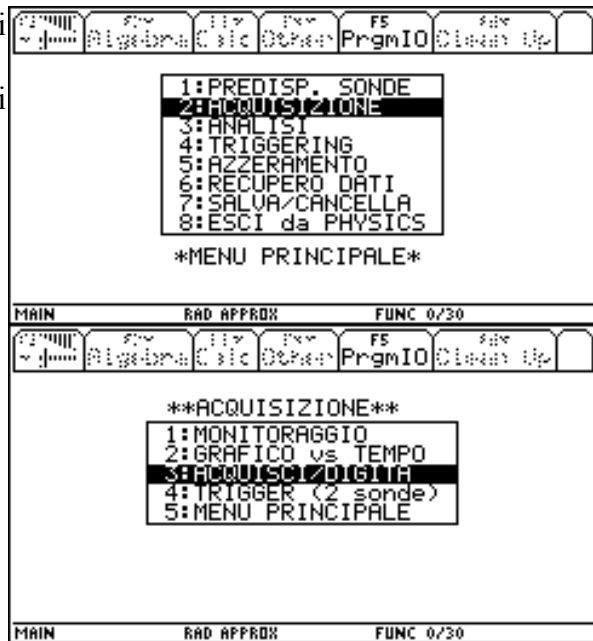
8. Procedere a collegare il sensore in CH1 del CBL qualora non fosse stato già fatto precedentemente



9. Non ricalibrare il sensore a meno che non siano presenti evidenti problemi nel qual caso attenersi alle procedure indicate sul manuale.



10. Si ritorna al menù principale nel quale si seleziona la funzione di azzeramento e, una volta terminata questa fase, quella di acquisizione dei dati.



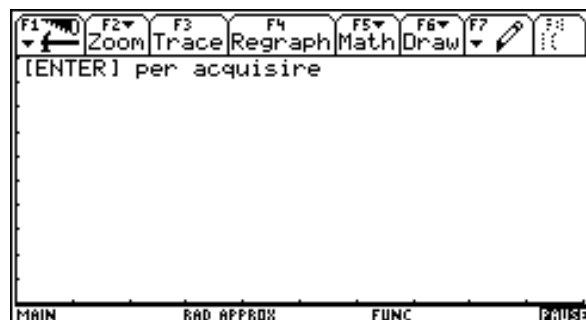
11. Selezioniamo la modalità <ACQUISISCI/DIGITA>

(NOTA: L'acquisizione può procedere in 4 modalità:

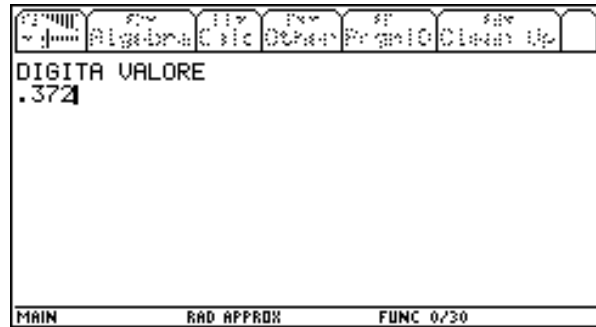
- MONITORAGGIO, esegue e ripete continuamente la misura, senza memorizzare i dati, utile per misure preliminari
- GRAFICO vs TEMPO, per acquisire i dati in una sequenza temporale di cui si possono impostare l'intervallo di tempo fra una misura e l'altra ed il numero totale di dati; è utile nelle misure di grandezze variabili nel tempo
- ACQUISISCI/DIGITA, esegue una misura ed offre il prompt per inserire il dato relativo alla grandezza correlata prima di eseguire la misura successiva; è la modalità più conveniente in questo esperimento, dove al prompt daremo i valori della lunghezza della molla
- TRIGGER, acquisisce i dati di seguito ogni volta che viene premuto il tasto [+])

12. I led del CBL lampeggiano ad indicare che la misura è stata effettuata e vi viene richiesto di premere <ENTER> per memorizzare il dato.

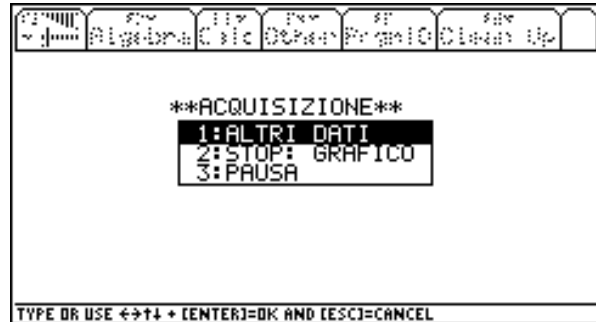
NOTA: a questo punto, e cioè prima di premere <ENTER>, la misura è già stata eseguita. Nelle misure successive impostare il nuovo valore dell'allungamento alla schermata precedente a questa.



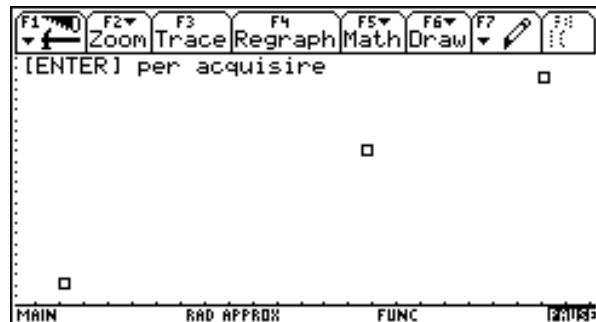
13. Immettere il valore della lunghezza



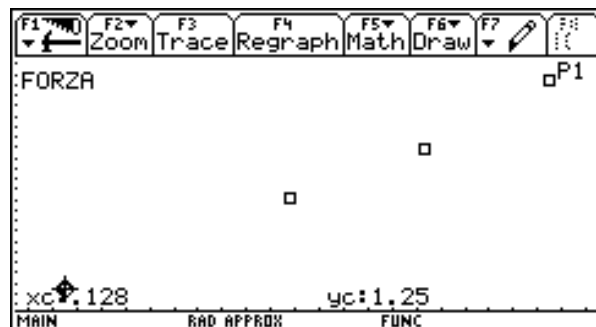
14. Selezionare <ALTRI DATI> e ripetere le due operazioni precedenti per il numero di misure previste (attenzione a cambiare il numero dei pesetti prima di premere <ENTER> su questa schermata, vedi nota al punto 11.)



15. Dopo ogni acquisizione viene mostrato il grafico dei dati misurati



16. Eseguite tutte le misure si seleziona STOP: GRAFICO e si ottiene il grafico finale



Compare il piano cartesiano con i valori delle misure effettuate. Notare che: i quadratini sono solo l'elemento grafico utilizzato per indicare il punto del piano e non riportano gli errori di misura; spostando il prompt, controllato dal mouse della calcolatrice, si possono leggere i valori numerici dei dati.

A questo punto la fase di acquisizione dei dati è terminata.

ATTENZIONE: per procedere con la relazione si dovrà utilizzare il grafico appena ottenuto, quindi non spegnere la calcolatrice e non utilizzarla in altro modo!

XI

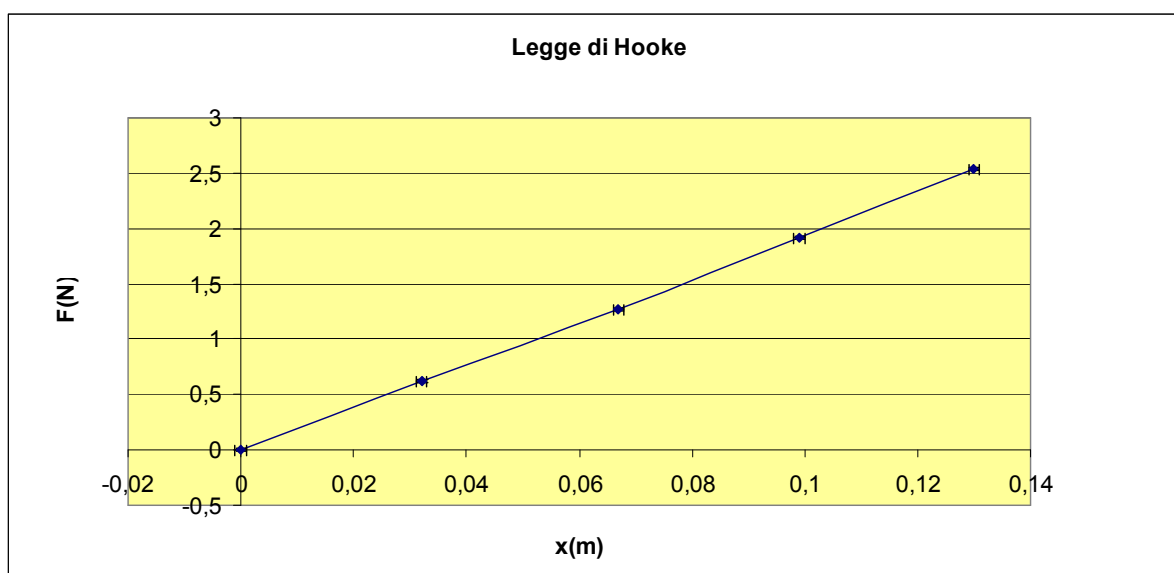
Elenco delle tabelle e dei grafici da riprodurre

Per ogni misura riportare in una tabella l'allungamento della molla x con l'errore Δx , la forza di richiamo della molla F con l'errore ΔF , il rapporto tra le due grandezze $k = F/x$.

N°	x (m)	Δx (m)	F (N)	ΔF (N)	$k = F/x$ (N/m)	Δk (*) (N/m)
1	0,000	0,001	0,0	0,01		
2	0,032	0,001	0,62	0,01	19,5	0,9
3	0,067	0,001	1,27	0,01	19,0	0,4
4	0,099	0,001	1,92	0,01	19,4	0,3
5	0,130	0,001	2,54	0,01	19,5	0,2

(*) Se $a=b/c \Rightarrow \Delta a = a(\Delta b/b + \Delta c/c)$

Rappresentare graficamente i punti sperimentali (i punti con le incertezze) riportando in ascissa l'allungamento della molla e in ordinata il valore della forza applicata.



XII

Guida all'analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Elaborazione algebrica

- Verificare che il valore k si mantenga costante entro gli errori sperimentali e che quindi sia verificata la legge di Hooke.
- Calcolare il valor medio \bar{k} e la semidispersione massima $\Delta \bar{k}$ e riportare i valori in tabella.

$\bar{k} = (k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n)/n$ (N/m)	$\Delta\bar{k} = (k_{\max} - k_{\min})/2$ (N/m)
19,3	0,3

- Se dai dati emerge qualche anomalia, indicare quale, proporre una spiegazione e suggerire come ripetere le misure per cercare di eliminarla.

Elaborazione grafica

- Disegnare la migliore curva che passa per i punti sperimentali e verificare che sia una retta passante dall'origine del sistema di riferimento, come ci si aspetta dalla legge di Hooke.
- Determinare il coefficiente di elasticità della molla (con la relativa unità di misura) calcolando il coefficiente angolare della retta.

$$k = (F_1 - F_0) / (x_1 - x_0) = 19,5 \text{ N/m}$$

XIII

Conclusioni (confronto tra risultati ottenuti e aspettati)

Utilizzare le tabelle e i grafici suggeriti ed elaborare i dati confrontando infine risultati ottenuti e aspettati.

Dalla prima tabella possiamo constatare che il rapporto tra forza e allungamento della molla rimane costante entro gli errori sperimentali e che quindi è verificata la legge di Hooke.

Il valore medio di questo rapporto con l'errore ad esso associato è $\bar{k} \pm \Delta\bar{k} = (19,3 \pm 0,3) \text{ N/m}$. Graficamente i dati sperimentali si dispongono lungo una retta e confermano l'a proporzionalità diretta tra forza e allungamento.

Il coefficiente angolare della retta 19,5 N/m è compatibile con il valore medio del coefficiente elastico della molla trovato algebricamente.

XIV

Questionario

1. Che cosa afferma la legge di Hooke?

Se una molla viene allungata o compressa essa tende a ritornare alla lunghezza di riposo: la forza con cui reagisce la molla è direttamente proporzionale all'allungamento o alla compressione ed ha stessa direzione ma verso opposto rispetto alla forza che li ha prodotti.

$$\vec{F} = -k\vec{\Delta x}$$

k = coefficiente di elasticità della molla

2. Spiega il significato di grandezze direttamente proporzionali

Due grandezze risultano direttamente proporzionali quando il loro rapporto è costante.

Se si rappresenta in un grafico cartesiano una grandezza in funzione dell'altra si ottiene una retta passante per l'origine il cui coefficiente angolare è uguale al rapporto costante tra le due grandezze.

3. A quale curva teorica corrisponde l'equazione della legge di Hooke?

Poiché la forza è direttamente proporzionale all'allungamento, se si rappresenta in un grafico cartesiano la forza in funzione dell'allungamento della molla si ottiene una retta passante per l'origine il cui coefficiente angolare è uguale al rapporto costante tra le due grandezze e quindi al coefficiente di elasticità della molla.

4. Indicando con k il coefficiente di elasticità della molla come varierebbero il grafico e k se utilizzassimo una molla +/- rigida?

A parità di forza applicata, se la molla è più rigida, l'allungamento è minore mentre, se è più morbida, l'allungamento è maggiore; poiché k si determina come rapporto tra F e x , quanto più la molla risulta rigida tanto maggiore è il suo coefficiente di elasticità e quindi il coefficiente angolare che caratterizza la retta del grafico.

5. Cosa accade se poniamo una seconda molla uguale alla prima in serie e applichiamo ad esse la stessa serie di pesi?

Se non applichiamo alcun peso ad esse l'allungamento è zero; se applichiamo un primo peso alla seconda molla essa si allunga di un tratto x e trasferisce la sollecitazione alla prima molla che si allunga anch'essa di x (supponiamo che la massa delle due molle sia trascurabile); l'allungamento totale della serie è quindi doppio rispetto all'allungamento che caratterizza ogni singola molla a parità di forza applicata, perciò il coefficiente di elasticità k risulta dimezzato così come il coefficiente angolare della retta che rappresenta graficamente i dati sperimentali.

6. E se le due molle sono in parallelo?

Se non applichiamo alcun peso ad esse l'allungamento è zero; se applichiamo un primo peso alle molle collegate in parallelo la sollecitazione, e quindi la reazione, si distribuisce sulle due molle che si allungano entrambe di un tratto $x/2$; l'allungamento totale del parallelo è quindi la metà di quello che caratterizzerebbe ogni singola molla a parità di forza applicata, perciò il coefficiente di elasticità k raddoppia così come il coefficiente angolare della retta che rappresenta graficamente i dati sperimentali.

GRIGLIA PER LA VALUTAZIONE DELL'ATTIVITA' DI LABORATORIO

Gruppo:

Argomento:

Data:

VALUTAZIONE		N	I	S	B	O	Voto
		0	2	3	4	5	
Attività del gruppo							
	Ripartizione dei compiti efficace. Interazione interna costruttiva. Autonomia.						
	Precauzione nell'utilizzo del materiale						
Relazione							
	Completa (tabelle, eventuali grafici, conclusioni, incertezze sui dati)						
	Unità di misura, calcoli e grafici, cifre significative, notazione scientifica, corretti.						
Conclusioni							
	Conformi a quelle aspettate.						
	Coerenti con le misure ed argomentate. Individuati problemi ed accorgimenti.						
Questionario							
	Percentuale di risposte corrette.						
	Risposte chiare e complete.						
Voto finale							

LEGENDA

- N Nullo
- I Insufficiente
- S Sufficiente
- B Buono
- O Ottimo

NOTA PER LA COMPILAZIONE

I parametri da valutare sono raccolti in 4 gruppi omogenei. Ogni gruppo va valutato da 0 a 10. È possibile valutare separatamente i singoli parametri in modo tale che il totale del gruppo vada da 0 a 10. Il voto finale è la media dei voti dei gruppi di parametri.

XV

Bibliografia e sitografia

Sui sistemi Real Time Laboratory (RTL), in particolare con un sistema: sensore-CBL-calcolatrice grafica

- ❑ G. Marucci, L. Catalano, V. Filippeschi e H. Coombat (a cura di), “Le calcolatrici grafiche ed i CBL nel laboratorio di Fisica”, *Quaderno del Ministero Pubblica Istruzione* in collaborazione con la Texas Instruments, Pitagora Editrice, Bologna 1998.
- ❑ M. Impedovo, “Matematica: insegnamento e computer algebra”, *Springer – Verlag Italia*, Milano 1999.
- ❑ J. Gastineau, K. Appel, C. Bakken, R. Sorensen, D. Vernier, “Physics with Calculators”, *Vernier Software & Technology*, Beaverton (Oregon, USA) 2000.
- ❑ B. Pecori, G. Torzo, G. Pezzi, O. Foà, A. Rambelli, M. Rafanelli, M. R. Rizzo, “L’ online ‘portabilE nell’insegnamento della fisica”, Atti del XXXVIII Congresso Nazionale AIF Ferrara, 1999, *La Fisica nella scuola - Supplemento*, gennaio – marzo 2001.
- ❑ AAVV, “Tecnologie informatiche nel laboratorio didattico”, Atti del XL Congresso Nazionale AIF, Senigallia, 2001, *La Fisica nella scuola – Supplemento*, aprile-giugno 2003.

- ❑ www.cartesionline.it, materiale didattico per l’insegnamento della matematica, della fisica e delle scienze.
- ❑ www.adt.it, Associazione per la Didattica con le Tecnologie (ADT)
- ❑ www.t3ww.org, Teachers Teaching with Technology, associazione internazionale di cui ADT è membro (in inglese).
- ❑ <http://www.fisica.uniud.it/irdis/index.htm>, IRDIS è un progetto finanziato nell’ambito della legge 10.01.2000 n.6 (Iniziative per la diffusione della cultura scientifica), finalizzato al potenziamento e ottimizzazione delle attività sperimentali nella didattica delle scienze con l’uso delle nuove tecnologie.

SCHEDA PER LO STUDENTE

LA FORZA ELASTICA

I

Titolo dell'esperienza

LA FORZA ELASTICA

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Se una molla viene allungata o compressa essa tende a ritornare alla lunghezza di riposo: la forza con cui reagisce la molla è direttamente proporzionale all'allungamento o alla compressione ed ha stessa direzione ma verso opposto rispetto alla forza che li ha prodotti.

$$\vec{F} = -k\Delta\vec{x}$$

k = coefficiente di elasticità della molla

III

Descrizione generale dell'esperienza e obiettivi

Si tratta della classica esperienza di verifica della legge di Hooke che può essere effettuata facilmente anche con attrezzatura di laboratorio tradizionale.

- Verificare che esiste una relazione lineare tra la forza applicata ad una molla e il suo allungamento
- Trovare il valore della costante elastica della molla.

IV

Materiali e strumenti occorrenti

- Molla
- Pesetti vari che si possano appendere facilmente
- Sostegno per la molla (fig. 4)
- Catetometro (fig. 5) [sensibilità 1mm, portata 750 mm]
- CBL (fig. 1)
- Calcolatrice TI92 PLUS Texas Instruments (fig. 2)
- Sensore di forza (fig. 3) [sensibilità 0,01 N; portata ± 10 N]

Foto dei materiali e dell'assemblaggio

fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4



fig. 5



V

Descrizione dell'allestimento della prova

Di seguito è riportata la sequenza delle operazioni da eseguire per allestire l'esperimento.

1. Collegare il CBL ad un alimentatore di 6V, se sprovvisto di batterie (Fig. 6)
2. Collegare la sonda di forza al canale CH1 del CBL (Fig. 7)
3. Collegare il CBL alla calcolatrice grafica con l'apposito cavetto (Fig. 8)
4. La situazione finale dei collegamenti è riassunta nella foto seguente (Fig.9)



Fig. 6



Fig. 7

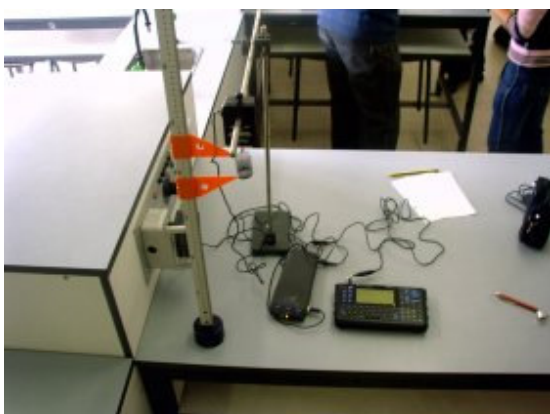


Fig. 8



Fig. 9

Posizioniamo il sostegno su un piano libero e affianchiamo ad esso un catetometro per misurare la variazione d'estensione della molla in tensione. Assicuriamo al sostegno il sensore di forza e appendiamo la molla al sensore stesso.



VI

Descrizione generale del procedimento di misura ed eventuali accorgimenti

Con il catetometro misuriamo direttamente l'allungamento della molla x al quale associamo l'errore di lettura $\Delta x = 0,1$ cm.

Attraverso il sensore di forza, al quale è appesa molla che verrà allungata dall'azione dei vari pesetti, misuriamo la forza ad esso applicata. È bene notare che anche quando non abbiamo alcun peso attaccato alla molla il sensore misura quello della molla stessa: prima di acquisire i dati sarà quindi opportuno utilizzare la funzione di azzeramento, come indicato nelle istruzioni: andremo così a sottrarre di volta in volta il peso della molla e otterremo quindi la forza di richiamo della molla F al variare dei pesetti ad essa attaccati; ad F associamo l'errore dovuto alla sensibilità dello strumento di misura $\Delta F = 0,01$ N.

Se la molla che abbiamo a disposizione è abbastanza rigida o se i pesetti che utilizziamo sono piccoli potremmo verificare un posizionamento anomalo del dato in corrispondenza del primo rispetto agli altri nel grafico: in effetti la legge di Hooke è verificata nelle fasi intermedie dell'allungamento della molla e si possono notare delle anomalie quando la molla inizia ad allungarsi o se poniamo un peso eccessivo attaccato ad essa. In tal caso possiamo ripetere le misure evitando di porre un unico pesetto.

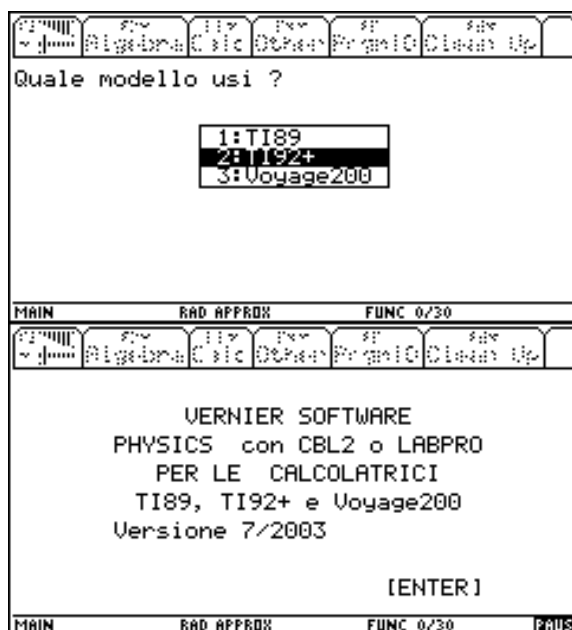
Ricordiamoci comunque di non porre un peso eccessivo attaccato alla molla.

A questo punto tutto è pronto e passiamo alla fase di acquisizione dei dati.

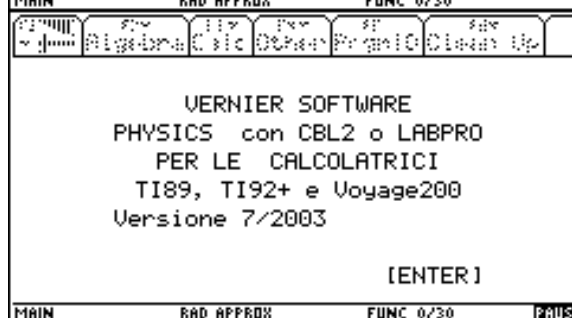
1. Accesa la calcolatrice, al prompt digitare physics() e premere <ENTER>



2. Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare TI92+ e premere <ENTER>



3. La schermata successiva dà informazioni sul software: premere <ENTER>



4. Comparare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda



5. Selezionare il numero (1) ...



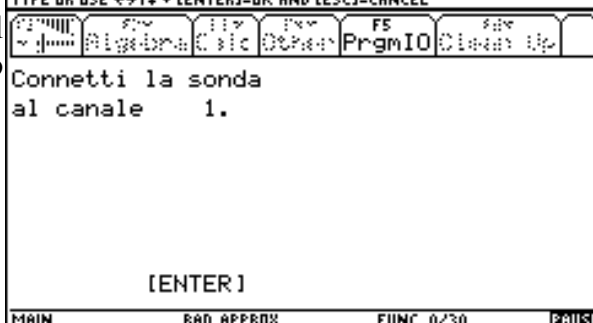
6. Dal menù dei sensori selezionare quello di forza come in figura e premere <ENTER>



7. Sono previste due configurazioni operative, diverse per portata e sensibilità (in figura sono mostrate le portate), del sensore di forza. Si passa da una portata all'altra con un selettore posto sulla sonda. In questo caso selezionare come in figura



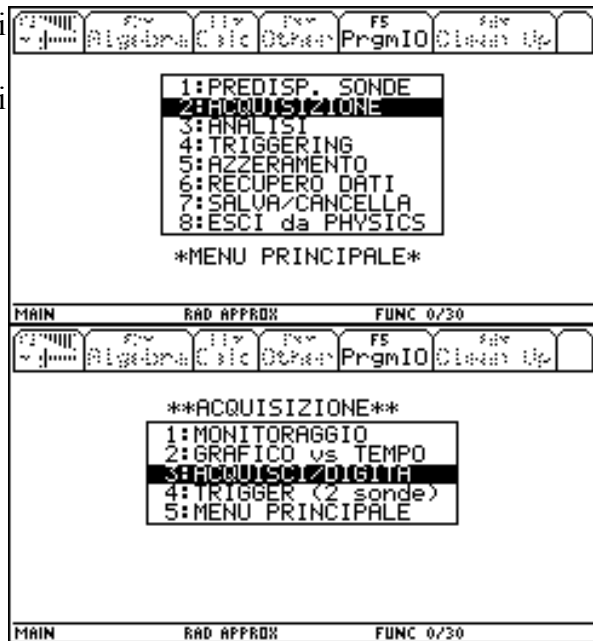
8. Procedere a collegare il sensore in CH1 del CBL qualora non fosse stato già fatto precedentemente



9. Non ricalibrare il sensore a meno che non siano presenti evidenti problemi nel qual caso attenersi alle procedure indicate sul manuale.



10. Si ritorna al menù principale nel quale si seleziona la funzione di azzeramento e, una volta terminata questa fase, quella di acquisizione dei dati.



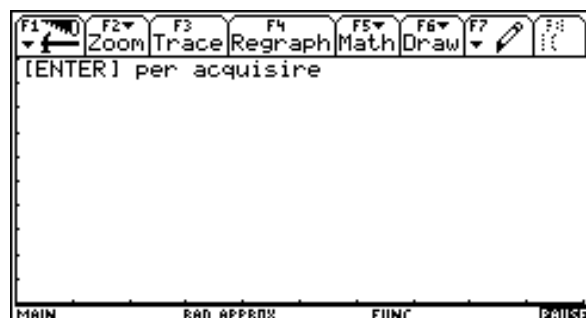
11. Selezioniamo la modalità <ACQUISISCI/DIGITA>

(NOTA: L'acquisizione può procedere in 4 modalità:

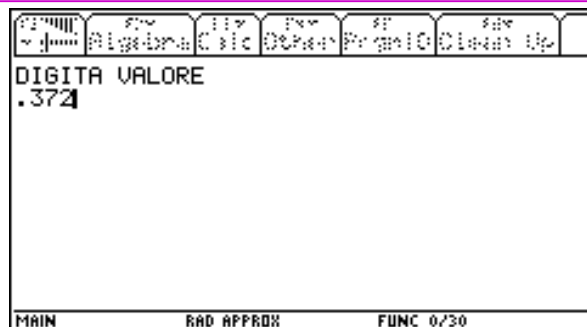
- MONITORAGGIO, esegue e ripete continuamente la misura, senza memorizzare i dati, utile per misure preliminari
- GRAFICO vs TEMPO, per acquisire i dati in una sequenza temporale di cui si possono impostare l'intervallo di tempo fra una misura e l'altra ed il numero totale di dati; è utile nelle misure di grandezze variabili nel tempo
- ACQUISISCI/DIGITA, esegue una misura ed offre il prompt per inserire il dato relativo alla grandezza correlata prima di eseguire la misura successiva; è la modalità più conveniente in questo esperimento, dove al prompt daremo i valori della lunghezza della molla
- TRIGGER, acquisisce i dati di seguito ogni volta che viene premuto il tasto [+])

12. I led del CBL lampeggiano ad indicare che la misura è stata effettuata e vi viene richiesto di premere <ENTER> per memorizzare il dato.

NOTA: a questo punto, e cioè prima di premere <ENTER>, la misura è già stata eseguita. Nelle misure successive impostare il nuovo valore dell'allungamento alla schermata precedente a questa.



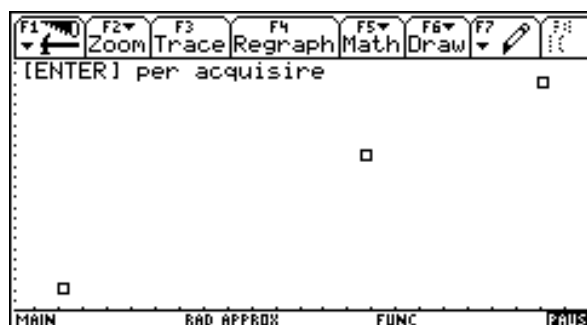
13. Immettere il valore della lunghezza



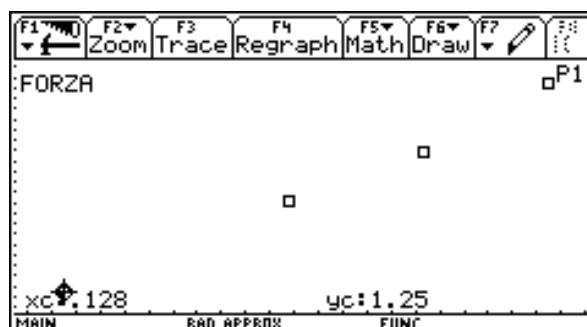
14. Selezionare <ALTRI DATI> e ripetere le due operazioni precedenti per il numero di misure previste (attenzione a cambiare il numero dei pesetti prima di premere <ENTER> su questa schermata, vedi nota al punto 11.)



15. Dopo ogni acquisizione viene mostrato il grafico dei dati misurati



16. Eseguite tutte le misure si seleziona STOP: GRAFICO e si ottiene il grafico finale



Compare il piano cartesiano con i valori delle misure effettuate. Notare che: i quadratini sono solo l'elemento grafico utilizzato per indicare il punto del piano e non riportano gli errori di misura; spostando il prompt, controllato dal mouse della calcolatrice, si possono leggere i valori numerici dei dati.

A questo punto la fase di acquisizione dei dati è terminata.

ATTENZIONE: per procedere con la relazione si dovrà utilizzare il grafico appena ottenuto, quindi non spegnere la calcolatrice e non utilizzarla in altro modo!

Elenco delle tabelle e dei grafici da riprodurre

Per ogni misura riportare in una tabella l'allungamento della molla x con l'errore Δx , la forza di richiamo della molla F con l'errore ΔF , il rapporto tra le due grandezze $k = F/x$.

[illegible]

(*) Se $a=b/c \Rightarrow \Delta a=a(\Delta b/b + \Delta c/c)$

Rappresentare graficamente i punti sperimentali (i punti con le incertezze) riportando in ascissa l'allungamento della molla e in ordinata il valore della forza applicata.

VIII

Guida all'analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Elaborazione algebrica

- Verificare che il valore k si mantenga costante entro gli errori sperimentali e che quindi sia verificata la legge di Hooke.
- Calcolare il valor medio \bar{k} e la semidispersione massima $\Delta \bar{k}$ e riportare i valori in tabella.

$\bar{k} = (k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n)/n$ (N/m)	$\Delta \bar{k} = (k_{\max} - k_{\min})/2$ (N/m)
19,3	0,3

- Se dai dati emerge qualche anomalia, indicare quale, proporre una spiegazione e suggerire come ripetere le misure per cercare di eliminarla.

Elaborazione grafica

- Disegnare la migliore curva che passa per i punti sperimentali e verificare che sia una retta passante dall'origine del sistema di riferimento, come ci si aspetta dalla legge di Hooke.
- Determinare il coefficiente di elasticità della molla (con la relativa unità di misura) calcolando il coefficiente angolare della retta.

$$k = (F_1 - F_0) / (x_1 - x_0) = 19,5 \text{ N/m}$$

IX

Conclusioni (confronto tra risultati ottenuti e aspettati)

Utilizzare le tabelle e i grafici suggeriti ed elaborare i dati confrontando infine risultati ottenuti e aspettati:

- verificando che il coefficiente angolare della retta sia compatibile con il valore trovato algebricamente.

X

Questionario

1. Che cosa afferma la legge di Hooke?

2. Spiega il significato di grandezze direttamente proporzionali

3. A quale curva teorica corrisponde l'equazione della legge di Hooke?

4. Indicando con k il coefficiente di elasticità della molla come varierebbero il grafico e k se utilizzassimo una molla +/- rigida?

5. Cosa accade poniamo una seconda molla uguale alla prima in serie e applichiamo ad esse la stessa serie di pesi?

6. E se le molle sono in parallelo?

SCHEDA PER IL DOCENTE

L'OSCILLATORE ARMONICO VERTICALE AL LABORATORIO RTL

I

Titolo dell'esperienza

L'OSCILLATORE ARMONICO VERTICALE AL LABORATORIO RTL

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Indicazioni generali

Il laboratorio RTL consente di seguire il moto dell'oscillatore nella sua evoluzione poiché può acquisire dati di posizione ad intervalli di tempo molto piccoli rispetto al periodo di oscillazione e per la durata desiderata. E' possibile, allora, discutere gli aspetti matematici del moto armonico (le caratteristiche di una funzione periodica come ampiezza, periodo e fase iniziale, le relazioni di fase fra posizione e velocità e tra posizione e forza, ecc.) a partire dai dati acquisiti. In questa scheda viene proposta una versione semplificata in cui il fenomeno fisico viene utilizzato per introdurre il modello matematico (e non il viceversa).

III

Descrizione del fenomeno fisico

Una massa di valore noto viene appesa ad una molla di costante elastica nota, in modo tale che il periodo delle oscillazioni sia dell'ordine di qualche secondo. La massa viene messa in oscillazione intorno alla posizione di equilibrio che dipende dall'azione combinata di forza peso e forza elastica. Il moto risultante è un moto armonico semplice, come nel caso dell'oscillatore su piano orizzontale, e nell'esperienza qui presentata viene studiato proprio per questi aspetti generali. Attenzione però che i due casi presentano notevoli differenze ad un'analisi più approfondita. Infatti anche la molla ha una massa che contribuisce al periodo del moto ed alla determinazione della posizione di equilibrio. Per rendere trascurabile questo effetto useremo l'accorgimento di appendere una massa di valore molto più grande di quella della molla. (per uno studio del contributo della massa della molla si confronti Ref.10 in bibliografia).

IV Prerequisiti

Il moto armonico e la forza elastica sono tipici argomenti di meccanica che vengono trattati al primo anno dei corsi di Fisica, il terzo anno di Liceo. D'altra parte gli aspetti matematici discussi, le funzioni periodiche, sono piuttosto argomento del corso di Trigonometria che viene normalmente svolto in classe quarta di Liceo Scientifico. In definitiva l'esperienza è indicata per alunni all'inizio del quarto anno o per alunni di terzo di corsi sperimentali di Fisica.

Prerequisiti minimi:

- Concetti di massa, peso, forza elastica.
- Saper individuare gli errori di misure dirette e saper calcolare l'errore sul valore di una grandezza derivata.
- Conoscere la legge di Hooke ed il significato di costante elastica.

V Obiettivi

1. Verificare dal grafico dei dati della posizione che la distanza picco-picco è costante e definire il moto periodico.
2. Misurare dal grafico dei dati il periodo del moto e verificare che la velocità istantanea e la forza variano con lo stesso periodo della posizione.
3. Misurare dal grafico i valori iniziali e le ampiezze massime di posizione, velocità e forza.
4. Stimare dai grafici i valori della posizione e della forza di equilibrio.
5. Confrontare i grafici di posizione e velocità per ricavare la relazione di fase fra di essi.
6. Verificare la formula del periodo dell'oscillatore armonico $T = 2\pi\sqrt{m/k}$

VI Accorgimenti

- La massa del peso deve essere molto maggiore di quella della molla altrimenti nella formula del periodo occorre tener conto, nel modo opportuno, anche della massa della molla.
- Le oscillazioni avvengono intorno ad un punto di equilibrio che è l'allungamento della molla con la massa appesa, quindi il valor medio della forza non sarà zero.
- Il CBR misura la posizione del peso rispetto a terra e non l'allungamento della molla.
- I valori di equilibrio di posizione e forza possono essere ottenuti con una misura diretta, prima di mettere in oscillazione il sistema, tramite la funzione MONITOR INPUT del menù COLLECT DATA del programma Physics.
- Attenzione ad evitare che si producano torsioni, oscillazioni orizzontali della molla o vibrazioni del sostegno del sistema.

VII Materiali occorrenti

- Sostegno con asta
- Molla di costante elastica nota
- Massa di valore noto
- CBL (fig. 1)

- CBR (fig. 2)
- Sensore di forza (fig. 3) [sensibilità 0,01 N; portata ± 10 N]
- Calcolatrice (fig. 4)

Foto dei vari materiali e del loro assemblaggio

fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4



fig. 5

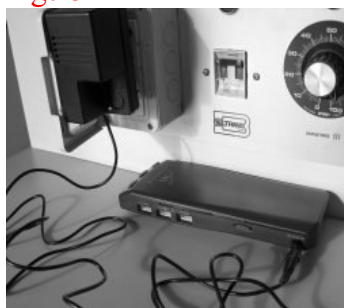


fig. 6



fig. 7



fig. 8



fig. 9

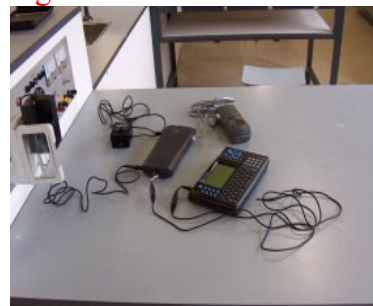


fig. 10



VIII

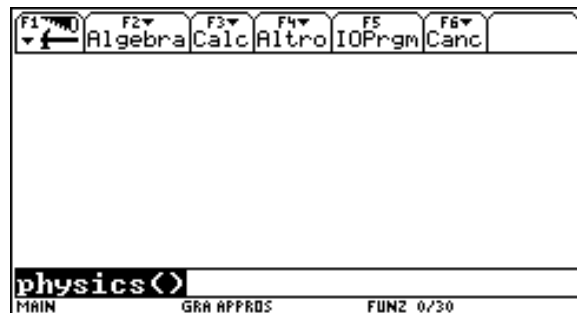
Allestimento della prova

Alimentate il CBL col suo trasformatore (fig. 5) o con le sue batterie. Collegate: il CBL alla calcolatrice tramite l'apposito cavetto (fig. 6); il CBR alla porta sonic del CBL tramite il cavetto fornito insieme al CBR (fig. 7); il sensore di forza al canale CH1 del CBL (fig. 8). La fig. 9 mostra la configurazione finale dei collegamenti fra i dispositivi. Posizionate il CBR sotto la verticale della molla che sarà stata appesa al sensore di forza a sua volta sistemato sull'asta di sostegno (fig. 10).

IX

Esecuzione delle misure

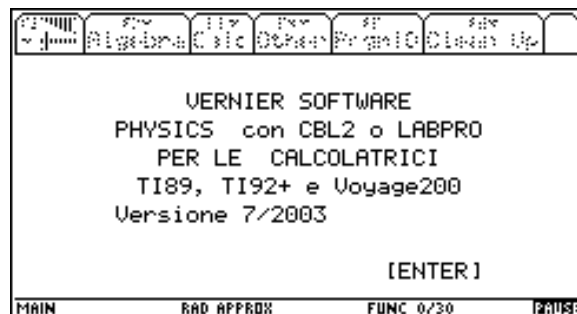
1) Al prompt della calcolatrice digitare physics() e premere <ENTER>



2) Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare Ti92+ e premere <ENTER>



3) La schermata successiva dà informazioni sul software: premere <ENTER>



4) Compare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda



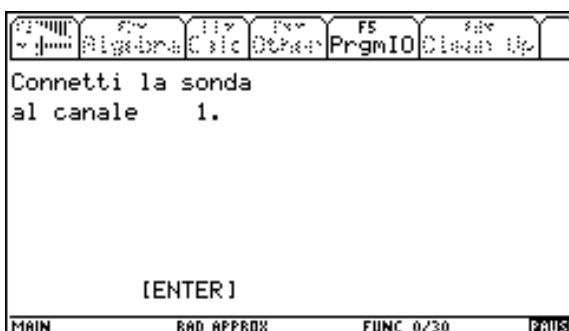
5) Selezionare il numero (2)



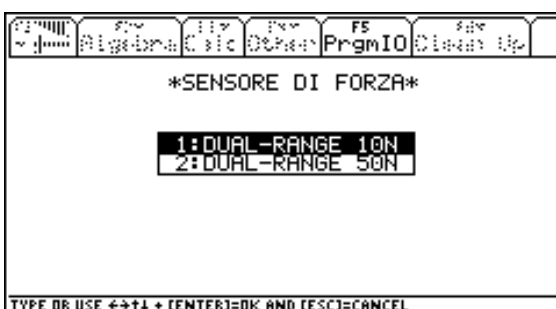
6) Impostare la sonda di forza



7) procedere a collegare il sensore in CH1 del CBL qualora non fosse stato già fatto precedentemente



8) Sono previste due configurazioni operative, diverse per portata e sensibilità (in figura sono mostrate le portate), del sensore di forza. Si passa da una portata all'altra con un selettore posto sulla sonda. In questo caso selezionare come in figura



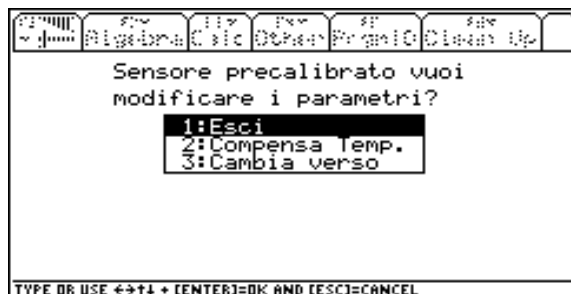
9) Non ricalibrare il sensore a meno che non siano presenti evidenti problemi nel qual caso attenersi alle procedure indicate sul manuale.



10) Selezionare il SONAR



11) premiere ESCI



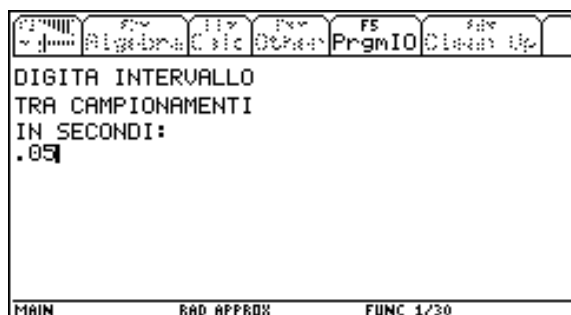
12) Ricompare il menù principale e si procede con l'acquisizione dei dati



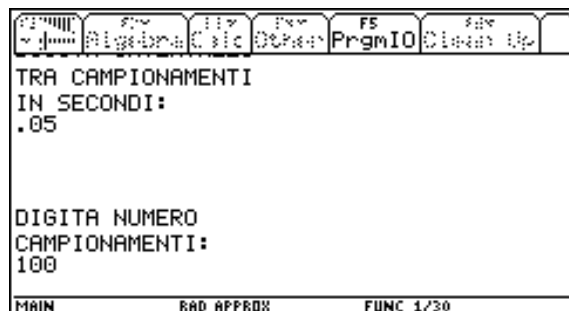
In questo esperimento vogliamo graficare gli andamenti in funzione del tempo delle grandezze fisiche: selezioniamo la modalità GRAFICO vs TEMPO.



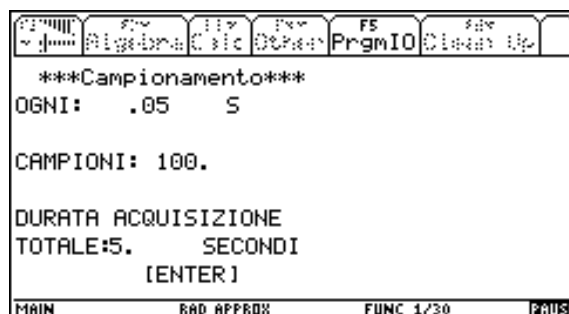
Successivamente viene proposto di fissare l'intervallo di tempo fra le misurazioni ed il numero totale dei dati da acquisire.



Questi valori vanno fissati sulla base di una stima preventiva del periodo dell'oscillazione in modo da avere più acquisizioni durante ogni oscillazione.



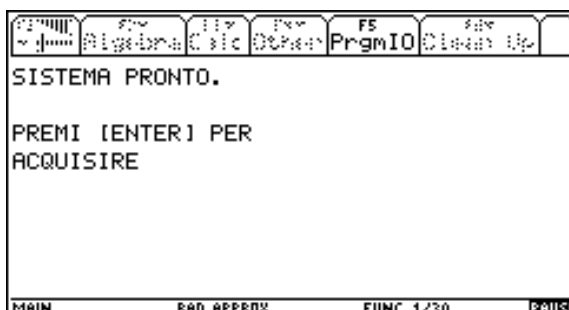
Le due schermate successive offrono un riepilogo delle scelte effettuate ...



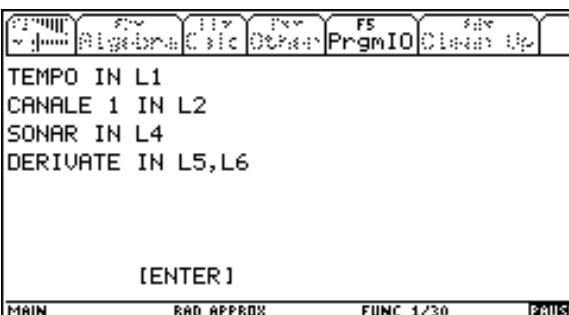
... e la possibilità di modificarle. Se tutto è ok premere ENTER



Se tutto è in ordine si procede all'esecuzione dell'esperimento. Spostare la molla dalla posizione di equilibrio e rilasciarla evitando di provocare oscillazioni orizzontali.



Terminata l'acquisizione compare una schermata riassuntiva che informa che la prima colonna (L1) di dati è il tempo, la seconda (L2) la grandezza misurata dal sensore collegato al canale CH1 del CBL, nel nostro caso la forza e le tre grandezze cinematiche, posizione, velocità e accelerazione, misurate dal CBR nelle colonne 4, 5 e 6.



Con la schermata successiva si può selezionare la grandezza di cui visualizzare il grafico. Negli esempi in figura sono mostrate la distanza, la velocità e la forza

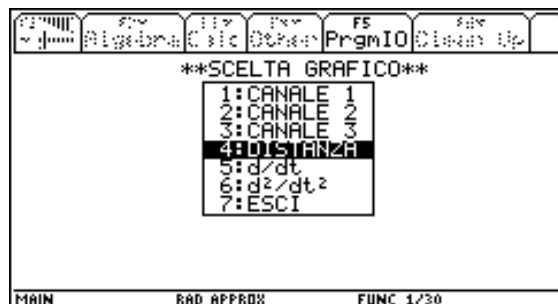


Grafico della distanza dal sonar

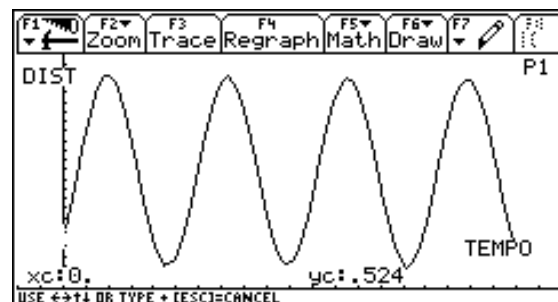


Grafico della velocità

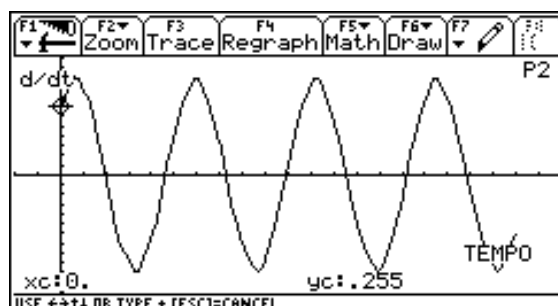
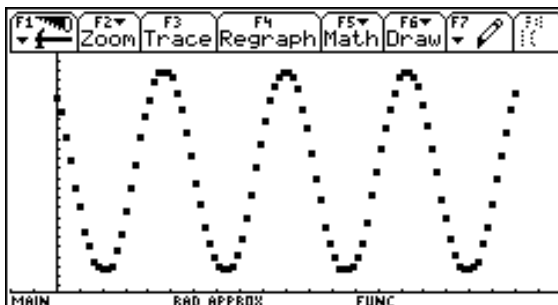


Grafico della forza



Prima di uscire da Physics salvare i dati per elaborarli successivamente “a mano” o importando il file dei dati su PC . Se invece si vuole utilizzare lo stesso Physics per eseguire un fit è più comodo non uscire affatto dal programma.



X Elaborazione dei dati

I dati possono essere letti direttamente dai grafici spostando il cursore col mouse, in questo modo si evitano operazioni che richiedono una maggiore familiarità con la calcolatrice e si sfrutta la leggibilità ed il carattere intuitivo dei grafici. In tal caso si può assumere come incertezza sulle misure la variazione che si ottiene spostandosi dalla posizione desiderata sul grafico a quella immediatamente vicina.

Dai grafici è possibile ricavare le caratteristiche del moto oscillatorio:

- Lo spostamento è periodico ed il periodo T può essere misurato
- La forza e lo spostamento hanno lo stesso periodo
- Anche la velocità è periodica con uguale periodo.
- La velocità è in anticipo di T/4 sullo spostamento.
- Ricavato T, noto il valore della massa M del peso, può essere verificata la relazione

$$T = 2\pi\sqrt{M/k}$$

Riportiamo a titolo di esempio i dati relativi al caso che compare nelle figure precedenti.

Tabella 1: valori di riferimento

Forza misurata a riposo (molla + massa)	$F_0 = (4,22 \pm 0,01) \text{ N}$
Costante elastica	$K = (8,52 \pm 0,08) \text{ N/m}$
Massa del peso	$M = (0,400 \pm 0,001) \text{ kg}$
Distanza del peso dal CBR a riposo (molla+massa)	$D_0 = (0,573 \pm 0,001) \text{ m}$

Nella tabella seguente sono riportati i valori riferiti ai massimi della distanza misurata dal CBR.

Nella colonna T sono riportate le differenze degli istanti di tempo corrispondenti a due massimi consecutivi. L'incertezza sui valori dell'istante di tempo dei picchi massimi non è legata alla sensibilità dello strumento, ma all'intervallo di campionamento (non sappiamo se con un campionamento più frequente non avremmo trovato un valore maggiore della distanza nell'intervallo immediatamente precedente o immediatamente seguente).

Tabella 2: valori dei picchi massimi della distanza.

N° picco massimo	t (s)	Δt (s)	T (s)	ΔT (s)	D (m)	ΔD (m)	$D - D_0$ (m)	ΔD_0 (m)
1	0,50	0,05	-----	-----	0,648	0,001	0,075	0,002
2	1,80	0,05	1,3	0,1	0,647	0,001	0,074	0,002
3	3,10	0,05	1,3	0,1	0,644	0,001	0,071	0,002
4	4,40	0,05	1,3	0,1	0,644	0,001	0,071	0,002

Il periodo risulta costante. L'ampiezza dell'oscillazione anche è sostanzialmente costante; ci aspettiamo comunque una diminuzione dovuta ad effetti dissipativi (attriti e resistenza dell'aria).

Analoga analisi può essere condotta per la velocità.

Tabella 3: valori dei picchi massimi della velocità.

N° picco massimo	t (s)	Δt (s)	T (s)	ΔT (s)	V (m)	ΔV (m)	D – D ₀ (m)	F – F ₀ (N)
1	0,15	0,05	-----	-----	0,36	0,02	-0,004	0,08
2	1,45	0,05	1,3	0,1	0,35	0,04	-0,007	0,10
3	2,80	0,05	1,35	0,1	0,36	0,03	0,009	-0,04
4	4,10	0,05	1,3	0,1	0,36	0,04	0,006	0,01

Di nuovo l'intervallo di tempo fra i massimi dei valori della velocità è costante, dunque si può parlare di periodo T, e tale periodo risulta uguale a quello trovato precedentemente dai valori della distanza. I valori dei picchi di velocità sono uguali entro le incertezze. Per l'incertezza sulla velocità è stato preso per ogni valore il più grande dei due scarti dai primi vicini. Nella tabella sono anche riportati i valori corrispondenti della forza e della posizione, corretti per i rispettivi valori di riposo del sistema massa – molla. Queste ultime due colonne dovrebbero contenere solo valori zero. Il fatto che così non sia dipende dal campionamento: succede che il picco vero in realtà capiti nell'intervallo fra una misura e l'altra. Un campionamento più frequente consentirebbe di ridurre, ma non di eliminare, l'incertezza sulla posizione dei picchi.

Infine consideriamo le misure di forza.

Tabella 4: valori dei picchi massimi della forza.

N° picco massimo	t (s)	Δt (s)	T (s)	ΔT (s)	F (N)	V (m/s)	F – F ₀ (N)	$\Delta F - F_0$ (N)
1	1,15	0,05	-----	-----	4,83	0,04	0,61	0,02
2	2,45	0,05	1,3	0,1	4,83	0,00	0,61	0,02
3	3,75	0,05	1,3	0,1	4,83	0,02	0,61	0,02
4								

I picchi dei massimi sono solo tre in coincidenza con i minimi della distanza. Il periodo è ancora uguale a quelli trovati con velocità e distanza. I valori della forza ai picchi è costante. La velocità prossima a zero.

Altre considerazioni sono possibili:

- Il massimo della velocità compare sempre 0,35 s ($\pm 0,1s$) prima del massimo della distanza, cioè un quarto di periodo in anticipo poiché $T/4 = 1,3s / 4 = 0,3s$
- Il massimo della forza compare sempre 0,65 s ($\pm 0,1s$) dopo il massimo della distanza, cioè la forza è in ritardo di metà periodo sulla distanza.

Verifichiamo ora la formula del periodo $T = 2\pi\sqrt{m/k}$. I dati della tabella 1 forniscono per T il valore: $T = (1,361 \pm 0,008)s$, valore che è in accordo, entro le incertezze, con quello ricavato dalle curve della distanza, della velocità e della forza.

XI Questionario

1. L'equazione oraria di un moto armonico è la seguente: $s = (6m) \cos\left[\left(\frac{\pi}{16} \text{rad/s}\right)t\right]$.

Determinare l'ampiezza, il periodo e la pulsazione.

R. L'ampiezza è $6m$, il periodo $T = 32s$ e la pulsazione $\omega = \frac{\pi}{16}$.

2. Esprimere la velocità e l'accelerazione in funzione del tempo del moto armonico dell'esercizio precedente.

R. La velocità è $v = -\left(\frac{6\pi}{16} m/s\right) \sin\left[\left(\frac{\pi}{16} \text{rad/s}\right)t\right]$, l'accelerazione è $a = -\left(\frac{3\pi^2}{128} m/s^2\right) \cos\left[\left(\frac{\pi}{16} \text{rad/s}\right)t\right]$.

3. Un punto materiale si muove di moto armonico con pulsazione $\omega = 4\pi \text{rad/s}$, e ampiezza $R = 10cm$. Determinare il massimo valore del modulo della velocità e dell'accelerazione.

R. La velocità massima è $v_{\max} = \omega R = 1,26m/s$, l'accelerazione massima è $a_{\max} = \omega^2 R = 15,8m/s^2$.

4. Quando un corpo di massa pari a $0,80kg$ è attaccato ad una molla verticale, la molla si allunga di $20cm$. Quanta massa si deve attaccare alla molla perché essa abbia un periodo di oscillazione di $1,2s$?

R. Una massa pari a $1,43kg$.

5. Un corpo di massa pari $200g$ è attaccato ad una molla situata su un piano orizzontale. Se si sposta il corpo di $10cm$ dalla posizione di equilibrio esso risente di una forza pari a $1,2N$. Nell'ipotesi di attriti trascurabili, determinare la legge oraria.

R. $s = (0,1m) \sin[(2,5\pi \text{rad/s})t]$.

GRIGLIA PER LA VALUTAZIONE DELL'ATTIVITA' DI LABORATORIO

Gruppo:

Argomento:

Data:

VALUTAZIONE		N	I	S	B	O	Voto
		0	2	3	4	5	
Attività del gruppo							
	Ripartizione dei compiti efficace. Interazione interna costruttiva. Autonomia.						
	Precauzione nell'utilizzo del materiale						
Relazione							
	Completa (tabelle, eventuali grafici, conclusioni, incertezze sui dati)						
	Unità di misura, calcoli e grafici, cifre significative, notazione scientifica, corretti.						
Conclusioni							
	Conformi a quelle aspettate.						
	Coerenti con le misure ed argomentate. Individuati problemi ed accorgimenti.						
Questionario							
	Percentuale di risposte corrette.						
	Risposte chiare e complete.						
Voto finale							

LEGENDA

- N Nullo
- I Insufficiente
- S Sufficiente
- B Buono
- O Ottimo

NOTA PER LA COMPILAZIONE

I parametri da valutare sono raccolti in 4 gruppi omogenei. Ogni gruppo va valutato da 0 a 10. E' possibile valutare separatamente i singoli parametri in modo tale che il totale del gruppo vada da 0 a 10. Il voto finale è la media dei voti dei gruppi di parametri.

XII

Bibliografia e sitografia

Sui sistemi Real Time Laboratory (RTL), in particolare con un sistema: sensore-CBL-calcolatrice grafica:

- 1) G. Marucci, L. Catalano, V. Filippeschi e H. Coombat (a cura di), “Le calcolatrici grafiche ed i CBL nel laboratorio di Fisica”, *Quaderno del Ministero Pubblica Istruzione* in collaborazione con la Texas Instruments, Pitagora Editrice, Bologna 1998.
- 2) M. Impedovo, “Matematica: insegnamento e computer algebra”, *Springer – Verlag Italia*, Milano 1999.
- 3) J. Gastineau, K. Appel, C. Bakken, R. Sorensen, D. Vernier, “Physics with Calculators”, *Vernier Software & Technology*, Beaverton (Oregon, USA) 2000.
- 4) B. Pecori, G. Torzo, G. Pezzi, O. Foà, A. Rambelli, M. Rafanelli, M. R. Rizzo, “L’online ‘portabile’ nell’insegnamento della fisica”, Atti del XXXVIII Congresso Nazionale AIF Ferrara, 1999, *La Fisica nella scuola - Supplemento*, gennaio – marzo 2001.
- 5) AAVV, “Tecnologie informatiche nel laboratorio didattico”, Atti del XL Congresso Nazionale AIF, Senigallia, 2001, *La Fisica nella scuola – Supplemento*, aprile-giugno 2003.
- 6) P. Peranzoni, G. Torzo, “Ciò che di solito si trascura nello studio dell’oscillatore ‘massa – molla’”, l’articolo in formato pdf può essere scaricato dal sito del progetto Irdis Ref.10

Siti Web

- 7) www.cartesionline.it, materiale didattico per l’insegnamento della matematica, della fisica e delle scienze.
- 8) www.adt.it, Associazione per la Didattica con le Tecnologie (ADT)
- 9) www.t3ww.org, Teachers Teaching with Technology, associazione internazionale di cui ADT è membro (in inglese).
- 10) <http://www.fisica.uniud.it/irdis/index.htm>, IRDIS è un progetto finanziato nell’ambito della legge 10.01.2000 n.6 (Iniziative per la diffusione della cultura scientifica), finalizzato al potenziamento e ottimizzazione delle attività sperimentali nella didattica delle scienze con l’uso delle nuove tecnologie.

SCHEDA PER LO STUDENTE

L'OSCILLATORE ARMONICO VERTICALE AL LABORATORIO RTL

I

Titolo dell'esperienza

L'OSCILLATORE ARMONICO VERTICALE AL LABORATORIO RTL

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Descrizione del fenomeno fisico

La forza esercitata da una molla è una forza di richiamo la cui intensità è proporzionale allo spostamento dalla sua posizione di equilibrio, cioè $F = -kx$ dove F è la forza, k la costante elastica della molla e x lo spostamento dall'equilibrio. Un corpo di massa m attaccato ad una molla esegue, in assenza di attrito, delle oscillazioni periodiche di periodo $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, che costituiscono un moto armonico: un moto caratterizzato da una accelerazione proporzionale allo spostamento del corpo rispetto alla posizione di equilibrio e di segno opposto allo spostamento.

III

Descrizione dell'esperienza e obiettivi

L'esperienza consiste nell'analizzare il moto di un corpo attaccato ad una molla in posizione verticale. Il laboratorio RTL consente di seguire il moto del corpo nella sua evoluzione, analizzando il moto armonico a partire dai dati acquisiti: grafici di posizione, velocità e forza. Dai grafici si ricavano i vari parametri quali ampiezza, periodo, fase iniziale, relazione di fase fra posizione e velocità etc.

Nell'esperienza da effettuare, il corpo di massa m che viene attaccato alla molla verticale ne provoca l'allungamento ed effettua delle oscillazioni di tipo armonico attorno ad una posizione di equilibrio determinata dalla condizione che il peso della massa sia uguale alla forza della molla. Le oscillazioni essendo di tipo armonico sono descritte matematicamente da funzioni sinusoidali, in particolare se prendiamo un riferimento che abbia come origine

dell'asse verticale la posizione a riposo della molla, allora lo spostamento verticale y è espresso dalla seguente relazione $y = y_0 + A \cos(\omega t)$ dove y_0 è la posizione di equilibrio, A l'ampiezza e $\omega = \frac{2\pi}{T}$ la frequenza angolare. La velocità invece è espressa dalla seguente relazione $v = -A\omega \sin(\omega t)$.

Le misure che si effettueranno durante l'esperienza serviranno a raggiungere i seguenti obiettivi:

1. Verificare dal grafico della posizione che la distanza picco-picco è costante e definire il moto periodico.
2. Misurare dal grafico dei dati il periodo del moto e verificare che la velocità istantanea e la forza variano con lo stesso periodo della posizione
3. Misurare dal grafico i valori iniziali e le ampiezze massime di posizione, velocità e forza.
4. Stimare dai grafici i valori della posizione e della forza di equilibrio.
5. Confrontare i grafici di posizione e velocità ricavare la relazione di fase
6. Verificare la formula del periodo dell'oscillatore armonico $T = 2\pi\sqrt{m/k}$

IV

Materiali occorrenti

- Sostegno con asta
- Molla di costante elastica nota
- Massa di valore noto
- CBL (fig. 1)
- CBR (fig. 2)
- Sensore di forza (fig. 3) [sensibilità 0,01 N; portata ± 10 N]
- Calcolatrice (fig. 4)

Foto dei vari materiali e del loro assemblaggio

fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4

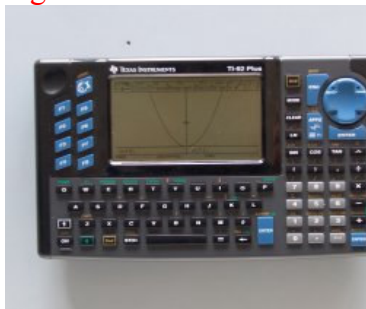


fig. 5



fig. 6



fig. 7



fig. 8



fig. 9



fig. 10



fig. 11



V

Accorgimenti

1. La massa del peso deve essere molto maggiore di quella della molla altrimenti nella formula del periodo occorre tener conto, nel modo opportuno, anche della massa della molla.
2. Le oscillazioni avvengono intorno ad un punto di equilibrio che è l'allungamento della molla con la massa appesa, quindi il valor medio della forza non sarà zero
3. Il CBR misura la posizione del peso rispetto a terra e non l'allungamento della molla.
4. Il CBR non misura correttamente le distanze inferiori a 40 cm, quindi occorre fare in modo che la distanza minima della massa oscillante sia abbastanza più grande di tale valore
5. Per mettere in oscillazione il peso spostarlo solo di poco (altrimenti le oscillazioni non sono più armoniche) dal suo punto di equilibrio, preferibilmente verso l'alto.

6. Avviare l'acquisizione dopo che il peso ha effettuato alcune oscillazioni e non contemporaneamente all'avvio del moto.
7. I valori di equilibrio di posizione e forza possono essere ottenuti con una misura diretta, prima di mettere in oscillazione il sistema, tramite la funzione MONITOR INPUT del menù COLLECT DATA del programma Physics.
8. Attenzione ad evitare che si producano torsioni o oscillazioni orizzontali della molla o vibrazioni del sostegno del sistema

VI

Istruzioni per l'assemblaggio

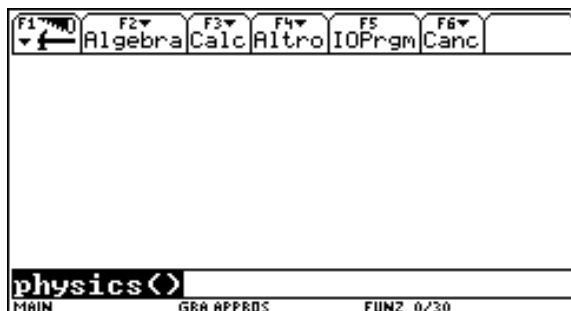
Alimentate il CBL col suo trasformatore (fig. 5) o con le sue batterie. Collegate: il CBL alla calcolatrice tramite l'apposito cavetto (fig. 6); il CBR alla porta sonic del CBL tramite il cavetto fornito insieme al CBR (fig. 7); il sensore di forza al canale CH1 del CBL (fig. 8). La fig. 9 mostra la configurazione finale dei collegamenti fra i dispositivi.

Posizionate il CBR sotto la verticale della molla che sarà stata appesa al sensore di forza a sua volta sistemato sull'asta di sostegno (fig. 10).

VII

Esecuzione delle misure

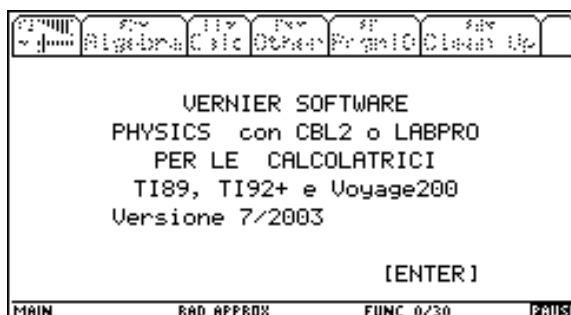
- 1) Al prompt della calcolatrice digitare physics() e premere <ENTER>



- 2) Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare Ti92+ e premere <ENTER>



- 3) La schermata successiva dà informazioni sul software: premere <ENTER>



4) Comparare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda



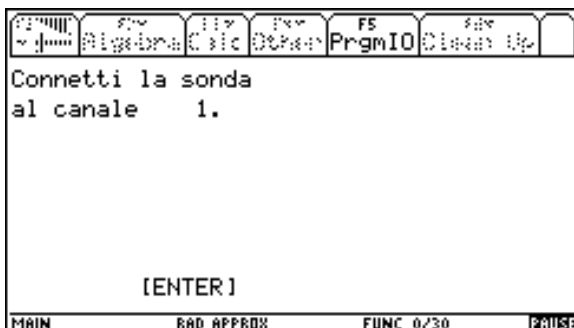
5) Selezionare il numero (2)



6) Impostare la sonda di forza



7) procedere a collegare il sensore in CH1 del CBL qualora non fosse stato già fatto precedentemente



8) Sono previste due configurazioni operative, diverse per portata e sensibilità (in figura sono mostrate le portate), del sensore di forza. Si passa da una portata all'altra con un selettore posto sulla sonda. In questo caso selezionare come in figura



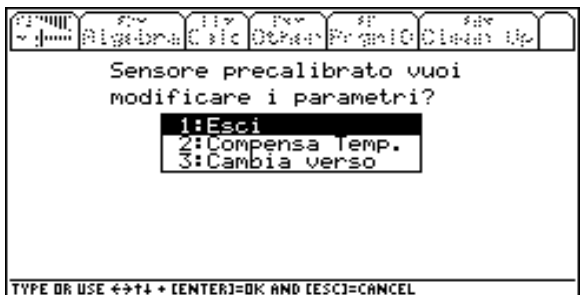
9) Non ricalibrare il sensore a meno che non siano presenti evidenti problemi nel qual caso attenersi alle procedure indicate sul manuale.

10) Selezionare il SONAR

11) premere ESCI

12) Ricompare il menù principale e si procede con l'acquisizione dei dati

In questo esperimento vogliamo graficare gli andamenti in funzione del tempo delle grandezze fisiche: selezioniamo la modalità GRAFICO vs TEMPO.



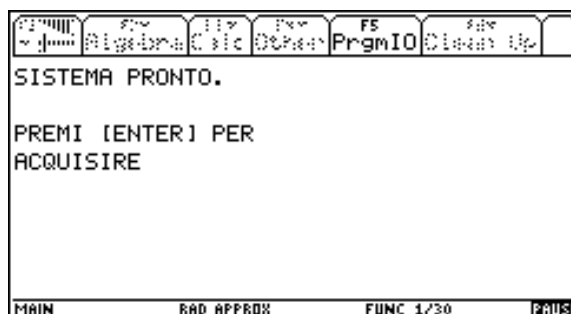
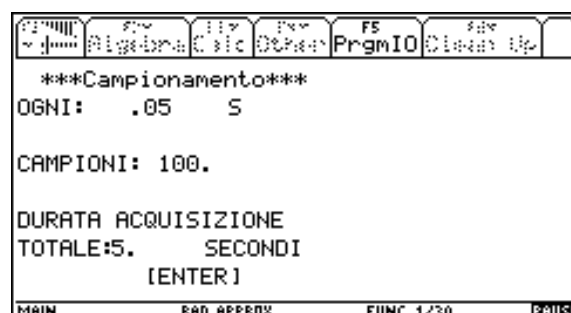
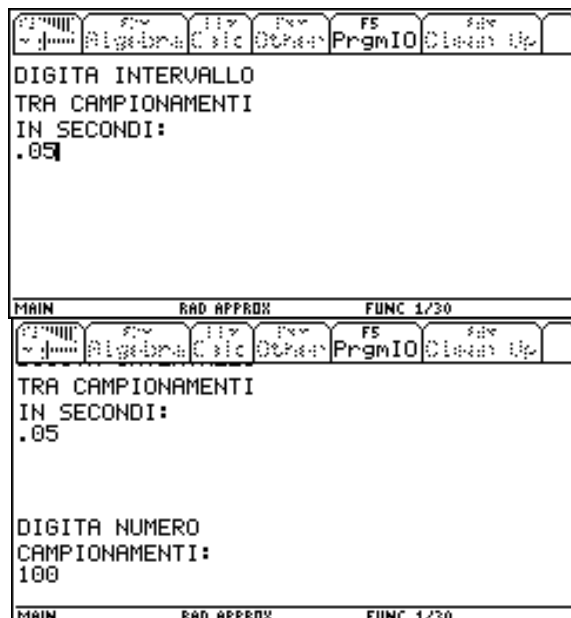
Successivamente viene proposto di fissare l'intervallo di tempo fra le misurazioni ed il numero totale dei dati da acquisire.

Questi valori vanno fissati sulla base di una stima preventiva del periodo dell'oscillazione in modo da avere più acquisizioni durante ogni oscillazione.

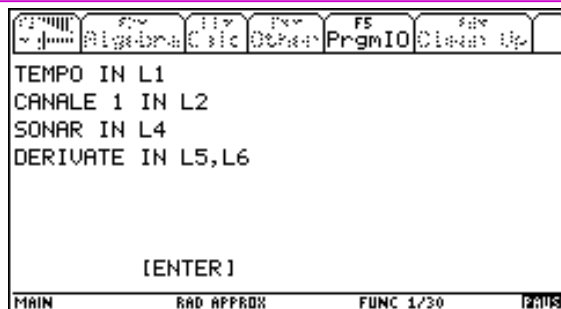
Le due schermate successive offrono un riepilogo delle scelte effettuate ...

... e la possibilità di modificarle. Se tutto è ok premere ENTER

Se tutto è in ordine si procede all'esecuzione dell'esperimento. Spostare la molla dalla posizione di equilibrio e rilasciarla evitando di provocare oscillazioni orizzontali.



Terminata l'acquisizione compare una schermata riassuntiva che informa che la prima colonna (L1) di dati è il tempo; la seconda (L2), la grandezza misurata dal sensore collegato al canale CH1 del CBL, nel nostro caso la forza; la quarta (L4) è il sonar cioè la posizione; la quinta e la sesta (L5) e (L6) contengono la velocità e l'accelerazione.



Con la schermata successiva (SCELTA GRAFICO) si può selezionare la grandezza di cui visualizzare il grafico. Negli esempi in figura sono mostrate la distanza, la velocità e la forza

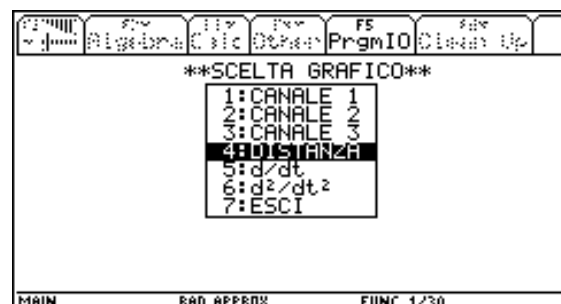


Grafico della distanza dal sonar: si ottiene selezionando la voce **DISTANZA** dalla schermata **SCELTA GRAFICO**

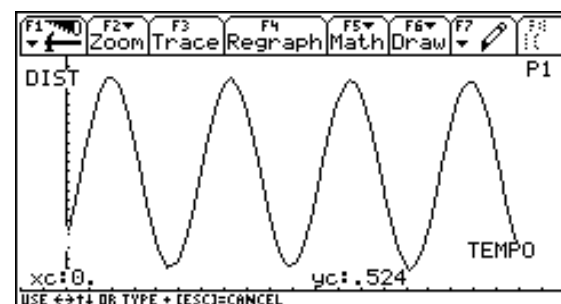


Grafico della velocità: si ottiene selezionando la voce **d/dt** dalla schermata **SCELTA GRAFICO**

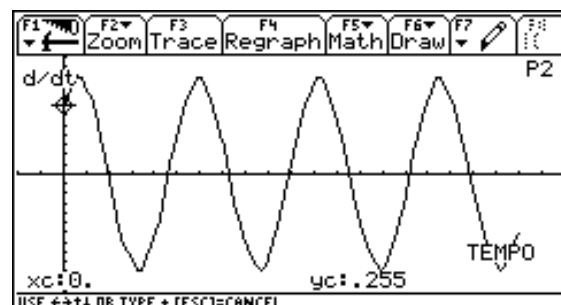
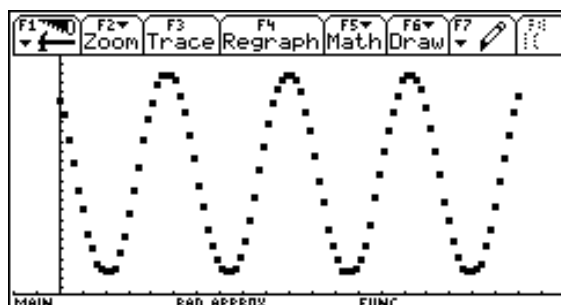


Grafico della forza: si ottiene selezionando il **CANALE 1** della schermata **SCELTA GRAFICO**



Attenzione: per procedere con la relazione dovrai utilizzare i grafici che hai appena ottenuto, quindi non spegnere la calcolatrice e non utilizzarla in alcun altro modo.

VIII Elaborazione dei dati

I dati possono essere letti direttamente dai grafici spostando il cursore col mouse. In tal caso si può assumere come incertezza sulle misure la variazione che si ottiene spostandosi dalla posizione desiderata sul grafico a quella immediatamente vicina.

La prima tabella da produrre è quella con i valori di riferimento, ed è la seguente:

Tabella 1: valori di riferimento

Forza misurata a riposo (molla + massa)	$F_0 =$
Costante elastica	$K =$
Massa del peso	$M =$
Distanza del peso dal CBR a riposo (molla+massa)	$D_0 =$

Nella tabella seguente sono riportati i valori riferiti ai massimi della distanza misurata dal CBR.

Nella colonna T vanno riportate le differenze degli istanti di tempo corrispondenti a due massimi consecutivi.

Tabella 2: valori dei picchi massimi della distanza.

N° picco massimo	t (s)	Δt (s)	T (s)	ΔT (s)	D (m)	ΔD (m)	$D - D_0$ (m)	ΔD_0 (m)
1								
2								
3								
4								

Analoga analisi va condotta per la velocità. Nella tabella seguente vanno riportate oltre alle misure della velocità anche i valori corrispondenti della forza e della posizione, corretti per i rispettivi valori di riposo del sistema massa – molla. Per l'incertezza sulla velocità si può prendere per ogni valore il più grande dei due scarti dai primi vicini. Le ultime due colonne dovrebbero contenere solo valori zero.

Tabella 3: valori dei picchi massimi della velocità.

N° picco massimo	t (s)	Δt (s)	T (s)	ΔT (s)	V (m)	ΔV (m)	$D - D_0$ (m)	$F - F_0$ (N)
1	0,15	0,05	-----	-----	0,36	0,02	-0,004	0,08
2	1,45	0,05	1,3	0,1	0,35	0,04	-0,007	0,10
3	2,80	0,05	1,35	0,1	0,36	0,03	0,009	-0,04
4	4,10	0,05	1,3	0,1	0,36	0,04	0,006	0,01

Infine consideriamo le misure di forza.

Tabella 4: valori dei picchi massimi della forza.

N° picco massimo	t (s)	Δt (s)	T (s)	ΔT (s)	F (N)	V (m/s)	$F - F_0$ (N)	$\Delta F - F_0$ (N)
1								
2								
3								
4								

IX

Guida all'analisi dei dati

Stimare dai grafici i valori della posizione e della forza di equilibrio.

Dai dati della Tabella 2, relativi alla distanza, ricavare gli intervalli di tempo tra i valori massimi della distanza e individuare il periodo.

Dai dati della Tabella 3, relativi alla velocità, ricavare gli intervalli di tempo tra i valori massimi della velocità e individuare il periodo.

Individuare lo sfasamento temporale tra la velocità e la distanza, e tra la forza e la distanza.

Dai dati della Tabella 4 ricavare il periodo della forza.

X

Conclusioni (confronto tra i risultati ottenuti e attesi)

Confrontare i valori misurati della posizione e della forza all'equilibrio con quelli aspettati.

Stabilire dal grafico della posizione se si tratta di moto periodico.

Verificare che la velocità istantanea e la forza variano con lo stesso periodo della posizione.

Confrontare tra loro i periodi della distanza, della velocità e della forza, e verificare che gli sfasamenti temporali tra la velocità e la distanza e la forza e la distanza sono quelli aspettati nel caso di moto armonico.

Infine, utilizzando i dati della tabella 1 ricavare il periodo usando la formula $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ con

$\Delta T = \frac{\Delta\pi}{\pi} + \frac{T}{2}\left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta k}{k}\right)$ e confrontarlo con i periodi ricavati dalle misure di distanza, velocità e forza.

XI

Questionario

1. L'equazione oraria di un moto armonico è la seguente: $s = (6m)\cos\left[\left(\frac{\pi}{16}\text{rad/s}\right)t\right]$.

Determinare l'ampiezza, il periodo e la pulsazione.

2. Esprimere la velocità e l'accelerazione in funzione del tempo del moto armonico dell'esercizio precedente.

3. Un punto materiale si muove di moto armonico con pulsazione $\omega = 4\pi\text{rad/s}$, e ampiezza $R = 10\text{cm}$. Determinare il massimo valore del modulo della velocità e dell'accelerazione.

4. Quando un corpo di massa pari a $0,80\text{kg}$ è attaccato ad una molla verticale, la molla si allunga di 20cm . Quanta massa si deve attaccare alla molla perché essa abbia un periodo di oscillazione di $1,2\text{s}$?

5. Un corpo di massa pari 200g è attaccato ad una molla situata su un piano orizzontale. Se si sposta il corpo di 10cm dalla posizione di equilibrio esso risente di una forza pari a $1,2\text{N}$. Nell'ipotesi di attriti trascurabili, determinare la legge oraria.

SCHEDA PER IL DOCENTE

LA LEGGE DI BOYLE AL LABORATORIO RTL

I

Titolo dell'esperienza

LA LEGGE DI BOYLE AL LABORATORIO RTL

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Finalità dell'esperienza e classi a cui è rivolta

L'esperienza ha lo scopo di verificare la validità della legge di Boyle che descrive il comportamento di un gas perfetto durante una trasformazione isoterma. Si utilizza come gas l'aria, che nelle condizioni di pressione utilizzata è una buona approssimazione di gas perfetto.

L'esperienza è rivolta ad alunni del IV anno del Liceo Scientifico e del V anno del Liceo Classico

III

Obiettivi generali

- Conoscere la legge di Boyle.
- Saper valutare le incertezze sperimentali delle misure dirette e saper ricavare l'incertezza di una grandezza derivata con la formula della propagazione degli errori.
- Saper costruire il grafico dei dati sperimentali con le loro incertezze.
- Saper stimare la media delle pendenze delle rette che passano per i dati sperimentali.

IV Obiettivi specifici

- Saper collegare la sonda al CBL e questo alla calcolatrice.
- Saper utilizzare le funzioni base della calcolatrice e del programma applicativo Physics.

Per una elaborazione più avanzata dei dati, che utilizzi i software applicativi Physics, residente sulla calcolatrice stessa, o Graphical Analysis installato su PC, si aggiungono i seguenti obiettivi specifici:

- Saper utilizzare un foglio elettronico.
- Conoscenza degli elementi di elaborazione statistica dei dati, del concetto di curva di regressione e di metodo dei minimi quadrati.
- Saper collegare la calcolatrice al PC e saper utilizzare il programma Graphical Analysis.

V Materiali e strumenti

1. Sonda di pressione: portata da 0 a 210 kPa (max 4 atm); sensibilità 0,2 kPa; tempo di risposta 100 μ s.
2. Siringa: portata 20 cm³; sensibilità 1 cm³.
3. CBL2, alimentatore per CBL2, calcolatrice Ti92+, cavetto per la connessione del CBL2 alla Ti92+

VI Allestimento dei materiali

- Fissare la siringa alla sonda di pressione (Fig. 1)
- Alimentare il CBL2, se non è provvisto di batterie) con un trasformatore di 6V (Fig. 2)
- Collegare il CBL2 alla calcolatrice Ti92+ con l'apposito cavetto (Fig. 3)
- Allestimento finale (Fig. 4)



Fig. 1 – La siringa fissata alla sonda di pressione.



Fig. 2 – Il CBL2 correttamente alimentato.



Fig. 3 – La connessione fra CBL2 e Ti92+

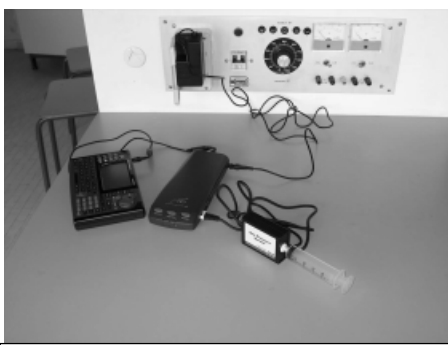
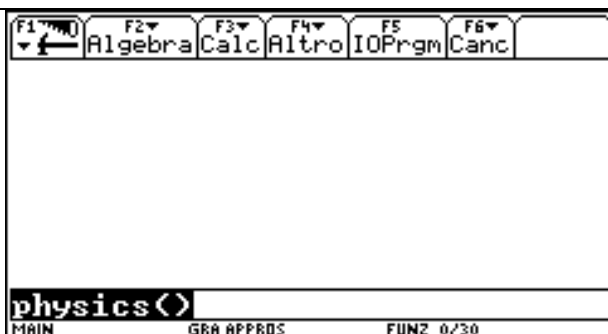


Fig. 4 – Allestimento finale (visibile la connessione fra CBL2 e Ti92+).

VII Esecuzione delle misure

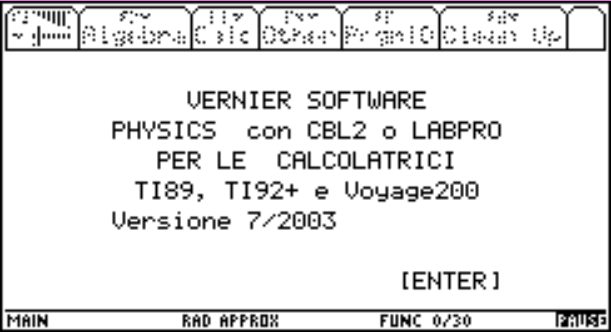



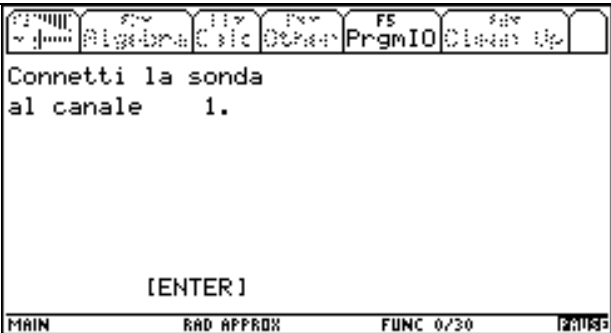
Misureremo il valore del volume dell'aria contenuta nella siringa leggendo direttamente sulla scala graduata della siringa stessa, mentre la sonda eseguirà la misura del valore della pressione. Per utilizzare il software per la grafica e l'analisi dei dati selezioneremo la modalità di acquisizione <ACQUISISCI/DIGITA> che consente di inserire il dato del volume durante l'acquisizione e subito dopo la lettura della pressione da parte del CBL2.


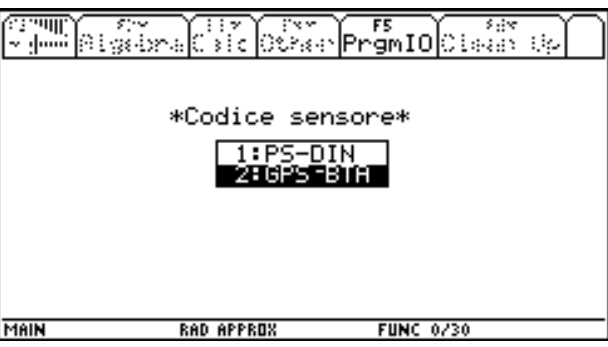



1) Al prompt della calcolatrice digitare physics() e premere <ENTER>

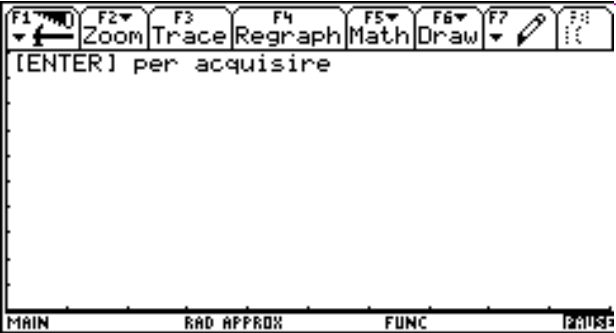
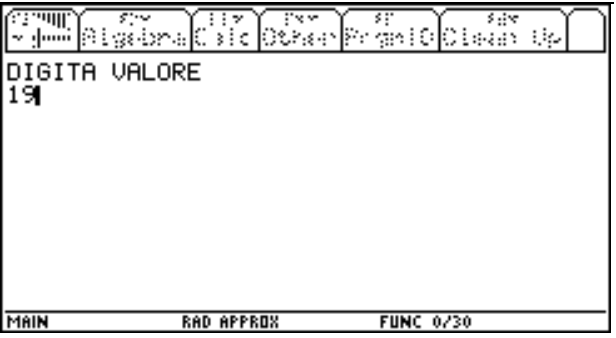

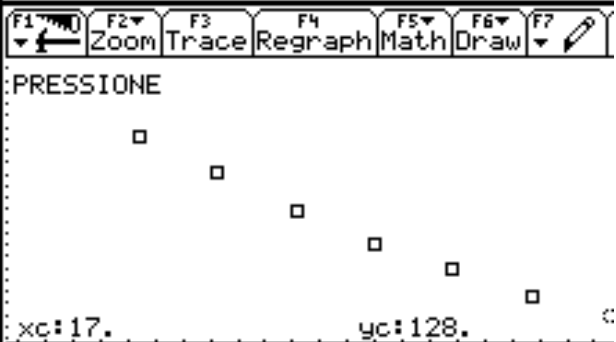



2) Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare Ti92+ e premere <ENTER>



<p>3) La schermata successiva dà informazioni sul software: premere <ENTER></p>	
<p>4) Comparare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda</p>	
<p>5) Selezionare il numero (1) ...</p>	
<p>6) ... ed il tipo di sonda (in questo caso la sonda di pressione)</p>	
<p>7) Controllare che la sonda sia connessa correttamente.</p>	

8) Selezionare l'unità di misura	 <p>*UNITA' PRESSIONE*</p> <p>1:Atm 2:mm Hg 3:kPa</p> <p>MAIN RAD APPROX FUNC 0/30</p>
9) Il codice del sensore è facilmente leggibile sulla sonda stessa	 <p>*Codice sensore*</p> <p>1:PS-DIN 2:GPS-BTA</p> <p>MAIN RAD APPROX FUNC 0/30</p>
10) Non ricalibrare il sensore a meno che non siano presenti evidenti problemi nel qual caso attenersi alle procedure indicate sul manuale.	 <p>Sensore precalibrato vuoi ricalibrare ?</p> <p>1:NO 2:SI</p> <p>TYPE OR USE <=>+<=>+ [ENTER]=OK AND [ESC]=CANCEL</p>
11) Ricompare il menù principale e si procede con l'acquisizione dei dati	 <p>1:PREDISP. SONDE 2:ACQUISIZIONE 3:ANALISI 4:TRIGGERING 5:AZZERAMENTO 6:RECUPERO DATI 7:SALVA/CANCELLA 8:ESCI da PHYSICS</p> <p>*MENU PRINCIPALE*</p> <p>MAIN RAD APPROX FUNC 0/30</p>
12) Selezioniamo la modalità <ACQUISISCI/DIGITA>	 <p>**ACQUISIZIONE**</p> <p>1:MONITORAGGIO 2:GRAFICO vs TEMPO 3:ACQUISISCI/DIGITA 4:TRIGGER (2 sonde) 5:MENU PRINCIPALE</p> <p>MAIN RAD APPROX FUNC 0/30</p>

<p>13) I led del CBL lampeggiano ad indicare che la misura è stata effettuata e vi viene richiesto di premere <ENTER> per memorizzare il dato.</p> <p>NOTA: a questo punto, e cioè prima di premere <ENTER>, la misura è già stata eseguita. Nelle misure successive impostare il nuovo valore della pressione alla schermata precedente a questa.</p>	
<p>14) Immettere il valore del volume</p>	
<p>15) Selezionare <ALTRI DATI> e ripetere le due operazioni precedenti per il numero di misure previste (attenzione a spostare il pistone della siringa sulla nuova posizione prima di premere <ENTER> su questa schermata, vedi nota al punto 13)</p>	
<p>Esempio di misure eseguite partendo da 17 cc e fino a 10 cc</p>	
<p>Prima di uscire da Physics salvare i dati per elaborarli successivamente “a mano” o importando il file dei dati su PC. Se invece si vuole utilizzare lo stesso Physics per eseguire un fit è più comodo non uscire affatto dal programma.</p>	

VIII

Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire durante l'esecuzione dell'esperienza

- È possibile eseguire le misure sia aumentando il volume che diminuendolo.
- Attenzione al fatto che affondando troppo il pistone la pressione aumenta tanto che viene meno la tenuta della siringa: il volume diminuisce, ma la pressione non aumenta più e varia il numero di moli di aria nel volume. Convien, se si lavora diminuendo il volume e si parte da 20 cc, non scendere sotto i 10 cc.
- Attenzione anche al fatto che tenendo troppo saldamente la siringa tra le mani potremmo aumentare la temperatura dell'aria contenuta ed uscire dalla condizione di trasformazione isoterma

IX

Dati e risultati di riferimento

Di seguito è riportato l'esempio di una serie di misure già effettuate.

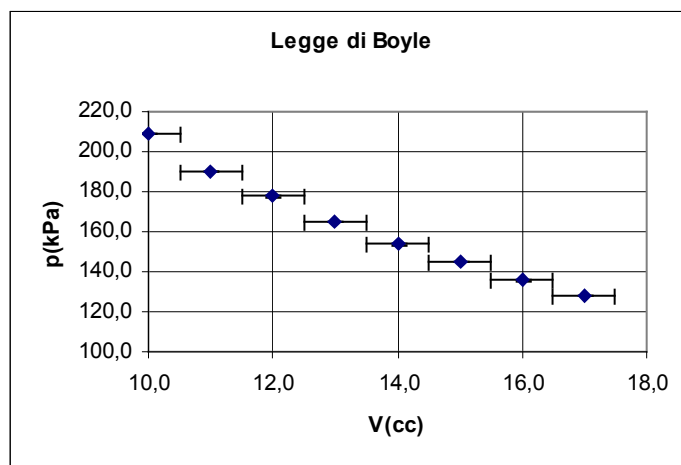
1. I dati come vengono visualizzati sulla calcolatrice:

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Plot	Setup	Cell	Header	Calc	Util	Stat
DATA	U(cc)	p(kPa)				
	c1	c2	c3	c4	c5	
1	17.	128.	2.	114.	9.E-6	
2	16.	136.			0.	
3	15.	145.			0.	
4	14.	154.			0.	
5	13.	165.				
6	12.	178.				
7	11.	190.				
c1=						
MAIN	RAD APPROX		FUNC			

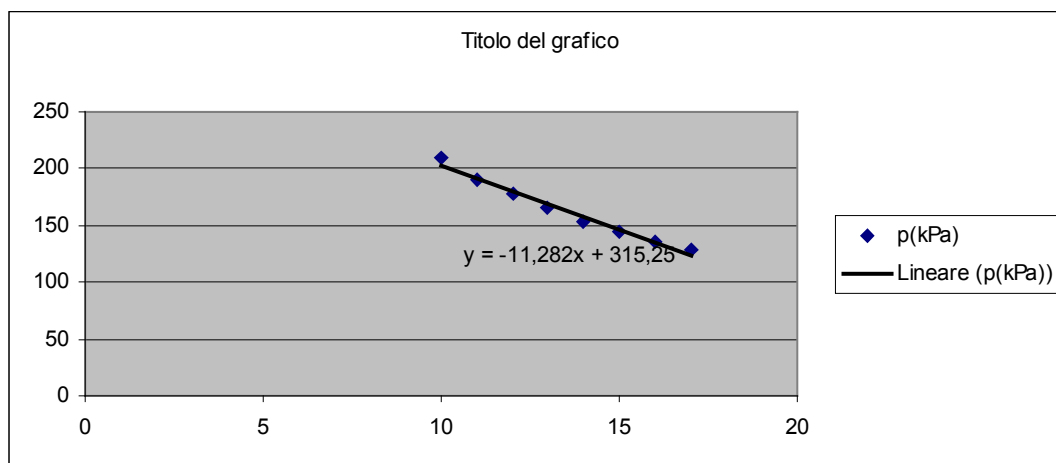
2. Tabella dei dati sperimentali ottenuti dai precedenti. Nell'esempio mostrato l'errore sul volume è stato stimato in 0,5 cc e quello sulla pressione in 0,2 kPa.. L'errore su $K = pV$ è stato calcolato con la legge di propagazione dell'errore.

V(cc)	p(kPa)	$\Delta p/p$	$\Delta V/V$	$V \cdot p$ (J)	$\Delta(V \cdot p)$ (J)
17,0	128,1	0,00156	0,02941	2,2	0,1
16,0	135,6	0,00147	0,03125	2,2	0,1
15,0	144,7	0,00138	0,03333	2,2	0,1
14,0	153,6	0,00130	0,03571	2,1	0,1
13,0	164,9	0,00121	0,03846	2,1	0,1
12,0	177,7	0,00113	0,04167	2,1	0,1
11,0	190,1	0,00105	0,04545	2,1	0,1
10,0	208,8	0,00096	0,05000	2,1	0,1

3. L'elaborazione grafica al foglio elettronico. Le incertezze sperimentali sull'asse y sono troppo piccole per essere visualizzabili.



4. Sempre con il foglio elettronico, è possibile fare il grafico di p in funzione di x, dove $x=1/V$, e calcolare l'equazione della retta che meglio si adatta all'andamento dei dati sperimentali.



X

Esempio di questionario e griglia di valutazione

1. Mostra il calcolo della fortuna dell'errore assoluto sulla grandezza $x = 1/V$
2. Indica il significato fisico del coefficiente angolare della retta di interpolazione del tuo grafico (x,p) .
3. Fai un'analisi dimensionale di x.
4. Il prodotto $k = p V$ entro gli errori sperimentali è costante?
5. A quale curva teorica corrisponde la legge di Boyle? Disegna l'isoterma ottenuta alla temperatura T dell'esperienza, utilizzando il valore di K misurato.
6. Supponendo $t = 20^{\circ}\text{C}$ il valore della temperatura alla quale hai eseguito l'esperienza, calcola il numero di moli di aria contenuti nella siringa.
7. Il numero di moli cambia se facciamo la trasformazione ad una temperatura diversa da T? Giustifica adeguatamente la risposta.

8. Se avessimo eseguito la misura ad una temperatura diversa avremmo ottenuto un andamento grafico (V, p) diverso? E i valori di k ?
9. Calcola, con i dati ricavati dalle risposte precedenti i valori k_1 e k_2 che avremmo dovuto ottenere per trasformazioni isoterme alle temperature $T_1 = 283^\circ\text{K}$ e $T_2 = 303^\circ\text{K}$
10. Disegna sullo stesso grafico le isoterme a temperature T, T_1, T_2 .

GRIGLIA PER LA VALUTAZIONE DELL'ATTIVITA' DI LABORATORIO

Gruppo:

Argomento:

Data:

VALUTAZIONE		N	I	S	B	O	Voto
		0	2	3	4	5	
Attività del gruppo							
	Ripartizione dei compiti efficace. Interazione interna costruttiva. Autonomia.						
	Precauzione nell'utilizzo del materiale						
Relazione							
	Completa (tabelle, eventuali grafici, conclusioni, incertezze sui dati)						
	Unità di misura, calcoli e grafici, cifre significative, notazione scientifica, corretti.						
Conclusioni							
	Conformi a quelle aspettate.						
	Coerenti con le misure ed argomentate. Individuati problemi ed accorgimenti.						
Questionario							
	Percentuale di risposte corrette.						
	Risposte chiare e complete.						
Voto finale							

LEGENDA

- N Nullo
- I Insufficiente
- S Sufficiente
- B Buono
- O Ottimo

NOTA PER LA COMPILAZIONE

I parametri da valutare sono raccolti in 4 gruppi omogenei. Ogni gruppo va valutato da 0 a 10. È possibile valutare separatamente i singoli parametri in modo tale che il totale del gruppo vada da 0 a 10. Il voto finale è la media dei voti dei gruppi di parametri.

XI

Bibliografia e siti Web di interesse

- Federico Tibone, Giovanni Pezzi LA FISICA SECONDO IL PSSC Ed. Zanichelli
- U. Amaldi FISICA: IDEE ED ESPERIMENTI dal pendolo ai quark Ed. Zanichelli
- www.ba.infn.it
- www.grc.nasa.gov (animazione)
- http://chemistry2.csudh.edu/lecture_help/boyleslaw.html
- <http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

Sui sistemi Real Time Laboratory (RTL), in particolare con un sistema: sensore-CBL-calcolatrice grafica

- G. Marucci, L. Catalano, V. Filippeschi e H. Coombat (a cura di), “Le calcolatrici grafiche ed i CBL nel laboratorio di Fisica”, *Quaderno del Ministero Pubblica Istruzione* in collaborazione con la Texas Instruments, Pitagora Editrice, Bologna 1998.
- M. Impedovo, “Matematica: insegnamento e computer algebra”, *Springer – Verlag Italia*, Milano 1999.
- J. Gastineau, K. Appel, C. Bakken, R. Sorensen, D. Vernier, “Physics with Calculators”, *Vernier Software & Technology*, Beaverton (Oregon, USA) 2000.
- B. Pecori, G. Torzo, G. Pezzi, O. Foà, A. Rambelli, M. Rafanelli, M. R. Rizzo, “L’ online ‘portabilE nell’insegnamento della fisica”, Atti del XXXVIII Congresso Nazionale AIF Ferrara, 1999, *La Fisica nella scuola - Supplemento*, gennaio – marzo 2001.
- AAVV, “Tecnologie informatiche nel laboratorio didattico”, Atti del XL Congresso Nazionale AIF, Senigallia, 2001, *La Fisica nella scuola – Supplemento*, aprile-giugno 2003.
- www.cartesionline.it, materiale didattico per l’insegnamento della matematica, della fisica e delle scienze.
- www.adt.it, Associazione per la Didattica con le Tecnologie (ADT)
- www.t3ww.org, Teachers Teaching with Technology, associazione internazionale di cui ADT è membro (in inglese).
- <http://www.fisica.uniud.it/irdis/index.htm>, IRDIS è un progetto finanziato nell’ambito della legge 10.01.2000 n.6 (Iniziative per la diffusione della cultura scientifica), finalizzato al potenziamento e ottimizzazione delle attività sperimentali nella didattica delle scienze con l’uso delle nuove tecnologie.

SCHEDA PER LO STUDENTE

LA LEGGE DI BOYLE AL LABORATORIO RTL

I

Titolo dell'esperienza

LA LEGGE DI BOYLE AL LABORATORIO RTL

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Descrizione generale dell'esperienza

L'esperienza ha lo scopo di verificare la Legge di Boyle che è la relazione che lega i valori della pressione e del volume di un gas ideale in una trasformazione isoterma. In altri termini, se viene cambiato il valore del volume occupato da un gas facendo in modo che il gas non fuoriesca dal suo contenitore e che non cambi la temperatura del gas stesso (basta per questo che sia in buon contatto termico con l'aria dell'ambiente esterno), si osserva che anche la sua pressione cambia.

III

Breve descrizione del fenomeno fisico

La relazione che lega pressione e volume è $pV = k$ con k una costante che, utilizzando l'equazione di stato dei gas perfetti, risulta essere data da $k = nRT$ essendo n è il numero di moli contenuto nel volume di gas, $R=8,315 \text{ J/(mol K)}$ e T la temperatura (alla quale eseguiamo l'esperienza) espressa in gradi Kelvin. La legge di Boyle $pV = k$ esprime il fatto che i valori di pressione e volume sono inversamente proporzionali.

IV

Materiale occorrente e istruzioni per l'assemblaggio

1. Sonda di pressione: portata da 0 a 210 kPa (max 4 atm); sensibilità 0,2 kPa; tempo di risposta 100 μ s.
 2. Siringa: portata 20 cc; sensibilità 1 cc.
 3. CBL2, alimentatore per CBL2, calcolatrice Ti92+, cavetto per la connessione del BL2 alla Ti92+
- Fissa la siringa alla sonda di pressione (Fig. 1)
 - Alimenta il CBL2 (se non è provvisto di batterie) con un trasformatore di 6V (Fig. 2)
 - Collega il CBL2 alla calcolatrice Ti92+ con l'apposito cavetto (Fig. 3)
 - La situazione finale, con l'esperimento allestito e pronto per l'esecuzione delle misure, è mostrata in Fig. 4.



Fig. 1 – La siringa fissata alla sonda di pressione



Fig. 2 – Il CBL2 correttamente alimentato



Fig. 3 –La connessione fra CBL2 e Ti92+

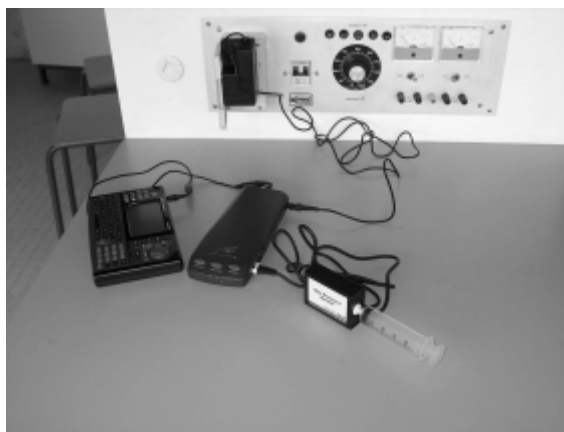


Fig. 4 – L'allestimento finale

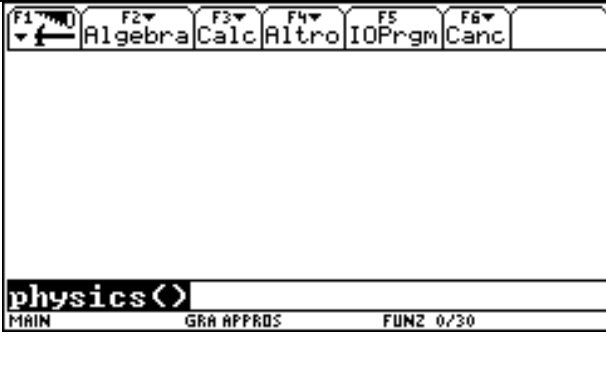

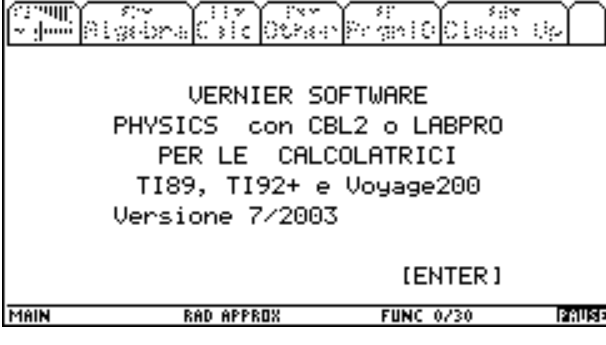
V






Descrizione generale del procedimento di misura e grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

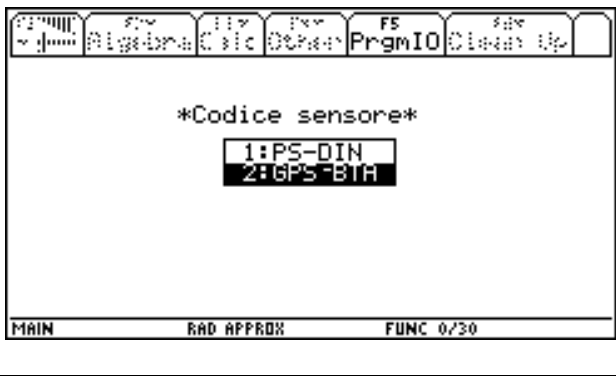



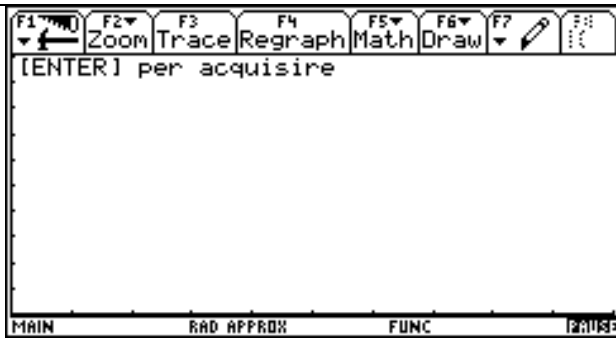
Misureremo il valore del volume dell'aria contenuta nella siringa leggendolo direttamente sulla scala graduata della siringa stessa, mentre la sonda eseguirà la misura del valore della pressione. Per utilizzare il software per la grafica e l'analisi dei dati selezioneremo la modalità di acquisizione <ACQUISISCI/DIGITA> che consente di inserire il dato del volume durante l'acquisizione e subito dopo la lettura della pressione da parte del CBL2.

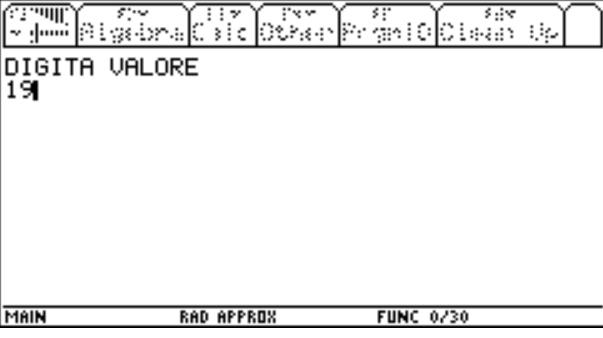

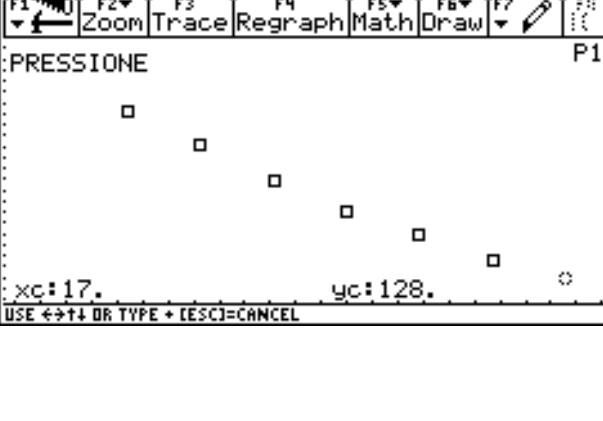
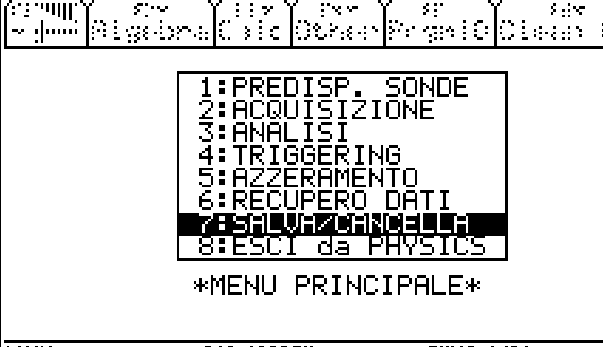
Accorgimenti

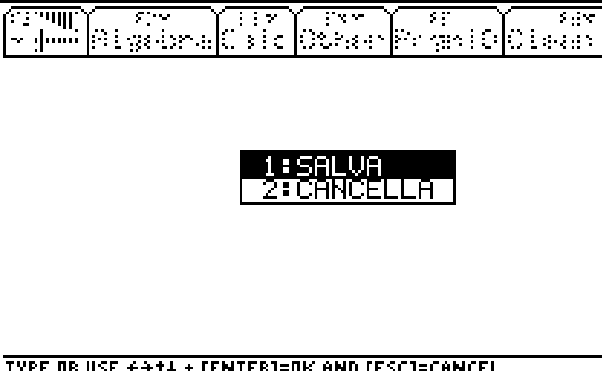

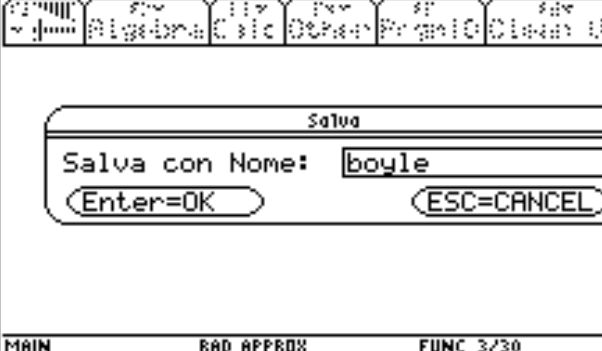

- E' possibile eseguire le misure sia aumentando il volume che diminuendolo.
- Attenzione al fatto che affondando troppo il pistone la pressione aumenta tanto che viene meno la tenuta della siringa: il volume diminuisce, ma la pressione non aumenta più e varia il numero di moli di aria nel volume. Conviene, se si lavora diminuendo il volume e si parte da 20 cc, non scendere sotto i 10 cc.
- Attenzione anche al fatto che tenendo troppo saldamente la siringa tra le mani potresti aumentare la temperatura dell'aria contenuta ed uscire dalla condizione di trasformazione isoterma

<p>1) Al prompt della calcolatrice digita physics() e premi <ENTER></p>	
<p>2) Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: seleziona TI92+ e premi <ENTER></p>	
<p>3) La schermata successiva dà informazioni sul software: premi <ENTER></p>	

4) Compare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda	
5) Seleziona il numero (1) ...	
6) ... ed il tipo di sonda	
7) Controlla che la sonda sia connessa correttamente.	
8) Seleziona l'unità di misura	

<p>9) Il codice del sensore è facilmente leggibile sulla sonda stessa</p>	
<p>10) Non ricalibrare il sensore a meno che non siano presenti evidenti problemi nel qual caso rivolgiti all'insegnante.</p>	
<p>11) Ricompare il menù principale e si procede con l'acquisizione dei dati</p>	
<p>12) Seleziona la modalità <ACQUISISCI/DIGITA></p>	
<p>13) I led del CBL lampeggiano ad indicare che la misura è stata effettuata e ti viene richiesto di premere <ENTER> per memorizzare il dato. NOTA: a questo punto, e cioè prima di premere <ENTER>, la misura è già stata eseguita. Nelle misure successive imposta il nuovo valore della pressione alla schermata precedente a questa.</p>	

<p>14) Immetti il valore del volume</p>	 <p>The calculator screen displays 'DIGITA VALORE' at the top and the number '19' below it. The top menu bar includes icons for various functions like Algebra, Calc, Other, Program, and Clean Up. The bottom status bar shows 'MAIN', 'RAD APPROX', and 'FUNC 0/30'.</p>
<p>15) Seleziona <ALTRI DATI> e ripeti le due operazioni precedenti per il numero di misure previste (attenzione a spostare il pistone della siringa sulla nuova posizione prima di premere <ENTER> su questa schermata, vedi nota al punto 13)</p>	 <p>The calculator screen shows a menu titled '**ACQUISIZIONE**'. The options are: '1:ALTRI DATI' (highlighted), '2:STOP: GRAFICO', and '3:PAUSA'. Below the menu, it says 'TYPE OR USE <F1> + [ENTER]=OK AND [ESC]=CANCEL'.</p>
<p>16) Quando hai eseguito un congruo numero di misure (almeno 6 o 7) seleziona STOP:GRAFICO e ti compare il grafico del piano (V,p) con i valori delle misure, come nell'esempio qui a fianco. Utilizzando il MOUSE della calcolatrice il cursore si sposta da un dato al successivo. Ogni volta sullo schermo compaiono i valori di xc, il volume, e yc, la pressione, che puoi così leggere e trascrivere nella tabella dei dati. Premendo ENTER si torna al MENU' PRINCIPALE</p>	 <p>The calculator screen displays a graph titled 'PRESSIONE' with 'P1' in the top right corner. The graph shows several data points (squares) forming a downward-sloping curve. At the bottom, the coordinates are shown as 'xc:17.' and 'yc:128.'. Below the graph, it says 'USE <F1> OR TYPE + [ESC]=CANCEL'.</p>
<p>Prima di uscire da physics salva i dati per elaborarli successivamente.</p>	 <p>The calculator screen shows a menu with the following options: '1:PREDISP. SONDE', '2:ACQUISIZIONE', '3:ANALISI', '4:TRIGGERING', '5:AZZERAMENTO', '6:RECUPERO DATI', '7:SHOW/CANCEL/H', and '8:ESCI da PHYSICS'. The option '7:SHOW/CANCEL/H' is highlighted. Below the menu, it says '*MENU PRINCIPALE*'. The bottom status bar shows 'MAIN', 'RAD APPROX', and 'FUNC 1/30'.</p>

<p>Coneferma che vuoi salvare i dati</p>	
<p>Seleziona ALTRO per salvare un nuovo file di dati.</p>	
<p>Inserisci il nome del file e premi due volte ENTER</p>	
<p>Seleziona SI per proteggere il file da cancellazioni involontarie</p>	

Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

p = pressione
 V = volume
 $K = p V = n R T = \text{costante}$
 Δp = incertezza su p
 ΔV = incertezza su V
 ΔK = incertezza su K
 $x = 1/V$
 Δx = incertezza su x

Errore relativo sulla grandezza $K = p \cdot V$: $\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta V}{V}$

Errore relativo sulla grandezza $x = 1/V$: $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta v}{v}$

Dalle caratteristiche degli strumenti ricava i valori delle incertezze di misura

$$\Delta p =$$
$$\Delta V \equiv$$

Riempi la tabella seguente indicando nelle parentesi le unità di misura in cui le grandezze sono espresse

[illegible]

Si possono costruire i seguenti grafici:

- (V, p) dove riportiamo in ascissa $V \text{ (m}^3\text{)}$ e in ordinata $p \text{ (in Pa)}$
- (x, p) dove $x \text{ (m}^{-3}\text{)} = 1/V$ è riportato in ascissa e $p \text{ (Pa)}$ in ordinata

VII

Guida all'analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Indica il procedimento di calcolo delle formule degli errori relativi e di quelli assoluti.
Il grafico al punto a) non è un grafico lineare: qual è la curva che meglio approssima i dati sperimentali?
Il grafico al punto b) è lineare: trova l'equazione della retta che meglio approssima l'andamento dei dati sperimentali.

VIII

Indicazioni per la relazione

Nella relazione dovrebbero essere trattati i seguenti punti

1. Descrizione del dispositivo sperimentale e degli strumenti di misura utilizzati
2. Descrizione dell'esperienza effettuata
(Descrivere come si è proceduto per effettuare la misura e gli accorgimenti usati).
3. Riepilogo dei dati sperimentali in tabella
4. Grafico e deduzione da esso del modello matematico che descrive il fenomeno analizzato
5. Conclusioni: confronto tra le conclusioni dell'esperienza e le previsioni teoriche.

IX

Indicazioni per il confronto tra i risultati ottenuti e quelli aspettati

Dalla lettura dei grafici prodotti si può ricavare la relazione esistente tra p e V . Tale relazione, entro gli errori di misura, è in accordo con i dati sperimentali?
In caso affermativo, indicare il valore della costante k derivante dalle misure effettuate.
In caso negativo, suggerire i motivi che a tuo avviso hanno condotto a tale discrepanza.

X

Questionario

1. Mostra il calcolo della fortuna dell'errore assoluto sulla grandezza $x = 1/V$
2. Indica il significato fisico del coefficiente angolare della retta di interpolazione del tuo grafico (x, p) .
3. Fai un'analisi dimensionale di x .
4. Il prodotto $k = p V$ entro gli errori sperimentali è costante?
5. A quale curva teorica corrisponde la legge di Boyle? Disegna l'isoterma ottenuta alla temperatura T dell'esperienza, utilizzando il valore di K misurato.
6. Supponendo $t = 20^\circ\text{C}$ il valore della temperatura alla quale hai eseguito l'esperienza, calcola il numero di moli di aria contenuti nella siringa.
7. Il numero di moli cambia se facciamo la trasformazione ad una temperatura diversa da T ? Giustifica adeguatamente la risposta.
8. Se avessimo eseguito la misura ad una temperatura diversa avremmo ottenuto un andamento grafico (V, p) diverso? E i valori di k ?
9. Calcola, con i dati ricavati dalle risposte precedenti i valori k_1 e k_2 che avremmo dovuto ottenere per trasformazioni isoterme alle temperature $T_1 = 283^\circ\text{K}$ e $T_2 = 303^\circ\text{K}$.
10. Disegna sullo stesso grafico le isoterme a temperature T, T_1, T_2

SCHEDA PER IL DOCENTE

CARICA E SCARICA DI UN CONDENSATORE AL LABORATORIO RTL

I

Titolo dell'esperienza

CARICA E SCARICA DI UN CONDENSATORE AL LABORATORIO RTL

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del **L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)**

I

Indicazioni generali

Il laboratorio RTL offre la possibilità di seguire l'evoluzione temporale di una grandezza fisica e di ottenerne il grafico anche quando la descrizione matematica risulterebbe difficile da proporre. In questo caso sono studiati due fenomeni che si descrivono col modello esponenziale. Se invece le competenze matematiche dei ragazzi lo consentono, l'esperienza si presta ad essere utilizzata anche come esercitazione di studio di funzioni.

II

Descrizione del fenomeno fisico

L'esperienza consiste nel misurare la variazione di tensione ai capi di un condensatore di capacità C inserito in un circuito con alimentazione in tensione continua ΔV_A e resistenza R . Come è noto, a circuito chiuso, le armature del condensatore si caricano fino a che fra di esse non si stabilisce una differenza di potenziale (ddp) opposta a quella dell'alimentazione. A regime nel circuito non circola corrente, la ddp del condensatore è costante e sulle armature del condensatore si è depositata una carica totale $Q = C \cdot \Delta V_A$. In questa esperienza studiamo però le due fasi di carica e di scarica del condensatore.

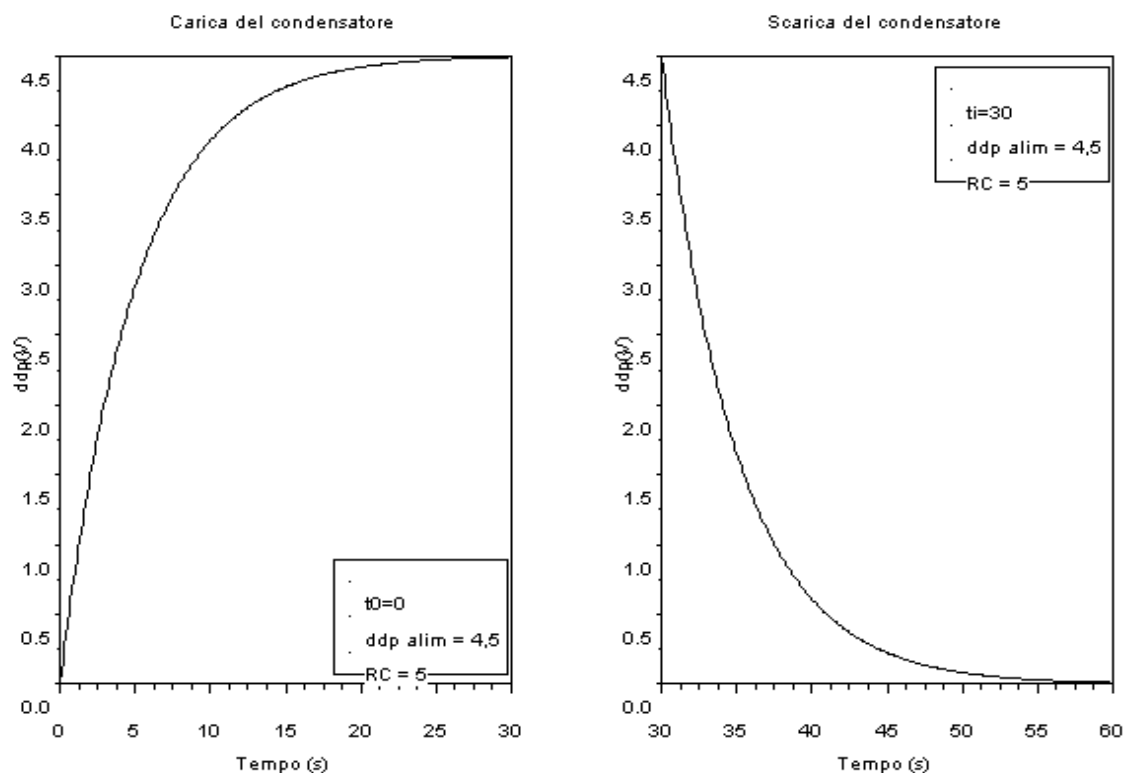
1. **Fase di carica:** il condensatore è inizialmente scarico, il circuito aperto; all'istante $t_0 = 0$ il circuito viene chiuso, si stabilisce una corrente elettrica inizialmente pari a $\Delta V_A / R$ via via decrescente, e la ddp ai capi del condensatore comincia ad aumentare. Il modello matematico prevede un comportamento esponenziale asintotico con un tempo caratteristico regolato dal prodotto dei valori RC , con legge di equazione:

$$\Delta V = \Delta V_A [1 - \exp(-\frac{t}{RC})]. \quad (\text{Eq.1})$$

2. **Fase di scarica:** una volta che il condensatore è carico si apre il circuito, si elimina l'alimentazione e si richiude il circuito all'istante t_i . Il condensatore si scarica con tempo di nuovo caratterizzato dal prodotto RC e con la legge di equazione:

$$\Delta V = \Delta V_A \exp\left(-\frac{t-t_i}{RC}\right). \quad (\text{Eq.2})$$

Le figure qui sotto mostrano i grafici che si ottengono dalle equazioni Eq.1 e Eq.2 e rappresentano l'andamento teorico del fenomeno.



III

Prerequisiti e classi a cui è rivolta l'esperienza

L'esperienza è indicata per alunni della 5^o classe delle Scuole Secondarie Superiori.

È necessario che gli studenti conoscano:

- i concetti base delle grandezze differenza di potenziale e corrente elettrica,
- gli strumenti e le modalità operative per misurare una differenza di potenziale.
- le caratteristiche generali di resistenza e capacità elettriche.
- l'equazione ed il grafico cartesiano della funzione esponenziale di base e delle funzioni che da essa si ottengono per trasformazioni affini.

IV

Obiettivi generali

- Saper raffrontare le nozioni teoriche astratte con la loro realizzazione concreta in laboratorio, individuando i limiti di applicabilità delle prime e le soluzioni tecnologiche che la seconda comporta. In particolare:
 - Riconoscere gli elementi circuitali fondamentali in quanto oggetti concreti
 - Saper realizzare un circuito elettrico con resistenza, condensatore e batteria
- Approfondire il rapporto fra fenomeno fisico reale e modello fisico-matematico utilizzato per descriverlo, con particolare riguardo al modello esponenziale.

V

Obiettivi specifici

1. Ottenere il grafico della tensione ai capi di un condensatore nelle fasi di carica e di scarica del condensatore.
2. Ricavare dall'analisi del grafico il valore della costante di tempo del circuito RC.

VI

Materiali occorrenti

- 1 Resistenza di valore dell'ordine di $10\text{ k}\Omega$
- 1 Condensatore di capacità dell'ordine di $500\text{ }\mu\text{F}$
- 1 Batteria (per esempio una pila da $4,5\text{ V}$)
- CBL (fig. 1)
- Calcolatrice (fig. 2)
- Sonda di tensione (fig. 3): portata $\pm 10\text{ V}$, sensibilità $0,02\text{ V}$

Foto dei vari materiali e del loro assemblaggio

fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4



fig. 5



fig. 6



fig. 7



fig. 8



VII Accorgimenti

1. Utilizzare una resistenza ed un condensatore tali che il prodotto RC sia dell'ordine di qualche secondo, non troppo piccolo da rendere impossibile seguire la carica nelle fasi iniziali, né troppo grande da richiedere un'attesa eccessiva perchè la carica raggiunga un valore ragionevolmente vicino al limite teorico.
2. Nella scelta del numero delle misure da acquisire e dell'intervallo di tempo Δt fra una misura e l'altra occorre tener presente che il Δt deve essere: 1) abbastanza piccolo da consentire di avere un numero adeguato di dati durante le fasi iniziali della carica e della scarica, quelle in cui l'evoluzione temporale è più rapida; 2) non troppo piccolo perchè altrimenti la durata complessiva dell'acquisizione diventa inutilmente lunga e si rischia di raccogliere più dati di quanti ne possa immagazzinare la memoria della calcolatrice. Il modo di regolarsi è il seguente: noto $T=RC$, la durata complessiva può essere pari a alcune volte il valore di T (diciamo 6 volte) in modo da avere un quadro abbastanza completo dell'evoluzione del fenomeno, e l'intervallo può essere una frazione di T scelta in modo da avere alcune decine di misure in un tempo T (diciamo 50). Ovviamente sono numeri indicativi. Nel nostro caso $T=5$ s, da cui $\Delta t=0,1$ s.
3. Controllare che il valore ΔV_A della ddp della batteria corrisponda a quello nominale. Nell'esempio riportato di seguito è un po' inferiore.
4. Attenzione che i condensatori elettrolitici, per ragioni costruttive, hanno una polarizzazione che va rispettata altrimenti vengono danneggiati

VIII Allestimento della prova

Alimentate il CBL col suo trasformatore (fig. 4) o con le sue batterie. Collegate: il CBL alla calcolatrice tramite l'apposito cavetto (fig. 5); il sensore di tensione al canale CH1 del CBL (fig. 6). La fig. 7 mostra la configurazione finale dei collegamenti fra i dispositivi. Realizzare il circuito collegando in serie la resistenza ed il condensatore (fig. 8). I due puntali della sonda vanno collegati ai due capi del condensatore

IX Esecuzione delle misure

Al prompt della calcolatrice digitare physics() e premere <ENTER>



Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare Ti92+ e premere <ENTER>



Compare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda



```

  F1 F2 F3 F4 F5 F6
  [F1] [F2] [F3] [F4] [F5] [F6]
  Algebra Calc Other Prgram Clear Up

  **NUMERO DI SONDE**
  1: UNO
  2: DUE
  3: TRE
  4: MENU PRINCIPALE

  TYPE OR USE ←+1 + [ENTER]=OK AND [ESC]=CANCEL

```

1:C. MAGNETICO
 2:TENSIONE ±10V
 3:SONDA 0-50
 4:TENSIONE diff.
 5:CORRENTE
 6:TEMPERATURA
 7:TERMOCOPIA
 8:ALTRO

SCELTA SONDE

MAIN RAD APPROX FUNC 25/30

Connetti la sonda
al canale 1.

[ENTER]

NON ricalibrare il sensore.



Ricompare il menù principale e si procede con l'acquisizione dei dati



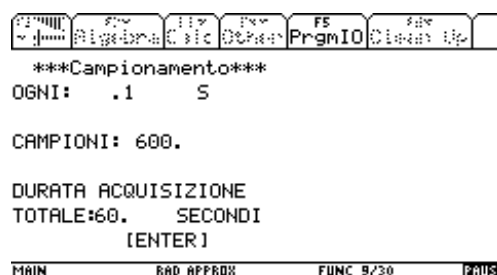
In questo esperimento vogliamo gli andamenti in funzione del tempo delle grandezze fisiche: selezioniamo la modalità GRAFICO vs TEMPO.



Successivamente viene proposto di fissare l'intervallo di tempo fra le misurazioni ed il numero totale dei dati da acquisire. Questi valori vanno fissati sulla base di una stima preliminare del prodotto RC. Nel nostro caso $RC = 5\text{ s}$ e quindi è sufficiente misurare per 30 secondi (circa sei volte RC) la salita della tensione durante la fase di carica, e per successivi altri 30 la discesa nella fase di scarica. (vedi il punto 2 della sezione accorgimenti)

Se tutto è ok premere ENTER

I dati possono essere visualizzati durante l'acquisizione. Se si sceglie questa opzione le schermate successive richiedono i valori minimo e massimo e la suddivisione della scala dell'asse delle ordinate.



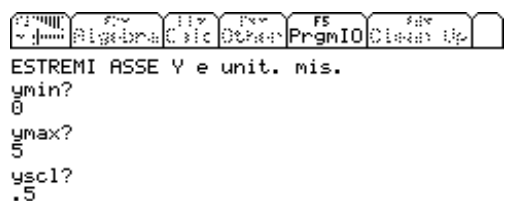
Se tutto è in ordine si procede all'esecuzione dell'esperimento.

A fianco è mostrato l'andamento della differenza di potenziale ai capi del condensatore sia durante la fase di carica sia durante quella, immediatamente successiva, di scarica.

Terminata l'acquisizione compare una schermata riassuntiva che informa che la prima colonna (L1) di dati è il tempo, la seconda (L2) la grandezza misurata dal sensore collegato al canale CH1 del CBL, nel nostro caso la tensione.

Con la schermata successiva si può selezionare la grandezza di cui visualizzare il grafico. Ovviamente nel nostro caso si tratta della grandezza ottenuta sul canale 1

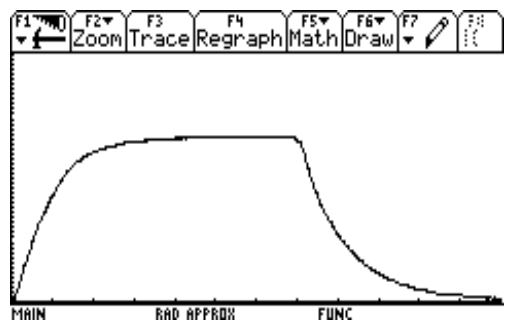
Si riottiene il grafico delle curve di carica e di scarica già apparso durante l'acquisizione. Spostandosi col mouse lungo la curva si possono leggere i dati misurati e procedere alla loro elaborazione.



MAIN	BAD APPROX	FUNC 9/30
------	------------	-----------



MAIN	BAD APPROX	FUNC 9/30	PAUSE
------	------------	-----------	-------



Algebra	Calc	Other	Prgram	Close Up	
---------	------	-------	--------	----------	--

TEMPO IN L1
DATI IN L2

MAIN	BAD APPROX	FUNC 9/30	PAUSE
------	------------	-----------	-------



TYPE OR USE ←→↑↓ + [ENTER]=OK AND [ESC]=CANCEL

X Elaborazione dei dati

I dati possono essere letti direttamente dai grafici spostando il cursore col mouse, in questo modo si evitano operazioni che richiedono una maggiore familiarità con la calcolatrice e si sfrutta la leggibilità ed il carattere intuitivo dei grafici. In tal caso si può assumere come incertezza sulle misure la variazione che si ottiene spostandosi dalla posizione desiderata sul grafico a quella immediatamente vicina.

Dai grafici è possibile:

1. Leggere la ddp ai capi del condensatore carico ΔV_M (da confrontare con la ddp di alimentazione al cui valore dovrebbe tendere asintoticamente)
2. individuare il punto del grafico che ha per ordinata il valore teorico $\Delta V_* = \Delta V_M (1 - \frac{1}{e})$ (questo valore va calcolato a parte ed è il valore teorico all'istante $T = RC$)
3. risalire da ΔV_* all'istante di tempo corrispondente t_* (da confrontare con il valore $T = RC$)
4. l'istante di inizio della fase di scarica t_i
5. il valore della ddp all'inizio della scarica ΔV_i (circa pari a ΔV_M)
6. il punto del grafico di ordinata $\Delta V_{**} = 1/e \Delta V_i$, nel tratto di curva che corrisponde alla fase di scarica, e da questo il t_{**} corrispondente
7. $\Delta t_{**} = t_{**} - t_i$ da cui ancora $T = RC$

Riportiamo a titolo di esempio i dati relativi al caso che compare nelle figure precedenti.

Tabella 1: valori di riferimento

Resistenza elettrica	$R = 10 \text{ k}\Omega \pm 5\%$
Capacità	$C = 500 \text{ }\mu\text{F} \pm 15\%$
ddp di alimentazione	$\Delta V = (3,35 \pm 0,01) \text{ V}$
Tempo caratteristico RC	$T = (5 \pm 1) \text{ s}$

Tabella 2: valori caratteristici (è sottintesa l'incertezza di una unità sull'ultima cifra)

ΔV_M (V)	ΔV_* (V)	t_* (s)	t_i (s)	ΔV_i (V)	ΔV_{**} (V)	t_{**} (s)	Δt_{**} (s)
3,33	2,09	4,8	34,7	3,33	1,21	40,7	6,0

Entro l'incertezza del 20% le leggi sono verificate.

XI Conclusioni (confronto tra risultati ottenuti e aspettati)

(in blue, grassetto e sottolineato le risposte attese)

- a) Quali elementi devi prendere in considerazione per decidere se il modello teorico è applicabile ai dati da te ottenuti?

Il grafico dei dati con quello combinato delle funzioni Eq.1 e Eq.2, almeno per gli aspetti qualitativi (numero degli zeri, degli eventuali massimi e minimi, dei tratti crescenti o decrescenti delle due funzioni). I valori dei parametri: ΔV_M con ΔV_A , T con t_* e Δt_{**} .

- b) Confronta qualitativamente il grafico dei dati sperimentali che hai ottenuto con i due grafici combinati insieme di Eq.1 e Eq.2.

Ci si aspetta che siano confrontati gli aspetti caratteristici dei due grafici. La precisione e la quantità degli elementi messi a confronto (zeri, asintoti, flessi concavità, tratti di monotonia, discontinuità della derivata) dipende dallo stato di progresso del programma di Matematica effettivamente svolto dai ragazzi.

c) Confronta i valori di T , t_* e Δt_{**}

Affermare se sono o no consistenti, considerando appropriatamente le rispettive incertezze

d) Confronta i valori di ΔV_A e ΔV_M

Affermare se sono o no consistenti, considerando appropriatamente le rispettive incertezze

e) In definitiva, i risultati da te ottenuti corrispondono a quelli aspettati sulla base di Eq.1 e Eq.2? Giustifica la tua risposta.

Sì o no, sulla base del confronto di tutti e tre gli elementi sopra considerati

f) Se hai ottenuto risultati del tutto inaspettati, indica qual è stato, secondo te, il problema e quali accorgimenti prenderesti nel caso tu ripetessi da capo l'esperimento.

Da valutare quanto risultino pertinenti e puntuali, ovvero non generici, i tentativi di individuare il problema e la sua soluzione. Non necessariamente deve essere la risposta giusta. Basta che sia una proposta ragionevole che segua dall'analisi di ciò che è realmente avvenuto e non una soluzione astratta o non argomentata.

XII Questionario di verifica

1. Considera la funzione matematica così definita: $y = \begin{cases} a \cdot (1 - e^{-bx}) & \text{se } 0 < x < x_* \\ a \cdot e^{-b(x-x_*)} & \text{se } x > x_* \end{cases}$.

Essa è equivalente all'insieme delle equazioni date in Eq.1 e Eq.2 se fra i simboli utilizzati vale la seguente corrispondenza (completa la tabella)

y	x	x_*	a	b	e
ΔV	t	t_i	ΔV_M	RC	e

2. Data la funzione definita alla domanda precedente, quali valori numerici devono avere a, b e x_* perché l'equazione corrisponda al grafico dei dati sperimentali?

Utilizzando i dati della scheda studenti le risposte attese sarebbero:

a = ...4,5..... ; b = 0,2..... x_* =30.....

3. Se sostituissi solo la resistenza da 10 k Ω con una da 5 k Ω cosa accadrebbe:

I. Alla ddp massima del condensatore ΔV_M ?

Resterebbe uguale. Il valore asintotico viene raggiunto in un tempo minore, ma resta uguale alla ddp di alimentazione.

II. Alla capacità del condensatore C?

Resterebbe uguale. È un parametro indipendente (a meno di non voler considerare gli effetti capacitivi alle connessioni della resistenza, ma non ci sono elementi per farlo).

- III. Alla costante di tempo caratteristica T ?
Si dimezzerebbe.
- IV. All'intensità di corrente I ?
Sarebbe in generale maggiore per la minor resistenza. Quella iniziale, pari a $\Delta V_A / R$ raddoppierebbe.
- V. Alla carica finale Q ?
Resterebbe uguale perché dipende solo dalla capacità del condensatore e dalla ddp di alimentazione, purché il processo sia sufficientemente lungo.
4. Se sostituissi solo la ddp di alimentazione da 4,5 V con una da 9 V cosa accadrebbe:
- I. Alla ddp massima del condensatore ΔV_M ?
Diventerebbe anch'essa 9 V.
- II. Alla capacità del condensatore C ?
Resterebbe uguale.
- III. Alla costante di tempo caratteristica T ?
Resterebbe uguale, dipende solo dai valori di R e di C .
- IV. All'intensità di corrente I ?
Sarebbe in generale maggiore. Quella iniziale, pari a $\Delta V_A / R$ raddoppierebbe.
- V. Alla carica finale Q ?
Raddoppierebbe poiché $Q = C \cdot \Delta V_A$
5. Se sostituissi la capacità di 500 μF con una di 50 pF, che valore dovrebbe avere la resistenza in modo tale che la costante di tempo caratteristica restasse invariata?
- I. $R = 10^{11} \Omega$
6. Se dovessi utilizzare una capacità più grande lasciando invariati gli altri parametri, che modifiche ti aspetteresti alla curva dei dati sperimentali?
Aumentando C aumenta il tempo caratteristico $T = RC$. Mi aspetterei una curva con una salita nella fase di carica ed una discesa in quella di scarica meno ripide. La nuova curva giacerebbe al di sotto di quella vecchia, tranne che all'istante $t_0=0$ e nel tratto in cui viene raggiunta la ddp massima che non dipende dalla capacità, ma solo dalla ddp di alimentazione. Se il nuovo valore di C fosse molto più grande del precedente potrebbe succedere che, lasciando invariata la durata della fase di acquisizione dei dati, il condensatore non si carichi completamente e quindi la ddp non raggiungerebbe il valore massimo possibile.

GRIGLIA PER LA VALUTAZIONE DELL'ATTIVITA' DI LABORATORIO

Gruppo:

Argomento:

Data:

		N	I	S	B	O	Voto
VALUTAZIONE		0	2	3	4	5	
Attività del gruppo							
	Ripartizione dei compiti efficace. Interazione interna costruttiva. Autonomia.						
	Precauzione nell'utilizzo del materiale						
Relazione							
	Completa (tabelle, eventuali grafici, conclusioni, incertezze sui dati)						
	Unità di misura, calcoli e grafici, cifre significative, notazione scientifica, corretti.						
Conclusioni							
	Conformi a quelle aspettate.						
	Coerenti con le misure ed argomentate. Individuati problemi ed accorgimenti.						
Questionario							
	Percentuale di risposte corrette.						
	Risposte chiare e complete.						
						Voto finale	

LEGENDA

- N Nullo
- I Insufficiente
- S Sufficiente
- B Buono
- O Ottimo

NOTA PER LA COMPILAZIONE

I parametri da valutare sono raccolti in 4 gruppi omogenei. Ogni gruppo va valutato da 0 a 10. È possibile valutare separatamente i singoli parametri in modo tale che il totale del gruppo vada da 0 a 10. Il voto finale è la media dei voti dei gruppi di parametri.

XIII

Bibliografia e sitografia

Sui sistemi Real Time Laboratory (RTL), in particolare con un sistema: sensore-CBL-calcolatrice grafica

- ❑ G. Marucci, L. Catalano, V. Filippeschi e H. Coombat (a cura di), “Le calcolatrici grafiche ed i CBL nel laboratorio di Fisica”, *Quaderno del Ministero Pubblica Istruzione* in collaborazione con la Texas Instruments, Pitagora Editrice, Bologna 1998.
- ❑ M. Impedovo, “Matematica: insegnamento e computer algebra”, *Springer – Verlag Italia*, Milano 1999.
- ❑ J. Gastineau, K. Appel, C. Bakken, R. Sorensen, D. Vernier, “Physics with Calculators”, *Vernier Software & Technology*, Beaverton (Oregon, USA) 2000.
- ❑ B. Pecori, G. Torzo, G. Pezzi, O. Foà, A. Rambelli, M. Rafanelli, M. R. Rizzo, “L’ online ‘portabile’ nell’insegnamento della fisica”, Atti del XXXVIII Congresso Nazionale AIF Ferrara, 1999, *La Fisica nella scuola - Supplemento*, gennaio – marzo 2001.
- ❑ AAVV, “Tecnologie informatiche nel laboratorio didattico”, Atti del XL Congresso Nazionale AIF, Senigallia, 2001, *La Fisica nella scuola – Supplemento*, aprile-giugno 2003.
- ❑ www.cartesionline.it, materiale didattico per l’insegnamento della matematica, della fisica e delle scienze.
- ❑ www.adt.it, Associazione per la Didattica con le Tecnologie (ADT)
- ❑ www.t3ww.org, Teachers Teaching with Technology, associazione internazionale di cui ADT è membro (in inglese).
- ❑ <http://www.fisica.uniud.it/irdis/index.htm>, IRDIS è un progetto finanziato nell’ambito della legge 10.01.2000 n.6 (Iniziative per la diffusione della cultura scientifica), finalizzato al potenziamento e ottimizzazione delle attività sperimentali nella didattica delle scienze con l’uso delle nuove tecnologie.

SCHEDA PER LO STUDENTE

CARICA E SCARICA DI UN CONDENSATORE AL LABORATORIO RTL

I

Titolo dell'esperienza

CARICA E SCARICA DI UN CONDENSATORE AL LABORATORIO RTL

Autori

Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori e Marco Litterio

Docenti del L.S.S. Labriola (Ostia, Roma)

II

Descrizione del fenomeno fisico

L'esperienza consiste nel misurare la variazione di tensione ai capi di un condensatore di capacità C inserito in un circuito con alimentazione in tensione continua ΔV_A e resistenza R . Come è noto, a circuito chiuso, le armature del condensatore si caricano fino a che fra di esse non si stabilisce una differenza di potenziale (ddp) opposta a quella dell'alimentazione. A regime nel circuito non circola corrente, la ddp del condensatore è costante e sulle armature del condensatore si è depositata una carica totale $Q = C \cdot \Delta V_A$. In questa esperienza studiamo però le due fasi di carica e di scarica del condensatore.

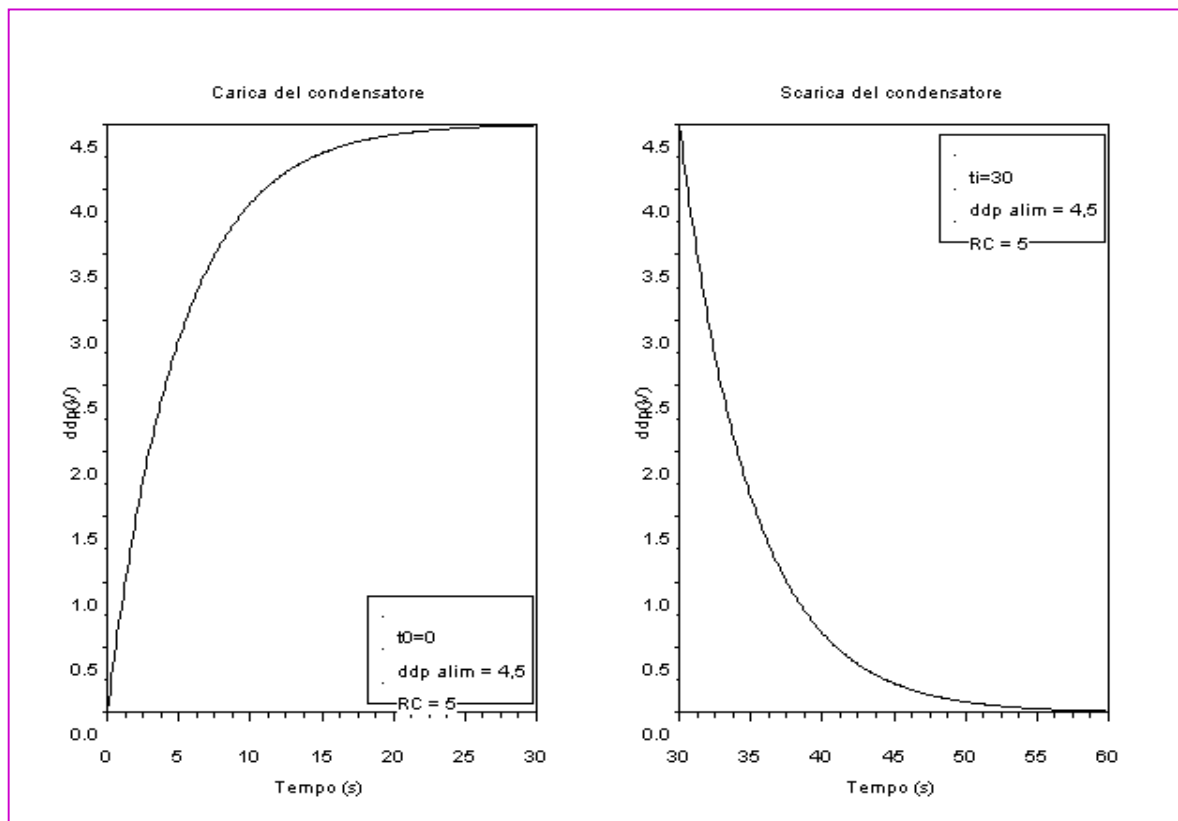
1. **Fase di carica:** il condensatore è inizialmente scarico, il circuito aperto; all'istante $t_0 = 0$ il circuito viene chiuso, si stabilisce una corrente elettrica inizialmente pari a $\Delta V_A / R$ e via via decrescente, la ddp ai capi del condensatore aumenta. Il modello matematico prevede un comportamento esponenziale asintotico con un tempo caratteristico regolato dal prodotto dei valori RC , con legge di equazione:

$$\Delta V = \Delta V_A [1 - \exp(-\frac{t}{RC})]. \quad (\text{Eq.1})$$

2. **Fase di scarica:** una volta che il condensatore è carico si apre il circuito, si elimina l'alimentazione e si richiude il circuito all'istante t_i . Il condensatore si scarica con tempo di nuovo caratterizzato dal prodotto RC e con la legge di equazione:

$$\Delta V = \Delta V_A \exp(-\frac{t - t_i}{RC}). \quad (\text{Eq.2})$$

Le figure qui sotto mostrano i grafici che si ottengono dalle equazioni Eq.1 e Eq.2 e rappresentano l'andamento teorico del fenomeno.



III Obbiettivi

1. Ottenere i grafici sperimentali della tensione ai capi di un condensatore nelle fasi di carica e di scarica del condensatore e confrontarli con quelli teorici
2. Ricavare dall'analisi del grafico il valore della costante di tempo del circuito RC e verificare che tale valore è lo stesso nella fase di carica ed in quella di scarica

IV Materiali occorrenti

- Una resistenza: $R = 10 \text{ k}\Omega$
- Un condensatore di capacità $C = 500 \text{ }\mu\text{F}$
- Una batteria da 4,5 V
- Un interruttore
- Materiali per realizzare il circuito: 4 cavi elettrici per le connessioni, 8 coccodrilli, basetta
- Il CBL (fig. 1)
- La calcolatrice Ti92+ (fig. 2)
- Sonda di tensione (fig. 3): portata $\pm 10\text{V}$, sensibilità 0,02 V

Foto dei vari materiali e del loro assemblaggio

fig. 1



fig. 2



fig. 3



fig. 4



fig. 5



fig. 6



fig. 7



fig. 8



V Accorgimenti

1. Attenzione: i condensatori elettrolitici, per ragioni costruttive, hanno una polarizzazione che va rispettata altrimenti vengono danneggiati.
2. Nella scelta del numero delle misure da acquisire e dell'intervallo di tempo Δt fra una misura e l'altra occorre tener presente che il Δt deve essere: 1) abbastanza piccolo da consentire di avere un numero adeguato di dati durante le fasi iniziali della carica e della scarica, quelle in cui l'evoluzione temporale è più rapida; 2) non troppo piccolo perché altrimenti la durata complessiva dell'acquisizione diventa inutilmente lunga e si rischia di raccogliere più dati di quanti ne possa immagazzinare la memoria della calcolatrice. Il modo di regolarsi è il seguente: noto $T=RC$, la durata complessiva può essere pari a alcune volte il valore di T (diciamo 6 volte) in modo da avere un quadro abbastanza completo dell'evoluzione del fenomeno, e l'intervallo può essere una frazione di T scelta in modo da avere alcune decine di misure in un tempo T (diciamo 50). Ovviamente sono numeri indicativi. Nel nostro caso $T=5$ s, da cui $\Delta t=0,1$ s.
3. Occorre controllare che il valore ΔV_A della ddp della batteria sia effettivamente 4,5 V.

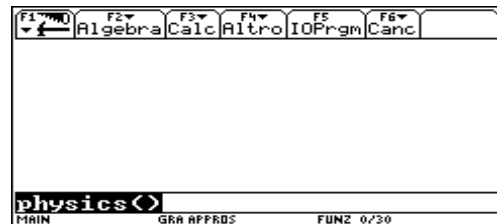
VI

Istruzioni per l'assemblaggio

Alimentate il CBL col suo trasformatore (fig. 4) o con le sue batterie. Collegate: il CBL alla calcolatrice tramite l'apposito cavetto (fig. 5); il sensore di tensione al canale CH1 del CBL (fig. 6). La fig. 7 mostra la configurazione finale dei collegamenti fra i dispositivi. Realizzare il circuito collegando in serie la resistenza ed il condensatore (fig. 8). I due puntali della sonda vanno collegati ai due capi del condensatore.

Esecuzione delle misure

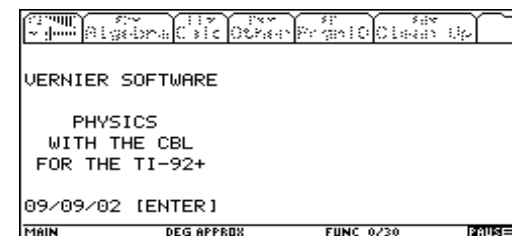
Al prompt della calcolatrice digitare `physics()` e premere <ENTER>



Dopo qualche secondo di apparente inattività (la scritta <BUSY> in basso a destra indica che la calcolatrice sta caricando il software) compare la schermata per la selezione del modello di calcolatrice: selezionare Ti92+ e premere <ENTER>



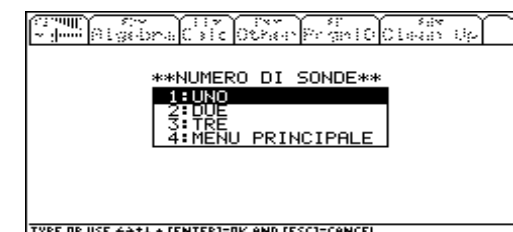
La schermata successiva dà informazioni sul software: premere <ENTER>



Compare il menù principale e la prima operazione da compiere è predisporre la sonda



Selezionare il numero (1)



Procedere a collegare il sensore in CH1 del CBL qualora non fosse stato già fatto precedentemente

Ricompare il menù principale e si procede con l'acquisizione dei dati

In questo esperimento vogliamo gli andamenti in funzione del tempo delle grandezze fisiche: selezioniamo la modalità **GRAFICO vs TEMPO**.

Successivamente viene proposto di fissare l'intervallo di tempo fra le misurazioni ed il numero totale dei dati da acquisire. Dato che $RC = 5$ s è sufficiente misurare per 30 secondi (circa sei volte RC) la salita della ddp durante la fase di carica, e per successivi altri 30 la discesa nella fase di scarica. Volendo acquisire ogni 0,1 s (vedi il punto due della sezione “Accorgimenti”) ne segue che il numero totale dei campioni deve essere posto uguale a 600.



Se tutto è ok premere ENTER

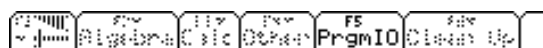
I dati possono essere visualizzati durante l'acquisizione. Se si sceglie questa opzione le schermate successive richiedono i valori minimo e massimo e la suddivisione della scala dell'asse delle ordinate.

Tipicamente la scala delle tensioni andrà dal valore minimo zero al valore della batteria (5V) con divisioni di 0,5.

Se tutto è in ordine si procede all'esecuzione dell'esperimento.

Alla fine dell'acquisizione dovrebbe comparirti sullo schermo un grafico simile a quello qui a fianco.

Terminata l'acquisizione compare una schermata riassuntiva che informa che la prima colonna (L1) di dati è il tempo, la seconda (L2) la grandezza misurata dal sensore collegato al canale CH1 del CBL, nel nostro caso la tensione.

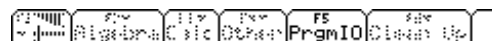


QUANDO TRACCIO?

1:DOPO ACQUIS.

2:DURANTE ACQUIS.

MAIN RAD APPROX FUNC 25/30



ESTREMI ASSE Y e unit. mis.

ymin?

0

ymax?

5

yscl?

.5

MAIN RAD APPROX FUNC 9/30

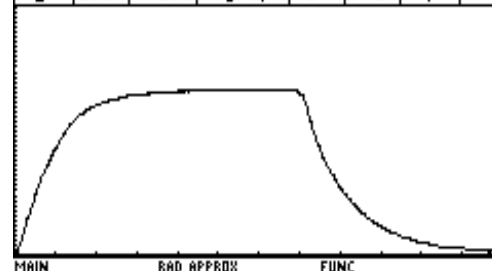
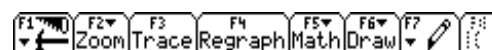


Premi [ENTER] per iniziare...

Eventualmente premi

il tasto [+] per interrompere

MAIN RAD APPROX FUNC 9/30



TEMPO IN L1

DATI IN L2

MAIN RAD APPROX FUNC 9/30

Algebra Calc Deriv PrntG Clean Up

****SCELTA GRAFICO****

1: CANALE 1
2: CANALE 2
3: CANALE 3
4: DISTANZA
5: d/dt
6: d^2/dt^2
7: ESCI

ATTENZIONE: per procedere con la relazione dovrai utilizzare il grafico che hai appena ottenuto, quindi non spegnere la calcolatrice e non utilizzarla in alcun altro modo.

Guida all'elaborazione ed all'analisi dei dati

7. Calcola $\Delta t_{**} = t_{**} - t_i$ [l'incertezza è la **somma** delle incertezze $E(\Delta t_{**}) = E(t_{**}) + E(t_i)$]

Tabella 1: valori derivati dal grafico sperimentale

Grandezza Fisica	ΔV_M (V)	ΔV_* (V)	t^* (s)	t_i (s)	ΔV_i (V)	ΔV_{**} (V)	t_{**} (s)	Δt_{**} (s)
Valore								
Incertezza								

Utilizzando le indicazioni contenute nella sezione “Materiali occorrenti”, completa la tabella successiva (fai attenzione a scrivere i valori numerici usando la notazione scientifica ed il corretto numero di cifre significative)

Tabella 2: valori di riferimento

GRANDEZZA FISICA	SIMBOLO	VALORE	INCERTEZZA
Resistenza elettrica	R		$E(R) = \pm 5\% R$
Capacità	C		$E(C) = \pm 15\% C$
ddp di alimentazione	ΔV_A		$E(\Delta V_A)$
Tempo caratteristico RC	$T = R C$		$E(T) = T \left(\frac{E(R)}{R} + \frac{E(C)}{C} \right)$

VIII

Conclusioni (confronto tra risultati ottenuti e aspettati)

- a) Quali elementi devi prendere in considerazione per decidere se il modello teorico è applicabile ai dati da te ottenuti?

.....

.....

- b) Confronta qualitativamente il grafico dei dati sperimentali che hai ottenuto con i due grafici combinati insieme di Eq.1 e Eq.2.

.....

.....

- c) Confronta i valori di T, t^* e Δt_{**}

.....

.....

d) Confronta o valori di ΔV_A e ΔV_M

.....

.....

e) In definitiva, i risultati da te ottenuti corrispondono a quelli aspettati sulla base di Eq.1 e Eq.2? Giustifica la tua risposta.

.....

.....

f) Se hai ottenuto risultati del tutto inaspettati, indica qual è stato, secondo te, il problema e quali accorgimenti prenderesti nel caso tu ripetessi da capo l'esperimento.

.....

.....

IX Questionario di verifica

1. Considera la funzione matematica così definita:

$$y = \begin{cases} a \cdot (1 - e^{-bx}) & \text{se } 0 < x < x_* \\ a \cdot e^{-b(x-x_*)} & \text{se } x > x_* \end{cases}$$

Essa è equivalente all'insieme delle equazioni date in Eq.1 e Eq.2 se fra i simboli utilizzati vale la seguente corrispondenza (completa la tabella)

y	x	x_*	a	b	e
ΔV	t				

2. Data la funzione definita alla domanda precedente, quali valori numerici devono avere a, b e x_* perché l'equazione corrisponda al grafico dei dati sperimentali?

a = ; b = x_* =

3. Se sostituissi solo la resistenza da 10 k Ω con una da 10 M Ω cosa accadrebbe:

I. Alla ddp massima del condensatore ΔV_M ?

II. Alla capacità del condensatore C ?.....

III. Alla costante di tempo caratteristica T ?.....

IV. All'intensità di corrente I ?

V. Alla carica finale Q ?

4. Se sostituissi solo la ddp di alimentazione da 4,5V con una da 9V cosa accadrebbe:

I. Alla ddp massima del condensatore ΔV_M ?.....

II. Alla capacità del condensatore C ?.....

III. Alla costante di tempo caratteristica T ?.....

IV. All'intensità di corrente I ?

V. Alla carica finale Q ?

5. Se sostituissi la capacità di 500 μF con una di 50 pF , che valore dovrebbe avere la resistenza in modo tale che la costante di tempo caratteristica restasse invariata?

I. $R =$

6. Se dovessi utilizzare una capacità più grande lasciando invariati gli altri parametri, che modifiche ti aspetteresti alla curva dei dati sperimentali?

.....

.....

Calendario degli incontri presso il L.S. “A. Labriola”

Indirizzo dell'Istituto: Via Capo Sperone, 50 - 00122 Ostia (Roma)

Docenti del gruppo di lavoro: Paola Cattaneo, Savina Ieni, Lorella Liberatori, Marco Litterio (docente referente)

Novembre 2006

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
		1	2	3	4	5
6	7 FE	8 OA	9 LB	10 CS	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Gennaio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
1	2	3	4	5	6	7
8	9 FE	10 OA	11 LB	12 CS	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Febbraio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6 FE	7 OA	8 LB	9 CS	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27 FE	28 OA				

Marzo 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1 LB	2 CS	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Legenda

FE: la forza elastica
OA: l'oscillatore armonico
LB: la Legge di Boyle
CS: carica e scarica di un condensatore

- Ogni incontro si svolgerà nell'arco di un pomeriggio, inizierà alle ore 15 e avrà una durata di 3 ore.
- Numero massimo di alunni partecipanti: 32, divisi in gruppi di laboratorio ognuno composto da massimo 4 studenti.
- Alle attività saranno presenti:
 - 2 docenti del gruppo di lavoro
 - l'assistente tecnico – pratico
 - alcuni studenti del Liceo come tutor

SCHEDA PER IL DOCENTE

IL MOTO DEL PENDOLO

I

Titolo dell'esperienza

IL MOTO DEL PENDOLO

Autori

Prof.ssa Lidia Bonaccorso

Docente del L.S.S. "G. Peano" - Roma

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Il pendolo oscilla, dopo essere stato spostato dalla sua posizione di equilibrio, muovendosi di moto periodico.

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza e prerequisiti

Possono eseguire l'esperimento sia una terza che una quarta classe di liceo scientifico. I prerequisiti necessari sono:

- Conoscere il moto armonico
- Conoscere il principio di conservazione dell'energia meccanica

IV

Obbiettivi generali

Applicare alcune leggi della fisica tenendo presente i loro limiti di applicabilità. Eseguire le varie misure con molta accuratezza per ottenere il migliore accordo possibile tra teoria ed esperienza.

V

Obbiettivi specifici

Sapere usare strumenti di misura anche familiari come la riga o il metro; comprendere che l'errore di una misura è intrinseco al concetto stesso di misura; sapere organizzare in tabelle e/o in grafici i risultati sperimentali.

VI

Materiale occorrente e assemblaggio

Astina con base; morsetto; astina più piccola; 5 pesi da 50 grammi l'uno; filo di nylon; cronometro (sensibilità pari a 0,01 secondi); metro metallico a nastro (portata pari a 3 metri, sensibilità pari a 0,001 metri); dinamometro (portata pari a 1 N e sensibilità pari a 0,01 N); giornali; carta bianca formato A4; nastro adesivo; riga; squadra e materiale di cancelleria.

Poggiare l'astina con base sul banco da lavoro, all'estremità superiore di essa fissare l'altra astina con il morsetto in modo che questa sporga fuori dal piano del tavolo. Per evitare torsioni occorre fissare entrambi gli estremi del filo di nylon all'astina orizzontale, distanziandoli il più possibile tra loro e agganciare i 5 pesi in modo che essi sfiorino il pavimento. Poggiare su quest'ultimo dei giornali, eventualmente bloccandoli col nastro adesivo, e su di essi poggiare il foglio bianco in modo che il lato lungo sia parallelo al tavolo e il punto di mezzo di quello corto coincida o sia molto vicino alla posizione di equilibrio del pendolo. La lunghezza del pendolo va misurata lungo la verticale condotta dal punto di mezzo tra le estremità del filo alla massa pendolare. Occorre che tale lunghezza sia la maggiore possibile (1,8–2 metri).

VII

Descrizione generale del procedimento di misura, grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori, elenco delle tabelle e dei grafici da produrre, analisi dei dati

Prima fase: calcolare la distanza $X_{\max} = L \sin(10^\circ)$ e dividerla in 4 o 5 parti uguali e per ciascuna di esse misurare la forza con il dinamometro. Ripetere 5 volte la misura della forza per ciascun valore di X e riportare i dati in tabella. Gli spostamenti orizzontali vanno riportati sul foglio di carta bianca e possono essere misurati con una riga da disegno da 50 cm. Questi strumenti di misura (metro, riga) hanno tutti la stessa sensibilità (1 mm) che rappresenta l'errore assoluto su ciascuna misura. Per misurare la forza di richiamo bisogna controllare lo zero del dinamometro prima di eseguire una nuova lettura. Come valore della forza si considera il valore medio e come errore assoluto la semi dispersione massima.

Seconda fase: si misura la lunghezza del pendolo e si calcola il corrispondente valore di X_{\max} . Quindi si sposta la massa pendolare non oltre X_{\max} e si misura con il cronometro il tempo impiegato per compiere 10 oscillazioni complete ripetendo almeno tre volte la misura. Per variare la lunghezza del pendolo basta abbassare l'astina orizzontale cui è legato il filo di nylon fino a quando la massa pendolare sfiora il foglio bianco poggiato sul pavimento senza toccarlo. Quindi si procede come per la lunghezza precedente.

Ripetere la serie di misure per 3 o 4 lunghezze diverse, avendo cura che la lunghezza più piccola non sia inferiore a 80 cm circa. Infatti per lunghezze più piccole sia X_{\max} sia il periodo diminuiscono e diventa difficile misurarli. Per calcolare il periodo occorre fare la media tra i vari tempi ottenuti, dividere per 10 e calcolare la semi dispersione massima che rappresenta l'errore assoluto.

In una prima tabella vengono riportati, per una lunghezza arbitraria (conviene scegliere la maggiore), il corrispondente valore di X_{\max} e per ciascun valore di X i valori di F misurati con il dinamometro, il valore medio di F e l'errore assoluto. In una seconda tabella vengono riportati i valori della lunghezza e per ciascuno di essi i valori del tempo impiegato per compiere 10 oscillazioni, il suo valore medio, il corrispondente periodo e l'errore assoluto. Per ciascuna tabella si costruisce il corrispondente grafico (F, X) (T^2, L). Tutti i grafici sono rette passanti per l'origine e per tutti è necessario usare la carta millimetrata. Inoltre sarebbe opportuno riportare sul grafico l'errore assoluto (barre d'incertezza) per entrambe le variabili scegliendo un opportuno fattore di scala e ricordando che fra la sensibilità dello strumento e la semi dispersione massima si sceglie il maggiore tra i due per rappresentare l'errore assoluto e che per T^2 l'errore assoluto è il doppio di quello calcolato per T .

I valori sia di F - per ogni X - che di $10T$ - per ogni L - non devono essere troppo diversi tra loro (in questo caso è bene ripetere le misure), ma nemmeno tutti uguali.

VIII

Esempi di questionari e griglie di valutazione

- ❖ Quali condizioni sono necessarie affinché una massa sospesa a un filo costituisca un pendolo semplice?
- ❖ In una stanza vi sono due pendoli semplici A e B aventi masse diverse $M_A < M_B$ ma uguale lunghezza. Essi vengono posti in oscillazione spostandoli di 2° rispetto alla loro posizione di equilibrio. In che rapporto stanno i loro periodi?
- ❖ Quali forze agiscono su un pendolo semplice? Trascurare gli attriti.
- ❖ Quando un pendolo semplice oscilla in quali posizioni si ha la massima tensione del filo?
- ❖ Un filo pende da una torre alta e priva di illuminazione. L'estremità superiore del filo non è né visibile né accessibile, mentre lo è quello in basso. Disponendo di una sferetta e di un orologio è possibile determinare L ? È necessario conoscere la massa della sferetta?

Per la valutazione del questionario si potrebbero attribuire 2 punti per ogni risposta esatta e correttamente argomentata.

SCHEDA PER LO STUDENTE

IL MOTO DEL PENDOLO

I

Titolo dell'esperienza

IL MOTO DEL PENDOLO

Autore

Prof.ssa Lidia Bonaccorso

Docente del L.S.S. "G. Peano" - Roma

II

Breve descrizione del fenomeno fisico

Il pendolo oscilla, dopo essere stato spostato dalla sua posizione di equilibrio, muovendosi di moto periodico.

III

Descrizione generale dell'esperienza

È possibile verificare che la forza agente sul pendolo è una forza di richiamo, cioè del tipo $F=Kx$, misurando la forza necessaria a spostare il pendolo e lo spostamento stesso fino a una distanza massima che corrisponde a uno spostamento angolare di 10° circa. Infine è possibile verificare che T^2/L è costante variando la lunghezza del pendolo e misurando il tempo necessario per compiere 10 oscillazioni complete.

IV

Materiale occorrente

Astina con base; morsetto; astina più piccola; 5 pesi da 50 grammi l'uno; filo di nylon; cronometro (sensibilità pari a 0,01 secondi); metro metallico a nastro (portata pari a 3 metri, sensibilità pari a 0,001 metri); dinamometro (portata pari a 1 N e sensibilità pari a 0,01 N); giornali; carta bianca formato A4; nastro adesivo; riga; squadra e materiale di cancelleria.

V

Istruzioni per l'assemblaggio

Poggiare l'astina con base sul banco da lavoro, all'estremità superiore di essa fissare l'altra astina con il morsetto in modo che questa sporga fuori dal piano del tavolo. Per evitare torsioni occorre fissare entrambi gli estremi del filo di nylon all'astina orizzontale, distanziandoli il più possibile tra loro e agganciare i 5 pesi in modo che essi sfiorino il pavimento. Poggiare su quest'ultimo dei giornali, eventualmente bloccandoli col nastro adesivo, e su di essi poggiare il foglio bianco in modo che il lato lungo sia parallelo al tavolo e il punto di mezzo di quello corto coincida o sia molto vicino alla posizione di equilibrio del pendolo. La lunghezza del pendolo va misurata lungo la verticale condotta dal punto di mezzo tra le estremità del filo alla massa pendolare. Occorre che tale lunghezza sia la maggiore possibile (1,8–2 metri).

VI

Descrizione generale del procedimento di misura

Prima fase: calcolare la distanza $X_{\max} = L \sin(10^\circ)$ e dividerla in 4 o 5 parti uguali e per ciascuna di esse misurare la forza con il dinamometro. Ripetere 5 volte la misura della forza per ciascun valore di X e riportare i dati in tabella. Gli spostamenti orizzontali vanno riportati sul foglio di carta bianco e possono essere misurati con una riga da disegno da 50 cm. Questi strumenti di misura (metro, riga) hanno tutti la stessa sensibilità (1 mm) che rappresenta l'errore assoluto su ciascuna misura. Per misurare la forza di richiamo bisogna controllare lo zero del dinamometro prima di eseguire una nuova lettura. Come valore della forza si considera il valore medio e come errore assoluto la semi dispersione massima.

Seconda fase: si misura la lunghezza del pendolo e si calcola il corrispondente valore di X_{\max} . Quindi si sposta la massa pendolare non oltre X_{\max} e si misura con il cronometro il tempo impiegato per compiere 10 oscillazioni complete ripetendo almeno tre volte la misura. Per variare la lunghezza del pendolo basta abbassare l'astina orizzontale cui è legato il filo di nylon fino a quando la massa pendolare sfiora il foglio bianco poggiato sul pavimento senza toccarlo. Quindi si procede come per la lunghezza precedente.

Ripetere la serie di misure per 3 o 4 lunghezze diverse, avendo cura che la lunghezza più piccola non sia inferiore a 80 cm circa. Infatti per lunghezze più piccole sia X_{\max} sia il periodo diminuiscono e diventa difficile misurarli. Per calcolare il periodo occorre fare la media tra i vari tempi ottenuti, dividere per 10 e calcolare la semi dispersione massima che rappresenta l'errore assoluto.

VII

Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

In una prima tabella vengono riportati, per una lunghezza arbitraria (conviene scegliere la maggiore), il corrispondente valore di X_{\max} e per ciascun valore di X i valori di F misurati con il dinamometro, il valore medio di F e l'errore assoluto. In una seconda tabella vengono riportati i valori della lunghezza e per ciascuno di essi i valori del tempo impiegato per compiere 10 oscillazioni, il suo valore medio, il corrispondente periodo e l'errore assoluto. Per ciascuna tabella si costruisce il corrispondente grafico (F, X) (T^2, L).

Tutti i grafici sono rette passanti per l'origine e per tutti è necessario usare la carta millimetrata. Inoltre sarebbe opportuno riportare sul grafico l'errore assoluto (barre d'incertezza) per entrambe le variabili scegliendo un opportuno fattore di scala e ricordando che fra la sensibilità dello strumento e la semi dispersione massima si sceglie il maggiore tra i due per rappresentare l'errore assoluto e che per T^2 l'errore assoluto è il doppio di quello calcolato per T .

I valori sia di F - per ogni X - che di $10T$ - per ogni L - non devono essere troppo diversi tra loro (in questo caso è bene ripetere le misure), ma nemmeno tutti uguali.

VIII Indicazioni per la relazione

Nella relazione vanno indicati gli autori, lo scopo dell'esperimento, il materiale usato e il procedimento seguito. Vanno inoltre allegate le tabelle e i grafici derivati e infine il confronto tra i dati sperimentali e le previsioni teoriche. Sappiamo infatti che $F/X=mg/L$, che $T^2/L=4\pi^2/g$ e quindi per un migliore accordo tra teoria ed esperimento sarebbe opportuno conoscere il valore di g con buona precisione.

IX Questionario

- ❖ Quali condizioni sono necessarie affinché una massa sospesa a un filo costituisca un pendolo semplice?
- ❖ In una stanza vi sono due pendoli semplici A e B aventi masse diverse $M_A < M_B$ ma uguale lunghezza. Essi vengono posti in oscillazione spostandoli di 2° rispetto alla loro posizione di equilibrio. In che rapporto stanno i loro periodi?
- ❖ Quali forze agiscono su un pendolo semplice? Trascurare gli attriti.
- ❖ Quando un pendolo semplice oscilla in quali posizioni si ha la massima tensione del filo?
- ❖ Un filo pende da una torre alta e priva di illuminazione. L'estremità superiore del filo non è né visibile né accessibile, mentre lo è quello in basso. Disponendo di una sferetta e di un orologio è possibile determinare L ? È necessario conoscere la massa della sferetta?

Calendario degli incontri presso il L.S. "G. Peano"

Indirizzo dell'Istituto: Via Francesco Morandini 38, 00142 Roma

Docente di riferimento: prof.ssa Lidia Bonaccorso

Dicembre 2006

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Gennaio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Febbraio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28				

Marzo 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Maggio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

- Ogni incontro si svolgerà nell'arco di un pomeriggio, inizierà alle ore 15 e avrà una durata di 3 ore.
- Numero massimo di alunni partecipanti all'attività di gruppo: 24 studenti. Gli studenti eseguono le esperienze suddivisi in gruppi di lavoro. Ogni gruppo è composto da un massimo di quattro alunni.
- Gli studenti sono accompagnati da uno o più docenti che partecipano all'attività.

SCHEDA PER IL DOCENTE

PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE EFFETTO FOTOVOLTAICO,
PRODUZIONE DI IDROGENO E OSSIGENO ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA

I

Titolo dell'esperienza

**PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE
EFFETTO FOTOVOLTAICO, PRODUZIONE DI IDROGENO E
OSSIGENO ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA**

Autori

Proff. Sergio Barbadoro e Attilio Maccari

Docenti del ISS Piazza della Resistenza, Monterotondo (Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

Il sole e le sue caratteristiche di base

Il sole dista in media dalla Terra 149,6 milioni di Km ed ha un diametro 110 volte superiore a quello del nostro pianeta. La sua superficie ha una temperatura di 6000 K ed una pressione superficiale minore di quella terrestre. All'interno, dove avvengono le reazioni termonucleari, si raggiungono temperature di 15.000.000 K.

Il Sole, avendo una massa intermedia rispetto alle altre stelle, è piuttosto stabile visto che consuma l'idrogeno del nucleo abbastanza lentamente, la sua stabilità è cominciata $5 \cdot 10^9$ anni fa e ne durerà circa altrettanti.

Oltre al moto di traslazione, assieme al sistema solare, esso compie anche un moto di rotazione sul proprio asse in un tempo compreso tra 25 e 30 giorni e con una velocità variabile, minima ai poli e massima all'equatore. All'interno del Sole si è individuato un nucleo centrale, con un raggio di circa 150.000 Km, dove la densità è 150 volte quella dell'acqua. In queste condizioni, le collisioni tra i nuclei degli atomi di idrogeno innescano violente reazioni di fusione nucleare. Il risultato di questo processo è che quattro nuclei di idrogeno si combinano per formare un nucleo di elio (catena protone-protone), mentre viene liberata energia sotto forma di raggi gamma e neutrini.

Entro una zona che ha spessore di circa 500.000 Km , l'energia prodotta all'interno del Sole si trasmette verso l'esterno per irraggiamento. Nei pressi della fotosfera, tuttavia, si trova una zona convettiva che occupa circa l'ultimo terzo del raggio solare, dove l'energia si trasmette per mezzo di moti turbolenti del gas. La fotosfera è appunto la superficie superiore della zona convettiva. Le celle convettive danno alla fotosfera un aspetto irregolare a macchie, noto come granulazione solare. Ciascun granulo ha un diametro di circa 2000 Km e una vita media di soli 10 minuti circa. Vi è anche una granulazione provocata dalla turbolenza che si estende in profondità nella zona convettiva. Questa supergranulazione ha celle che sopravvivono per circa un giorno e hanno dimensioni di circa 30.000 km .

Energia irraggiata dal sole: aspetti energetici

L'energia che raggiunge la superficie del nostro pianeta varia con il variare di alcuni fattori:

- la posizione della Terra rispetto al Sole, che trova espressione fisica nella porzione di Terra esposta alla radiazione variabile a ritmo stagionale;
- nell'emisfero boreale durante l'inverno i raggi del sole arrivano con un angolo basso rispetto all'orizzonte e pertanto risultano irradiate con scarsa intensità le superfici orizzontali, mentre vengono irradiate intensamente le superfici verticali esposte ad est, sud, ovest, in quanto investite secondo angoli vicini a 90° ;
- in funzione della rotazione della terra attorno al suo asse, la parte esposta ai raggi solari varia con ritmo giornaliero, ad orario: i raggi del mattino e della sera investono le superfici verticali con angoli relativamente efficaci, essendo il sole basso sull'orizzonte, mentre nelle ore meridiane l'irraggiamento più intenso raggiunge i piani orizzontali.

Sfruttamento dell'energia solare

Lo sviluppo della moderna tecnologia ha portato allo sfruttamento dell'energia solare in due tipi di applicazioni:

- il solare termico, che consiste nella trasformazione dell'energia solare in calore, attraverso l'utilizzo di un dispositivo (collettore solare) che riscalda l'acqua così da poter essere utilizzata a scopi domestici;
- il solare fotovoltaico, che consiste nella conversione diretta dell'energia solare in elettricità attraverso un fenomeno denominato effetto fotovoltaico.

Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è un fenomeno fisico che si manifesta quando gli elettroni vengono emessi dalla superficie di un conduttore metallico in seguito all'assorbimento dell'energia trasportata dalla luce incidente sulla superficie stessa.

L'effetto è sfruttato nella cellula fotoelettrica in cui gli elettroni emessi da uno dei due poli della cellula, il fotocatodo, migrano verso l'altro polo, l'anodo, per effetto di un campo elettrico applicato.

La scoperta dell'effetto fotoelettrico ebbe un ruolo fondamentale nella crisi della fisica classica, che assegnava alla radiazione elettromagnetica un comportamento prettamente ondulatorio, e nello sviluppo della meccanica quantistica che utilizzava il concetto del dualismo onda-particella. La teoria ondulatoria classica prevedeva infatti che, all'aumentare dell'intensità della luce incidente su una superficie metallica, aumentasse l'energia degli elettroni emessi. Al contrario, gli esperimenti mostravano che l'energia massima posseduta dai fotoelettroni dipendeva unicamente dalla frequenza della radiazione incidente, e non dall'intensità di illuminazione.

Nel 1905 Albert Einstein spiegò l'effetto fotoelettrico con l'ipotesi che i raggi luminosi trasportassero particelle, chiamate fotoni, di energia $E = h\nu$, dove $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ è la costante di Planck e ν la frequenza dell'onda luminosa. Quando incidono sulla superficie di un corpo metallico, i fotoni cedono la propria energia agli elettroni liberi del conduttore, provocandone l'emissione. Con questa ipotesi l'energia dell'elettrone liberato viene a dipendere solo dalla frequenza del fotone che colpisce l'elettrone.

Il termine effetto fotoelettrico può indicare altri tre processi: la fotoionizzazione, la fotoconduzione e l'effetto fotovoltaico.

La fotoionizzazione consiste nella ionizzazione di un gas da parte di luce o di altra radiazione elettromagnetica: i fotoni, se dotati di energia sufficiente, liberano uno o più elettroni appartenenti ai livelli energetici esterni degli atomi del gas.

Nella fotoconduzione, gli elettroni facenti parte del reticolo cristallino di un solido assorbono energia dai fotoni incidenti e divengono elettroni di conduzione. L'effetto fotovoltaico si manifesta invece con la formazione di coppie elettrone-lacuna quando un fascio di fotoni colpisce la superficie di un materiale semiconduttore. In alcuni dispositivi quest'ultimo effetto viene sfruttato per provocare una differenza di potenziale in corrispondenza della giunzione tra due diversi semiconduttori. Qualunque sia il materiale impiegato, il meccanismo con cui la cella trasforma la luce solare in energia elettrica è essenzialmente lo stesso. Consideriamo per semplicità il caso di una convenzionale cella fotovoltaica di silicio cristallino. L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi. In un cristallo di silicio puro ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi, quindi due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino. Esiste quindi un forte legame covalente fra i due atomi e per spezzarlo occorre una certa quantità di energia. In un solido cristallino, infatti, i livelli energetici che possono assumere gli elettroni periferici sono raggruppati in bande di energia. Nella banda di valenza si trovano i livelli energetici che gli elettroni assumono nell'orbita più esterna degli atomi che formano il solido (elettroni di valenza). Nella banda di conduzione si trovano i livelli energetici della cosiddetta nube elettronica responsabile del fenomeno della conduzione. Tra queste due bande vi è una regione, detta banda proibita, in cui non vi sono livelli energetici permessi agli elettroni. La larghezza della banda proibita, detta anche *energy gap*, è una caratteristica molto importante del semiconduttore, e si denota di solito con E_G ($E_G = E_C - E_V$), essendo E_C l'energia del bordo inferiore della banda di conduzione e E_V l'energia del bordo superiore della banda di valenza. La distribuzione degli elettroni fra le varie bande di energia consentita determina le caratteristiche elettriche dei materiali. Nella banda di valenza gli elettroni sono legati ai singoli atomi del reticolo, vibrano nelle posizioni di equilibrio, ma non possono contribuire alla conduzione, come invece accade per gli elettroni che occupano i livelli energetici della banda di conduzione, che sono liberi di muoversi e, in presenza di un campo elettrico, possono contribuire alla generazione di un flusso di elettricità.

Secondo questo modello, allo zero assoluto tutti gli elettroni si trovano nella banda di valenza. All'aumentare della temperatura e, quindi, all'aumentare dell'energia termica, alcuni elettroni possono assumere valori energetici tipici della banda di conduzione.

Naturalmente questo processo si intensifica man mano che si va ad incrementare la temperatura.

Gli elementi conduttori hanno la caratteristica di avere una banda proibita molto ridotta e, in certi casi, le bande energeticamente possibili si sovrappongono: già a temperatura ambiente, numerosi elettroni occupano la banda di conduzione.

Altri elementi presentano una banda proibita molto larga ($4 \div 5 \text{ eV}$, ma anche 10 eV) che, a temperatura ambiente, non permette l'esistenza di elettroni di conduzione. Per questo motivo vengono definiti isolanti.

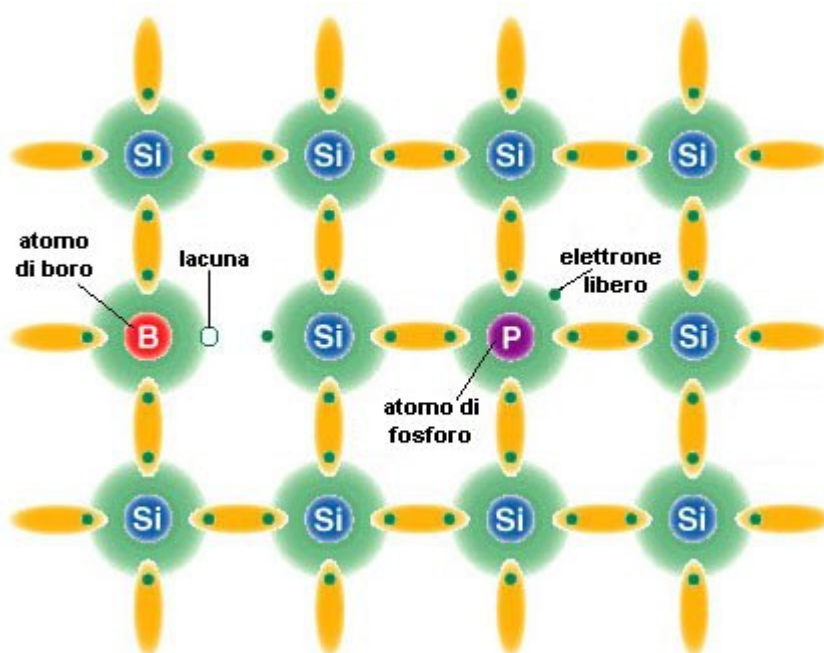
Per i semiconduttori, la banda proibita è dell'ordine di $1 \div 1,5 \text{ eV}$. E' possibile, dunque, che un elettrone di valenza, ricevuta un'opportuna quantità di energia, salti con una certa facilità al livello energetico superiore, dove è poi libero di muoversi sotto l'azione di un eventuale campo elettrico applicato. La lacuna (*hole*) lasciata nella banda di valenza dall'elettrone passato alla banda di conduzione può essere considerata a tutti gli effetti una carica positiva, potendo anch'essa muoversi liberamente in presenza di un campo elettrico. Nei semiconduttori, dunque, partecipano al fenomeno della conduzione elettrica sia gli elettroni nella banda di conduzione, sia le lacune nella banda di valenza. In questo caso la concentrazione delle cariche negative (elettroni di conduzione) n_i è pari alla concentrazione delle cariche positive (lacune di conduzione) p_i ed è detta concentrazione di portatori intrinseci $n_i = p_i$.

Nei semiconduttori intrinseci, cioè assolutamente puri, gli elettroni e le lacune di conduzione si formano solo a causa della rottura dei legami; in termini del diagramma a bande, l'energia richiesta per rompere un legame corrisponde alla larghezza della banda proibita o *energy gap* E_G .

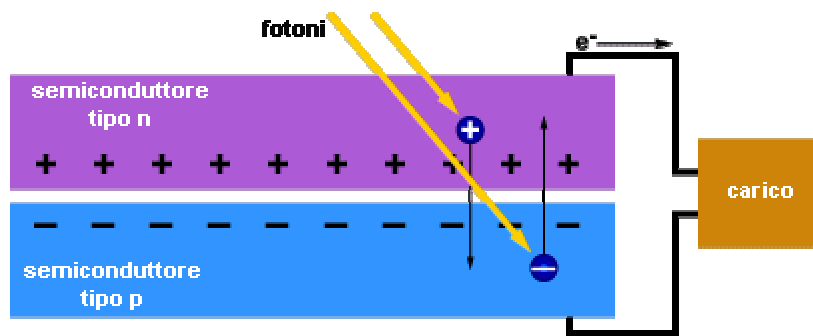
Dati sperimentali dimostrano che la concentrazione di portatori intrinseci n_i aumenta molto rapidamente con l'aumentare della temperatura (e quindi con l'incremento dell'energia vibrazionale del reticolo) e che, per una data temperatura, n_i diminuisce molto rapidamente col crescere della banda proibita.

Semiconduttori estrinseci

In pratica è necessario introdurre nel silicio una piccola quantità di atomi appartenenti al terzo o al quinto gruppo del sistema periodico degli elementi, in modo da ottenere due strutture differenti, una con un numero di elettroni insufficiente, l'altra con un numero di elettroni eccessivo. Questo trattamento viene detto drogaggio (*doping*) e la quantità delle impurità introdotte è dell'ordine di una parte per milione. Generalmente si utilizzano il boro (terzo gruppo) ed il fosforo (quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo *p* (con un eccesso di lacune) ed una di tipo *n* (con un eccesso di elettroni).



Nello strato drogato con fosforo, che ha cinque elettroni esterni o di valenza contro i quattro del silicio, è presente una carica negativa debolmente legata, composta da un elettrone per ogni atomo di fosforo. Analogamente, nello strato drogato con boro, che ha tre elettroni esterni, si determina una carica positiva in eccesso, composta dalle lacune presenti negli atomi di boro quando si legano al silicio. Il primo strato, drogato con atomi del quinto gruppo e quindi a carica negativa, si indica con n , l'altro, a carica positiva, con p , la zona di separazione è detta *giunzione p-n*. In entrambi i casi il materiale risulta elettricamente neutro; tuttavia, ponendo a contatto i due tipi di strutture, tra i due strati si attiva un flusso elettronico dalla zona n alla zona p che, raggiunto il punto di equilibrio elettrostatico, determina un eccesso di carica positiva nella zona n , dovuto agli atomi di fosforo con un elettrone in meno, e un eccesso di carica negativa nella zona p , dovuto agli elettroni migrati dalla zona n . In altri termini gli elettroni presenti nel silicio tipo n diffondono per un breve tratto nel silicio tipo p : il silicio tipo n si carica positivamente, quello di tipo p si carica negativamente e si crea inoltre una regione intermedia detta zona di svuotamento o di carica spaziale. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo dell'ampiezza di pochi micrometri.



Prendendo in considerazione i cristalli di silicio drogati con materiali quali fosforo e boro, si può notare come il fosforo, inserito nel reticolo cristallino, apporta un elettrone in più, mentre il boro presenta un elettrone in meno. Il fosforo appartiene al quinto gruppo del sistema periodico degli elementi; i suoi atomi per quanto si è visto sono detti donatori. Il boro appartiene al terzo gruppo del sistema periodico degli elementi; i suoi atomi sono detti accettori.

Nel primo caso, silicio drogato con fosforo, l'energia di ionizzazione del fosforo nel silicio è molto più piccola dell'energia da fornire al silicio per permettere ad un elettrone di passare nella banda di conduzione superando la banda proibita. Analoghe considerazioni si possono fare per il semiconduttore drogato con boro.

Funzione di distribuzione di Fermi-Dirac

La probabilità che un elettrone in un solido occupi uno stato elettronico con energia E è data dalla funzione di distribuzione di Fermi – Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

dove k è la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta, mentre il parametro E_F , detto livello energetico di Fermi, è quell'energia alla quale la probabilità che un elettrone occupi tale stato energetico è pari a $1/2$.

In un semiconduttore intrinseco il numero degli stati energetici è circa lo stesso per le due bande possibili, inoltre il numero di elettroni nella banda di conduzione è pari al numero delle lacune nella banda di valenza. Ciò significa che, essendo la funzione di Fermi – Dirac simmetrica rispetto al livello di Fermi, E_F deve trovarsi a metà della banda proibita. Nell'operazione di drogaggio con atomi di tipo n , si aumenta la concentrazione di elettroni nella banda di conduzione che, però, ha la stessa densità di stati energetici del semiconduttore di partenza. Si registra, quindi, un aumento del livello energetico di Fermi e con questo uno spostamento verso l'alto dell'intera funzione di distribuzione. Nel caso di semiconduttore di tipo p , l'energia di Fermi e la funzione di distribuzione si spostano verso il basso.

La dipendenza della concentrazione di portatori intrinseci n_i dalla *energy gap* e dalla temperatura segue la seguente relazione:

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi M_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(- \frac{(E_C - E_F)}{kT} \right)$$

dove $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ è la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta e M_e^* è la massa efficace dell'elettrone. Si deve considerare, infatti, che, quando l'elettrone si muove nel campo di forze del reticolo cristallino del semiconduttore, la sua massa appare diversa da quella dell'elettrone libero. La differenza fra le due masse tiene conto appunto dell'interazione con il reticolo cristallino. A 300 K , la concentrazione di portatori intrinseci nel silicio risulta essere uguale a $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; nell'arseniuro di gallio $n_i = 1,8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$.

Per quanto riguarda le lacune, si ottiene

$$p_i = 2 \left(\frac{2\pi M_h^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(- \frac{(E_F - E_V)}{kT} \right),$$

dove con M_h^* è stata indicata la massa efficace della lacuna. Si noti che il prodotto $n_i p_i$ è indipendente dall'energia di Fermi e che inoltre in un semiconduttore intrinseco $n_i = p_i$. Da questa condizione segue

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \left(\frac{M_h^*}{M_e^*} \right).$$

Quando il semiconduttore viene drogato la concentrazione dei portatori positivi e negativi cambia, ma il loro prodotto rimane costante:

$$np = n_i p_i.$$

Giunzioni di semiconduttori

La conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso che incide su una regione di carica spaziale in cui è presente un campo elettrico in grado di separare le cariche elettriche che si producono.

Tale regione può instaurarsi nelle seguenti strutture:

- omogiunzioni o giunzioni p-n;
- strutture metallo-semiconduttore o barriera di Schottky;
- strutture metallo-isolante-semiconduttore (MIS);
- eterogiunzioni ottenute accoppiando due semiconduttori dissimili.

Per semplicità si farà riferimento alle giunzioni $p-n$, il metodo più comunemente usato per creare un campo elettrico interno. Se un materiale semiconduttore (per esempio silicio) incorpora su un lato atomi droganti di tipo p (boro) e sull'altro atomi di tipo n (fosforo) si ha la formazione della giunzione, perché i due strati di materiale, in origine elettricamente neutri, attraverso il contatto danno luogo ad un campo elettrico. Infatti, a causa del gradiente di concentrazione di carica nei pressi della giunzione, si ha contemporaneamente una diffusione di elettroni in p e di lacune in n . La corrente di diffusione origina una barriera di potenziale tra le due regioni caricandosi p negativamente e n positivamente.

La differenza di potenziale che nasce, detta di diffusione, tende ad opporsi al moto delle cariche e si giunge ad una condizione di equilibrio elettrostatico, funzione del tipo di giunzione e della mobilità di elettroni e lacune.

Per effetto dei flussi opposti delle cariche, i livelli di energia delle bande di valenza e di conduzione della regione drogata con atomi di tipo p si innalzano rispetto a quelli nel materiale n , poiché il livello di energia di Fermi, che originariamente era più alto nel materiale di tipo n , deve rimanere costante attraverso la giunzione in condizione di equilibrio termodinamico. Il risultato è una distorsione delle bande lungo la giunzione.

Il campo elettrico interno produce l'effetto diodo. Senza alcuna tensione applicata, non si ha corrente attraverso la giunzione. Se attraverso la giunzione si applica una differenza di potenziale in condizione di polarizzazione diretta (zona p collegata col polo positivo di una batteria e zona n col polo negativo), il campo elettrico si annulla e si ha un aumento esponenziale della corrente; se invece attraverso la giunzione si applica una differenza di potenziale in condizione di polarizzazione inversa, il campo elettrico interno diventa più intenso e non si ha passaggio di corrente (eccezion fatta per quei pochi elettroni che, eccitati termicamente, riescono a superare la barriera costituita dalla giunzione e dalla tensione applicata e creano la cosiddetta corrente di polarizzazione inversa I_0). La giunzione agisce pertanto da diodo.

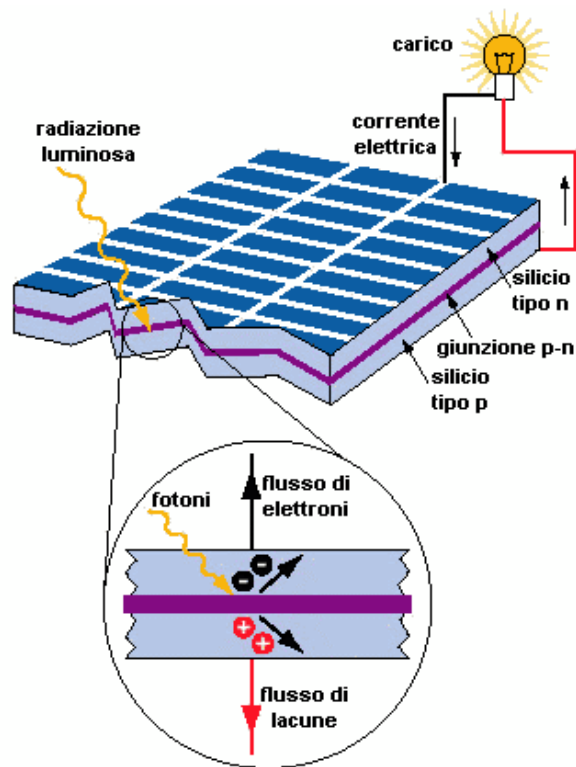
In termini matematici, la caratteristica $I-V$ di un diodo è data dall'equazione:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

dove I è l'intensità di corrente, V è la tensione, k è la costante di Boltzmann, q è la carica dell'elettrone e T è la temperatura assoluta.

L'effetto fotovoltaico

Illuminando la giunzione $p-n$ dalla parte del silicio tipo n , si generano delle coppie elettrone-lacuna in entrambe le zone n e p . Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso generati dall'assorbimento della luce dalle rispettive lacune, spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona n e le lacune verso la zona p). Una volta attraversato il campo, gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo, agendo come un diodo, impedisce loro di invertire la marcia



Se ora si connette la giunzione *p-n* con un conduttore, nel circuito esterno si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo strato *n* verso lo strato *p*. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua. E' importante che lo spessore dello strato *n* sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione. Per il silicio questo spessore deve essere di $0,5\text{ mm}$, mentre lo spessore totale della cella non deve superare i $250\text{ }\mu\text{m}$. In sintesi la conversione da luce a energia elettrica effettuata dalla cella fotovoltaica avviene essenzialmente perché i portatori di carica liberi (elettroni e lacune), generati dalla luce, sono spinti in direzioni opposte dal campo elettrico interno creato attraverso la giunzione di due semiconduttori drogati in modo diverso. Le cariche positive (lacune) sono spinte verso un lato della cella e le cariche negative (elettroni) verso l'altro. Se le due facce (inferiore e superiore della cella) sono collegate mediante un conduttore, le cariche libere lo attraversano e si osserva una corrente elettrica. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce sotto forma di corrente continua. L'efficienza di conversione per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13 % e il 17%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5%. I motivi di tale bassa efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati in quattro categorie:

resistenze parassite: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta viene effettuata dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi. Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti.

riflessione: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti;

fotoni troppo o poco energetici: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti possiedono energia sufficiente. D'altra parte alcuni fotoni troppo energetici generano coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo;

ricombinazione: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi.

Caratteristiche elettriche della cella fotovoltaica

Vediamo ora di approfondire la descrizione fornita nella precedente sezione. In una giornata con cielo limpido, circa $4.4 \cdot 10^{17}$ fotoni incidono un centimetro quadrato della superficie terrestre ogni secondo. Solo alcuni di questi fotoni, quelli con energia superiore al *gap* di energia della banda proibita, possono essere convertiti in energia elettrica dalla cella solare. Quando uno di questi fotoni raggiunge il semiconduttore, esso può essere assorbito e far passare un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione. Poiché rimane una lacuna nella banda di valenza, il processo di assorbimento genera coppie elettrone-lacuna. Per la natura del fenomeno che si è appena visto, ogni semiconduttore può convertire solo una parte dello spettro solare.

Si comprende anche che una parte dell'energia del fotone incidente viene persa nel processo di assorbimento. Infatti, tutte le coppie elettrone-lacuna che vengono generate hanno in pratica energia superiore all'*energy gap*. Immediatamente dopo la loro creazione, elettrone e lacuna decadono a stati energetici prossimi agli estremi delle rispettive bande (di conduzione e di valenza).

L'energia in eccesso viene dissipata in calore e non può essere convertita in potenza utile. Questo rappresenta uno dei meccanismi di perdita fondamentali in una cella solare. Si può fare una stima approssimativa dell'entità di potenza elettrica che può essere prodotta. Una cella solare può effettivamente trasformare in corrente elettrica la corrente di elettroni provocata dalla luce attraverso la banda proibita. Trascurando le perdite, ciascun fotone contribuisce con la carica di un elettrone alla generazione di corrente. La corrente elettrica quindi diviene uguale a:

$$I_L = q N A,$$

dove N è il numero di fotoni avente energia superiore all'*energy gap*, A è l'area superficiale del semiconduttore esposto alla luce, q è la carica dell'elettrone. Si può così determinare la densità di corrente corrispondente allo spettro terrestre:

$$J_L = I_L / A = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.4 \cdot 10^{17} = 70 \text{ mA/cm}^2.$$

Una cella solare al silicio può convertire al massimo 44 mA/cm^2 .

Per quanto riguarda la tensione che può generare una cella solare, si può dare un valore limite superiore, in quanto tale tensione non può superare il valore

$$V = E_g / q.$$

Come si vede, il massimo valore della tensione in *volt* è numericamente uguale al valore dell'*energy gap* espresso in *eV*. Sebbene la tensione effettivamente raggiunta nella pratica sia considerevolmente più bassa di questo limite teorico, l'espressione sopra mostra che i semiconduttori con banda proibita più ampia producono in genere una tensione più alta.

Una cella fotovoltaica è costituita dalla giunzione tra un materiale semiconduttore di tipo *p* e uno di tipo *n* che produce un campo elettrico interno in grado di separare le cariche elettriche create dall'assorbimento della radiazione luminosa.

Sotto l'influenza del campo elettrico esistente, le due cariche libere si sposteranno in direzioni opposte, verso il materiale cui corrisponde loro lo stato di energia più basso: l'elettrone che in prossimità della giunzione ha ricevuto dal flusso luminoso energia sufficiente per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione, cioè una $E > E_g$ ($E_g = \text{energy gap}$, dipende dal tipo di semiconduttore impiegato), migrerà verso la zona n ; un analogo spostamento interesserà le lacune di conduzione.

Il flusso elettronico unidirezionale così originato, in caso di connessione del dispositivo con conduttori all'interno di un circuito chiuso, si traduce in energia elettrica.

La caratteristica $I-V$ di una cella solare può essere ottenuta nel seguente modo. La generazione di corrente I_L per effetto della radiazione luminosa è rappresentato da un generatore di corrente in parallelo con un diodo che rappresenta la giunzione $p-n$. La corrente risultante I è quindi uguale alla differenza tra la corrente generata dalla luce I_L e la corrente del diodo I_D :

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 (\exp (qV/kT) - 1).$$

Si deve inoltre introdurre una resistenza R_S , che tiene conto della resistenza ohmica nei contatti di metallo e nel materiale semiconduttore e delle perdite elettriche nel collegamento metallo-semiconduttore. Volendo tener conto di R_S , l'espressione della corrente diventa:

$$I = I_L - I_0 (\exp (q(V - IR_S)/kT) - 1)$$

La corrente di corto circuito è la massima corrente generata dalla luce; infatti in condizioni di corto circuito il diodo non assorbe corrente quindi $I_L = I$.

La condizione di lavoro ottimale della cella è rappresentata dal punto della curva caratteristica di generazione tensione-corrente in corrispondenza del quale il prodotto $I V$, che esprime la potenza elettrica ottenibile a parità di altre condizioni, risulta massimo (P_M). Questo punto di massima potenza è un parametro importante per individuare il livello di prestazione della singola cella.

Per poter paragonare tra loro le prestazioni dei diversi dispositivi, indipendentemente dalle specifiche peculiarità del sito in cui andranno ad operare, si è convenuto internazionalmente di fissare come condizioni di riferimento una temperatura alla giunzione di 25°C , con un irraggiamento di 1000 W/m^2 . La potenza nominale del dispositivo P_N , misurata in watt di picco (Wp), non è altro che il valore della potenza massima P_M misurato nelle condizioni di riferimento. Per una comune cella al silicio, il punto di massima potenza in condizioni standard di riferimento corrisponde ad una differenza di potenziale di circa $0,5 \text{ V}$.

Anche il rapporto tra P_M ed il prodotto $I_{sc}V_{oc}$ (corrente di corto circuito e tensione a vuoto della cella), detto fill-factor (FF) o fattore di riempimento della cella, è un ulteriore termine di giudizio sul rendimento della cella. Questo mette in relazione la massima potenza effettivamente estraibile con la potenza massima ideale. Per le usuali celle al silicio cristallino il *fill-factor* in condizioni standard di riferimento si aggira attorno a $0,75 \div 0,80$.

Si definisce rendimento di conversione il rapporto tra la massima potenza elettrica generata dalla cella e quella della radiazione solare incidente sulla cella stessa:

$$\eta = \frac{P_M}{P_I}$$

A seconda del tipo di applicazione varia lo spettro della radiazione solare che effettivamente incide sulla cella e, conseguentemente, varia il valore del rendimento.

La scelta del materiale utilizzato (e quindi dell'entità dell'ampiezza della banda proibita E_g) si riflette sul rendimento. Per esempio, nel caso dei semiconduttori, avere E_g elevata significa avere un minor numero di fotoni dello spettro solare con $E > E_g$ e, conseguentemente, una diminuzione della corrente di corto circuito I_{sc} ; nello stesso tempo, però, al diminuire di E_g diminuisce anche il valore della tensione a vuoto V_{oc} ,

pari a circa la metà dell'ampiezza della banda proibita. L'efficienza ideale è ottenuta supponendo nulle tutte le perdite dipendenti da fattori tecnologici (riflessione, ombreggiatura, ecc.) e considerando solo le limitazioni dovute a fattori fisici del processo fotovoltaico. Il valore massimo di questo parametro si riscontra per un'ampiezza della banda proibita compresa tra $1,4$ e $1,8$ eV e quindi materiali come l'arseniuro di gallio (*GaAs*) e il tellurio di cadmio (*CdTe*) sono potenzialmente più promettenti del silicio.

La curva caratteristica I - V di una specifica cella fotovoltaica posta in un particolare contesto dipende, sostanzialmente, da tre variabili fondamentali:

- intensità della radiazione incidente su essa;
- temperatura alla giunzione;
- area della cella.

Variando le condizioni di irraggiamento solare e mantenendo costanti le altre condizioni di funzionamento, la curva caratteristica di una cella fotovoltaica di silicio cristallino si modifica.

Si può notare che mentre la corrente I_{sc} (e quindi anche la corrente massima) è molto sensibile alla radiazione solare essendo proporzionale al numero di fotoni al secondo che incidono sulla superficie della cella, l'unico modo per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico consiste nell'oscurarne totalmente la superficie captante, in quanto V_{oc} (e quindi il voltaggio massimo) presentano valori prossimi a quello massimo anche a bassissimi valori di radiazione solare.

L'efficienza di conversione dipende anche dalla temperatura della cella T_c . In una cella di silicio monocristallino, all'aumento della temperatura di giunzione corrisponde una diminuzione della tensione a vuoto di circa $2,3$ mV/°C e, congiuntamente, un aumento della corrente di cortocircuito pari a circa lo $0,07\%/^{\circ}\text{C}$.

Questi due fenomeni, anche se di segno opposto, si traducono in una diminuzione dell'area sottostante la curva caratteristica intorno al $6\div 7\%$ per ogni aumento di 10 gradi della temperatura delle celle. Ciò comporta una diminuzione del rendimento di conversione di $0,4\%$ per ogni grado di aumento della T_c .

L'area della cella, infine, non influenza il valore della tensione, ma esiste invece una sua proporzionalità diretta con la corrente generata.

Se si utilizza come semiconduttore il silicio, per liberare una coppia elettrone-lacuna è necessaria un'energia corrispondente ad una lunghezza d'onda massima per la radiazione luminosa di $1,15 \cdot 10^{-6}$ m. La frazione eccedente questo limite (collocata dunque nella banda dell'infrarosso), avente cioè lunghezza d'onda maggiore e quindi energia insufficiente, corrisponde a circa il 25% dell'energia complessivamente contenuta nello spettro solare. Il rimanente 75% risulta pertanto in grado di liberare coppie elettrone-lacuna.

Tuttavia, anche i fotoni con troppa energia vengono utilizzati solo parzialmente: in questo caso essi vengono assorbiti, ma la frazione di energia in eccesso rispetto al valore di soglia necessario per l'assorbimento viene convertita in calore e va quindi perduta dal punto di vista elettrico.

Questi fotoni corrispondono alla porzione di radiazione solare caratterizzata da lunghezze d'onda inferiori a $0,4 \cdot 10^{-6}$ m e collocata, quindi, nella banda dell'ultravioletto. Ne segue che, con semiconduttori in silicio, la percentuale di energia solare che è teoricamente possibile convertire in energia elettrica non supera il 44% circa.

Il rendimento delle celle fotovoltaiche in silicio, anche nelle prove in laboratorio, è tuttavia molto distante da questo valore, perché intervengono ulteriori inefficienze di carattere tecnologico. Alcuni fotoni vengono riflessi dalla superficie della cella, altri vengono intercettati dall'elettrodo frontale che deve mediare tra l'esigenza di realizzare un buon contatto ed quella di oscurare il meno possibile la superficie della cella esposta alla luce.

Il problema della riflessione, che per il silicio interessa il 30-40% dei fotoni, può essere fortemente limitato dall'utilizzo di film antiriflettenti di SiO_2 o TiO_2 che vengono depositati direttamente sulla superficie.

Alcune coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima di venir separate dal campo elettrico interno alla giunzione. Queste perdite dipendono principalmente dal grado di purezza del silicio utilizzato. La distanza che le cariche possono percorrere prima di ricombinarsi è detta "lunghezza di diffusione". E' chiaro che coppie create distanti dalla giunzione in una cella in cui i materiali sono di scarsa qualità hanno una maggiore probabilità di ricombinarsi piuttosto che di diffondere fino alla giunzione, venir separate dal campo elettrico ivi esistente e rendere, quindi, disponibile ai morsetti una differenza di potenziale che fa circolare la corrente nel circuito esterno. Parte dell'energia potenziale delle coppie elettrone-lacuna che vengono separate risulta inefficace ai fini della conversione in elettricità e viene persa. Si definisce "efficienza di raccolta delle cariche" il rapporto fra il numero di cariche separate dalla giunzione e il numero di fotoni che colpiscono la cella.

Per poter raccogliere il maggior numero di cariche generate, la giunzione deve essere posizionata in maniera accurata. Infatti materiali diversi presentano differenti proprietà di assorbimento della luce. Alcuni semiconduttori sono buoni assorbitori di luce e possono assorbire tutta la radiazione con energia superiore all'*energy gap* in uno strato di pochi micron di spessore. Questi conduttori sono detti a *gap* diretto (ad esempio *GaAs*). In altri semiconduttori, detti a *gap* indiretto, come il silicio, il processo di assorbimento è più complicato. Il silicio presenta una grande variabilità di assorbimento: nel campo delle lunghezze d'onda dello spettro solare, le cariche sono generate estremamente vicino alla superficie della cella nella regione dell'ultravioletto, mentre risultano a una maggiore profondità nella regione dell'infrarosso. La soluzione di compromesso prevede una giunzione posta molto vicino alla superficie della cella (generalmente alla profondità di $0,1 - 0,2 \cdot 10^{-6} m$) e un materiale sottostante molto puro per poter avere elevati valori della lunghezza di diffusione del materiale e dunque la possibilità di usufruire contemporaneamente anche delle cariche generate nella regione dove la lunghezza d'onda è elevata.

La fabbricazione di una cella fotovoltaica

Per fabbricare una cella fotovoltaica, una sottile fetta di silicio viene pretrattata al fine di eliminare eventuali asperità superficiali e poi sottoposta al processo di formazione della giunzione *p-n*: il drogaggio avviene per diffusione controllata delle impurità in forni (se ad es. si parte dal silicio *p*, si fanno diffondere atomi di fosforo, che rende il semiconduttore di tipo *n*, con una profondità di giunzione pari a $0,3/0,4 \mu m$).

Segue quindi la realizzazione della griglia metallica frontale di raccolta delle cariche elettriche e del contatto elettrico posteriore, per elettrodeposizione o per serigrafia.

Al fine di limitare le perdite per riflessione ottica, si opera la deposizione di un sottile strato di antiriflesso.

Rendimenti tipici delle celle fotovoltaiche

Rendimenti di alcuni tipi di celle:

Germanio = 13%

Solfuro di cadmio = 18%

Silicio = 25%

Tellurio di cadmio = 25%

Fosforo di indio = 26%

Arseniuro di gallio = 27 %

Antimoniuro di alluminio = 27%

I modelli commerciali, a base silicea, più comuni sono:

- Silicio monocristallino, in cui ogni cella è costituita da un wafer prodotto da un lingotto di silicio purissimo;
- Silicio policristallino, in cui il lingotto di cui sopra è prodotto mediante drogaggio chimico;
- Silicio amorfo, in cui gli atomi silicei vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno;
- Eterogiunzione, in cui viene impiegato uno strato di silicio cristallino come superficie di sostegno di uno o più strati amorfi, ognuno dei quali ottimizzato per una specifica sotto-banda di radiazioni;
- Silicio microsferico, in cui si impiega silicio policristallino ridotto in sfere del diametro di circa $0,75\text{ mm}$ ingabbiate in un substrato di alluminio;

Si deve tener conto inoltre del fatto che le ditte costruttrici definiscono le prestazioni dei pannelli fotovoltaici in base alla cosiddetta potenza “di picco”, che identifica la potenza elettrica massima fornita dal pannello quando riceve una insolazione di 1 kW/m^2 e la temperatura delle celle si mantiene a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tali condizioni sono ovviamente nominali, non verificandosi praticamente mai, poiché l’irraggiamento solare sulla terra presenta una intensità di 1 kW/m^2 solo per poco tempo e inoltre un pannello fotovoltaico sottoposto ad una simile radiazione raggiunge la temperatura di circa $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nella pratica il rendimento effettivo del pannello è inferiore a quello ottenibile nelle condizioni nominali “di picco”.

Rendimenti medi effettivi dei sistemi in commercio

Tipicamente per i sistemi in commercio il rendimento effettivo ha i seguenti valori: 16% nei moduli in eterogiunzione, 14% nei moduli in silicio monocristallino, 13% nei moduli in silicio policristallino, 10% nei moduli in silicio microsferico, 6% nei moduli con celle in silicio amorfo.

Praticamente per tenere conto delle varie perdite si considera un rendimento effettivo del 10% per silicio policristallino. Ovvero per avere un kW di potenza di picco [sole perpendicolare] ci vogliono 10 m^2 di pannelli di silicio policristallino.

Per tenere conto del rendimento giornaliero e stagionale ai fini del calcolo della energia media annua si divide ancora per 6 (fattore variabile da zona a zona) per avere una potenza media continuativa sulle 24 ore. Risulta quindi che 10 m^2 di pannelli equivalgono ad una potenza continua 100 Watt nelle 24 ore, pertanto giornalmente si hanno circa 4 KWh .

Tali numeri di massima dipendono ovviamente dal tipo di pannello e dalla località.

CAPACITA' PRODUTTIVA DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Localizzazione dell'impianto	Energia utile per m^2 per moduli in silicio monocristallino $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{ anno})$	Energia utile per m^2 per moduli in silicio policristallino $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{ anno})$	Energia utile per 1 kWp installato $\text{KWh}/(\text{kWp anno})$
NORD	150	130	1080
CENTRO	190	160	1350
SUD	210	180	1500

Elettrolisi dell'acqua tramite celle fotovoltaiche

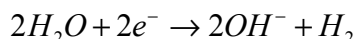
L'acqua viene sottoposta ad un processo (elettrolitico) che la scinde attraverso il passaggio di corrente elettrica continua, prodotta nel nostro caso dai pannelli fotovoltaici, nei due elementi di cui essa è composta: idrogeno ed ossigeno allo stato gassoso.

Considerato che nei conduttori di seconda specie la corrente elettrica viene trasportata dagli ioni e che l'acqua pura conduce poco la corrente elettrica in quanto poco ionizzata, si rende necessaria l'aggiunta di un elettrolita, un composto completamente scisso in ioni a contatto con l'acqua (alcuni *ml* di acido solforico concentrato o alcuni granelli di nitrato di potassio). In questo modo l'acqua conterrà un sufficiente numero di ioni per essere attraversata da una idonea quantità di elettricità. La corrente continua prodotta dal pannello fotovoltaico circolando all'interno del fluido potrà far avvenire delle reazioni di ossido riduzione.

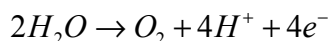
Per effettuare una elettrolisi dell'acqua e poter raccogliere i gas prodotti dalle reazioni redox è necessario quindi aggiungere un elettrolita e disporre di un recipiente costituito da due canne di vetro distinte all'interno di ciascuna delle quali alloggiare un elettrodo, dotate di appositi rubinetti per la raccolta dei gas.

Le reazioni che avvengono agli elettrodi sono le seguenti:

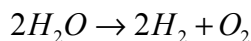
al catodo (polo negativo), avvengono le reazioni di riduzione



all'anodo (polo positivo), avvengono le reazioni di ossidazione



sommando le due semireazioni si avrà la reazione complessiva:



Si osservi che il volume di idrogeno raccolto si presenta doppio rispetto a quello dell'ossigeno.

Il volume dei gas raccolti è direttamente proporzionale alla quantità di elettricità applicata, la quale a sua volta è il risultato del prodotto dell'intensità della corrente per il tempo nel quale questa viene applicata all'acqua.

Lo strumento che meglio consente di far avvenire queste reazioni e raccogliere separatamente i due gas è il voltmetro di Hoffmann corredato da due elettrodi di platino.

III

Classi a cui è rivolta l'esperienza

L'esperienza è consigliata per le classi quinte del liceo.

Prerequisiti

- Gli strumenti di misura e le loro caratteristiche
- Definizione operativa di grandezza fisica
- Le grandezze fisiche fondamentali e derivate
- Il S.I. di misura
- Misura di grandezze elettriche
- Misura diretta e indiretta di una grandezza
- Definizione matematica di grandezze *direttamente* e *inversamente* proporzionali
- Conoscenza dell'effetto fotovoltaico
- Collegamenti di componenti elettriche in serie e parallelo
- Conoscenza dei fenomeni prodotti dal passaggio di corrente elettrica nelle soluzioni
- Conoscenza del significato di reazione di ossidoriduzione

IV

Obiettivi generali

- o Sperimentare una tecnologia che utilizzi l'effetto fotovoltaico per generare corrente elettrica continua.
- o Individuare una procedura che permetta di misurare le grandezze elettriche generate da un pannello fotovoltaico.
- o Esaminare sperimentalmente una possibile applicazione della produzione di elettricità mediante effetto fotoelettrico.
- o Esaminare sperimentalmente gli effetti di due reazioni di ossidoriduzione.
- o Individuare la relazione di proporzionalità tra gas prodotti dall'elettrolisi dell'acqua e quantità di elettricità applicata.
- o Interpretare un grafico per ricavare la relazione di proporzionalità tra le grandezze quantità di elettricità e gas sviluppati.
- o Ricavare da un grafico sperimentale la proporzionalità tra i volumi dei diversi gas sviluppati agli elettrodi a parità di quantità di elettricità.

V

Obiettivi specifici

- Effettuare misure dirette di volumi di gas raccolti
- Effettuare misure dirette ed indirette di grandezze elettriche.
- Realizzare sperimentalmente due reazioni di ossidoriduzione.
- Usare le corrette unità di misura effettuando se necessario le opportune equivalenze.
- Gestire i calcoli numerici in notazione scientifica.
- Costruire un grafico sperimentale e trarre da esso informazioni.
- Confrontare grafici sperimentali diversi ma riferiti a medesime grandezze fisiche.

VI
Materiale e strumentazione occorrente

Fare riferimento alla scheda studenti.

VII
Descrizione generale del procedimento di misura
Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori
Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre
Analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Fare riferimento alla scheda studenti.

VIII
Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire
durante l'esecuzione dell'esperienza

1. La prima parte dell'esperienza può essere realizzata a gruppi di alunni. La parte dell'esperienza relativa alla costruzione dei grafici andrebbe realizzata mettendo a confronto i dati raccolti singolarmente da ogni gruppo.
2. La misura delle grandezze elettriche va eseguita disponendo il pannello in maniera stabile perpendicolarmente ai raggi del sole.
3. Per confrontare la relazione tra inclinazione del pannello rispetto ai raggi solari e quantità di elettricità prodotta è possibile differenziare l'attività dei vari gruppi assegnando a ciascuno di loro un'angolazione differente del pannello e facendo svolgere tutte le fasi dell'esperimento con questa angolazione.
4. Nella parte finale dell'esperienza, quella relativa alla discussione finale e collettiva dell'analisi dei dati e dei risultati ottenuti, si riporteranno i dati raccolti da ciascun gruppo di lavoro sullo stesso grafico. Sarà così possibile confrontare i valori delle diverse quantità di gas sviluppati in relazione alla quantità di elettricità.

Dati e risultati di riferimento

Nella seguente tabella sono riportati i risultati di una esperienza tipo:

Tabella grafico n.1 (X=Volume di idrogeno Y=Quantità di elettricità)

X= Volume di idrogeno (cm ³)	Y=quantità di elettricità (C)
13.0	117
26.8	234
40.8	351
54.0	468

Tabella grafico n.2 (X=Volume di idrogeno Y=Quantità di elettricità)

X= Volume di idrogeno (cm ³)	Y=quantità di elettricità (C)
6.4	57
12.9	114
18.9	171
25.2	228
31.4	285

Tabella grafico n.3 (X=Volume di ossigeno Y=Quantità di elettricità)

X= Volume di ossigeno (cm ³)	Y=quantità di elettricità (C)
cm ³	C
3.0	57
6.0	114
8.8	171
11.7	228
14.2	285

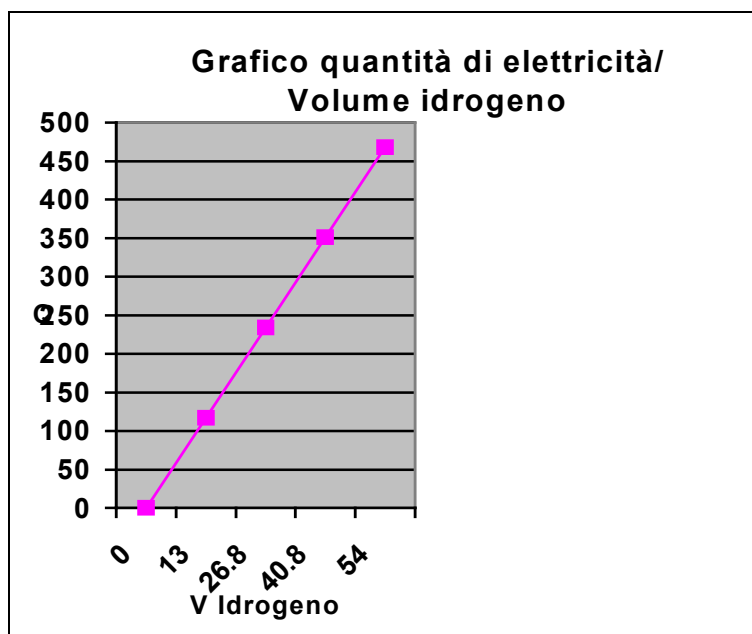


Grafico N. 1

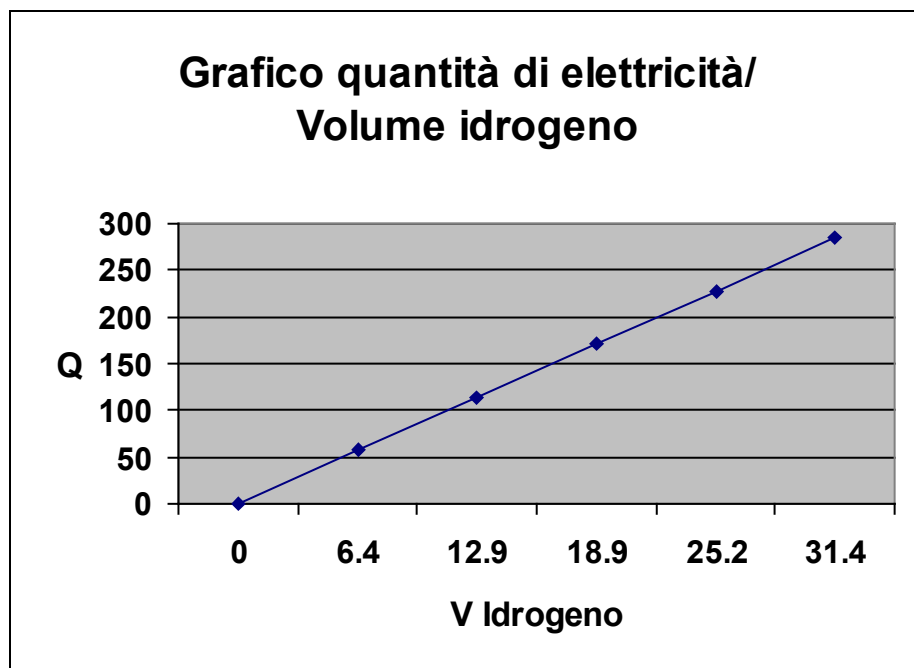


Grafico N. 2

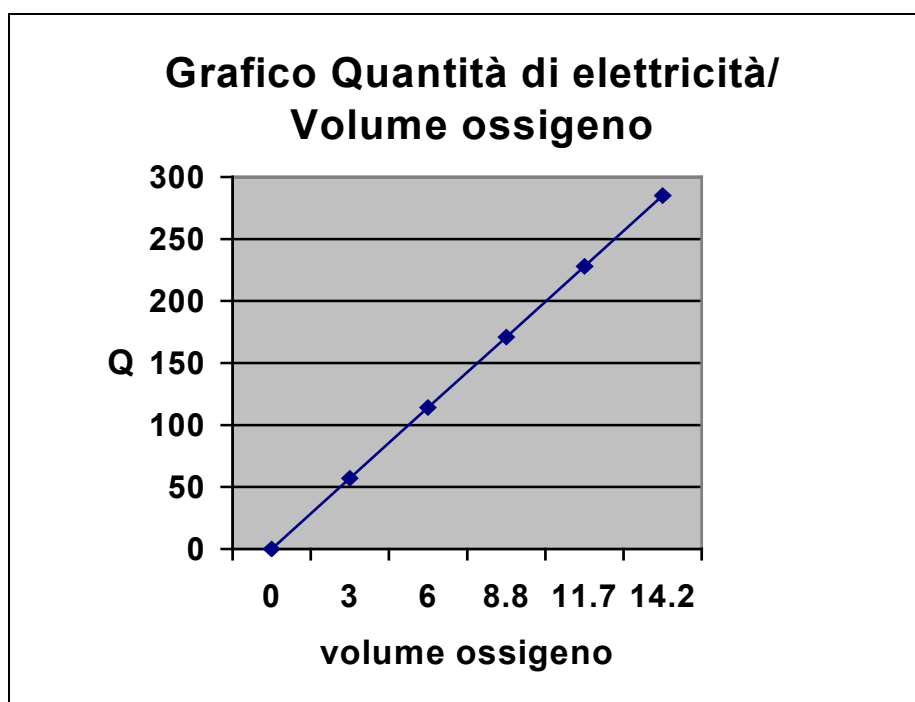


Grafico N. 3

IX

Esempi di questionari e griglie per la valutazione

o Descrivere brevemente l'effetto fotovoltaico

.....
.....

o Come cambiano le grandezze elettriche (ddp applicata, intensità di corrente, quantità di carica elettrica) in relazione all'inclinazione del pannello rispetto ai raggi del sole?

.....
.....

o Quale relazione matematica esiste tra la quantità di gas sviluppati e la quantità di elettricità applicata all'acqua?

.....
.....

o Confrontando i due diversi grafici ottenuti O_2 / Q ed H_2 / Q quali considerazioni vengono sollecitate?

.....
.....
.....

o Quale relazione matematica lega i volumi dei due gas sviluppati agli elettrodi?

.....
.....

X

Bibliografia e siti Web di interesse

1. Califano P.F., Spirito P., "Le celle solari", *Fonti Energetiche Alternative*, Franco Angeli Editore, 1990.
2. Canali C., Prudenzioli M., "Materiali semiconduttori per la conversione fotovoltaica", *Alta Frequenza*, **XLVI**(10), 1977.
3. Cirillo E., "Gli impianti fotovoltaici: le celle solari", *Energie alternative HTE*, **52**, 1988.
4. Grove A. S., *Fisica e tecnologia dei dispositivi a semiconduttore*, Franco Angeli Editore, 1985.
5. IEC standard 60904-3: *Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. Photovoltaic Devices*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1998.
6. Markvart T., *Solar electricity*, John Wiley & Sons, 1994.
7. Markvart T., Castaner L., *Practical Handbook of Photovoltaics*, Elsevier, 2003.

SCHEDA PER GLI STUDENTI

PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE EFFETTO FOTOVOLTAICO,
PRODUZIONE DI IDROGENO E OSSIGENO ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA

I

Titolo dell'esperienza

PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE EFFETTO FOTOVOLTAICO, PRODUZIONE DI IDROGENO E OSSIGENO ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA

Autori

Proff. Sergio Barbadoro e Attilio Maccari

Docenti del ISS Piazza della Resistenza, Monterotondo (Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

Lo sviluppo della moderna tecnologia ha portato allo sfruttamento dell'energia solare in due tipi di applicazioni:

- il solare termico, che consiste nella trasformazione dell'energia solare in calore, attraverso l'utilizzo di un dispositivo (collettore solare) che riscalda l'acqua così da poter essere utilizzata a scopi domestici;
- il solare fotovoltaico, che consiste nella conversione diretta dell'energia solare in elettricità attraverso un fenomeno denominato effetto fotovoltaico, che può essere considerato un tipo particolare di effetto fotoelettrico..

L'effetto fotoelettrico è un fenomeno fisico che si manifesta quando gli elettroni vengono emessi dalla superficie di un conduttore metallico in seguito all'assorbimento dell'energia trasportata dalla luce incidente sulla superficie stessa.

L'effetto è sfruttato nella cellula fotoelettrica in cui gli elettroni emessi da uno dei due poli della cellula, il fotocatodo, migrano verso l'altro polo, l'anodo, per effetto di un campo elettrico applicato.

La scoperta dell'effetto fotoelettrico ebbe un ruolo fondamentale nella crisi della fisica classica, che assegnava alla radiazione elettromagnetica un comportamento prettamente ondulatorio, e nello sviluppo della meccanica quantistica che utilizzava il concetto del dualismo onda-particella. La teoria ondulatoria classica prevedeva infatti che, all'aumentare dell'intensità della luce incidente su una superficie metallica, aumentasse

l'energia degli elettroni emessi. Al contrario, gli esperimenti mostravano che l'energia massima posseduta dai fotoelettroni dipendeva unicamente dalla frequenza della radiazione incidente, e non dall'intensità di illuminazione.

Nel 1905 Albert Einstein spiegò l'effetto fotoelettrico con l'ipotesi che i raggi luminosi trasportassero particelle, chiamate fotoni, di energia $E = h\nu$, dove $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ è la costante di Planck e ν la frequenza dell'onda luminosa. Quando incidono sulla superficie di un corpo metallico, i fotoni cedono la propria energia agli elettroni liberi del conduttore, provocandone l'emissione. Con questa ipotesi l'energia dell'elettrone liberato viene a dipendere solo dalla frequenza del fotone che colpisce l'elettrone.

Il termine effetto fotoelettrico può indicare altri tre processi: la fotoionizzazione, la fotoconduzione e l'effetto fotovoltaico.

La fotoionizzazione consiste nella ionizzazione di un gas da parte di luce o di altra radiazione elettromagnetica: i fotoni, se dotati di energia sufficiente, liberano uno o più elettroni appartenenti ai livelli energetici esterni degli atomi del gas.

Nella fotoconduzione, gli elettroni facenti parte del reticolo cristallino di un solido assorbono energia dai fotoni incidenti e divengono elettroni di conduzione. L'effetto fotovoltaico si manifesta invece con la formazione di coppie elettrone-lacuna quando un fascio di fotoni colpisce la superficie di un materiale semiconduttore. In alcuni dispositivi quest'ultimo effetto viene sfruttato per provocare una differenza di potenziale in corrispondenza della giunzione tra due diversi semiconduttori. Qualunque sia il materiale impiegato, il meccanismo con cui la cella trasforma la luce solare in energia elettrica è essenzialmente lo stesso. Consideriamo per semplicità il caso di una convenzionale cella fotovoltaica di silicio cristallino. L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi. In un cristallo di silicio puro ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi, quindi due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino. Esiste quindi un forte legame covalente fra i due atomi e per spezzarlo occorre una certa quantità di energia. In un solido cristallino, infatti, i livelli energetici che possono assumere gli elettroni periferici sono raggruppati in bande di energia. Nella banda di valenza si trovano i livelli energetici che gli elettroni assumono nell'orbita più esterna degli atomi che formano il solido (elettroni di valenza). Nella banda di conduzione si trovano i livelli energetici della cosiddetta nube elettronica responsabile del fenomeno della conduzione. Tra queste due bande vi è una regione, detta banda proibita, in cui non vi sono livelli energetici permessi agli elettroni. La larghezza della banda proibita, detta anche *energy gap*, è una caratteristica molto importante del semiconduttore, e si denota di solito con E_G ($E_G = E_C - E_V$), essendo E_C l'energia del bordo inferiore della banda di conduzione e E_V l'energia del bordo superiore della banda di valenza. La distribuzione degli elettroni fra le varie bande di energia consentita determina le caratteristiche elettriche dei materiali. Nella banda di valenza gli elettroni sono legati ai singoli atomi del reticolo, vibrano nelle posizioni di equilibrio, ma non possono contribuire alla conduzione, come invece accade per gli elettroni che occupano i livelli energetici della banda di conduzione, che sono liberi di muoversi e, in presenza di un campo elettrico, possono contribuire alla generazione di un flusso di elettricità.

Secondo questo modello, allo zero assoluto tutti gli elettroni si trovano nella banda di valenza. All'aumentare della temperatura e, quindi, all'aumentare dell'energia termica, alcuni elettroni possono assumere valori energetici tipici della banda di conduzione. Naturalmente questo processo si intensifica man mano che si va ad incrementare la temperatura.

Gli elementi conduttori hanno la caratteristica di avere una banda proibita molto ridotta e, in certi casi, le bande energeticamente possibili si sovrappongono: già a temperatura ambiente, numerosi elettroni occupano la banda di conduzione.

Altri elementi presentano una banda proibita molto larga ($4 \div 5 \text{ eV}$, ma anche 10 eV) che, a temperatura ambiente, non permette l'esistenza di elettroni di conduzione. Per questo motivo vengono definiti isolanti.

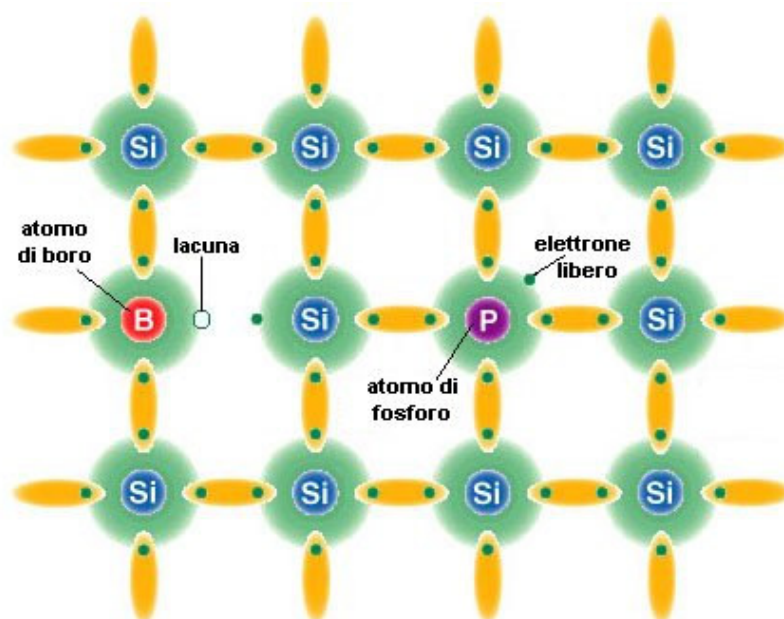
Per i semiconduttori, la banda proibita è dell'ordine di $1 \div 1,5 \text{ eV}$. E' possibile, dunque, che un elettrone di valenza, ricevuta un'opportuna quantità di energia, salti con una certa facilità al livello energetico superiore, dove è poi libero di muoversi sotto l'azione di un eventuale campo elettrico applicato. La lacuna (*hole*) lasciata nella banda di valenza dall'elettrone passato alla banda di conduzione può essere considerata a tutti gli effetti una carica positiva, potendo anch'essa muoversi liberamente in presenza di un campo elettrico.

Nei semiconduttori, dunque, partecipano al fenomeno della conduzione elettrica sia gli elettroni nella banda di conduzione, sia le lacune nella banda di valenza. In questo caso la concentrazione delle cariche negative (elettroni di conduzione) n_i è pari alla concentrazione delle cariche positive (lacune di conduzione) p_i ed è detta concentrazione di portatori intrinseci $n_i = p_i$.

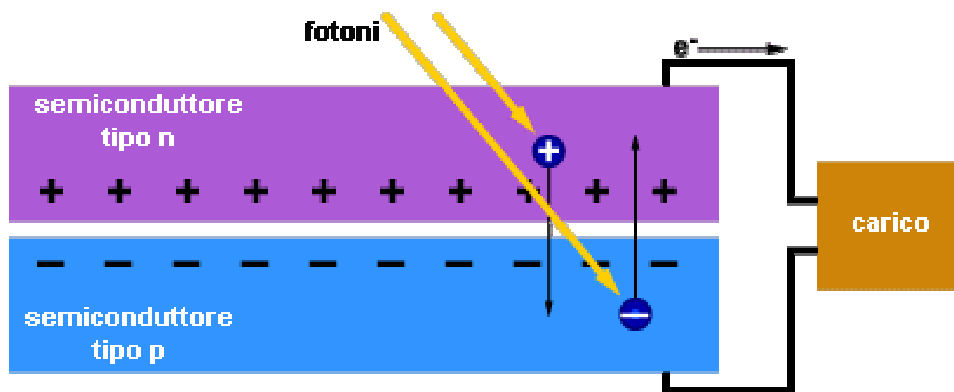
Nei semiconduttori intrinseci, cioè assolutamente puri, gli elettroni e le lacune di conduzione si formano solo a causa della rottura dei legami; in termini del diagramma a bande, l'energia richiesta per rompere un legame corrisponde alla larghezza della banda proibita o *energy gap* E_G .

Dati sperimentali dimostrano che la concentrazione di portatori intrinseci n_i aumenta molto rapidamente con l'aumentare della temperatura (e quindi con l'incremento dell'energia vibrazionale del reticolo) e che, per una data temperatura, n_i diminuisce molto rapidamente col crescere della banda proibita.

In pratica è necessario introdurre nel silicio una piccola quantità di atomi appartenenti al terzo o al quinto gruppo del sistema periodico degli elementi, in modo da ottenere due strutture differenti, una con un numero di elettroni insufficiente, l'altra con un numero di elettroni eccessivo. Questo trattamento viene detto drogaggio (*doping*) e la quantità delle impurità introdotte è dell'ordine di una parte per milione. Generalmente si utilizzano il boro (terzo gruppo) ed il fosforo (quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo *p* (con un eccesso di lacune) ed una di tipo *n* (con un eccesso di elettroni).



Nello strato drogato con fosforo, che ha cinque elettroni esterni o di valenza contro i quattro del silicio, è presente una carica negativa debolmente legata, composta da un elettrone per ogni atomo di fosforo. Analogamente, nello strato drogato con boro, che ha tre elettroni esterni, si determina una carica positiva in eccesso, composta dalle lacune presenti negli atomi di boro quando si legano al silicio. Il primo strato, drogato con atomi del quinto gruppo e quindi a carica negativa, si indica con n , l'altro, a carica positiva, con p , la zona di separazione è detta *giunzione p-n*. In entrambi i casi il materiale risulta elettricamente neutro; tuttavia, ponendo a contatto i due tipi di strutture, tra i due strati si attiva un flusso elettronico dalla zona n alla zona p che, raggiunto il punto di equilibrio elettrostatico, determina un eccesso di carica positiva nella zona n , dovuto agli atomi di fosforo con un elettrone in meno, e un eccesso di carica negativa nella zona p , dovuto agli elettroni migrati dalla zona n . In altri termini gli elettroni presenti nel silicio tipo n diffondono per un breve tratto nel silicio tipo p : il silicio tipo n si carica positivamente, quello di tipo p si carica negativamente e si crea inoltre una regione intermedia detta zona di svuotamento o di carica spaziale. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo dell'ampiezza di pochi micrometri.



Prendendo in considerazione i cristalli di silicio drogati con materiali quali fosforo e boro, si può notare come il fosforo, inserito nel reticolo cristallino, apporta un elettrone in più, mentre il boro presenta un elettrone in meno. Il fosforo appartiene al quinto gruppo del sistema periodico degli elementi; i suoi atomi per quanto si è visto sono detti donatori. Il boro appartiene al terzo gruppo del sistema periodico degli elementi; i suoi atomi sono detti accettori.

Nel primo caso, silicio drogato con fosforo, l'energia di ionizzazione del fosforo nel silicio è molto più piccola dell'energia da fornire al silicio per permettere ad un elettrone di passare nella banda di conduzione superando la banda proibita. Analoghe considerazioni si possono fare per il semiconduttore drogato con boro.

La conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso che incide su una regione di carica spaziale in cui è presente un campo elettrico in grado di separare le cariche elettriche che si producono.

Tale regione può instaurarsi nelle seguenti strutture:

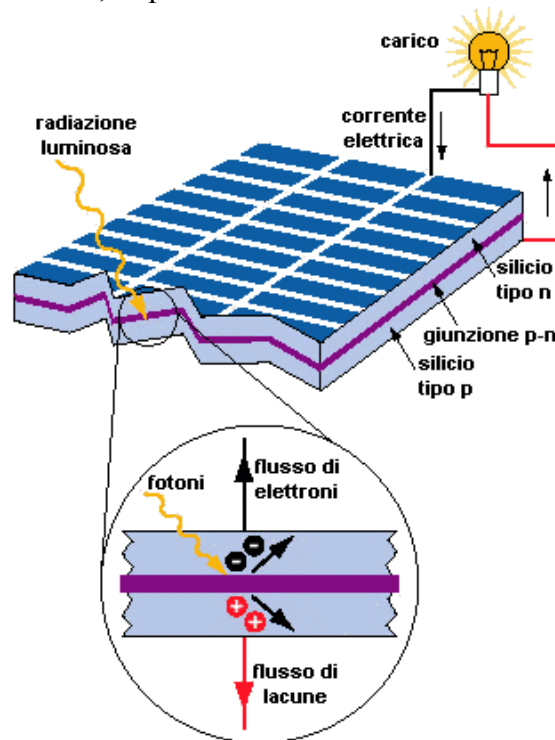
- omogiunzioni o giunzioni p-n;
- strutture metallo-semiconduttore o barriera di Schottky;
- strutture metallo-isolante-semiconduttore (MIS);
- eterogiunzioni ottenute accoppiando due semiconduttori dissimili.

Per semplicità si farà riferimento alle giunzioni $p-n$, il metodo più comunemente usato per creare un campo elettrico interno.

Se un materiale semiconduttore (per esempio silicio) incorpora su un lato atomi droganti di tipo p (boro) e sull'altro atomi di tipo n (fosforo) si ha la formazione della giunzione, perché i due strati di materiale, in origine elettricamente neutri, attraverso il contatto danno luogo ad un campo elettrico. Infatti, a causa del gradiente di concentrazione di carica nei pressi della giunzione, si ha contemporaneamente una diffusione di elettroni in p e di lacune in n . La corrente di diffusione origina una barriera di potenziale tra le due regioni caricandosi p negativamente e n positivamente.

La differenza di potenziale che nasce, detta di diffusione, tende ad opporsi al moto delle cariche e si giunge ad una condizione di equilibrio elettrostatico, funzione del tipo di giunzione e della mobilità di elettroni e lacune.

Per effetto dei flussi opposti delle cariche, i livelli di energia delle bande di valenza e di conduzione della regione drogata con atomi di tipo p si innalzano rispetto a quelli nel materiale n , poiché il livello di energia di Fermi, che originariamente era più alto nel materiale di tipo n , deve rimanere costante attraverso la giunzione in condizione di equilibrio termodinamico. Il risultato è una distorsione delle bande lungo la giunzione. Il campo elettrico interno produce l'effetto diodo. Senza alcuna tensione applicata, non si ha corrente attraverso la giunzione. Se attraverso la giunzione si applica una differenza di potenziale in condizione di polarizzazione diretta (zona p collegata col polo positivo di una batteria e zona n col polo negativo), il campo elettrico si annulla e si ha un aumento esponenziale della corrente; se invece attraverso la giunzione si applica una differenza di potenziale in condizione di polarizzazione inversa, il campo elettrico interno diventa più intenso e non si ha passaggio di corrente (eccezion fatta per quei pochi elettroni che, eccitati termicamente, riescono a superare la barriera costituita dalla giunzione e dalla tensione applicata e creano la cosiddetta corrente di polarizzazione inversa I_0). La giunzione agisce pertanto da diodo. Illuminando la giunzione $p-n$ dalla parte del silicio tipo n , si generano delle coppie elettrone-lacuna in entrambe le zone n e p . Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso generati dall'assorbimento della luce dalle rispettive lacune, spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona n e le lacune verso la zona p). Una volta attraversato il campo, gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo, agendo come un diodo, impedisce loro di invertire la marcia.



Se ora si connette la giunzione $p-n$ con un conduttore, nel circuito esterno si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo strato n verso lo strato p . Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua. E' importante che lo spessore dello strato n sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione. Per il silicio questo spessore deve essere di $0,5\text{ mm}$, mentre lo spessore totale della cella non deve superare i 250 mm . In sintesi la conversione da luce a energia elettrica effettuata dalla cella fotovoltaica avviene essenzialmente perché i portatori di carica liberi (elettroni e lacune), generati dalla luce, sono spinti in direzioni opposte dal campo elettrico interno creato attraverso la giunzione di due semiconduttori drogati in modo diverso. Le cariche positive (lacune) sono spinte verso un lato della cella e le cariche negative (elettroni) verso l'altro. Se le due facce (inferiore e superiore della cella) sono collegate mediante un conduttore, le cariche libere lo attraversano e si osserva una corrente elettrica. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce sotto forma di corrente continua. L'efficienza di conversione per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13% e il 17% , mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del $32,5\%$. I motivi di tale bassa efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati in quattro categorie:

resistenze parassite: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta viene effettuata dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi. Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti.

riflessione: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti;

fotoni troppo o poco energetici: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti possiedono energia sufficiente. D'altra parte alcuni fotoni troppo energetici generano coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo;

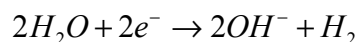
ricombinazione: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi.

Diamo ora un breve cenno all'elettrolisi dell'acqua tramite celle fotovoltaiche. L'acqua viene sottoposta ad un processo (elettrolitico) che la scinde attraverso il passaggio di corrente elettrica continua, prodotta nel nostro caso dai pannelli fotovoltaici, nei due elementi di cui essa è composta: idrogeno ed ossigeno allo stato gassoso. Considerato che nei conduttori di seconda specie la corrente elettrica viene trasportata dagli ioni e che l'acqua pura conduce poco la corrente elettrica in quanto poco ionizzata, si rende necessaria l'aggiunta di un elettrolita, un composto completamente scisso in ioni a contatto con l'acqua (alcuni *ml* di acido solforico concentrato o alcuni granelli di nitrato di potassio).

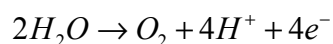
In questo modo l'acqua conterrà un sufficiente numero di ioni per essere attraversata da una idonea quantità di elettricità. La corrente continua prodotta dal pannello fotovoltaico circolando all'interno del fluido potrà far avvenire delle reazioni di ossido riduzione. Per effettuare una elettrolisi dell'acqua e poter raccogliere i gas prodotti dalle reazioni redox è necessario quindi aggiungere un elettrolita e disporre di un recipiente costituito da due canne di vetro distinte all'interno di ciascuna delle quali alloggiare un elettrodo, dotate di appositi rubinetti per la raccolta dei gas.

Le reazioni che avvengono agli elettrodi sono le seguenti:

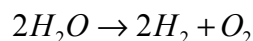
al catodo (polo negativo), avvengono le reazioni di riduzione



all'anodo (polo positivo), avvengono le reazioni di ossidazione



sommando le due semireazioni si avrà la reazione complessiva:



Si osservi che il volume di idrogeno raccolto si presenta doppio rispetto a quello dell'ossigeno.

Il volume dei gas raccolti è direttamente proporzionale alla quantità di elettricità applicata, la quale a sua volta è il risultato del prodotto dell'intensità della corrente per il tempo nel quale questa viene applicata all'acqua.

Lo strumento che meglio consente di far avvenire queste reazioni e raccogliere separatamente i due gas è il voltmetro di Hoffmann corredato da due elettrodi di platino.

III

Descrizione generale dell'esperienza

In questa esperienza si utilizza una tecnologia che sfrutta l'effetto fotovoltaico per generare corrente elettrica continua e si esamina come possibile applicazione pratica la produzione di elettricità mediante effetto fotoelettrico.

La teoria del fenomeno prevede una relazione di proporzionalità tra gas prodotti dall'elettrolisi dell'acqua e quantità di elettricità applicata.

Questo esperimento ci consentirà di effettuare misure dirette di volumi di gas raccolti, misure dirette ed indirette di grandezze elettriche ed infine di realizzare sperimentalmente due reazioni di ossidoriduzione.

IV

Materiale occorrente

- o Pannello fotovoltaico
- o Cavetti di collegamento
- o Voltmetro di Hoffmann completo di elettrodi di platino e cavetti di collegamento
- o Multimetro digitale per misure in corrente continua (a 4 cifre)
- o Cronometro (sensibilità al decimo di secondo)
- o Termometro digitale (sensibilità $0,1^{\circ}C$)

V

Istruzioni per l'assemblaggio

1-Porre il pannello fotovoltaico in prossimità di una finestra e collegare il tester in parallelo; spostare l'inclinazione del pannello fino a leggere sul tester il valore massimo di ddp (in questo modo il pannello è orientato perpendicolarmente ai raggi solari)

2-Introdurre nel voltmetro di Hoffmann i due elettrodi di platino e riempire lo strumento con acqua distillata addizionata con un elettrolita.



Voltmetro di Hoffmann



VI

Descrizione generale del procedimento di misura Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

- 1-Collegare il voltmetro di Hoffmann con il pannello fotovoltaico registrando con il tester in serie il valore dell'intensità di corrente.
- 2-Azzerare il voltmetro e far partire il cronometro mantenendo costantemente il tester collegato in serie
- 3-Senza mai interrompere il passaggio di corrente elettrica annotare ogni 5 minuti i volumi dei due diversi gas raccolti separatamente nei due bracci del voltmetro.
- 4-Ripetere la lettura dei volumi di gas fino a completo riempimento di una delle due scale graduate del voltmetro.
- 5-Dopo aver azzerato il voltmetro ripetere le misure portando l'inclinazione del pannello fotovoltaico a 45° rispetto all'incidenza dei raggi solari.

VII

Elenco dei grafici e delle tabelle da produrre

Calcolare per ogni valore di tempo registrato la quantità di elettricità che ha attraversato l'acqua.

Costruire una tabella dalla quale risultino: la ddp applicata (Volt), l'intensità di corrente (Ampere) e la quantità di elettricità (Coulomb) che ha attraversato l'acqua; i volumi (in cm^3) dei due gas raccolti ogni 5 minuti.

Costruire poi una tabella con le grandezze Volume ossigeno raccolto, Q (quantità di elettricità) ed il loro rapporto K_O , come pure una tabella con le grandezze Volume idrogeno raccolto, Q (quantità di elettricità) ed il loro rapporto K_H .

Infine rappresentare in un grafico le grandezze Volume ossigeno raccolto / Q (quantità di elettricità) ed in un secondo grafico le quantità Volume idrogeno raccolto / Q (quantità di elettricità).

VIII

Guida all' Analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Sulla ddp applicata e l'intensità di corrente l'errore è dato dalla sensibilità del multimetro (5% della misura per il multimetro utilizzato). L'errore sulla quantità di elettricità $Q (=IT)$ è sempre del 5% essendo trascurabile quello sul tempo. L'errore sui volumi di gas raccolti è 0.1 cm^3 . L'errore sulle grandezze derivate K_O e K_H è dato dalle formule.

$$\Delta K_H = K_H \left(\frac{\Delta V_H}{V_H} + \frac{\Delta Q}{Q} \right), \quad \Delta K_O = K_O \left(\frac{\Delta V_O}{V_O} + \frac{\Delta Q}{Q} \right).$$

IX Indicazioni per la relazione

I dati raccolti permettono di verificare la legge di Faraday dell'elettrolisi:

$$M = \frac{M_0}{nzF} IT,$$

dove M è la massa (in grammi) che si deposita agli elettrodi, M_0 la massa (in grammi) di una mole della sostanza che si deposita agli elettrodi, n è il numero di atomi che forma la molecola della sostanza, I l'intensità di corrente (in Ampere), T il tempo di durata dell'elettrolisi (in secondi), z la valenza e F la costante di Faraday ($=96500\text{ C}$).

Assimilando l'idrogeno e l'ossigeno a dei gas perfetti, la massa può essere calcolata con la formula

$$M = \frac{pVM_0}{RT},$$

dove P è la pressione ambiente ($=1\text{ atm}=101500\text{ Pa}$), V è il volume misurato, M_0 la massa molare, R la costante dei gas ($=8.3\text{ J/K}$) e T la temperatura assoluta dell'ambiente ($=273,15 + t$, dove t è la temperatura Celsius). Dalle due formule si può calcolare il valore teorico del rapporto $K=Q/V$:

$$K = \frac{Q}{V} = \frac{nzpF}{RT}.$$

Si noti che il rapporto K risulta essere direttamente proporzionale alla valenza ($z=1$ per l'idrogeno e 2 per l'ossigeno, mentre $n=2$ in tutti e due i casi). Il valore di K per l'idrogeno è la metà di quello dell'ossigeno

$$K_O = \frac{Q}{V} = \frac{4pF}{RT}, \quad K_H = \frac{Q}{V} = \frac{2pF}{RT}.$$

Nel grafico Volume/Quantità di carica si osserva che i dati si dispongono in linea retta (compatibilmente con gli errori sperimentali) e, misurando il coefficiente angolare della retta, per esempio con il metodo delle rette di minima e massima pendenza, si può verificare che il suo valore coincide, entro gli errori sperimentali, con il valore teorico K . L'incertezza sul valore teorico K è determinato solo dagli errori percentuali sulla temperatura e sulla pressione ambiente:

$$\Delta K = K \left(\frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta p}{p} \right)$$

X
Esempio di questionario

o Descrivere brevemente l'effetto fotovoltaico

.....
.....

o Come cambiano le grandezze elettriche (ddp applicata, intensità di corrente, quantità di carica elettrica) in relazione all'inclinazione del pannello rispetto ai raggi del sole?

.....
.....

o Quale relazione matematica esiste tra la quantità di gas sviluppati e la quantità di elettricità applicata all'acqua?

.....
.....

o Confrontando i due diversi grafici ottenuti O_2 / Q ed H_2 / Q quali considerazioni vengono sollecitate?

.....
.....
.....

o Quale relazione matematica lega i volumi dei due gas sviluppati agli elettrodi?

.....
.....

SCHEDA PER IL DOCENTE

PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE CELLE A COMBUSTIBILE ALIMENTATE DA IDROGENO E OSSIGENO PRODOTTI ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA

I

Titolo dell'esperienza

**PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE CELLE
A COMBUSTIBILE ALIMENTATE DA IDROGENO E OSSIGENO
PRODOTTI ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA**

Autori

Proff. Sergio Barbadoro e Attilio Maccari

Docenti del ISS Piazza della Resistenza, Monterotondo (Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

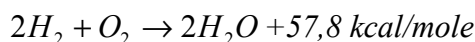
Il fotovoltaico alla base di un nuovo modo di produrre energia

Il nostro pianeta è ora come mai scosso dal problema energetico, tra poco meno di una ventina di anni le riserve mondiali di petrolio diventeranno sempre più scarse ed il costo al barile di quest'ultimo sempre più alto. Si prevede addirittura che se India e Cina continueranno a svilupparsi con il ritmo impressionante degli ultimi anni (che li porterà a consumare quantità sempre più ingenti di petrolio), la crisi energetica potrebbe presentarsi già intorno al 2015.

Studiosi di tutto il mondo stanno quindi cercando di trovare un degno sostituto all'oro nero. La tecnologia degli impianti fotoelettrici potrebbe costituire il modo migliore per produrre energia elettrica, superando il problema della dipendenza dai combustibili fossili, con la produzione di una energia più pulita e soprattutto senza alcun problema di reperibilità.

Idrogeno = energia

Facendo reagire l'idrogeno e l'ossigeno si possono ricavare grandi quantità di energia e produrre come gas di scarto vapore acqueo



Questo semplice processo dal quale si ottiene la stessa energia che viene consumata nel processo inverso (la scissione dell'acqua) è reso possibile dalle celle a combustibile.

L'idrogeno, ovvero l'elemento costituente più del 70% del nostro pianeta ed il 90% dell'Universo, potrebbe così divenire il centro della prossima rivoluzione industriale, sostituendo gas, petrolio e carbone sia nelle nostre case sia nelle nostre auto.

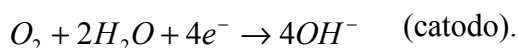
Ma come si può ricavare l'idrogeno?

L'idrogeno si trova in grandi quantità legato all'ossigeno per formare acqua, oppure legato al carbonio all'interno del carbone, del petrolio e del metano, ma mai libero e pronto all'uso. Oggi il 99% dell'idrogeno viene estratto dai combustibili fossili attraverso un processo detto *reforming*. Il gas naturale e il carbone vengono fatti reagire con vapore acqueo ad alte temperature in un catalizzatore che cattura atomi di idrogeno. Il prodotto di scarto di questo processo è però l'anidride carbonica, uno dei principali responsabili dell'inquinamento atmosferico.

L'elettrolisi è l'unica alternativa ecologica al *reforming* ed inoltre all'elettrolisi può essere appunto associata la tecnologia dei pannelli fotovoltaici.

Cella a combustibile

Una volta ricavato l'idrogeno si può iniziare a pensare alla produzione delle celle a combustibile. Questi sono dei veri e propri apparecchi elettrochimici che convertono in elettricità l'energia chimica della reazione tra H_2 ed O_2 . A differenza di una cella elettrochimica o di una batteria, una cella a combustibile non si esaurisce e non richiede ricarica; funziona fintanto che vengono forniti ai due elettrodi un carburante e un agente ossidante. Il combustibile, in genere idrogeno, ammoniaca o idrazina, viene utilizzato all'anodo, cioè all'elettrodo positivo, mentre l'ossidante, spesso aria o ossigeno, viene fornito al catodo. I due elettrodi della cella sono separati da un conduttore ionico elettrolitico. Nella cella idrogeno-ossigeno, che prevede l'uso di un idrossido di metallo come elettrolita, all'anodo e al catodo si sviluppano le seguenti reazioni



Gli elettroni generati all'anodo si muovono lungo un circuito esterno e passano al catodo, mentre gli ioni OH^- prodotti al catodo giungono attraverso l'elettrolita all'anodo, dove si combinano con l'idrogeno, formando acqua che deve essere rimossa durante il funzionamento per evitare l'allagamento dell'apparecchio. Il voltaggio erogato da una cella di questo tipo è di circa 1,2 V. Le celle a idrogeno-ossigeno che usano membrane a scambio ionico o elettroliti dell'acido fosforico furono usate rispettivamente nei programmi spaziali Gemini e Apollo. Attualmente sono in via di sviluppo celle a combustibile che utilizzano elettroliti di carbonati fusi. L'elettrolita che a temperatura ambiente si presenta allo stato solido, si trasforma in liquido alla temperatura di funzionamento (tra i 650 e gli 800 °C).

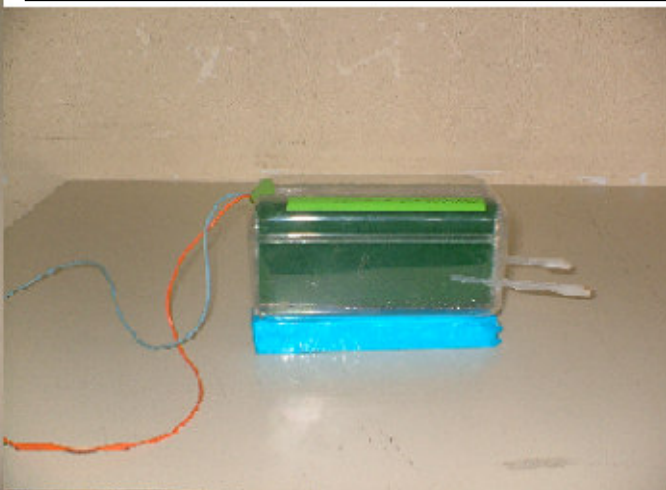
Simili celle presentano il vantaggio di utilizzare come carburante monossido di carbonio, e ciò permette di usare anche miscele di monossido di carbonio e idrogeno prodotte durante la gassificazione del carbone. Di largo impiego sono anche le celle a combustibile solido in cui l'elettrolita è diossido di zirconio solido, un composto che a circa $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ presenta una buona conducibilità elettrica, e il carburante può essere idrogeno, monossido di carbonio o metano, assieme ad aria o ossigeno forniti gradualmente al catodo. L'elevata temperatura di funzionamento delle celle a ossido solido permette l'uso diretto di metano, un combustibile che non richiede l'impiego di costosi catalizzatori al platino. Le celle a ossido solido hanno il vantaggio di essere relativamente poco sensibili alle impurità del combustibile, quali ad esempio i composti di zolfo e azoto, che riducono la funzionalità di altri sistemi simili. La temperatura relativamente alta di utilizzo sia delle celle a carbonati fusi sia di quelle a ossidi solidi facilita la rimozione di acqua prodotta dalla reazione sotto forma di vapore. Nelle celle a bassa temperatura, al contrario, si deve provvedere artificialmente alla rimozione dell'acqua dalla camera dell'anodo.

Una cella a combustibile ideale

L'ipotesi sperimentale è quella di progettare e realizzare una cella a combustibile ideale, ovvero totalmente ecologica e con la possibilità di produrre energia pulita a costo zero. Ciò è reso possibile utilizzando luce solare e producendo energia attraverso i pannelli fotovoltaici, questa corrente elettrica viene poi convogliata in un voltmetro di Hoffmann, attraverso il quale, l'acqua è scomposta in idrogeno ed ossigeno. Tramite una cella a combustibile l'idrogeno viene combinato con l'ossigeno sotto l'ausilio di un catalizzatore al platino e si ottiene nuovamente corrente elettrica.



Prototipo di cella a combustibile ideata nel nostro laboratorio.

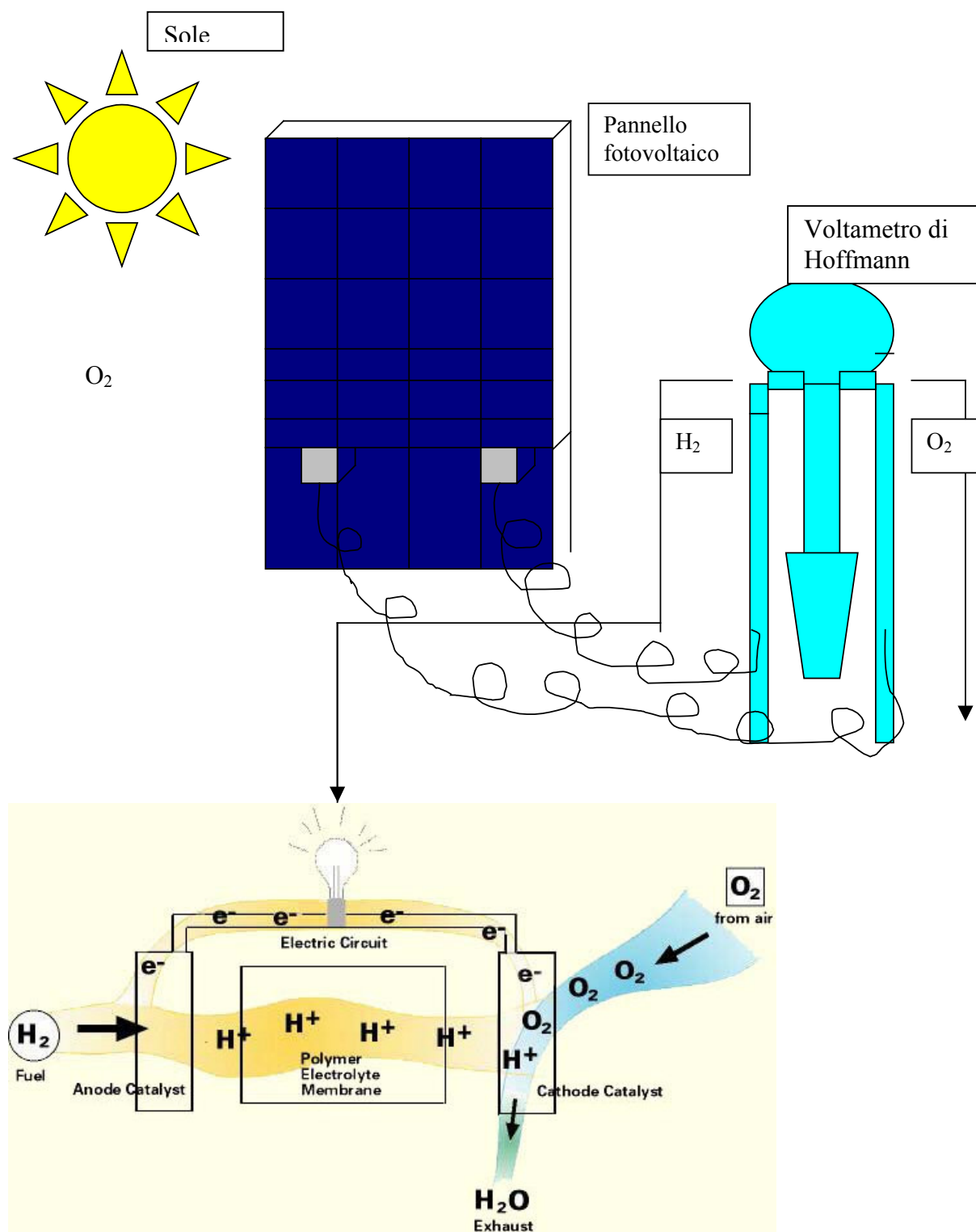


La prima cella di William Robert Grove

La prima cella a combustibile (una batteria voltaica), fu inventata dal Gallese Grove ed era in grado di generare una corrente di intensità circa 12 A con una tensione di circa $1,8\text{ Volt}$. Questa cella possedeva quasi il doppio del voltaggio della cella Daniell e fu scelta per il primo telegrafo americano (1840-1860), perché offriva un output di corrente molto forte. Quando l'attività del telegrafo aumentò, si scoprì che la cella di Grove scaricava gas di biossido di azoto velenoso.

Gli uffici del telegrafo si riempirono di gas provenienti dalle batterie fumanti di Grove, mentre la necessità di un voltaggio costante divenne critica per uno strumento così limitato (quando la cella si scaricava, l'acido nitrico si esauriva ed il voltaggio era ridotto). Al tempo della Guerra Civile Americana, la cella di Grove fu perciò sostituita dalla pila Daniell.

Impianto ideale di cella a combustibile



La seconda cella di Grove

La seconda cella di Grove, una “batteria voltaica gassosa”, universalmente riconosciuta come la progenitrice delle moderne celle a combustibile fu realizzata nel 1839 dallo scienziato gallese. Basando i suoi esperimenti sul fatto che, inviando corrente elettrica attraverso l’acqua, quest’ultima si divide nelle sue parti componenti, idrogeno ed ossigeno, Grove invertì la reazione unendo idrogeno ed ossigeno per produrre elettricità ed acqua. L’ossigeno e l’idrogeno contenuti nei tubi all’interno dei recipienti reagiscono in una soluzione di acido solforico per formare acqua. Gli elettrodi separano poi l’acqua in ossigeno ed idrogeno nel tubo superiore, utilizzato come voltmetro. In un articolo, apparso sul *Philosophical Magazine*, Grove dimostrò che le sue *fuel cells* funzionavano, ma, dato che Grove non aveva inclinazioni imprenditoriali, il loro utilizzo pratico non venne però realizzato (il termine “cella a combustibile” fu coniato in realtà più tardi, nel 1889, da Ludwig Mond e Charles Langer).

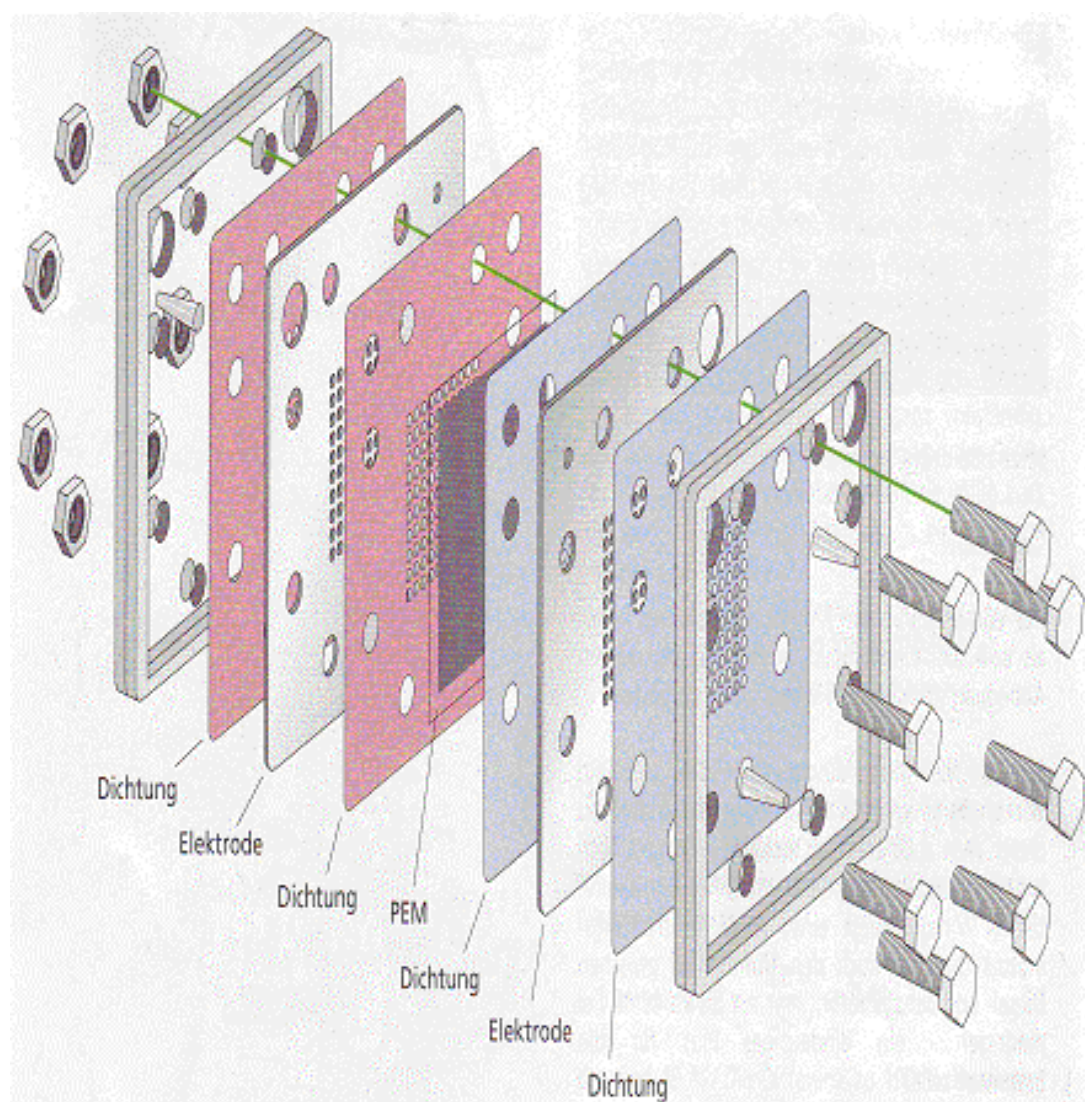
Il progetto di Grove prese consistenza quando lo scienziato immerse due strisce di platino circondate da tubi stretti contenenti idrogeno e ossigeno in un elettrolita acido, inventando il prototipo della cella ad acido fosforico. Sfortunatamente, Grove fu ostacolato dall’inconsistenza delle prestazioni ottenute dalla cella, ma comprese ugualmente l’importanza del contatto trifasico (gas, elettrolita, platino) per la generazione di energia. Passò perciò la maggior parte del suo tempo alla ricerca di un elettrolita che producesse una corrente più costante e ne individuò diversi, sebbene tutti ugualmente incapaci di dare risultati soddisfacenti. Intuì anche il potenziale commerciale della cella, nel momento in cui l’idrogeno avesse sostituito il carbone e la legna come fonte primaria di energia.

Nel corso dei suoi esperimenti, Grove dimostrò che la produzione di corrente richiede sia idrogeno che ossigeno e sollevò anche delle questioni sulla produzione del calore, che tuttavia non riuscì a risolvere con le attrezzature e i risultati teorici a sua disposizione e che divennero dei veri e propri rebus per i ricercatori che si cimentarono dopo di lui nello sviluppo della tecnologia delle celle. Un amico più anziano di Grove, John P. Gassiot (1797-1877), lo influenzò e lo aiutò molto, incoraggiandolo a proseguire la carriera scientifica all’inizio degli anni ’40, quando il conflitto tra il desiderio di continuare la ricerca e quello di dedicarsi alla professione legale era più forte. Nello stesso periodo (1840-1847), divenne professore di Filosofia Sperimentale alla London Institution di Londra. Celebri restano le sei lezioni di un corso tenuto nel 1843 sulla “Correlazione delle Forze Fisiche” dove espresse le sue idee sulla conservazione dell’energia con un anno di anticipo rispetto al celebre documento “Sulla conservazione della forza” del fisico tedesco Hermann von Helmholtz.

Grove dimostrò la dissociazione termica degli atomi all’interno di una molecola e mostrò che il vapore a contatto con un filo di platino fortemente riscaldato viene decomposto in idrogeno ed ossigeno in una reazione reversibile. Fu anche il primo a dimostrare che l’elettrolisi, con una corrente ad alta tensione, può aver luogo attraverso il vetro sottile.

Negli anni ’40 del secolo s’interessò molto alla scienza fotografica. Nel 1841, presso la London Institution, sperimentò (con la collaborazione di J. P. Gassiot) i piatti dagherrotipi per la stampa fotomeccanica. Un documento sul “processo voltaico per imprimere piatti dagherrotipi” fu letto ad una riunione della London Electrical Society, il 17 agosto 1841, e le stampe che esibì avrebbero dovuto portare l’iscrizione “disegnate dalla luce, incise dall’elettricità”.

Schema di una cella a combustibile

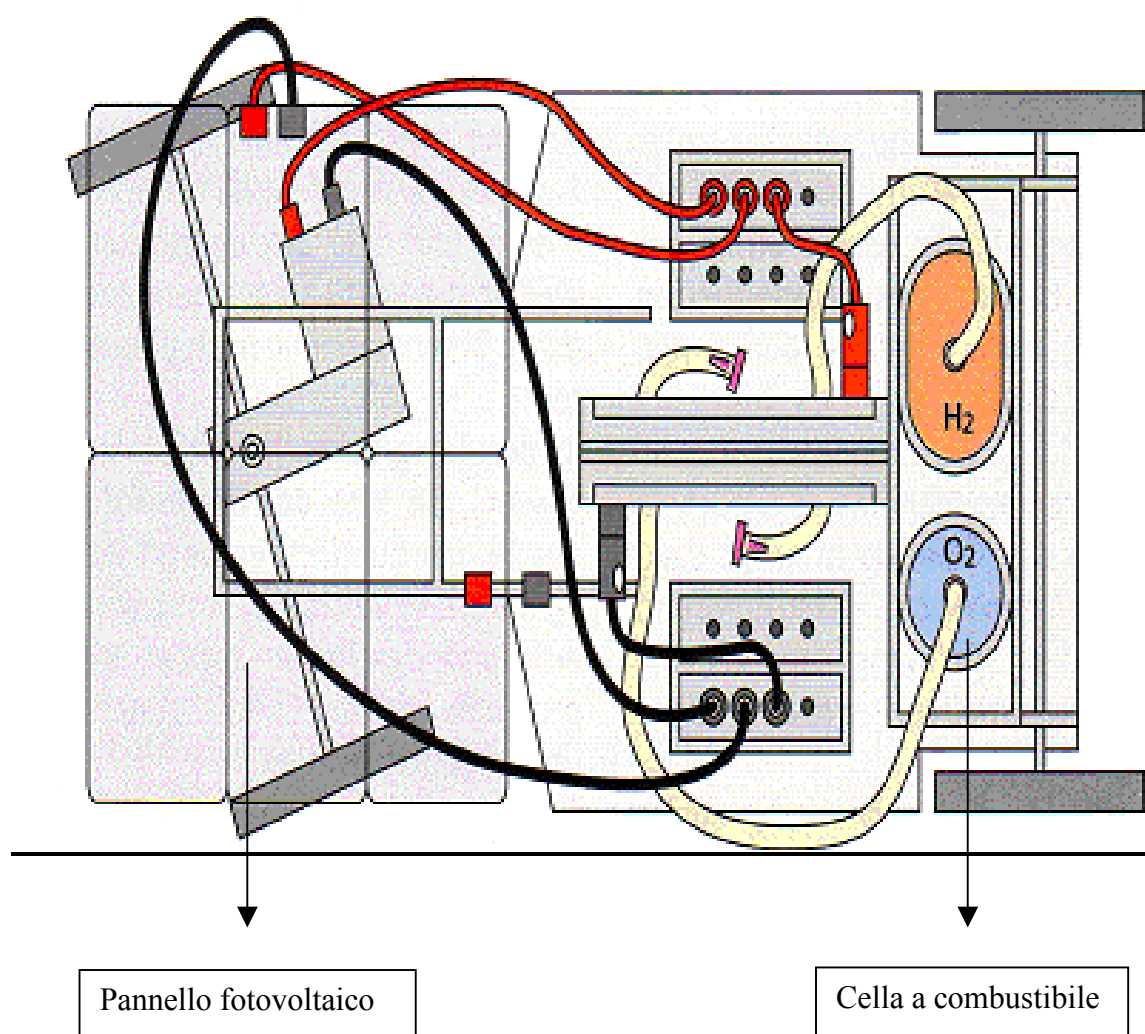


La storia della cella a combustibile

I ricercatori hanno lavorato sullo schema di base descritto da Grove per oltre 150 anni e hanno apportato numerose variazioni sul combustibile, sugli elettrodi e sugli elettroliti. Lo svizzero/tedesco Christian Friedrich Schonbein pubblicò il suo articolo sulla cella sul “Philosophical Magazine” del gennaio 1839. A quel tempo, Grove stava lavorando sulle serie o connessioni parallele della sua potente batteria a zinco-platino. In un post scriptum al suo articolo pubblicato sul “Philosophical Magazine” del febbraio 1839, Grove indicò la possibilità intrinseca alla reazione idrogeno-ossigeno di generare elettricità. Nel 1842, Grove presentò la cella a combustibile in tutti i suoi dettagli. Più tardi, celle a combustibile come quelle costruite da William White Jacques sostituirono l'acido fosforico H_3PO_4 nel bagno elettrolitico.

Una ricerca significativa sulla cella a combustibile fu fatta in Germania negli anni Venti del ventesimo secolo e gettò le basi per lo sviluppo successivo del ciclo del carbonato e delle celle ad ossido solido. Forse la ricerca più importante sulle celle a combustibile del secolo scorso fu condotta da Francio T. Bacon (diretto discendente dell'omonimo filosofo) che sviluppò la "cella di Bacon". Bacon sostituì un elettrolita acido con un elettrolita alcalino (idrossido di potassio- KOH) che funziona sia come acido sia come elettrolita senza essere troppo corrosivo sugli elettrodi. Il progetto di Bacon fu scelto dalla NASA per la scorta di energia per la missione Apollo e per lo Shuttle. Un serio interesse per le celle a combustibile come generatori ci fu solo negli anni '60, quando furono scelte per il programma spaziale degli Usa in sostituzione dell'energia nucleare, considerata troppo rischiosa, e al posto dell'energia solare, giudicata troppo costosa. Le celle a combustibile hanno fornito energia alle navicelle spaziali Gemini ed Apollo ed elettricità e acqua allo Space Shuttle.

Schema macchina alimentata a fotovoltaico e cella a combustibile



III

Classi a cui è rivolta l'esperienza

L'esperienza è consigliata per le classi quinte del liceo.

Prerequisiti

- Il S.I. di misura
- Misura di grandezze elettriche
- Misura diretta e indiretta di una grandezza
- Definizione matematica di grandezze *direttamente* e *inversamente* proporzionali
- Conoscenza dell'effetto fotovoltaico
- Collegamenti di componenti elettriche in serie e parallelo
- Conoscenza dei fenomeni prodotti dal passaggio di corrente elettrica nelle soluzioni
- Conoscenza del significato di reazione di ossidoriduzione

IV

Obiettivi generali

- o Sperimentare una tecnologia che utilizzi le celle a combustibile per generare corrente elettrica continua.
- o Individuare una procedura che permetta di misurare le grandezze elettriche generate da una cella a combustibile.
- o Esaminare sperimentalmente una possibile applicazione della produzione di elettricità mediante celle a combustibile.
- o Esaminare sperimentalmente gli effetti di due reazioni di ossidoriduzione.

V

Obiettivi specifici

- Effettuare misure dirette di volumi di gas raccolti
- Effettuare misure dirette ed indirette di grandezze elettriche.
- Realizzare sperimentalmente reazioni di ossidoriduzione.
- Usare le corrette unità di misura effettuando se necessario le opportune equivalenze.

VI

Materiale e strumentazione occorrente

Fare riferimento alla scheda studenti.

VII

Descrizione generale del procedimento di misura Grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Analisi dei dati e alla determinazione delle grandezze derivate con relativi errori

Fare riferimento alla scheda studenti.

VIII

Eventuali difficoltà operative ed accorgimenti da seguire durante l'esecuzione dell'esperienza

1. La prima parte dell'esperienza può essere realizzata ricorrendo alla scheda relativa all'elettrolisi dell'acqua con pannelli fotovoltaici.
2. Prima di iniziare il collegamento dei gas con la cella a combustibile si raccomanda di raccoglierne la quantità massima dei due gas.
3. La misura delle grandezze elettriche va eseguita mantenendo il flusso dei gas costante. (mL /minuto),
4. Per evidenziare al meglio le potenzialità della cella a combustibile collegare alla stessa un piccolo motore elettrico che con un movimento di una pala confermi gli effetti energetici delle reazioni di ossidoriduzione tra i due gas.
5. Nella parte finale dell'esperienza, quella relativa alla discussione finale e collettiva dell'analisi dei dati e dei risultati ottenuti, si riporteranno i dati raccolti da ciascun gruppo di lavoro e si solleciterà la ricerca di una relazione tra flusso del gas e grandezze elettriche sollecitando anche il calcolo previsionale sulle quantità di idrogeno necessarie per mantenere attivo un motore elettrico di una certa potenza per un definito numero di ore.

Dati e risultati di riferimento

Macchina alimentata con fotovoltaico e cella a combustibile

	Pannello		Cella a combustione	
	V	A	V	A
Ore 10:30	3.06	0.44		
Ore 11:00	3.04	0.42		
Ore 11:30	3.03	0.39		
Ore 12:00	3.20	0.42		

Pannello fotovoltaico collegato al Voltmetro di Hoffman

	V	A	V	A
Ore 10:30	10.30	3.58		
Ore 11:00	18.90	3.59		
Ore 11:30	18.92	3.22		
Ore 12:00	19.70	2.74		

Apparecchiatura per elettrolisi dell'acqua con cella a combustibile
e produzione di elettricità con cella a combustibile

Uscita pannello solare

Uscita cella a combustibile

	V	A	V	A
Ore 10:30	1.68	0.47	0.53	0.08
Ore 11:00	1.66	0.46	0.55	0.12
Ore 11:30	1.65	0.43	0.57	0.12
Ore 12:00	1.63	0.42	0.56	0.12

Macchina alimentata con fotovoltaico e cella a combustibile

Pannello fotovoltaico

Cella a combustione

	V	A	V	A
Ore 8:30	3.36	0.24		
Ore 9:00	3.35	0.26		
Ore 9:30	3.33	0.22		
Ore 10:00	3.25	0.43		
Ore 10:30	3.20	0.35		
Ore 10:45	3.22	0.33		
Ore 11:00	3.21	0.32		
Ore 11:15	3.26	0.30		
Ore 11:30	3.27	0.32		
Ore 11:45	3.23	0.33		
Ore 12:00	3.22	0.32		
Ore 12:15	3.20	0.30		

Pannello Fotovoltaico collegato al voltmetro di Hoffman

	V	A
Ore 8:30	20.00	1.78
Ore 9:00	19.87	1.79
Ore 9:30	18.80	2.16
Ore 10:00	19.32	2.71
Ore 10:30	19.23	2.56
Ore 10:45	19.22	2.40
Ore 11:00	19.23	2.24
Ore 11:15	19.28	2.20
Ore 11:30	19.47	2.24
Ore 11:45	19.01	2.30
Ore 12:00	19.06	2.40
Ore 12:15	18.47	1.43

Apparecchiatura per elettrolisi dell'acqua con cella a combustibile
e produzione di elettricità con cella a combustibile

	Uscita pannello solare		Uscita cella a combustibile	
	V	A	V	A
Ore 8:30	1.62	0.25	0.05	0.05
Ore 9:00	1.61	0.24	0.11	0.07
Ore 9:30	1.62	0.27	0.13	0.08
Ore 10:00	1.62	0.30	0.48	0.10
Ore 10:30	1.62	0.28	0.47	0.08
Ore 10:45	1.60	0.32	0.52	0.13
Ore 11:00	1.61	0.25	0.53	0.13
Ore 11:15	1.50	0.29	0.54	0.11
Ore 11:30	1.61	0.28	0.26	0.07
Ore 11:45	1.58	0.52	0.30	0.10
Ore 12:00	1.60	0.31	0.24	0.10
Ore 12:15	1.49	0.28	0.55	0.14

Giorno giovedì
Macchina alimentata con fotovoltaico e cella a combustibile

	Pannello fotovoltaico		Cella a combustione	
	V	A	V	A
Ore 10:25	3.47	0.10	1.86	0
Ore 10:50	3.31	0.34	1.57	0.03
Ore 11:05	3.01	0.47	1.40	0.04
Ore 11:20	3.22	0.36	1.71	0
Ore 11:35	3.11	0.100	1.29	0.01
Ore 11:45	3.53	0.36	1.88	0
Ore 12:00	1.82	0.09	1.55	0.01
Ore 12:15	3.38	0.07	1.56	0

Pannello Fotovoltaico collegato al voltmetro di Hoffman

	V	A
Ore 10:25	21,00	0.66
Ore 10:50	20.5	0.77
Ore 11:05	18.65	0.78
Ore 11:20	19.35	0.90
Ore 11:35	17.30	1.53
Ore 11:45	18.72	0.35
Ore 12:00	18.21	0.24
Ore 12:15	18.62	0.23

Apparecchiatura per elettrolisi dell'acqua con cella a combustibile
e produzione di elettricità con cella a combustibile

	Uscita pannello solare		Uscita cella a combustibile	
	V	A	V	A
Ore 10:25	1.63	0.50	0.43	0.10
Ore 10:50	1.74	0.90	0.19	0.10
Ore 11:05	1.63	0.40	0.37	0.08
Ore 11:20	1.56	0.26	0.20	0.12
Ore 11:35	1.48	0.90	0.52	0.10
Ore 11:45	1.57	0.03	0.18	0.14
Ore 12:00	1.47	0.02	0.50	0.09
Ore 12:15	1.58	0.22	0.49	0.12

Macchina alimentata con fotovoltaico e cella a combustibile

	Pannello fotovoltaico		Cella a combustione	
	V	A	V	A
Ore 9:30	3.37	0.23	0	0
Ore 10:00	3.36	0.43	1.67	0.01
Ore 10:30	3.23	0.35	1.72	0.01
Ore 11:00	3.28	0.36	1.50	0

Pannello Fotovoltaico collegato al voltmetro di Hoffman

	V	A
Ore 9:30	19.94	0.14
Ore 10:00	19.73	0.14
Ore 10:30	19.10	1.95
Ore 11:00	19.93	0.21

Apparecchiatura per elettrolisi dell'acqua con cella a combustibile
e produzione di elettricità con cella a combustibile

	Uscita pannello solare		Uscita cella a combustibile	
	V	A	V	A
Ore 9:30	1.53	0.30	0.08	0.02
Ore 10:00	1.52	0.33	0.30	0.02
Ore 10:30	1.50	0.33	0.43	0.03
Ore 11:00	1.49	0.33	0.51	0.03

Macchina alimentata con fotovoltaico e cella a combustibile

Pannello fotovoltaico			Cella a combustione	
	V	A	V	A
Ore 9:30	3.20	0.09	1.38	0.32
Ore 10:00	1.26	0.03	1.42	0.53
Ore 10:30	1.63	0.07	1.46	0.62
Ore 11:00	1.61	0.06	1.47	0,65
Ore 11:30	3.28	0.02	0.90	0.39
Ore 12.00	1.71	0.01	1..46	0.48

Pannello Fotovoltaico

	V	A
Ore 9:30	19.00	0.90
Ore 10:00	18.89	0.5
Ore 10:30	18.96	0.28
Ore 11:00	18.16	0.10
Ore 11:30	18.95	0.38
Ore 12.00	18.68	0.25

Apparecchiatura per elettrolisi dell'acqua con cella a combustibile e produzione di elettricità con cella a combustibile

Uscita pannello solare			Uscita cella a combustibile	
	V	A	V	A
Ore 9:30	1.51	0.04	0.06	0.01
Ore 10:00	1.51	0.06	0.06	0.01
Ore 10:30	1.50	0.04	0.07	0.01
Ore 11.00	1.15	0.03	0.17	0.01
Ore 11:30	1.49	0.02	0.19	0.02
Ore 12.00	1.50	0.02	0.22	0.02

Caratteristiche tecniche del pannello solare collegato al voltmetro di Hoffmann:
Siemens 53W 3,05 A 21,7V classe C

IX
Esempi di questionari e griglie per la valutazione

o Descrivere il procedimento che permette di ottenere elettricità da idrogeno ed ossigeno?

.....
.....

o Qual è l'origine dell'energia elettrica prodotta dalla cella a combustibile?

.....
.....

o Che relazione esiste tra grandezze elettriche, elettricità consumata e pressione dei gas idrogeno ed ossigeno?

.....
.....
.....
.....

X
Bibliografia e siti Web di interesse

1. Marco Noro, *Celle a combustibile, Tecnologia e possibilità applicative*, 2006, Dario Flaccovio Editore
2. Jeremy Rifkin, *Economia all'idrogeno*, 2003, Mondatori.
www.miniwatt.it, www.h2it.org, www.fuelcells.org/, siti ricchi di molte informazioni sui problemi energetici e le celle a combustibile in particolare.

SCHEDA PER GLI STUDENTI

PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE CELLE A COMBUSTIBILE ALIMENTATE DA IDROGENO E OSSIGENO PRODOTTI ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA

I

Titolo dell'esperienza

**PRODUZIONE DI CORRENTE ELETTRICA MEDIANTE CELLE
A COMBUSTIBILE ALIMENTATE DA IDROGENO E OSSIGENO
PRODOTTI ATTRAVERSO ELETTROLISI DELL'ACQUA**

Autori

Proff. Sergio Barbadoro e Attilio Maccari

Docenti del ISS Piazza della Resistenza, Monterotondo (Roma)

II

Breve descrizione del fenomeno fisico e finalità dell'esperienza

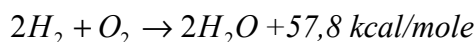
Il fotovoltaico alla base di un nuovo modo di produrre energia

Il nostro pianeta è ora come mai scosso dal problema energetico, tra poco meno di una ventina di anni le riserve mondiali di petrolio diventeranno sempre più scarse ed il costo al barile di quest'ultimo sempre più alto. Si prevede addirittura che se India e Cina continueranno a svilupparsi con il ritmo impressionante degli ultimi anni (che li porterà a consumare quantità sempre più ingenti di petrolio), la crisi energetica potrebbe presentarsi già intorno al 2015.

Studiosi di tutto il mondo stanno quindi cercando di trovare un degno sostituto all'oro nero. La tecnologia degli impianti fotoelettrici potrebbe costituire il modo migliore per produrre energia elettrica, superando il problema della dipendenza dai combustibili fossili, con la produzione di una energia più pulita e soprattutto senza alcun problema di reperibilità.

Idrogeno = energia

Facendo reagire l'idrogeno e l'ossigeno si possono ricavare grandi quantità di energia e produrre come gas di scarto vapore acqueo



Questo semplice processo dal quale si ottiene la stessa energia che viene consumata nel processo inverso (la scissione dell'acqua) è reso possibile dalle celle a combustibile.

L'idrogeno, ovvero l'elemento costituente più del 70% del nostro pianeta ed il 90% dell'Universo, potrebbe così divenire il centro della prossima rivoluzione industriale, sostituendo gas, petrolio e carbone sia nelle nostre case sia nelle nostre auto.

Ma come si può ricavare l'idrogeno?

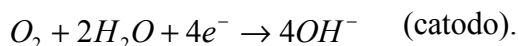
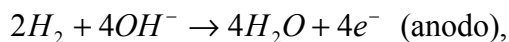
L'idrogeno si trova in grandi quantità legato all'ossigeno per formare acqua, oppure legato al carbonio all'interno del carbone, del petrolio e del metano, ma mai libero e pronto all'uso. Oggi il 99% dell'idrogeno viene estratto dai combustibili fossili attraverso un processo detto *reforming*. Il gas naturale e il carbone vengono fatti reagire con vapore acqueo ad alte temperature in un catalizzatore che cattura atomi di idrogeno. Il prodotto di scarto di questo processo è però l'anidride carbonica, uno dei principali responsabili dell'inquinamento atmosferico.

L'elettrolisi è l'unica alternativa ecologica al *reforming* ed inoltre all'elettrolisi può essere appunto associata la tecnologia dei pannelli fotovoltaici.

III

Descrizione generale dell'esperienza

Le celle a combustibile sono dei veri e propri apparecchi elettrochimici che convertono in elettricità l'energia chimica della reazione tra H_2 ed O_2 . A differenza di una cella elettrochimica o di una batteria, una cella a combustibile non si esaurisce e non richiede ricarica; funziona fintanto che vengono forniti ai due elettrodi un carburante e un agente ossidante. Il combustibile, in genere idrogeno, ammoniaca o idrazina, viene utilizzato all'anodo, cioè all'elettrodo positivo, mentre l'ossidante, spesso aria o ossigeno, viene fornito al catodo. I due elettrodi della cella sono separati da un conduttore ionico elettrolitico. Nella cella idrogeno-ossigeno, che prevede l'uso di un idrossido di metallo come elettrolita, all'anodo e al catodo si sviluppano le seguenti reazioni



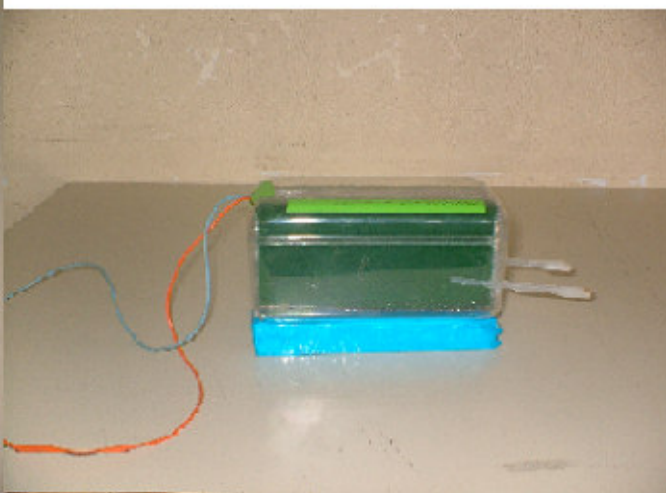
Gli elettroni generati all'anodo si muovono lungo un circuito esterno e passano al catodo, mentre gli ioni OH^- prodotti al catodo giungono attraverso l'elettrolita all'anodo, dove si combinano con l'idrogeno, formando acqua che deve essere rimossa durante il funzionamento per evitare l'allagamento dell'apparecchio. Il voltaggio erogato da una cella di questo tipo è di circa 1,2 V. Le celle a idrogeno-ossigeno che usano membrane a scambio ionico o elettroliti dell'acido fosforico furono usate rispettivamente nei programmi spaziali Gemini e Apollo. Attualmente sono in via di sviluppo celle a combustibile che utilizzano elettroliti di carbonati fusi. L'elettrolita che a temperatura ambiente si presenta allo stato solido, si trasforma in liquido alla temperatura di funzionamento (tra i 650 e gli 800 °C).

Simili celle presentano il vantaggio di utilizzare come carburante monossido di carbonio, e ciò permette di usare anche miscele di monossido di carbonio e idrogeno prodotte durante la gassificazione del carbone. Di largo impiego sono anche le celle a combustibile solido in cui l'elettrolita è diossido di zirconio solido, un composto che a circa $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ presenta una buona conducibilità elettrica, e il carburante può essere idrogeno, monossido di carbonio o metano, assieme ad aria o ossigeno forniti gradualmente al catodo. L'elevata temperatura di funzionamento delle celle a ossido solido permette l'uso diretto di metano, un combustibile che non richiede l'impiego di costosi catalizzatori al platino. Le celle a ossido solido hanno il vantaggio di essere relativamente poco sensibili alle impurità del combustibile, quali ad esempio i composti di zolfo e azoto, che riducono la funzionalità di altri sistemi simili. La temperatura relativamente alta di utilizzo sia delle celle a carbonati fusi sia di quelle a ossidi solidi facilita la rimozione di acqua prodotta dalla reazione sotto forma di vapore. Nelle celle a bassa temperatura, al contrario, si deve provvedere artificialmente alla rimozione dell'acqua dalla camera dell'anodo.

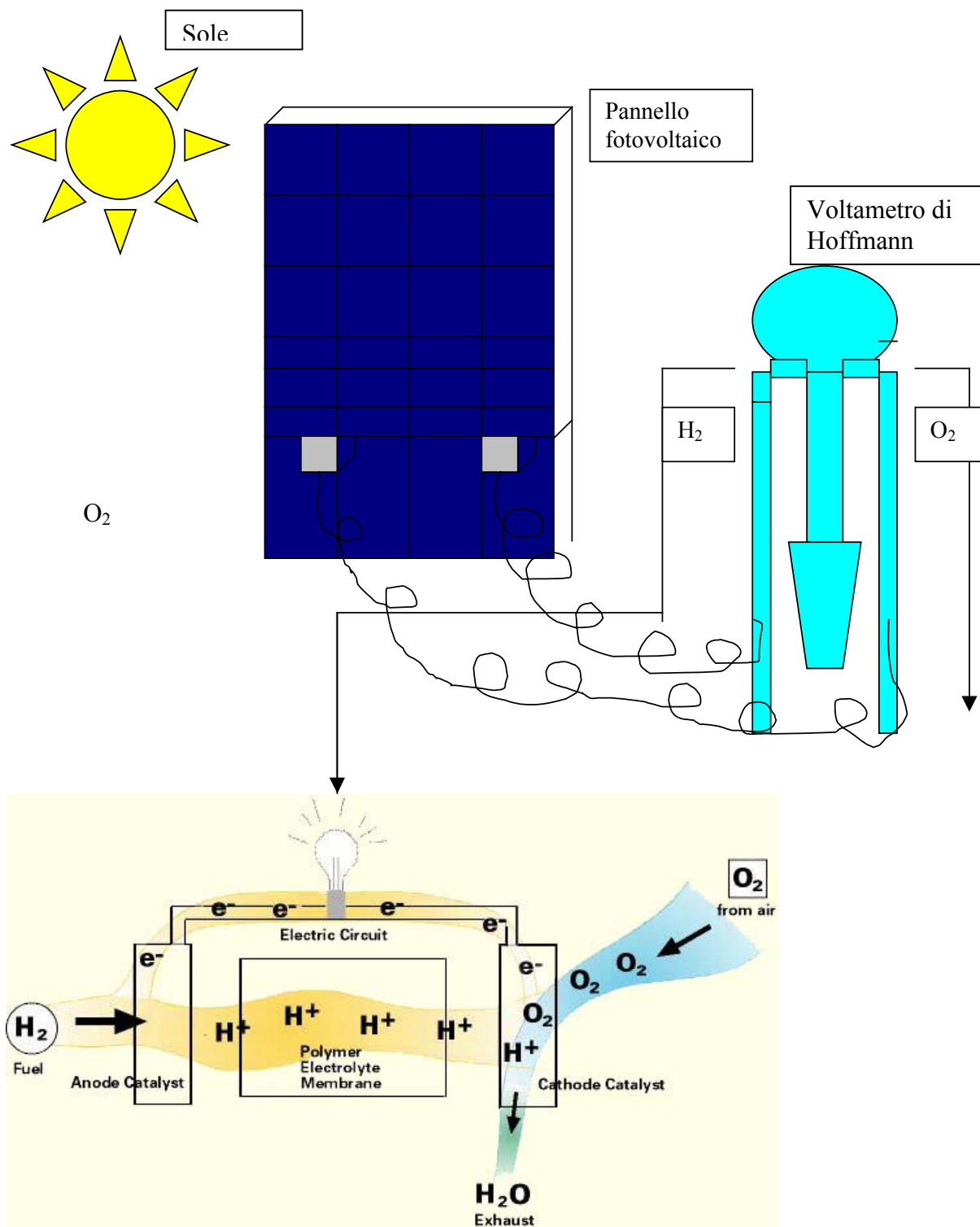
L'ipotesi sperimentale è quella di progettare e realizzare una cella a combustibile ideale, ovvero totalmente ecologica e con la possibilità di produrre energia pulita a costo zero. Ciò è reso possibile utilizzando luce solare e producendo energia attraverso i pannelli fotovoltaici, questa corrente elettrica viene poi convogliata in un voltmetro di Hoffmann, attraverso il quale, l'acqua è scomposta in idrogeno ed ossigeno. Tramite una cella a combustibile l'idrogeno viene combinato con l'ossigeno sotto l'ausilio di un catalizzatore al platino e si ottiene nuovamente corrente elettrica.



Prototipo di cella a combustibile



Impianto ideale di cella a combustibile



IV

Materiale e strumentazione occorrente

- o Pannello fotovoltaico
- o Cavetti di collegamento elettrici
- o Voltmetro di Hoffmann completo di elettrodi di platino e cavetti di collegamento
- o Multimetro digitale per misure di tensione ed intensità di corrente in c. c..
- o Cella a combustibile
- o Tubi di collegamento dal voltmetro alla cella a combustibile

V

Istruzioni per l'assemblaggio

Descrizione della sequenza operativa per montare l'esperimento

- 1- Porre il pannello fotovoltaico in prossimità di una finestra e collegare il tester in parallelo; spostare l'inclinazione del pannello fino a leggere sul tester il valore massimo di ddp (in questo modo il pannello è orientato perpendicolarmente ai raggi solari)
- 2- Introdurre nel voltmetro di Hoffmann i due elettrodi di platino e riempire lo strumento con acqua distillata addizionata con un elettrolita
- 3- Collegare il voltmetro di Hoffmann con il pannello fotovoltaico registrando con il tester in serie il valore dell'intensità di corrente.
- 4- Azzerare il voltmetro e raccogliere i gas fino a raggiungere il massimo del volume misurabile
- 5- Collegare i tubi di plastica ai rubinetti del voltmetro e connettere gli altri estremi dei due tubi alla cella a combustibile.
- 6- Aprire i rubinetti del voltmetro e far circolare una piccola quantità di idrogeno ed ossigeno nella cella per rimuovere le tracce di aria.

VI

Descrizione generale del procedimento di misura, grandezze da misurare direttamente, unità di misura, errori

- 1- Chiudere i due tubicini per lo spurgo dei gas e dell'acqua che si formerà nel corso della reazione ed aprire i rubinetti del voltmetro alimentando la cella a combustibile con ossigeno ed idrogeno.
- 2- Attendere qualche minuto e collegare il tester per registrare differenza di potenziale ed intensità di corrente prodotte dalla cella a combustibile.
- 3- Collegare i due cavetti alla cella e connettere questa con il motorino elettrico messo a disposizione.
- 4- Ripetere l'esperimento con l'apparecchio completo di pannello fotovoltaico, celle a combustibile e motore elettrico annotando le intensità di corrente e le differenze di potenziale prodotte dal pannello fotovoltaico e dalla cella a combustibile.
- 5- Ripetere le misure delle grandezze elettriche sul modellino di auto alimentata da fotovoltaico e cella a combustibile.

VII

Elenco delle tabelle e dei grafici da produrre

Annotare in una tabella i valori delle grandezze elettriche misurate nella cella a combustibile individuale.

Costruire delle analoghe tabelle per i dati raccolti sull'apparecchio completo di pannello fotovoltaico e celle a combustibile e sul modellino di auto.

VIII

Questionario per la valutazione

o Descrivere il procedimento che permette di ottenere elettricità da idrogeno ed ossigeno?

.....
.....

o Qual è l'origine dell'energia elettrica prodotta dalla cella a combustibile?

.....
.....

o Che relazione esiste tra grandezze elettriche, elettricità consumata e pressione dei gas idrogeno ed ossigeno?

.....
.....
.....
.....

Calendario degli incontri presso l'I.S.S. Piazza della Resistenza

Indirizzo dell'Istituto: Piazza della Resistenza 1, Monterotondo (Roma)

Tel: 06 90627399; 328 1858517

Docente di riferimento: prof. Sergio Barbadoro

Dicembre 2006

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Gennaio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Febbraio 2007

Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28				

- Ogni incontro si svolgerà nell'arco di una giornata, inizierà alle ore 10.30 e avrà una durata di 3 ore.
- Numero massimo di alunni partecipanti all'attività di gruppo: 24 studenti.
Gli studenti eseguono le esperienze suddivisi in gruppi di lavoro. Ogni gruppo è composto da un massimo di quattro alunni.
- Gli studenti sono accompagnati da uno o più docenti che partecipano all'attività.