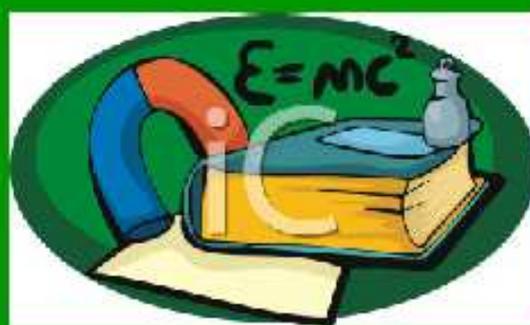

Piano
Lauree
Scientifiche



I laboratori PLS

*I laboratori didattici di Fisica nel
Piano Lauree Scientifiche
a Lecce*

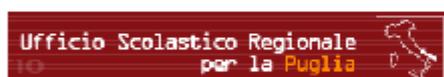


**Piano
Lauree
Scientifiche**



I laboratori PLS

***I laboratori didattici di Fisica nel
Piano Lauree Scientifiche
a Lecce***



***Referente Progetto
Maria Luisa De Giorgi***

INDICE

Introduzione, 4

CAPITOLO 1

1.1 Elementi di teoria degli errori, 5

CAPITOLO 2 - Ottica

2.1 Verifica della legge della riflessione, 10

2.2 Verifica sperimentale della legge di Snell, 14

2.3 La legge dei punti coniugati per lenti sottili, 19

2.4 L'ottica ondulatoria: le leggi dell'interferenza e della diffrazione (1), 22

2.5 L'ottica ondulatoria: le leggi dell'interferenza e della diffrazione (2), 30

CAPITOLO 3 - Elettromagnetismo

3.1 La scarica del condensatore, 33

3.2 Sistema molla-magnete, 37

3.3 Il motorino elettrico, 41

3.4 Il tubo a raggi catodici, 44

3.5 Il trasformatore, 47

CAPITOLO 4 - Fisica moderna

4.1 L'esperienza di Millikan, 50

4.2 L'interazione radiazione-materia: l'effetto fotoelettrico, 54

CAPITOLO 5 - Fisica nucleare

5.1 Misurazione di concentrazione del Radon, 58

Ringraziamenti, 63

1.1 Introduzione

Il metodo scientifico consiste nell'osservazione di fenomeni (attività sperimentale) e nello sviluppo di modelli per interpretare i risultati delle misurazioni (attività teorica). Esso permette di comprendere le leggi che sono alla base dei fenomeni naturali. La progettazione e la realizzazione di esperimenti che permettono di determinare le relazioni funzionali tra varie grandezze fisiche sono pertanto alla base dell'insegnamento della fisica.

Questi appunti, raccolgono una serie di esperienze didattiche di laboratorio concepite e realizzate presso il Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento, con la finalità di avvicinare gli studenti di scuola superiore, al metodo scientifico e quindi allo studio della fisica.

Questa attività si colloca nell'ambito del Piano Lauree Scientifiche e si è sviluppata in collaborazione con alcune scuole superiori secondarie delle province di Lecce e Brindisi.

Gli esperimenti sono stati concepiti in modo da chiarire ed approfondire i concetti che lo studente incontra durante il normale svolgimento del programma e da stimolarne la curiosità e la creatività. Si è voluto così avviare lo studente verso l'osservazione quantitativa del fenomeno a cui si spera possa seguire l'elaborazione di modelli interpretativi che permettano di prevedere il valore di alcuni osservabili in determinate condizioni.

In accordo con i docenti delle scuole, sono state scelte sia esperienze vicine agli argomenti curricolari, sia attività ed argomenti di interesse più ampio solitamente non trattati durante le lezioni scolastiche.

Gli appunti iniziano con alcuni richiami sulla teoria degli errori, di fondamentale importanza nell'acquisizione ed elaborazione dei dati sperimentali. Di seguito sono riportate le esperienze svolte dagli studenti nel corso del progetto.

Le prime esperienze riguardano l'ottica geometrica, in particolare le leggi della riflessione, della rifrazione e dei punti coniugati per le lenti sottili. Le successive sono di ottica fisica e puntano a verificare le leggi dell'interferenza e della diffrazione mediante l'uso di fenditure, reticoli di diffrazione e l'interferometro di Michelson.

La seconda serie di esperienze è relativa ad argomenti di elettromagnetismo. È stata studiata la scarica di un condensatore, un sistema accoppiato molla-magnete, un trasformatore, un motorino elettrico e un tubo a raggi catodici (oscilloscopio).

L'ultima serie di esperienze introduce alcuni principi della fisica moderna. Un'esperienza riguarda la quantizzazione della carica elettrica, mentre un'altra serve a verificare la quantizzazione dell'energia elettromagnetica mediante l'effetto fotoelettrico. Ricordiamo che questa evidenza sperimentale fu una di quelle che all'inizio del '900 segnò la crisi della fisica classica.

Infine si segnala un'esperienza "sul campo": la misura della concentrazione di radon all'interno degli edifici scolastici partecipanti al progetto.

Prima di passare ad illustrare nel dettaglio le esperienze di laboratorio, faremo qualche cenno alla teoria degli errori, strumento indispensabile per completare il processo di misura.

Capitolo 1

1.1 Elementi di teoria degli errori

La fisica è una scienza fondamentale che ha per oggetto la comprensione dei fenomeni di base che accadono nell'universo.

E' basata su osservazioni sperimentali e misure quantitative allo scopo di sviluppare teorie basate su leggi fondamentali comprovate dall'esperienza.

Il metodo privilegiato per lo studio dei fenomeni naturali è il metodo sperimentale basato su:

- osservazione;
- formulazione di ipotesi;
- conferma e convalida delle ipotesi.

Pertanto la fisica, ed in genere la scienza, si sviluppa dal continuo confronto fra esperimenti e teoria ovvero tra fare le misure ed interpretarle.

Alla base del metodo sperimentale c'è la determinazione di grandezze fisiche come ad esempio la lunghezza, la massa di un corpo, la temperatura..., sulle quali è possibile effettuare misurazioni in modo oggettivo e riproducibile mediante l'uso di strumenti e metodi pratici ed analitici.

Tuttavia, il valore vero di una grandezza fisica è un'astrazione matematica, in quanto anche se la misurazione viene effettuata con estrema precisione e accuratezza è sempre affetta da un certo grado di incertezza. Pertanto, la misura sperimentale è completa quando il valore della grandezza fisica è corredato dall'incertezza ovvero dall'errore che si commette nell'effettuare la misurazione.

Classificazione degli errori

Gli errori che si possono commettere nell'eseguire una misura sperimentale possono essere divisi in:

- errori sistematici;
- errori casuali;
- disturbi;
- svarioni.

I disturbi sono errori occasionali, temporanei che scompaiono quando la misura viene ripetuta.

Gli svarioni sono quegli errori madornali dovuti ad esempio ad una distrazione dello sperimentatore (lettura errata dello strumento, trascrizione sbagliata dei dati, ...).

Entrambi questi tipi di errori sono eliminabili da parte di un attento sperimentatore.

Più importanti nella trattazione della teoria della misura sono gli errori sistematici e gli errori casuali.

Gli errori sistematici alterano la misura sistematicamente sempre nello stesso senso, in eccesso o in difetto. Non si possono rivelare con la ripetizione delle misure, ma solo confrontando risultati di misure eseguite con strumenti o con procedure diverse.

Alcuni esempi di errori sistematici sono dovuti a difetti dello strumento, all'interazione strumento-sperimentatore, all'interazione strumento-fenomeno, alle errate condizioni di lavoro, all'imperfetta schematizzazione, riproduzione ed interpretazione del fenomeno.

Individuato l'errore sistematico si interviene modificando la procedura della misura e/o la strumentazione oppure si può quantificare l'errore ed apportare al risultato della misura una correzione sotto forma di un termine addizionabile o di un fattore moltiplicativo.

Gli errori casuali fluttuano passando da una misura alla successiva e possono avvenire con uguale probabilità sia in eccesso sia in difetto. Essi danno risultati che si distribuiscono intorno ad un valore medio. Si possono rivelare con la ripetizione delle misure e sono spiegati con l'impossibilità di riprodurre esattamente le stesse condizioni sperimentali.

A differenza degli errori sistematici, gli errori casuali sono inevitabili e non eliminabili ma trattabili, in quanto il loro contributo può essere quantificato mediante l'analisi statistica dei risultati.

Incertezze massime

Incertezze di sensibilità

Supponiamo di voler eseguire la misura della lunghezza x di un parallelepipedo utilizzando una riga millimetrata e di ripetere la misura N volte. Noteremo che tutte le misure danno come risultato lo stesso valore in quanto lo strumento non è così sensibile da percepire le fluttuazioni intrinseche alla misura.

Se la lunghezza è compresa tra un valore di 2.8 cm e 2.9 cm, allora si scriverà come:

$$x = (2.85 \pm 0.05) \text{ cm}$$

In tal caso, l'incertezza associata alla misura, $\Delta x = 0.05$, è legata alla sensibilità dello strumento. Se la sensibilità è stata definita come la più piccola variazione della grandezza che lo strumento è in grado di apprezzare, essa risulta legata alla più piccola divisione (tra due tacche consecutive) riportata sulla scala dello strumento.

Errori di questo tipo sono detti massimi perché assorbono tutti gli altri tipi di errori (casuali) ed è considerata la più grande indeterminazione possibile nella visione più pessimistica.

Incertezze casuali

Fino ad ora abbiamo correlato la bontà di una misura alla sensibilità degli strumenti utilizzati.

Siamo partiti da una situazione in cui effettuata una serie di N misure ripetute, le misure hanno tutte dato lo stesso valore come risultato.

E' possibile però anche che le N misure ripetute della stessa grandezza diano valori differenti:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$$

Ciò si verifica quando l'errore di sensibilità dello strumento è inferiore alle fluttuazioni intrinseche delle misure.

E' pertanto necessario trovare dei criteri per:

- esprimere il valore più rappresentativo della grandezza (la migliore stima);
- valutare l'indeterminazione associata.

Si assume che il valore più rappresentativo della grandezza x sia la media aritmetica delle misure, definita come:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i .$$

Per valutare l'incertezza associata si determina il campo di variazione (intervallo in cui varia il valore della grandezza) delle misure, detto anche intervallo di dispersione, e che è rappresentato tra la differenza fra il valore massimo, x_{max} , ed il valore minimo, x_{min} .

L'incertezza, Δx , sarà così data da

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

detta semidispersione massima.

Anche in questo caso, come per gli errori di sensibilità degli strumenti, si ha a che fare con degli errori di tipo massimo.

L'errore massimo rappresenta un limite superiore dell'incertezza (stima più pessimistica dell'incertezza) e costituisce in taluni casi solo una stima grossolana dell'incertezza.

Questa valutazione dell'errore tramite la semidispersione massima si usa solitamente per un campione con N piccolo, (N=10, o anche per N minori).

Quando si dispone di numerose misure di una grandezza, la semidispersione massima sarebbe una valutazione troppo pessimistica dell'errore (non avrebbe senso ripetere un numero così alto di volte la misura, con dispendio di forze e tempo, senza un effettivo vantaggio, senza migliorare la bontà della misura).

Una valutazione meno grossolana potrebbe essere fatta elaborando gli scarti.

Si definisce scarto della i-esima misura la quantità

$$\xi_i = x_i - \bar{x}$$

Esso dà un'indicazione dello scostamento, dovuto alle fluttuazioni casuali, della singola misura dal valor medio.

La valutazione più opportuna dell'errore casuale è data dallo scarto quadratico medio o deviazione standard, σ , che ha un importante significato probabilistico.

σ è definita:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Ovvero è la radice quadrata della media dei quadrati degli scarti.

Propagazione degli errori

La propagazione degli errori tiene conto del fatto che se si usano diverse misure sperimentali (X, Y, ...) per giungere ad un risultato ($G=f(X, Y, \dots)$) e se le osservazioni contengono errori ($\Delta X, \Delta Y, \dots$) allora anche il risultato sarà affetto da errore (ΔG), per un ammontare che dipende dalle singole misure.

Se si misurano due grandezze X e Y e si calcola ad esempio la loro somma (o differenza), l'errore associato alla grandezza $G=X+Y$ sarà $\Delta G=\Delta X+\Delta Y$, cioè sarà la somma delle incertezze delle singole misure.

Se la grandezza G è data dal prodotto (o quoziente) delle due grandezze $G=X \cdot Y$ ($G=X/Y$), allora l'errore associato è il seguente:

$$\frac{\Delta G}{|G|} = \frac{\Delta X}{|X|} + \frac{\Delta Y}{|Y|}$$

Nella tabella di seguito sono riassunte le principali regole da considerare per la propagazione degli errori.

	Relazione tra G e (X,Y)	Relazione tra ΔG e (ΔX, ΔY)
1	$G = X + Y$	$\Delta G = \Delta X + \Delta Y$
2	$G = X - Y$	$\Delta G = \Delta X + \Delta Y$
3	$G = X \cdot Y$	$\frac{\Delta G}{ G } = \frac{\Delta X}{ X } + \frac{\Delta Y}{ Y }$
4	$G = \frac{X}{Y}$	$\frac{\Delta G}{ G } = \frac{\Delta X}{ X } + \frac{\Delta Y}{ Y }$
5	$G = X^n$	$\frac{\Delta G}{ G } = n \frac{\Delta X}{ X }$
6	$G = \ln X$	$\Delta G = \frac{\Delta X}{ X }$
7	$G = e^x$	$\frac{\Delta G}{ G } = \Delta X$
8	$G = k \cdot X$	$\Delta G = k \cdot \Delta X$

Cifre significative

Quando viene eseguita una misurazione in laboratorio essa è generalmente condotta con i limiti di precisione dello strumento di misura impiegato. La bontà di una misura viene indicata dal numero di cifre significative con cui si trascrivono i risultati.

Per numero di cifre significative si intende il numero di tutte le cifre scritte a partire da destra fino all'ultima cifra a sinistra.

Lo zero in un numero può essere alle volte cifra significativa e alle volte no. Se lo zero è contenuto in un numero è sempre cifra significativa, per esempio 1.203 g oppure 10.01 ml. Se gli zeri sono a sinistra, questi non sono mai significativi, per esempio 0.253 g ha 3 cifre significative e 0.0001 ml ha una cifra significativa. Gli zeri a destra, invece, lo sono. Ad esempio, 3,9 m/s ha due cifre significative, mentre 3,90 m/s ne ha tre.

Un modo per mostrare che gli zeri a sinistra non sono significativi è quello di scrivere questi numeri con la notazione scientifica, vale a dire 2.53×10^{-1} g oppure 1×10^{-3} ml, in cui questi zeri non vengono neanche riportati.

In genere le incertezze massime (errore di sensibilità, semidispersione massima) vanno espresse con una sola cifra significativa decimale, mentre le incertezze statistiche (deviazione standard) vanno espresse con due cifre significative decimali.

Valutata l'incertezza, con il numero adeguato di cifre significative, viene conseguentemente stabilito il numero di cifre significative con cui esprimere il risultato di una misura. In particolare, si esprimono

tante cifre significative in modo che l'ultima a destra (o le due ultime due nel caso di incertezza statistica) corrisponda alla cifra (cifre) significativa dell'incertezza.

Capitolo 2

Ottica

2.1 Verifica della legge della riflessione

Studio del fenomeno della riflessione della luce utilizzando uno specchio orientabile

Scopo dell'esperienza

Un raggio luminoso, incidente su una superficie a specchio, viene riflesso (Fig. 1). L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione

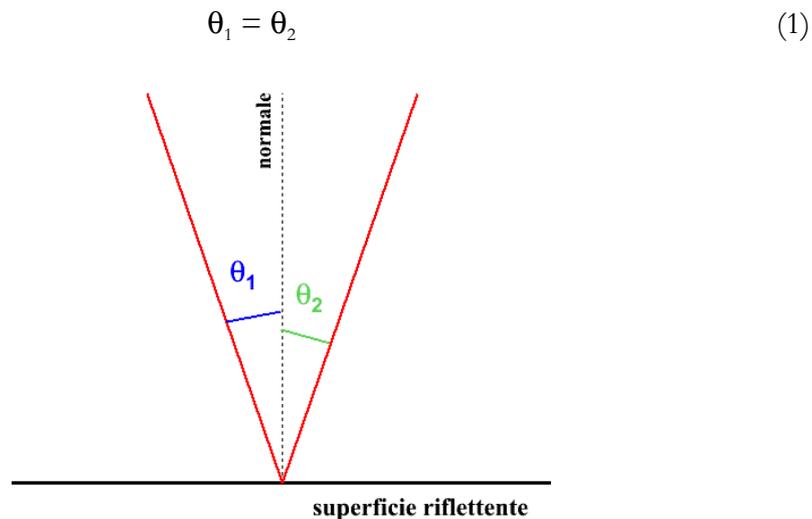


Fig. 1. Il fenomeno della riflessione (in rosso il raggio luminoso). Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente sono complanari.

Si intende verificare questa legge per mezzo di uno specchio piano, che è possibile ruotare utilizzando delle viti micrometriche. Con il dispositivo di misura, schematicamente rappresentato in Fig. 2, si può facilmente verificare che

$$\alpha = 2 \theta \quad (2)$$

dove θ è l'angolo di rotazione dello specchio e α è l'angolo tra raggio incidente e raggio riflesso. Verranno quindi misurate alcune coppie di valori θ , α per poi verificare che il loro andamento è interpolabile con la funzione (2), cioè con una retta passante per l'origine ($q=0$) di coefficiente angolare $m=2$.

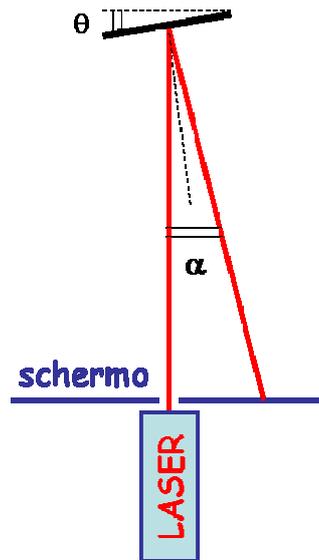


Fig. 2. Geometria della misura: il raggio incide sullo specchio e viene riflesso sullo schermo. Lo spostamento angolare del raggio luminoso (α) è doppio rispetto alla rotazione dello specchio (θ).

Strumentazione e materiale a disposizione

- Banco ottico (portata: 116.5 cm; sensibilità: 0.1 cm)
- Specchio piano montato su supporto, orientabile per mezzo di viti micrometriche
- Sorgente luminosa (laser)
- Schermo con carta millimetrata



Fig. 3. Il dispositivo di misura.

Le viti micrometriche permettono di ruotare lo specchio sull'orizzontale o sulla verticale, separatamente. Inoltre sono state opportunamente tarate: lo spostamento di una tacca corrisponde a

$$\begin{array}{ll} \beta_o = 0.24 \text{ milliradiani} & \text{per la rotazione sull'orizzontale,} \\ \beta_v = 0.34 \text{ milliradiani} & \text{per la rotazione sulla verticale.} \end{array}$$

La distanza (L) tra lo schermo e lo specchio deve essere fissata dallo studente. Si tenga conto che distanze troppo piccole amplificherebbero gli effetti degli errori di misura, come sarà evidente nel seguito.

Procedura sperimentale

Allineamento e azzeramento – Inizialmente si procede orientando lo specchio in modo che il raggio torni su stesso (Fig. 4 a sinistra). In queste condizioni $\theta = 0$ e anche $\alpha = 0$. Inoltre viene misurata la distanza L tra lo specchio e lo schermo.

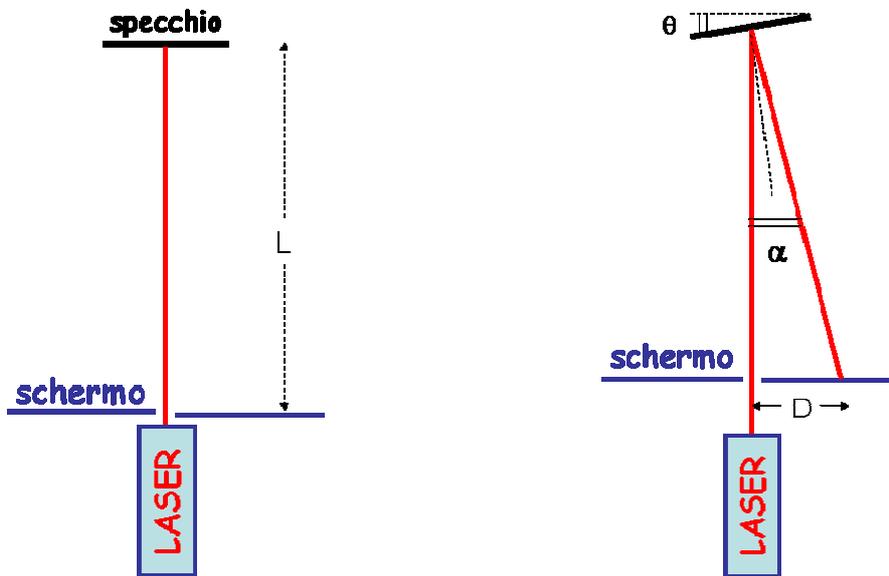


Fig. 4. Inizialmente lo specchio viene orientato in modo che il raggio torni su se stesso (figura a sinistra). Successivamente si ruota lo specchio e si misura lo spostamento dello spot luminoso sullo schermo (figura a destra).

Misure sull'orizzontale - Si ruota lo specchio soltanto per mezzo della vite che comanda l'angolo sull'orizzontale, prendendo nota della rotazione in termini di tacche (n) sul tamburo della vite. Si misura quindi lo spostamento dello spot luminoso (D) grazie al foglio di carta millimetrata che è stato applicato sullo schermo (Fig. 4 a destra). Da queste due misure si deducono facilmente i due angoli (in radianti):

$$\theta = n \beta_o \qquad \alpha = \text{atan}(D/L) \qquad (3)$$

Lo studente valuti in quali condizioni la seconda equazione si può ridurre a $\alpha = D/L$. Questa approssimazione non deve modificare significativamente il dato numerico, ma rende molto più semplice la stima della propagazione degli errori, che è demandata allo studente.

L'operazione viene ripetuta più volte al fine di ottenere un numero adeguato di coppie di valori θ , α .

Misure sulla verticale - Si azzeri nuovamente il sistema e si ripeta tutta la procedura utilizzando la vite comanda l'angolo sulla verticale. Ovviamente si abbia cura di utilizzare la calibrazione appropriata (β_v).

Interpolazione dei dati – A titolo di esempio in Fig. 5 sono rappresentati i risultati di 10 misure sui due assi. Questi dati sono soltanto indicativi, svolgendo effettivamente l'esperienza in laboratorio i dati sperimentali possono risultare diversi. Gli errori sono stati assunti dell'ordine di β_o e β_v per θ e dell'ordine del milliradiante per α .

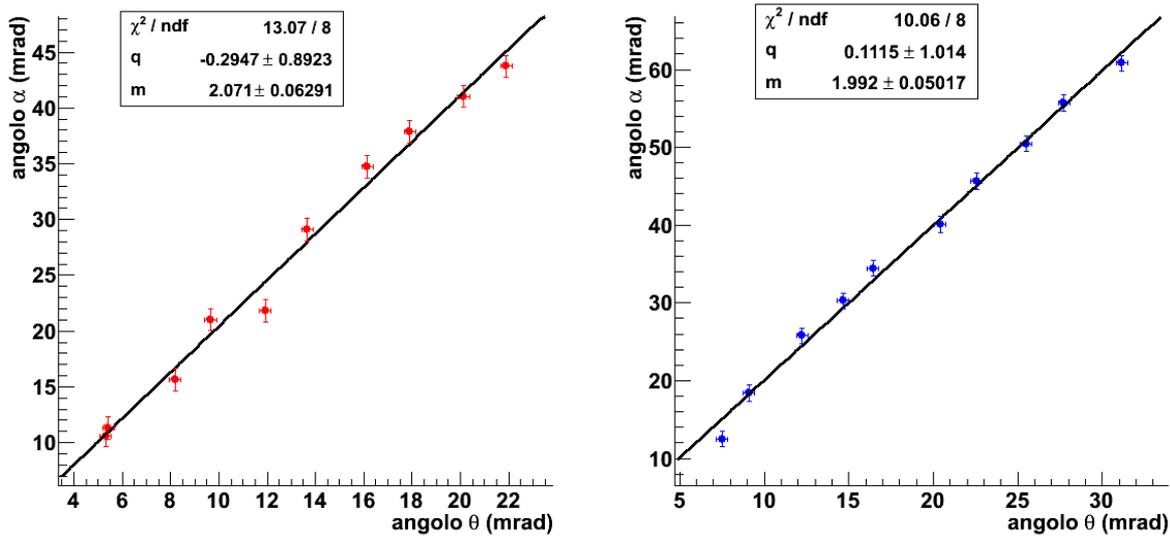


Fig. 5. A sinistra i punti sperimentali per rotazioni sul piano orizzontale sono interpolati con una retta, analogamente a destra per rotazioni sul piano verticale. Il coefficiente angolare è compatibile con 2 in entrambe i casi, come pure l'intercetta è compatibile con 0. Il valore del chi-quadro ridotto, prossimo all'unità, conferma che la retta interpola bene i due campioni sperimentali.

Conclusioni

I risultati dell'interpolazione (Fig. 5) sono quelli attesi in base alla legge della riflessione. Infatti il coefficiente angolare (m) è compatibile con 2, come previsto in base alla equazione (2). In quest'ultima equazione non è presente l'intercetta ed infatti dall'interpolazione dei dati sperimentali l'intercetta (q) è compatibile con zero. Il valore del chi-quadro ridotto (χ^2/ndf) è dell'ordine di 1 sia nel caso della rotazione orizzontale che in quello della rotazione verticale e questo è sintomatico di un buon accordo tra dati sperimentali e funzione di interpolazione, oltre che di una corretta stima degli errori.

Concludendo, uno specchio orientabile ha permesso di verificare la relazione (2) che è una semplice conseguenza geometrica della legge della riflessione.

2.2 Verifica sperimentale della legge di Snell

Studio del fenomeno della rifrazione, alla superficie di interfaccia tra due mezzi con diverso indice di rifrazione

Scopo dell'esperienza

Utilizzando un semi-cilindro in materiale plastico si vuole verificare la legge della rifrazione, detta legge di Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

dove θ_1 e θ_2 rappresentano gli angoli di incidenza e di rifrazione (vedi Fig. 1), n_1 e n_2 gli indici di rifrazione dei due mezzi (materiale plastico e aria nel caso specifico), cioè i rapporti tra la velocità della luce nel vuoto e le velocità della luce nei rispettivi mezzi. Tipicamente il valore dell'indice di rifrazione è crescente con la densità del mezzo.

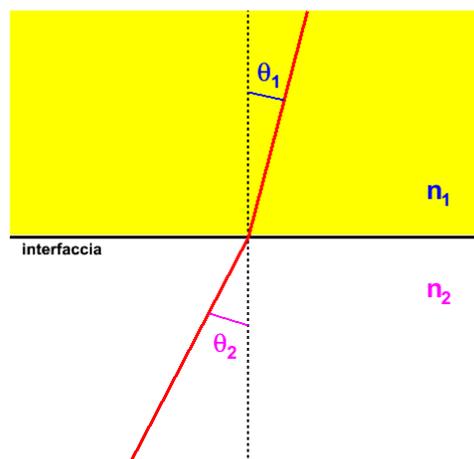


Fig. 1. Il fenomeno della rifrazione (in rosso un raggio luminoso nel passaggio da un mezzo ad un altro). Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di interfaccia sono complanari. Nel caso in figura $n_1 > n_2$.

Inoltre si vuole misurare l'indice di rifrazione del materiale plastico sapendo che, nel passaggio da un mezzo più denso ad uno meno denso ($n_1 > n_2$), oltre un certo valore dell'angolo di incidenza (θ_L) a cui corrisponde un angolo di rifrazione di 90° , non si ha più la rifrazione e la luce viene totalmente riflessa.

Questo fenomeno è detto riflessione totale e θ_L è l'angolo limite, definito dalla relazione:

$$n_1 \sin \theta_L = n_2 \sin 90^\circ \quad (2)$$

Ricordando che la funzione trigonometrica seno ha il suo massimo per $\theta = 90^\circ$, si comprende facilmente che per valori superiori dell'angolo di incidenza ($\theta_1 > \theta_L$) la legge della rifrazione non può più essere valida e la luce viene totalmente riflessa. Dalla misura dell'angolo limite si può ricavare l'indice di rifrazione del materiale plastico. Infatti dalla relazione (2) segue:

$$n_1 = n_2 / \sin \theta_L = 1 / \sin \theta_L \quad (3)$$

ricordando che l'indice di rifrazione dell'aria è molto prossimo ad 1 ($n_2 = 1.0003$).

Strumentazione e materiale a disposizione

- Banco ottico
- Lampada
- Schermo
- Base rotante con goniometro (da 0° a 360° con passi di 1°)
- Semi-cilindro trasparente

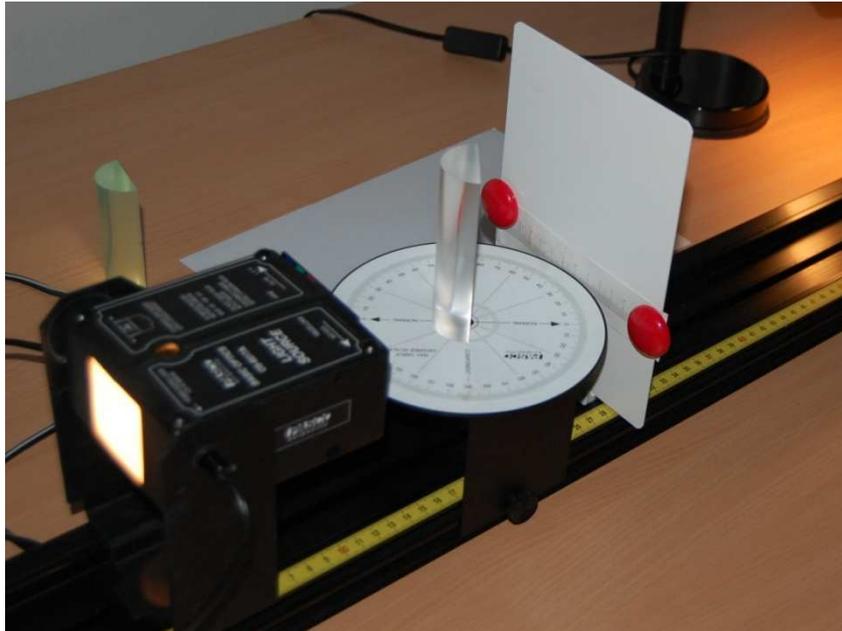


Fig. 2. Strumentazione utilizzata per l'esperienza.

Procedura di misura

Azzeramento - Posizionare la lampada e il goniometro in modo che il raggio luminoso sia radente e passi esattamente dallo zero e dal centro del goniometro. In queste condizioni il raggio luminoso è allineato con il diametro del goniometro stesso. Lo schermo deve essere posizionato a ridosso del goniometro e deve essere memorizzata la posizione dello spot luminoso su di esso. Fatto questo si posiziona il cilindro, come in figura, avendo cura di non modificare il cammino del raggio luminoso. Quest'ultima condizione si realizza quando l'asse del cilindro passa per il centro del goniometro e la superficie piana del semi-cilindro è perpendicolare al raggio luminoso.

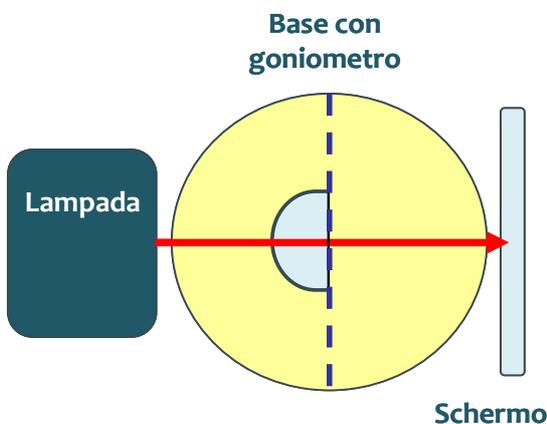


Fig. 3. Azzeramento del dispositivo di misura. In questa configurazione il raggio luminoso è perpendicolare ad entrambe le superfici di interfaccia aria-materiale plastico.

Misure per verificare la legge di Snell – Si può quindi procedere alle misure vere e proprie, facendo ruotare più volte il goniometro, avendo cura che il semi-cilindro resti solidale col goniometro stesso, e misurando ogni volta gli angoli θ_1 e θ_2 come illustrato in Fig. 4. Il raggio viene deviato solo dalla superficie piana del semi-cilindro, non da quella curva perchè incide perpendicolarmente a quest'ultima. Gli errori associati alle due misure sono connessi alla larghezza dei fasci luminosi e alla lettura sulla scala del goniometro. Si lascia allo sperimentatore la stima di questi errori. In questa scheda si assumono errori statistici di $0.5^\circ = 0.009$ radianti (la propagazione degli errori va fatta usando i radianti). A mo' di esempio in Fig. 5 sono rappresentati i risultati di 8 misure. Questi dati sono soltanto indicativi, svolgendo effettivamente l'esperienza in laboratorio i dati sperimentali risulteranno abbastanza diversi. Gli errori sono ricavati in base alle regole di propagazione che portano alla seguente espressione (valida sia per $i=1$ che per $i=2$):

$$\sigma_{\text{sen } \theta_i} = \sigma_\theta \cos \theta_i \quad (4)$$

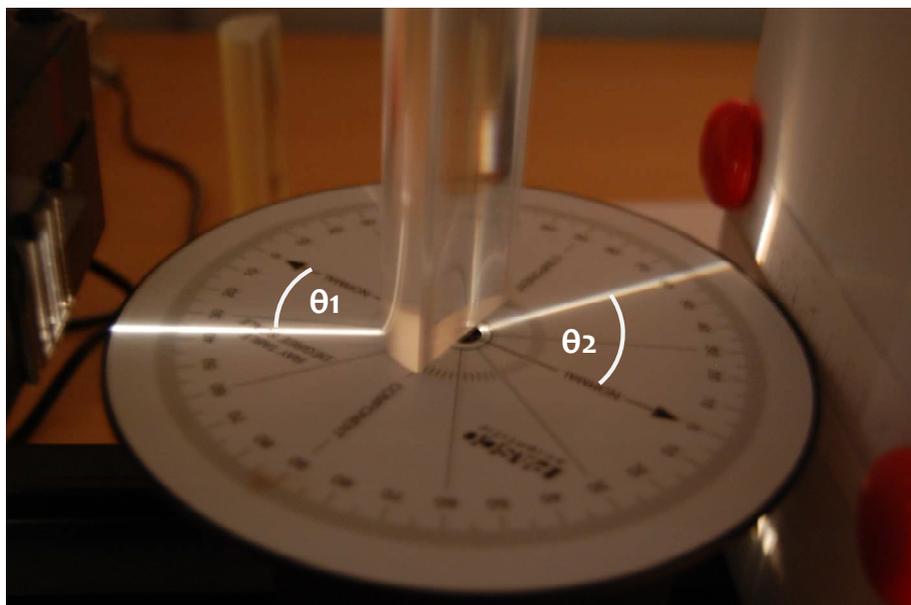


Fig. 4. Misura degli angoli di incidenza (θ_1) e di rifrazione (θ_2) sulla superficie piana del semi-cilindro. La superficie curva non devia il raggio perchè questo arriva perpendicolare alla tangente.

L'interpolazione lineare in Fig. 5 è fatta utilizzando la relazione (in cui $n_2 = 1.0003=1$)

$$\text{sen } \theta_2 = (n_1 / n_2) \text{sen } \theta_1 = n_1 \text{sen } \theta_1 \quad (5)$$

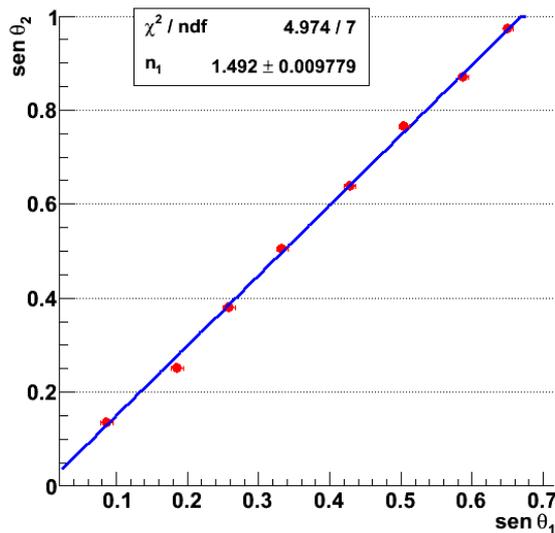


Fig. 5. Interpolazione lineare delle misure, utilizzando la relazione (5). Il valore del chi-quadro ridotto (χ^2/ndf) è dell'ordine di 1 e questo è sintomatico di un buon accordo tra dati sperimentali e funzione di interpolazione, oltre che di una corretta stima degli errori.

Il risultato in Fig. 5 da una parte conferma la legge di Snell, dall'altra fornisce una misura dell'indice di rifrazione del materiale plastico.

Verifica sperimentale del fenomeno della riflessione totale – Utilizzando il valore di n_1 ricavato dall'interpolazione in Fig. 5 si può stimare l'angolo limite, già definito con l'equazione (3):

$$\theta_L = \arcsen (1/ n_1) \quad (6)$$

Continuando ad utilizzare i dati dell'esempio di Fig. 5 risulta $\theta_L = 42.1^\circ$ (non viene stimato l'errore perchè non necessario per il controllo che qui viene proposto). Come già detto, per $\theta_1 < \theta_L$ il raggio viene rifratto. Per $\theta_1 > \theta_L$ si verifica la riflessione totale, cioè il raggio incidente non passa nel mezzo meno denso (l'aria, in questo caso) e viene riflesso dalla superficie d'interfaccia.

Si può quindi verificare sperimentalmente che, per angoli di incidenza θ_1 superiori all'angolo limite, il raggio rifratto scompare e si intensifica notevolmente il raggio riflesso (vedi Fig. 6).

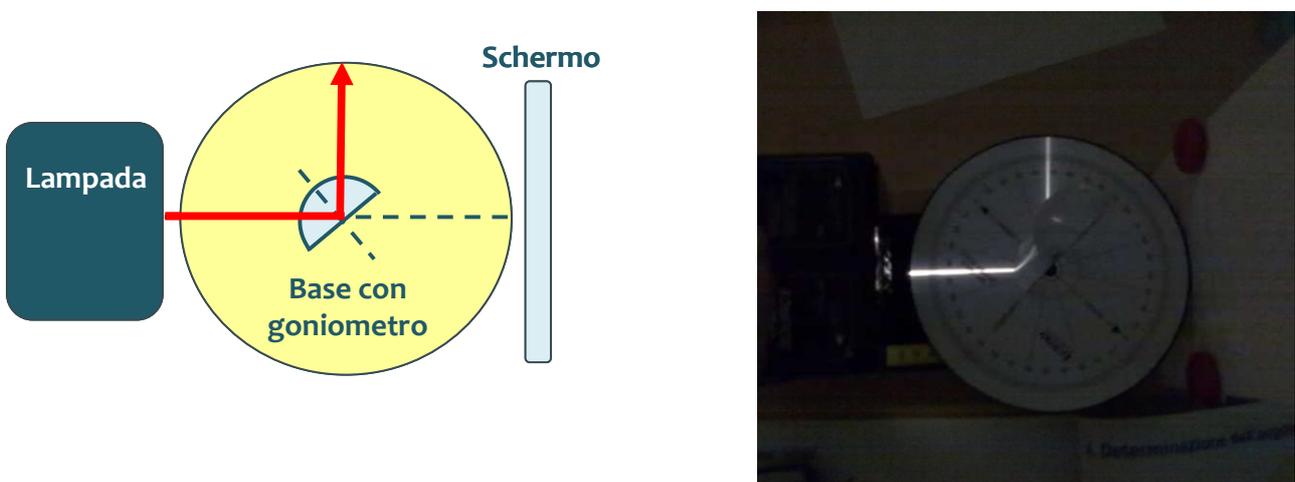


Fig. 6. Il fenomeno della riflessione totale si manifesta per angoli di incidenza superiori all'angolo limite.

Conclusioni

Grazie alla particolare geometria del semi-cilindro, è possibile verificare la legge di Snell alla superficie di interfaccia tra materiale plastico ed aria. Dall'analisi della relazione tra $\sin \theta_2$ e $\sin \theta_1$ si può misurare l'indice di rifrazione del materiale plastico e quindi stimare l'angolo limite. Infine tale stima può essere sottoposta a controllo verificando per quali valori dell'angolo di incidenza si manifesta il fenomeno della riflessione totale.

**Le immagini e le foto di questa scheda
sono tratte dalle relazioni di Stefania
Pepe, studentessa del Liceo Polivalente
"Q. Punzi" - Cisternino (Br) nell'anno
scolastico 2010/11**

2.3 La legge dei punti coniugati per lenti sottili

Studio della relazione esistente tra distanza oggetto e distanza immagine per una lente sottile

Scopo dell'esperienza

La distanza oggetto (p) e la distanza immagine (q), cioè le distanze dell'oggetto e dell'immagine dalla lente (Fig. 1), obbediscono alla seguente legge dei punti coniugati:

$$1/p + 1/q = 1/f \quad (1)$$

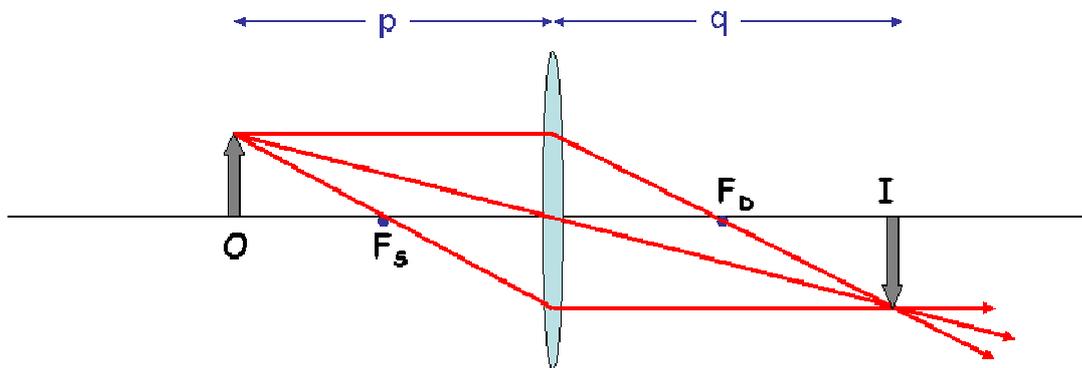


Fig. 1. La legge dei punti coniugati mette in relazione la distanza oggetto con la distanza immagine. I punti F_s e F_D rappresentano i fuochi (sinistro e destrò) della lente. La lente in figura è convergente.

Si dimostra che l'equazione (1) è quella di un'iperbole equilatera nel piano p, q (Fig. 2) con due asintoti, uno verticale di equazione $p=f$ ed uno orizzontale di equazione $q=f$. Le distanze positive sono associate ad oggetti ed immagini reali, cioè effettivamente visibili (ramo rosso dell'iperbole). Viceversa le distanze negative sono relative ad oggetti (ramo blu) o immagini (ramo verde) non realmente visibili, detti virtuali.

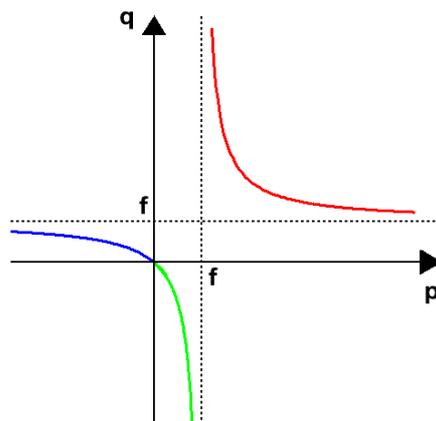


Fig. 2 L'iperbole equilatera della legge dei punti coniugati per una lente convergente ($f > 0$). Gli asintoti intercettano gli assi proprio in corrispondenza della distanza focale f . Nel ramo rosso la distanza oggetto e la distanza immagine sono positive (oggetto e immagine reali). Negli altri due rami una delle due distanze è negativa (oggetto o immagine virtuali).

In questa esperienza sarà studiata solo la curva rossa, volendo verificare la validità della legge (1) e misurare la distanza focale f della lente. Verranno misurate coppie di valori p , q poi interpolati con la funzione:

$$q = fp / (p-f) \quad (2)$$

facilmente deducibile dalla (1). La distanza focale f è l'unico parametro dell'interpolazione.

Strumentazione e materiale a disposizione (Fig. 3)

- Banco ottico munito di metro (sensibilità: 0.1 cm; portata: 110 cm)
- Lampada con mascherina sagomata come oggetto
- Lente sottile convergente con distanza focale incognita
- Schermo



Fig. 3. Strumentazione disponibile in laboratorio.

Procedura sperimentale

Si inizia posizionando la lampada con l'oggetto (una punta sulla mascherina) all'estremo del banco ottico e misurandone la posizione O . La lampada non verrà più spostata nel corso dell'esperienza e quindi il valore della coordinata O non varierà. Si procede posizionando la lente e misurando la posizione L . Infine si cerca la posizione I dello schermo in cui l'immagine è ben focalizzata. Se tale posizione non si riuscisse a trovare l'immagine è virtuale (curva verde) e la misura sarebbe molto più complessa. Per ovviare a questo inconveniente si allontana ulteriormente la lente dall'oggetto e si torna a cercare l'immagine nella nuova configurazione. La distanza p altro non è che la differenza, sempre positiva, tra le coordinate O e L . La distanza q è la differenza, anch'essa positiva, tra le coordinate L e I . Si lascia allo sperimentatore il compito di stimare gli errori, osservando che le misure di O e L sono essenzialmente affette dalle incertezze di lettura, mentre la stima di I è legata alla visione distinta dell'immagine e quindi l'intervallo di incertezza è maggiore.

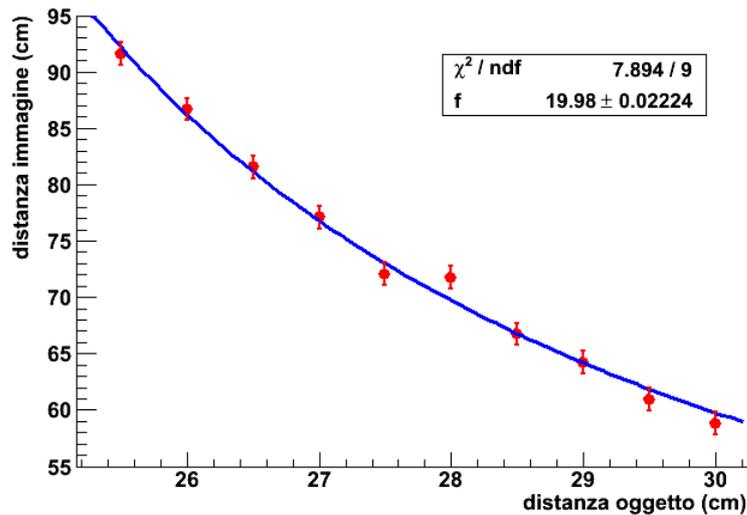


Fig. 4. Interpolazione dei dati sperimentali.

A mo' di esempio in Fig. 4 sono rappresentati i risultati di 10 misure. Questi dati sono soltanto indicativi, svolgendo effettivamente l'esperienza in laboratorio i dati sperimentali risulteranno abbastanza diversi. Gli errori sono dell'ordine del mm per la distanza oggetto e del cm per la distanza immagine. Il valore del chi-quadro ridotto (χ^2/ndf) è dell'ordine di 1 e questo è sintomatico di un buon accordo tra dati sperimentali e funzione di interpolazione, oltre che di una corretta stima degli errori. La distanza focale risulta 19.981 ± 0.022 cm.

Controllo – una volta ricavata la distanza focale f (circa 20 cm nell'esempio), si può verificare che per distanze oggetto inferiori a f non si riesce a trovare una posizione dello schermo in cui sia visibile distintamente l'immagine. In altre parole per $0 < p < f$ l'immagine diventa virtuale ($q < 0$) e non è visualizzabile sullo schermo (curva verde in Fig. 2).

Conclusioni

La legge dei punti coniugati è stata verificata sperimentalmente per una lente sottile. E' stata anche misurata la distanza focale f . Infine si è verificato che l'immagine diventa virtuale per oggetti troppo vicini alla lente.

2.4 L'ottica ondulatoria: leggi dell'interferenza e della diffrazione (1)

Analisi delle figure di diffrazione prodotte da fenditure e reticoli

Scopo dell'esperienza

Determinazione dell'ampiezza di una singola fenditura rettilinea, dell'ampiezza e del passo di una doppia fenditura e del passo reticolare di un reticolo di diffrazione.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Banco ottico
- Sorgente di luce coerente (laser a diodo, $\lambda = 650 \text{ nm}$) Oggetti diffrangenti (fenditure e reticoli)
- Schermo
- Sensore di luce
- Computer per acquisizione ed analisi dati – programma Data Studio

Cenni teorici

La teoria ondulatoria della luce interpreta il fenomeno della luce come un'onda elettromagnetica, ossia come una variazione periodica dei campi elettrico e magnetico nello spazio e nel tempo. Due onde della stessa natura (coerenti e monocromatiche) che si incontrano nello stesso punto dello spazio interagiscono e generano una perturbazione di ampiezza pari alla somma delle loro ampiezze. L'interferenza è un fenomeno per cui due o più raggi luminosi monocromatici, che partono da sorgenti distinte, interagendo vanno a formare, su uno schermo, una figura costituita da zone luminose intervallate a zone d'ombra.

La diffrazione invece si manifesta quando un raggio luminoso incontra una fenditura più piccola della sua lunghezza d'onda. Pertanto quando un raggio di luce attraversa una piccola apertura, si osservano delle frange alternate di luce o buio, piuttosto che una macchia luminosa. Questo comportamento indica che la luce, attraversata l'apertura, si diffonde in varie direzioni penetrando in zone in cui, se la luce si propagasse in linea retta, ci si aspetterebbe ombra.

Questi fenomeni possono essere descritti solo con il modello ondulatorio della luce.

Diffrazione da una singola fenditura

Proiettando su uno schermo la luce che attraversa una fenditura di ampiezza paragonabile alla sua lunghezza d'onda, la distribuzione di intensità delle frange di interferenza prodotte dalla fenditura è riportata in Fig. 1:

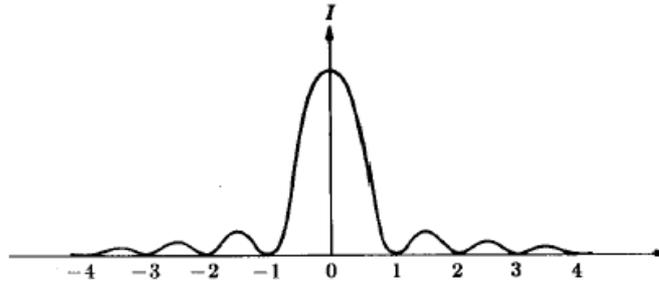


Fig. 1. Diffrazione da fenditura

dove la distanza del k -esimo minimo rispetto al massimo centrale è data da:

$$y = \frac{kL\lambda}{a} \quad (1)$$

dove L rappresenta la distanza fenditura-schermo, λ la lunghezza d'onda della luce ed a l'ampiezza della fenditura.

Diffrazione da due fenditure

La figura di diffrazione prodotta sullo schermo da due fenditure parallele è il risultato degli effetti combinati dell'interferenza e della diffrazione: ogni fenditura produce diffrazione e i fasci diffratti interferiscono fra loro producendo la distribuzione di intensità osservata.

La distribuzione di intensità delle frange di interferenza prodotte dalle due fenditure di uguale ampiezza è rappresentata in Fig. 2:

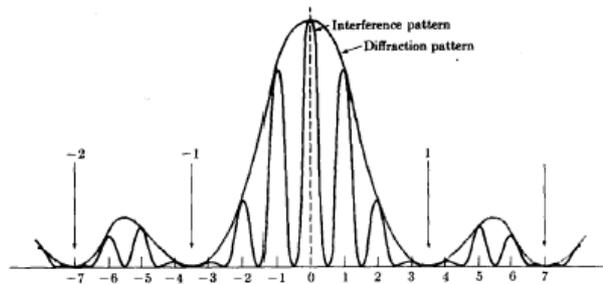


Fig. 2. Interferenza e diffrazione da due fenditure.

dove la distanza del k -esimo minimo rispetto al massimo centrale nella figura di diffrazione è data da:

$$y = \frac{kL\lambda}{a} \quad (2)$$

con L distanza fenditura schermo, λ lunghezza d'onda della luce ed a ampiezza delle fenditure; la distanza del n -esimo massimo rispetto al massimo centrale nella figura di interferenza è data da

$$l = \frac{nL\lambda}{h} \quad (3)$$

con L distanza fenditura-schermo, λ lunghezza d'onda della luce ed b distanza fra i centri delle fenditure.

Diffrazione da un reticolo

Il reticolo di diffrazione, strumento molto utile nell'analisi di sorgenti di luce, consiste in un gran numero di fenditure parallele equispaziate. La distribuzione di intensità sullo schermo è il risultato degli effetti combinati di interferenza e diffrazione: ogni fenditura produce diffrazione e i fasci diffratti interferiscono generando la distribuzione di intensità osservata.

La distribuzione di intensità risultante da un reticolo di diffrazione è rappresentata da:

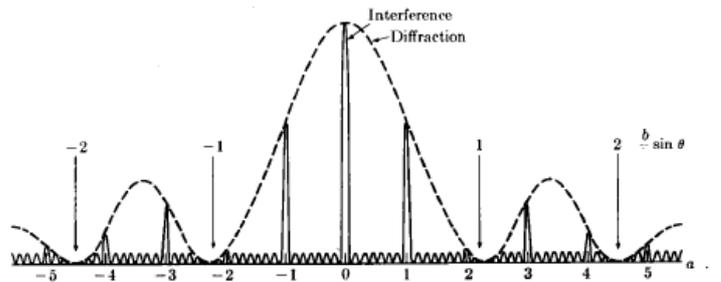


Fig. 3. Interferenza e diffrazione da reticolo.

dove la distanza del n -esimo massimo rispetto al massimo centrale nella figura di interferenza è data da

$$l = \frac{nL\lambda}{h} \quad (4)$$

con L distanza fenditura-schermo, λ lunghezza d'onda della luce ed h separazione fra le fenditure (*passo reticolare*).

Esecuzione delle misure

Si posizionano e si allineano sul banco ottico il laser e la fenditura singola. Si osserva la figura di diffrazione prodotta sullo schermo e si analizza l'andamento dell'intensità luminosa. Si individuano le posizioni di massima e minima intensità, e si determinano le distanze dei minimi rispetto al massimo centrale per stimare il valore dell'ampiezza della fenditura, nota la lunghezza d'onda della radiazione laser utilizzata.

Si procede analogamente dopo aver sostituito la singola fenditura dapprima con la doppia fenditura e poi con il reticolo di diffrazione al fine di stimare i parametri che li caratterizzano (a e b).

Diffrazione da una singola fenditura

È stato sistemato il banco ottico e proiettata la luce attraverso la fenditura, ottenendo sullo schermo una serie di spot luminosi, intervallati da spot di buio come è possibile osservare in Fig. 4. Lo spot luminoso centrale ha intensità massima, mentre l'intensità degli spot laterali ad esso diminuisce progressivamente.



Fig. 4. Immagine sullo schermo della diffrazione da fenditura.

È stata misurata la distanza fenditura-schermo:

$$L = (585 \pm 1) \text{ mm}$$

Quindi è stato fatto scorrere lentamente il fotodiodo lungo tutta l'ampiezza dell'immagine di diffrazione.

Il fotodiodo ha registrato l'intensità della luce di ogni singola frangia ed ha inviato i dati al computer. Quest'ultimo, attraverso il programma Data Studio, ha elaborato il grafico di Fig. 5, in cui sull'asse delle ascisse è riportata la posizione in mm:

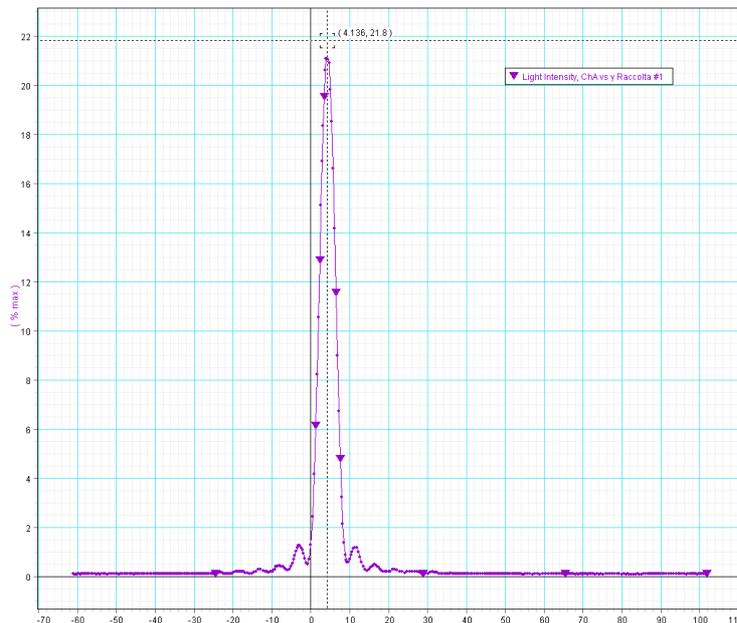


Fig. 5. Dati rilevati dal fotodiodo.

È stata misurata la distanza dal massimo centrale dei primi 4 minimi a destra e dei primi 4 minimi a sinistra dello stesso. È stata calcolata l'ampiezza della fenditura in relazione alle diverse misurazioni (calcolando l'errore di volta in volta); quindi, è stato determinato il valore medio fra i risultati appena ottenuti e verificata la sua compatibilità con il valore nominale (0.08 mm) riportato sulla fenditura utilizzata.

k	y (mm)	a (mm)
-4	19.5 ± 0.4	0.0779 ± 0.002
-3	15.0 ± 0.4	0.0763 ± 0.002
-2	10.1 ± 0.4	0.0752 ± 0.003
-1	4.9 ± 0.4	0.0774 ± 0.006
1	5.2 ± 0.4	0.0736 ± 0.006
2	10.3 ± 0.4	0.0735 ± 0.003
3	15.2 ± 0.4	0.0750 ± 0.002
4	20.0 ± 0.4	0.0759 ± 0.002

Valore medio di a :
 (0.076 ± 0.003) mm

L'errore assoluto su a è calcolato con:

$$\Delta a = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta y}{y} \right) \cdot a$$

e come errore sul valore medio è stata presa la media dei singoli errori.

Diffrazione da due fenditure

È stato sostituito l'oggetto diffrangente a singola fenditura con l'oggetto diffrangente a fenditura doppia. Proiettata la luce attraverso le fenditure, è stata ottenuta un'immagine di diffrazione e interferenza costituita da spot principali di luce e buio, alternati fra loro, la cui intensità è modulata in modo simmetrico rispetto al massimo centrale (Fig. 6)



Fig. 6. Immagine sullo schermo della diffrazione di due fenditure.

Procedendo analogamente al caso di una singola fenditura e' stato acquisito il grafico dell'intensità in funzione della posizione degli spot luminosi riportato in Fig. 7, con $L = (585 \pm 1)$ mm:

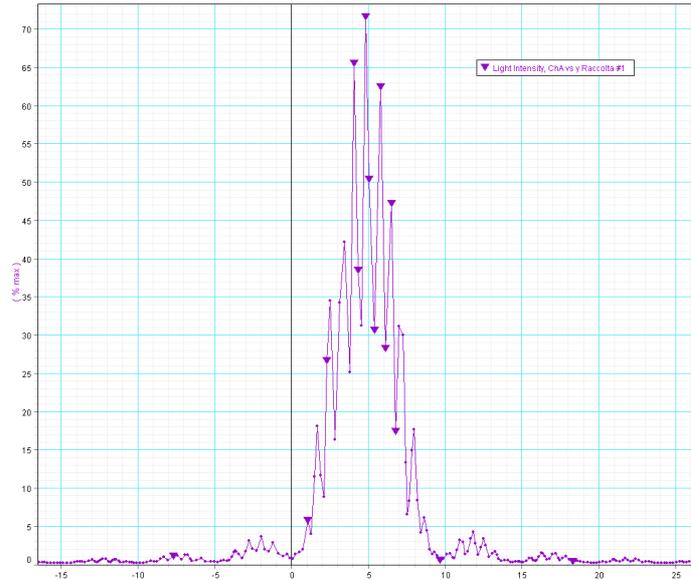


Fig. 7. Dati rilevati dal fotodiiodo.

Utilizzando il programma Data Studio, è stata misurata la distanza dei primi 4 minimi (della figura di diffrazione) a destra del massimo centrale e dei primi 4 minimi a sinistra dello stesso. È stata quindi calcolata l'ampiezza delle due fenditure per ogni singolo massimo ed è stato valutato il valore medio dell'ampiezza. Infine è stata verificata la compatibilità fra il valore ottenuto sperimentalmente ed il valore nominale (0.08 mm).

k	y (mm)	a (mm)
-4	19.8 ± 0.4	0.0767 ± 0.002
-3	15.0 ± 0.4	0.0761 ± 0.002
-2	9.6 ± 0.4	0.0789 ± 0.003
-1	4.8 ± 0.4	0.0798 ± 0.007
1	4.8 ± 0.4	0.0778 ± 0.007
2	9.6 ± 0.4	0.0793 ± 0.003
3	14.8 ± 0.4	0.0772 ± 0.002
4	19.4 ± 0.4	0.0783 ± 0.002

Valore medio a :
 (0.078±0.004) mm

Dal grafico è stata misurata la distanza dei primi 4 massimi a destra (della figura di interferenza) del massimo centrale e dei primi 4 massimi a sinistra dello stesso, per calcolare la distanza fra i centri delle due fenditure. E' stata quindi determinata la media dei valori ottenuti e verificato che tale risultato fosse compatibile con il valore nominale del passo (0.5 mm) delle fenditure.

n	l (mm)	h (mm)
-4	3.2 ± 0.4	0.48 ± 0.06
-3	2.3 ± 0.4	0.49 ± 0.09
-2	1.4 ± 0.4	0.5 ± 0.2
-1	0.8 ± 0.4	0.5 ± 0.3
1	0.9 ± 0.4	0.4 ± 0.2
2	1.7 ± 0.4	0.5 ± 0.1
3	2.2 ± 0.4	0.53 ± 0.10
4	3.2 ± 0.4	0.48 ± 0.06

Valore medio h :
 (0.5±0.1) mm

L'errore assoluto su h è calcolato con:

$$\Delta h = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot h$$

e come errore sul valore medio è stata presa la media dei singoli errori.

Diffrazione da un reticolo

Sul banco ottico è stato posizionato un reticolo di fenditure. Il grafico relativo alla figura di diffrazione è riportato in Fig. 8 con $L = (529 \pm 1)$ mm:

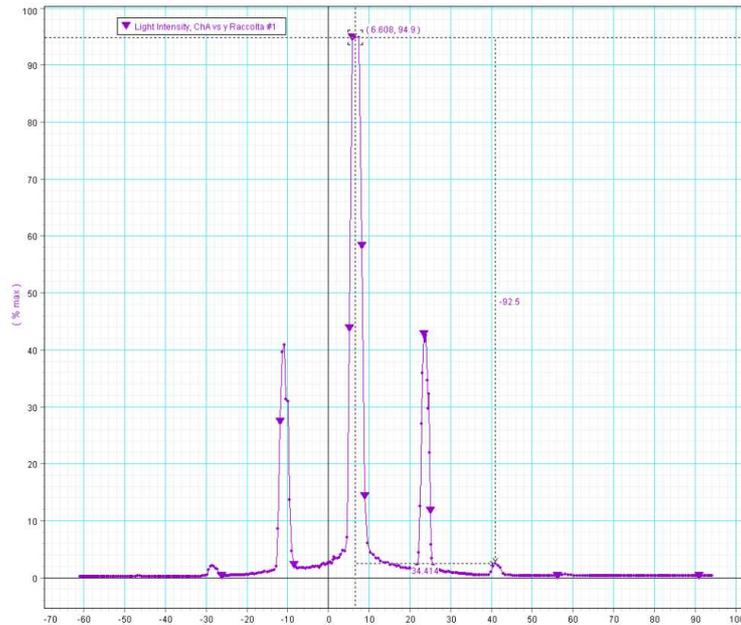


Fig. 8. Dati rilevati dal fotodiiodo.

E' stata misurata la distanza dei primi 2 massimi a destra del massimo centrale e dei primi 2 massimi a sinistra dello stesso, calcolato il passo delle fenditure del reticolo in relazione alle singole misurazioni e il numero di fenditure per millimetro, valutata la media dei risultati ottenuti e verificata la compatibilita' con i valori nominali (0.02 mm e 50 linee/mm, rispettivamente).

n	l (mm)	h (mm)	Linee/mm (mm^{-1})
-2	34.4 ± 0.4	0.0200 ± 0.0003	50.0 ± 0.7
-1	16.7 ± 0.4	0.0206 ± 0.0005	49 ± 1
1	16.7 ± 0.4	0.0205 ± 0.0005	49 ± 1
2	34.4 ± 0.4	0.0200 ± 0.0003	50.0 ± 0.7

Valore medio h :
(0.0203 \pm 0.0004) mm

Valore medio
Linee/mm:
(49 \pm 1) mm^{-1}

L'errore assoluto sul numero di Linee/mm è calcolato con:

$$\Delta(\text{Linee/mm}) = \left(\frac{\Delta h}{h} \right) \cdot (\text{Linee/mm})$$

e come errore sul valore medio è stata presa la media dei singoli errori.

Conclusioni

Gli esperimenti descritti consentono di verificare la natura ondulatoria della luce.

Il primo esperimento permette di osservare il fenomeno attraverso l'utilizzo di una fenditura rettilinea di ampiezza pari a 0,08 mm. Avendo effettuato otto misurazioni, il risultato ottenuto può essere considerato accettabile, in quanto il valore finale dell'ampiezza, ossia $a = (0.076 \pm 0.003)$ mm, è una buona approssimazione dell'ampiezza nominale della fenditura.

Nel secondo esperimento, il fenomeno di diffrazione è analizzato in concomitanza al fenomeno di interferenza. Ciò è possibile attraverso l'utilizzo di due fenditure rettilinee di uguale ampiezza. I risultati ottenuti $a = (0.078 \pm 0.004)$ mm e $h = (0.5 \pm 0.1)$ mm nono entrambi compatibili entro gli errori sperimentali con i valori nominali delle fenditure, ovvero: $a = 0.08$ mm e $b = 0.50$ mm.

Infine, nel terzo esperimento, l'oggetto diffrangente utilizzato è un reticolo avente 50 fenditure per mm. Il risultato ottenuto di (49 ± 1) Linee/mm è compatibile entro gli errori sperimentali con il valore nominale.

2.5 L'ottica ondulatoria: leggi dell'interferenza e della diffrazione (2)

Studio del fenomeno dell'interferenza mediante l'interferometro di Michelson

Scopo dell'esperienza

Studio delle proprietà di interferenza della luce mediante l'uso di un interferometro di Michelson e misura della lunghezza d'onda di una sorgente laser.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Interferometro di Michelson
- Laser He-Ne ($\lambda=632.8$ nm)

Premesse teoriche

L'interferometro di Fig. 1 può essere schematizzato secondo quanto riportato in Fig.2:



Fig.1. Interferometro di Michelson.

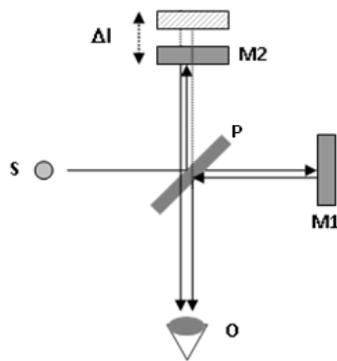


Fig.2. Schema dell'interferometro.

Un sottile fascio di luce emesso dalla sorgente laser S incide su uno specchio semiriflettente P, posto al centro della piattaforma per dividere il raggio in due. Il primo raggio, rifratto attraverso lo specchio semiriflettente, viene successivamente riflesso dallo specchio fisso M_1 e, dopo essere tornato indietro, viene nuovamente riflesso dallo specchio S e diretto verso l'osservatore (schermo) O. Il secondo raggio, dapprima riflesso dallo specchio semiriflettente e successivamente dallo specchio mobile M_2 , torna indietro e dopo aver attraversato S giunge anch'esso sullo schermo. I due raggi di luce che giungono sullo schermo, dopo aver percorso cammini ottici differenti producono un sistema di frange di interferenza.

Esecuzione delle misure

Dopo aver allineato gli specchi dell'interferometro con il laser per visualizzare le frange di interferenza, si fa traslare lo specchio mobile M_2 per osservare lo spostamento delle frange di interferenza dovute alla variazione della differenza di cammino ottico (Fig.3).



Fig. 3. Frange di interferenza sullo schermo.

Si misura la differenza di cammino ottico corrisponde ad un prefissato numero di frange Δn che scorrono sullo schermo e si determina la lunghezza d'onda del laser He-Ne sapendo che lo spostamento subito dallo specchio mobile è legato alla lunghezza d'onda e al numero di frange scure (o luminose) contate, mediante la relazione:

$$\lambda = \frac{2\Delta l}{\Delta n} = \frac{2\Delta x}{5\Delta n} \quad (1)$$

dove, Δl è l'escursione dello specchio mobile, $2\Delta l$ rappresenta la variazione della differenza di cammino ottico dei due raggi e Δx è la lettura corrispondente all'escursione di M_2 su una vite micrometrica ad esso collegata per cui vale la relazione $\Delta l = \Delta x / 5$.

Dopo aver contato il passaggio di $\Delta n = (50 \pm 1)$ frange si è riscontrato un Δx pari a $(0,080 \pm 0,005)$ mm. Applicando la formula per il calcolo della lunghezza d'onda e valutando l'indeterminazione ad essa associata dalla relazione:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} + \frac{\Delta(\Delta n)}{\Delta n} \quad (2)$$

è stato trovato un valore pari a (640 ± 50) nm.

Conclusioni

L'esperimento descritto consente un'ulteriore verifica della natura ondulatoria della luce.

Il risultato ottenuto per la lunghezza d'onda della radiazione luminosa utilizzata è compatibile, entro gli errori sperimentali, con il valore di 632,8 nm, lunghezza d'onda di un laser He-Ne.

Capitolo 3

Elettromagnetismo

3.1 La scarica del condensatore

Andamento temporale della carica accumulata sulle armature di un condensatore

Scopo dell'esperienza

Studio della scarica di un condensatore attraverso i fenomeni dell'induzione elettrostatica, della conservazione della carica elettrica e dell'immagazzinamento e trasformazione dell'energia elettrostatica.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Condensatore (con capacità 2700 μF)
- Resistenza elettrica (di valore 56 $\text{k}\Omega$)
- Alimentatore (con fondo scala 40 V)
- Interruttore e cavi per circuito elettrico
- Voltmetro analogico (con fondo scala 15V)
- Cronometro digitale (con sensibilità di 0.01 s)

Cenni teorici

Un condensatore è un dispositivo composto da due lastre metalliche, dette armature, separate da un isolante (dielettrico). L'accumulo di cariche positive su una faccia del condensatore comporta l'allontanamento delle cariche positive dall'altra faccia e quindi l'accumulo delle cariche negative. All'accumulo delle cariche di segno diverso sulle due piastre è connessa una differenza di potenziale elettrico.

Nei circuiti che contengono sia resistenze sia condensatori (circuiti RC), si definisce un tempo caratteristico $\tau=RC$ (costante di tempo del circuito) durante il quale avvengono variazioni significative.

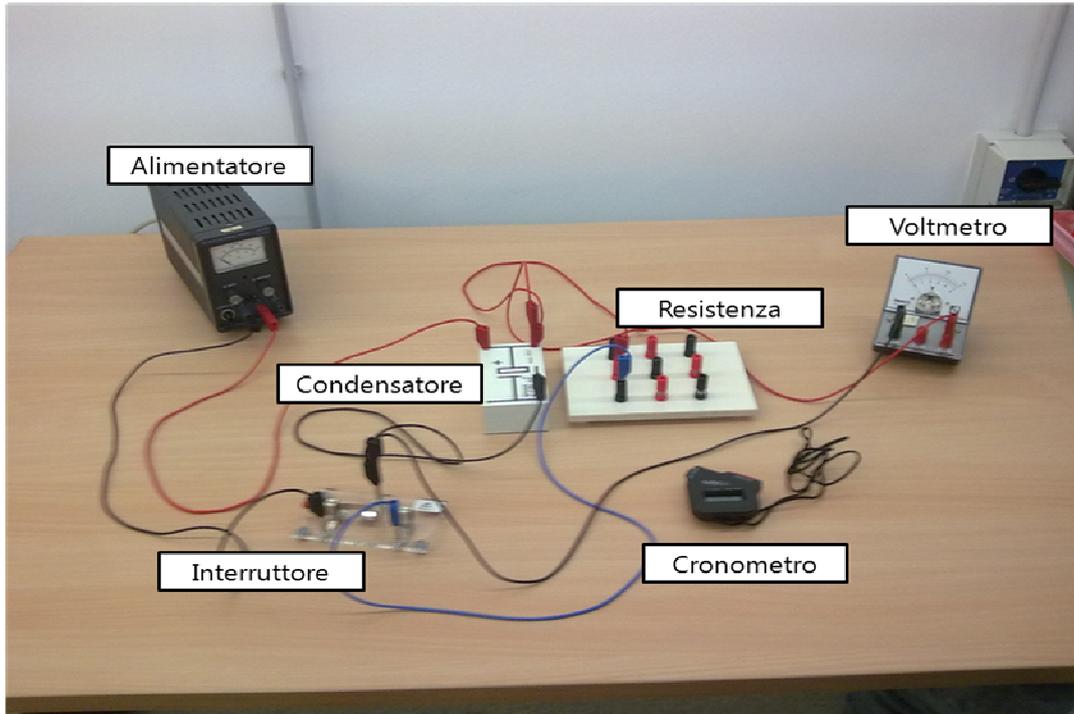


Fig.1. Foto della strumentazione utilizzata per l'esperienza.

Procedura sperimentale

Il circuito RC precedentemente descritto è raffigurato nella foto riportata in Fig. 1. Nella fase iniziale dell'esperienza il circuito elettrico, opportunamente realizzato a partire dalla strumentazione a disposizione, viene configurato come nella Fig. 2 a sinistra, posizionando cioè l'interruttore in modo tale da consentire al condensatore di caricarsi tramite il flusso di corrente proveniente dall'alimentatore: in tale fase le cariche elettriche si accumulano sulle facce del condensatore fino a che la tensione ai capi del condensatore, misurabile tramite il voltmetro collegato in parallelo, non eguaglia quella erogata dall'alimentatore, indicata nel seguito con V_0 .

Successivamente si agisce sull'interruttore in maniera tale da collegare la resistenza al condensatore (come rappresentato nella Fig.2 a destra): in questo modo l'energia elettrostatica accumulata nel condensatore si trasforma per effetto Joule in energia termica (calore sulla resistenza). L'accumulo di cariche sulle facce del condensatore si riduce fino ad annullarsi e con esso la differenza di potenziale, attraverso il processo di scarica del condensatore.

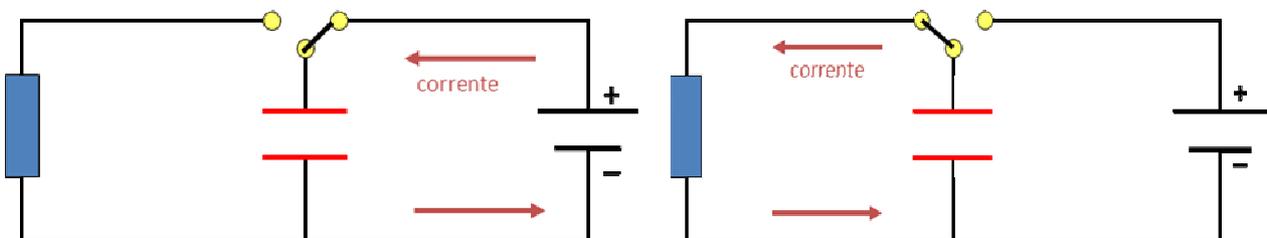


Fig.2. Schema della carica del condensatore (a destra) e della scarica del condensatore sulla resistenza (a sinistra)

La carica elettrica Q sul condensatore in fase di scarica varia nel tempo secondo la relazione di tipo esponenziale decrescente:

$$Q(t) = CV_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

dove con C si è indicata la capacità del condensatore. Analogamente, la tensione V misurata ai capi del condensatore varia secondo l'equazione:

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Ci si aspetta pertanto che la tensione V dopo un tempo pari a $t=\tau$ si riduca di un fattore $1/e$ rispetto al valore iniziale V_0 , per $t=2\tau$ si riduca di $1/e^2$, e così via, fino ad annullarsi (nei limiti della sensibilità del voltmetro) dopo un tempo sufficientemente lungo.

Non appena ha inizio la scarica, si misurano tramite il cronometro i valori dei tempi (t) in corrispondenza di fissati valori assunti dalla tensione ai capi del condensatore (V) per mezzo del voltmetro.

Le coppie di valori misurati per i tempi e per le tensioni (con incertezza assoluta di 0,01 s e di 0,03 V rispettivamente) sono riportati nella seguente tabella:

t (s)	V (V)
0,00	15,00
1,90	14,00
3,80	13,00
6,00	12,00
9,20	11,00
12,90	10,00
14,90	9,00
19,30	8,00
24,20	7,00
29,30	6,00
35,70	5,00
42,60	4,00
52,90	3,00
67,90	2,00
90,60	1,00
158,30	0,00

Dall'equazione (2) si può ricavare il tempo caratteristico τ in funzione di una data coppia di valori della tensione e del tempo:

$$\tau = -t / \ln(V/V_0) \quad (3)$$

e, dalla media di tutti i valori ricavati dai dati sperimentali raccolti, si ottiene una stima del τ del circuito, pari a $\tau_{\text{mis}}=31,3\pm 0,3$ s. Si rappresentano quindi in un piano cartesiano i valori di V rispetto al tempo t, ottenendo il grafico riportato di seguito, nel quale è stato effettuato un fit a una funzione esponenziale con una pendenza (“slope”) il cui opposto del reciproco ($32,5\pm 0,9$ s) è compatibile con il valore precedentemente misurato di τ_{mis} .

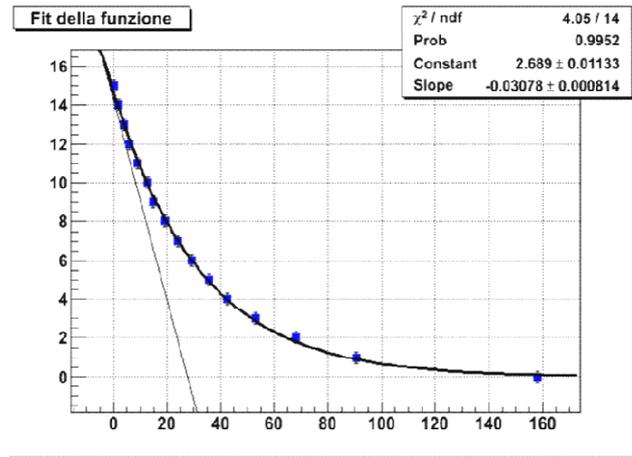


Fig.3. Dati sperimentali della tensione di scarica del condensatore con curva teorica data dall'equazione (2).

Si osserva tuttavia che il valore ottenuto non è uguale a quello che si ricava teoricamente moltiplicando i valori nominali di R e di C , dai quali ci si dovrebbe attendere un tempo caratteristico di 151,2 s. Questa situazione è presumibilmente determinata dalla presenza di una resistenza interna nel condensatore che ne provoca la scarica ancor prima che la sua carica si riversi sulla resistenza del circuito: questo valore può essere calcolato analizzando la resistenza equivalente (data dal parallelo tra resistenza R del circuito e resistenza interna R_{int} del condensatore)

$$R_{eq} = (1/R + 1/R_{\text{int}})^{-1} \quad (4)$$

dalla quale, avendo imposto la relazione $\tau_{\text{mis}} = R_{eq}C$, e sostituito i valori noti di R , C e τ_{mis} , si conclude che R_{int} ha un valore attorno ai 14 k Ω .

Conclusioni

E' stato verificato l'andamento di tipo esponenziale decrescente della tensione ai capi di un condensatore fatto scaricare attraverso una resistenza, misurando il tempo caratteristico del circuito e confrontandolo col valore atteso teoricamente.

3.2 Sistema molla-magnete

Studio di fenomeni di induzione magnetica e di trasformazioni energetiche

Scopo dell'esperienza

Studio del moto oscillatorio di un magnete in una bobina conduttrice e dell'intensità di corrente elettrica da esso indotta.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Magnete permanente collegato a una molla
- Bobina conduttrice fissata su un supporto
- Sistema di acquisizione dati connesso a un computer per la misura della corrente elettrica indotta all'interno della bobina.

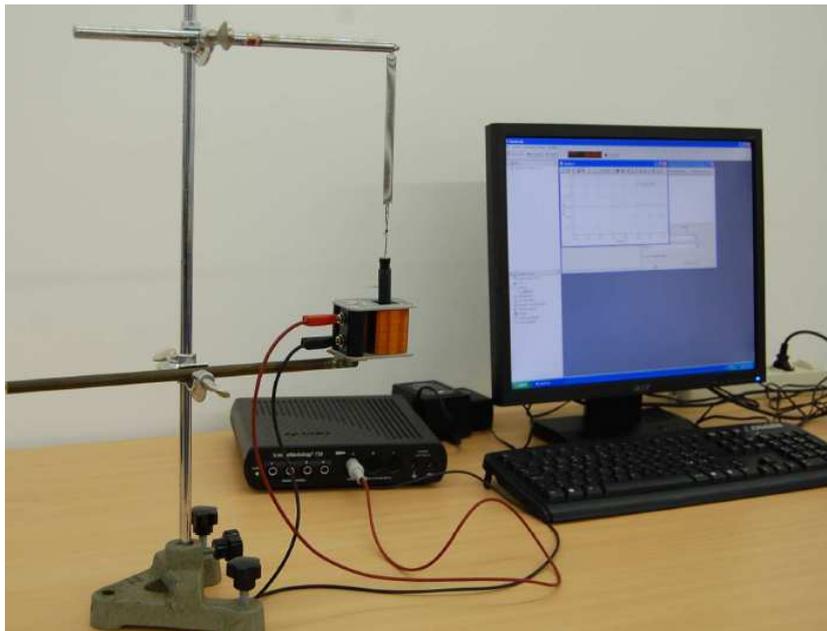


Fig.1. Foto della strumentazione utilizzata per l'esperienza.

Procedura sperimentale

Il magnete, connesso alla molla (Fig. 1), viene sospeso in posizione verticale e, dopo un opportuno allungamento della molla, viene lasciato oscillare in modo tale da penetrare all'interno della bobina conduttrice. Si pone cura affinché il moto oscillatorio del magnete sia il più possibile regolare lungo la direzione verticale, senza contatti con le pareti interne della bobina e tale da svilupparsi simmetricamente rispetto alla bobina stessa.

Per effetto dell'induzione magnetica, il moto del sistema molla-magnete genera nelle spire della bobina una corrente elettrica variabile dal momento che varia il flusso del campo magnetico. Si misura

l'intensità di tale corrente in funzione del tempo per mezzo del sensore collegato al sistema acquisizione dati.

L'andamento della corrente $i(t)$ rilevata dal sistema di acquisizione in funzione del tempo t è rappresentato nella Fig. 2, per un breve intervallo di tempo preso in considerazione.

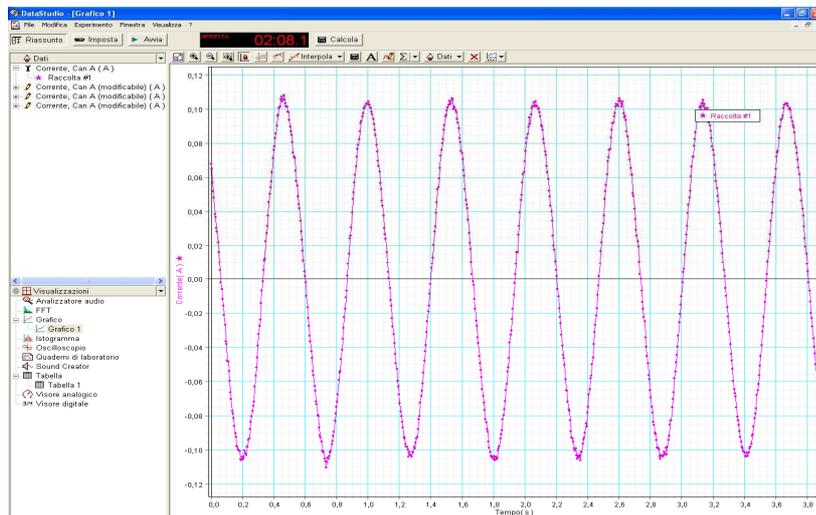


Fig. 2. Corrente indotta all'interno della bobina.

Al fine di verificare l'isocronia delle oscillazioni, sono stati considerati alcuni punti di massimo consecutivi nel grafico e si è verificato che essi corrispondono a istanti di tempo equispaziati tra loro, vale a dire che il periodo τ di oscillazione è una costante che non varia.

Tale procedura è soggetta a errori di tipo sistematico dovuti al fatto che la presa dati del sistema di acquisizione avviene con una frequenza finita (che nella fattispecie è stata fissata a 200 Hz) con la quale non si è in grado di misurare con continuità la corrente ad ogni istante di tempo. Per questo motivo si è assegnata ai valori di tempo t_i misurati un'incertezza assoluta di 5 ms, pari all'inverso della frequenza di acquisizione. Nella seguente tabella sono inoltre riportati (solo in parte) i valori delle correnti misurate in corrispondenza dei valori t_i prossimi ai massimi del grafico e, come differenze tra misure consecutive dei tempi, le stime del periodo τ .

t (s)	errore su t (s)	i (A)	errore su i (A)	τ (s)
0,465	$\pm 0,005$	0,108	$\pm 0,001$	—
0,990	$\pm 0,005$	0,104	$\pm 0,001$	0,525
1,540	$\pm 0,005$	0,106	$\pm 0,001$	0,550
2,070	$\pm 0,005$	0,104	$\pm 0,001$	0,530
2,605	$\pm 0,005$	0,106	$\pm 0,001$	0,535
3,135	$\pm 0,005$	0,105	$\pm 0,001$	0,530
3,675	$\pm 0,005$	0,104	$\pm 0,001$	0,540
4,215	$\pm 0,005$	0,105	$\pm 0,001$	0,540
4,725	$\pm 0,005$	0,104	$\pm 0,001$	0,510
5,285	$\pm 0,005$	0,105	$\pm 0,001$	0,560
5,820	$\pm 0,005$	0,102	$\pm 0,001$	0,535
6,350	$\pm 0,005$	0,102	$\pm 0,001$	0,530
6,870	$\pm 0,005$	0,101	$\pm 0,001$	0,520
7,410	$\pm 0,005$	0,101	$\pm 0,001$	0,540
7,955	$\pm 0,005$	0,103	$\pm 0,001$	0,545
8,475	$\pm 0,005$	0,103	$\pm 0,001$	0,520
9,015	$\pm 0,005$	0,102	$\pm 0,001$	0,540
9,555	$\pm 0,005$	0,102	$\pm 0,001$	0,540
10,085	$\pm 0,005$	0,100	$\pm 0,001$	0,530
10,615	$\pm 0,005$	0,102	$\pm 0,001$	0,530
11,155	$\pm 0,005$	0,100	$\pm 0,001$	0,540
11,685	$\pm 0,005$	0,103	$\pm 0,001$	0,530
12,240	$\pm 0,005$	0,100	$\pm 0,001$	0,555
12,760	$\pm 0,005$	0,098	$\pm 0,001$	0,520

Dall'insieme di valori misurati di τ , è possibile ricavare il valore medio $\langle \tau \rangle = 0,535$ s, con una deviazione standard di 0,011 s che, essendo dello stesso ordine delle incertezze sulle singole misure temporali, prova l'ipotesi che tutte le misure di τ provengono dal medesimo campione statistico, e dunque che le oscillazioni del magnete sono caratterizzate dallo stesso periodo al variare del tempo.

Successivamente, per provare che la corrente $i(t)$ si riduce nel tempo secondo una legge esponenziale, si è preso in considerazione l'intero insieme di valori (rappresentati nella figura sotto in un intervallo di tempo di 35 s) e si sono studiati i valori della corrente nei punti di massimo in funzione del tempo.

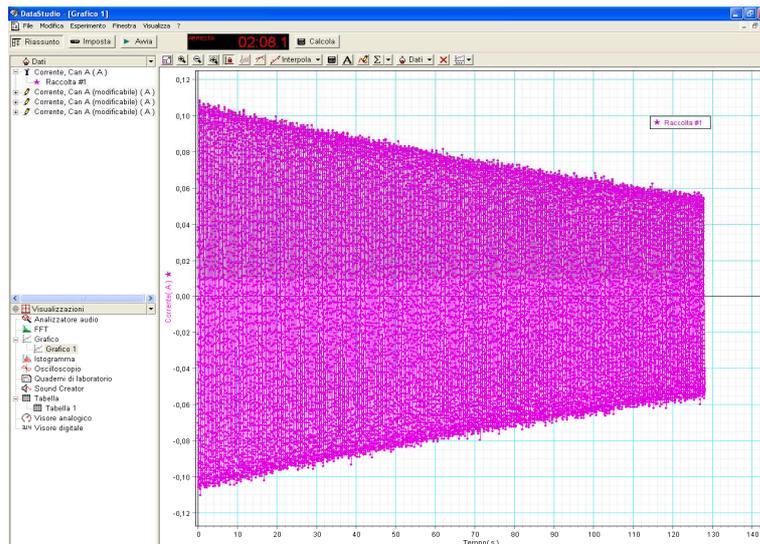


Fig. 3. Corrente indotta all'interno della bobina in un intervallo di tempo di 35 s.

I soli punti di massimo, selezionati tra tutti i valori acquisiti, sono stati rappresentati nel grafico riportato di seguito, con le incertezze già indicate precedentemente. Benché l'andamento risulti a prima vista di tipo lineare non essendo molto lungo l'intervallo di tempo di presa dati, è stato possibile comunque stimare il tempo τ di attenuazione nel tempo della corrente massima circolante nella bobina come opposto del reciproco del parametro "slope" ottenuto dal fit dei punti a una funzione esponenziale:

$$f(x) = \exp(\text{constant} + \text{slope} * x) .$$

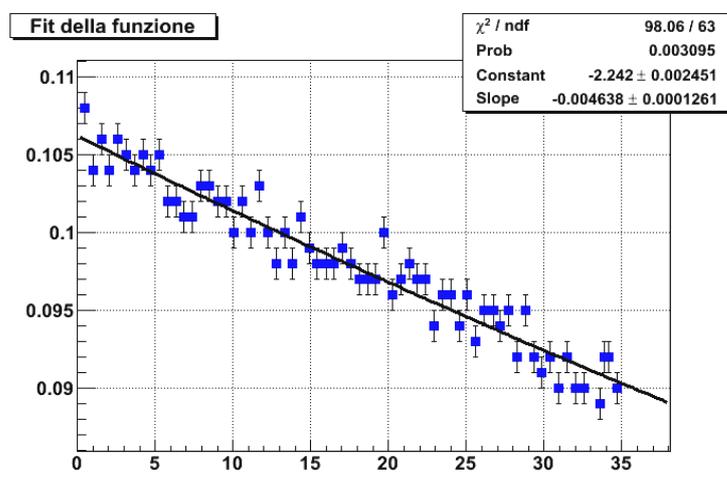


Fig. 4. Dati sperimentali per stimare il tempo di attenuazione.

Il valore così ricavato per il suddetto tempo di attenuazione è $\tau = (216 \pm 6)$ s. La qualità del fit risente parzialmente della sistematica legata alla difficoltà di individuare i massimi della corrente in funzione del tempo a causa della finita frequenza di acquisizione dati.

Conclusioni

Si è verificato che il sistema molla-magnete descritto in precedenza è in grado di muoversi all'interno della bobina compiendo oscillazioni isocrone, e di generare una corrente elettrica la cui intensità massima decresce esponenzialmente nel tempo, fino all'arresto del magnete per effetto dei vari attriti e della trasformazione di parte dell'energia.

3.3 Il motorino elettrico

Studio del funzionamento di un motorino elettrico e dei fenomeni fisici connessi (forza di Lorentz, trasformazioni energetiche e induzione magnetica)

Scopo dell'esperienza

Il motorino elettrico è costituito essenzialmente da avvolgimenti di filo conduttore, solidali con un albero rotore, in presenza di un campo magnetico. Nel caso in esame il campo è generato da magneti permanenti. Le cariche elettriche in moto (corrente elettrica) negli avvolgimenti sono soggette alla forza di Lorentz, cioè la forza a cui è sottoposta una carica elettrica in movimento in un campo magnetico. Gli avvolgimenti sono arrangiati in maniera tale che le forze risultanti si possano schematicamente rappresentare come forze opposte applicate in punti simmetrici del rotore (coppia). Quindi il rotore è sottoposto ad una coppia di forze che lo mette in rotazione. Un sistema di spazzole commuta l'alimentazione elettrica degli avvolgimenti in maniera che la forza di Lorentz non si annulli e che la rotazione sia continua.

All'aumentare della corrente elettrica, grazie all'alimentatore regolabile, i fili conduttori sono sottoposti ad una coppia di forze di maggiore intensità e quindi aumenta la velocità di rotazione del sistema. Nella presente esperienza si vuol verificare appunto la relazione tra corrente elettrica e frequenza di rotazione, osservando inoltre che l'energia elettrica fornita viene convertita in energia cinetica rotazionale e successivamente in calore per effetto degli attriti.

Al fine di misurare la frequenza della rotazione si sfrutta il fenomeno dell'induzione magnetica: un piccolo magnete permanente è saldato al rotore. Il campo generato da questo magnete è in rapido movimento insieme all'albero del motorino. Avvicinando un avvolgimento di fili conduttori (bobina), la variazione nel tempo del campo magnetico induce una differenza di potenziale sull'avvolgimento. Questo segnale viene analizzato dal tester e convertito in un segnale di frequenza, in Hz.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Alimentatore regolabile in continua
- Motorino elettrico
- Sonda per misura della frequenza (bobina)
- Misuratore di frequenza (tester) che apprezza fino 0.1 Hz



Fig. 1 Motorino elettrico

Procedura sperimentale

Si tratta semplicemente di misurare la frequenza di rotazione del motorino al variare della tensione di alimentazione. Si procede quindi alimentando il motorino in modo che si metta in lenta rotazione. Quindi si avvicina la bobina di misura alla parte superiore del motorino, dove è saldato il piccolo magnete (Fig. 2). Il tester a cui è collegata la bobina fornisce così il dato relativo alla frequenza di rotazione. Si prende nota della tensione di alimentazione impostata e della frequenza misurata. Si ripete più volte la procedura aumentando la tensione di alimentazione e quindi anche la velocità di rotazione. Si abbia cura di posizionare la bobina sempre alla stessa distanza dall'albero in rotazione e di non muoverla durante le singole misurazioni.

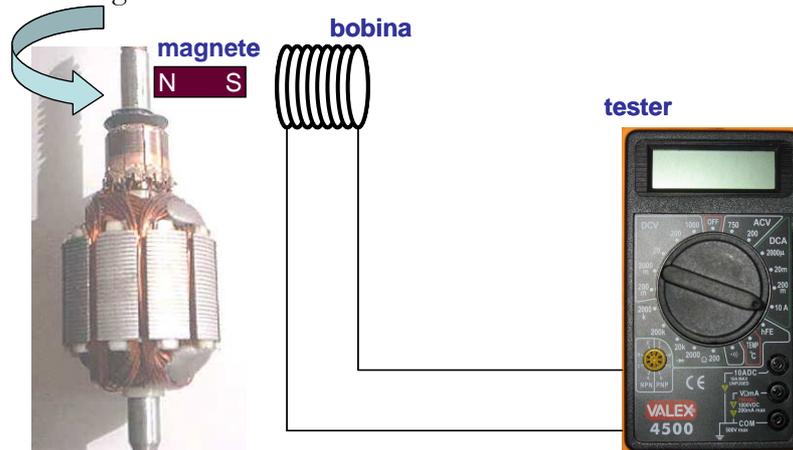


Fig. 2 La frequenza viene misurata avvicinando una bobina al magnete saldato sull'albero in rotazione del motorino elettrico. Il tester permette di leggere direttamente la frequenza in Hz.

A titolo di esempio in Fig. 3 sono rappresentati i risultati di 12 misure, assumendo errori dell'ordine di 0.05 V e 0.2 Hz. Questi valori devono essere considerati solo indicativi. Ripetendo l'esperienza in laboratorio si potranno riscontrare condizioni diverse (altro motorino, altri strumenti di misura) e comunque la stima degli errori va riconsiderata.

Nel caso dei dati in Fig. 3 il valore del chi-quadro ridotto (χ^2/ndf) è molto prossimo all'unità a conferma del buon accordo tra dati sperimentali e funzione di interpolazione, oltre che di una corretta stima degli errori.

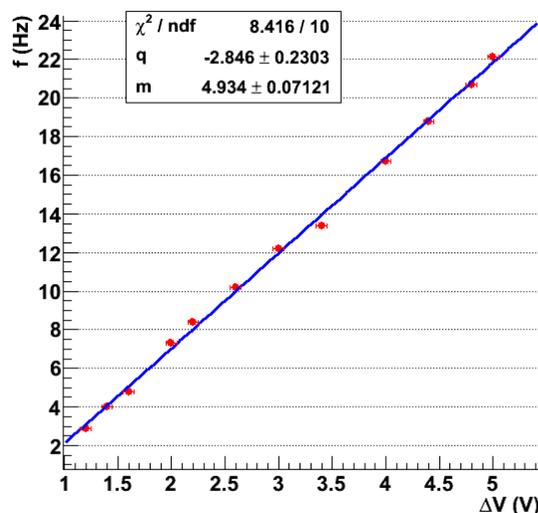


Fig. 3. Frequenza di rotazione del motorino (f) in funzione della tensione di alimentazione (ΔV).

Conclusioni

Dal grafico in Fig. 3 risulta evidente il carattere lineare della relazione tra tensione di alimentazione (ΔV) e frequenza di rotazione (f). Ricordando che l'energia elettrica fornita è proporzionale al quadrato della corrente, come pure al quadrato della tensione, mentre l'energia rotazionale è proporzionale al quadrato della frequenza di rotazione, si conclude che la linearità tra f e ΔV è dovuta alla relazione lineare tra energia elettrica fornita ed energia rotazionale del sistema.

A latere si noti che il fenomeno dell'induzione magnetica ha permesso di misurare f non intervenendo meccanicamente sul motorino in rotazione.

3.4 Il tubo a raggi catodici

Studio qualitativo dei principi di funzionamento di un tubo a raggi catodici

Scopo dell'esperienza

Questa esperienza non mira ad effettuare una vera e propria misura, ma piuttosto a comprendere i principi di funzionamento dell'oscilloscopio per mezzo di alcune osservazioni qualitative.

L'oscilloscopio è progettato per osservare la deviazione di un fascio di elettroni per effetto di campi elettrici e magnetici. Gli elettroni vengono emessi per effetto termoionico da un catodo opportunamente riscaldato (19 in fig. 1), la differenza di potenziale accelera gli elettroni verso l'anodo (18 in fig. 1). La forma dell'anodo permette agli elettroni di superare l'anodo stesso. Un ulteriore dispositivo (disco di Wehnelt) collima il fascio di elettroni che è visibile nel tubo come un pennello luminoso bluastro. Alle piastre deflettrici (17 in fig. 1) è applicato un campo elettrico, regolato in maniera tale che il fascio di elettroni arrivi al centro dello schermo fluorescente (22 in fig. 1).

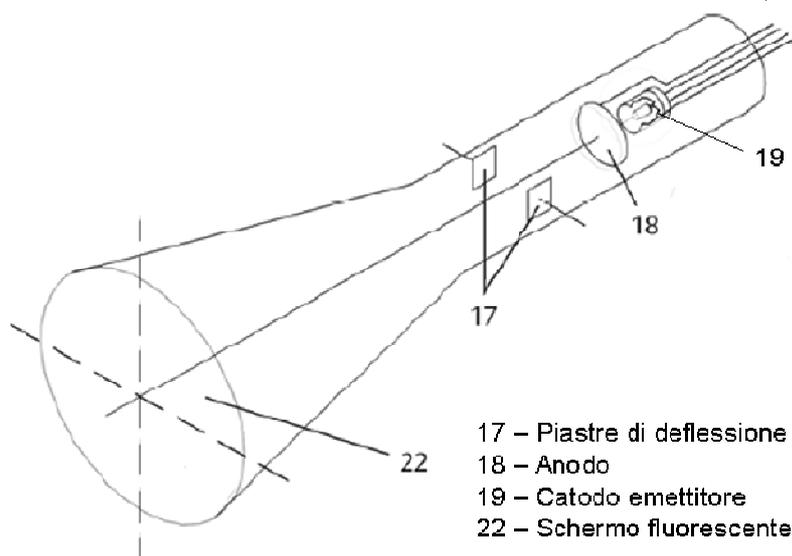


Fig. 1. Rappresentazione schematica del tubo catodico (tratto dal manuale della 3B Scientific).

Intorno al tubo catodico, montate su una struttura circolare, sono posizionate tre bobine (visibili in Fig. 2). Una volta alimentate, le bobine generano dei campi magnetici, in linea di massima paralleli all'asse delle bobine stesse, e gli elettroni vengono deflessi per effetto della forza di Lorentz

$$F = q v B \sin \chi \quad (1)$$

dove q è la carica elettrica, v la sua velocità, B l'intensità del campo magnetico e χ l'angolo tra la velocità e il campo magnetico. Dalla formula (1) si deduce che la forza di Lorentz è nulla su cariche ferme ($v=0$) o in assenza di campo magnetico ($B=0$). Inoltre la forza è perpendicolare sia al campo magnetico che alla velocità della carica.

E' possibile alimentare quanti e quali bobine si voglia, è anche possibile invertire la polarità dell'alimentazione. Questo permette di studiare separatamente gli effetti dei singoli campi magnetici e verificare come tali campi si sommano (maggiori dettagli nel paragrafo sulla procedura di misura).

Strumentazione e materiale a disposizione

- Oscilloscopio didattico, composto da: ampolla di vetro sottovuoto (tubo catodico), catodo incandescente, anodo, piastre di deflessione, anello con bobine di deflessione, schermo fluorescente.
- Alimentatore per l'oscilloscopio. Quattro canali permettono di alimentare separatamente: l'anodo, il catodo che così viene riscaldato, il disco di Wehnelt e le piastre deflettrici.
- Alimentatore per le bobine e basetta per alimentazione in parallelo. Un unico canale di alimentazione permette di alimentare in parallelo le tre bobine. Inserendo o togliendo gli spinotti dalla basetta si decide quali e quante bobine alimentare. Invertendo gli spinotti si inverte la polarità dell'alimentazione.



Fig. 2 Dispositivi usati per l'esperienza. A sinistra l'alimentatore con 4 canali, al centro l'alimentatore delle bobine. A destra il tubo catodico, circondato da una struttura circolare su cui sono montate le 3 bobine deflettrici.

Procedura sperimentale

Si accenda l'alimentatore e si aspetti il tempo necessario perchè il catodo si riscaldi. Quindi si prenda nota, sinteticamente, di tutto quello che si può osservare circa l'emissione degli elettroni dal catodo, la loro accelerazione e la propagazione nel tubo, fino allo schermo fluorescente.

Si proceda quindi ad alimentare una sola bobina, si osservi lo spostamento della macchia luminosa sullo schermo fluorescente e si spieghi tale effetto in termini di campo magnetico generato dalla bobina e di forza di Lorentz agente sugli elettroni. Si ricordi che il campo magnetico è allineato con l'asse della bobina e che la forza di Lorentz è perpendicolare sia al campo magnetico che alla velocità degli elettroni. Si inverta la polarità della spira e si osservi che lo spostamento si inverte. Si ripeta la procedura con le altre bobine.

Si alimentino le due bobine orizzontali in maniera che le forze sugli elettroni si annullino reciprocamente e la macchia luminosa resti centrale. Si inverta la polarità di una bobina e si verifichi che l'effetto è doppio rispetto a quello di una singola bobina (principio di sovrapposizione per i campi magnetici).

Si alimenti anche la terza bobina e si commenti l'ulteriore spostamento della macchia luminosa.

Si rimanda alla fantasia dello studente affinchè individui altre configurazioni delle bobine alimentate per mezzo delle quali verificare gli effetti magnetici sugli elettroni in movimento.

Conclusioni

Sono stati verificati diversi fenomeni fisici:

- emissione ed accelerazione di elettroni
- collimazione di un fascio di elettroni
- risposta di uno schermo fluorescente
- generazione di campi magnetici tramite bobine percorse da corrente
- azione della forza di Lorentz su cariche elettriche in movimento
- carattere additivo dei campi magnetici

3.5 Il trasformatore

Studio dell'accoppiamento magneto-induttivo tra due bobine, una delle quali alimentata in corrente alternata

Scopo dell'esperienza

Si vuole studiare il fenomeno dell'induzione magnetica utilizzando un trasformatore. Questo non è altro che una coppia di bobine (avvolgimenti di filo conduttore), una delle quali (circuito primario, A in fig. 1) è alimentata. La corrente elettrica che la percorre genera un campo magnetico. Una sbarra metallica (traferro, C in fig. 1) fa sì che questo campo magnetico sia presente anche nella seconda bobina (secondario, B in fig. 1), non alimentata. Poichè la corrente nel primario è alternata, il campo magnetico è variabile e questo induce una forza elettromotrice nel secondario (induzione magnetica).

In questa esperienza si misurerà la tensione indotta (ΔV) sul circuito secondario al variare della distanza (L) tra primario e secondario e quindi della porzione di traferro non interna ai due circuiti. Ci si aspetta che all'aumentare della porzione di traferro scoperta diminuisca l'accoppiamento magnetico tra i due circuiti e quindi sia minore la forza elettromotrice indotta sul secondario. La misura permetterà di determinare la forma funzionale della relazione tra L e ΔV .

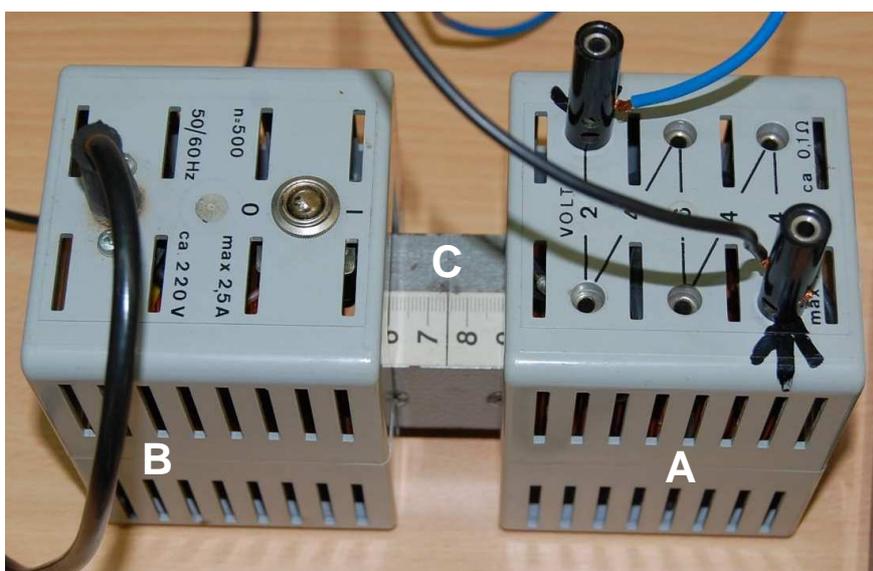


Fig. 1 – Il trasformatore utilizzato nell'esperienza. L'avvolgimento primario (A) è alimentato in corrente alternata, quello secondario (B) non è alimentato. Le due bobine sono accoppiate tramite un barra metallica (C, traferro). Il campo magnetico variabile generato dalla corrente nel primario è presente anche nel secondario ed induce una forza elettromotrice (induzione magnetica).

Strumentazione e materiale a disposizione

- Due bobine (primario e secondario), cioè avvolgimenti di filo di rame. Le bobine hanno la stessa lunghezza, ma un numero diverso di spire. Il primario è alimentato (6.5 V in alternata)
- Traferro (barra metallica con scala graduata)
- Interruttore per attivare l'alimentazione del circuito primario
- Voltmetro e raddrizzatore. Quest'ultimo trasforma la tensione alternata indotta sul secondario in tensione continua. Il voltmetro misura appunto questa tensione in continua.

Procedura sperimentale

Si realizzi il massimo accoppiamento tra i due circuiti, riducendo a zero la distanza tra di essi. Si abbia cura di posizionare il traferro simmetricamente (la stessa porzione in entrambe i circuiti). Si accenda quindi il circuito primario e si misuri la tensione sul secondario. Fatto questo, si spenga il circuito primario.

Si separino i due circuiti di qualche centimetro, sempre tenendo simmetrico il traferro, si riaccenda il primario e si misuri la tensione sul secondario. Si spenga nuovamente il primario. Si ripeta l'operazione finchè possibile, prendendo sempre nota della distanza L e della tensione ΔV .

In Fig. 2 sono rappresentati i risultati di 10 misure. Questi dati sono soltanto indicativi. Svolgendo effettivamente l'esperienza in laboratorio i risultati delle misure potranno essere abbastanza differenti. Si lascia allo studente la stima degli errori (nel grafico di Fig. 2 si sono assunti errori di 2 mm e di 0.1 volt).

I dati sperimentali sembrano disporsi su una curva esponenziale. Nella Fig. 2 sono stati interpolati con la funzione

$$\Delta V = \Delta V_0 \exp(-L/L_0) \quad (1)$$

Il risultato di questa interpolazione è accettabile ed infatti il valore del chi-quadro ridotto (χ^2/ndf) risulta dell'ordine di 1 ($12.66/8 = 1.6$) a conferma del buon accordo tra dati sperimentali e funzione di interpolazione.

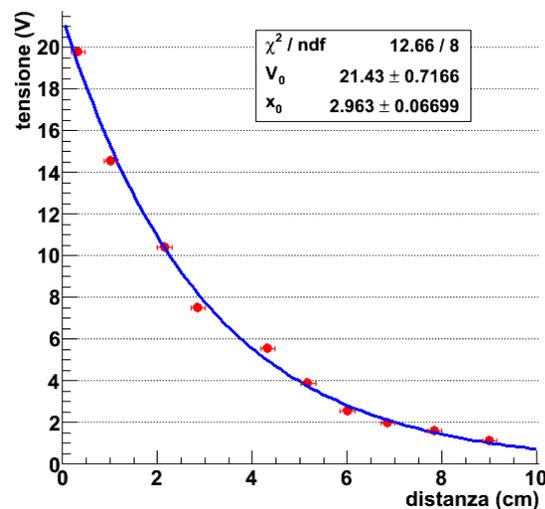


Fig. 2 Misure della tensione sul circuito secondario in funzione della distanza tra i circuiti. Gli errori stimati sono 0.1 V e 0.2 cm. Questo grafico ha solo valore di esempio.

Conclusioni

E' stato verificato l'andamento di tipo esponenziale decrescente della funzione che lega la forza elettromotrice indotta ΔV con la distanza L tra i circuiti. Questo risultato conferma che la forza elettromotrice dipende dall'accoppiamento magnetico tra i due circuiti e che tale accoppiamento si realizza per mezzo del traferro.

Ulteriore controllo

Si provi a ripetere l'esperienza senza il traferro, semplicemente posizionando alle diverse distanze i due circuiti. Ci si aspetta di trovare valori molto minori di ΔV perchè l'accoppiamento magnetico è molto meno efficiente. Si verifichi tale ipotesi.

Capitolo 4

Fisica Moderna

4.1 L'esperienza di Millikan

Verifica della quantizzazione della carica elettrica

Scopo dell'esperienza

Misura della carica elettrica di goccioline d'olio accelerate da un campo elettrico uniforme. Verifica della granularità della carica elettrica e dell'esistenza di una carica fondamentale di cui tutte le cariche sono multiple.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Piano di base
- Microscopio con oculare e micrometro
- Condensatore piano
- Dispositivo per illuminare con alimentatore (corrente continua)
- Nebulizzatore d'olio
- Pompetta di gomma per olio, contenente olio di densità nota
- Base d'appoggio
- Cronometro digitale

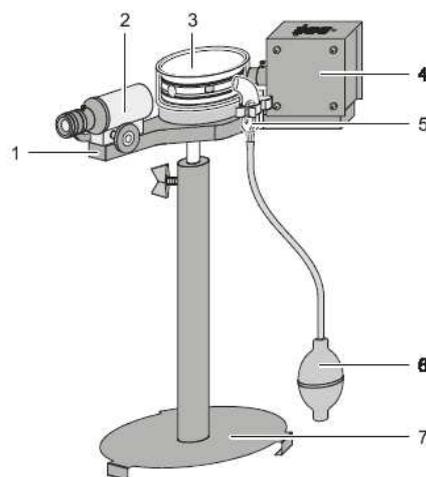


Fig. 1. Schema dell'apparato sperimentale.

Cenni storici e teorici

Nel 1909 Robert Andrews Millikan fu il primo a misurare la carica elementare di elettricità, attraverso l'esperimento della "gocciolina d'olio", ottenendo già una precisione dello 0.1%:

$$Q = (1.592 \pm 0.0017) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

e provando empiricamente l'esistenza degli elettroni. Millikan riuscì nel suo intento studiando in maniera appropriata il moto di alcune goccioline dalle dimensioni micrometriche, ottenute dalla nebulizzazione di un olio di densità nota. L'articolo definitivo (1913) valse a Millikan, dieci anni più tardi, il riconoscimento del premio Nobel. Il valore attualmente noto della carica dell'elettrone è:

$$Q = (1.602\,176\,487 \pm 0.000\,000\,040) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Procedura sperimentale

Agendo sulla pompetta si immettono delle goccioline d'olio nella cameretta delimitata dalle armature del condensatore piano (avente potenziale regolabile) e dal coperchio in plastica, sul quale sono presenti due appositi forellini. La cameretta è illuminata per rendere le goccioline osservabili tramite un microscopio con oculare munito di una scala graduata. Le immagini del microscopio, catturate da un'apposita videocamera, sono visibili su uno schermo, sufficientemente ingrandite in modo da osservare meglio il processo.

Alcune delle goccioline che raggiungono l'interno del condensatore si caricano elettricamente per effetto della frizione con l'aria e, tramite il campo elettrico, possono essere accelerate lungo l'asse verticale, lungo il quale agiscono le seguenti forze (vedere Fig. 2):

- la forza peso: $F_p = mg$;
- la spinta di Archimede: F_a ;
- la forza viscosa: $F_{av} = 6\pi\eta r v_d$;
- la forza elettrica: $F_e = qE = q(V/d)$,

dove q , r e m sono, rispettivamente, la carica elettrica, il raggio e la massa della gocciolina, v_d è la sua velocità di deriva, η è il coefficiente di viscosità dell'aria pari a $1.82 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, E è il campo elettrico pari al rapporto tra il potenziale V (variabile tra 0 e 600 V) del condensatore e la distanza d (con valore $6.00 \pm 0.05 \text{ mm}$) tra le armature dello stesso.

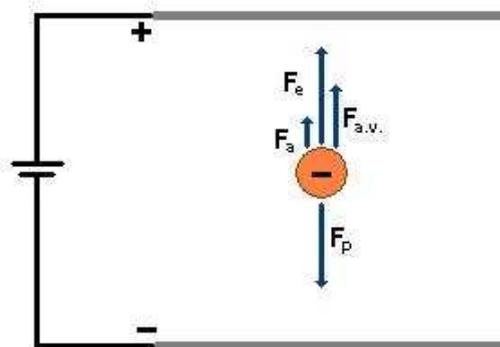


Fig. 2. Schema rappresentativo delle forze che agiscono sulle goccioline.

Per la densità dell'olio si è impiegato il valore di $\rho_{\text{olio}} = 0.871 \text{ g/cm}^3$ (alla temperatura di 25° C), valendo quindi la relazione $m = (4\pi/3) \rho_{\text{olio}} r^3$.

Per il calcolo della spinta di Archimede $F_a = (4\pi/3) \rho_{\text{aria}} r^3 g$, considerato un valore della densità dell'aria $\rho_{\text{aria}} = 0.0012 \text{ g/cm}^3$, si può subito osservare che questa può essere trascurata, dal momento che equivale a circa un millesimo del peso della gocciolina, indipendentemente dalle sue dimensioni.

Mantenendo il condensatore scarico ($V=0$), la gocciolina è soggetta solo alla forza peso e a quella di attrito viscoso e, inoltre, il moto di caduta non è accelerato se non nei primi istanti, poiché l'aria costituisce un mezzo viscoso nel quale la goccia, di massa molto piccola, raggiunge subito la velocità di

regime. Nel momento in cui viene raggiunta la velocità di regime v_d , la gocciolina non scende più di moto accelerato, in quanto la forza peso e quella di attrito viscoso si equivalgono, pertanto

$$F_p = F_{a.v.} \Rightarrow mg = 6\pi\eta r v_d \Rightarrow (4\pi/3) \rho_{olio} r^3 g = 6\pi\eta r v_d$$

da cui si ricava il raggio della gocciolina:

$$r = \sqrt{\frac{9 \eta v_d}{2 \rho g}} \quad (1)$$

Variando il potenziale del condensatore si può controllare il moto delle goccioline all'interno della camera, ovvero applicando una differenza di potenziale tale da far prevalere la forza elettrica sulle altre forze. Caricata negativamente, la gocciolina comincerà a salire, perché attirata dall'armatura positiva del condensatore. È possibile anche trovare il valore di potenziale per il quale la risultante delle forze agenti sulla gocciolina è nulla e quindi la gocciolina si ferma. In questa situazione ($V \neq 0$), si ha:

$$F_e = F_p = F_{a.v.} \Rightarrow q(V/d) = (4\pi/3) \rho_{olio} r^3 g = 6\pi\eta r v_d \Rightarrow q = (6\pi\eta r v_d d)/V \quad (2)$$

e, impiegando la precedente relazione relativa al raggio, si ottiene

$$q = \frac{18\pi d \eta^{3/2} v_d^{3/2}}{\sqrt{2\rho g} V} \quad (3)$$

che può essere sintetizzata, ponendo la prima frazione al secondo membro uguale a C

$$q = C \frac{v_d^{3/2}}{V} \quad (4)$$

essendo $C \approx (2,00 \pm 0,06)10^{-10}$ in unità M.K.S.

Per calcolare la carica, è dunque necessario solo calcolare la velocità di deriva $v_d = s/t$ della gocciolina in questione una volta azzerato il potenziale. Per fare ciò, vengono misurati sullo schermo spostamenti della gocciolina, cronometrando contemporaneamente i relativi tempi e calcolando dal loro rapporto il valore della corrispondente velocità di deriva.

Nella tabella seguente sono riportate le misure compiute su distinte goccioline:

V (V)	t (s)	s (m)	v _d (m/s)	q (C)
191 ± 1	32 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	4,7·10 ⁻⁵ ± 0,5·10 ⁻⁵	3,4·10 ⁻¹⁹ ± 0,6·10 ⁻¹⁹
142 ± 1	46 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	3,3·10 ⁻⁵ ± 0,3·10 ⁻⁵	2,6·10 ⁻¹⁹ ± 0,4·10 ⁻¹⁹
205 ± 1	42 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	3,6·10 ⁻⁵ ± 0,1·10 ⁻⁵	2,1·10 ⁻¹⁹ ± 0,4·10 ⁻¹⁹
218 ± 1	40 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	3,7·10 ⁻⁵ ± 0,3·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻¹⁹ ± 0,3·10 ⁻¹⁹
211 ± 1	25 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	6,0·10 ⁻⁵ ± 0,6·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻¹⁹ ± 0,8·10 ⁻¹⁹
294 ± 1	24 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	6,2·10 ⁻⁵ ± 0,7·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻¹⁹ ± 0,6·10 ⁻¹⁹
281 ± 1	34 ± 1	1,5·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	4,4·10 ⁻⁵ ± 0,4·10 ⁻⁵	2,0·10 ⁻¹⁹ ± 0,4·10 ⁻¹⁹
348 ± 1	30 ± 1	1,8·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	6,0·10 ⁻⁵ ± 0,5·10 ⁻⁵	2,7·10 ⁻¹⁹ ± 0,5·10 ⁻¹⁹
392 ± 1	18 ± 1	1,2·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	6,7·10 ⁻⁵ ± 0,7·10 ⁻⁵	2,8·10 ⁻¹⁹ ± 0,5·10 ⁻¹⁹
335 ± 1	13 ± 1	1,2·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	9,2·10 ⁻⁵ ± 0,9·10 ⁻⁵	5,3·10 ⁻¹⁹ ± 0,8·10 ⁻¹⁹
252 ± 1	25 ± 1	1,8·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	7,2·10 ⁻⁵ ± 0,6·10 ⁻⁵	4,9·10 ⁻¹⁹ ± 0,7·10 ⁻¹⁹
235 ± 1	13 ± 1	0,6·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	4,6·10 ⁻⁵ ± 0,8·10 ⁻⁵	2,7·10 ⁻¹⁹ ± 0,9·10 ⁻¹⁹
330 ± 1	13 ± 1	0,6·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	4,6·10 ⁻⁵ ± 0,8·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻¹⁹ ± 0,8·10 ⁻¹⁹
299 ± 1	22 ± 1	1,8·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	8,2·10 ⁻⁵ ± 0,9·10 ⁻⁵	5,0·10 ⁻¹⁹ ± 0,9·10 ⁻¹⁹
168 ± 1	34 ± 1	1,0·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	5,6·10 ⁻⁵ ± 0,7·10 ⁻⁵	5,0·10 ⁻¹⁹ ± 0,9·10 ⁻¹⁹
377 ± 1	18 ± 1	2,3·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	1,1·10 ⁻⁵ ± 0,1·10 ⁻⁵	6,1·10 ⁻¹⁹ ± 0,9·10 ⁻¹⁹
455 ± 1	21 ± 1	1,2·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	1,3·10 ⁻⁵ ± 0,2·10 ⁻⁵	6,3·10 ⁻¹⁹ ± 1,1·10 ⁻¹⁹
222 ± 1	10 ± 1	1,6·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	4,2·10 ⁻⁵ ± 0,5·10 ⁻⁵	2,5·10 ⁻¹⁹ ± 0,5·10 ⁻¹⁹
260 ± 1	38 ± 1	3,0·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	1,4·10 ⁻⁵ ± 0,1·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻¹⁹ ± 0,2·10 ⁻¹⁹
568 ± 1	10 ± 1	1,0·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻⁵ ± 0,2·10 ⁻⁵	3,7·10 ⁻¹⁹ ± 1,1·10 ⁻¹⁹
566 ± 1	7 ± 1	2,0·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	1,4·10 ⁻⁵ ± 0,3·10 ⁻⁵	5,6·10 ⁻¹⁹ ± 1,8·10 ⁻¹⁹
566 ± 1	16 ± 1	1,0·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁵ ± 0,2·10 ⁻⁵	4,8·10 ⁻¹⁹ ± 1,3·10 ⁻¹⁹
566 ± 1	20 ± 1	1,0·10 ⁻³ ± 10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻⁵ ± 0,7·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻¹⁹ ± 0,4·10 ⁻¹⁹

Per il calcolo degli errori da associare alle cariche q, ci si è avvalsi delle regole di propagazione degli errori statistici: in particolare l'errore relativo ϵ_q/q può essere stimato (per ogni singola misura) dalla suddetta espressione di q secondo la relazione:

$$\frac{\epsilon_q}{q} = \frac{\epsilon_C}{C} + \frac{\epsilon_V}{V} + \frac{3}{2} \left(\frac{\epsilon_s}{s} + \frac{\epsilon_t}{t} \right). \quad (5)$$

Conclusioni

Calcolati gli errori dei corrispondenti valori di q, possiamo affermare che, in accordo con le previsioni teoriche e compatibilmente con gli errori sperimentali dovuti all'apparato strumentale, i valori calcolati sono tutti multipli di un unico valore corrispondente alla carica dell'elettrone, pari a $1,60 \cdot 10^{-19}$ C.

4.2 Interazione radiazione-materia: l'effetto fotoelettrico

Scopo dell'esperienza

Illustrare la natura quantistica dell'interazione radiazione, cioè che ogni processo di assorbimento, o emissione, di radiazione elettromagnetica (monocromatica) avviene attraverso atti elementari, in ognuno dei quali la quantità di energia E assorbita (emessa) dalla materia è $E = h f$, dove f è la frequenza caratteristica dell'onda incidente. Le misure di E e di f consentono di ottenere il valore della costante di Planck h , che definisce una delle scale strutturali dell'Universo, in analogia con la velocità della luce, la costante di gravitazione universale e la carica elettrica elementare.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Un generatore di tensione
- Un potenziometro
- Un amperometro
- Un monocromatore
- Una cella fotoelettrica
- Una sorgente di luce "bianca" (lampada alogena)
- Un computer per l'analisi dati – programma Data Studio

Cenni teorici

Il fenomeno dell'effetto fotoelettrico fu introdotto nella seconda metà del XIX secolo per spiegare la conducibilità di liquidi e gas in certe particolari condizioni. Un riferimento multimediale sull'argomento si trova al sito <http://www.ba.infn.it/~garuccio/didattica/fotoelettrico/homepage.htm>.

Hertz, per primo, scoprì che una lastra metallica illuminata da luce ultravioletta emette elettroni, anche se la loro energia cinetica non è proporzionale all'intensità della luce. Nel 1900 Lenard fece degli esperimenti irradiando con radiazione ultravioletta il catodo di un tubo a vuoto (Fig. 1).

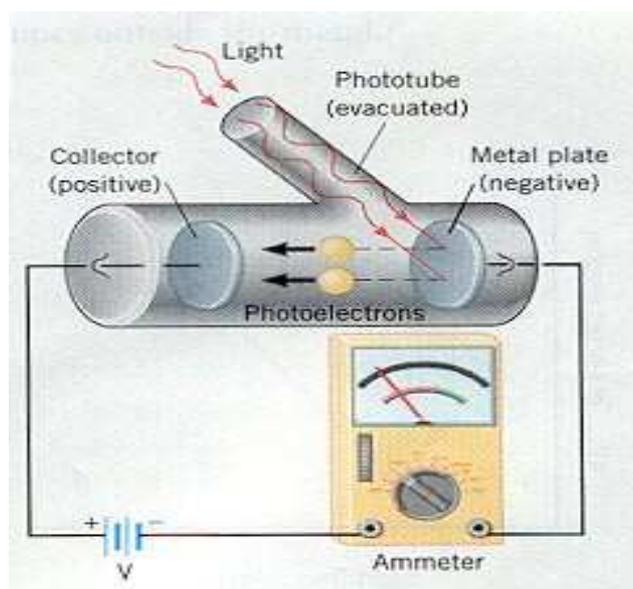


Fig. 1. Immagine di un tubo a vuoto per la produzione di elettroni per effetto fotoelettrico.

La radiazione elettromagnetica (supposta monocromatica in buona approssimazione) colpisce il catodo, che emette elettroni solo se la frequenza, f , è superiore di un certo valore di soglia, f_0 . Applicando una differenza di potenziale (ddp) al circuito, questi elettroni vengono accelerati verso l'anodo e l'amperometro segna una corrente corrispondente. Aumentando il valore della ddp aumenta anche il valore della corrente che passa nel circuito e, quindi, la quantità di elettroni che riescono a raggiungere l'anodo (Fig. 2). Tuttavia tale aumento non è in generale proporzionale alla ddp, ma da un certo valore in poi la corrente si stabilizza ad un valore dipendente solo dall'intensità della luce incidente. D'altra parte riducendo progressivamente il valore della ddp, fino a invertirne il segno, la corrente circolante diminuisce, fino ad azzerarsi in corrispondenza di un valore $-\Delta V_L$, comune a tutti i valori dell'intensità incidente per fissata frequenza f . Questo valore di potenziale è detto potenziale di arresto e si annulla per una specifica frequenza f_0 , al di sotto della quale il fenomeno non ha luogo. Il ruolo di $-\Delta V_L$ consiste nel generare una barriera di energia potenziale elettrica, che gli elettroni espulsi dal catodo debbono risalire azzerando la loro velocità. Il che equivale a dire che l'energia cinetica che gli elettroni possiedono all'uscita dal catodo non è sufficiente a superarla, postulata la conservazione dell'energia totale. Misurando quindi ΔV_L , nota la loro carica elettrica, è possibile calcolare l'energia cinetica degli elettroni (almeno di quelli più energetici). Questa poi è da correlare all'energia assorbita dall'elettrone irraggiato e quindi alle caratteristiche principali del processo di interazione radiazione-materia.

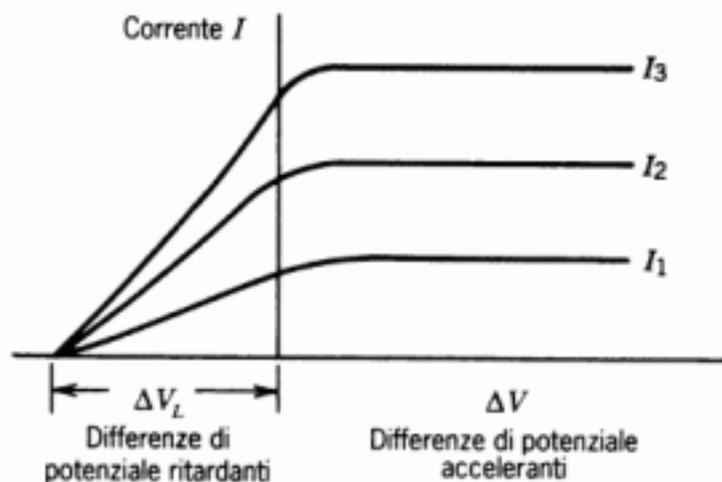


Fig. 2. Corrente in funzione della differenza di potenziale applicata.

Con la fisica classica non si può spiegare l'effetto fotoelettrico, in quanto essa prevede che:

1. un fascio di luce di qualsiasi frequenza possa espellere elettroni, purché abbia un'intensità sufficiente in modo che l'energia ceduta a un elettrone superi il lavoro di estrazione dal metallo e ne provochi la sua espulsione;
2. la massima energia cinetica di un elettrone espulso aumenti all'aumentare dell'intensità del fascio di luce.

Entrambe le previsioni non corrispondono ai dati sperimentali in quanto:

1. per espellere elettroni, il fascio di luce incidente deve avere una frequenza maggiore di un determinato valore di soglia f_0 ;
2. se la frequenza della luce è maggiore della frequenza di soglia, l'aumento dell'intensità luminosa aumenta il numero di elettroni emessi nell'unità di tempo, ma non la massima energia cinetica degli elettroni. Questa corrisponde al potenziale d'arresto $-\Delta V_L$, che è indipendente dall'intensità della luce.

Nel 1905 A. Einstein diede un'interpretazione di questi risultati assumendo che la radiazione incidente fosse costituita da pacchetti (quanti) di energia "hf" (fotoni), dove f è la frequenza e h è la costante di Planck. Se uno di questi quanti di energia viene assorbito da un elettrone, deve in primo luogo separare la barriera energetica che lo mantiene confinato nel catodo e dovuta alla presenza degli ioni metallici, che esercitano su di esso una forza attrattiva. L'energia minima necessaria per estrarre l'elettrone dal catodo, ovvero l' "energia di legame" con il metallo, viene chiamata "lavoro di estrazione" e si indica con W_0 . Risulta pertanto che l'energia cinetica massima di un elettrone è data da

$$E = hf - W_0 \quad (1)$$

Da questa formula risulta chiaro che se la luce incidente non ha frequenza abbastanza elevata, nessun elettrone verrà emesso, perchè nessuno riuscirà ad avere energia superiore a quella di legame. Questo è completamente indipendente dall'intensità della luce stessa.

Quando $E=0$ si ha che $f_0 = W_0/h$, che si può identificare con la frequenza di soglia. Applicando una ddp tra anodo e catodo si può ritardare il moto degli elettroni. In particolare, per il valore $-\Delta V_L$ della ddp, la corrente diventa nulla, il che significa che tutta l'energia cinetica è pari a quella potenziale elettrica assunta dall'elettrone, cioè

$$e \Delta V_L = hf - W_0 \quad (2)$$

Quindi se lo scopo dell'esperienza è misurare h , si deve misurare ΔV_L in funzione di f e derivarne il coefficiente angolare h/e .

Esecuzione delle misure

L'apparato sperimentale (Fig. 3) è sostanzialmente quello di Lenard e le misure vengono eseguite riducendo al minimo l'introduzione di frequenze spurie nella cella fotoelettrica. Questa viene perciò collocata all'interno di una scatola foderata e protetta da cartoncino nero.

Una volta scelta la frequenza di lavoro con il selettore, che agisce sul reticolo di diffrazione, bisogna fermare gli elettroni emessi dal catodo variando la differenza di potenziale finchè la corrispondente corrente non si annulli.

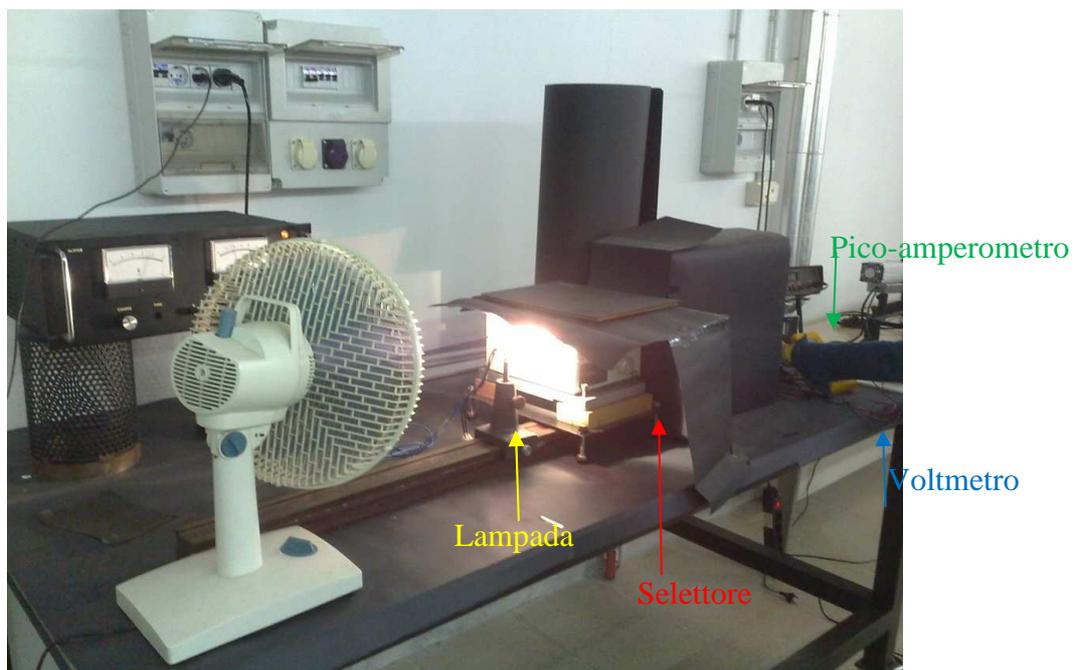
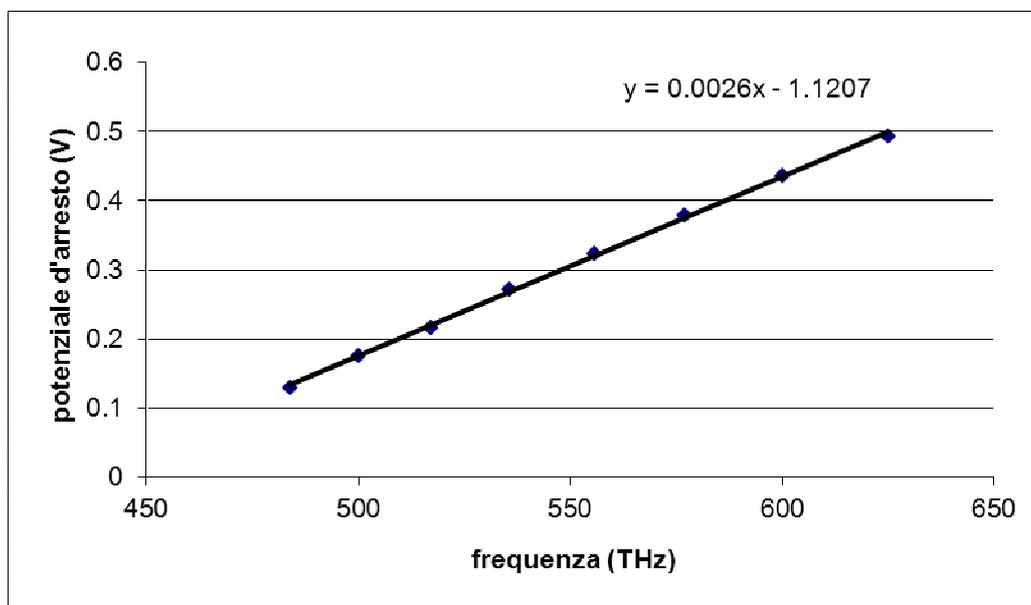


Fig. 3. Foto dell'apparato sperimentale.

Si applica poi lo stesso procedimento per altre lunghezze d'onda e quindi si traccia un grafico avente in ascisse la frequenza e in ordinate la ddp.

Le misure eseguite sono riportate nella seguente tabella. Nella prima colonna si riporta la lunghezza d'onda, convertita nella seconda in frequenza grazie alla relazione di dispersione della luce. Nella terza colonna sono riportati i dati relativi al potenziale di arresto.

Lunghezza d'onda (Å)	f (THz)	ΔV_L (V)
6200	483.9 ± 0.1	0.130 ± 0.001
6000	500.0 ± 0.1	0.175 ± 0.001
5800	517.2 ± 0.1	0.217 ± 0.001
5600	535.7 ± 0.1	0.272 ± 0.001
5400	555.6 ± 0.1	0.322 ± 0.001
5200	576.9 ± 0.1	0.378 ± 0.001
5000	600.0 ± 0.1	0.436 ± 0.001
4800	625.0 ± 0.1	0.493 ± 0.001



Dal grafico si osserva l'andamento lineare previsto teoricamente.

Conclusioni

Interpolando i dati sperimentali, usando il metodo dei minimi quadrati, ne risulta un valore per la costante di Planck pari a $h = 4,16 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ (assumendo la carica elettrica pari a $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), in buon accordo con i valori riportati dagli istituti metrologici (per esempio $h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, deviazione standard $0,00000029 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, deviazione standard relativa $4,4 \cdot 10^{-8}$, da CODATA2010, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>).

Capitolo 5

Fisica Nucleare

5.1 Misure di concentrazione del radon

Stima della concentrazione di radon in ambienti scolastici e di lavoro

Scopo dell'esperienza

Determinare la concentrazione media di gas radon ^{222}Rn all'interno di ambienti da monitorare attraverso l'esposizione per periodi prolungati di rivelatori a traccia, successivamente sottoposti a attacco chimico ed, infine, analizzati al microscopio.

Strumentazione e materiale a disposizione

- Film polimerici (o dosimetri CR-39) sensibili alle particelle α
- Camere di espansione per alloggiare i dosimetri
- Acqua distillata e idrossido di sodio
- Contenitore per bagno termostatico
- Bilancia elettronica e accessori aggiuntivi per realizzare una soluzione di soda caustica con concentrazione desiderata
- Microscopio ottico con ingrandimento fino a 40x
- Webcam collegata a un computer per l'ingrandimento e l'acquisizione delle immagini al microscopio

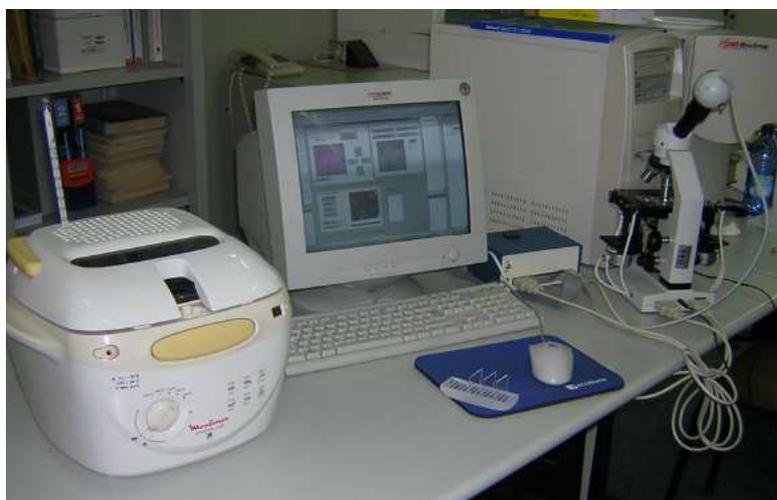


Fig. 1. Foto dell'apparato sperimentale.

Cenni teorici

Il radon (^{222}Rn) è un gas radioattivo monoatomico inerte presente nell'atmosfera che viene generato da elementi naturali presenti nella crosta terrestre; esso può emergere dal suolo o disciogliersi nelle acque e diffondere. La catena di decadimenti che lo genera si origina dall'isotopo ^{238}U , riccamente presente nella crosta terrestre in concentrazioni dipendenti dalla connotazione geologica del luogo. Il tempo di dimezzamento del radon è pari a 3.82 giorni e nel suo decadimento emette radiazione α producendo "discendenti" radioattivi che emettono radiazione.

La modalità con cui il radon entra in un edificio e viene in contatto con le persone varia moltissimo da caso a caso. Esso viene emesso dalle rocce e dal suolo (emanazione) in una quantità che dipende dal tipo di minerali contenuti e può penetrare, attraverso fessure o giunti, nei locali sotterranei o comunque a contatto col suolo; da qui, attraverso porte, scale interne, fori passanti per tubature e cavi, fessurazioni di solette e pavimenti, può migrare ai piani superiori, anche se, dato che si tratta di un gas pesante, troveremo sempre una concentrazione che decresce man mano che si sale. Pertanto gli ambienti a rischio di accumulo di radon sono soprattutto i locali sotterranei e i piani bassi degli edifici. Gli studi sanitari compiuti negli ultimi decenni hanno dimostrato che l'esposizione a concentrazioni elevate di radon aumenta il rischio di tumori polmonari, tanto che, dopo il fumo di sigaretta (che rimane di gran lunga la più importante causa di tumore al polmone), il radon è considerato la seconda causa di questa malattia. Le sostanze dannose per la salute sono in realtà i prodotti di decadimento del radon, i cosiddetti figli, ma è uso comune riferire il rischio direttamente al radon.

Procedura sperimentale

Per la misura della concentrazione di radon, ci si è avvalsi di rivelatori a traccia CR-39 (altrimenti indicati nel seguito come "dosimetri"), realizzati in resina termoindurente attraverso processi di polimerizzazione, con dimensioni di $20 \times 35 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Il potere ionizzante delle particelle α prodotte al termine della catena di decadimento del radon danneggia le molecole del materiale dielettrico che costituisce tali rivelatori, e determina la formazione di tracce di dimensioni nanometriche lungo la traiettoria seguita dalle particelle stesse.

I dosimetri vengono esposti all'interno di appositi contenitori ("camere di espansione") affinché la valutazione delle tracce sia attribuibile al decadimento del solo ^{222}Rn e dei suoi prodotti di decadimento formati all'interno del contenitore stesso. Essendo infatti il radon un gas estremamente volatile, esso penetra nel contenitore attraverso piccole fessure presenti nella chiusura della camera. Prima di essere collocati nelle camere di espansione, i dosimetri vengono liberati da una pellicola protettiva di cui sono inizialmente muniti. Ogni dosimetro è caratterizzato da un numero inciso sulla sua superficie, che ne permette l'identificazione e la catalogazione nelle successive fasi dell'esperienza. In Fig. 2 sono riportate alcune immagini relative alla fase di approntamento dei dosimetri prima di esporli per periodi di tempo sufficientemente lunghi negli ambienti che si intende monitorare.



Fig. 2. Fasi di preparazione del dosimetro

Dopo alcuni mesi di esposizione nei vari ambienti, i dosimetri opportunamente catalogati vengono raccolti e sottoposti ad attacco chimico. A tale scopo, si prepara preliminarmente una soluzione di soda caustica con concentrazione molare 10N versando e mescolando circa 80g di soda caustica (NaOH, disponibile in scaglie) in un recipiente riempito con 200ml di acqua distillata, come riportato in Fig. 3.



Fig. 3. Fasi di preparazione dell'attacco chimico del dosimetro.

I dosimetri, inseriti all'interno di un apposito supporto cilindrico, vengono calati nella suddetta soluzione e vengono quindi sottoposti a un bagno termostatico di 90°C circa per 5 ore, come indicato nella Fig. 4.



Fig. 4. Attacco chimico con bagno termostatico per dosimetri

Al termine dell'attacco chimico, i dosimetri sono estratti, lavati accuratamente ed asciugati facendo uso di pinzette per non alterarli o danneggiarli. E' in questa fase che le tracce nanometriche generate dalle particelle α assumono maggiori dimensioni (dell'ordine dei micrometri), tali da poter essere osservate al microscopio ottico.

Analisi dei dati

I dosimetri sono, successivamente, sottoposti a scansione al microscopio ottico collegato tramite webcam allo schermo di un computer per una più agevole visualizzazione. Si è chiaramente fatto in modo di non ripetere scansioni su aree già acquisite, anche solo parzialmente, e ci si è mossi a passi regolari nella fase di scansione delle superfici dei dosimetri, a prescindere dal numero di tracce che si sarebbero effettivamente misurate, al fine di non alterare i conteggi.

A titolo di esempio, si riportano in Fig. 5 due immagini ottenute al microscopio ottico relativamente a ingrandimenti 10x (a sinistra) e 40x (a destra). Benché quest'ultimo tipo di ingrandimento garantisca una maggiore capacità di discernere le tracce dovute alle particelle α (con forma tendenzialmente circolare o leggermente ellittica) dalle eventuali impurezze del dosimetro (tipicamente più irregolari), si è

preferito avvalersi di ingrandimenti 10x, che nel complesso non degradano di molto la qualità della selezione delle tracce, e in definitiva consentono di analizzare maggiori superfici e quindi raccogliere una maggior statistica di dati.

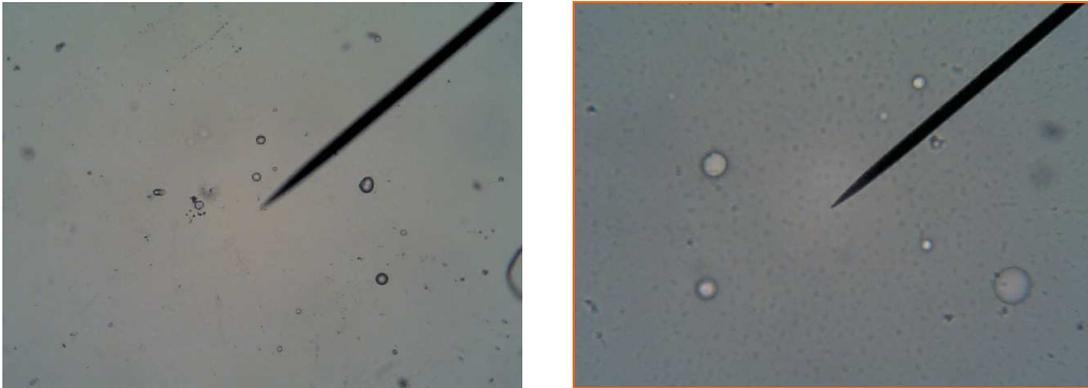


Fig. 5. Selezione delle tracce dovute alle particelle α

Nel caso degli ingrandimenti 10x (e 40x) ogni scansione effettuata ha riguardato una superficie dosimetrica di $1.2 \times 0.8 \text{ mm}^2$ (e di $0.3 \times 0.2 \text{ mm}^2$, rispettivamente). Per ogni dosimetro si sono effettuate almeno dieci scansioni, così da poter pervenire a risultati statisticamente accettabili.

Si è voluto identificare e contare sia tracce “grandi” sia tracce “piccole”, in modo da poter tenere conto di effetti sistematici dovuti all’arbitrarietà nel conteggio, decidendo cioè di contare il numero di tracce

totali sull’area campionata come: $N = N_{grandi} + \frac{1}{2}N_{piccole}$.

La concentrazione di radon C espressa in kBq/m^3 è stata stimata dall’equazione:

$$C = \frac{1}{S} \frac{N}{At} \quad (1)$$

dove con S si è indicata la sensibilità, che per i rivelatori CR-39 è data da:

$$S = 2.3 \frac{\text{tracce}/\text{cm}^2}{\text{kBq} \cdot \text{h}/\text{m}^3}, \quad (2)$$

mentre con A si è indicata l’area campionata e con t il tempo di esposizione. Si è attribuito a S un errore sistematico del 5% (dovuto all’errore sull’ultima cifra significativa) e ad A e a t incertezze variabili da caso a caso, ma tipicamente trascurabili nel caso di t (dal momento che il tempo di esposizione è tipicamente di alcuni mesi). Per la stima delle incertezze ΔC da associare alla concentrazione di radon, si è impiegata la formula di propagazione degli errori relativi:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta t}{t}. \quad (3)$$

L’incertezza sui conteggi tiene conto sia di un contributo sistematico pari a $\frac{1}{2}N_{piccole}$ dovuto alla discrezionalità nel distinguere le tracce, sia di un contributo statistico \sqrt{N} di tipo poissoniano.

Nella tabella seguente si riportano i conteggi di tracce grandi e piccole riscontrati su un dato dosimetro su un totale di 12 scansioni.

Scansione dosimetro	N _{grandi}	N _{piccole}
427	7	4
428	5	2
429	2	2
430	7	2
431	3	2
432	9	4
433	9	4
434	9	2
435	5	4
436	4	2
437	5	2
438	1	0

La stima del numero di tracce risulta pertanto: $N=81\pm 15\pm 9$; tenuto conto che l'area complessivamente campionata per quel dosimetro risulta $12\cdot(1.2\cdot 0.8 \text{ mm}^2)=11.52\text{mm}^2$ in un intervallo di tempo di 82 giorni, si ricava una stima della concentrazione di radon pari a $155\pm 40 \text{ Bq/m}^3$.

La procedura è stata ripetuta per tutti i dosimetri esposti nei vari ambienti da monitorare e la maggioranza dei risultati così ottenuti si è rivelata nel complesso inferiore rispetto al valore critico indicato dalla legge di 500 Bq/m^3 .

Conclusioni

Si è misurata la concentrazione di radon in alcuni ambienti scolastici e di lavoro al fine di comparare i risultati ottenuti con i valori limite previsti per legge. Benché in alcuni casi si è riscontrato che la principale sorgente di incertezza nella misura è la ridotta statistica esaminata, si è tuttavia potuto constatare la presenza di qualche valore potenzialmente confrontabile o superiore alla norma: in tali casi si è quindi ritenuto opportuno intervenire negli ambienti interessati con altre metodologie di misura del radon (della cui descrizione non ci si è occupati in questa sede).

Ringraziamenti

Questa raccolta di esperienze è il frutto del lavoro di quanti direttamente o indirettamente, con costanza, pazienza ed entusiasmo, hanno contribuito allo svolgimento delle attività del Piano Lauree Scientifiche a Lecce:

Paolo Bernardini
Giovanni Buccolieri
Maria Luisa De Giorgi
Marcella D'Elia
Sergio Fonti
Antonella Lorusso
Luigi Martina
Vincenzo Orofino
Fabio Paladini
Andrea Ventura

Si ringraziano:

il Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento
la sezione di Lecce dell'INFN
l'Ufficio Scolastico Regionale della Puglia

Si ringraziano inoltre tutti i docenti e gli studenti delle scuole che hanno partecipato al progetto nell'anno scolastico 2010-2011:

Liceo Scientifico C. De Giorgi Lecce
IISS G. Stampacchia Tricase (LE)
Liceo Scientifico T. Monticelli Brindisi
Liceo Polivalente Q. Punzi Cisternino (BR)
ITIS E. Mattei Maglie (LE)
IISS E. Ferdinando Mesagne (BR)
ISA N. Della Notte Poggiardo (LE)
Liceo Scientifico G.C. Vanini Casarano (LE)
Liceo Scientifico E. Fermi Brindisi
IISS F. Redi Squinzano (LE)
Liceo Scientifico Q. Ennio Gallipoli (LE)
ITIS E. Fermi Lecce
IISS E. Giannelli Parabita (LE)
IISS S. Trinchese Martano (LE)

Si ringrazia infine il dott. Giuseppe Sclarici per aver raccolto ed ordinato gli appunti delle esperienze di laboratorio riportati in questo lavoro.