

Misure di elettrostatica con la bilancia di torsione di Coulomb

INTRODUZIONE

La forza elettrostatica fra due cariche puntiformi q_1, q_2 poste a distanza r l'una dall'altra è direttamente proporzionale alle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della distanza, secondo la legge di Coulomb

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (1)$$

ed è diretta lungo la retta congiungente q_1 e q_2 .

Nel Sistema Internazionale la costante k è espressa come

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$$

dove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto (o permittività dielettrica del vuoto) $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, ed ϵ_r è una costante specifica del mezzo in cui sono poste le cariche, detta costante dielettrica relativa. Il valore di ϵ_r per l'aria è 1.00059, e sarà approssimato ad 1 nel seguito.

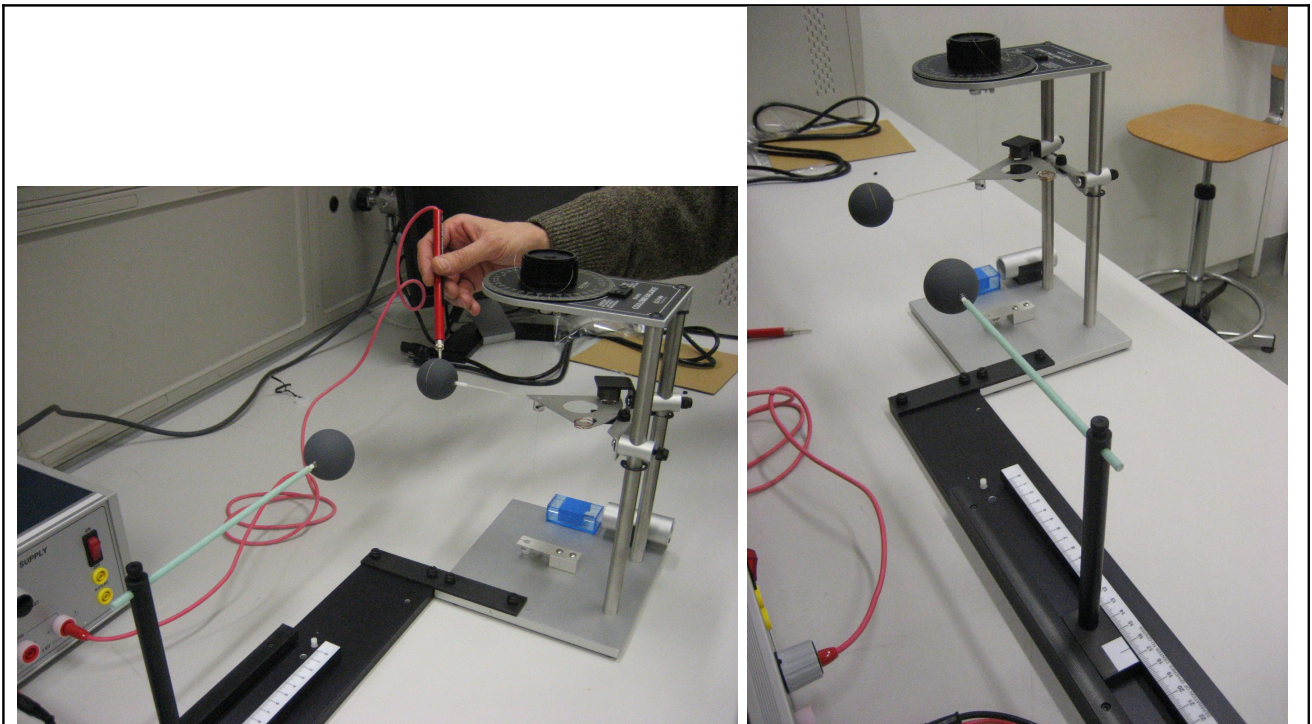
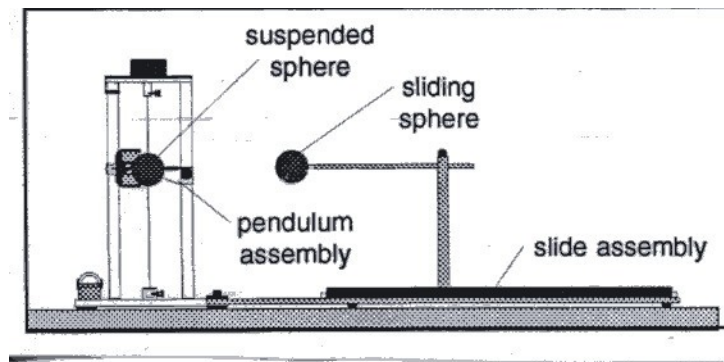
La carica di una sfera conduttrice è legata al potenziale dalla relazione $q=CV$, dove C è la capacità della sfera. Nel caso di una sfera conduttrice **isolata** vale $C=4\pi\epsilon_0 a$, dove a è il raggio della sfera. Pertanto la forza di Coulomb tra due sfere cariche risulta direttamente proporzionale al prodotto dei potenziali V_1 e V_2 a cui sono state poste le sfere.

DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

La bilancia di torsione permette di studiare l'interazione elettrostatica fra due sfere cariche. Una leggera sfera di materiale conduttivo è sostenuta da un braccio rigidamente collegato ad un equipaggio mobile, contrappesato, ancorato a sua volta ad un sottile filo di torsione. Una sfera identica è montata su un supporto a slitta, in modo che si possa posizionare a distanze diverse dalla prima. Per eseguire gli esperimenti, si caricano entrambe le sfere e quella montata sul supporto a slitta viene posizionata a diverse distanze dalla posizione di equilibrio di quella sospesa all'equipaggio mobile. La forza elettrostatica fra le due sfere causa lo spostamento della sfera mobile, torcendo il filo di un certo angolo.

Per misurare tale angolo, lo sperimentatore ruota la testa di sospensione del filo in senso contrario, fino a riportare l'equipaggio mobile nella posizione di partenza. Il valore dell'angolo di cui si deve torcere il filo per ristabilire l'equilibrio risulta proporzionale alla forze elettrostatica fra le due sfere. Infatti l'angolo di torsione è proporzionale al momento torcente: $\tau = C_{tor} \theta$, dove C_{tor} è la costante di torsione del filo, ed essendo la forza applicata perpendicolarmente, a distanza costante, $\tau = F b$, dove b è il braccio della forza.

Lo schema della bilancia è mostrato in figura.



SVOLGIMENTO DELL'ESPERIENZA

Si suggeriscono nel seguito due modi di utilizzo del sistema:

- a) **Verifica della forma funzionale della legge di Coulomb**, analizzando la dipendenza della forza dalle quantità in gioco. Questo può essere fatto attraverso lo studio della dipendenza dell'angolo di torsione dai potenziali cui sono poste le sfere e dalla distanza tra le sfere cariche.
- b) **Misura della forza di Coulomb** di repulsione tra le sfere cariche e suo confronto con il valore calcolato tramite la (1). Questo richiede la calibrazione della bilancia, ossia la determinazione della **costante di torsione del filo**.

Prima di procedere alle misure leggete attentamente le “note tecniche” nell'ultimo paragrafo della scheda.

1) DIPENDENZA DELLA FORZA DALLA DISTANZA

Si vuole verificare la dipendenza della forza di Coulomb dal quadrato della distanza tra le cariche. Poiché nella bilancia di torsione l'angolo di torsione risulta proporzionale alla forza applicata, si può studiare semplicemente la dipendenza dell'angolo di torsione da r .

Caricare entrambe le sfere ad un potenziale di 6 kV mediante la sonda di carica, avendo cura di mettere a terra un terminale dell'alimentatore. Spegnerne immediatamente l'alimentatore, per evitare effetti di dispersione di tensione.

Portare la sfera mobile alla distanza $r = 20$ cm. La forza repulsiva agente fra le due sfere farà ruotare l'equipaggio mobile appeso al filo di torsione. Ruotate la manopola di azzeramento della torsione del filo fino a far coincidere nuovamente lo zero dell'equipaggio mobile con quello fisso. Leggete il valore dell'angolo, θ , di cui avete dovuto ruotare la manopola.

Ripetete la procedura per diversi valori della distanza r compresi tra 20 e 5 cm e riportate in una tabella i valori di r e θ .

E' bene ripetere più volte ogni misura e determinare l'angolo θ medio in corrispondenza di ciascun valore di r .

Per determinare la relazione funzionale fra la forza di interazione, che è proporzionale all'angolo di torsione θ , e la distanza r tra le sfere, potete riportare in

grafico θ in funzione di $1/r^2$. Si dovrà verificare che θ è direttamente proporzionale a $1/r^2$. Alternativamente potete utilizzare carta logaritmica determinando la relazione lineare tra $\ln\theta$ e $\ln r$.

In realtà, la dipendenza lineare non è ben verificata per piccoli valori di r . Ciò è dovuto al fatto che la carica sulle sfere conduttrici non si distribuisce in modo uniforme quando esse non sono isolate, ma poste una di fronte all'altra.

Le cariche si ridistribuiscono sulla loro superficie in modo tale da rendere minima l'energia elettrostatica, ossia concentrandosi nelle regioni più lontane, la distanza effettiva tra i baricentri delle cariche risulta pertanto superiore a quella tra i centri geometrici delle sfere.

Per ovviare a questa deviazione, si può ricorrere ad una correzione per l'angolo θ , moltiplicandolo per un fattore $1/B$, con

$$B = 1 - \frac{4a^3}{r^3}$$

dove a è il raggio delle sfere.

Calcolare la correzione ed applicarle ai punti segnando i nuovi valori sui grafici.

2) **DIPENDENZA DELLA FORZA DELLA CARICA**

Mantenete le sfere ad una distanza r costante di 10 cm.

Caricatele a diversi potenziali e misurate la forze di interazione risultante. Tracciate in grafico l'angolo θ , proporzionale alla forze, in funzione del potenziale $V=V_1=V_2$.

Tenete quindi costante il potenziale V_1 su una sfera e variate V_2 sull'altra. Riportate in grafico l'angolo di torsione in funzione del valore del potenziale che è stato variato.

Nota: per caricare le sfere, è opportuno ogni volta scaricarle completamente, allontanarle il più possibile l'una dall'altra, caricarle, quindi riportarle alla distanza a cui effettuare la misura.

3) **MISURA DELLA COSTANTE DI TORSIONE DEL FILO**

Per misurare il valore della forza di Coulomb è necessario conoscere la costante di proporzionalità fra la forza applicata alla bilancia di torsione e l'angolo di torsione θ .

A questo scopo è necessario calibrare la bilancia con una forza nota. Si usa la forza di gravità.

Coricare delicatamente la bilancia sul fianco, dopo aver estratto la barretta di supporto laterale. Sistemare il tubo di supporto sotto la sfera, per sostenerla fino a regolazione ultimata, evitando torsioni eccessive del filo.

Azzerare la bilancia, ruotando la manopola di regolazione della torsione, fino a portare l'indice inciso sul contrappeso a paletta in corrispondenza di quello inciso sul braccio fisso con indice.

Togliere quindi il tubo di supporto posto sotto la sfera.

Appoggiare con delicatezza sulla sfera conduttiva la massa da 20 mg. Ruotare la manopola di regolazione della torsione fino a tornare alla posizione di partenza e leggere il valore dell'angolo di torsione.

Ripetere aggiungendo via via sulla sfera conduttiva masse di valore crescente.

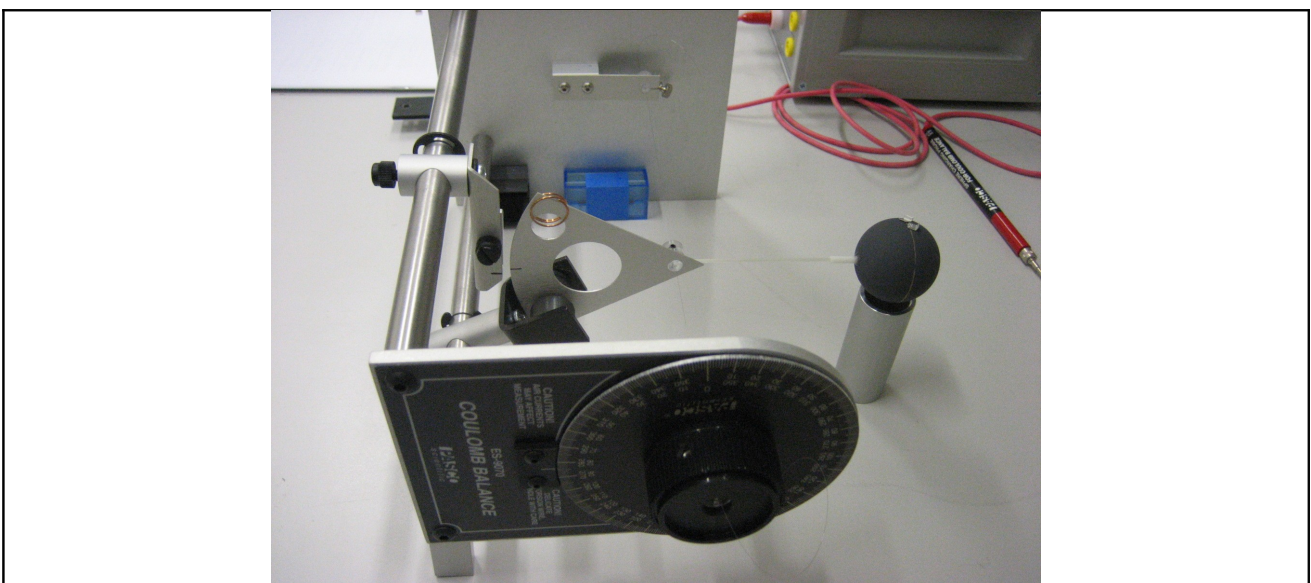
Riportare in grafico i valori dell'angolo di torsione θ in funzione della massa m .

Ricavare il valore della costante di torsione da una regressione lineare della forza peso F in funzione di θ :

$$F = K_{tor} \theta = (C_{tor} / b) \theta$$

dove b e' il braccio della forza e C_{tor} la costante di torsione del filo.

Noto il valore di K_{tor} , si può quindi calcolare il valore della forza di Coulomb corrispondente a ciascun valore di θ .



NOTE TECNICHE

- PREPARAZIONE DELL'ESPERIENZA

Prima di procedere a qualsiasi misura, assicurarsi che le sfere siano completamente scariche, toccandole con l'apposita sonda metallica collegata a terra.

Attenzione: non toccare le sfere quando sono cariche, né la punta dell'elettrodo dell'alimentatore quando è acceso!

Porre la sfera montata sul supporto a slitta alla distanza massima possibile dalla sfera sospesa all'equipaggio mobile.

Mettere in equilibrio l'equipaggio mobile: sbloccare il contrappeso allentando la vite superiore del fermo, quindi allontanare il fermo dal contrappeso e fissarlo in posizione parallela alla base della bilancia.

Ruotare la manopola di azzeramento della torsione fino a portare l'indice sullo zero della scala graduata. Agendo sul fermo inferiore del filo di torsione, azzerare la bilancia facendo in modo che l'indice inciso sul contrappeso a paletta vada a coincidere con quello inciso sul braccio con indice.

- La sfera mobile è inserita nel braccio (cannuccia di plastica), ma non incollata. Fare attenzione perché durante l'uso non fuoriesca.
- Per caricare correttamente le sfere, accendete l'alimentatore, caricate le sfere avvicinandovi ad esse in direzione frontale rispetto alla cannuccia di supporto (per evitare spostamenti laterali), quindi spegnete immediatamente l'alimentatore. L'alta tensione presente ai capi dell'alimentatore può generare correnti di dispersione, che influiscono in modo incontrollato sulla misura.
- Quando caricate le sfere, impugnate la sonda il più possibile lontano dall'elettrodo, in modo che la vicinanza della vostra mano non effettui sulla sfera un effetto capacitivo, aumentando la carica su di essa. Mantenetevi poi il più lontano possibile dalle sfere per effettuare la misura, ed evitate di avvicinare alle sfere oggetti carichi o che potrebbero caricarsi per induzione.
- Impurità sulla superficie delle barrette in plastica che sostengono le sfere o sul filo di torsione della bilancia possono generare perdite di carica. Si eviti il più possibile di toccare queste parti.
- Nonostante tutte le precauzioni, le dispersioni di carica sono inevitabili. Cercate quindi di eseguire tutte le misure il più velocemente possibile, dopo aver caricato le sfere, in modo da minimizzare gli effetti dovuti alla dispersione. Ricaricate le

sfere prima di ogni misura, dopo averle ogni volta scaricate completamente ed allontanate.

FILI PERCORSI DA CORRENTE IMMERSI IN UN CAMPO MAGNETICO

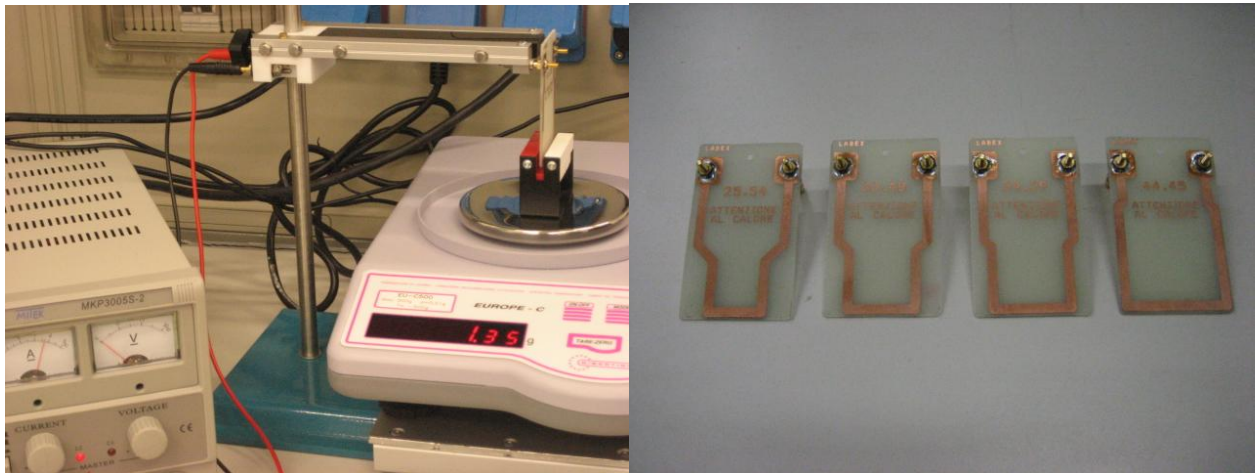
INTRODUZIONE

Un aspetto importante dell'interazione tra correnti e campi magnetici statici può essere verificato sperimentalmente immergendo un filo conduttore percorso da corrente in un campo magnetico uniforme statico B : su di esso agisce una forza, dovuta alle azioni magnetiche, data da:

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (1)$$

dove i è l'intensità di corrente, L è il vettore avente modulo pari alla lunghezza del conduttore e orientamento come quello della corrente. La relazione precedente è una relazione vettoriale, che include quindi anche le informazioni sulla direzione e sul verso della forza risultante.

DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE



Apparato sperimentale impiegato per la misura (a sinistra) e diversi conduttori utilizzati, di lunghezza variabile (a destra).

L'apparato a disposizione permette di studiare l'interazione tra un conduttore percorso da corrente stazionaria e un campo magnetico statico, permettendo misure relative alla dipendenza della forza dall'intensità di corrente, dalla lunghezza del conduttore e dall'intensità del campo magnetico.

Un supporto di ferro, che può alloggiare fino a sei magneti permanenti uguali e rimovibili, viene utilizzato come sorgente del campo magnetico statico B e posto sul piatto di una bilancia elettronica di precisione (sensibilità 0.01 g), la cui lettura viene azzerata sul peso del supporto coi magneti. I conduttori sono realizzati su circuiti stampati, di diversa lunghezza, indicata sui conduttori stessi, e vengono inseriti su un braccio articolato, che ne permette il posizionamento e l'alimentazione. L'alimentatore fornisce una corrente fino a 10 A, il cui valore può essere misurato con precisione tramite un multimetro. Inserendo un conduttore nella zona di campo uniforme dei magneti, il supporto risente di una forza verticale, il cui verso dipende sia dalla direzione di scorrimento della corrente sia verso del vettore campo magnetico, che è dato essenzialmente dalla sua orientazione. Dalla differenza di peso misurata dalla bilancia nelle condizioni in cui non passa o quando passa corrente si può ricavare la forza d'interazione ($F=mg$ dove m è la massa e g l'accelerazione di gravità).

SVOLGIMENTO DELL'ESPERIENZA

Obiettivo dell'esperienza consiste nella verifica delle legge (1) studiando la dipendenza della forza da ciascuna delle grandezze in gioco. In particolare:

a) Dipendenza della forza F dalla corrente i .

Scelto uno dei conduttori disponibili (i.e. fissata la lunghezza L) e utilizzando il magnete completo si misura la variazione di forza peso, misurata con la bilancia di precisione, al variare dell'intensità di corrente.

Si consiglia in questa fase di aumentare gradualmente la corrente partendo da 0 A fino ad un valore di 1.2 A, con passo 0.2 A per non pregiudicare il corretto funzionamento dell'amperometro con il quale avviene la lettura del valore di corrente.

Si costruisce un grafico di F verso i con cui si può dimostrare l'esistenza di una relazione lineare. Si ricavano i parametri della retta interpolante, direttamente dal grafico o utilizzando il metodo dei minimi quadrati. Nota la lunghezza del conduttore, usando la legge (1) si ricava quindi il valore di B . Si può confrontare il valore ottenuto per B con quello misurato direttamente tra i poli del magnete usando una sonda di Hall.

b) Dipendenza della forza F dalla lunghezza L del conduttore

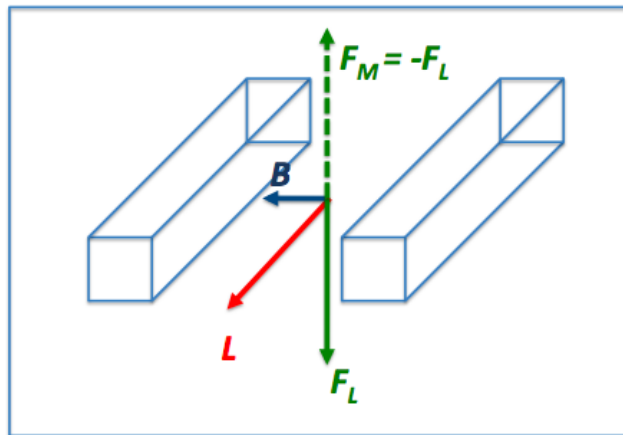
Si fissa un valore di corrente i (tra valori usati in precedenza) e si ripete la misura della forza per i quattro conduttori a disposizione, ciascuno di lunghezza diversa. Si costruisce un grafico di F verso L con cui si può dimostrare l'esistenza di una relazione lineare. Noto il valore dell'intensità di corrente si ricava il valore di B che può essere confrontato con quello ottenuto precedentemente.

c) Dipendenza della forza F dall'intensità del campo magnetico B (facoltativo)

Scelto un conduttore e fissato un valore per la corrente si ripete la misura della forza variando il numero di componenti nel magnete. Si misura B utilizzando la sonda di Hall e si costruisce un grafico di F verso B con cui dimostrare l'esistenza di una relazione lineare.

In ciascun caso si può verificare che cambiando il verso di scorrimento della corrente nel conduttore (invertendo semplicemente i morsetti nell'alimentatore) la forza misurata sulla bilancia è la stessa (in modulo) ma con verso opposto (la differenza di peso letto sulla bilancia risulta essere positivo o negativo a seconda del verso scelto).

Dal punto di vista pratico, per effettuare la misura correttamente occorre inserire il conduttore tra i poli del magnete in modo che si trovi equidistante tra essi e parallelo al magnete (come schematizzato nella figura). Allora L e B sono perpendicolari tra loro e pertanto la forza risulta diretta perpendicolarmente al piano che contiene i vettori L e B , con modulo dato da $F = iLB$ e verso che dipende dal verso in cui circola la corrente nel conduttore.



Relazioni tra i vettori che contribuiscono alla relazione $F = iLB$. Sul conduttore percorso da corrente (ed ancorato ad alla struttura di sostegno) agisce una forza F_L uguale e contraria e quella sperimentata dal magnete (F_M), che corrisponde a quella misurata con la bilancia di precisione.

DETERMINAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE PER MEZZO DI BOBINE DI HELMHOLTZ

INTRODUZIONE

Il metodo più semplice per rilevare l'esistenza di un campo magnetico in una data regione di spazio è quello di utilizzare un aghetto o una sbarretta cilindrica magnetizzata (dipolo) disposta in modo da poter ruotare liberamente attorno ad un asse baricentrale verticale.

Un tale dispositivo trova la sua più diffusa applicazione nell'ordinaria bussola topografica.

Se si pone un dipolo in un campo magnetico \mathbf{B} , esso tende a orientarsi in modo che il suo polo Nord punti nella direzione orientata di \mathbf{B} .

In questa esperienza si utilizzerà l'orientamento dell'ago magnetico per misurare il valore della componente tangenziale del campo magnetico terrestre, sia con il metodo statico che dinamico, e per la costruzione di un *galvanometro a bussola delle tangenti*.

Breve introduzione storica: il fisico (e chimico) danese H. Oersted nel 1819 scoprì che un filo percorso da corrente elettrica è in grado di deviare la direzione di orientazione di un ago magnetico.

Questa scoperta fu importante per i seguenti motivi:

a) teoricamente dimostrò che esiste quindi uno stretto legame tra fenomeni elettrici e magnetici. Il legame nasce dal fatto che cariche in moto (quelle che scorrono nel filo percorso da corrente) sono in grado di generare un campo magnetico nello spazio. Quindi, se da un lato quando una carica elettrica ferma essa genera un campo elettrico, quando questa è invece in movimento, oltre a portarsi appresso il suo campo elettrico, essa genera anche un campo magnetico. Pertanto le forze elettriche e le forze magnetiche sono attribuibili ad un'unica entità fisica, ad un unico campo, cioè sono due aspetti della stessa entità fisica! Successivamente Maxwell dimostrò che questa "unica entità fisica" è rappresentata dal campo elettromagnetico.

b) aveva per la prima volta messo in evidenza che, invece di un'attrazione o di una repulsione di carattere Newtoniano, l'esperimento evidenzia una rotazione dell'oggetto considerato. Questo aspetto trovò, successivamente, un'importante applicazione pratica nella realizzazione dei motori elettrici.

c) aveva infine suggerito il modo per costruire uno strumento in grado di misurare l'intensità della corrente I . Infatti, è possibile risalire ad una misura di I mediante la misura dell'angolo di rotazione dell'ago magnetico. Con uno strumento di questo tipo è anche possibile misurare l'intensità della componente orizzontale del campo magnetico terrestre.

DETERMINAZIONE DELLA COMPONENTE TANGENZIALE DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE CON IL METODO STATICO

Per poter realizzare innanzitutto uno strumento che permetta la misura dell'intensità della corrente a partire da una misura angolare, è necessario modificare l'esperimento originale di Oersted. Si preferisce pertanto curvare il filo in modo da realizzare una spira di raggio R e posizionare il magnete, del quale si intende misurare la rotazione angolare, nel suo centro. In tale regione infatti il campo magnetico risulta sufficientemente uniforme e vale:

$$(1) \quad B = \frac{\mu_o I}{2R} \quad \text{dove} \quad \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$$

Per amplificare l'effetto magnetico della corrente elettrica in modo da poter misurare correnti anche deboli, si avvolgono N spire in modo da realizzare una bobina.

E' inoltre possibile realizzare un campo magnetico particolarmente uniforme nella regione posta tra una coppia di bobine, nella disposizione detta di Helmholtz: in tale configurazione (che verrà utilizzata nel nostro esperimento) due bobine collegate in serie tra loro e percorse dalla stessa quantità di corrente I vengono poste ad una distanza reciproca pari al loro raggio R . Si può dimostrare che in tale configurazione l'intensità del campo magnetico in prossimità del centro del sistema di bobine è data da semplicemente :

$$(2) \quad B = \mu_0 \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R}$$

E' importante ora osservare come un ago magnetico posto al centro del sistema di bobine, quando in esse viene fatta circolare corrente, risulti essere simultaneamente soggetto sia al campo **B prodotto dalle bobine** sia alla **componente orizzontale B_T del campo magnetico terrestre** (*); in tali condizioni esso si orienta secondo la direzione del campo risultante, somma vettoriale dei due singoli campi; se il magnete inizialmente è allineato con **B_T** (unico campo diverso da zero esistente) e perpendicolare all'asse delle bobine, allora esso ruoterà di un angolo θ quando ad esso viene sommato quello prodotto dalla coppia di bobine. Quindi, se si invia una corrente di intensità I opportuna, in grado di far ruotare il magnete esattamente di un angolo pari a 45° rispetto alla direzione iniziale nord-sud significa che si è nella condizione in cui si è prodotto un campo di uguale intensità di **B_T** ma perpendicolare ad esso e quindi si può ricavare il modulo B_T come:

$$(3) \quad B_T = B = \mu_0 \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R}$$

In generale la relazione fra i due campi è:

$$(4) \quad \tan(\theta) = \frac{B}{B_T}$$

Ne segue che l'apparato così costruito può essere usato per:

a) determinare il valore della componente orizzontale **B_T** del campo magnetico terrestre, noto il valore della corrente I che realizza la condizione di rotazione di 45° rispetto alla direzione iniziale nord-sud, usando la (3);

b) determinare il valore della corrente I che circola nelle bobine a partire dalla misura dell'angolo θ , qualora si supponga noto il valor di **B_T** :

$$(5) \quad I = \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{R}{N\mu_0} B_T \tan(\theta)$$

In questo senso il sistema costruito costituisce un *galavanometro*.

(*) *Si tenga presente che la componente orizzontale del campo magnetico terrestre e' variabile a seconda della latitudine geografica, ed assume un valore minimo (nei pressi dell'equatore) pari circa a 0.2 gauss ed un valore massimo (ai poli) pari circa a 0.7 gauss (1 Tesla = 10^4 gauss).*

Il campo magnetico terrestre possiede, oltre ad una componente orizzontale, anche una componente verticale, ma nel seguito quest'ultima non verrà presa in considerazione. Col simbolo B_T si indicherà sempre la componente orizzontale.

DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

Materiale utilizzato per gli esperimenti (si vedano Figg. 1 e 2):

- 2 bobine da 200 spire di raggio medio 10.5 cm montate su un supporto con i rispettivi centri separati da una distanza di 10,5 cm, in configurazione quindi di Helmholtz;
- un magnete cilindrico;
- disco goniometrico;
- ago indicatore per facilitare il rilevamento delle posizioni angolari;
- un tester usato come amperometro;
- cavetti di rame per le connessioni elettriche;
- 1 resistore da 300 Ω ;
- alimentatore stabilizzato in corrente continua.

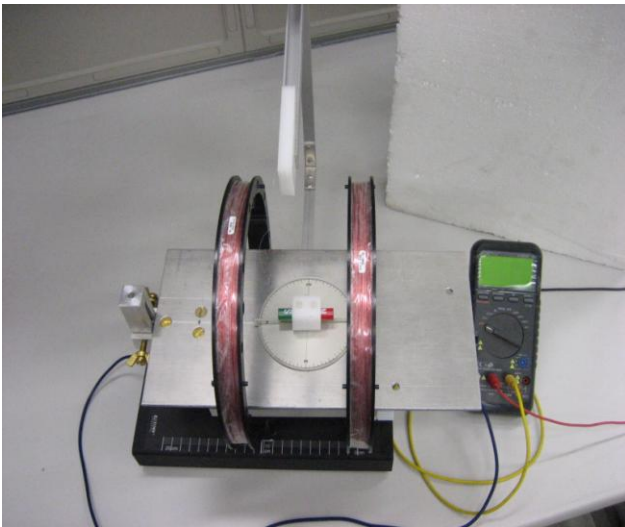


Fig. 1

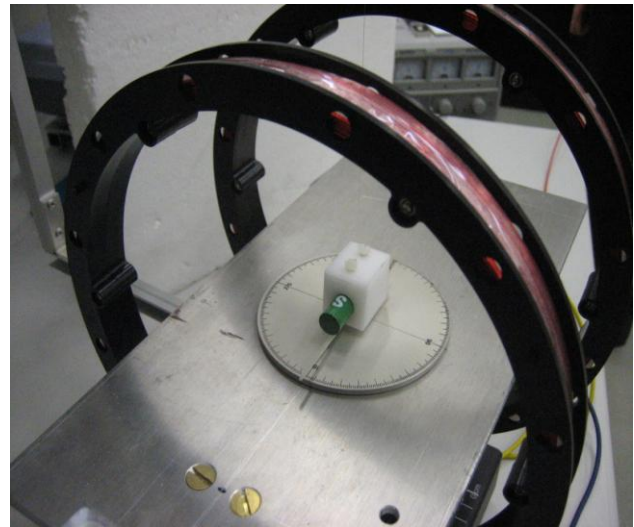


Fig. 2

SENSORE DI CAMPO MAGNETICO

Il sensore di campo magnetico (Fig. 3) viene usato in abbinamento con un'interfaccia per computer. Ci sono due dispositivi ad effetto Hall all'estremità della sonda: uno per rilevare campi con linee parallele alla lunghezza della sonda l'altro per campi con linee perpendicolari ad essa. La selezione avviene con un interruttore.

Inoltre la sonda è dotata di un tasto per l'azzeramento.

Dopo aver connesso la sonda all'interfaccia, si sceglie il sensore assiale o radiale, quindi si procede all'azzeramento allontanandola da qualsiasi campo magnetico (a parte quello terrestre) e premendo il pulsante TARE. Per ottimizzare tale operazione è disponibile una "Zero Gauss Chamber" in cui va inserita la sonda durante la taratura soprattutto quando si devono misurare campi molto deboli.

Vi è anche la possibilità di scegliere fra tre scale:

100X: per misure di campi magnetici da -10 a +10 gauss con risoluzione di 50 milligauss adeguata per misurare il campo magnetico terrestre;
10X: per misure di campi magnetici da -100 a +100 gauss con risoluzione di 50 milligauss da usare con solenoidi e bobine di Helmholtz;
1X: per misure di campi magnetici da -1000 gauss a +1000 gauss con risoluzione di 500 milligauss per campi prodotti da magneti permanenti.

Con il sensore di campo magnetico è possibile:

- confrontare il campo misurato con il valore ottenuto applicando la (2) per diverse intensità di corrente (attenzione a non superare i 2 A di corrente).
- effettuare una mappatura del campo prodotto dalle bobine di Helmholtz a corrente costante



Fig. 3

SVOLGIMENTO DELL'ESPERIENZA

Una volta fissate le due bobine di Helmholtz alla base, assicurarsi che il magnete sia sospeso nel centro geometrico del sistema di bobine. Il disco goniometrico a disposizione dovrà essere collocato poco sotto il centro delle bobine in modo che il magnete cilindrico, sostenuto dal filo di nylon, possa trovarsi sul piano orizzontale mediano delle bobine. Fissare l'ago indicatore sotto al magnete. Con i cavetti elettrici collegare in serie al generatore le bobine, il tester e un resistore da 300 Ω . Il resistore deve essere inserito nel circuito per limitare l'intensità della corrente che attraversa le bobine. Prima di dare tensione selezionare sul tester la scala adatta per misurare con sufficiente precisione l'intensità di corrente.

Disporre le bobine in modo che il loro asse di simmetria risulti ortogonale al magnete, nella sua posizione di equilibrio (direzione nord-sud). Si può ora tracciare la *curva di taratura* del galvanometro, vale a dire correlare le posizioni angolari θ raggiunte dal magnete in corrispondenza di valori noti della corrente I di eccitazione delle bobine: si fa passare la corrente nelle bobine e si rilevano gli angoli di deviazione del magnete al variare della corrente.

Riportare in una tabella i valori della corrente misurati col tester, gli angoli di deviazione del magnete letti sul goniometro ed il campo prodotto dalle bobine calcolato tramite la (2).

Rappresentare graficamente il valore di B in funzione di θ e B in funzione di $\tan(\theta)$ e tracciare la linea di tendenza: quale significato hanno questi grafici?

Calcolare quindi il valore del campo terrestre mediante la (4).

Per una misura più precisa del valore del campo magnetico è possibile inoltre sfruttare la simmetria intrinseca dell'apparato sperimentale. Invertendo il verso della corrente circolante nelle bobine (questo può essere fatto semplicemente invertendo i poli del generatore) il campo magnetico prodotto dal sistema di bobine risulta uguale in modulo ma diretto in maniera opposta al precedente, pertanto l'ago ruoterà in senso contrario. Con questa misura addizionale si hanno quindi a disposizione due valori di I che realizzano l'equivalenza tra B e B_T dei quali si potrà farne una media, rendendo così più precisa la determinazione del valore I (e quindi di B_T).

Di quanto si discosta il valore di B_T misurato rispetto al valore atteso? Che giustificazione dare a tale discrepanza?

E' possibile che campi elettromagnetici esterni (quali ad esempio quelli generati dai comuni telefoni cellulari) possano influenzare in qualche modo la misura?

Il valore ottenuto è consistente con la nostra collocazione geografica sul globo terrestre?

Prima di effettuare le misure è possibile misurare il campo magnetico all'interno delle bobine con il sensore di campo magnetico descritto nell'appendice. Posizionandolo sull'asse delle bobine a uguale distanza da entrambe (vedi le fotografie) è possibile verificare sperimentalmente la validità della (2). Rappresentare graficamente B in funzione di I . Spostando il sensore si può costruire una mappa del campo nella regione delle bobine.