



Mauro Bellei*,
Paolo Bussei*,
Giulio Stancari†

* ITIS "L. da Vinci",
Carpi (MO)

† Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare,
Ferrara

Determinazione della carica specifica dell'elettrone per mezzo della deflessione magnetica dei raggi catodici

(Pervenuto il 28.11.2008, approvato l'11.5.2009)

ABSTRACT

This article describes an experiment carried out by students as a group activity within the annual Physics workshops held by the ITIS "L. da Vinci" in Carpi (MO).

1. Introduzione

Nell'ambito del ciclo di seminari di fisica per docenti e studenti di scuola secondaria¹, quest'anno sul tema "Insegnare a misurare", organizzato all'ITIS "L. da Vinci" di Carpi (MO), abbiamo predisposto l'osservazione del comportamento dei raggi catodici in un campo magnetico utilizzando l'apparato distribuito dalla ditta *TEL-Atomic*.

Da tempo si discute sull'opportunità e/o la fattibilità di un insegnamento della fisica moderna nelle scuole superiori, intesa nel suo aspetto più ampio così come espresso da Elio Fabri nel questionario dell'AIF². Non nascondiamo che anche tra noi autori di queste note permangono pareri contrastanti. Forse ha ragione chi afferma che prima di insegnare fisica moderna sarebbe forse più opportuno un modo moderno di insegnare fisica.

Ciononostante abbiamo voluto "azzardare" e, con il gruppo di ragazzi che volontariamente è rimasto in orario pomeridiano, abbiamo voluto provare a proporre l'esperienza che qui riportiamo.

Gli scopi dell'esperienza, indirizzata a un gruppo eterogeneo per provenienza e conoscenza, sono i seguenti³:

- osservare qualitativamente che la deflessione aumenta all'aumentare del campo magnetico;
- osservare qualitativamente che la deflessione diminuisce all'aumentare del potenziale di accelerazione;
- osservare qualitativamente che la deflessione è ortogonale sia alla direzione di propagazione dei raggi che al campo magnetico;
- fornire un esempio di alcuni passi coinvolti nel processo di misura (progetto, esecuzione, analisi dei dati, studio delle incertezze, conclusioni) attraverso la determinazione quantitativa della carica specifica q/m dell'elettrone.

2. Apparato sperimentale

L'apparato è mostrato in figura 1. È formato da un'ampolla sferica evacuata di raggio $r' = (60 \pm 2)$ mm al cui interno è posto un filamento riscaldato (catodo) mantenuto ad un potenziale V variabile a piacere tra 0 kV e -5 kV rispetto ad un elettrodo di estrazione collegato a massa. L'estremo opposto dell'ampolla è ricoperto da uno schermo fluorescente per visualizzare il fascio. L'ampolla è immersa nel campo magnetico generato da una coppia di bobine di Helmholtz di raggio $R = (65 \pm 1)$ mm, formate ciascuna da $n = 320$ spire.

3. Osservazioni qualitative

Con l'ausilio di una calamita a barra, è possibile mostrare, tenendola più o meno vicina all'ampolla, che la deflessione aumenta col campo magnetico, diminuisce all'aumentare del potenziale di accelerazione V , ed è perpendicolare

sia alla direzione di propagazione che alla direzione del campo magnetico. Sono queste le caratteristiche principali del termine magnetico della forza di Lorentz⁴, esprimibile matematicamente come $F = qv \wedge B$, dove q è la carica della particella, v la sua velocità e B il campo magnetico.

4. Misura della carica specifica dell'elettrone

4.1 Misure

Decidiamo di misurare l'arco di deflessione del fascio, ossia la posizione a sullo schermo fluorescente del punto luminoso, in funzione della corrente i nelle bobine di Helmholtz e del potenziale di accelerazione V . Per fare ciò, fissiamo una scala graduata sull'ampolla, dietro allo schermo fluorescente, come si può vedere in figura 1.

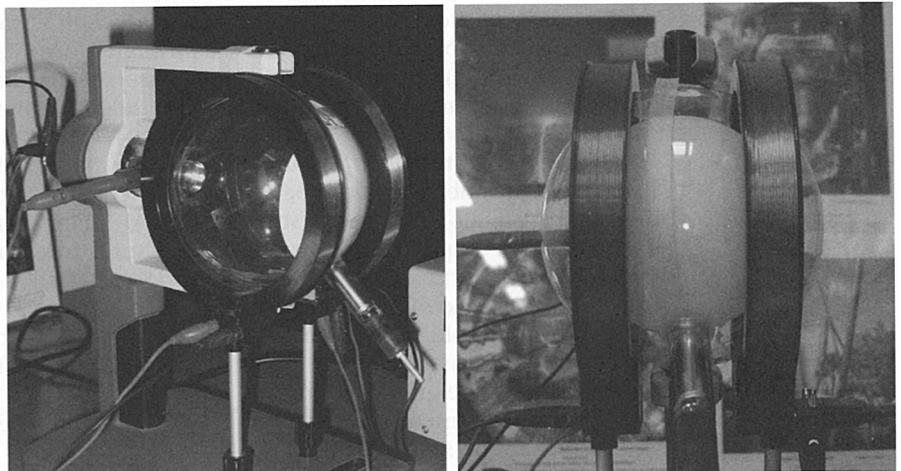


Figura 1. Apparato sperimentale e dettaglio della misura.

I dati sono riportati nella Tabella 1 e in forma grafica in figura 2. Le coordinate a' si riferiscono alle letture grezze sulla scala graduata, prima della sottrazione dello zero della scala, a_0 , ossia della posizione del fascio per campo magnetico nullo, cioè la posizione determinata dalla componente orizzontale del campo magnetico terrestre (circa $0,2 \times 10^{-4}$ T a Carpi⁵), non trascurabile rispetto al campo magnetico prodotto dalle bobine di Helmholtz: circa 4×10^{-4} T per $i = 0,1$ A. Possiamo non considerare la componente verticale, ben più intensa (circa $0,4 \times 10^{-4}$ T), in quanto produce uno spostamento laterale non interessante per i nostri scopi.

4.2 Modello fisico

Analizziamo i dati secondo il seguente modello [1,2]. Le particelle vengono accelerate dal potenziale di accelerazione ad una energia cinetica:

$$T = qV. \quad (1)$$

Esse entrano poi nel campo magnetico generato dalle bobine di Helmholtz, il cui valore è legato alla corrente tramite la seguente relazione:

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

$V(\text{kV}) \pm 0,02$	$i(\text{A}) \pm 0,005$	$a'(\text{mm}) \pm 1$	$V(\text{kV}) \pm 0,02$	$i(\text{A}) \pm 0,005$	$a'(\text{mm}) \pm 1$
4,5	0,06	0	3,0	0,29	42
4,5	0,14	15	3,0	0,22	31
4,5	0,19	20	3,0	0,18	25
4,5	0,22	25	3,0	0,13	16
4,5	0,26	31	3,0	0,10	11
4,5	0,32	40	3,0	0,06	3
4,5	0,34	43	2,5	0,06	4
4,5	0,26	32	2,5	0,10	13
4,5	0,21	24	2,5	0,14	20
4,5	0,14	14	2,5	0,20	30
4,5	0,06	0	2,5	0,21	33
4,0	0,06	0	2,5	0,24	38
4,0	0,13	13	2,5	0,26	41
4,0	0,19	24	2,5	0,22	36
4,0	0,22	27	2,5	0,18	28
4,0	0,25	31	2,5	0,13	18
4,0	0,29	37	2,5	0,09	10
4,0	0,31	40	2,5	0,06	4
4,0	0,32	42	1,5	0,06	8
4,0	0,26	33	1,5	0,07	11
4,0	0,21	27	1,5	0,09	15
4,0	0,12	13	1,5	0,13	25
4,0	0,06	1	1,5	0,18	36
3,0	0,06	4	1,5	0,20	39
3,0	0,10	10	1,5	0,205	41
3,0	0,14	18	1,5	0,16	30
3,0	0,17	23	1,5	0,125	23
3,0	0,21	30	1,5	0,11	18
3,0	0,23	33	1,5	0,08	14
3,0	0,25	36	1,5	0,07	10
3,0	0,26	39	1,5	0,06	8

Tabella 1. Dati raccolti.

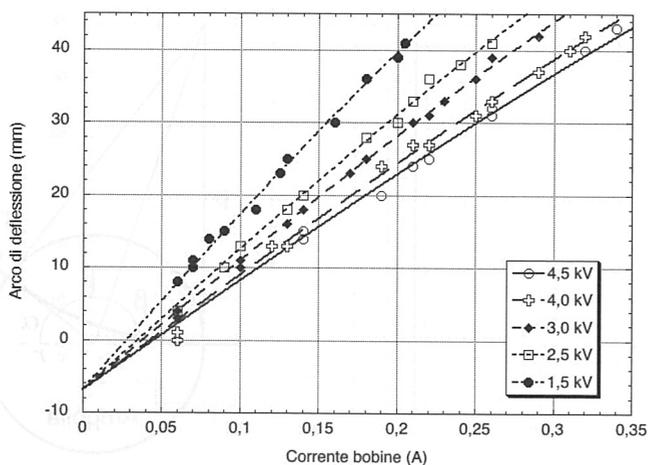


Figura 2. Dati raccolti in Tabella 1 (punti) e previsioni secondo il modello (linee).

Per semplicità di discussione, facciamo l'ipotesi (verificata in appendica A) che il campo sia "a scalino", cioè nullo al di fuori di un certo raggio effettivo r e costante all'interno. Con questa assunzione, la traiettoria degli elettroni è un arco di circonferenza di raggio di curvatura:

$$\rho = \frac{mv}{qB}, \quad (3)$$

dove m è la massa delle particelle e v la loro velocità, legata all'energia cinetica dalla relazione:

$$T = \frac{1}{2}mv^2. \quad (4)$$

Utilizziamo le relazioni cinematiche non relativistiche, ipotizzando che l'energia cinetica T delle particelle sia piccola rispetto alla loro energia a riposo. Dalla figura 3 osserviamo che valgono le seguenti relazioni geometriche:

$$\alpha = \frac{a}{r} \quad (5)$$

$$\alpha + 2\beta = \pi \quad (6)$$

$$\tan \beta = \frac{\rho}{r}. \quad (7)$$

Il raggio di curvatura della traiettoria degli elettroni è quindi legato all'arco $a = a' - a_0$ dalla seguente relazione:

$$\rho = r \cdot \tan \left[\frac{\pi}{2} - \frac{a}{2r} \right]. \quad (8)$$

Per semplificare l'analisi, dobbiamo assumere che il raggio r rappresenti sia il raggio entro il quale il campo magnetico è uniforme, sia il raggio di curvatura dello schermo fluorescente. Per questo scegliamo $r = r' = (60 \pm 2)$ mm.

Secondo questo modello, la relazione tra l'arco misurato e gli altri parametri è la seguente:

$$a' = a_0 + r \left\{ \pi - 2 \cdot \arctan \left[\sqrt{\left(\frac{5}{4} \right)^3 \frac{2Vm}{q} \frac{R}{\mu_0 n i r}} \right] \right\}. \quad (9)$$

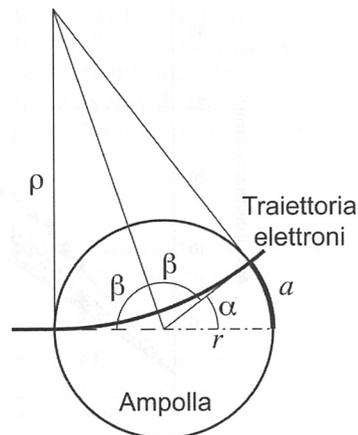


Figura 3. Relazione tra arco a e raggio di curvatura r .

Il fondo scala a_0 può essere determinato durante l'esperimento, osservando la posizione del punto luminoso in assenza di corrente nelle bobine. Nel nostro caso ciò non è stato fatto, per cui determiniamo $a_0 = (-6,9 \pm 1,6)$ mm interpolando le misure effettuate secondo le curve:

$$a'(V, i) = a_0 + r \left\{ \pi - 2 \cdot \arctan \left[K \frac{\sqrt{VR}}{\mu_0 n i r} \right] \right\}, \quad (10)$$

in cui a_0 e K sono lasciati come parametri liberi. Le curve interpolanti sono mostrate assieme ai dati in figura 2. Il buon accordo con i dati suggerisce che il modello sia appropriato a descrivere l'esperimento.

Confidando in questo modello, possiamo ricavare dalle misure di V , i e a' il parametro (q/m) , ossia la carica specifica dell'elettrone:

$$(q/m) = 2V \left(\frac{5}{4} \right)^3 \left\{ \frac{R}{\mu_0 n i r \tan \left[\frac{\pi}{2} - \frac{a' - a_0}{2r} \right]} \right\}^2. \quad (11)$$

La precedente formula (11) può essere ottenuta combinando le relazioni (1), (2), (3), (4) e (8). Dalla (3) si ricava il rapporto $(q/m) = v/\rho B$ che mediante la (4) e la (1) può essere riscritta come $(q/m) = 2V/(\rho B)^2$. Sostituendo, quindi, al posto di B e ρ le loro espressioni date, rispettivamente, dalla (2) e dalla (8) si ottiene la (11).

4.3 Analisi dei dati

Variando V e i abbiamo eseguito $N = 62$ misure di a' (Tabella 1). La distribuzione di queste misure è mostrata nell'istogramma di figura 4. Il valor medio, rappresentato in figura dalla linea verticale spessa, risulta essere:

$$\overline{(q/m)} = 1,87 \times 10^{11} \text{ C/kg} \quad (12)$$

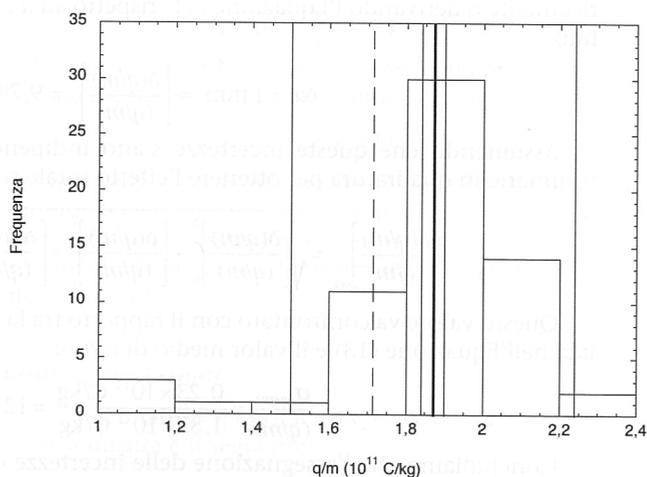


Figura 4. Risultati della misura.

mentre la deviazione standard è:

$$\sigma_{(q/m)} = 0,23 \times 10^{11} \text{ C/kg}. \quad (13)$$

La deviazione standard della media rappresenta l'incertezza casuale o statistica della misura. Essa vale:

$$[\delta(q/m)]_{\text{sta}} = \frac{\sigma_{(q/m)}}{\sqrt{N}} = 2,9 \times 10^9 \text{ C/kg}. \quad (14)$$

4.4 Analisi delle incertezze casuali

Nei paragrafi che seguono abbiamo voluto riportare per esteso la trattazione degli errori casuali e sistematici, nonché riflessioni su un possibile miglioramento dell'apparato sperimentale in quanto, trattandosi di discussioni nate all'interno di un ciclo di lezioni/seminari sull'arte della misura e del misurare, la stima delle incertezze era una parte centrale di ciò che volevamo trasmettere agli studenti.

La carica specifica è affetta da fluttuazioni casuali nelle misure di tensione V , corrente i e arco a' . Verifichiamo che lo sparpagliamento nelle misure di (q/m) sia consistente con la propagazione degli errori casuali su V , i ed a' .

Alla tensione V è assegnata un'incertezza pari a 0,02 kV, dovuta alla lettura del voltmetro analogico. In media, l'incertezza relativa su V è dello 0,76%, che si traduce in una pari incertezza relativa su (q/m) , essendo (q/m) e V proporzionali:

$$\frac{\delta V}{V} = 0,76\% \Rightarrow \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_V = \frac{\delta V}{V} = 0,76\%. \quad (15)$$

La corrente i ha un'incertezza di circa 0,005 A, dovuta alla lettura del multimetro digitale. In media, l'incertezza relativa su i è del 4%, ed essendo (q/m) proporzionale all'inverso del quadrato di i , questo valore va raddoppiato per ottenere il contributo all'incertezza su (q/m) :

$$\frac{\delta i}{i} \approx 4,0\% \Rightarrow \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_i = 2 \frac{\delta i}{i} = 7,9\%. \quad (16)$$

All'arco a' è assegnata un'incertezza di 1 mm a causa della precisione raggiungibile nelle letture sulla scala graduata fissata dietro lo schermo fluorescente. Non essendo banale la dipendenza di (q/m) da a' , è necessario valutare l'effetto numericamente o derivando l'Equazione (11) rispetto ad a' . Si ottiene il seguente risultato:

$$\delta a' = 1 \text{ mm} \Rightarrow \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_{a'} = 9,7\%. \quad (17)$$

Assumendo che queste incertezze siano indipendenti e casuali, possiamo sommarle in quadratura per ottenere l'effetto totale su (q/m) :

$$\left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_{\text{sta}} = \sqrt{\left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_V^2 + \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_i^2 + \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_{a'}^2} = 13\%. \quad (18)$$

Questo valore va confrontato con il rapporto tra la deviazione standard calcolata nell'Equazione (13) e il valor medio di (q/m) :

$$\frac{\sigma_{(q/m)}}{(q/m)} = \frac{0,23 \times 10^{11} \text{ C/kg}}{1,87 \times 10^{11} \text{ C/kg}} = 12\%. \quad (19)$$

Concludiamo che l'assegnazione delle incertezze casuali è ragionevole e che l'incertezza sul risultato finale è dominata dalle incertezze sulla corrente e sull'ar-

co. Esse possono essere ridotte scegliendo più opportunamente la scala del multimetro digitale e migliorando la lettura della scala graduata sull'ampolla.

4.5 Analisi delle incertezze sistematiche

La misura di (q/m) è affetta da incertezze sistematiche dovute al raggio R delle bobine di Helmholtz, alla determinazione del fondo scala degli archi a_0 e al raggio r dell'ampolla e del campo magnetico.

Dallo spessore delle bobine e dalla loro separazione, assegniamo un'incertezza di 1 mm al raggio R . Essendo (q/m) proporzionale a R^2 , l'effetto di questa incertezza è:

$$\frac{\delta R}{R} = 1,5\% \Rightarrow \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_R = 2 \frac{\delta R}{R} = 3,1\%. \quad (20)$$

Non essendo stato misurato direttamente, lo zero della scala degli archi a_0 può essere determinato dai dati, estrapolando le misure a valori di corrente nulla. Assegniamo all'indeterminazione di a_0 un'incertezza di 1 mm, pari a quella degli archi stessi. L'effetto sistematico medio sui risultati è il seguente:

$$\delta a_0 = 1 \text{ mm} \Rightarrow \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_{a_0} = 9,7\%. \quad (21)$$

L'ipotesi che il campo magnetico sia "a gradino", con un raggio r pari al raggio dell'ampolla, introduce un ulteriore errore sistematico. Dall'incertezza di 2 mm su r risulta che l'effetto sui risultati è:

$$\delta r = 2 \text{ mm} \Rightarrow \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_r = 15\% \quad (22)$$

Assumiamo che le incertezze sistematiche siano indipendenti e le sommiamo in quadratura per ottenere l'incertezza sistematica totale:

$$\left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_{\text{sis}} = \sqrt{\left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_R^2 + \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_{a_0}^2 + \left[\frac{\delta(q/m)}{(q/m)} \right]_r^2} = 18\% \quad (23)$$

cioè:

$$\left[\delta(q/m) \right]_{\text{sis}} = 0,34 \times 10^{11} \text{ C/kg}. \quad (24)$$

Essendo la carica specifica misurata in esperimenti di alta precisione, abbiamo a disposizione il valore accettato della grandezza (q/m) :

$$(q/m)_{\text{acc}} = 1,75882011 \times 10^{11} \text{ C/kg}, \quad (25)$$

rappresentato in figura 4 da una linea verticale tratteggiata grigia. Possiamo quindi confrontare la nostra stima dell'incertezza sistematica, $3,4 \times 10^{11}$ C/kg, con la differenza tra valore accettato e valore misurato, $0,11 \times 10^{11}$ C/kg. Questo confronto ci permette di affermare che la nostra stima degli errori sistematici è forse eccessivamente prudente.

4.6 Risultati e conclusioni

A seguito dell'analisi sopra descritta, possiamo affermare che il risultato finale della nostra misura è il seguente:

$$(q/m)_{\text{mis}} = (1,87 \pm 0,03 \pm 0,34) \times 10^{11} \text{ C/kg} \quad (26)$$

dove il primo errore è casuale o statistico, mentre il secondo è sistematico. Il valore medio, gli errori statistici e sistematici, ed il valore accettato sono rappresentati in figura 4 dalle linee verticali.

L'analisi degli errori indica che la misura è dominata dagli errori sistematici (in particolare dall'ipotesi di campo "a gradino") e dalla stima del raggio di curvatura delle particelle a partire da due punti soltanto. La misura può essere migliorata in almeno due modi:

- visualizzando l'intera traiettoria con uno schermo fluorescente graduato posizionato nell'ampolla parallelamente al fascio;
- producendo, anziché traiettorie circolari, traiettorie rettilinee, generate dalla combinazione di campi elettrici e magnetici noti, perpendicolari tra di loro e al fascio, seguendo l'esempio di J. J. Thomson.

Anche se grossolano, il nostro risultato ci permette comunque di trarre importanti conclusioni. Utilizzando la costante di Faraday dell'elettrolisi $F = 96,5 \text{ kC/mol}$ e il numero di Avogadro $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, possiamo stimare l'unità di carica elettrica:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{96,5 \text{ kC/mol}}{6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C.} \quad (27)$$

Se supponiamo che gli elettroni da noi osservati abbiano una carica pari a questo valore, ricaviamo che la loro massa deve essere pari a:

$$m = \frac{e}{(q/m)_{\text{mis}}} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1,87 \times 10^{11} \text{ C/kg}} = 8,6 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (28)$$

molto minore della massa atomica, che è dell'ordine di $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Abbiamo quindi un'indicazione che gli elettroni dei raggi catodici sono particelle subatomiche.

Appendice A

Le bobine di Helmholtz sono una coppia di bobine con alcune caratteristiche particolari:

- hanno entrambe raggio R ;
- hanno uno spessore L molto più piccolo del raggio R ;
- sono disposte, a distanza R , in modo che gli assi di simmetria delle due bobine siano coincidenti;
- hanno lo stesso numero n di spire;
- sono elettricamente collegate in serie, in modo che il verso di percorrenza delle due correnti sia lo stesso.

Sono spesso utilizzate in situazioni in cui c'è bisogno di un campo uniforme in una zona estesa. Il campo magnetico prodotto, infatti, è piuttosto uniforme, nel piano perpendicolare all'asse delle bobine e passante per il punto centrale di tale asse.

L'andamento del campo lungo l'asse delle due bobine può essere calcolato a partire dalla relazione di Biot-Savart [3]:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\mathbf{l} \wedge \mathbf{r}}{r^3} \quad (A1)$$

Si tratta di una relazione vettoriale che fornisce il campo \mathbf{B} prodotto da un elemento di circuito $d\mathbf{l}$, percorso da una corrente i , in un generico punto P posto a distanza r da $d\mathbf{l}$.

Con un po' di calcoli si può dimostrare che il campo magnetico lungo l'asse delle bobine è dato dalla relazione:



Figura 5. Dettaglio della verifica dell'ipotesi di campo a gradino mediante sensore di campo magnetico accoppiato a un sensore di movimento.

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2} \frac{R^2}{\left(R^2 + \left(x + \frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} + \frac{\mu_0 i n}{2} \frac{R^2}{\left(R^2 + \left(x - \frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (A2)$$

con $-R/2 \leq x \leq R/2$. Si osservi che per $x = 0$, cioè al centro tra le due bobine, il campo magnetico risulta essere quello riportato nella (2).

L'ipotesi di campo "a gradino" tra le due bobine di Helmholtz può essere verificata se si dispone di un sensore di campo magnetico. Nel nostro caso abbiamo utilizzato il sensore PS-2112 della Pasco (figura 5). Si tratta di una sonda ad effetto Hall capace di fornire il campo magnetico lungo la direzione assiale e perpendicolare della sonda.

Nella figura 6 è riportato, con linea continua spesso, l'andamento dato dalla (A2) del campo magnetico atteso in funzione del raggio, sul piano perpendicolare all'asse delle due bobine e passante per il centro. Il cerchio tratteggiato delimita la zo-

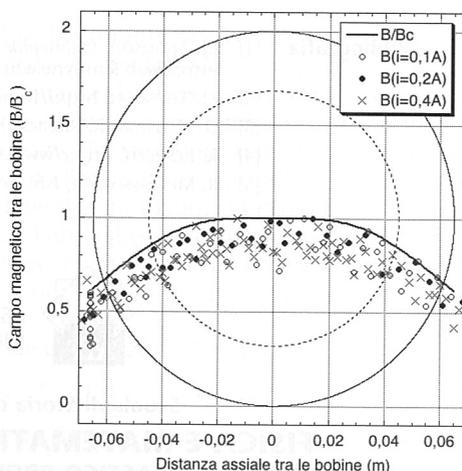


Figura 6. Campo atteso (linea) dalle bobine di Helmholtz in direzione assiale (cioè lungo l'asse) in funzione della posizione. I punti rappresentano le misure sperimentali per tre diversi valori della corrente che alimenta le bobine.

na dello schermo fluorescente sull'ampolla e individua una regione in cui la variazione del campo generato è inferiore al 15% rispetto al campo massimo (quello nel punto centrale).

Come si può osservare, i punti sperimentali soddisfano abbastanza bene l'ipotesi di "uniformità" del campo nella regione centrale, ossia quella interessata al passaggio del fascio di elettroni, tuttavia risultano mediamente il 10% inferiori al campo atteso.

Questa discrepanza può, come già ricordato nell'analisi degli errori sistematici, essere responsabile della maggior parte dell'incertezza della nostra misura.

Ringraziamenti

Vorremmo ringraziare tutti i ragazzi che si sono fermati in orario pomeridiano per approfondire un argomento di fisica con tanto entusiasmo, ma in particolare modo Sandro Gualdi, il "nostro" validissimo, entusiasta e sempre disponibile insegnante tecnico pratico.

Note ¹ Gli argomenti e il materiale prodotto nelle precedenti edizioni possono essere reperiti all'indirizzo: <http://edu.itisvinci.com/course/view.php?id=5>

² Il questionario in questione, reperibile all'indirizzo <http://www.aif.it/questionario/qfm.htm>, fa parte del lavoro preparatorio per il seminario "La fisica moderna nella scuola" per il Congresso dell'AIF tenutosi a Roma, dal 22 al 25 ottobre 2008.

³ Su indicazione di Stancari, all'epoca dell'esperienza docente di Fisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Ferrara e ora *Assistant Professor in Accelerator Physics* presso l'Idaho State University, abbiamo raggruppato quindici studenti del 3° e 4° anno ITIS "L.Vinci" di Carpi (indirizzo Fisica Ambientale) e 4° e 5° anno Liceo Classico "S.Carlo" di Modena.

⁴ Il primo ad aver dedotto l'espressione che conosciamo col nome di forza di Lorentz ($F = qE + qv \wedge B$) in modo corretto fu Heaviside nel 1889; J.J. Thomson vi si era avvicinato nel 1881. Come si può vedere la relazione che fornisce la forza di Lorentz è composta dalla somma di due termini; uno rappresenta l'azione sulla carica da parte del campo elettrico E , l'altro l'azione sulla carica in moto da parte del campo magnetico B . Si può subito ricavare che, nel caso di carica ferma ($v = 0$), l'unica forza che agisce è la ben nota relazione elettrostatica $F = qE$. In assenza poi di campo elettrico ($E = 0$) si ha $F = qv \wedge B$ [4,5].

⁵ I valori del campo magnetico terrestre nelle varie località del globo sono reperibili all'indirizzo: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag>

Bibliografia

- [1] J.J. THOMSON, *Philosophical Magazine*, 44, 293, (1897), reperibile in rete all'indirizzo <http://web.lemoyne.edu/~giunta/thomson1897.html>
- [2] J.J. THOMSON, <http://www.nobelprize.org>, (1906).
- [3] D. HALLIDAY, R. RESNICK, K. S. KRANE, *Fisica 2*, 5ª ed. it., Casa Editrice Ambrosiana, (2004).
- [4] R. RENZETTI, http://www.fisicamente.net/FISICA/STORIA_RELATIVITA_2.pdf
- [5] R. MCCORMMACH, *Isis*, Vol. 61, No. 4, 459-497 (1970).



ASSOCIAZIONE PER
L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA

Scuola di Storia della fisica · Corso di formazione

FISICA E MATEMATICA, DUE STORIE INTRECCIATE
UFFICIO SCOLASTICO PROVINCIALE - I.I.S. "L. EINAUDI", FERRARA

30 NOVEMBRE - 5 DICEMBRE 2009

Per ulteriori informazioni: www.lfns.it/STORIA/