

SCIENZA  FIRENZE

*Undicesima Edizione*

*Micro & Macro*

*Due approcci alla varietà dei fenomeni naturali  
La dimensione sperimentale nello studio delle scienze*

*Firenze, 10-11 aprile 2014*

**SEZIONE TESINA TRIENNIO**

*Primo Classificato*

*Giorgia Cannata, Sara Ferretto,  
Alessia Chiara Latini, Margherita Adelaide Musco*

*Classi II B e II G*

*Liceo Ginnasio Statale "Giovanni Berchet"*

*Milano*

*Docente Coordinatore Prof.ssa Barbara Chierichetti*

*Titolo*

*Regola o legge?*

*Motivazione*

*Il lavoro sviluppa in modo esemplare il tema del concorso e documenta un approccio didattico significativo, che integra la ricerca storica con l'attività sperimentale, realizzando anche un esperimento poco conosciuto. Viene così raggiunto un duplice obiettivo educativo: la miglior comprensione di un contenuto fondamentale del programma di fisica e la valutazione critica del percorso storico che ha condotto alla sua affermazione. Il resoconto del lavoro rivela una piena padronanza dei metodi sperimentali, una buona familiarità con la documentazione storica e una capacità di inquadrare un singolo problema scientifico in una prospettiva epistemologica più ampia.*

## Relazione dell'insegnante allegata alla tesina dal titolo: **Regola o legge?**

Il lavoro che ho preparato per questa edizione di ScienzaFirenze dal titolo: *Micro & Macro due approcci alla varietà dei fenomeni naturali, la dimensione sperimentale nello studio delle scienze*, descrive un percorso sullo studio del fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

L'idea è nata da una conversazione con un professore che mi aveva invitato ad eseguire con i miei studenti l'esperimento di Blondel e da un mio interesse personale per la figura di Faraday.

Questa proposta è stata accolta da quattro studentesse della classe II del Liceo Classico che in fisica avevano appena terminato lo studio della meccanica e che in matematica avevano completato quello della geometria analitica. Per prepararle, quindi, prima di iniziare, ho dovuto svolgere un corso intensivo e molto essenziale sull'elettromagnetismo che è durato circa un mese.

Il corso, come del resto tutta l'attività sperimentale, si è svolto nel Laboratorio di Fisica della scuola durante incontri pomeridiani di due-tre ore con cadenza settimanale.

Nel percorso teorico introduttivo, ho presentato dapprima i concetti di base come il campo elettrico, il potenziale, la corrente elettrica, la forza elettromotrice, ecc., quindi, nell'affrontare la parte relativa al magnetismo, ho messo in evidenza l'equivalenza magnete-corrente considerata sia dal punto di vista statico, sia da quello dinamico.

A tale scopo ho mostrato gli spettri dei campi magnetici visualizzabili con la limatura di ferro, generati da circuiti o da magneti, e introdotto l'ipotesi delle micro-correnti di Ampère per darne una spiegazione.

Inoltre, oltre all'esperimento di Oersted, ho eseguito esperimenti che mostrassero, anche solo qualitativamente, l'interazione tra corrente-corrente e corrente-magnete e ho introdotto la legge di Lorentz come chiave interpretativa di tali interazioni.

Con questi strumenti concettuali ci siamo addentrati nell'osservazione dei fenomeni dell'induzione elettromagnetica, guidati dal lavoro di Faraday e prendendo spunto da alcuni esperimenti da lui eseguiti e descritti in *Experimental Researches in Electricity*. Questa fase è stata dedicata principalmente all'osservazione e studio del fenomeno da un punto di vista macroscopico. Domande ricorrenti sono state: cosa ci si aspetta? quando avviene il fenomeno? qual è il verso previsto della corrente indotta? ecc.

Per evidenti ragioni di spazio e di tempo non è stato possibile realizzare tutte le tappe significative del percorso sviluppato da Faraday, ma ho dovuto limitarmi ad esperimenti che mettessero in luce che la corrente indotta poteva essere ottenuta:

- con una variazione del campo magnetico (esperimento delle due bobine affiancate, esperimento della calamita in movimento rispetto alla bobina)
- con il movimento del conduttore rispetto al campo magnetico (esperimento della bobina in movimento rispetto alla calamita).

Per conoscere gli esperimenti di Faraday, ci siamo appoggiati su testi in cui erano presenti delle traduzioni di parti del libro sopra citato, ma anche abbiamo tradotto alcuni passaggi proprio a partire dal testo originale.

Infine siamo entrate nella dimensione *micro* con l'interpretazione del *fenomeno induzione* alla luce della forza di Lorentz e con la discussione della validità della legge del flusso.

A tale fine abbiamo eseguito due esperimenti: nel primo, utilizzando una bilancia elettrodinamica, abbiamo misurato e paragonato la differenza di potenziale prodotta in una spira in movimento in un campo magnetico con la *fem* prevista teoricamente e nel secondo abbiamo riprodotto l'esperimento di Blondel nella sua forma semplificata.

Il tempo dedicato a queste misure ha permesso alle studentesse di comprendere e muoversi correttamente nello svolgere tali esperimenti, ma non è stato sufficiente per raggiungere quella confidenza con la strumentazione che permette di ottenere misure significative. Un altro limite ai risultati ottenuti è dovuto alla scarsa sensibilità degli strumenti di misura a nostra disposizione.

Molto importante infine è stato il momento in cui tutto il materiale raccolto è stato rielaborato per redigere la tesina. Qui le studentesse hanno toccato con mano la differenza tra il capire e il saper spiegare o raccontare, infatti le prime bozze della tesina sono state seguite da lunghe discussioni tese a far emergere i nessi ed i legami tra i vari aspetti del fenomeno. Ritengo che, per le mie studentesse, questa sia stata un'occasione per incontrare da vicino il metodo di indagine della fisica e per affrontare in modo meno dogmatico lo studio di tale disciplina.

Per quanto mi riguarda, l'aver dovuto discutere con loro sull'argomento per mettere in evidenza i nessi, per chiarire o sfrondare i concetti da ambiguità o da generalizzazioni frettolose, mi ha permesso di ripercorrere ed approfondire con loro la strada che, a partire da Faraday, ha portato alla formazione e allo sviluppo della conoscenza del fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

# Regola o legge?

## *Ringraziamenti*

Desidero rendere omaggio al professor Paoloantonio Marazzini, scomparso nel mese di giugno del 2014, grata per la disponibilità e pazienza con cui inizialmente ha orientato questo lavoro sperimentale, testimoniando ancora una volta la sua indomabile passione per l'educazione dei giovani, accompagnata da una sincera e rigorosa ricerca del vero.

Un particolare ringraziamento va al professor Giuseppe Giuliani dell'Università di Pavia per aver donato alla nostra scuola la strumentazione per l'esperimento di Blondel, approntata dallo stesso professor Marazzini, e per i preziosi consigli con cui ci ha accompagnato durante lo sviluppo del percorso sintetizzato in questa tesina.

Barbara Chierichetti



# Indice

1	<i>Introduzione</i>	p. 5
2	<i>Gli esperimenti di Faraday</i>	p. 5
3	<i>Forza di Lorentz e legge del flusso</i>	p. 7
4	<i>Esperimento con la bilancia elettrodinamica</i>	p. 9
5	<i>Esperimento di Blondel</i>	p. 12
6	<i>Conclusioni</i>	p. 14
7	<i>Bibliografia e Sitografia</i>	p. 15

# Introduzione

Con questo lavoro abbiamo approfondito il percorso storico-scientifico che concerne il concetto di induzione elettromagnetica, caposaldo di una branca della fisica, l'elettromagnetismo, che si sviluppò a seguito della scoperta delle connessioni tra corrente elettrica e magnetismo.

Il primo ad evidenziare sperimentalmente tale relazione fu Oersted, il quale, nel 1820, mostrò che una corrente elettrica può generare un effetto magnetico.

Fondamentale per l'elettrodinamica fu André Marie Ampère, il quale effettuò studi approfonditi sull'elettromagnetismo, e giunse, tra il 1821 e il 1825, attraverso l'elaborazione matematica più che con la sperimentazione in laboratorio, ad una teoria fisico-matematica che inquadrava i nuovi fenomeni. La sua geniale intuizione per spiegare il magnetismo nei materiali consistette nel negare la presenza di fluidi magnetici in corrispondenza dei poli e nel considerare invece, al posto di tali fluidi, l'esistenza di correnti elettriche microscopiche; Ampère ipotizzava, quindi, che gli effetti magnetici nei materiali derivassero dall'azione di queste micro-correnti presenti al loro interno. Secondo la sua teoria, inoltre, era possibile ricondurre tutti gli effetti magnetici a fenomeni legati alla presenza di correnti, indipendentemente dal tipo di sorgente.

Fu Michael Faraday, però, a segnare il punto di svolta. Questo fisico e chimico inglese, uomo di umili origini nato a Newington, Survey nel 1791 e morto a Hampton Court nel 1867, aveva da sempre avuto interessi per l'ambito scientifico, tanto da diventare assistente di H. Davy alla Royal Institution e sviluppare numerose ricerche con approccio preminentemente sperimentale. Faraday avviò le proprie indagini sull'elettromagnetismo chiedendosi se fosse possibile creare corrente elettrica partendo da un'azione magnetica così com'era possibile creare un effetto magnetico a partire da una corrente elettrica e fece diversi e ripetuti esperimenti riguardanti l'interazione tra un circuito elettrico e un campo magnetico, elaborando così il concetto dell'induzione elettromagnetica: con questo termine si intende appunto la produzione di corrente elettrica in un circuito dovuta ad azioni magnetiche.

Abbiamo voluto ripercorrere il tanto geniale quanto difficile cammino tracciato da Faraday, prendendo in considerazione alcuni dei suoi esperimenti più significativi (l'esperimento dell'anello di ferro dolce, della calamita in movimento reciproco rispetto ad una bobina, ecc.) e riproducendone di analoghi in laboratorio. Abbiamo fatto nostro l'approccio sperimentale di cui il fisico inglese è un degno rappresentante e tentato in tal modo di prevedere, analizzare, commentare le conclusioni a cui era giunto. Abbiamo infine analizzato l'evoluzione nella trattazione dell'induzione elettromagnetica nei secoli successivi con l'obiettivo di ricavare delle conclusioni coerenti ai dati sperimentali che abbiamo raccolto.

## Gli esperimenti di Faraday

Faraday, tra il 1830 e il 1831, si dedicò ad una serie di esperimenti tesi a verificare la possibilità di produrre elettricità mediante il magnetismo; tale fenomeno fu battezzato dallo stesso scienziato con il termine di *induzione elettromagnetica* partendo dall'idea che, come un corpo carico induce cariche elettriche su un altro conduttore, così una corrente in un circuito deve indurre corrente su un altro circuito. Quando realizzò i suoi esperimenti, per interpretare quanto osservava, Faraday aveva ben in mente:

- l'ipotesi di Ampère sulle micro-correnti per spiegare il magnetismo nei materiali;
- la sua convinzione che, nel mezzo interposto tra magneti o tra fili percorsi da corrente, la trasmissione delle forze avvenisse tramite "linee di forza" che egli definì come quelle curve "che potrebbero venir tracciate dalla limatura di ferro, cioè quelle a cui risulterebbe tangente un ago magnetico piccolissimo"<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> M. Faraday, in S. D'Agostino, Elettromagnetismo classico

Oggi sappiamo che l'intuizione di Faraday sull'esistenza di un mediatore nelle interazioni magnetiche è all'origine del concetto di campo magnetico (indicato con il vettore  $\vec{B}$ ), che noi utilizziamo per descrivere tali interazioni.

Tra i numerosi esperimenti da lui eseguiti, il primo che abbiamo considerato è il famoso esperimento dell'anello di ferro dolce. Il fisico inglese, come egli stesso descrive nella sua opera "Experimental Researches in Electricity", realizzò, con una barra di ferro dolce, un anello di diametro esterno di sei pollici. Su una parte di esso vennero realizzati tre avvolgimenti con fili di rame, ciascuno isolato dal ferro e dagli altri avvolgimenti, che Faraday indicò con la lettera A; dalla parte opposta vennero realizzati altri avvolgimenti con fili di rame (indicati con B) che furono collegati ad un galvanometro (Figura 1).

Quando Faraday collegò i fili dell'avvolgimento A ad una batteria, il galvanometro indicò subito la presenza di corrente, ma ciò accadde solamente nelle fasi transitorie del fenomeno, ossia nei momenti in cui si chiudeva o apriva il contatto: l'ago del galvanometro, infatti, dopo aver indicato il passaggio di corrente, nonostante il contatto venisse mantenuto, ritornava subito alla posizione iniziale, mentre, rompendo il contatto, l'ago mostrava di nuovo il passaggio di corrente, ma nel senso opposto a quello indotto nel primo istante, per poi ritornare rapidamente alla posizione di partenza.

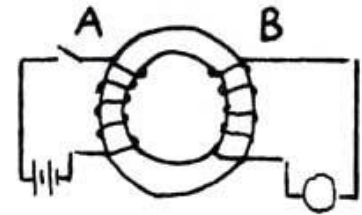


Figura 1

Per realizzare in laboratorio un esperimento analogo a quello sopra descritto ci siamo serviti di due bobine di base rettangolare, ciascuna di 250 spire di filo conduttore, affiancate l'una all'altra: la prima era collegata ad un generatore che forniva una tensione di 10,0 V, la seconda ad un galvanometro, tarato in Volt, ad ago centrale, con fondo scala di  $\pm 10,0$  V (sensibilità 0,2 V).

Come Faraday, abbiamo osservato che, quando le due bobine sono vicine, nel momento in cui il contatto viene chiuso, l'ago del galvanometro indica il passaggio di corrente nella seconda bobina, mediante un leggero tremolio, per ritornare subito al punto iniziale; la stessa cosa accade quando il contatto viene aperto. Inserendo poi, all'interno delle bobine, un nucleo di ferro dolce di dimensioni 15 cm x 4 cm x 4 cm, riproducendo così una situazione più vicina a quella dell'esperimento ricordato, l'ago si spinge fino ad indicare circa 4,0 V e, quando il circuito viene aperto, si osserva un movimento opposto a quello precedente e con una minore intensità.

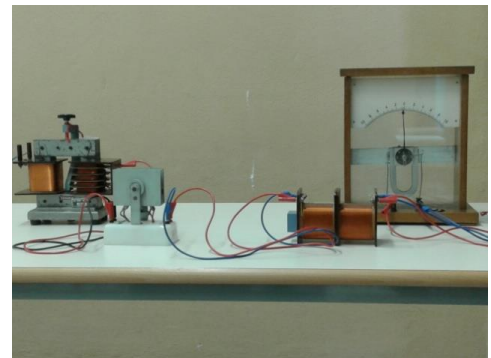


Figura 2

Inoltre abbiamo notato che, quando si chiude il circuito, il blocco di ferro viene respinto e, come già osservato da Faraday, quando la corrente nella prima bobina rimane costante, il galvanometro non indica alcun passaggio di corrente. Per comprendere quanto osservato, abbiamo constatato che quando chiudiamo e apriamo il circuito, e, in corrispondenza di ciò, quando l'ago del galvanometro si sposta prima in un senso e poi in quello opposto, indicando un passaggio di corrente, si ha una variazione del campo magnetico  $B$  generato dalla prima bobina: infatti quando il contatto viene chiuso, si passa da  $B=0$  a  $B \neq 0$ , viceversa, quando viene aperto, da  $B \neq 0$  a  $B=0$ . Ciò non si verifica nell'intervallo di tempo in cui il generatore rimane acceso: in questo caso la corrente, e quindi il campo magnetico, nella prima bobina restano costanti e il galvanometro non indica alcun passaggio di corrente.

Pertanto, possiamo affermare che per creare corrente indotta non è sufficiente un campo magnetico, ma è necessaria una sua variazione.

Nel momento in cui viene inserito il nucleo di ferro dolce, il campo magnetico generato dalla prima bobina, e quindi la sua variazione, aumentano in modo molto consistente; ciò produce anche una crescita dell'intensità della corrente indotta, provocando un movimento dell'ago, che si spinge fino a 4,0 V. La corrente indotta nella seconda bobina genera, inoltre, un campo magnetico opposto rispetto a quello prodotto nella prima; ciò si può rilevare attraverso l'espulsione del blocco di ferro dolce.

In seguito ad ulteriori osservazioni, Faraday verificò e ottenne corrente indotta mediante il movimento reciproco tra magnete e circuito elettrico.

Per eseguire tale verifica ci siamo serviti di una calamita cilindrica, legata ad una molla, e di una bobina con 10'000 avvolgimenti, collegata con due cavi allo stesso galvanometro che era stato usato in precedenza per l'esperimento del nucleo di ferro dolce (Figura 3).

Dopo aver teso la molla e lasciato andare la calamita, facendo attenzione che le oscillazioni prodotte fossero verticali, abbiamo osservato che, in corrispondenza del moto oscillatorio della calamita all'interno della bobina, l'ago del galvanometro oscillava attorno allo zero centrale, segno inequivocabile del passaggio di corrente indotta all'interno della bobina stessa. Abbiamo, inoltre, riscontrato che gli effetti sono sempre gli stessi, sia che la bobina resti fissa e il magnete si muova, sia invece che il magnete rimanga fisso e la bobina sia in moto. Il fenomeno aumenta con l'accrescere del numero delle spire e della velocità con cui viene mossa la calamita; infatti inserendola o togliendola in modo che ogni volta l'impulso sia maggiore, l'ago oscilla fino a raggiungere il fondo scala.

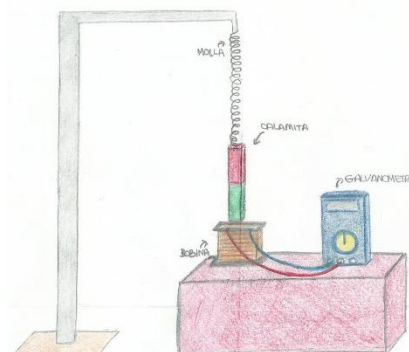


Figura 3

Abbiamo associato la presenza di corrente indotta, prodotta dal movimento della calamita rispetto alla bobina, alla variazione del campo magnetico concatenato alla bobina stessa.

Per interpretare, invece, il caso in cui è la bobina a muoversi rispetto alla calamita, ci siamo riferiti alla conclusione cui Faraday era giunto dopo aver eseguito una serie di esperimenti che, a partire da una variazione di quello eseguito da Arago, lo portarono a constatare che in un filo conduttore in movimento in un campo magnetico si può produrre una corrente indotta. La direzione del movimento del filo rispetto a quella del campo magnetico non era casuale; infatti, egli affermava che le correnti indotte fossero generate in un conduttore che tagliava le linee di forza magnetiche o che era tagliato da esse, ovvero, detto con le parole di Faraday: "Se un filo conduttore si muove in modo tale da tagliare una curva magnetica si produce una forza che tende a produrre una corrente elettrica attraverso di esso"<sup>2</sup>.

## Forza di Lorentz e legge del flusso

Come abbiamo appena affermato, Faraday giunse ad interpretare il fenomeno dell'induzione elettromagnetica attraverso il concetto di linee di campo tagliate da un conduttore. Tale fenomeno fu compreso più a fondo dopo la scoperta da parte di Thomson (1897) di particelle elementari elettricamente cariche, gli elettroni, scoperta che lo scienziato raggiunse studiando il moto di cariche elettriche in vuoto spinto. Nel 1892, inoltre, Lorentz scrisse l'espressione della forza a cui è soggetta una carica elettrica in movimento in un campo magnetico:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Essa è data dal prodotto della carica  $q$  per il prodotto vettoriale tra la velocità  $\vec{v}$  della particella e l'intensità del campo magnetico  $\vec{B}$ .

Per interpretare dal punto di vista microscopico il comportamento di un filo in movimento in un campo magnetico prendiamo in esame il caso di una sbarretta AB libera di scorrere alle sue estremità lungo i bracci di un conduttore di ferro piegato a U immerso in un campo magnetico uniforme come mostrato in Figura 4. Gli elettroni presenti nella sbarretta AB, partecipando del moto di questa, sono soggetti alla

<sup>2</sup> [http://www.treccani.it/scuola/lezioni/in\\_aula/fisica/faraday/1.html](http://www.treccani.it/scuola/lezioni/in_aula/fisica/faraday/1.html)

forza di Lorentz, che è diretta da B verso A; questo causerà un moto degli elettroni e, quindi, una corrente da A a B. Per questo motivo, è come se ci fosse in tutti i punti della sbarretta un campo elettromotore in grado di mantenere la differenza di potenziale agli estremi della stessa. Tale campo elettromotore è dato dalla seguente formula:

$$\vec{E}_m = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2)$$

dove F rappresenta la forza di Lorentz. Tenendo conto del fatto che nel nostro caso la direzione della velocità è perpendicolare a quella del campo, il modulo di F è  $F = q \cdot v \cdot B$ . Sostituendo nella (2) questa espressione, si giunge a concludere che il campo elettromotore è:

$$E_m = v \cdot B \quad (3)$$

La forza elettromotrice corrispondente si ottiene calcolando la circuitazione del campo elettromotore lungo il percorso chiuso ABCD, ovvero eseguendo la sommatoria dei prodotti scalari tra campo elettrico e spostamento ( $\vec{E}_m \cdot \Delta\vec{s}$ ) per i quattro lati del quadrilatero; nel nostro caso, l'unico addendo diverso da zero in tale calcolo è quello relativo al tratto AB, poiché il campo elettromotore degli altri lati è nullo. Si arriva, così, a determinare la forza elettromotrice che si crea agli estremi del filo conduttore come il prodotto tra il campo magnetico B, la lunghezza l del tratto AB e la velocità v con cui essa si muove:

$$fem = v \cdot l \cdot B \quad (4)$$

Un altro metodo per leggere questa situazione fa riferimento al concetto di flusso. In generale, il flusso di un vettore  $\vec{V}$  attraverso una superficie piana  $\vec{S}$  è il prodotto scalare tra i due vettori  $\vec{V}$  e  $\vec{S}$ :

$$\phi(\vec{V}) = \vec{V} \cdot \vec{S} = V \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (5)$$

dove  $\alpha$  è l'angolo formato dai due vettori.

Consideriamo il flusso del campo magnetico B attraverso una superficie  $S_{(ABCD)}$  avente per bordo il circuito. Nel nostro caso, quindi, il flusso sarà espresso dalla seguente formula:

$$\phi(B) = \vec{S}_{(ABCD)} \cdot \vec{B} = S_{(ABCD)} \cdot B \quad (6)$$

dove abbiamo posto  $\cos\alpha$  pari a 1 perché il vettore perpendicolare alla superficie e il campo magnetico sono paralleli.

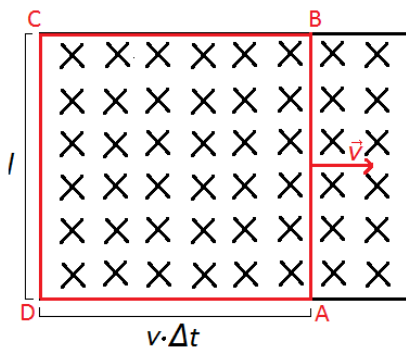


Figura 5

Nel caso preso in esame, quando il flusso di B concatenato al circuito ABCD varia, si produce all'interno di questo una corrente indotta a cui corrisponde una forza elettromotrice espressa dalla formula:

$$fem = - \frac{\phi(B)_{finale} - \phi(B)_{iniziale}}{\Delta t} \quad (7)$$

L'effetto di tale corrente elettrica è la produzione di un campo magnetico che si oppone a ciò che l'ha causato, ovvero la variazione del flusso del primo campo magnetico, come abbiamo osservato riproducendo l'esperimento delle due bobine; per questa ragione si antepone alla frazione il segno meno. Noi abbiamo considerato la situazione in cui la sbarretta AB inizialmente coincide con CD. Perciò la superficie all'istante iniziale ( $t_{iniziale}$ ), e con essa il flusso, è nulla; con questo espediente possiamo considerare rilevante soltanto il dato del flusso finale.



Si ha dunque che:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{finale}} &= S_{\text{finale}} \cdot B \\ \Phi_{\text{iniziale}} &= S_{\text{iniziale}} \cdot B = 0 \\ \Delta t &= t_{\text{finale}} - t_{\text{iniziale}} = t_{\text{finale}}\end{aligned}$$

Come si può notare dalla figura, nel momento in cui il filo  $l$  "taglia le linee di campo", il flusso  $\Phi$  è dato dal prodotto di  $B$  per la superficie spazzata. Essendo  $l$  la lunghezza del filo conduttore nel tratto AB,  $v$  la velocità con cui viene compiuto il movimento e  $\Delta t$  l'intervallo in cui avviene il movimento stesso, tale superficie può essere assimilata all'area del rettangolo di lati  $v \cdot \Delta t$  e  $l$ .

La forza elettromotrice sarà data dal rapporto tra la variazione del flusso del campo magnetico nel tempo preso in considerazione e il tempo stesso. Sostituendo nella formula i dati riportati sopra si ottiene:

$$fem = \frac{v \cdot \Delta t \cdot l \cdot (B)}{\Delta t} \quad (8)$$

Semplificando si arriva, così, alla formula:

$$fem = v \cdot l \cdot B \quad (9)$$

Come si evince dalla formula (9) i parametri che risultano in definitiva rilevanti per l'individuazione del valore della forza elettromotrice sono l'intensità del campo magnetico  $B$ , la lunghezza del filo conduttore  $l$  e la velocità  $v$  con cui si produce il movimento. Confrontando la (4) e la (9) si può facilmente notare che pur tramite diverse basi teoriche, da una parte la forza di Lorentz, dall'altra quella del flusso, si giunge alla stessa formula per descrivere la forza elettromotrice responsabile della produzione della corrente indotta. Tuttavia, la descrizione che usa la forza di Lorentz specifica dove la  $fem$  viene prodotta: nella sbarretta.

## Esperimento con la bilancia elettrodinamica

Un esperimento che può essere interpretato alla luce della formula ricavata è l'esperimento che abbiamo eseguito con la bilancia elettrodinamica, dove si prevede che una spira di un metallo conduttore, in movimento, si immerga in un campo magnetico perpendicolare ad essa. A partire da questa situazione, durante l'esperimento, si potrà registrare una differenza di potenziale, corrispondente alla corrente elettrica creatasi nella spira.

Per eseguire questo esperimento ci siamo serviti di un sistema che permette, tramite un movimento uniforme, che la spira entri ed esca dall'influenza del campo magnetico e di un elettromagnete che crei il campo magnetico stesso.

Tale campo viene creato grazie a un nucleo di ferro a U, nei cui bracci sono inserite due bobine da 600 avvolgimenti, collegate con un alimentatore tramite un circuito chiuso (si veda Figura 6).

L'alimentatore, dalla portata di 5,00 A, fornisce corrente elettrica dell'intensità di 2,00 A, adatta al circuito costituito dalle bobine.

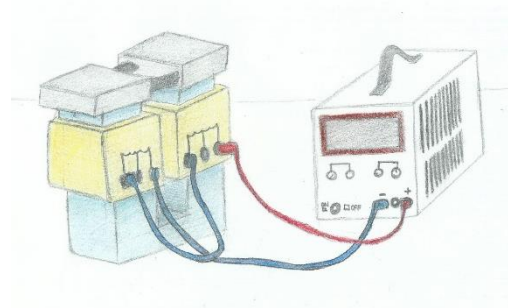


Figura 6

Le due bobine, per loro proprietà, permettono che si origini un campo magnetico al loro interno, che si trasferisce al nucleo di ferro a U. A sua volta, il campo magnetico viene trasmesso alle due espansioni polari, due blocchi di ferro dolce. I collegamenti sono stati eseguiti in modo da ottenere in corrispondenza delle due espansioni polarità opposte. Le due espansioni polari sono separate da due distanziatori dello spessore di 1 o 2 cm per creare uno spazio in cui viene fatta entrare la spira. Questa è fissata al braccio della bilancia, che ha la capacità di oscillare. Il movimento di oscillazione, che permette l'immersione della spira nel campo magnetico, è ottenuto con il posizionamento di pesi lungo il bilanciante. Il braccio della bilancia, infatti, è dotato di alcuni supporti in cui inserire i pesi. All'estremità B del bilanciante, opposta rispetto a quella della spira, pende una massa di 200 gr che pesca in un cilindro riempito di glicerina. Grazie a questo accorgimento (la glicerina è un liquido viscoso che genera attrito) le oscillazioni prodotte avvengono a velocità costante. Nel supporto apposito, dunque, sul bilanciante, è

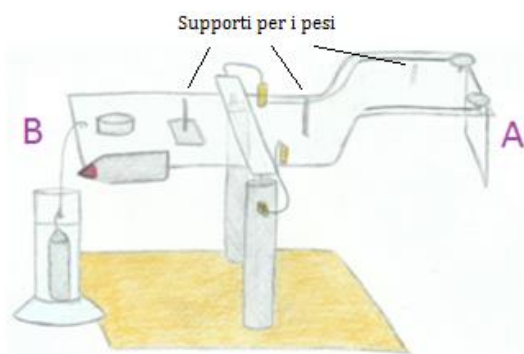


Figura 7

stata posizionata una massa in grado di contrapporsi a quella di 200 gr e, quindi, di provocare l'ingresso della spira nel campo magnetico.

Per studiare il moto uniforme abbiamo preso come riferimento la punta di una freccia che si trova all'estremità B del bilanciante e il cui moto è solidale a quello del peso immerso nel liquido viscoso e opposto rispetto a quello del circuito, che si trova all'estremità A. Per individuare più facilmente la sua posizione e studiarla, le abbiamo applicato un adesivo colorato di rosso. La differenza di potenziale che risultava dall'esperimento è stata registrata con un tester collegato alla bilancia elettrodinamica.

Quello che abbiamo voluto verificare analizzando l'esperimento da un punto di vista quantitativo è che il valore della differenza di potenziale che appare sul tester durante la prova corrispondesse a quello previsto ( $fem$ ) utilizzando la formula a cui siamo giunti partendo sia dalla forza di Lorentz sia dalla legge del flusso. Le misure necessarie per tale analisi sono l'intensità del campo magnetico ( $B$ ), la lunghezza della parte dell'arco conduttore interessata dal flusso di elettroni ( $l$ ) e la velocità media del suo movimento nel campo ( $v$ ), oltre al valore della differenza di potenziale indicato dal tester ( $\Delta V$ ).

A seconda della distanza tra le due espansioni polari (1 o 2 cm), l'intensità del campo magnetico indotto dalla corrente (di 2,00 A) è rispettivamente di 0,18 T o 0,15 T, come indicato dal costruttore. La lunghezza del filo metallico in cui si verifica il flusso di elettroni, invece, è di 10,0 cm, come risulta dalle nostre misurazioni, effettuate con una riga millimetrata. La velocità, infine, è stata ottenuta utilizzando Tracker, un programma didattico multimediale grazie al quale, a partire dal video dell'esperimento, è stato possibile visualizzare il grafico spazio-tempo delle posizioni successive assunte dalla freccia di riferimento. Durante l'esperimento abbiamo filmato il movimento di tale freccia e accanto ad essa il tester tenuto su un supporto, in modo da sapere quanto fosse il valore della differenza di potenziale in ogni istante. Era importante che la videocamera fosse ferma e perfettamente frontale rispetto alla bilancia, per evitare che il movimento della ripresa si aggiungesse a quello del sistema e che la lunghezza di riferimento (il lato lungo della freccia, di 5,0 cm) risultasse distorta. Per questo motivo, abbiamo scartato parecchi video durante i quali non erano stati presi questi accorgimenti.

Per ogni filmato, abbiamo individuato le posizioni della freccia in cui il potenziale indotto si è mantenuto costante per più tempo; dopodiché, abbiamo selezionato nel grafico spazio-tempo (tempo in ascissa e spazio in ordinata) i punti corrispondenti e individuato il coefficiente angolare della retta che li interpolava (la legge oraria del moto): esso corrisponde alla velocità media del movimento della freccia (e di conseguenza anche del filo conduttore che si immerge nel campo) in quell'intervallo. Data la presenza del liquido viscoso, che come già detto dovrebbe rendere costante il movimento, e poiché non abbiamo modificato la collocazione dei pesi tra una prova e l'altra, la velocità dovrebbe essere sempre uguale e, se i valori non coincidono, ciò è dovuto all'errore sperimentale. Perciò, nel nostro studio sulla forza elettromotrice, abbiamo calcolato la velocità media  $\bar{v}$  di quelle ottenute con Tracker.

L'incertezza è stata conseguentemente calcolata con la formula della semidispersione:

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2} \quad (10)$$

I valori delle velocità raccolte sono riportate nelle tabelle seguenti:

PRIMA SERIE (B = 0,15 T)	
Esperimento	Velocità (cm/s)
1	2,155
2	2,021
3	1,753
4	1,662
5	1,728
6	1,807
7	2,162

SECONDA SERIE (B = 0,18 T)	
Esperimento	Velocità (cm/s)
1	1,415
2	1,803
3	1,906
4	1,962
-	-
-	-
-	-

Per gli esperimenti in cui B era uguale a 0,15 T, la velocità media è:  $\bar{v} = (1,9 \pm 0,3) \text{ cm/s}$

Per quelli in cui B era uguale a 0,18 T, invece, la velocità media è:  $\bar{v} = (1,8 \pm 0,3) \text{ cm/s}$

In sintesi, ecco i dati necessari per la determinazione della forza elettromotrice *fem*:

PRIMA SERIE (B = 0,15 T)			SECONDA SERIE (B = 0,18 T)		
Grandezza	Valore	Incertezza	Grandezza	Valore	Incertezza
$\bar{v}$	1,9 cm/s	0,3 cm/s	$\bar{v}$	1,8 cm/s	0,3 cm/s
<i>l</i>	10,0 cm	0,1 cm	<i>l</i>	10,0 cm	0,1 cm
<i>B</i>	0,15 T	0,01 T	<i>B</i>	0,18 T	0,01 T

Per poter concludere l'analisi, abbiamo infine dovuto calcolare il valore della forza elettromotrice che ci saremmo aspettati secondo le considerazioni teoriche fatte in precedenza. Abbiamo dunque utilizzato la formula seguente, tenendo conto dell'incertezza della misura:

$$fem = v \cdot l \cdot B$$

$$\Delta fem = \left( \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta B}{B} \right) fem \quad (11)$$

Da queste formule si ricava che:

$$fem_{(B=0,15 \text{ T})} = (0,3 \pm 0,1) \text{ mV}$$

$$fem_{(B=0,18 \text{ T})} = (0,3 \pm 0,1) \text{ mV}$$

Il paragone di questi risultati con le corrispondenti differenze di potenziale è riportato nella tabella seguente:

PRIMA SERIE (B = 0,15 T)			SECONDA SERIE (B = 0,18 T)		
Grandezza	Valore	Incertezza	Grandezza	Valore	Incertezza
$\Delta V$	0,2 mV	0,1 mV	$\Delta V$	0,4 mV	0,1 mV
fem	0,3 mV	0,1 mV	fem	0,3 mV	0,1 mV

Nell'osservazione dei risultati è importante notare il fatto che, poiché non abbiamo potuto misurare direttamente l'intensità del campo magnetico e ci siamo dovuti quindi attenere alle indicazioni del costruttore, l'incertezza di tale misura risulta piuttosto elevata e perciò si percepisce solo una piccola differenza tra gli intervalli dei due valori, in quanto il primo è di  $(0,15 \pm 0,01) T$  e il secondo di  $(0,18 \pm 0,01) T$ . Per questo motivo, dal calcolo della forza elettromotrice non emerge nessuna differenza tra le due serie di esperimenti, che invece risulta evidente dal paragone tra le due differenze di potenziale. Tuttavia, come si può notare dalle tabelle riportate, nei casi presi in considerazione i due valori della forza elettromotrice (quella calcolata e quella che compare sul tester) non sono in contrasto, essendo  $\Delta V$  compreso nell'intervallo dell'incertezza della fem. Questo significa che le previsioni ricavate da considerazioni teoriche trovano - nei limiti della precisione delle nostre misure - un riscontro ragionevole nelle osservazioni sperimentali.

## Esperimento di Blondel

La forza di Lorentz e la legge del flusso sono state a lungo alternativamente richiamate per interpretare i fenomeni di induzione elettromagnetica. Secondo il metodo scientifico, tuttavia, non possono esserci due o più spiegazioni al fenomeno, ragion per cui diversi fisici, tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, si interrogarono sulle due modalità di spiegazione della corrente indotta e tentarono di capire a quale delle due dovesse essere accordata la dignità di legge e a quale quella di regola. Blondel nel 1910 realizzò un esperimento per verificare la validità della cosiddetta legge di Faraday - Lenz, secondo cui:

$$fem = - \frac{\Delta\phi(B)}{\Delta t}$$

Il suo apparato sperimentale era costituito da due espansioni polari tra le quali era inserito un rocchetto; attorno ad esso era avvolto un filo di rame, le cui estremità erano collegate con un contatto strisciante ad un misuratore di corrente. Secondo la legge del flusso si dovrebbe produrre una forza elettromotrice indotta generata dalla variazione del flusso del campo magnetico nel momento in cui si svolgono le spire costituite dal filo di rame attorno al rocchetto. La corrente che ne dovrebbe conseguire, tuttavia, non venne da lui riscontrata.

Abbiamo riprodotto l'esperimento di Blondel, nella sua forma semplificata (Figura 8), utilizzando un apparato sperimentale costituito da una struttura in legno che tiene in sospensione un tubo di plastica con all'interno 24 magneti al neodimio di raggio  $10,5 \cdot 10^{-3} m$ , che producono, in corrispondenza della superficie del cilindro, un campo magnetico di 0,25 T, come dichiarato dal costruttore. Attorno

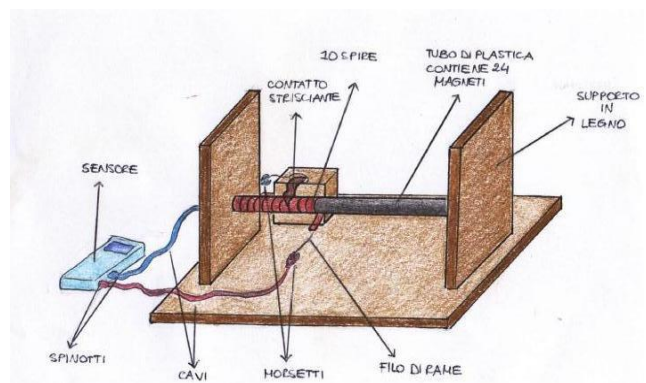


Figura 8



al tubo è avvolto un conduttore (un filo di rame) isolato da un rivestimento in gomma e in contatto strisciante con la struttura di supporto; le estremità di rame del filo conduttore sono collegate ai morsetti di due cavi ciascuno dotato di uno spinotto da inserire in un tester di sensibilità  $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$ , fondo scala  $200 \cdot 10^{-3} \text{ V}$  e impostato sulla corrente continua (simbolo: V =); sono stati infine necessari un dispositivo per filmare l'esperimento e poterlo riprodurre fotogramma per fotogramma e fogli di carta millimetrata.

Abbiamo deciso che gli avvolgimenti del filo conduttore attorno al tubo di plastica fossero pari a 10 spire; in tal modo l'esperimento è più funzionale e semplice da realizzare. Per eseguire questo esperimento è stata necessaria la collaborazione di più persone: una di noi ha dovuto tenere con fermezza il supporto di legno al piano di appoggio, un'altra ha svolto le spire dal magnete con un colpo veloce, secco, ma allo stesso tempo preciso, poiché il conduttore deve rimanere tangente alle linee di campo; un'ultima persona, infine, ne ha filmato l'esecuzione. Una volta caricato il filmato sul computer e aperto il video con un programma che permetta di visualizzare ogni fotogramma dello stesso, abbiamo fatto uso della carta millimetrata: abbiamo, infatti, misurato quale fosse la lunghezza riportata dalla barra di visualizzazione del timer del programma per un tempo facilmente definibile (1 s), abbiamo poi individuato i fotogrammi in cui comincia e si conclude lo svolgimento delle spire e misurato anche in tal caso le lunghezze corrispondenti riportate dal timer. Calcolando la differenza tra questi ultimi due valori e impostando una proporzione si può individuare il tempo impiegato per svolgere le spire. Abbiamo realizzato diversi filmati e in quello meglio riuscito lo svolgimento delle spire è stato eseguito in 0,64 s. I dati relativi a tale filmato sono indicati nella seguente tabella:

Grandezza	Misura
B	0,25 T
$\Delta t$	0,64 s
Numero di spire	10
r	$10,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Fondo scala del tester	$200 \cdot 10^{-3} \text{ V (V =)}$
Sensibilità del tester	$0,1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
Fem riscontrata	$0,0 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

Secondo la legge di Faraday - Lenz la forza elettromotrice indotta è data dalla variazione del flusso nell'unità di tempo considerata. Tale variazione, in questo caso, è dovuta a propria volta alla variazione della superficie concatenata al circuito. Al termine dello svolgimento delle spire quest'ultima superficie è nulla, mentre nell'istante in cui inizia l'esperimento essa è pari al prodotto tra la superficie individuata da una spira e il numero di spire stesso:

$$fem = - \frac{(\text{superficie di una spira}) \cdot (\text{numero di spire}) \cdot (B)}{\Delta t}$$

Sostituiamo alla formula i dati dell'esperimento considerato:

$$fem = - \frac{(10,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \cdot 10 \cdot \pi \cdot 0,25 \text{ T}}{0,64 \text{ s}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Applicando la legge di Faraday - Lenz si dovrebbe produrre una forza elettromotrice di  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ V}$ , mentre il tester non registra alcuna fem, se si escludono gli istanti finali dello svolgimento in cui il filo, non essendo più teso, taglia le linee di campo producendo una fem di  $\cong 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ V}$ . Il fatto che il mancato riscontro di una corrente indotta non possa essere addebitato all'insufficiente sensibilità del sensore

(  $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$  ) è stato confermato da altre riproduzioni di tale esperimento nelle quali la sensibilità del multimetro era ancor più precisa e pari a  $0,001 \cdot 10^{-3} \text{ V}$ .<sup>3</sup>

Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica viene spiegato in molti manuali delle scuole secondarie superiori e dei primi anni di università facendo riferimento in alcuni casi alla forza di Lorentz, in altri alla cosiddetta legge del flusso, o legge di Faraday - Lenz. Quest'ultima, tuttavia, viene citata in modo superficiale, senza approfondire se l'attribuzione a Faraday sia corretta e se la sua validità sia estesa a tutti i fenomeni di corrente indotta. Il concetto di flusso, in realtà, non è stato elaborato da Faraday, ma deve essere attribuito a Maxwell, il quale, dopo aver descritto nel suo "A Treatise on Electricity and Magnetism" gli esperimenti del fisico di Survey, afferma: "L'insieme di questi fenomeni può essere riassunto in una sola legge. Quando il numero delle linee dell'induzione magnetica che passano attraverso il circuito secondario nella direzione positiva cambia, nel circuito agisce una forza elettromotrice che è misurata dalla rapidità con la quale decresce l'induzione magnetica attraverso il circuito", ovvero che l'insieme dei fenomeni da lui sperimentalmente evidenziati può essere attribuito ad un unico fattore, la variazione del flusso del campo magnetico analizzato. Maxwell formula poi quella che passerà alla storia con il nome di legge del flusso, ma trascura di sottolineare il fatto che essa non è la legge generale dell'induzione elettromagnetica. Il fatto che egli non abbia dato ampio respiro a questa conclusione, in realtà fondamentale, ha comportato che nel mondo della fisica ci si riferisse a tale "legge" senza considerare il fatto che essa è in realtà valida solo per casi ad hoc e che vi si giunge attraverso passaggi matematici, che, pur corretti, non possono essere sufficienti per una adeguata giustificazione del fenomeno fisico. E' dunque più opportuno riferirvisi indicandola come regola di calcolo, la quale è funzionale per una buona parte degli esperimenti sull'induzione elettromagnetica, ma che non ne spiega la totalità e, ancor più importante, non prevede sempre gli effetti sperimentalmente verificati, come abbiamo potuto constatare attraverso l'esperimento di Blondel.

## Conclusioni

Il nostro percorso si è sviluppato su due binari, strettamente collegati l'uno con l'altro: da una parte abbiamo seguito lo sviluppo storico che ha avuto, da Faraday in poi, il concetto di induzione elettromagnetica; dall'altra abbiamo analizzato tale fenomeno sotto molteplici aspetti. Oersted e Faraday hanno studiato l'elettromagnetismo da un punto di vista macroscopico: sulla base di dati sperimentalmente verificabili sono giunti ad evidenziare le connessioni tra corrente elettrica e magnetismo. Con l'evoluzione delle conoscenze scientifiche si è poi approdati ad un'analisi più approfondita della corrente indotta: Thomson ha scoperto l'esistenza di una particella subatomica, l'elettrone, la quale poteva essere considerata causa della corrente elettrica. A partire da ciò Lorentz ha dato avvio ad uno studio microscopico del fenomeno elettromagnetico: la corrente indotta, infatti, non è altro che l'espressione macroscopica di ciò che accade a livello microscopico, ovvero il movimento degli elettroni di un conduttore, soggetti alla cosiddetta forza di Lorentz, che nella sua forma generale:  $\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$  tiene conto sia del movimento delle cariche, sia della presenza di un campo elettromotore. Sebbene tutti gli esperimenti da noi riprodotti si inseriscano nell'ambito del macroscopico, non abbiamo perso di riferimento l'aspetto microscopico; al contrario, nella nostra tesina

---

<sup>3</sup> [http://fisica.unipv.it/percorsi/ok\\_1.mpg](http://fisica.unipv.it/percorsi/ok_1.mpg)

esso è stato un elemento fondamentale apportato dalla forza di Lorentz alla luce del quale abbiamo messo alla prova la validità della “legge” del flusso attraverso l’esperimento di Blondel.

L’opportunità di approfondire uno degli argomenti cardine della fisica moderna ci ha permesso di relazionarci a tale materia da un punto di vista più sperimentale e di comprendere che essa non consta semplicemente di una serie di formule, ma che, al contrario, si basa innanzitutto sull’osservazione diretta ed empirica dei fenomeni. La stesura della tesina è stata invece l’occasione per renderci conto dello scarto tra linguaggio letterario e scientifico: anche se classicisti, abbiamo dovuto far nostro questo diverso codice linguistico e ci siamo accorti di quanto ogni particolare riscontrato risulti rilevante per la spiegazione del fenomeno. Infine l’onere di rivedere e perfezionare il lavoro svolto è stato per noi una prova tangibile del fatto che per produrre un elaborato organico e coerente non è sufficiente una comprensione superficiale della tematica prescelta, ma che al contrario bisogna comprenderla in profondità e relazionarsi secondo diverse prospettive prima di poterla padroneggiare con sicurezza. Una frase di Faraday racchiude appieno l’essenza di quanto appena detto e, a distanza di secoli, è ancora attuale: “La scienza ci insegna a non trascurare niente, a non disdegnare gli indizi modesti, in quanto nel piccolo sono sempre presenti i principi del grande, come nel grande è contenuto il piccolo.”

## Bibliografia

- P. Marazzini, M. E. Bergamaschini, L. Mazzoni – Fenomeni e Fisica – Minerva Scuola., vol.3
- G. Giuliani, P. Marazzini - Induzione elettromagnetica: un possibile percorso didattico - La Fisica nella Scuola, XLV, 2, 2012
- M. Faraday - “Experimental Researches in Electricity”

## Sitografia

- [http://www.treccani.it/scuola/lezioni/in\\_aula/fisica/faraday/1.html](http://www.treccani.it/scuola/lezioni/in_aula/fisica/faraday/1.html)
- <http://www.museodifisica.it>
- <http://aforismi.meglio.it>