

Le forze magnetiche: l'esperienza dei laboratori PLS

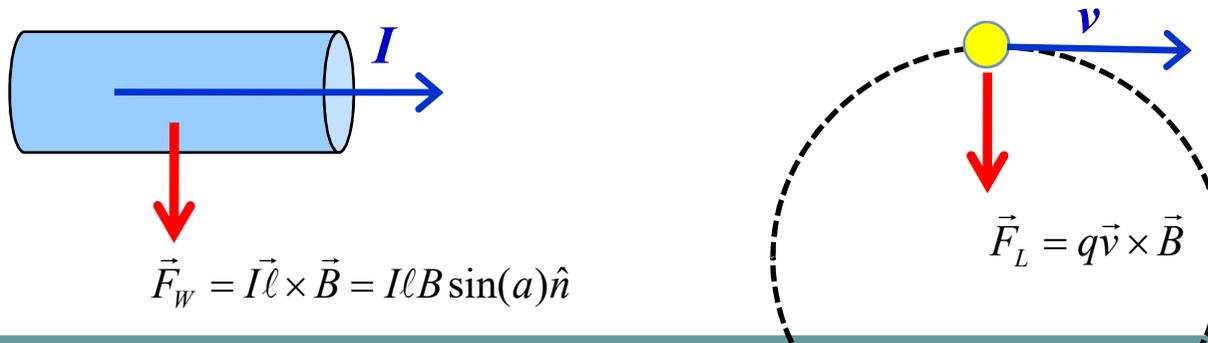
A. De Ambrosis, M.Malgieri

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

**AIF Pavia – 41° Corso di aggiornamento in Fisica
21 Novembre 2018**

Obiettivi

- Costruire passo dopo passo attraverso l'attività sperimentale la "seconda legge di Laplace", ossia l'espressione della forza magnetica su un filo rettilineo percorso da corrente.
- Migliorare la comprensione della relazione tra la forza magnetica su un filo percorso da corrente e la forza di Lorentz su una singola carica in moto.



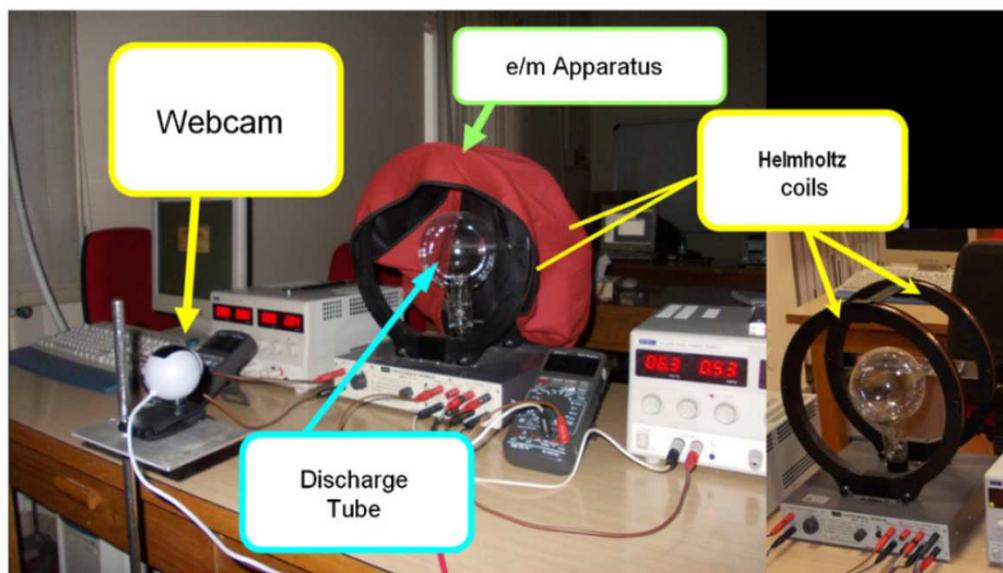
Schema dell'attività



La forza di Lorentz

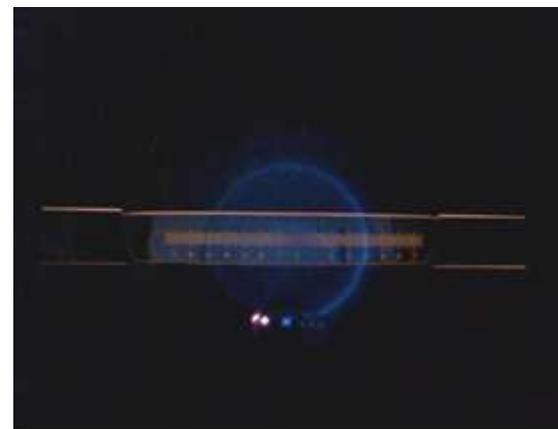
Apparato sperimentale

Per l'osservazione e la misura della forza di Lorentz su un fascio di elettroni

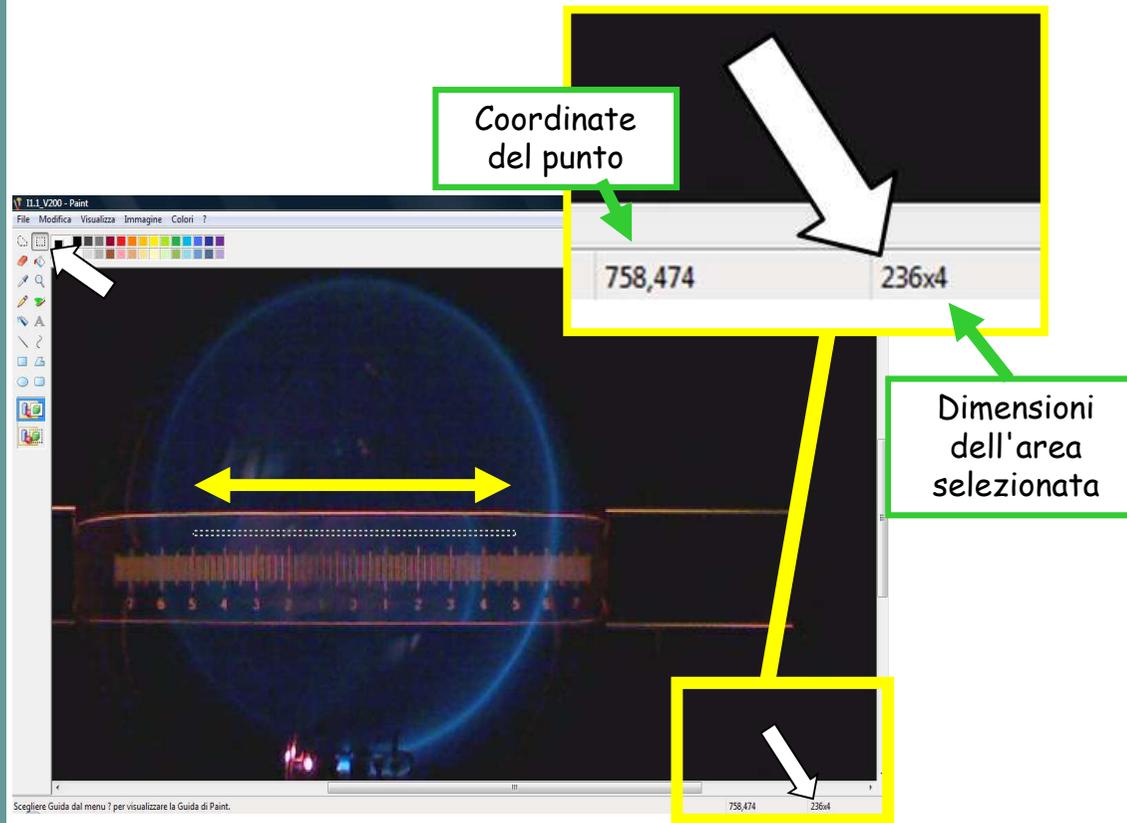


Misure

Gli studenti lavorano su fotografie digitali dell'apparato in diverse condizioni, analizzandole con l'aiuto del PC.

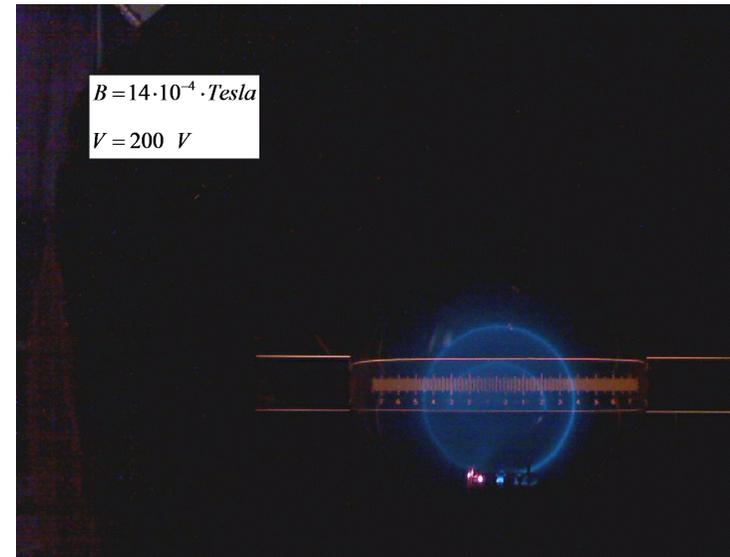
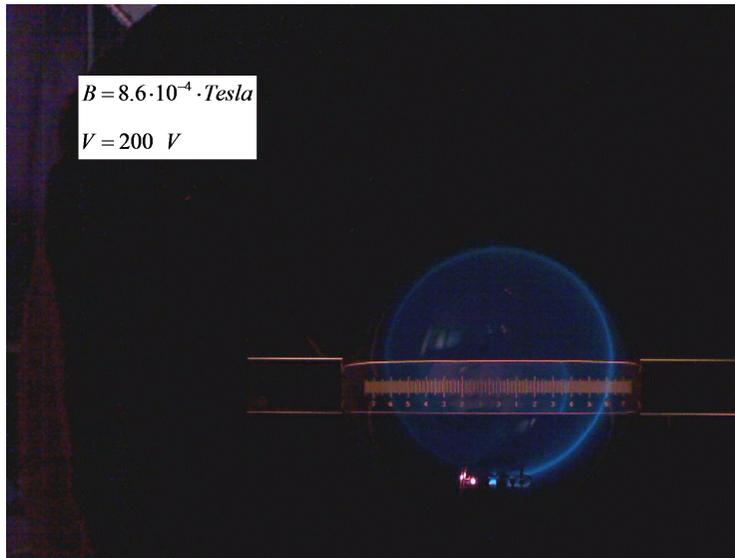


Effettuare misure sulle immagini



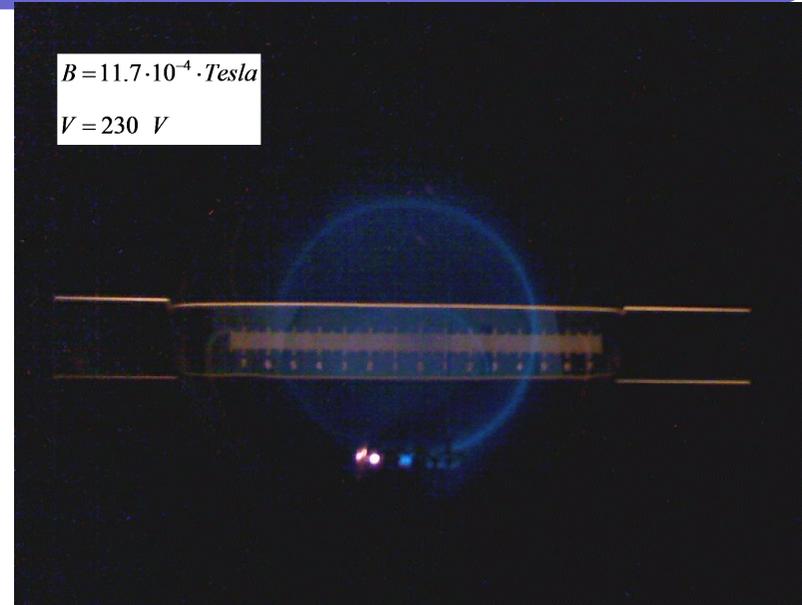
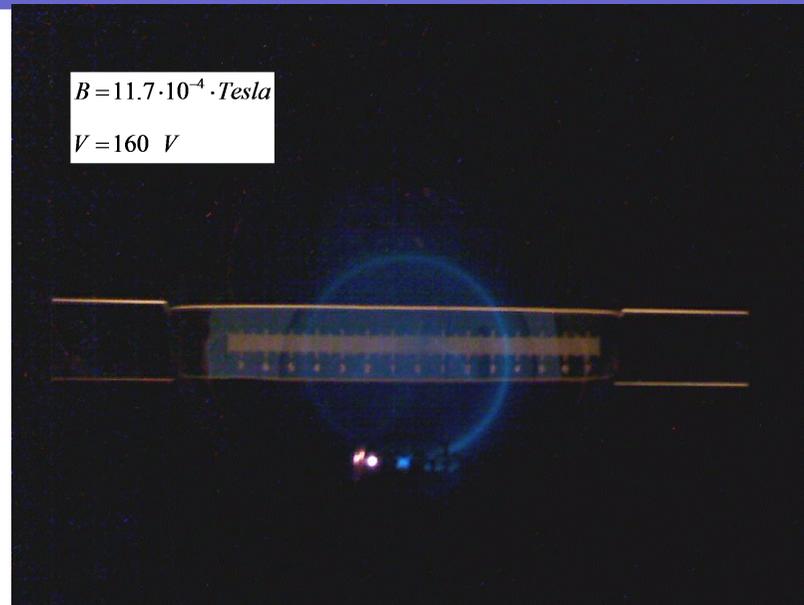
Gli studenti possono misurare le coordinate in pixel di qualunque punto sulla traiettoria del fascio di elettroni. In questo modo, possono misurare il raggio o direttamente individuando il diametro, oppure utilizzando la formula del raggio della circonferenza passante per tre punti.

Relazione tra raggio della traiettoria e intensità del campo magnetico



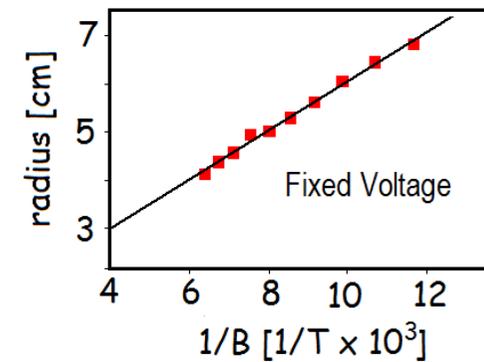
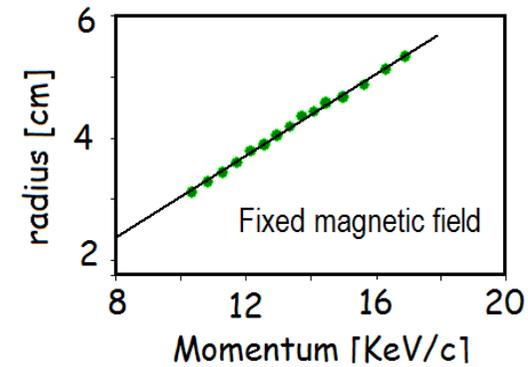
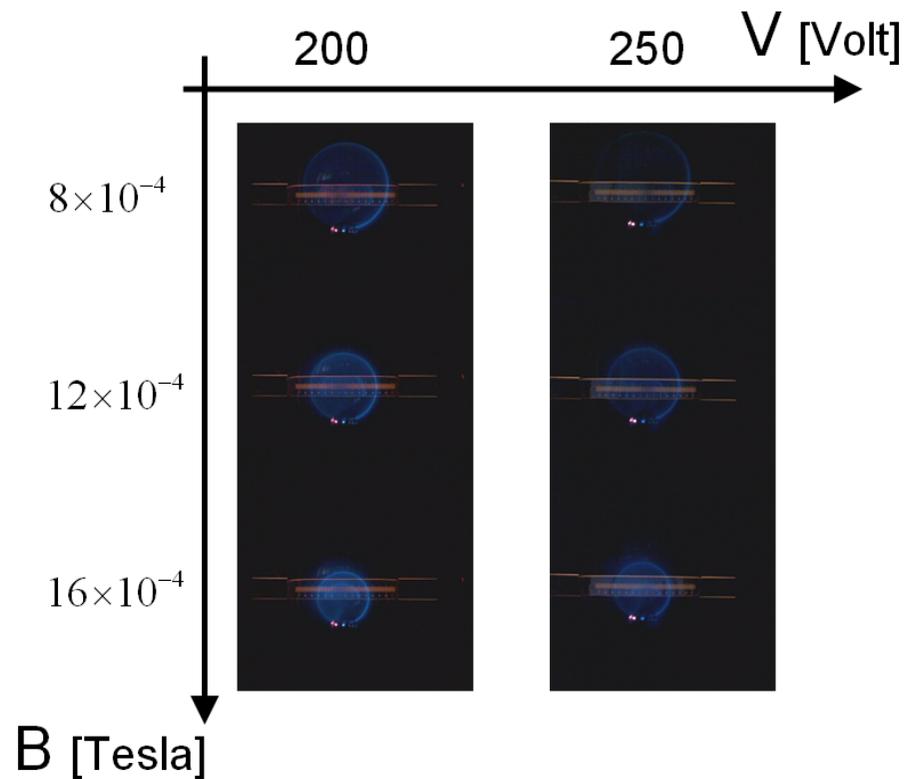
Analizzando fotografie scattate tenendo costante la differenza di potenziale che accelera gli elettroni (e quindi la loro velocità quando entrano nel campo magnetico) ma variando l'intensità di corrente nelle bobine, gli studenti scoprono una relazione di proporzionalità inversa tra il raggio della traiettoria e l'intensità del campo magnetico.

Relazione tra raggio della traiettoria e velocità dell'elettrone

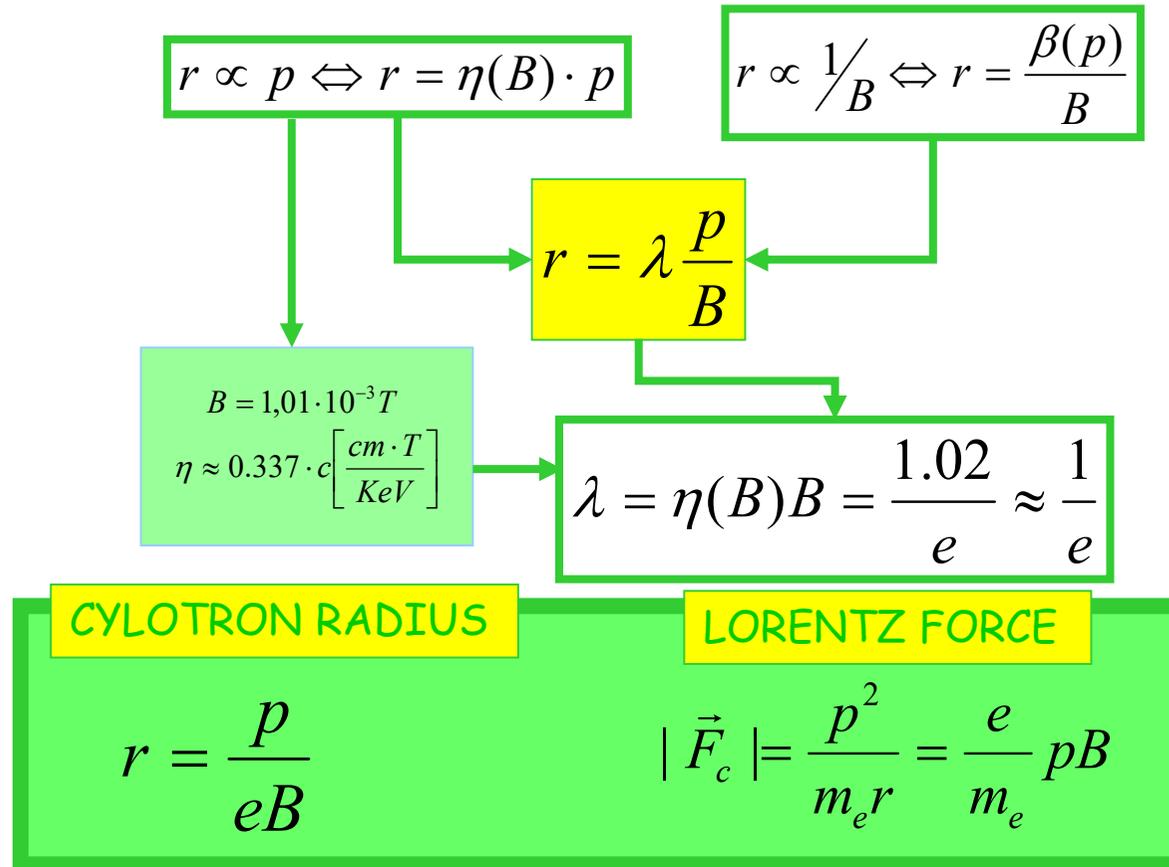


Analizzando fotografie scattate a campo magnetico costante, ma variando la differenza di potenziale che accelera gli elettroni, gli studenti sono guidati a scoprire che vi è proporzionalità diretta tra la velocità degli elettroni ed il raggio della traiettoria (la velocità è proporzionale alla radice quadrata della differenza di potenziale applicata).

La forza di Lorentz: risultati



Dagli esperimenti alla forza di Lorentz



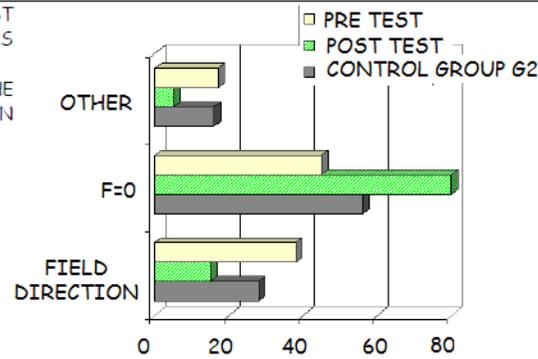
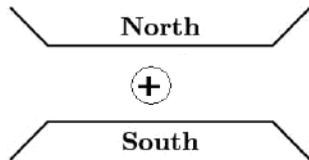
La forza di Lorentz

I dati da noi raccolti nel corso di diverse sperimentazioni indicano che l'attività aiuta gli studenti a comprendere:

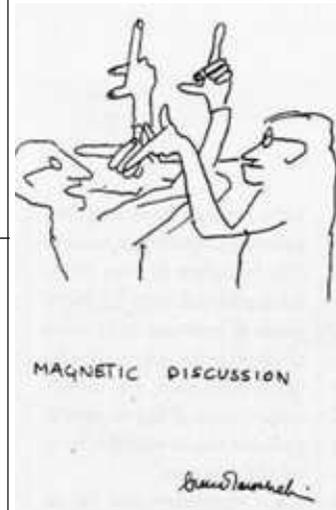
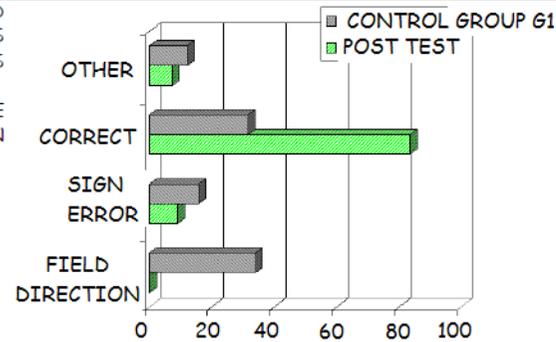
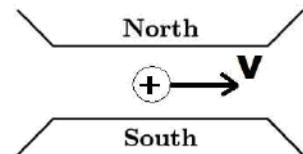
- Che l'intensità della forza magnetica esercitata su una carica è proporzionale all'intensità del campo magnetico ed alla velocità della carica stessa.
- Che un magnete esercita una forza su un oggetto carico in moto, ma non su una carica ferma.
- Che la forza magnetica agisce in una direzione perpendicolare sia a \vec{v} che a \vec{B} , ossia è perpendicolare al piano formato dalla velocità della carica e dal campo magnetico.
- Che, come conseguenza del punto precedente, il lavoro compiuto dalla forza di Lorentz su una carica in moto è zero.

Alcune domande su tipiche difficoltà degli studenti

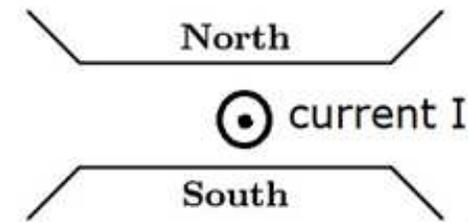
A CHARGED PARTICLE IS PLACED AT REST BETWEEN TWO POLES OF A MAGNET AS SHOWN. IF THERE IS A FORCE, INDICATE THE DIRECTION OF THE FORCE ACTING ON THE PARTICLE.



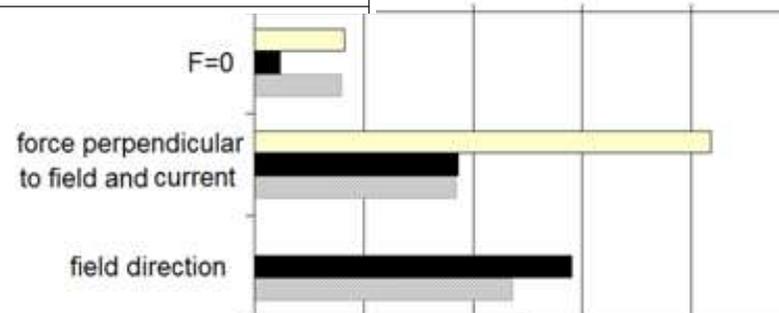
A CHARGED PARTICLE IS PLACED BETWEEN TWO POLES OF A MAGNET AS SHOWN. THE PARTICLE INITIALLY HAS VELOCITY "v". IF THERE IS A FORCE, INDICATE THE DIRECTION OF THE FORCE ACTING ON THE PARTICLE.



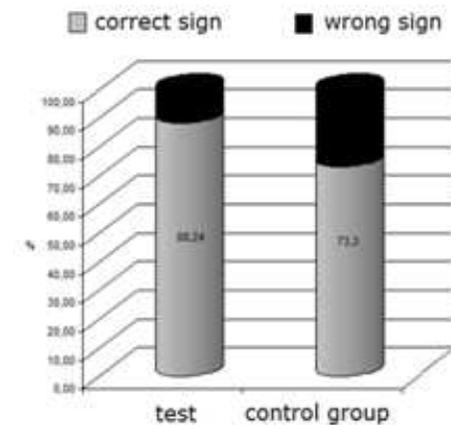
Question A current-carrying wire is placed between two poles of a magnet as shown. The current flows in the direction exiting from the paper. If there is a force, indicate the direction of the force acting on the wire.



40 60 80 100



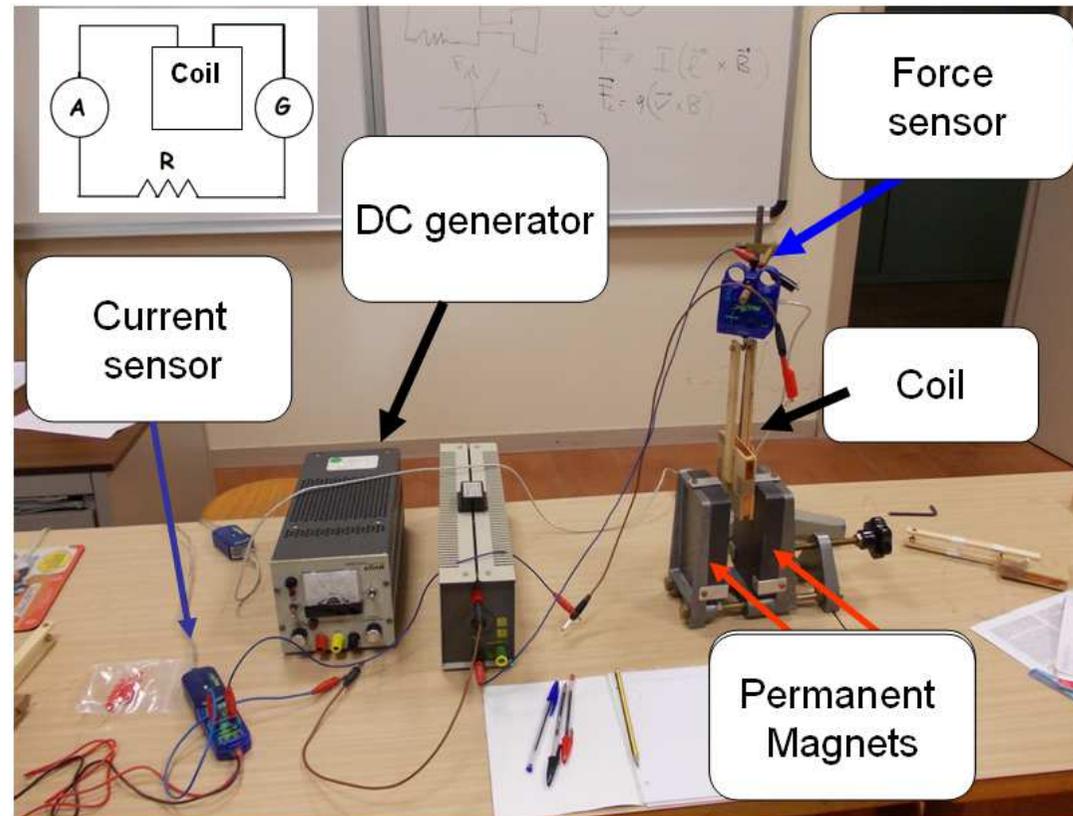
	field direction	force perpendicular to field and current	F=0
test	0	83,6	16,4
control group	58,1	37,2	4,7
pretest	47,2	36,8	16



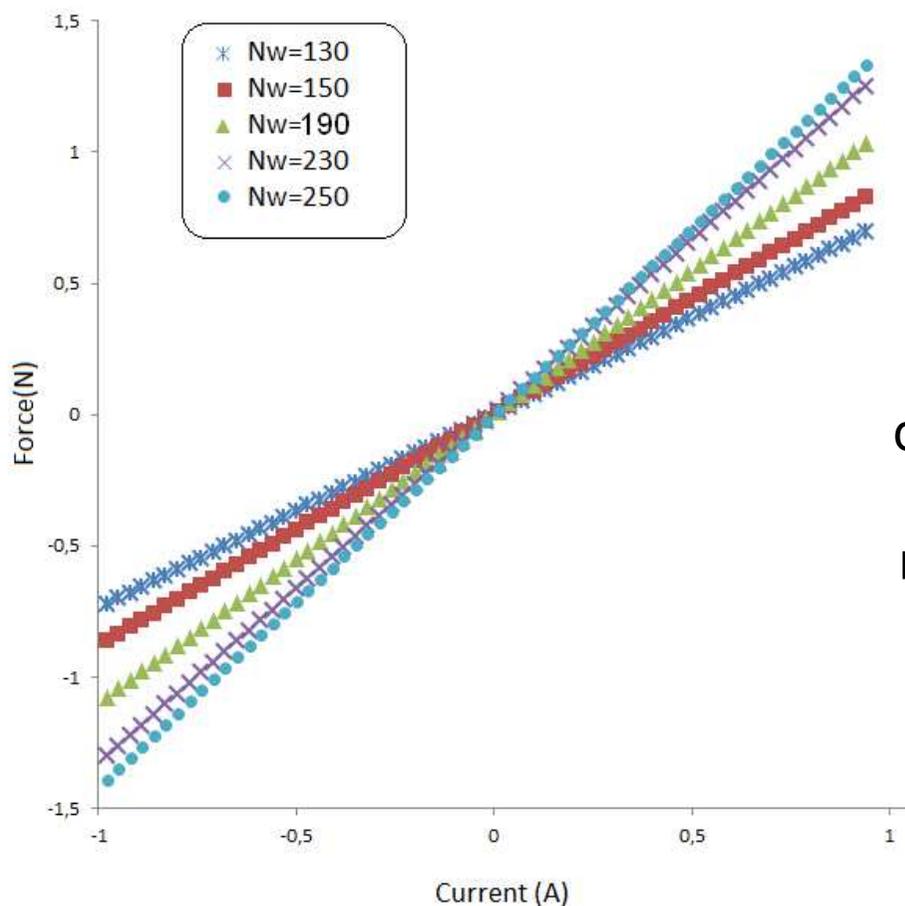
La forza su un filo percorso da corrente

Sono proposte diverse attività:

- Misura della forza in funzione dell'intensità di corrente,
- Confronto tra I risultati dei diversi gruppi, che porta a comprendere la dipendenza tra la forza e la lunghezza del filo,
- Misura della forza in funzione dell'angolo tra la corrente e il campo magnetico.

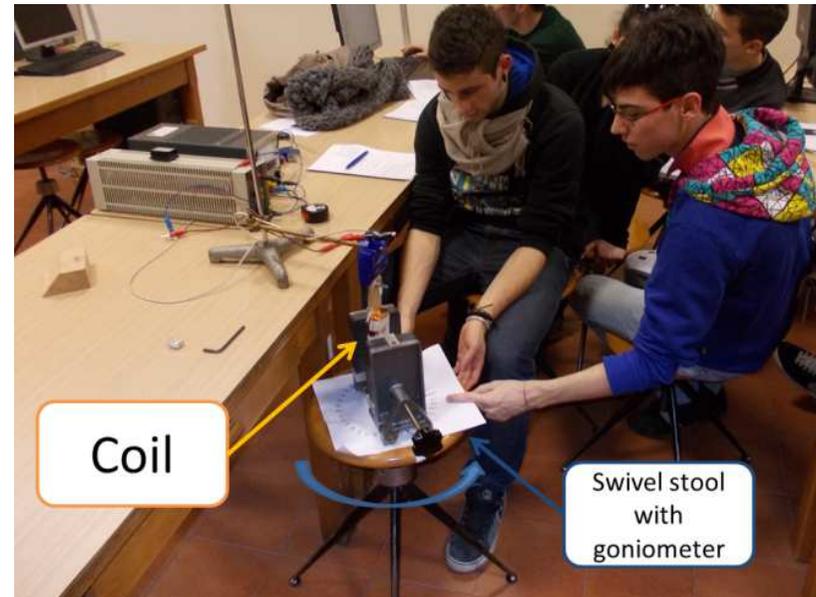
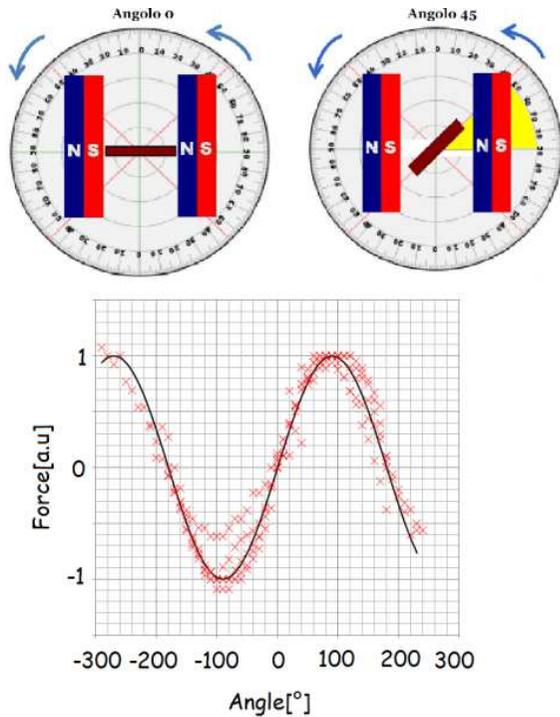


La forza in funzione dell'intensità di corrente e della lunghezza del filo



Forza in funzione dell'intensità di corrente, per bobine con diverso numero di avvolgimenti.

La forza in funzione dell'angolo tra la corrente e le linee di forza del campo magnetico.



Attraverso l'analisi e l'interpretazione dei risultati, gli studenti possono **costruire** la formula

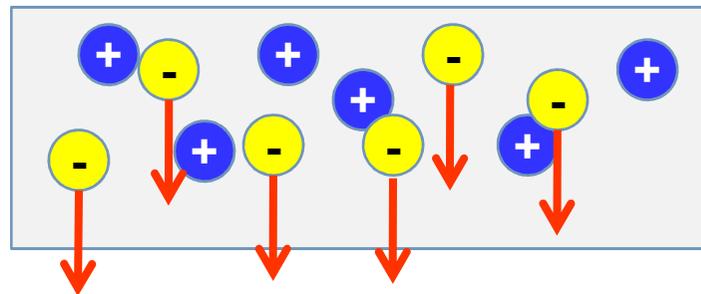
$$\vec{F}_W = I\vec{\ell} \times \vec{B} = I\ell B \sin(a)\hat{n}$$

Costruire un ponte concettuale tra le due forze

Solitamente, sui libri di testo tanto di scuola secondaria quanto universitari, la forza su un filo percorso da corrente viene derivata immediatamente dalla forza di Lorentz su una carica

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \rightarrow \vec{F}_W = i\vec{\ell} \times \vec{B}$$

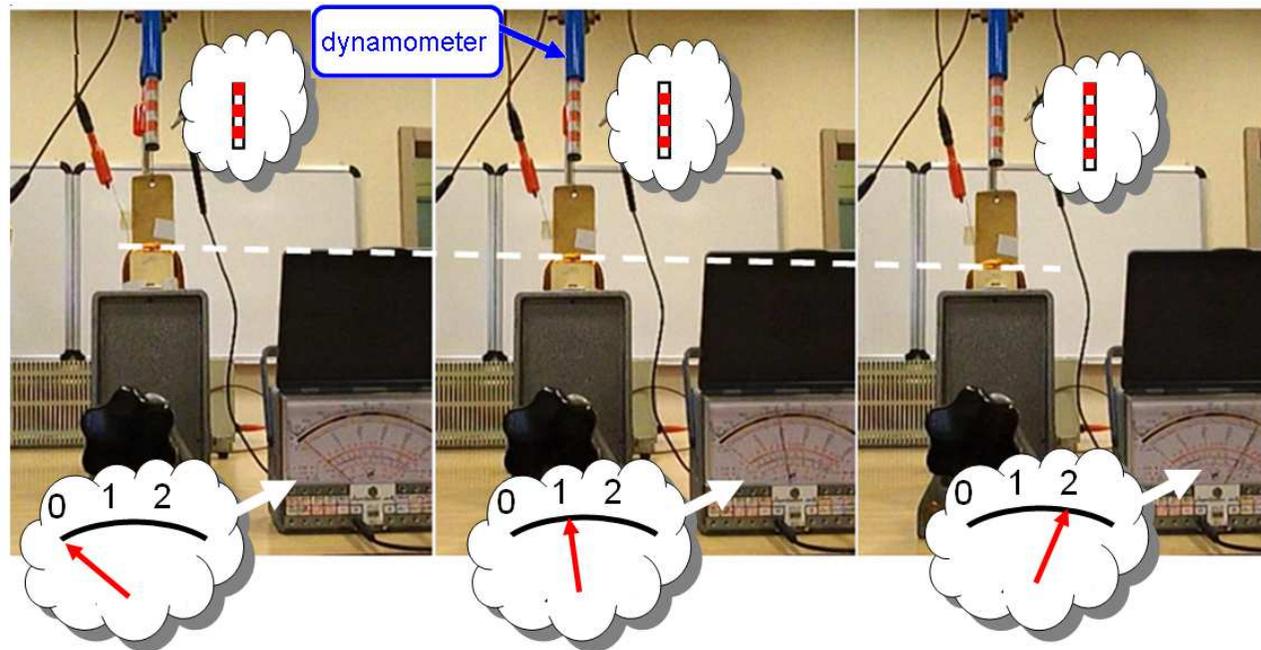
Senza alcun commento sul fatto che la forza di Lorentz non compie lavoro perchè è sempre perpendicolare al vettore velocità della carica.



Ma la forza di Laplace può compiere lavoro?

La forza sul filo può compiere lavoro?

Se la bobina, anzichè ad un sensore digitale di forza, viene appesa ad una molla, si può osservare macroscopicamente che la forza è in grado di compiere lavoro, perchè vi è una variazione della lunghezza della molla



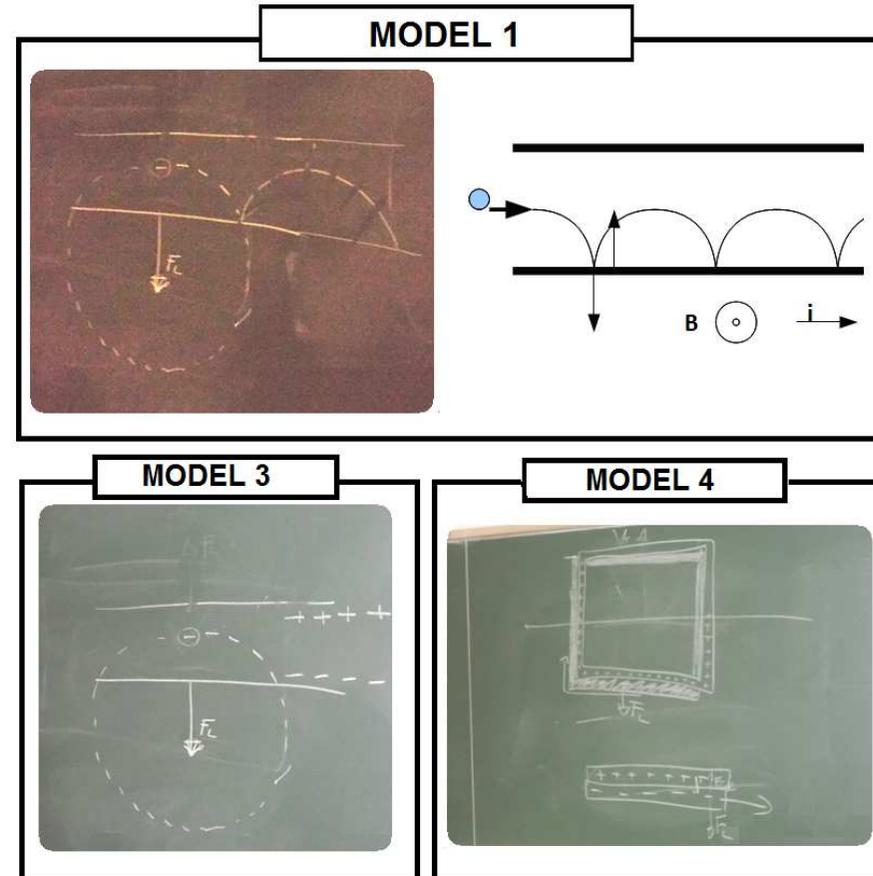
Come si può risolvere questo apparente paradosso?

Discussione

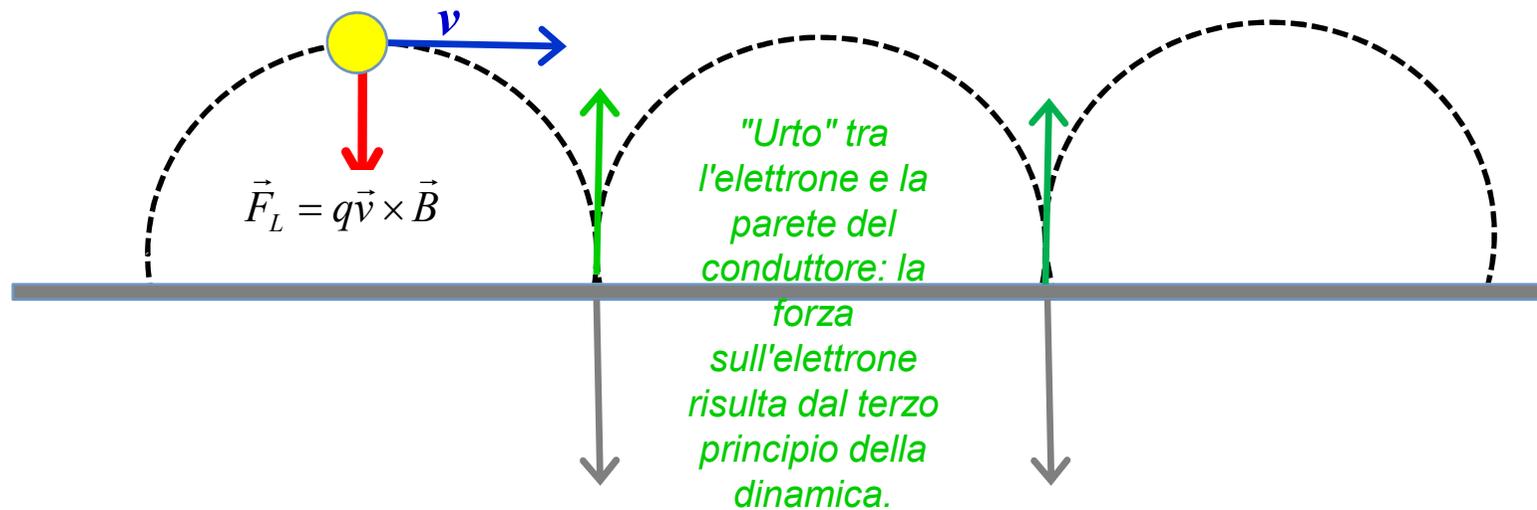
Completare il ponte concettuale

Uno degli insegnanti in formazione cui abbiamo proposto questo percorso ha scritto *"L'approccio che è solitamente seguito nei libri di testo appare rigoroso... ma il problema è sottile e vi è un enorme ostacolo alla comprensione."*

Un altro studente ha sottolineato che *"durante la discussione è stata messa in luce una fondamentale differenza tra le due forze che consiste nella possibilità o meno di compiere lavoro"*. Vi è quindi un'inconsistenza tra le due situazioni e occorre fare lo sforzo di immaginare un modello.

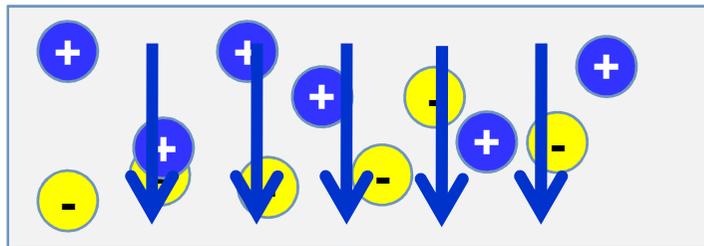
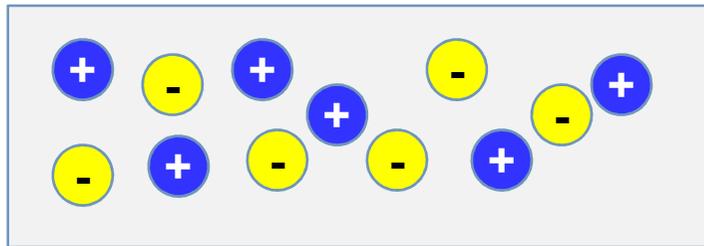


Modello balistico



Le cariche libere sono deflesse dal campo magnetico e si muovono su traiettorie circolari finchè non urtano contro la parete del conduttore impartendogli una certa forza verso il basso (e, al contrario, ricevendo una forza diretta verso l'alto). Quindi al bordo del conduttore le cariche trasferiscono energia a quest'ultimo, attraverso una forza di tipo elettrostatico, diversa dalla forza di Lorentz: questa forza può compiere lavoro.

Effetto Hall e separazione delle cariche



**Forza
elettrostatica
sul reticolo**

**Campo
elettrico
di Hall**

Gli elettroni nel campo magnetico sono deflessi ortogonalmente alla direzione della corrente; quindi si crea una differenza di potenziale tra le parti superiore e inferiore del conduttore. Come conseguenza, una forza elettrostatica agisce sugli elettroni (equilibrata in situazione stazionaria dalla forza di Lorentz) e una forza di reazione agisce sul reticolo. E' questa forza a compiere lavoro.

Altre osservazioni degli insegnanti in formazione

❑ Gli esperimenti possono portare gli studenti a focalizzare l'attenzione sulla direzione della forza, e comprendere il significato del prodotto vettoriale.

"Questo esperimento è particolarmente interessante perché presenta in modo "evidente" il concetto di forza risultato di un prodotto vettoriale.

E' una delle poche occasioni di vedere una forza ortogonale al moto.

La necessità di sperimentare una quantità osservabile ottenuta come prodotto vettoriale di due altre quantità misurate rafforza il concetto concreto di prodotto vettoriale:"

"La prova diretta della misura di intensità, direzione e verso della forza agente su un filo permette una più facile interiorizzazione delle modalità qualitative e quantitative dell'interazione tra una corrente e un campo magnetico

Altre osservazioni degli insegnanti in formazione

□ L'analisi delle traiettorie degli elettroni favorisce la creazione di un collegamento fra fenomeni meccanici ed elettromagnetici.

"L'esperienza è efficace per dedurre quale deve essere la direzione della forza (perché deve essere una forza centripeta)."

"l'esperienza può essere di consolidamento al concetto di moto circolare e di forza centripeta: in particolare, l'esperienza può essere occasione per sottolineare il fatto che la forza centripeta non è un tipo di forza (come spesso è ritenuto dagli studenti), ma solo una "modalità di azione" di una forza che può essere di diverse nature"

"Per la prima volta ho pensato all'inversa proporzionalità tra raggio della circonferenza traiettoria degli elettroni e intensità del campo e alla diretta proporzionalità tra raggio della circonferenza e velocità dell'elettrone." [...]

Bibliografia

Onorato, P., & De Ambrosis, A. (2013). How can magnetic forces do work? Investigating the problem with students. *Physics Education*, 48(6), 766.

G. H. Goedecke and S. E. Kanim, (2007) "The Hall effect in accelerating and stationary conductors," *Am. J. Phys.* 75, 131–138.

M. Sakai, N. Honda, F. Fujimoto, O. Nakamura, and H. Shibata (2010) "A complementary study of the role of the Hall electric field for generation of the force on current-carrying wire in a magnetic field", *American Journal of Physics* 78 160

Guisasola, J., Almudi, J. M., & Zubimendi, J. L. (2004). Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university. *Science Education*, 88, 443–464.