

progettoscuolaestivadifisica2023

L'entusiasmo e la curiosità sostituiscono la fatica di imparare definizioni e sterili procedimenti calati dall'alto. Si parte dal concreto per arrivare all'astratto: le definizioni arrivano dopo.

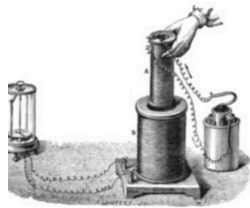
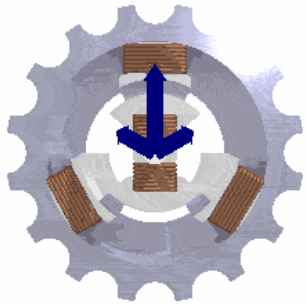
<https://phet.colorado.edu/sims/cheerj/capacitor-lab/latest/capacitor-lab.html?simulation=capacitor-lab>

<https://phet.colorado.edu/it/simulations/faradays-law>

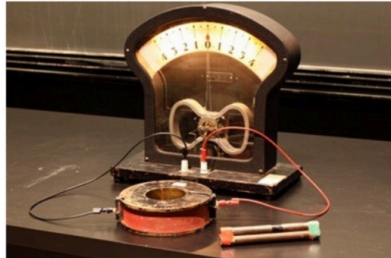
https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics_it.html

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerj/capacitor-lab/latest/capacitor-lab.html?simulation=capacitor-lab>

Elettromagnetismo induzione e.m.



M Faraday
1791-1867



1) Quanto vale il raggio della traiettoria circolare di un elettrone che entra perpendicolarmente in un campo magnetico $B = 10^{-6} T$ alla velocità $V = 90000 \frac{m}{s}$?

2) Quanto vale la velocità con cui si muove un elettrone all'interno di un atomo di idrogeno?

Lavoriamo insieme

campo elettrico \vec{E}	campo magnetico \vec{B}
<p>Teorema di Gauss per il campo elettrico: il flusso del campo elettrico E attraverso una qualsiasi superficie chiusa S vale: $\Phi_{sup.ch.}(\vec{E}) = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum q_{interna}}{\epsilon_0}$</p>	<p>Teorema di Gauss per il campo magnetico: il flusso del campo magnetico B attraverso una qualsiasi superficie chiusa S è nullo $\Phi_{sup.ch.}(\vec{B}) = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$</p>
<p>le linee di forza* sono linee aperte che iniziano da una carica positiva e finiscono su una carica negativa</p> <p>il teorema di Gauss esprime matematicamente il fatto che le cariche elettriche sono "sorgenti" di un campo elettrico le quali possono essere positive o negative e possono esistere isolate</p>	<p>le linee di forza* sono linee chiuse</p> <p>il teorema di Gauss esprime matematicamente il fatto che non possono esistere poli magnetici isolati</p>
<p>La circuitazione del campo elettrostatico lungo ogni linea chiusa γ è nulla</p> $\Gamma_\gamma(\vec{E}) = \oint_{linea\ ch.\ \gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$	<p>Teorema della circuitazione di Ampère: la circuitazione di un qualunque campo magnetico B lungo una linea chiusa γ è uguale alla somma algebrica delle correnti concatenate alla linea stessa (<i>una corrente I è concatenata ad una linea chiusa γ se attraversa la superficie delimitata dalla linea chiusa</i>)</p> $\Gamma_\gamma(\vec{B}) = \oint_{linea\ ch.\ \gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_n I_n$
<p>questo integrale esprime matematicamente il fatto che \rightarrow il campo E è un campo conservativo</p> <p>\rightarrow si può definire una energia potenziale elettrica (come già fatto per il campo gravitazionale)</p> <p>\rightarrow attenzione: questo è vero solo se non sono presenti variazioni del flusso del campo magnetico</p>	<p>il teorema della circuitazione di Ampère esprime matematicamente il fatto che \rightarrow il campo B è un campo non conservativo</p> <p>\rightarrow non si può parlare di energia potenziale magnetica</p> <p>\rightarrow le correnti sono "sorgenti" di un campo magnetico</p> <p>\rightarrow attenzione: questo è vero solo se non sono presenti variazioni del flusso del campo elettrico</p>
<p>** $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$ costante dielettrica nel vuoto costante universale (compare nella legge di Coulomb)</p>	<p>** $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ permeabilità magnetica nel vuoto costante universale (compare nella legge di Biot-Savart)</p>

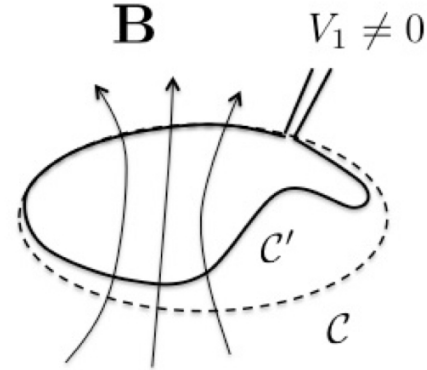
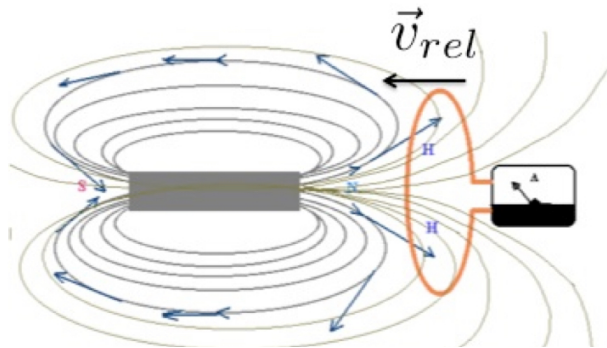
Curiosità

fornelli a induzione si caratterizzano per una superficie di cottura in vetroceramica (materiale solido e altamente resistente alle temperature elevate) al di sotto della quale sono presenti delle bobine conduttrici in filo di rame che alimentano un campo elettromagnetico direzionale quando esse sono attraversate dall'elettricità.

Nel momento in cui una pentola o una padella viene posizionata sulla zona di cottura, il materiale ferroso di cui sono composte funge da conduttore, attirando il campo elettromagnetico e generando calore direttamente all'interno del tegame (e non riscaldando la superficie di cottura).

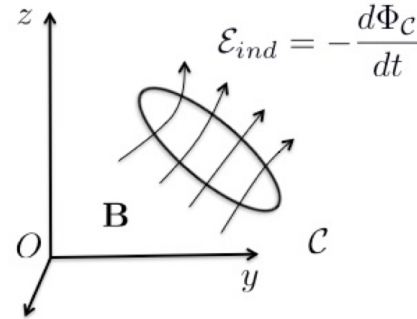
I piani cottura a induzione sono alimentati da corrente elettrica e sono rivestiti in vetroceramica come quelli elettrici, si differenziano da questi per delle speciali bobine che generano un campo magnetico che si converte in calore.

- Cosa è la forza elettromotrice (f.e.m.) indotta?
- Quali sono le situazioni sperimentali in cui si evidenzia la presenza di una f.e.m. indotta?
- Quali informazioni “qualitative” ricaviamo?



- Come possiamo “formalizzare” le osservazioni?
- Cosa è il “flusso concatenato”
- Come possiamo formulare la

“Legge di Faraday”



Legge di

- Faraday
- Faraday-Neumann + Legge di Lentz
- Faraday-Neumann-Lentz
- Faraday-Henry

$$f^{(\text{ind})} = -\frac{d\Phi_{\vec{B}}^{(\text{conc})}}{dt}$$

$f^{(\text{ind})}$: forza elettromotrice indotta
lungo una linea chiusa γ

$\Phi_{\vec{B}}^{(\text{conc})}$: flusso di \vec{B} concatenato
con la linea chiusa γ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

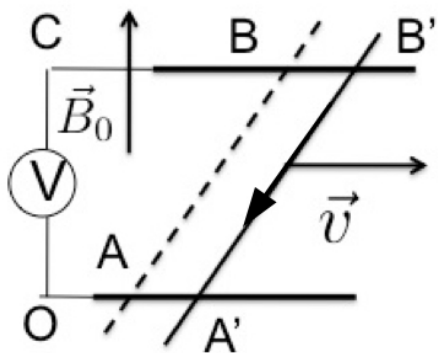
$$\oint_{\partial \Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_{\Sigma} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

- Circuito mobile o deformabile
 - La f.e.m. indotta, se agisce su di un circuito chiuso, genera una corrente, ovvero muove delle cariche
 - Il moto delle cariche, e quindi della f.e.m. indotta, può essere spiegato tramite la Forza di Lorentz
- Campo **B** variabile nel tempo
 - La f.e.m. indotta, se agisce su di un circuito chiuso, genera una corrente, ovvero muove delle cariche
 - Il moto delle cariche, e quindi della f.e.m. indotta, può essere spiegato solo ammettendo che un campo **B** variabile nel tempo genera un campo **E** (non conservativo)

$$\text{rot } \vec{E}_{\text{stat}} = 0$$

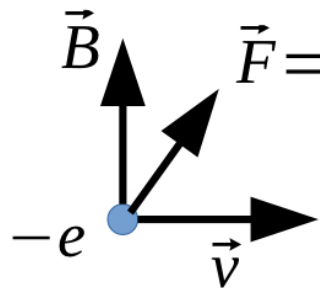
$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \vec{E}_{\text{ind}} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$



$$\Delta S = h v \Delta t$$

$$\Delta \Phi = h v B \Delta t$$



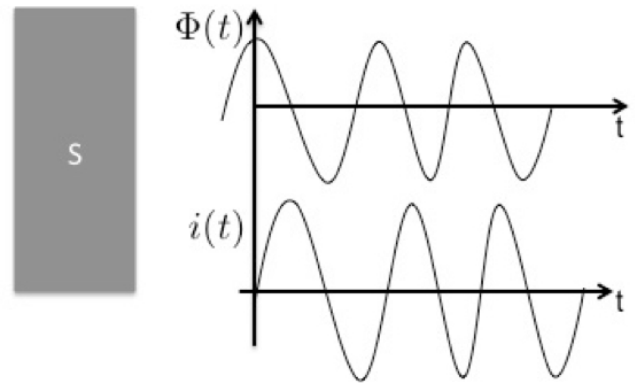
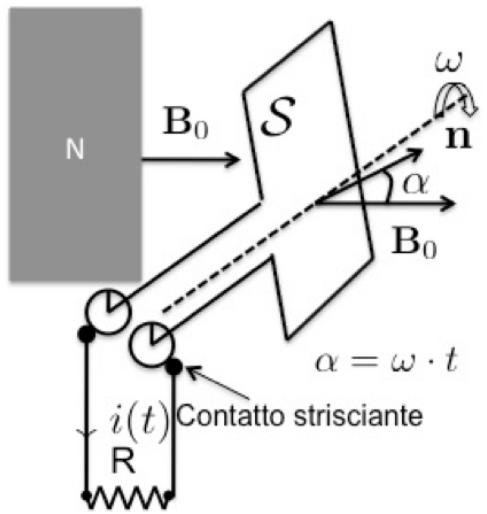
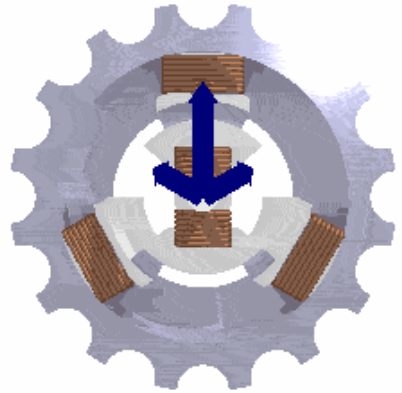
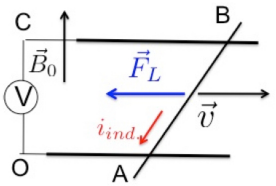
$$\vec{E}_{(\text{ind})} = \vec{v} \times \vec{B}$$

$$dV_{(\text{ind})} = \vec{E}_{(\text{ind})} \cdot d\vec{l}$$

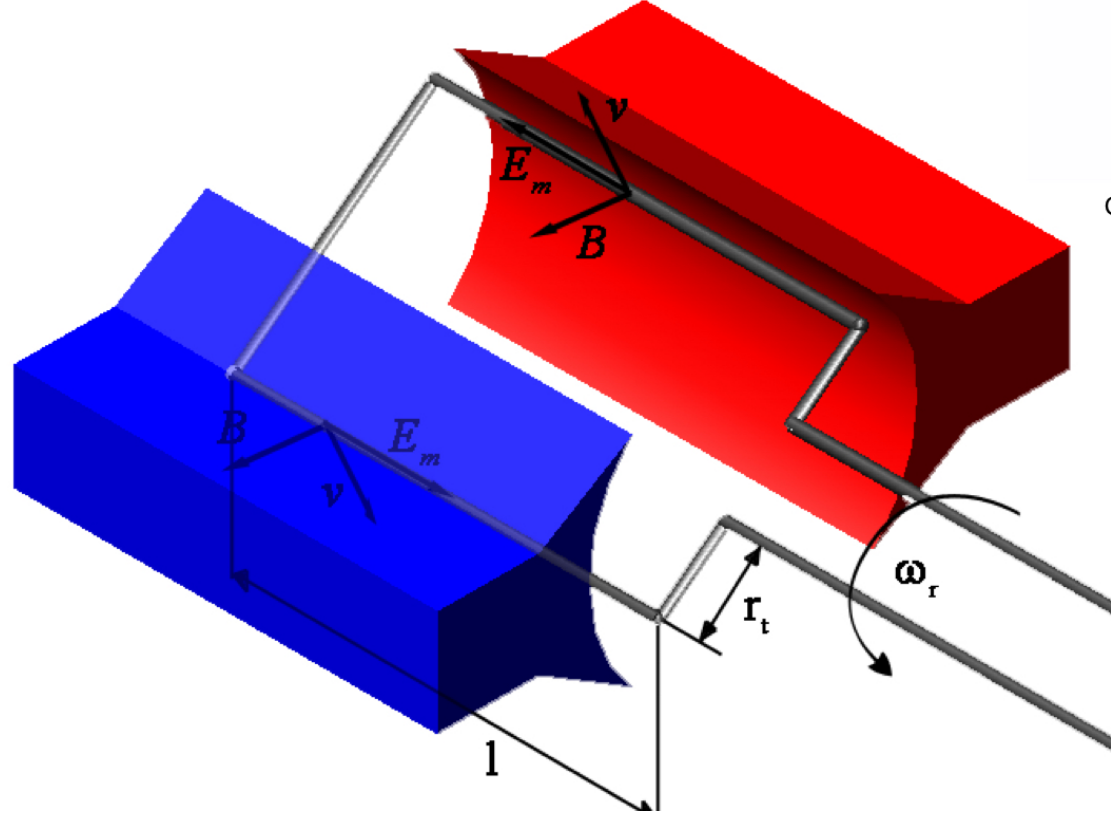
$$\Delta V_{(\text{ind})} = -E_{(\text{ind})} h = -v B h$$

$$\Delta V_{(\text{ind})} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

La forza che agisce sulla barretta in moto si comporta come una forza di attrito (modulo proporzionale alla velocità, verso opposto)



Motori elettrici: – solo principio di funzionamento

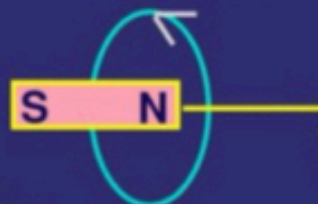


Effetti di Induzione

Generazione di corrente (indotta) in assenza di batteria (f.e.m. indotta)

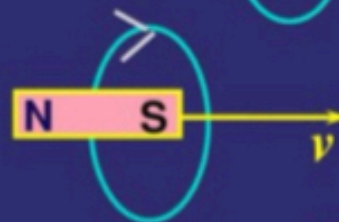
Barra magnetica si muove attraverso la spira

⇒ Corrente indotta nella spira



• Ribaltando i poli magnetici

⇒ la corrente indotta cambia segno



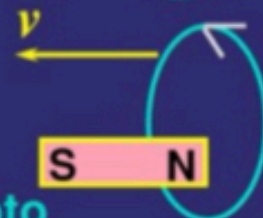
• Barra magnetica stazionaria dentro la spira

⇒ Nessuna corrente indotta nella spira



• Spira in moto, barra magnetica fissa

⇒ Corrente indotta nella spira



in qualunque caso, cambio di direzione del moto

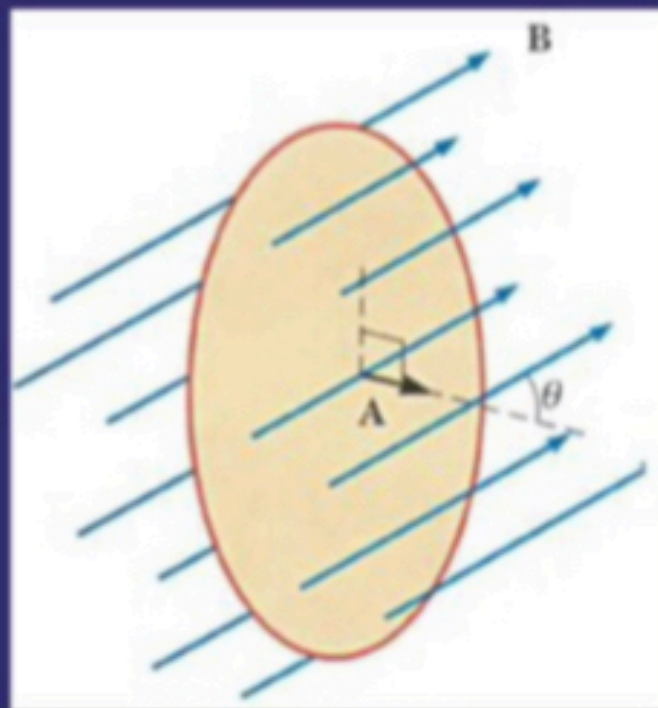
Induce una variazione nel segno della corrente

I flusso concatenato vale

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B dA \cos\theta = \cos\theta \int dA = B A \cos\theta$$

La f.e.m. indotta vale quindi

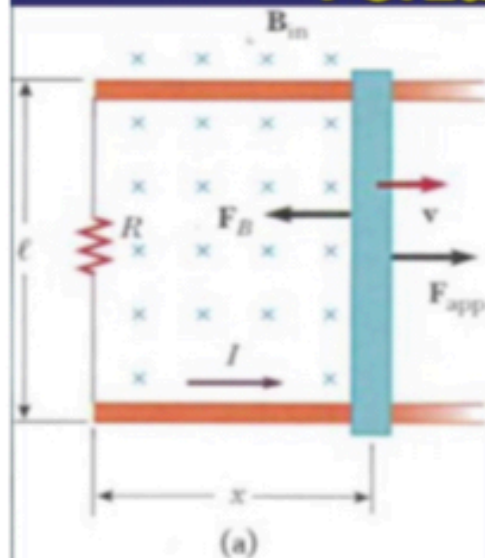
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(B A \cos\theta)$$



Dall'espressione si vede che una f.e.m. può essere indotta:

- quando varia nel tempo il modulo di **B**
- quando varia nel tempo la superficie A del circuito
- quando varia nel tempo l'angolo θ tra **B** e la normale al circuito
- per qualsiasi combinazione dei casi precedenti

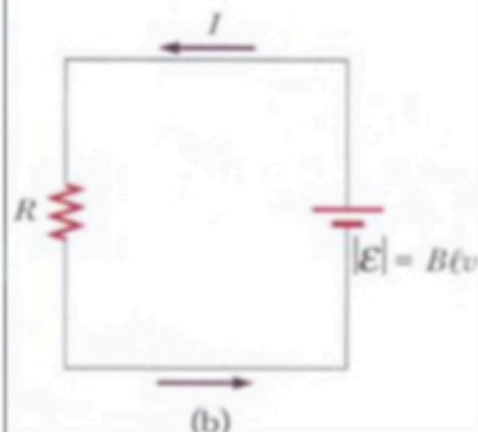
Forza elettromotrice dinamica



(a) Una sbarretta conduttrice che scorre con velocità v su due guide conduttrici, sotto l'azione di una forza applicata F_{app} . La forza magnetica F_B si oppone al moto, e una corrente I di verso antiorario viene indotta nel circuito. (b) Il diagramma circuitale equivalente per la rappresentazione pittorica della parte (a).

Conduttore in movimento parte di circuito chiuso

L'energia meccanica (sbarretta in movimento) si conserva (energia dissipata nel resistore) !!!



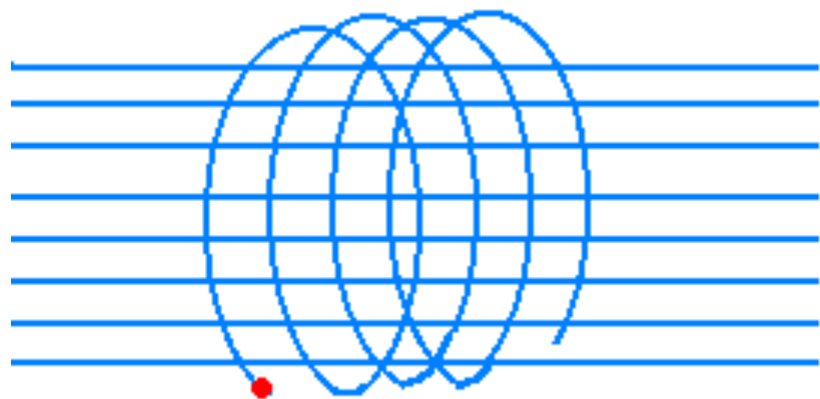
$$\Phi_B = Blx$$

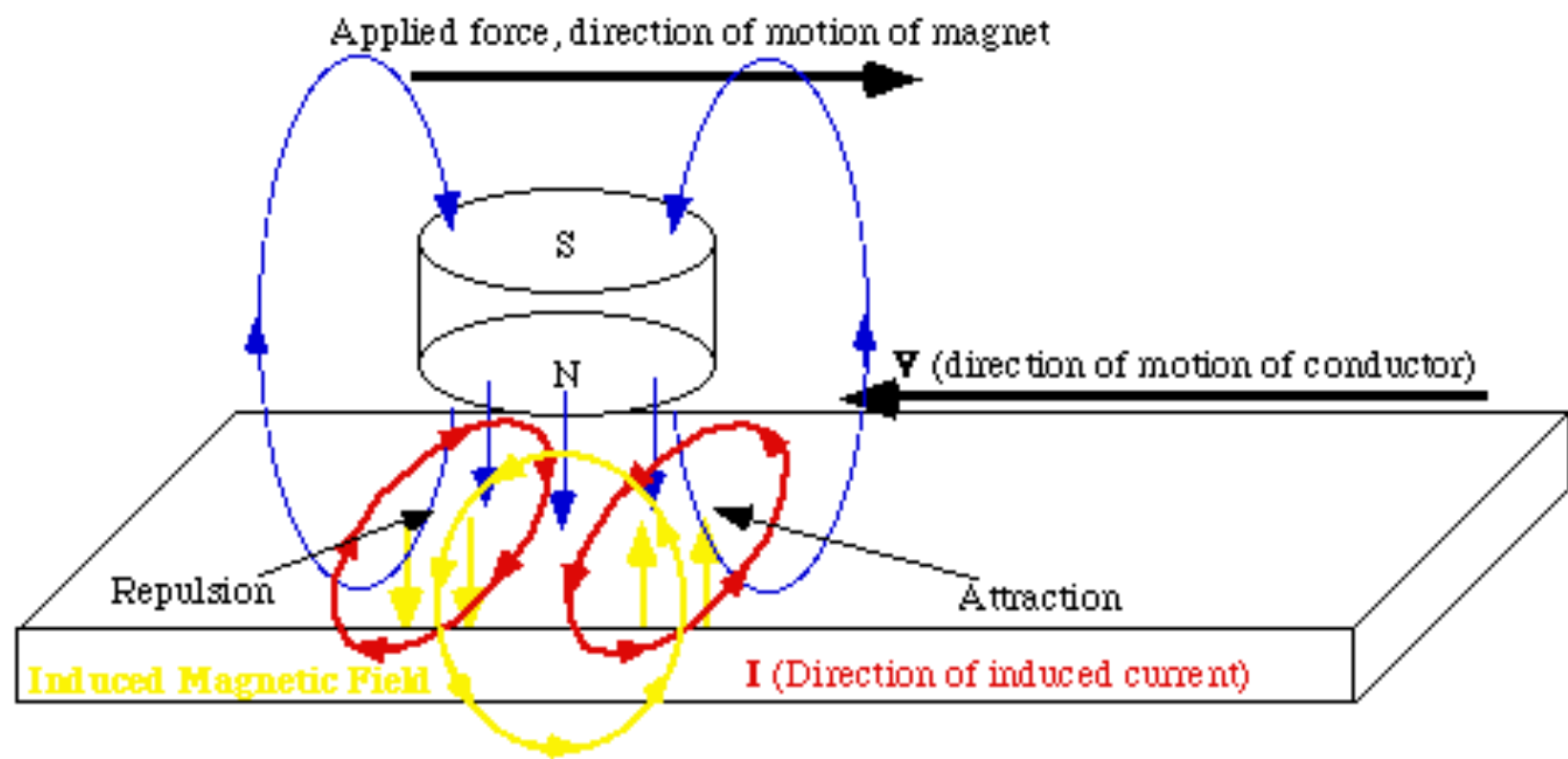
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(Blx) = -Bl\frac{dx}{dt} = -Blv$$

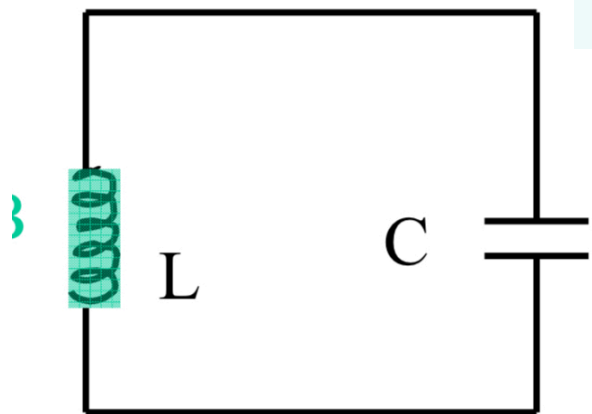
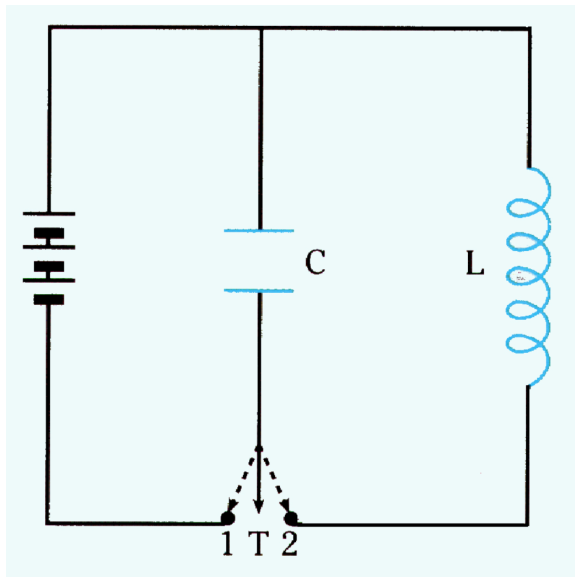
$$I = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{Blv}{R}$$

$$F_{app} = F_B = I\ell B, \text{ La potenza dissipata sar\`a}$$

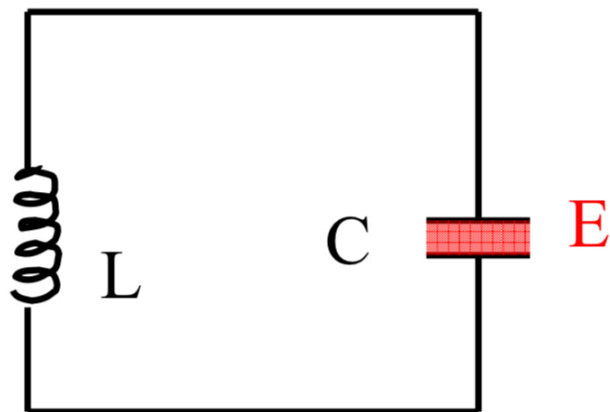
$$P = F_{app}v = (I\ell B)v = \frac{B^2\ell^2v^2}{R} = \left(\frac{Blv}{R}\right)^2 R = I^2R$$







Massima corrente



Massima tensione

Un protone (carica : 1.6×10^{-19} C , massa : 1.67×10^{-27} Kg) si trova all'interno di un solenoide, che ha raggio di 40 cm, 1000 spire/m, ed una corrente di 20 A. Il protone viaggia su un piano ortogonale all'asse del solenoide, partendo dal centro di esso. Quale è la sua velocità massima, affinché non possa mai raggiungere la bobina ?

$$B = \mu_0 i n; r_p = \frac{mv}{qb} = \frac{mv}{q\mu_0 i n};$$

$$2r_p \leq r_s \rightarrow v_{max} = \frac{q\mu_0 i n r_s}{2m} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1.26 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 1000 \cdot 4}{2 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}} = 4.83 \cdot 10^5 \text{ m/s.}$$

- **Esperimento di Oersted** [Christian Oersted Dk, 1777-1851]: Il passaggio di corrente elettrica in un filo genera un campo magnetico in cui linee di forza* del vettore campo magnetico B sono le infinite circonferenze concentriche di cui il filo costituisce l'asse, il verso del vettore campo magnetico si può ottenere con la regola della mano destra e il modulo

vale: $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}$ (**Legge empirica di Biot e Savart**)

- **Esperimento di Ampère** [André-Marie Ampère FR, 1775-1836]: Due fili conduttori rettilinei e paralleli si attraggono se la corrente li percorre nello stesso verso e si respingono se la corrente li percorre in versi opposti, con una

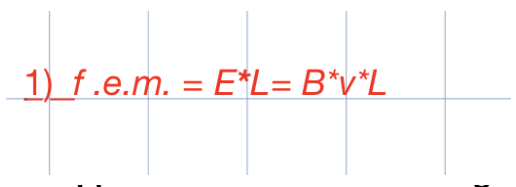
forza: $F_l = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{L \cdot I_1 \cdot I_2}{r}$

- **Principio di equivalenza di Ampère**: "un ago magnetico posto all'interno di un campo magnetico si comporta come una spira, ovvero risente di una coppia di forze che tende a farlo ruotare"

- **Esperimenti di Faraday** [Michael Faraday UK, 1791-1867]: un magnete esercita una forza su un conduttore percorso

da corrente $\vec{F}_{magnetica} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$ B si misura in tesla $1T = \frac{1N \cdot s}{C \cdot m}$ [Nikola Tesla USA, 1856-1953]

- **Forza di Lorentz** [Hendrik Lorentz NL, 1853-1928]: su una carica in moto in un campo magnetico: $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$ o in generale in presenza anche di un campo elettrico: $\vec{F} = q\vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B}$



2 **f.e.m cinetica (=indotta in un conduttore in moto)**: $f.e.m. = v \cdot B \cdot L$ (nel caso il conduttore sia una barretta di lunghezza L che si muove con velocità v in direzione perpendicolare ad un campo magnetico di intensità B essendo v,B,L mutuamente perpendicolari)

3 **Legge di Faraday** (UK,1791-1867) – **Neumann** (De,1798-1895):

All'interno di un circuito elettrico si genera una corrente indotta quando varia, **per qualunque motivo**, il FLUSSO del campo magnetico $\Phi(\vec{B}) = \vec{B} \cdot \vec{A}$ attraverso la superficie delimitata dal circuito stesso. Tuttavia, poiché nel circuito indotto non esistono punti tra i quali calcolare una differenza di potenziale (non c'è alcun generatore) si preferisce esprimere tale legge in termini di forza elettromotrice:

$$f.e.m. = -\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}$$

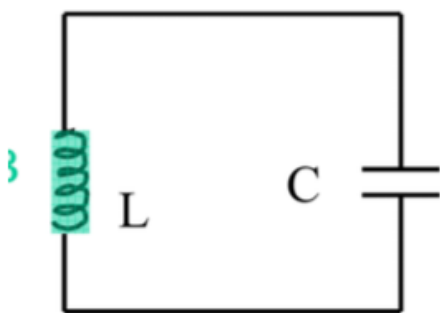
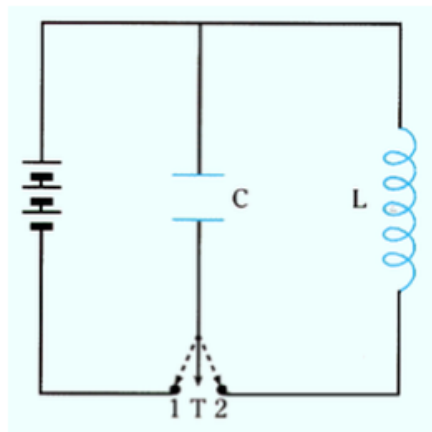
la f.e.m. si misura in volt [V]
il flusso di campo magnetico si misura in weber [wb]=[T·m²]=[V·s]

4 **Legge di Lenz** (Ru,1804-1865): "la corrente indotta ha un verso tale da generare un campo magnetico indotto che si oppone alla variazione del flusso magnetico che l'ha provocata"

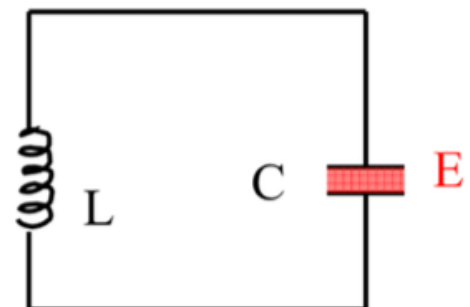
il verso della corrente indotta è tale da generare un campo magnetico che si oppone alla variazione di flusso del campo magnetico esterno che l'ha generata". Ad esempio, se il campo esterno sta aumentando, la corrente indotta genera un campo magnetico di verso opposto che ne riduce il flusso; se viceversa il campo esterno sta diminuendo, la corrente indotta genera un campo magnetico che ha lo stesso verso del campo esterno, compensando in parte, quindi, la sua diminuzione

(se P.A. la corrente indotta fosse tale da generare un campo magnetico dello stesso verso di quello che l'ha generato, tale campo magnetico aumenterebbe la variazione di flusso totale e quindi l'intensità della corrente indotta; tale processo non avrebbe termine e genererebbe una quantità di energia illimitata.)

- Circuito mobile o deformabile
 - La f.e.m. indotta, se agisce su di un circuito chiuso, genera una corrente, ovvero muove delle cariche
 - Il moto delle cariche, e quindi della f.e.m. indotta, può essere spiegato tramite la Forza di Lorentz
- Campo **B** variabile nel tempo
 - La f.e.m. indotta, se agisce su di un circuito chiuso, genera una corrente, ovvero muove delle cariche
 - Il moto delle cariche, e quindi della f.e.m. indotta, può essere spiegato solo ammettendo che un campo **B** variabile nel tempo genera un campo **E** (non conservativo)



Massima corrente



Massima tensione

L'energia "immagazzinata" nell'induttore (ad esempio un solenoide)

- è il lavoro compiuto per "generare" il campo magnetico presente al suo interno

$$U_L = \frac{1}{2} L I^2 \quad \text{in J}$$

- è immagazzinata nel campo magnetico presente al suo interno

$$w_B = \frac{1}{2 \mu_0} |\vec{B}|^2 \quad \text{in J/m}^3$$

Nota: si ricordi che

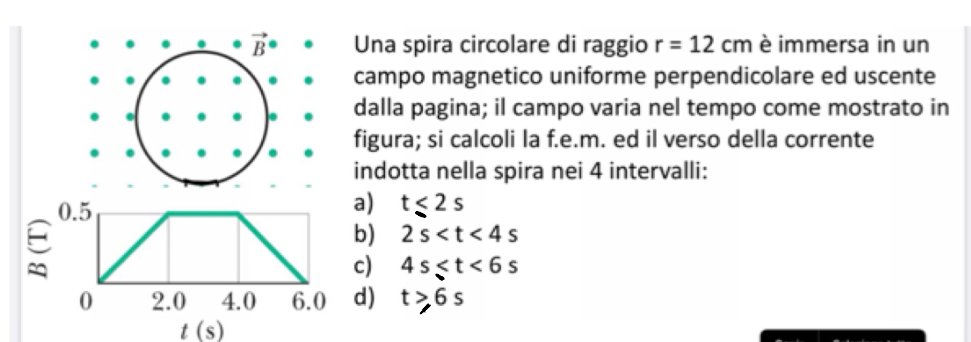
$$U_C = \frac{1}{2} C \Delta V^2 \quad w_E = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2$$

Scheda operativa

1) Quanto vale il raggio della traiettoria circolare di un elettrone che entra perpendicolarmente in un campo magnetico $B = 10^{-6} T$ alla velocità $V = 90000 \frac{m}{s}$?

2) Quanto vale la velocità con cui si muove un elettrone all'interno di un atomo di idrogeno?

Proposta n.1



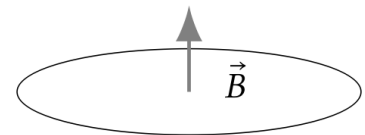
Una spira circolare di raggio $r = 12\text{ cm}$ è immersa in un campo magnetico uniforme perpendicolare ed uscente dalla pagina; il campo varia nel tempo come mostrato in figura; si calcoli la f.e.m. ed il verso della corrente indotta nella spira nei 4 intervalli:

- a) $t \leq 2\text{ s}$
- b) $2\text{ s} < t < 4\text{ s}$
- c) $4\text{ s} \leq t < 6\text{ s}$
- d) $t > 6\text{ s}$

Proposta 2)

Una spira rotonda è immersa in un campo magnetico costante e uniforme $B = 350\ \mu\text{T}$, come indicato in figura. Il raggio della spira varia linearmente da 25 cm a 5 cm in otto secondi.

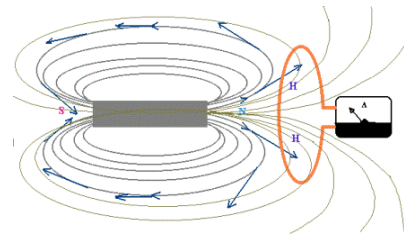
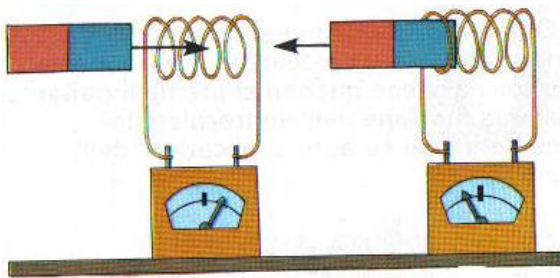
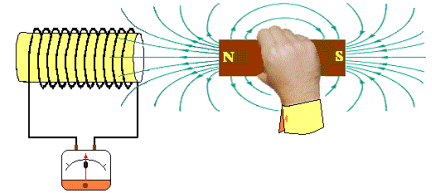
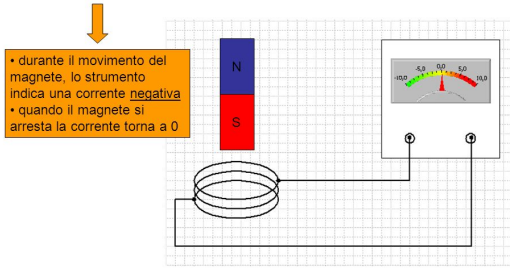
1. Quanto vale la f.e.m. indotta media?
2. Quanto vale la f.e.m. indotta istantanea?
3. Qual è il verso della corrente indotta media nell'intervallo dato?
4. Qual è il verso della corrente indotta istantanea nello stesso intervallo?



Proposta 3) **esperimenti di facile realizzazione**

INDUZIONE ELETTROMAGNETICA - ESPERIENZA 1

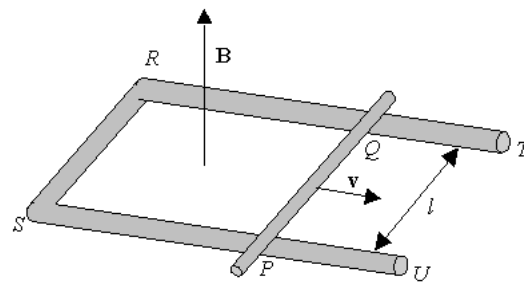
cosa accade se il magnete viene allontanato dalle spire?



Electro-Magnetic Induction

Oscillating Magnet Movement

Downloaded from dreamstime.com

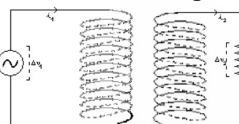


L'esperienza di Faraday

Faraday costruì un circuito elettrico privo di generatore ma dotato di un solenoide e di un amperometro. Egli notò che, avvicinando un magnete al solenoide, nel circuito l'amperometro segnalava passaggio di corrente. Tenendo il magnete fermo non c'era passaggio di corrente nel circuito. Allontanando il magnete si notava invece passaggio di corrente nel verso opposto. Dunque il moto del magnete rispetto al circuito elettrico genera un passaggio di corrente. Inoltre l'intensità di corrente è tanto maggiore quanto minore è il tempo in cui avviene lo spostamento del magnete rispetto al circuito.



L'induzione elettromagnetica (II)



La variazione della corrente nel circuito 1 genera una corrente indotta nel circuito 2 perché il flusso del campo magnetico che lo attraversa varia.

Se la corrente nel circuito 1 non cambia, non c'è variazione del flusso del campo magnetico e, quindi in 2 non circola corrente.