

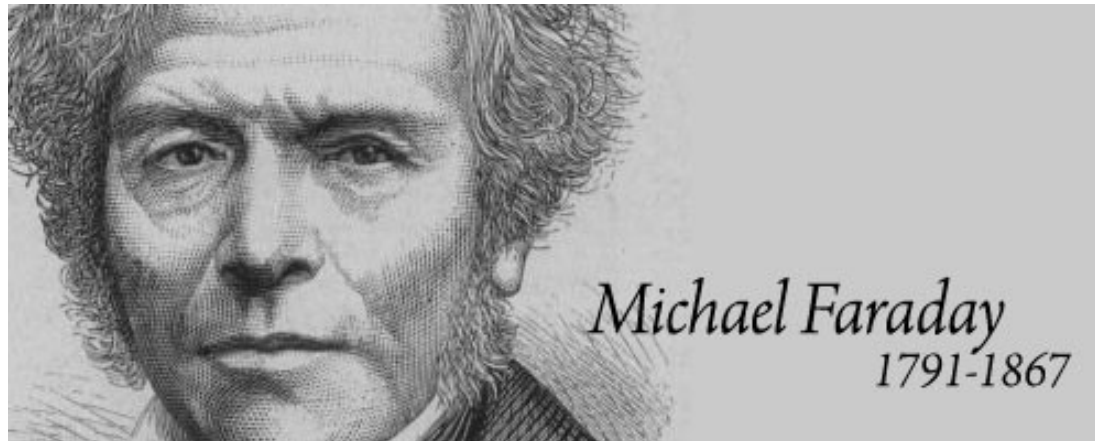


**UNIMORE**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

Dipartimento di Scienze Fisiche,  
Informatiche e Matematiche

## **ELETROMAGNETISMO**

### ***Induzione elettromagnetica***

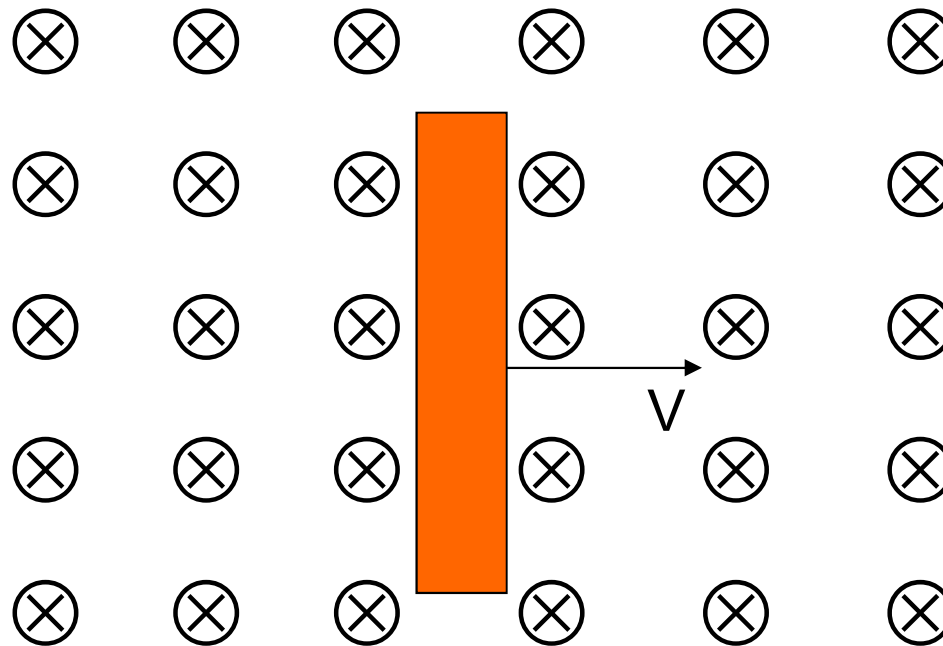


# Sommario

- FEM indotta
- Legge di Faraday
- Legge di Lenz
- Autoinduttanza

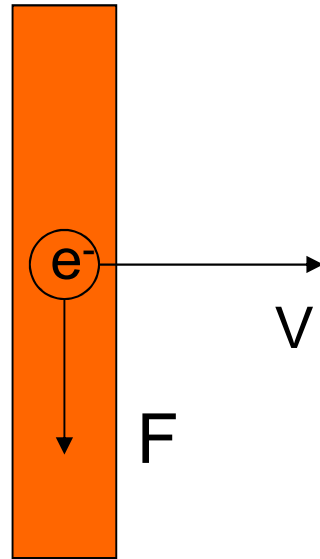
# Forza elettromotrice indotta

Considera un conduttore in un campo  $B$  in moto verso destra.



$$\mathbf{F}_B = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

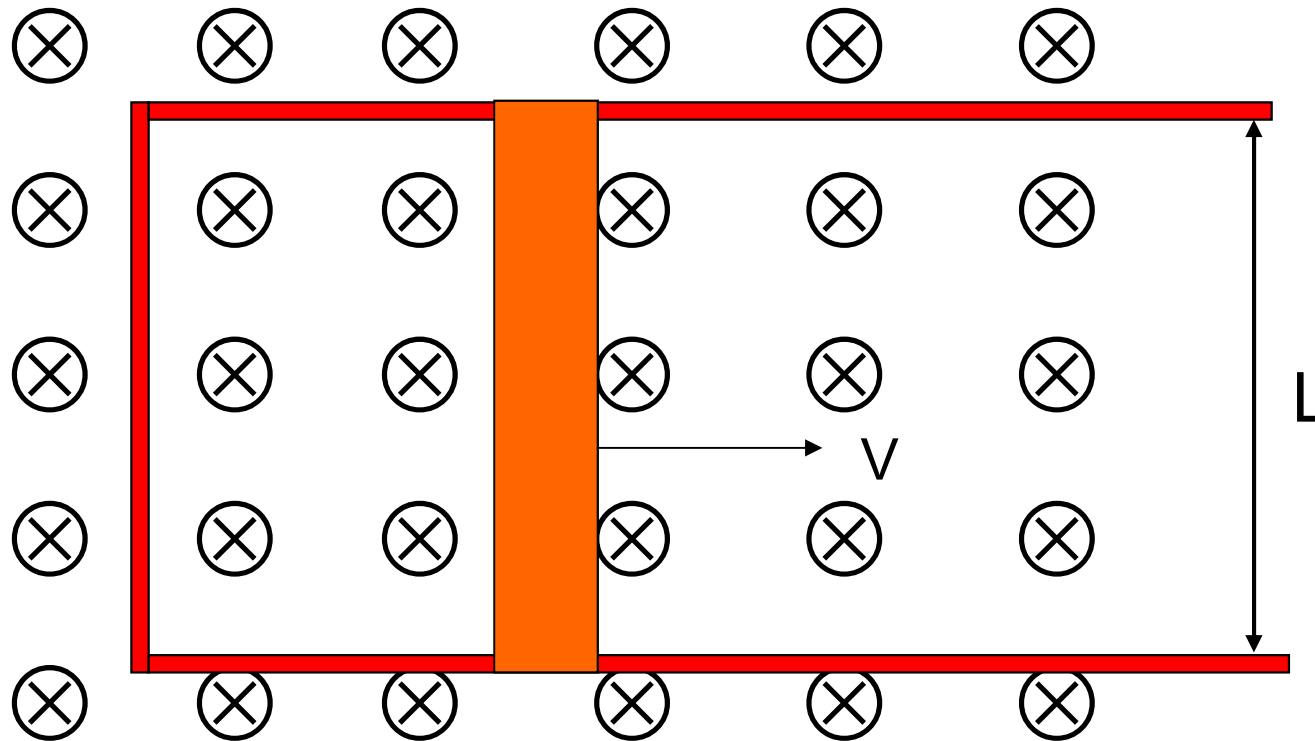
Un elettrone nel conduttore sperimenta una forza verso il basso.



Gli elettroni nella sbarra si muoveranno verso il fondo della sbarra.

Ciò crea nella sbarra un campo elettrico (indotto dal campo magnetico) e una differenza di potenziale elettrico tra l'apice e il fondo della sbarra. Il trasferimento di carica ha termine quando la forza dovuta al campo magnetico viene annullata dalla forza elettrica repulsiva tra la carica accumulata e la nuova carica in arrivo.

Cosa accadrebbe se la sbarra fosse posta perpendicolarmente a dei binari conduttivi (in rosso) in modo da formare una spira per gli elettroni?



In questo circuito, gli elettroni girano in senso orario; la corrente scorre in senso antiorario.

La FEM indotta  $\varepsilon$  agli estremi del conduttore si può ottenere considerando che:

$$q\varepsilon = F_B L = qvBL$$

$$\varepsilon = vBL$$

dove  $L$  è la separazione tra i binari.

La corrente nella sbarra è

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBL}{R}$$

dove  $R$  è la resistenza della sbarra.

La sbarra è dunque percorsa da corrente. Qual è la direzione della forza magnetica sulla sbarra dovuta al campo magnetico esterno?

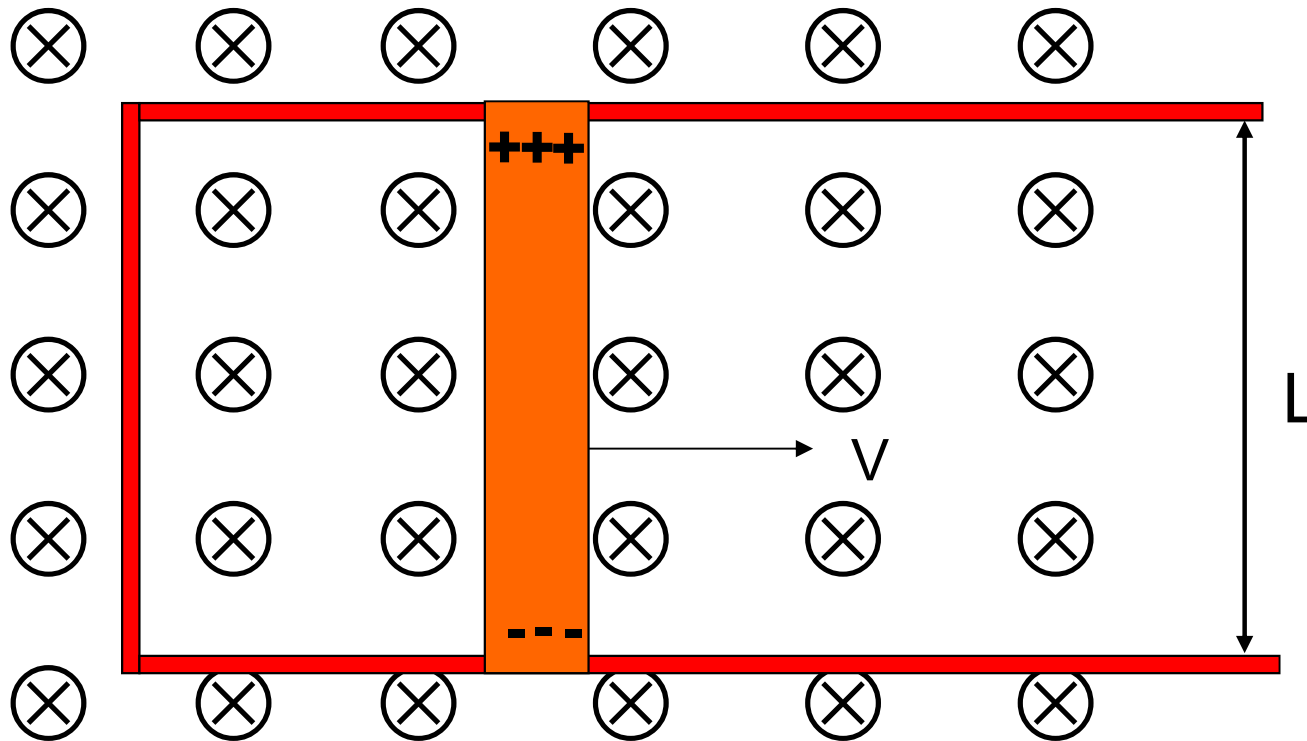
$$\mathbf{F} = I(\mathbf{L} \times \mathbf{B})$$

Il modulo della forza magnetica sulla sbarra è:

$$F = ILB \sin 90^\circ = ILB = \frac{vBL}{R} LB = \frac{vB^2 L^2}{R}$$

Usando la regola della mano destra, la forza sulla sbarra è diretta verso sinistra.

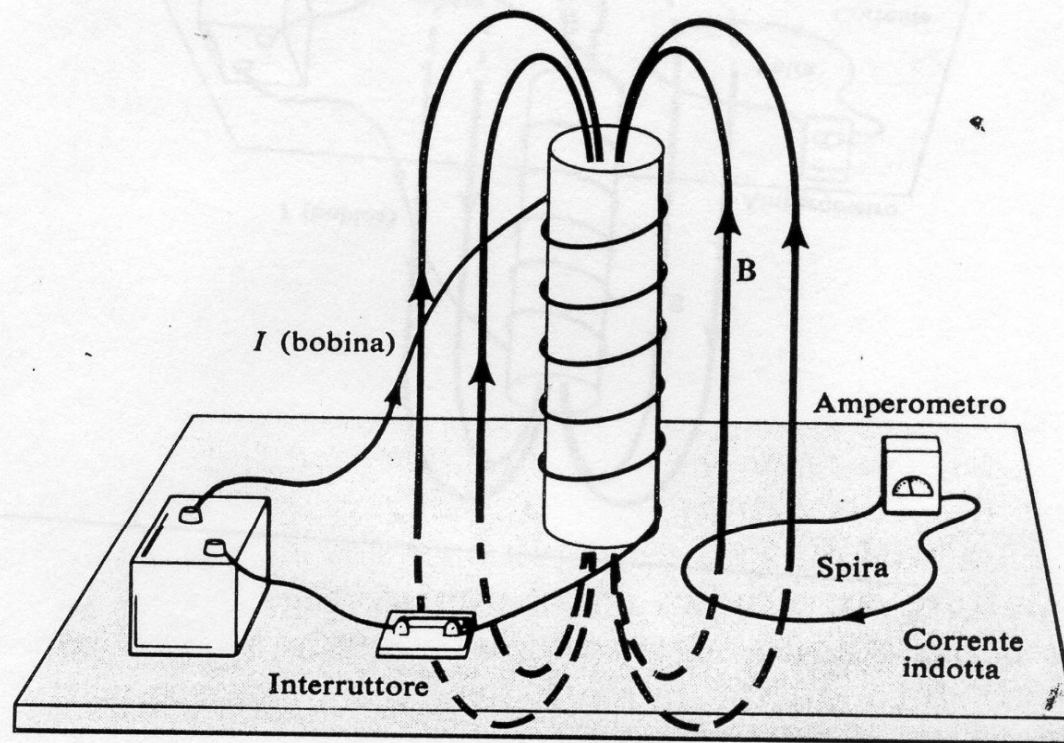
Per mantenere una FEM costante tra i due estremi, la sbarra deve muoversi verso destra con velocità costante. Un agente esterno deve quindi compiere lavoro sulla sbarra (conservazione dell'energia).





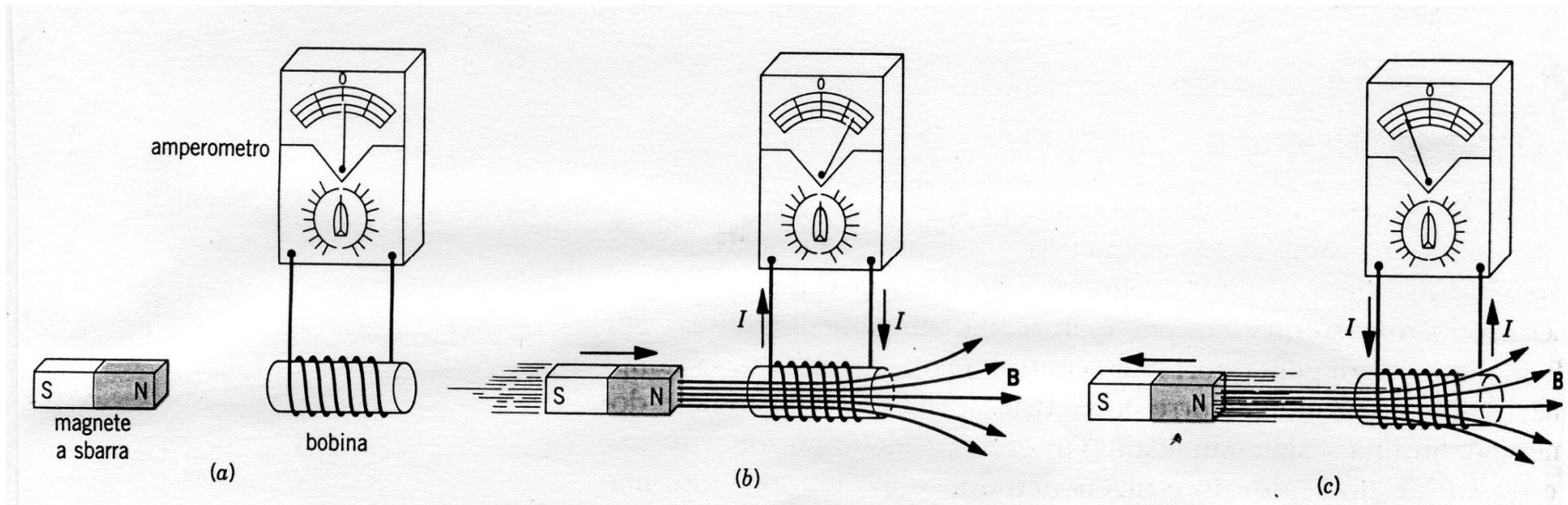
# Induzione elettromagnetica

<https://www.youtube.com/watch?v=864kUkKBCRw>



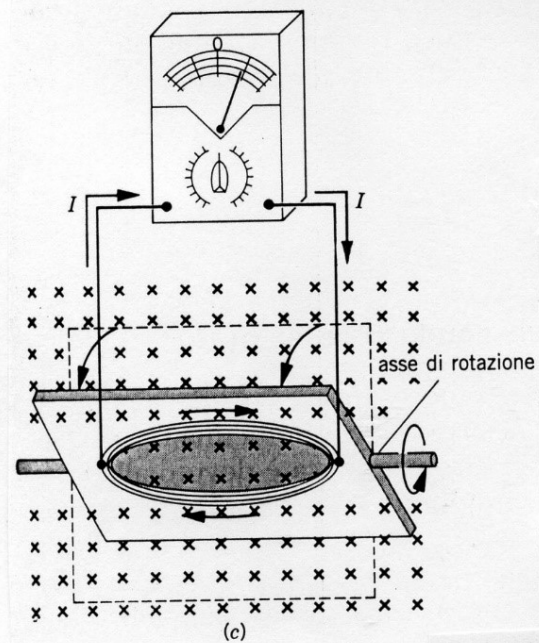
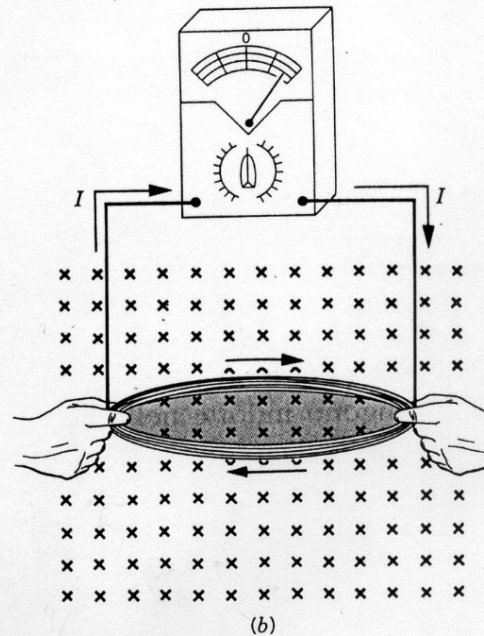
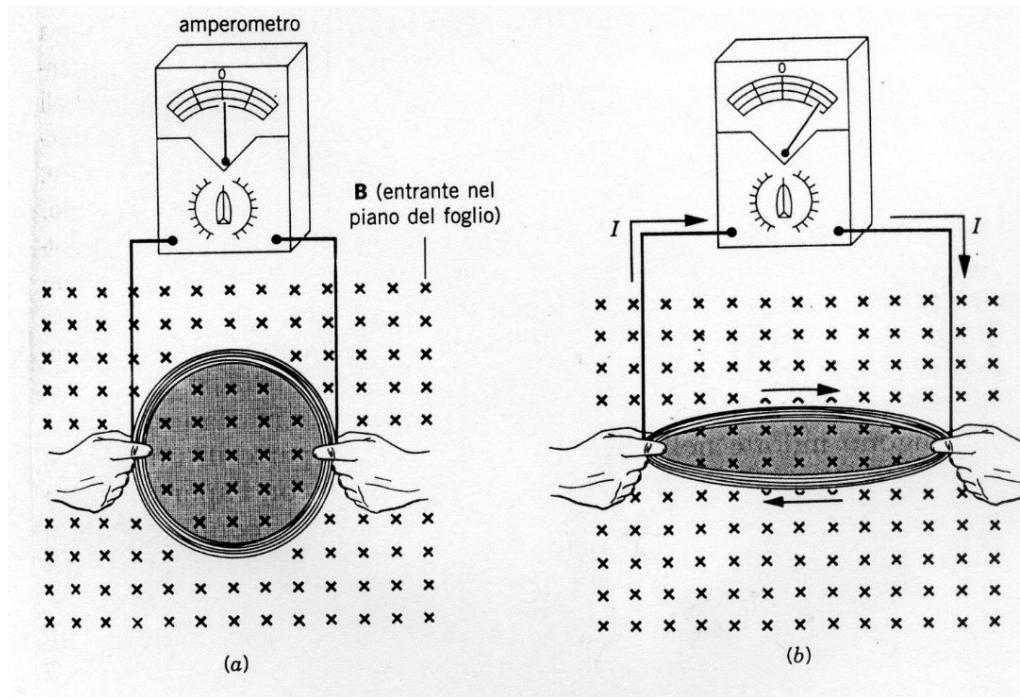
Quando l'interruttore viene chiuso, si produce temporaneamente nella spira una corrente che ha la direzione indicata; una corrente transitoria scorre invece nella direzione opposta quando l'interruttore viene aperto. Se l'interruttore viene lasciato chiuso in modo da creare un campo magnetico costante, una corrente verrà prodotta o muovendo la spira o cambiando la sua forma o le sue dimensioni, ovvero modificando il suo orientamento.

# Induzione elettromagnetica



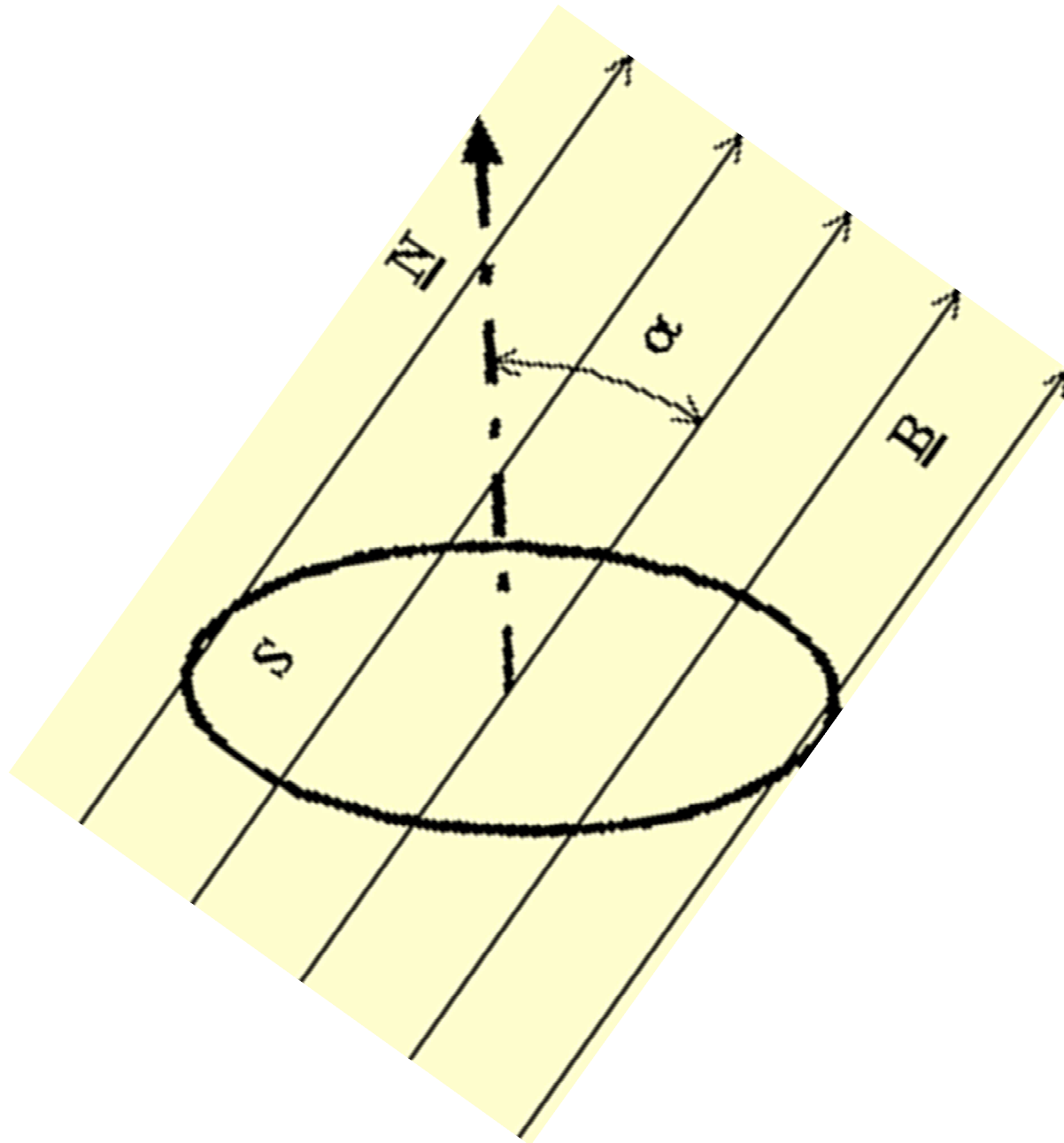
(a) Quando non c'è moto relativo tra la bobina di filo conduttore e il magnete a sbarra, nella bobina non c'è corrente. (L'amperometro indica intensità nulla della corrente quando l'indice è al centro della scala; quando c'è una corrente, l'indice devia verso destra o verso sinistra, secondo il verso della corrente.) (b) Si genera una corrente nella bobina quando il magnete si muove verso la bobina. (c) Si genera una corrente anche quando si allontana dalla bobina, ma in questo caso il verso della corrente è opposto a quello in (b).

# Induzione elettromagnetica



(a) Non esiste una corrente in una bobina di area costante (la regione ombreggiata) che è situata in un campo magnetico uniforme e costante.  
(b) Mentre l'area della bobina varia, si generano una f.e.m. indotta e una corrente indotta.  
(c) Si generano una f.e.m. indotta e una corrente indotta anche mentre la bobina ruota attorno a un asse perpendicolare al campo magnetico.

**... conta la variazione nel tempo del flusso magnetico!**

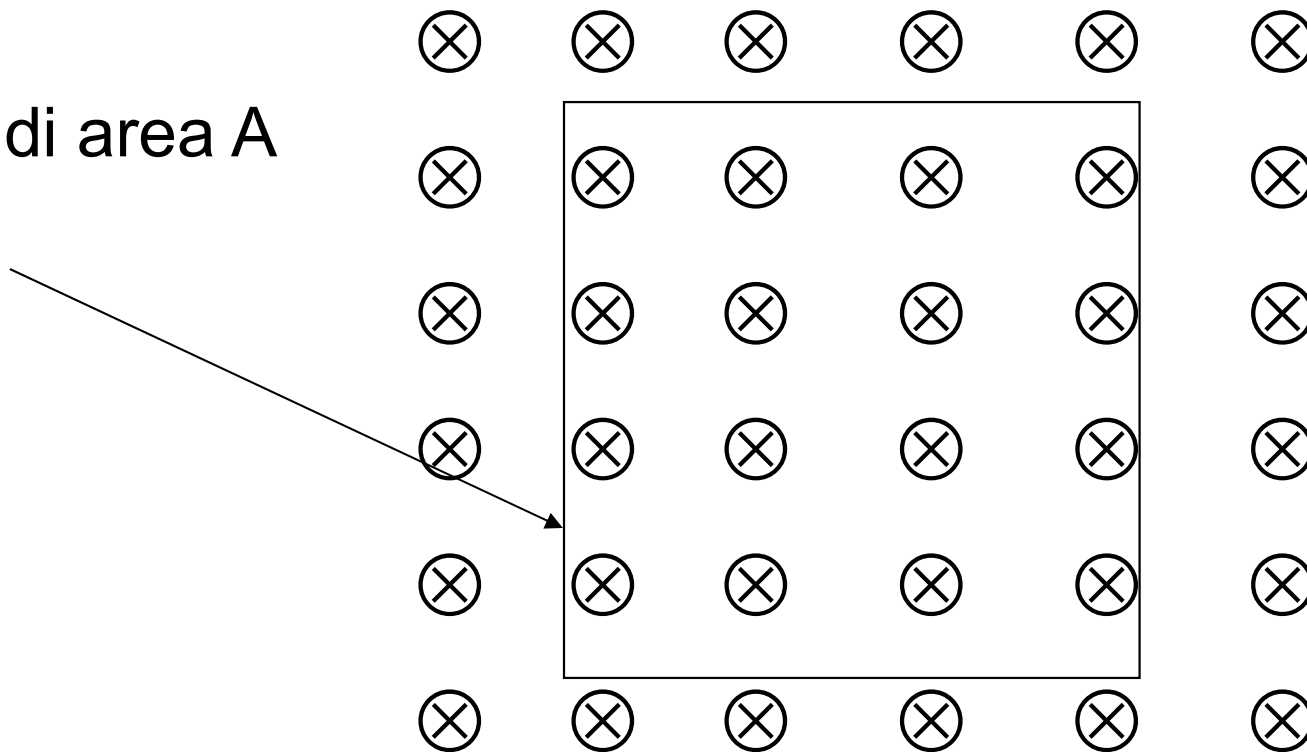


Il flusso magnetico è proporzionale al numero di linee del campo  $B$  che attraversano una determinata area.

$$\Phi_B = BA \cos \theta$$

L'unità di misura del flusso magnetico è il weber:  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$

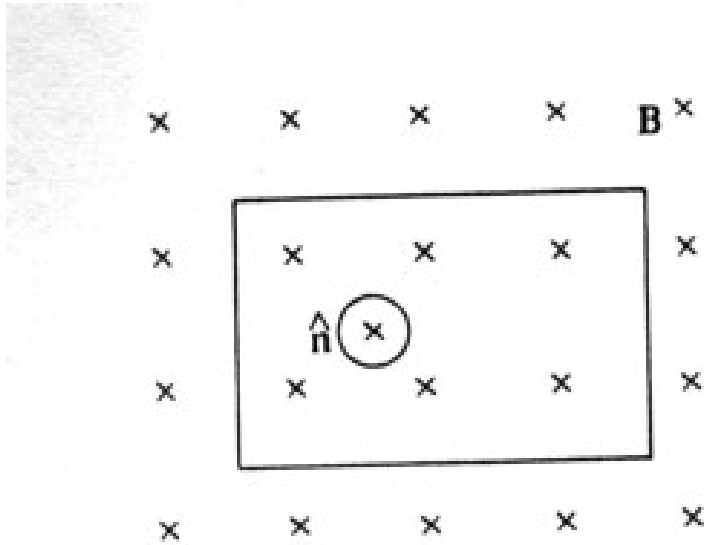
Spira di area  $A$







La spira in figura ha un'area di  $0.1 \text{ m}^2$ . Il campo magnetico è perpendicolare al piano della spira e ha una intensità costante di  $0.2 \text{ T}$ . Si trovi il flusso magnetico attraverso la spira.



## RISOLUZIONE/1

Per risolvere questo problema, dobbiamo applicare la legge di Faraday Neumann Lenz che lega fra loro f.e.m e flusso magnetico. Il flusso del campo magnetico attraverso la superficie e' dato dal prodotto scalare tra il vettore **B** e il vettore **A**

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = 0.1 \cdot 0.2 = 0.02 \text{ Wb}$$

Qui **A** e' il vettore avente come modulo il valore della superficie e come direzione quella perpendicolare alla superficie.

# Legge di Faraday

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Una FEM indotta in un avvolgimento di N spire è dovuta al cambiamento del flusso magnetico.

Modi di indurre una FEM:

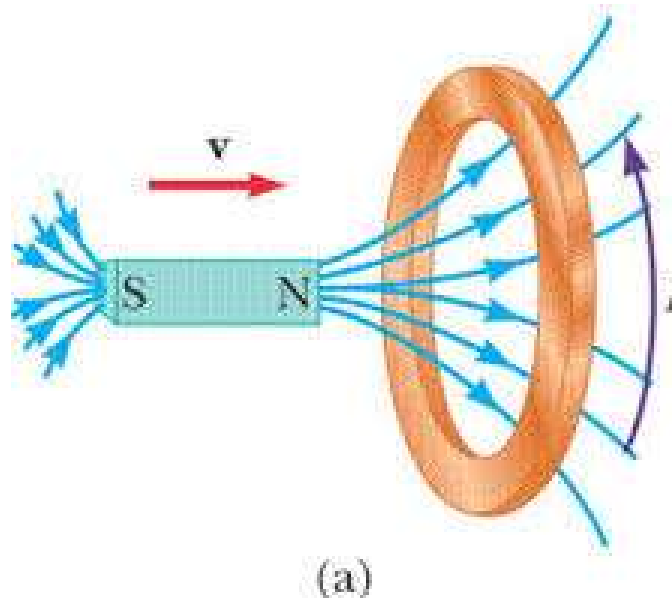
1. Variare il campo magnetico.
2. Variare l'area della spira.
3. Cambiare l'angolo tra **B** e **A**.

# Legge di Lenz

La corrente indotta si oppone sempre al cambiamento di flusso che l'ha prodotta.

La  $I$  indotta (e quindi il  $B$  indotto) cerca di contrastare la variazione del flusso totale attraverso la spira.

<http://www.raiscuola.rai.it/articoli/l-induzione-elettromagnetica-la-scienza-per-concetti/9028/default.aspx>

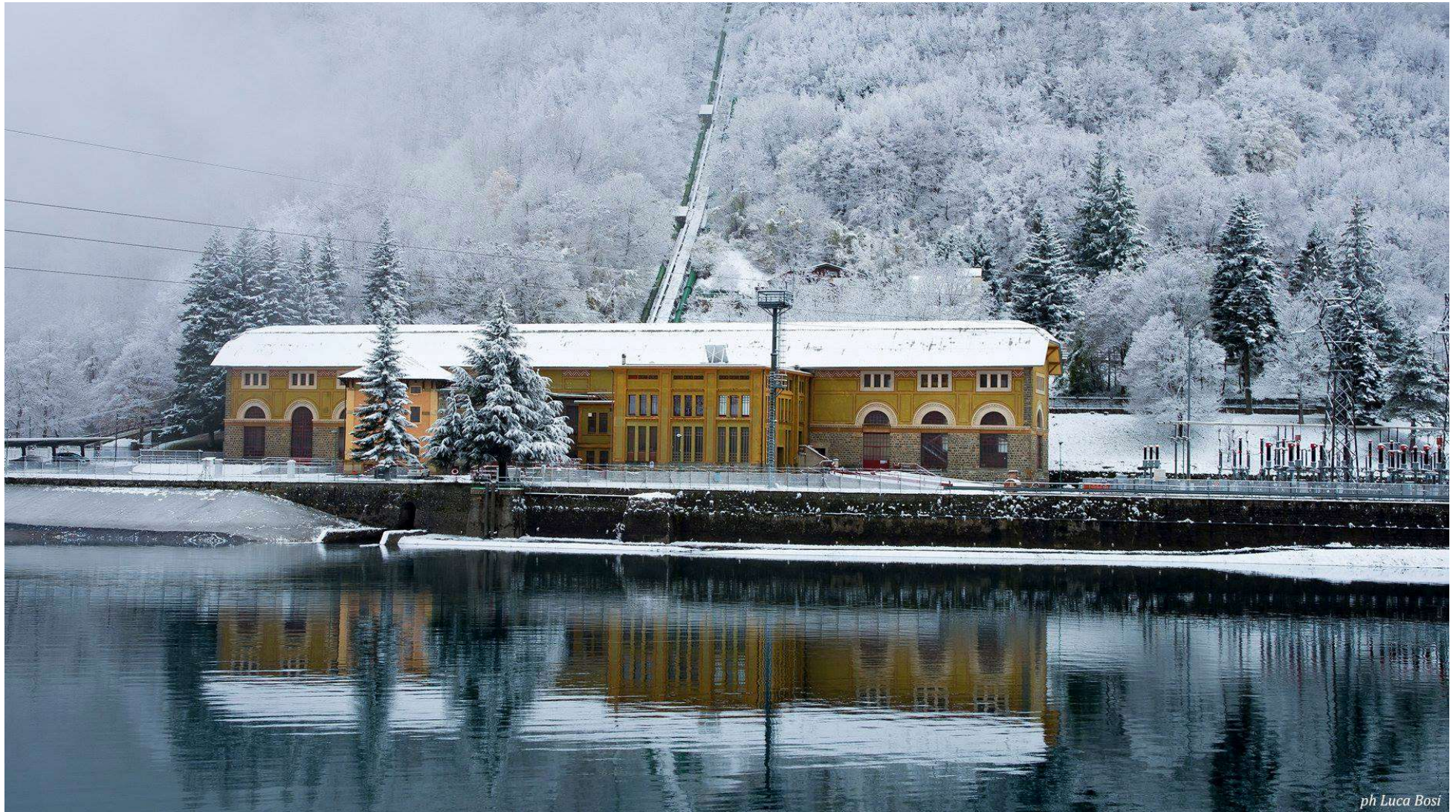




# Il generatore elettrico

<http://www.raiscuola.rai.it/articoli/l-induzione-elettromagnetica-la-scienza-per-concetti/9028/default.aspx>

Minuto 6,27



ph Luca Bosi

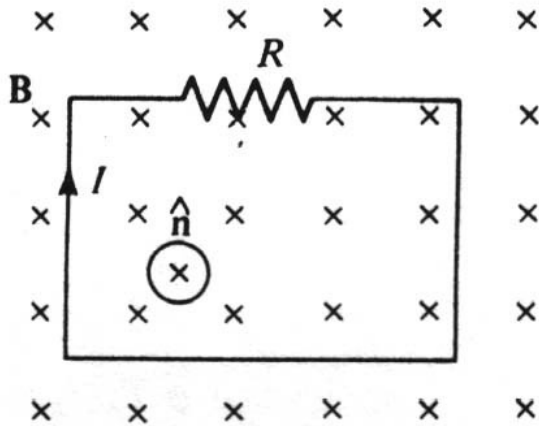
<http://www.appenninoreggiano.it/schede.asp?lang=it&d=centrali-idroelettriche-di-ligonchio>





Una spira di area  $0.1 \text{ m}^2$  ha una resistenza di  $10 \Omega$ . Un campo magnetico  $B$  normale alla spira ha inizialmente una intensità di  $0.2 \text{ T}$  e viene ridotto a zero con una velocità uniforme in  $10^{-4} \text{ s}$ . Trovare la f.e.m. indotta e la corrente risultante.

## RISOLUZIONE/1



Per risolvere questo problema dobbiamo applicare la legge di Faraday-Neumann Lenz che afferma che in un circuito in presenza di un flusso magnetico che varia nel tempo, viene indotta una f.e.m. che produce una corrente il cui campo magnetico si oppone alla variazione di flusso.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

N.B. La corrente indotta (e il corrispondente campo magnetico indotto) tende a contrastare la variazione di flusso attraverso il circuito

## RISOLUZIONE/2

Calcoliamo il flusso magnetico all' istante iniziale

$$\Phi_B(t=0) = \vec{B} \cdot \vec{A} = |\vec{B}| |\vec{A}| \cos 0 = 0.1 * 0.2 \text{Wb} = 0.02 \text{Wb}$$

All' istante finale il flusso magnetico e' nullo essendo il campo magnetico nullo.

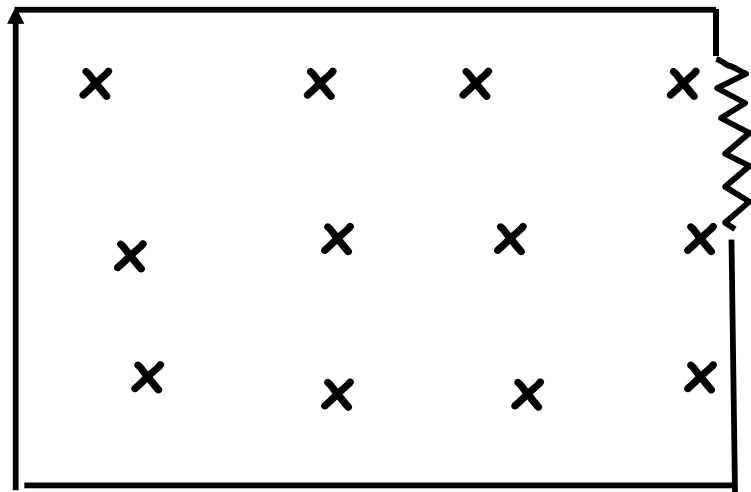
$$\Phi_B(t=10^{-4} \text{s}) = 0$$

La f.e.m indotta sara' data

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -\frac{\Phi_B(t=10^{-4} \text{s}) - \Phi_B(t=0)}{\Delta t} = \frac{0.02}{10^{-4}} \text{V} = 2 * 10^2 \text{V}$$

## RISOLUZIONE/3

Calcoliamo adesso il verso della corrente indotta che circola nel circuito. Dalla legge di Lenz questa corrente deve opporsi alla variazione di flusso.

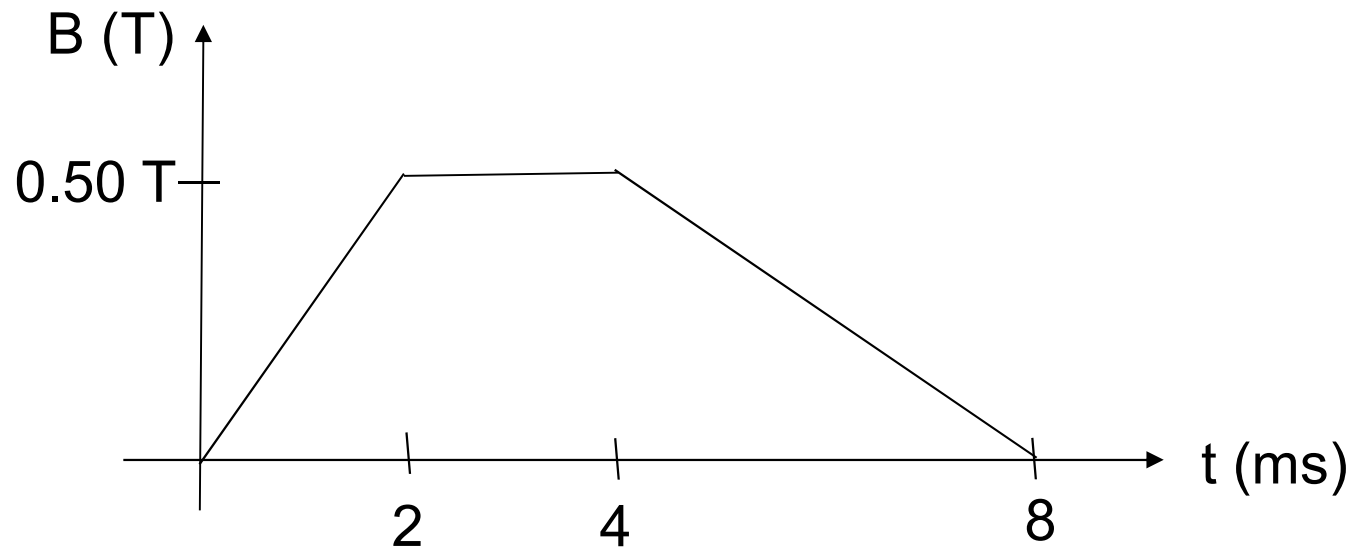


Il flusso generato dal campo magnetico entrante diminuisce, per cui la componente perpendicolare del campo magnetico indotto per opporsi alla variazione di flusso deve essere anch'esso entrante. Quindi la corrente indotta deve dare luogo ad un campo magnetico entrante rispetto al piano della spira.

$$I_{ind} = \frac{\varepsilon}{R} = 2 \times 10^2 \text{ V} / 10 \Omega = 20 \text{ A}$$



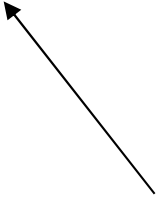
Se il campo magnetico in una regione varia col tempo secondo il grafico qui sotto, trova il modulo della FEM indotta in una singola spira durante i seguenti intervalli di tempo: (a) 0-2.0 ms, (b) 2.0-4.0 ms, e (c) 4.0-8.0 ms. La spira ha area  $0.500 \text{ m}^2$  e il piano della spira è perpendicolare al campo  $B$ .



continua:

Usa la legge di  
Faraday:

$$\mathcal{E} = - \left( \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \right) = -A \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right)$$



Questa è la  
pendenza del  
grafico di B vs il  
tempo.

continua:

(a) Nell'intervallo 0.0-2.0 ms,

$$|\mathcal{E}| = \left| -A \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \right| = \left| (0.500 \text{ m}^2) \left( \frac{0.50\text{T}-0.00\text{T}}{2.0 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) \right| = 130 \text{ V}.$$

(b) Nell'intervallo 2.0-4.0 ms,

$$|\mathcal{E}| = \left| -A \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \right| = \left| (0.500 \text{ m}^2) \left( \frac{0.50\text{T}-0.50\text{T}}{2.0 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) \right| = 0 \text{ V}.$$

continua:

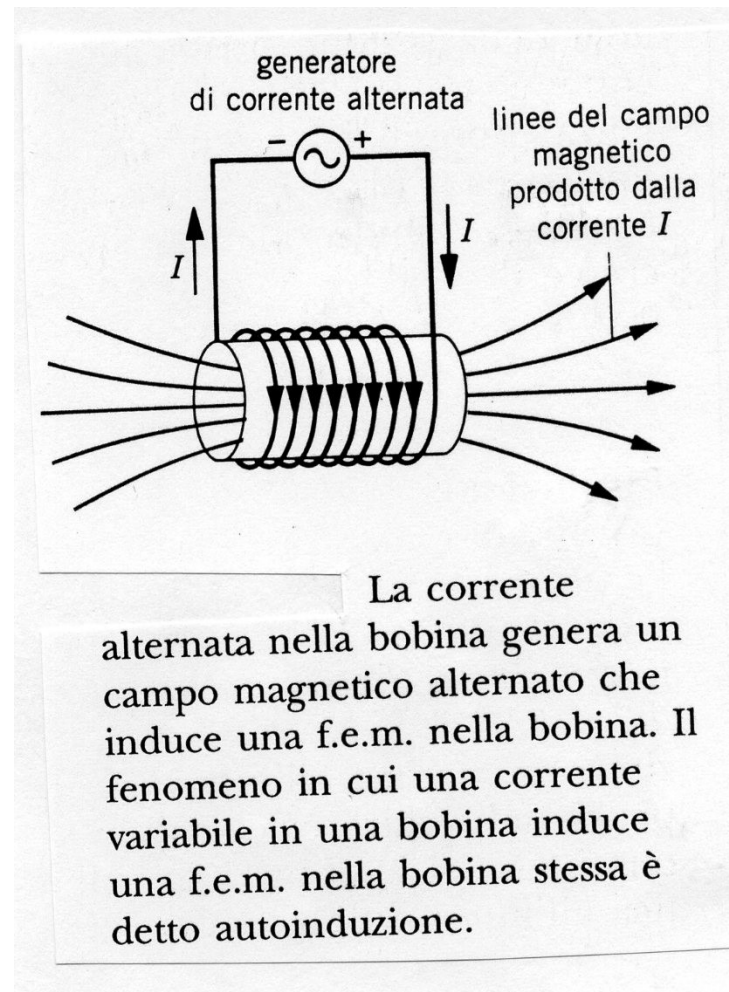
(c) Nell'intervallo 4.0-8.0 ms,

$$|\mathcal{E}| = \left| -A \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \right| = \left| (0.500 \text{ m}^2) \left( \frac{0.00\text{T} - 0.50\text{T}}{4.0 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) \right| = 63 \text{ V}.$$



# Autoinduzione

L'autoinduzione si manifesta quando un avvolgimento che trasporta corrente induce una FEM su se stesso.



# Campi elettrici generati da cariche elettriche o da campi magnetici

	Campi E Conservativi	Campi E indotti (non conservativi)
Sorgente	Cariche	Campi B variabili
Linee di campo	Iniziano dalle cariche positive e terminano su quelle negative	Linee chiuse
Possono essere descritti da un potenziale elettrico?	Sì	No
Lavoro su un percorso chiuso	Sempre nullo	Può non essere nullo su un percorso chiuso