

Gli esperimenti condotti da Faraday hanno portato a stabilire l'esistenza di una forza elettromotrice e quindi di una corrente indotta in un circuito quando:

- 1) il circuito è in presenza di un campo magnetico variabile nel tempo
- 2) si ha un moto relativo tra il circuito e un campo magnetico costante

I fenomeni di induzione elettromagnetica vengono prodotti ogni qualvolta vi siano variazioni del flusso del campo **B** nella regione occupata da circuiti conduttori

L' indipendenza della f.e.m. indotta dal modo in cui si verificano le variazioni di flusso \Rightarrow
un legame tra il campo elettrico e quello magnetico

Un campo magnetico variabile nel tempo diventa sorgente di un campo elettrico non conservativo

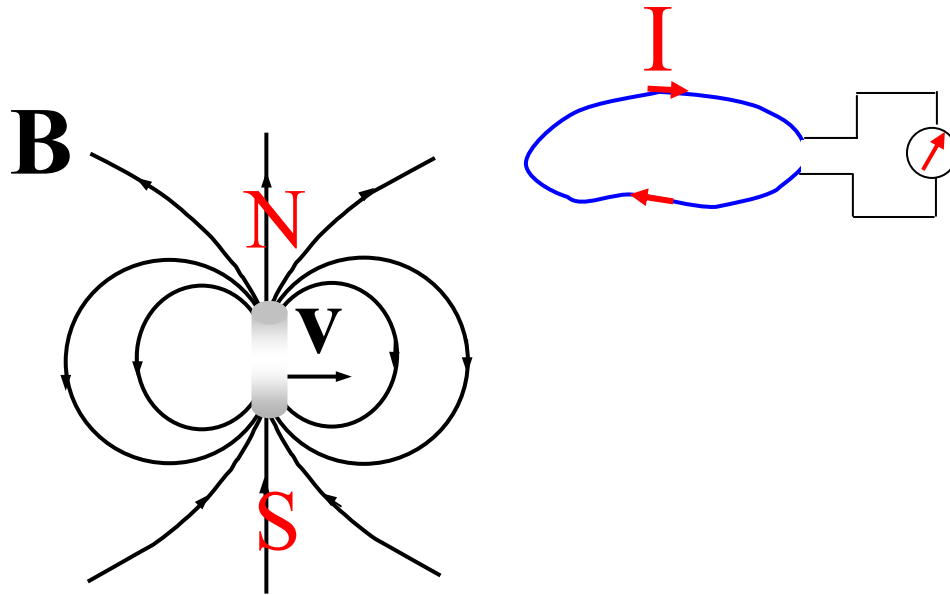
Maxwell dimostrò la validità della situazione simmetrica:

Un campo elettrico variabile nel tempo crea un campo magnetico

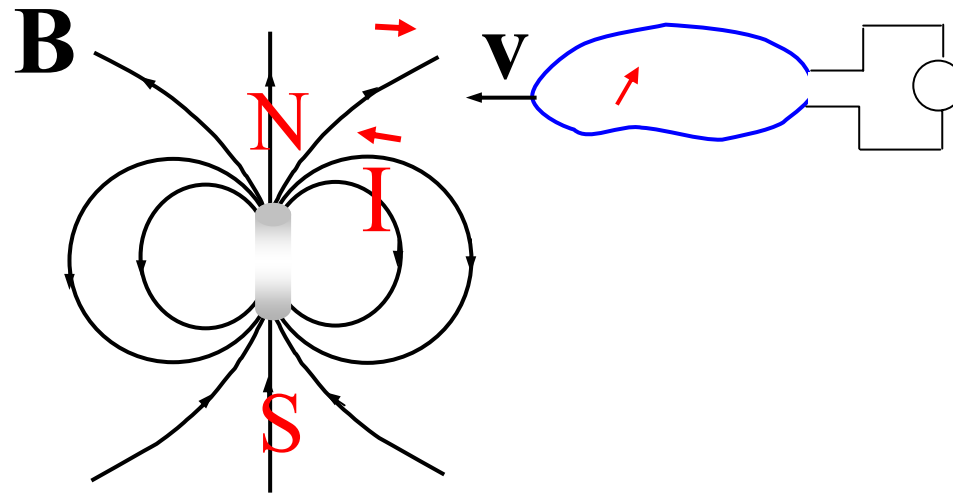
Campo elettrico e campo magnetico non sono in generale entità indipendenti, ma sono **unificati nel campo elettromagnetico**

Legge di Faraday

Avvicinando o allontanando un magnete da una spira collegata ad un galvanometro, questo segnala la presenza di una corrente nel circuito



Lo stesso fenomeno ha luogo se il magnete è fermo e la spira si muove ed ancora se una spira percorsa da corrente prende il posto del magnete



In conclusione, in caso di **moto relativo fra un circuito e un campo magnetico** (generato da un magnete o da un circuito percorso da corrente) a causa della variazione del flusso magnetico concatenato con il circuito **si sviluppa una f.e.m. indotta**

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

legge di Faraday

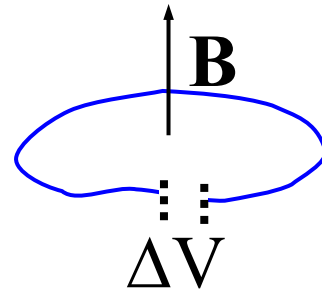
Si genera una corrente indotta

$$I = - \frac{1}{R} \frac{d\Phi_B}{dt}$$

R = resistenza ohmica dei conduttori che costituiscono il circuito

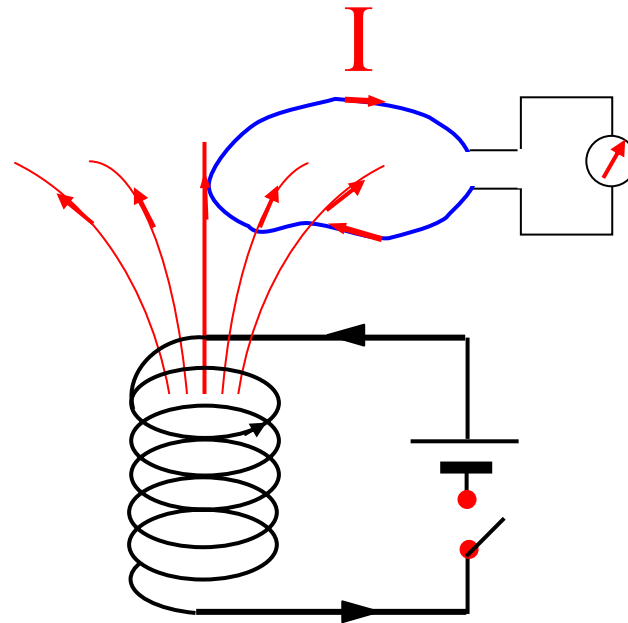
Il segno negativo stabilisce il verso della f.e.m.

\mathcal{E} può essere misurata come d.d.p. tra le due estremità del circuito interrotto in un punto



Variazione di flusso determinata da campi magnetici variabili nel tempo

Mediante un interruttore si fa variare la corrente in un solenoide \Rightarrow il galvanometro segnala la presenza di una corrente nella spira

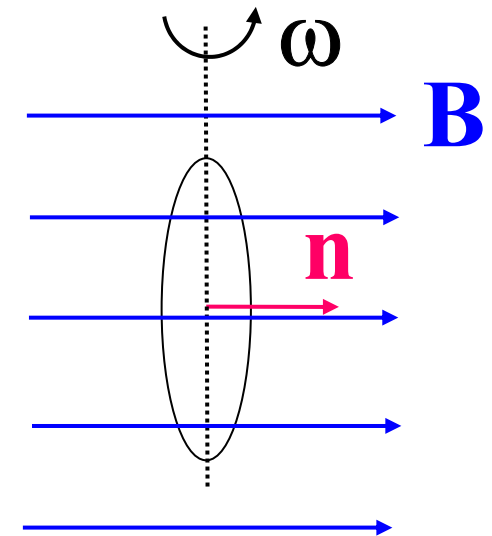


Variazione di flusso determinata dalla variazione dell'angolo fra il campo magnetico e la normale alla spira

Esempio: spira in rotazione con velocità angolare costante ω in un campo magnetico uniforme perpendicolare all'asse di rotazione della spira

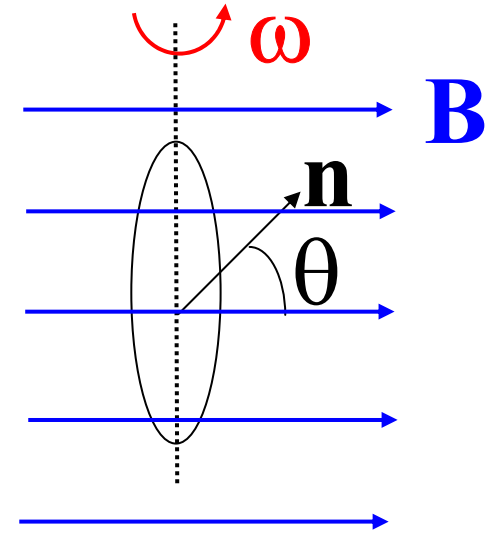
θ angolo fra la normale \mathbf{n} alla spira e \mathbf{B}

All'istante $t_0 = 0$ $\theta_0 = 0$



In un generico istante t

$$\theta = \theta_0 + \omega t = \omega t$$



Flusso concatenato con la spira

$$\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} S = B \cdot S \cdot \cos \theta = BS \cos \omega t$$

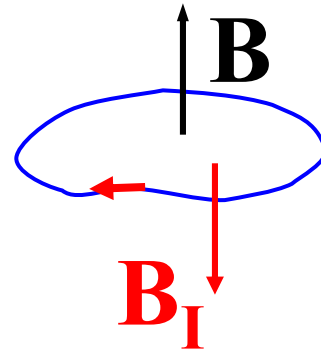
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = \omega BS \sin \omega t$$

In ognuno dei casi precedenti la variazione del flusso concatenato con un circuito genera una f.e.m. indotta e quindi un campo elettrico indotto non conservativo così definito

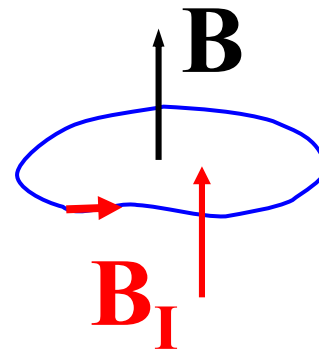
$$\varepsilon = \oint \mathbf{E}_{\text{IND}} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Legge di Lenz: l'effetto della f.e.m. indotta ε è sempre tale da opporsi alla variazione di flusso che l'ha generata

$$\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$$



$$\frac{d\Phi_B}{dt} < 0$$

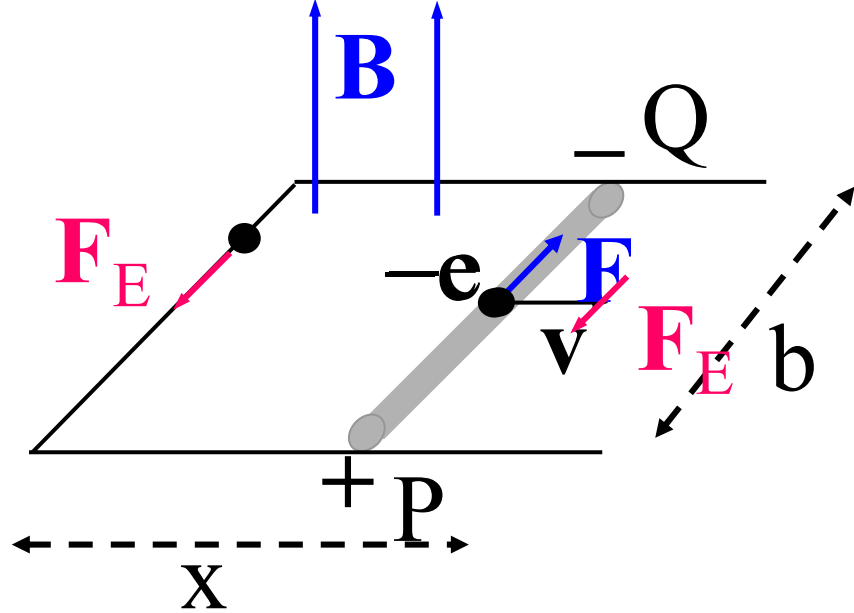


Origine della f.e.m. indotta

Fenomeni connessi con il moto di circuiti o di parti di questi in campi magnetici statici:

la f.e.m. indotta può essere spiegata sulla base della forza di Lorentz

Una sbarretta metallica PQ, in moto con velocità \mathbf{v} , in un campo \mathbf{B} uniforme e stazionario, costituisce un lato di un circuito rettangolare

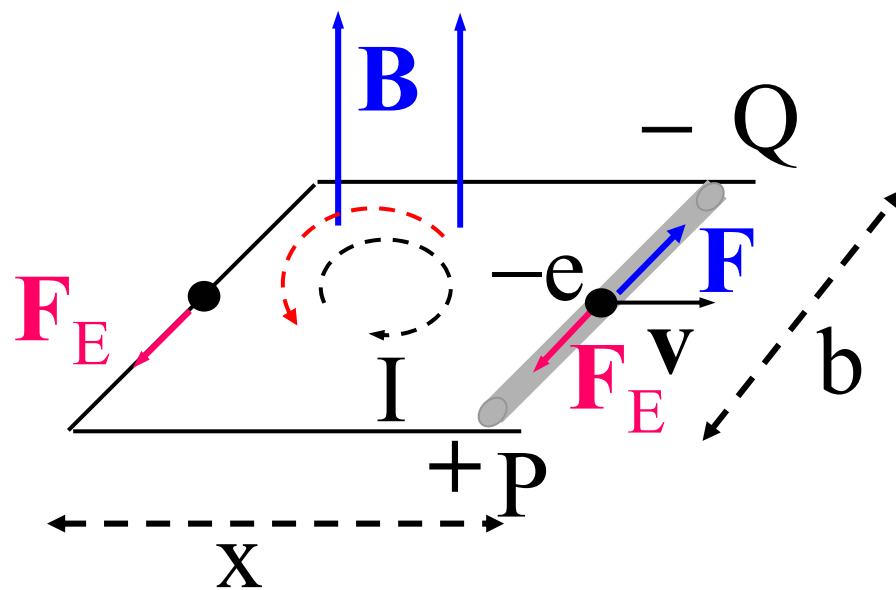


$\mathbf{F} = -e \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ forza di Lorentz agente sugli elettroni

$$\mathbf{F} = e \mathbf{v} \mathbf{B}$$

\mathbf{F} sposta gli elettroni mobili della sbarretta da P a Q

La separazione di carica tra i punti P e Q genera un campo elettrostatico che riporta gli elettroni in P lungo il circuito



Si origina così la corrente indotta che scorre in verso opposto a quello del moto degli elettroni

La forza di Lorentz è la sorgente di f.e.m.

Ha origine un campo elettromotore

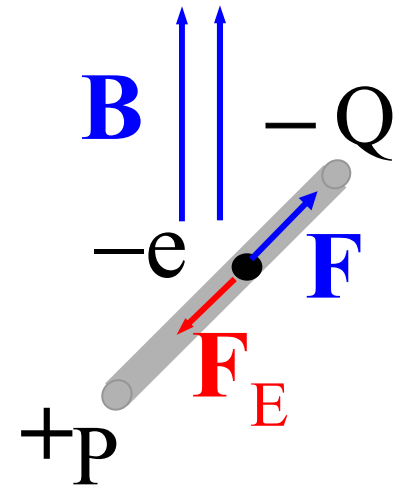
$$\mathbf{E}_{\text{IND}} = \frac{\mathbf{F}}{-e} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Il tratto di conduttore PQ \Leftrightarrow ad un generatore di f.e.m. con il morsetto positivo in P e quello negativo in Q

Misura della f.e.m. ε del generatore

$\varepsilon =$ d.d.p. misurata tra P e Q a circuito **aperto**

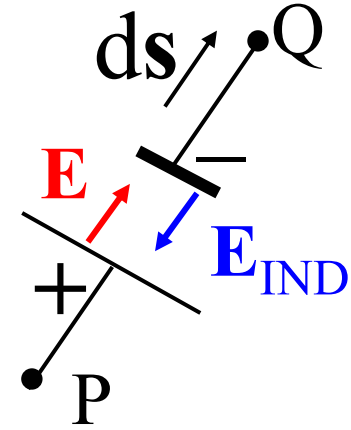
In tale situazione gli elettroni si accumulano in Q fino a quando la forza di Lorentz non è equilibrata dalla forza elettrostatica diretta da Q a P



In condizioni di equilibrio:

$$\mathbf{F}_E + \mathbf{F} = -e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} = -\mathbf{E}_{\text{IND}}$$



d.d.p. tra i punti P e Q \equiv f.e.m. presente nel circuito

$$\varepsilon = \Delta V = V_P - V_Q = \int_P^Q \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} =$$

$$= - \int_P^Q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = vBb$$

Accordo con la legge di Faraday:

verso positivo antiorario fissato sul circuito \Rightarrow

\mathbf{n} normale positiva alla superficie racchiusa dal circuito concorde con \mathbf{B}

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} b dx = Bbx \Rightarrow$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -Bb \frac{dx}{dt} = -Bbv$$

il segno $-$ indica che la corrente scorre in verso orario
opposto a quello fissato come positivo

La corrente indotta dà origine ad un campo magnetico
opposto a \mathbf{B} in accordo con la legge di Lenz

Fenomeni legati alla variazione del campo magnetico

Circuito fisso: $\mathbf{F} = -e \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$

Gli elettroni non si muovono a causa della forza di Lorentz

Quindi deve esistere una forza che agisce sugli elettroni quando sono in quiete

$$\mathbf{F} = -e \mathbf{E}'$$

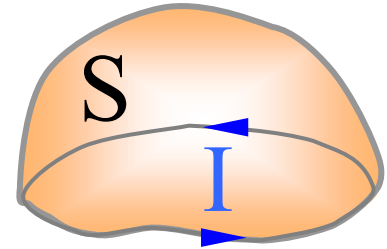
L'origine della f.e.m. indotta è dovuta ad un campo elettrico \mathbf{E}' non conservativo

Autoinduzione

Ogni circuito percorso da corrente genera un campo magnetico

Per la I legge di Laplace:

$$B \propto I$$



Φ_B flusso di B attraverso una qualsiasi superficie S che abbia il circuito come contorno =

flusso concatenato con il circuito stesso o
“autoconcatenato”

$$\Phi_B \propto I \qquad \Phi_B = L I$$

L coefficiente di autoinduzione “induttanza”

Nel S.I. si misura in Henry

$$H = \text{Wb} / \text{A}$$

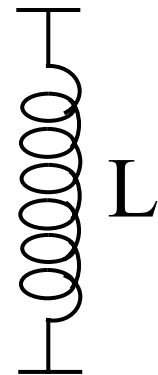
Il fenomeno di autoinduzione spiega la presenza di energia associata al campo magnetico

Fenomeni induttivi nei circuiti

L'intensità di corrente in un circuito è variabile \Rightarrow

Φ_B flusso concatenato varia \Rightarrow

si genera nel circuito una forza elettromotrice indotta:
f.e.m. di autoinduzione



$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$\varepsilon \propto L$$

ε di verso tale da opporsi alla variazione della corrente stessa

Coefficiente di autoinduzione per un solenoide indefinito

Campo **B** nel solenoide

$$B = \mu_0 n I$$

n = numero di spire per unità di lunghezza

r_0 = raggio della spira

Flusso concatenato con una spira

$$\Phi_1 = \mu_0 n I \pi r_0^2$$

Flusso totale concatenato con le spire relative ad un tratto di lunghezza ℓ

$$\Phi_{\text{TOT}} = n \ell \Phi_1 = \mu_0 n^2 \ell I \pi r_0^2$$

$$L_0 = \frac{L}{\ell} = \frac{\Phi_{\text{TOT}}}{\ell I} = \mu_0 n^2 \pi r_0^2 = \mu_0 n^2 S$$

coefficiente di autoinduzione per unità di lunghezza