

## INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

Dopo le esperienze di Oersted, di Biot, di Savart e di Ampère, che avevano messo in evidenza che le correnti elettriche possono produrre campi magnetici, alcuni ricercatori si posero l'obiettivo di vedere se i campi magnetici possono produrre correnti elettriche.

Per diversi motivi, pratici e teorici, i primi tentativi fatti non ebbero esito positivo.

Fu nel 1831 che Faraday scoprì, quasi per caso, che correnti elettriche sono prodotte da campi magnetici variabili nel tempo e al fenomeno fu dato il nome di **induzione elettromagnetica**.

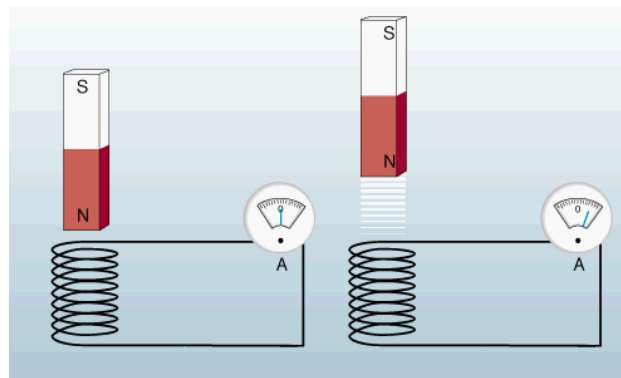
Faraday si accorse che, avvicinando una calamita ad un solenoide collegato ad un amperometro molto sensibile, veniva prodotta una corrente che attraversava il solenoide nell'intervallo di tempo in cui la calamita era in movimento e si interrompeva quando la calamita si fermava.

Notò anche che se la calamita veniva allontanata dal solenoide, il verso della corrente era l'opposto. Verificò inoltre che gli effetti rimanevano gli stessi, sia che il solenoide restasse fisso rispetto ad un sistema di riferimento e la calamita fosse in moto sia che la calamita rimanesse ferma e il solenoide fosse in moto.

Concluse che, per la produzione di corrente era necessario solo che ci fosse un moto relativo del magnete rispetto al solenoide.

La corrente così ottenuta venne chiamata **corrente indotta**.

La corrente indotta misurata dall'amperometro risulta tanto più intensa quanto più rapido è il movimento relativo fra solenoide e calamita.



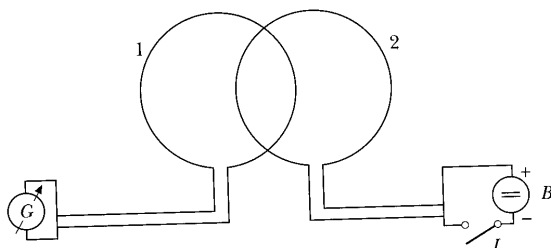
Tale moto può essere, oltre che una traslazione, una rotazione relativa che presenta ad un magnete una spira in piani diversi.

Se si inserisse in un circuito una spira collegata ad un amperometro molto sensibile ed un generatore (di resistenza interna nulla), il prodotto  $iR$  definirebbe la forza elettromotrice del generatore.

Quando nella spira circola corrente indotta, non vi è alcun generatore inserito nel circuito, tuttavia poiché circola corrente indotta, nella spira è presente una forza elettromotrice detta **forza elettromotrice indotta**, data da:

$$f_i = i_i \cdot R$$

Una corrente indotta si ottiene anche nella spira 1 del seguente dispositivo quando si apre o si chiude l'interruttore nel circuito 2 che contiene un generatore.



Ogni volta che nel circuito 2 varia l'intensità di corrente circolante, si ottiene corrente indotta nel circuito 1.

La corrente indotta, così ottenuta, è tanto più intensa quanto più rapida è la variazione di intensità di corrente nel circuito 2.

Si può anche ottenere corrente indotta in un circuito chiuso, immerso in un campo magnetico costante, deformando il circuito (cioè variando la superficie racchiusa). In questo caso l'intensità della corrente indotta dipende dalla rapidità della deformazione.

Faraday intuì che i vari metodi per produrre corrente indotta hanno in comune un aspetto fondamentale:

*Si ottiene una corrente indotta in un circuito quando varia il flusso di  $B$  attraverso il circuito stesso (ovvero il flusso concatenato al circuito).*

Osservazioni e misure accurate consentirono di esprimere il legame fra l'intensità di corrente indotta  $i$  e la variazione  $\Delta\Phi$  del flusso di  $B$ .

L'intensità della corrente indotta  $i$  è direttamente proporzionale alla variazione del flusso di  $B$  e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo in cui avviene la variazione del flusso e alla resistenza  $R$ , cioè:

$$i = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t} \quad \text{Legge di Felici (Riccardo Felici 1819-1902)}$$

Una corrente elettrica crea un proprio campo magnetico e la configurazione di tale campo nello spazio, in particolare il suo verso, dipende dalla corrente e da come essa circola.

Inoltre, come per ogni campo, anche per il campo proprio di un circuito si definisce il flusso attraverso il circuito stesso, detto **flusso autoconcatenato**.

Quando una corrente indotta è dovuta a un aumento del flusso magnetico inducente, il verso di questa corrente è tale da creare un campo magnetico antagonista di quello esterno, in modo che il flusso autoconcatenato dal circuito sia opposto a quello esterno e ne rallenti l'aumento.

Viceversa, la corrente indotta per una diminuzione del flusso esterno circola in modo che il flusso autoconcatenato sia concorde con quello esterno e ne rallenti la diminuzione.

Queste osservazioni sperimentali, dovute al sovietico Emilij Christianovič Lenz (1804-1865), si sintetizzano dicendo che:

*La corrente indotta in un circuito ha verso tale da opporsi alla variazione di flusso magnetico che l'ha generata (legge di Lenz).*

Per tener conto di questa legge, nella  $i = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t}$  si introduce un segno negativo e si ottiene

$$i = -\frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t}$$

La **forza elettromotrice indotta** è:  $f = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  (1)

Se il flusso varia istante per istante, il valore istantaneo della f.e.m. indotta sarà  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$  ovvero il limite a cui tende il rapporto (1) quando si fa tendere a zero l'intervallo di tempo  $\Delta t$  a partire dall'istante considerato.

Quest'ultima formula è valida anche in assenza di un circuito, ovvero se in una certa regione di spazio varia il flusso magnetico, in essa compare una f.e.m. indotta.

La  $f = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , nota come **legge di Faraday-Neumann-Lenz**, afferma che:

**Quando in un circuito chiuso, immerso in un campo magnetico, varia il flusso concatenato di  $B$ , nel circuito viene indotta una forza elettromotrice uguale alla rapidità di variazione del flusso (cioè alla derivata del flusso rispetto al tempo) cambiata di segno.**

Se esponiamo a un flusso magnetico variabile una bobina di  $N$  spire, in ogni spira compare una f.e.m. data dalla (1) e tutte queste f.e.m. si sommano tra loro. Se la bobina è abbastanza compatta perché possiamo pensare che tutte le spire siano soggette allo stesso flusso magnetico, la (1) diviene

$$f = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ dove } N \Phi \text{ è il cosiddetto } \mathbf{flusso concatenato} \text{ alla bobina.}$$

Ricordando la definizione di flusso magnetico possiamo scrivere  $f = -\frac{\Delta(BS \cos \alpha)}{\Delta t}$  quindi

l'induzione elettromagnetica si può manifestare nei tre modi seguenti:

- 1) **variazione del modulo dell'induzione magnetica  $B$ ,**
- 2) **variazione della superficie della spira,  $S$ ,**
- 3) **variazione dell'inclinazione della spira nel campo magnetico.**

Nel Sistema Internazionale, l'unità di flusso magnetico è il weber ( $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V s}$ ).

La legge di Lenz è una conseguenza del principio di conservazione dell'energia (infatti, se il segno della f.e.m. indotta non fosse quello voluto dalla legge di Lenz, dopo una iniziale spesa di energia per produrre una prima variazione di flusso del campo, sarebbe la stessa corrente, già indotta, a incrementare continuamente il  $\Delta\Phi$  e, quindi, se stessa, producendo continuamente energia elettrica senza spesa di altra forma di energia).

La forza elettromotrice viene indotta in un circuito anche se esso è chiuso su un generatore ed è quindi già percorso da corrente.

La corrente nel circuito risulterà dagli effetti combinati delle due forze elettromotrici.

Una f.e.m. indotta genera entro il conduttore un campo elettrico  $E$  che trasporta gli elettroni di conduzione, esercitando su ciascuno di essi la forza  $F = -e E$ .

**Il campo elettrico indotto** differisce sostanzialmente da quello elettrostatico per il fatto che **non è conservativo**.

Infatti, in un campo elettrico il lavoro totale eseguito dalle forze del campo su una particella carica, lungo un cammino chiuso, è nullo. Dopo che il campo ha compiuto lavoro motore, per esempio su una particella di carica positiva  $q$  spostandola verso punti a potenziale più basso, lo stesso campo non può ricondurre la particella al punto di partenza.

Nella fase di ritorno, la forza del campo elettrostatico compie lavoro resistente sulla particella.

Un campo elettrostatico non può essere responsabile di una corrente in un circuito chiuso: occorre una pila, che pompa le cariche verso il punto di partenza. Nel caso del circuito percorso da corrente indotta, la corrente c'è, ma la pila no; quindi, il campo elettrico indotto nel conduttore è tale che il lavoro compiuto dalle forze del campo sulle cariche, lungo il cammino chiuso costituito dal circuito è diverso da zero: *il campo non è conservativo*.

Fra i casi di induzione ha particolare interesse quello in cui la variazione del flusso magnetico attraverso un circuito è dovuta alla variazione nel tempo del campo magnetico  $B$ .

Questo **campo magnetico variabile** crea un campo elettrico indotto entro il conduttore.

Quindi la legge di Faraday-Neumann-Lenz, in questo caso, autorizza ad affermare che **un campo magnetico variabile nel tempo produce un campo elettrico**.