

Il campo elettromagnetico

11.1 La dipendenza dal tempo

1. Abbiamo finora studiato solo campi elettrici e magnetici di tipo stazionario, non dipendenti cioè dal tempo: fino a questo momento era quindi implicito nel discorso che il vettore \vec{E} e il vettore \vec{B} si mantenessero costanti nel tempo in valore e direzione in ogni punto dello spazio, e comunque non abbiamo mai considerato quali effetti potessero derivare da una situazione di variabilità.

2. Prenderemo ora in esame campi elettrici e magnetici di tipo non stazionario. Vedremo che l'idea di campo elettrico e l'idea di campo magnetico, del tutto indipendenti l'una dall'altra nel caso di stazionarietà, non potranno più essere separate nel caso di variabilità: un campo elettrico in variazione produce un campo magnetico la cui configurazione dipende dalle variazioni del campo elettrico, un campo magnetico in variazione produce un campo elettrico la cui configurazione dipende dalle variazioni del campo magnetico. I due campi costituiscono quindi, in caso di variabilità, un'unica realtà fisica, che denomineremo «campo elettromagnetico».

11.2 L'induzione elettromagnetica

1. Consideriamo una spira metallica in un campo magnetico. L'esperienza mostra che se si fa in modo di produrre variazioni nel valore del flusso magnetico concatenato alla spira, si produce insieme un passaggio di corrente nella spira: in tutti gli istanti in cui il flusso magnetico concatenato è in variazione, nella spira circola corrente: è il fenomeno dell'**induzione elettromagnetica**. Evidentemente, in concomitanza alle variazioni del flusso magnetico concatenato alla spira agiscono sugli elettroni di conduzione della spira forze di tipo non conservativo^[1], sulla cui esatta natura ci riserviamo di ritornare.

2. La corrente prodotta nella spira dalle variazioni del flusso magnetico concatenato si chiama **corrente indotta**. Si chiama invece

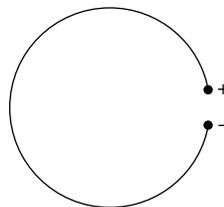


Fig.1 - La corrente indotta tende a circolare in senso orario.

¹ Le forze conservative non possono produrre energia cinetica lungo un percorso chiuso (sul quale il lavoro complessivo di una forza conservativa è sempre zero). Così, ad esempio, il fatto che l'acqua entri in movimento in un circuito idraulico chiuso non può essere un effetto gravitazionale: da qualche parte c'è una pompa, o una ruota a pale, o qualcosa del genere.

forza elettromotrice indotta il lavoro per unità di carica delle forze responsabili del passaggio della corrente indotta. Se, come in fig. 1, la spira è aperta, la corrente indotta non può circolare e ai due estremi della spira si producono cariche elettriche di segno opposto, con una differenza di potenziale il cui valore coincide con quello della f.e.m. indotta.

3. Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica appare governato dalle due leggi seguenti.

- **Legge di Lenz:** la corrente indotta circola sempre in senso tale da contrastare la variazione del flusso magnetico concatenato.
- **Legge di Faraday - Neumann:** la forza elettromotrice indotta è uguale alla derivata temporale del flusso magnetico concatenato, presa col segno meno:

$$[A] \quad f = - \frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}.$$

Come verrà subito chiarito (punto 7), il segno meno esprime l'effetto di contrasto previsto dalla legge di Lenz.

4. A illustrazione della legge di Lenz, si consideri la situazione mostrata in fig. 2. Dato che il magnete si sta avvicinando alla spira, il flusso magnetico concatenato alla spira è in aumento: allora la corrente indotta circola in modo tale che, nel campo magnetico da essa prodotto, il flusso concatenato alla spira abbia segno opposto a quello del flusso magnetico che si concatena alla spira nel campo prodotto dal magnete. Conseguentemente la spira equivale a una lamina magnetica che oppone al polo più vicino del magnete in avvicinamento un polo di nome uguale (nel nostro caso, Nord contro Nord), con ciò producendo sul magnete un effetto di repulsione meccanica.

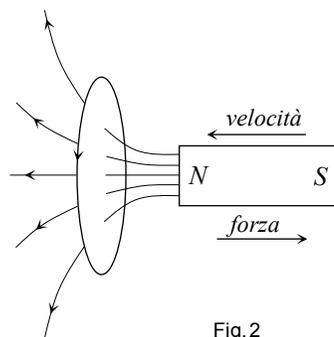


Fig. 2

Se invece il magnete si stesse allontanando, la corrente indotta circolerebbe nell'altro senso, per cui la lamina magnetica equivalente opporrebbe al Nord del magnete il proprio Sud, e produrrebbe sul magnete un effetto di attrazione.

5. È chiaro che tutto questo ha a che fare con l'idea di conservazione dell'energia: *se da qualche parte compare dell'energia, una equivalente quantità di energia (nella stessa forma o in altra forma) deve scomparire da qualche altra parte.* Supponiamo in un primo tempo che la spira della fig. 2 sia aperta: il flusso magnetico ad essa concatenato aumenta ma la corrente indotta non circola, il moto del magnete non è quindi contrastato e possiamo immaginare che il magnete, libero da qualsiasi forza, proceda per inerzia. Se a un certo punto la spira viene chiusa, la corrente indotta comincia a circolare: allora la spira si riscalda per effetto Joule, ma questo effetto energetico viene pagato col fatto che il magnete rallenta e al limite si ferma, perden-

do con ciò la propria energia cinetica. In definitiva, l'energia cinetica perduta nel moto macroscopico del magnete si ritrova nel moto di agitazione termica delle particelle della spira. Se, per assurdo, la corrente indotta circolasse nell'altro senso, la spira si riscalderebbe e per di più l'energia cinetica del magnete aumenterebbe: la conservazione dell'energia sarebbe violata.

6. L'effetto di contrasto della corrente indotta si vede anche considerando le forze che, nella situazione rappresentata in fig. 2, il campo prodotto dal magnete esercita sulla spira. Si riconosce facilmente che su ogni elemento di spira agisce una forza che ha un componente orizzontale diretto verso sinistra (diretto quindi in senso tale da allontanare la spira dal magnete), e un componente verticale diretto verso il centro della spira, in senso tale cioè da tendere a rimpicciolire la spira. Se il magnete si stesse invece allontanando, la spira sarebbe soggetta a forze tendenti ad aumentarne l'area e ad avvicinarla al magnete.

7. Relativamente invece alla legge di Faraday-Neumann, si osservi prima di tutto che il più o meno grande valore della f.e.m. indotta non è legato al valore del flusso magnetico concatenato, ma esclusivamente alla sua rapidità di variazione. Quanto al segno, *si presuppone che il circuito indotto* (il circuito in cui la forza elettromotrice indotta si manifesta) *sia stato preliminarmente orientato*: allora anche il flusso magnetico concatenato ha un segno, e le f.e.m. indotta è il lavoro compiuto per unità di carica dalle forze del campo elettrico indotto quando la corrente circola nel senso prefissato; il fatto allora che a un valore positivo della derivata temporale del flusso corrisponda un valore negativo della forza elettromotrice indotta significa semplicemente che la corrente indotta circola (se la spira è chiusa) in senso contrario al senso del circuito. Se, ad esempio, nel caso della fig. 2 consideriamo positivo il flusso concatenato alla spira, vuol dire che dal punto di vista del magnete la spira è orientata in senso orario: essendo positiva la derivata temporale del flusso, la forza elettromotrice indotta risulterà negativa, e conseguentemente (legge di Ohm generalizzata, pag. 116) la corrente indotta circolerà nella spira in senso contrario a quello prefissato. Il tutto, in pieno accordo con la legge di Lenz.

Sulla possibilità di produrre forze elettromotrici per induzione elettromagnetica sono basate tutte le macchine elettriche (motori e generatori), nonché le comunicazioni elettriche senza fili: e quindi quasi tutte le applicazioni dell'elettrotecnica.

11.3 Interpretazione

1. Quando la variazione del flusso magnetico concatenato dipende dal fatto che il circuito indotto (o anche solo una parte di esso) si muove in un campo magnetico stazionario, il fenomeno dell'induzione elettromagnetica non esprime una nuova legge fisica, ma è semplicemente una conseguenza del fatto che un campo magnetico esercita forze (del tipo $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$) sulle cariche che lo attraversano. Se invece il circuito indotto è immobile, e il flusso magnetico concatenato è quindi in variazione perché sta variando la configurazione del campo magnetico in cui il circuito