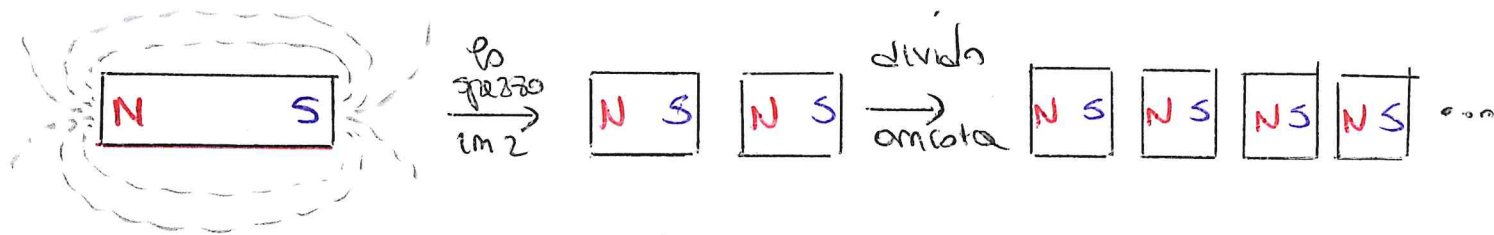


φ Campi Magnetici

- Possono essere generati da cariche elettriche in movimento, come il flusso di cariche che dà luogo ad una corrente elettrica in un filo (elettromagnete)
 - Generato dalla somma di tanti piccoli campi magnetici "elementari" - intrinseci delle particelle elementari che costituiscono una sostanza - che sono allineati (calamite, o magneti permanenti)
- ovvero il campo magnetico "intrinseco" è una caratteristica fondamentale delle particelle come la massa o la carica elettrica. → Una differenza di base con la carica elettrica è che **non è possibile isolare un polo magnetico**, mentre ad esempio possiamo isolare una carica e ; **i poli magnetici esistono solo sotto forma di DIPOLLO MAGNETICO**

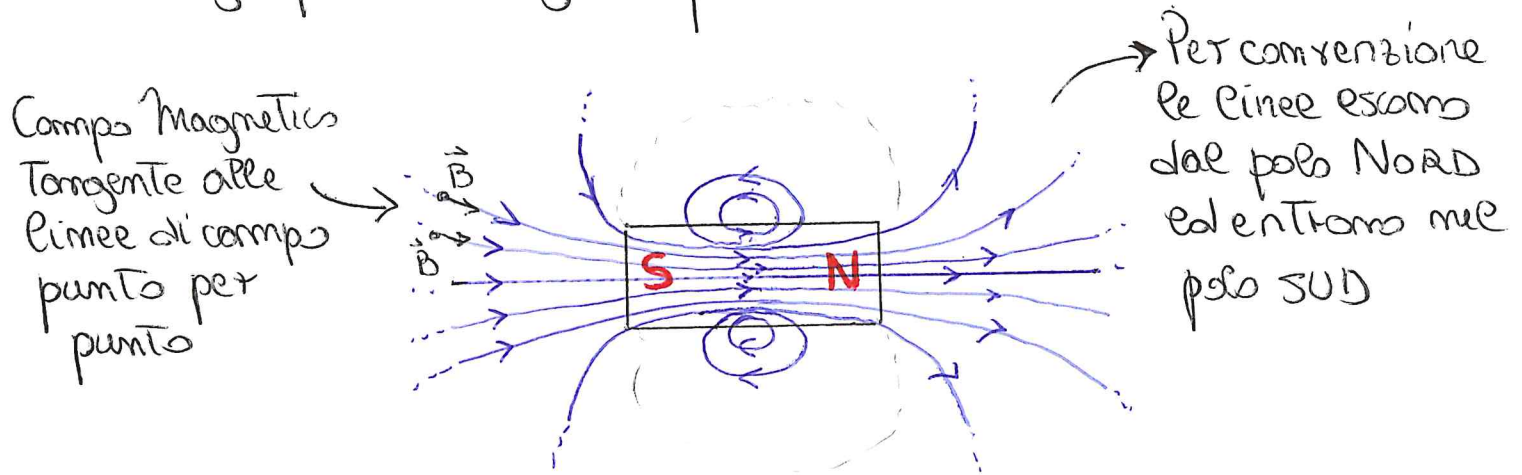
Es: Magnete



→ per quante volte io divido il magnete avrò sempre 2 poli

→ Usando e.g. della lamiatura di ferro possiamo evidenziare le linee di forza del campo magnetico.

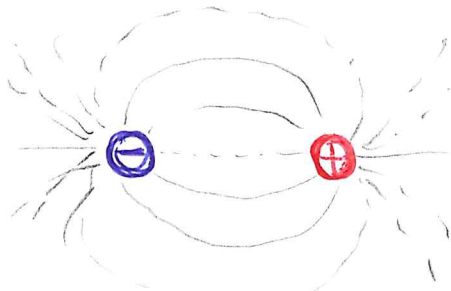
E.g. per un magnete permanente



- Tutte le linee di campo formano un percorso chiuso
- Dove le linee sono più fitte il campo magnetico è più intenso

Conseguenza del fatto che non esistono Monopoli magnetici isolati.

Nota: le linee di forza del campo magnetico generate da un magnete rettilineo, hanno la stessa configurazione del campo elettrico generato da un dipolo elettrico



- Poli magnetici uguali si respingono, mentre poli magnetici opposti si attraggono

Prodotto Vettoriale (vedremo in seguito)

$$\vec{a} \times \vec{b} = \vec{c} \rightarrow \text{il prodotto vettoriale dà come risultato 1 vettore}$$

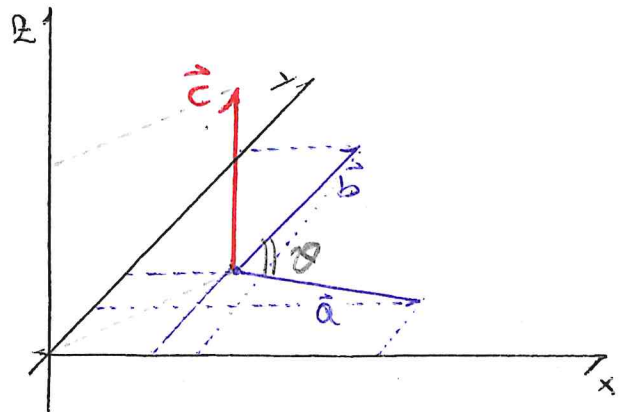
• Modulo:

$$|\vec{c}| = c = ab \sin \theta$$

$$\theta = 90^\circ \Rightarrow \vec{a} \perp \vec{b}$$

• Direzione:

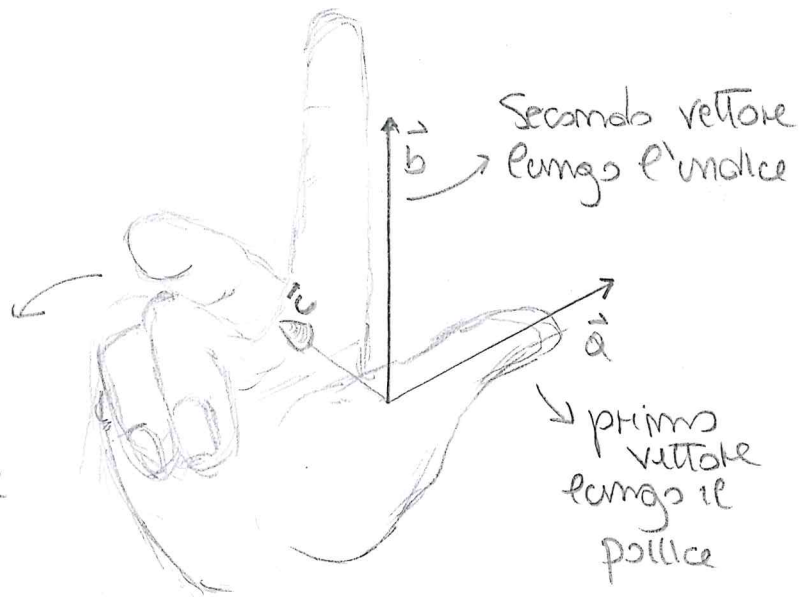
Perpendicolare al piano
definito da $\vec{a}$ & $\vec{b}$



• Verso:

Regola della mano destra

Il medio,
messo $\perp$
al pollice ed
indice dà il
verso di $\vec{c}$



→ Dalla regola della mano destra segue che:

$$\vec{a} \times \vec{b} = -(\vec{b} \times \vec{a})$$

• Usando i versori abbiamo che:

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_x \hat{i} + a_y \hat{j}) \times (b_x \hat{i} + b_y \hat{j}) = (a_x b_y - a_y b_x) \hat{k}$$

NB per semplicità
ho preso 2 vettori
che giacciono sul
piano xy

il vettore
risultante è
 $\perp$ al piano xy

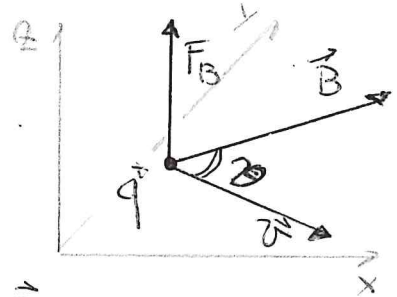
Forza Magnetica su una particella carica

→ Sperimentalmente si osserva che ^{se} una particella carica ferma in un campo magnetico non agisce alcuna forza.

Se invece la particella si muove con una velocità $\vec{v}$ all'interno di un campo magnetico $\vec{B}$, su essa agisce una forza:

Forza di
Lorentz

$$\vec{F}_B = q \vec{v} \times \vec{B}$$



→ direzione della forza $\perp$ al piano $\vec{v}\vec{B}$

→ Modulo: $F_B = q v B \sin \theta$

→ Concettualmente abbiamo che la carica elettrica in moto genera un campo magnetico che interagisce col campo magnetico esterno $\vec{B}$.

N.B. Essendo la forza $\perp$ a $\vec{v}$, e quindi $\perp$ allo spostamento

$$W = \vec{F}_B \cdot \vec{s} = 0 = \Delta E_k = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2$$

ovvero il modulo della velocità non cambia, ma cambia solo la direzione $\rightarrow$ la $\vec{F}_B$ genera solo un'accelerazione centripeta

Unità di misura B: Tesla

$$T = \frac{N}{A \cdot m} = \frac{kg}{A \cdot s^2}$$

$\swarrow$ $\frac{C \cdot m}{s}$ $\searrow$ $\frac{C}{s}$
 $[q]$ $[v]$

→ Analogamente se consideriamo un conduttore percorso da corrente (con cariche che si muovono con una velocità $\vec{v}_d$) immerso in un campo magnetico, ciascun elettrone subisce la forza:

$$\vec{F} = -e \vec{v}_d \times \vec{B}$$

→ Considerando il moto di tutti gli elettroni lungo un conduttore filiforme di lunghezza l , rettilineo:

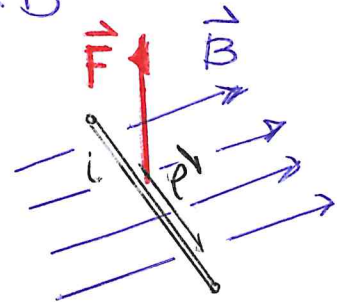
$$\vec{F} = q \vec{v}_d \times \vec{B} = i \frac{e}{v_d} \vec{v}_d \times \vec{B} = i \vec{l} \times \vec{B}$$

carica
Totale
che scorre
nel filo

$$= i t = i \frac{e}{v_d}$$

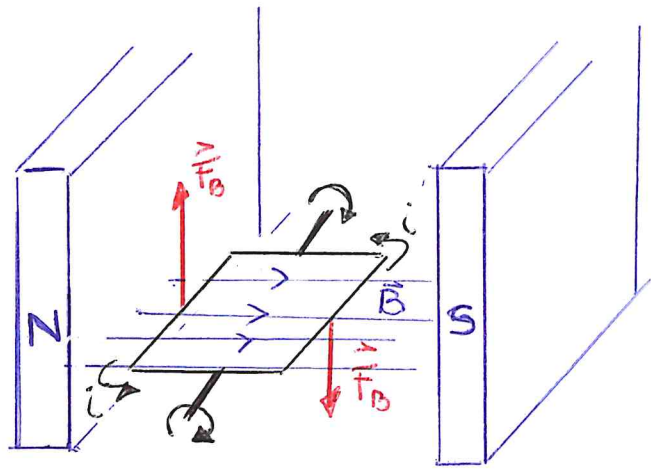
tempo necessario
a percorrere il filo

Vettore
lunghezza



* Motore Elettrico

Una spita, percorsa da corrente, ed immersa in un campo magnetico,



Sperimenta una coppia di forze $\vec{F}_B$ & $-\vec{F}_B$ nei due lati $\perp$ al campo $\vec{B}$, che generano un momento torcente; ovvero la spita inizia a ruotare.

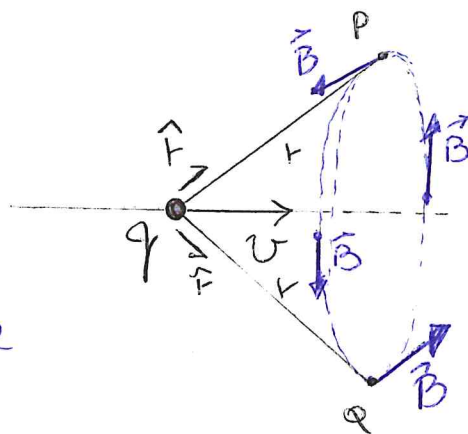
Questo meccanismo è alla base del funzionamento dei motori elettrici.

* Campo Magnetico Generato da cariche in moto (stazionario)

→ Una carica in moto genera in un punto un campo magnetico pari a

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$

Velocità della carica
Vettore del raggio posizione del punto
distanza dalla carica del punto



Nota: così come una carica statica subisce la forza di un campo elettrico, e genera un campo elettrico, così una carica in moto subisce la forza di un campo magnetico, e genera un campo magnetico

→ ricordando: $\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$ possiamo scrivere

$$\vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \vec{v} \times \vec{E} \Rightarrow$$

Si intuisce da questa formula la stretta relazione tra campo elettrico e magnetico prodotti da una carica

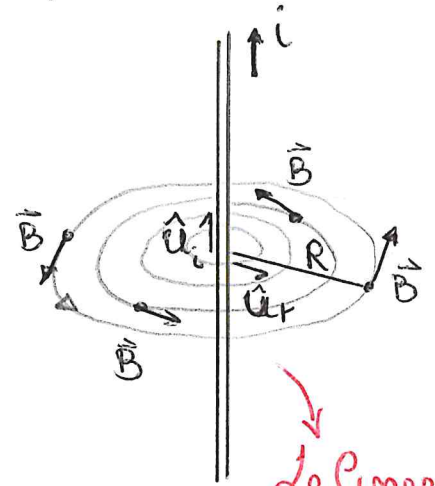
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T } \frac{\text{m}}{\text{A}}$$

↓
Permeabilità Magnetica nel vuoto

→ Un filo rettilineo percorso da corrente - quindi al cui interno scottano delle cariche - produrrà un campo magnetico (statico):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \hat{u}_i \times \hat{r}$$

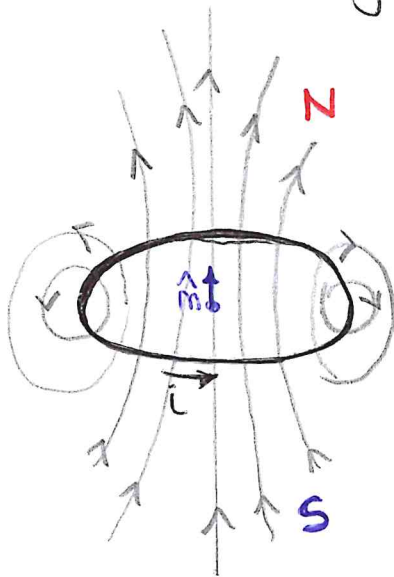
$\hat{u}_i$: Versore del filo
 $\hat{r}$: Versore di R
 $\hat{u}_i \times \hat{r}$: Versore tangente alla circonferenza avente centro in filo, e perpendicolare al filo
 $2\pi R$: distanza dal filo



Le linee di campo sono circonferenze concentriche al filo

ovvero pieghiamo il filo fino a formare un percorso chiuso

→ Se prendiamo una spira percorsa da corrente, il campo prodotto è analogo a quello di una barra magnetica:



Al centro della spira il campo magnetico è massimo e vale:

$$\vec{B}_{\text{MAX}} = \frac{\mu_0 i}{2R} \hat{m}$$

$\hat{m}$: Versore normale al piano della spira

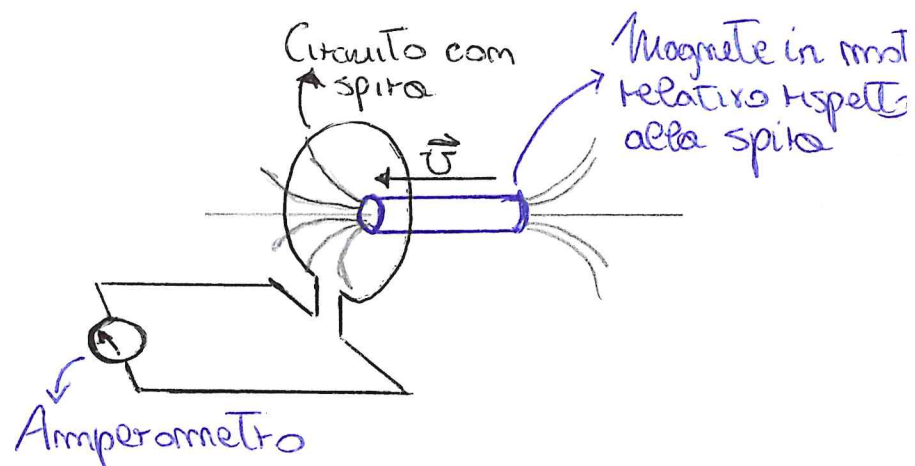
Induzione Elettromagnetica

→ Abbiamo visto che una carica in quiete genera un campo elettrico statico, mentre una carica in moto stazionario, genera un campo magnetico statico (ovvero che non varia nel tempo)

↓
Un campo magnetico variabile ^{nel tempo} genera un campo elettrico, e viceversa $\Rightarrow$ Non è possibile "separarne",
Un campo elettrico ^{e magnetico} variabile, ma vanno riuniti sotto il concetto più generale di CAMPO ELETTROMAGNETICO. (leggi di Maxwell)

Esempio:

- 1) Spira attraversata da un magnete con velocità relativa;



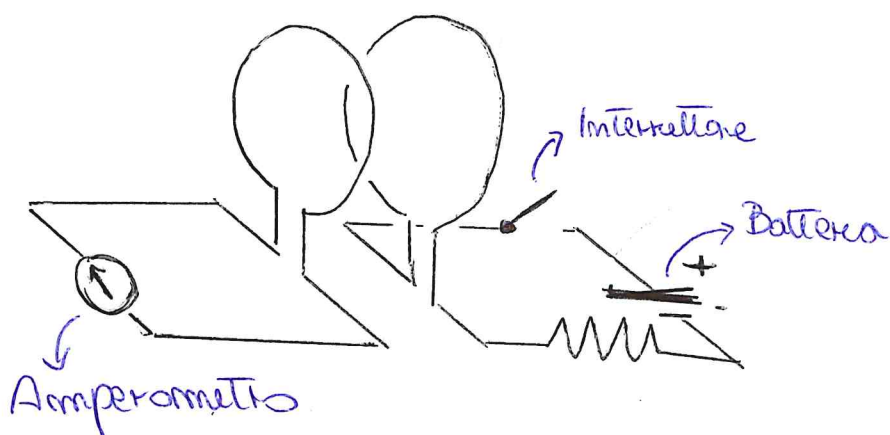
Si osserva che:

- i) Il circuito è attraversato da corrente se c'è una velocità relativa tra magnete e spira.
- ii) Cambiando direzione alla velocità, la corrente scorre in senso contrario.
- iii) Più è veloce il movimento, più intensa è la corrente.

2) Due spire vicine, di cui una collegata ad una batteria e dotata di un interruttore.

Si osserva:

i) Chiudendo l'interruttore, permettendo alla corrente di fluire nel circuito di destra, si



misura il passaggio di corrente anche sul circuito di sinistra per un istante.

ii) Aprendo il circuito di destra, si misura nuovamente il passaggio di corrente per un istante nel circuito di sinistra, ma nel verso opposto.

⇒ In entrambi gli esperimenti abbiamo una corrente **INDOTTA** nella spira (e una corrispondente Forza elettromotrice -f.e.m.- indotta, ovvero un lavoro svolto per spostare le cariche all'interno della spira)

$$\left[\begin{array}{l} \text{f.e.m.: } \mathcal{E} = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{s} \Rightarrow \text{Lavoro, per unità di carica, svolto} \\ \text{dal campo elettrico } \vec{E}, \text{ lungo il} \\ \text{circuito chiuso } c \end{array} \right]$$

legge di Faraday dell'induzione:

→ Faraday capì che la corrente (e la f.e.m.) vengono indotte nel circuito ogni qual volta varia la "quantità" di campo magnetico che attraversa la spira.

Definendo il flusso magnetico attraverso una superficie come:

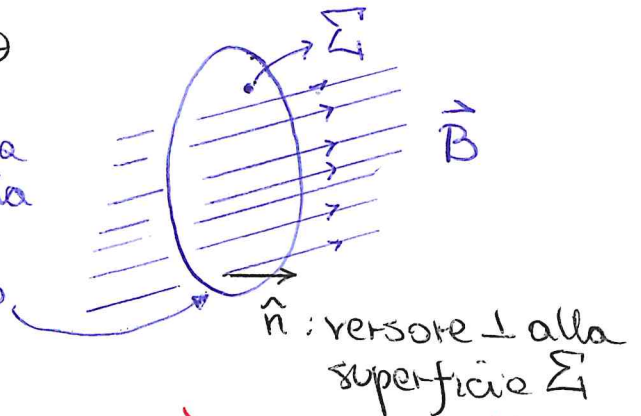
↳ (Assumiamo campo $\vec{B}$ uniforme per semplicità)

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{\Sigma} = B \Sigma \cos \theta$$

superficie
e.g. della
spira

campo
magnetico
uniforme

Angolo tra la
normale alla
superficie
ed il campo



La f.e.m. indotta in una spira è uguale alla variazione temporale di flusso magnetico attraverso la stessa, cambiato di segno:

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

legge di Faraday

$$\left[\text{per } \Delta t \rightarrow 0 \quad \mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \right]$$

mentre la corrente indotta è:

$$i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = - \frac{1}{R} \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Resistenza del circuito

NOTA
⇒ È importante notare il segno meno nella relazione (legge di Lenz): L'effetto della f.e.m. indotta è sempre tale da **OPPORSI** alla causa che ha generato il fenomeno (questo andamento è concorde al principio di conservazione dell'energia)

⇒ Possiamo quindi indurre una f.e.m.:

- 1) Variando l'intensità di $\vec{B}$ nel tempo
- 2) Variando la superficie della spira (o bobina) che giace nel campo magnetico
- 3) Variando l'angolo tra la direzione del campo magnetico e la normale alla superficie della spira.

→ Il caso 2 & 3 possono essere ricondotti alla forza di Lorentz.

→ Per il caso 1 invece si ha che la variazione di $\vec{B}$ genera un campo elettrico INDOTTO, responsabile del moto delle cariche nella spira

* Legge dell'Induzione di Maxwell:

→ Un campo elettrico variabile induce un campo magnetico.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \underbrace{\mu_0 i}_{\text{legge di Ampere}} + \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}_{\text{legge di Ampere-Maxwell}}$$

legge di
Ampere-Maxwell

2 Sorgenti possibili
di campo Magnetico:

Corrente
di
conduzione

Variazione di
campo elettrico
nel tempo

Quindi:

→ Campi elettrici/magnetici variabili nel tempo
producono campi magnetici/elettrici indotti.
Questo fenomeno è alla base della propagazione
delle onde elettromagnetiche