Dall'elettromagnetismo alle equazioni di Maxwell (cap.20)

- **Esperimento di Oersted** [Christian Oersted Dk, 1777-1851]: Il pasaggio di corrente elettrica in un filo genera un campo magnetico in cui linee di forza* del vettore campo magnetico B sono le infinite circonferenze concentriche di cui il filo costituisce l'asse, il verso del vettore campo magnetico si può ottenere con la regola della mano destra e il modulo vale:

$B=\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{I}{r}$ (***Legge empirica di Biot e Savart***)

- **Esperimento di Ampère** [André-Marie Ampère FR,1775-1836]: Due fili conduttori rettilinei e paralleli si attraggono se la corrente li percorre nello stesso verso e si respingono se la corrente li percorre in versi opposti, con una

forza: $F_l=\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{L\cdot\ I_1\cdot I_2}{r}$

- **Principio di equivalenza di Ampère**: "un ago magnetico posto all'interno di un campo magnetico si comporta come una spira, ovvero risente di una coppia di forze che tende a farlo ruotare"

- **Esperimenti di Faraday** [Michael Faraday UK,1791-1867]: un magnete esercita una forza su un conduttore percorso da corrente $\vec{F}_{magnetica}=I\cdot\vec{L}\times\vec{B}$

B si misura in tesla $1T=\frac{1N\cdot s}{C\cdot m}$ [Nikola Tesla USA,1856-1953]

- **Forza di Lorentz** [Hendrik Lorentz NL,1853-1928]: su una carica in moto in un campo magnetico: $\vec{F}=q\,\vec{v}\times\vec{B}$ o in generale in presenza anche di un campo elettrico: $\vec{F}=q\vec{E}+q\,\vec{v}\times\vec{B}$

campo elettrico $\vec{E}$	**campo magnetico** $\vec{B}$
Teorema di Gauss per il campo elettrico: il flusso del campo elettrico E attraverso una qualsiasi superficie chiusa S vale: $\Phi_{sup.ch.}(\vec{E})=\boxed{\int_S\vec{E}\cdot d\vec{S}\ =\frac{\sum q_{interna}}{\varepsilon_0}}$	**Teorema di Gauss per il campo magnetico**: il flusso del campo magnetico B attraverso una qualsiasi superficie chiusa S è nullo $\Phi_{sup.ch.}(\vec{B})=\boxed{\int_S\vec{B}\cdot d\vec{S}\ =0}$
le linee di forza* sono **linee aperte** che iniziano da una carica positiva e finiscono su una carica negativa	le linee di forza* sono **linee chiuse**
il teorema di Gauss esprime matematicamente il fatto che le cariche elettriche sono "**sorgenti**" di un campo elettrico le quali possono essere positive o negative e possono esistere isolate	il teorema di Gauss esprime matematicamente il fatto che non possono esistere poli magnetici isolati
La **circuitazione** del campo elettrostatico lungo ogni linea chiusa γ è nulla $\Gamma_\gamma(\vec{E})=\boxed{\oint_{linea\ ch.\gamma}\vec{E}\cdot d\vec{l}=0}$	**Teorema della circuitazione di Ampère**: la circuitazione di un qualunque campo magnetico B lungo una linea chiusa γ è uguale alla somma algebrica delle correnti concatenate alla linea stessa *(una corrente I è concatenata ad una linea chiusa γ se attraversa la superficie delimitata dalla linea chiusa)* $\Gamma_\gamma(\vec{B})=\boxed{\oint_{linea\ ch.\gamma}\vec{B}\cdot d\vec{l}=\mu_0\cdot\sum_n I_n}$
questo integrale esprime matematicamente il fatto che → il campo **E è un campo conservativo** → si può definire una energia potenziale elettrica (come già fatto per il cmapo gravitazionale) **→ attenzione: questo è vero solo se non sono presenti variazioni del flusso del campo magnetico**	il teorema della circuitazione di Ampère esprime matematicamente il fatto che → **il campo B è un campo non conservativo** → non si può parlare di energia potenziale magnetica → le correnti sono "**sorgenti**" di un campo magnetico **→ attenzione: questo è vero solo se non sono presenti variazioni del flusso del campo elettrico**
** $\varepsilon_0=8{,}85\cdot10^{-12}\frac{C^2}{N\cdot m^2}$ *costante dielettrica nel vuoto* costante universale (compare nella legge di Coulomb)	** $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}\frac{T\cdot m}{A}$ permeabilità magnetica nel vuoto costante universale (compare nella legge di Biot-Savart)

Si osservi che il campo elettrico E non compare nelle equazioni che descrivono il campo magnetico B e viceversa

* Le linee di forza di un campo:
(1) sono più fitte dove il campo è più intenso *(criterio di Faraday, indicano il modulo)*
(2) la cui tangente, in ogni suo punto, è diretta come il campo magnetico in quel punto *(indicano direzione e verso)*
(3) non si intersecano mai *(altrimenti ci sarebbero più rette tangenti nello stesso punto)*

- OSSERVAZIONE: quando i campi elettrici e magnetici sono costanti nel tempo possono essere trattati separatamente, ma quando essi variano, le loro interazioni reciproche non posso più essere trascurate.

2 Quando il campo magnetico varia nel tempo varia anche il suo flusso attraverso una superficie S e nel bordo γ di S si origina una *f.e.m.* indotta data dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz

$$f.e.m. = -\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t} \xrightarrow[\Delta t \to 0]{} -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}$$

se dividiamo il circuito in tanti segmenti infinitesimi e introduciamo per ciascuno di essi il vettore $d\vec{l}$ orientato nel verso di spostamento della corrente e il cui modulo è pari alla lunghezza del segmento e ricordando che la f.e.m. è definita come il rapporto tra il lavoro effettuato dalla forze elettrica per spostare una carica q lungo il circuito e la carica stessa, si ha: $f.e.m. = \frac{\sum_k \vec{F}_k \cdot d\vec{l}_k}{q} = \sum \frac{\vec{F}_k}{q} \cdot d\vec{l}_k = \sum \vec{E}_k \cdot d\vec{l}_k = \oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l}$

(un integrale di questo tipo è detto "***circuitazione***")

Quindi la **LEGGE DI FARADAY-NEUMANN-LENZ** nel caso generale diventa: $f.e.m. = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt} = \oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l}$

$$\Gamma_\gamma(\vec{E}) = \boxed{\oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}}$$

questo integrale, chiamato **circuitazione del campo elettrico E**, esprime matematicamente il fatto che variazioni di flusso magnetico generano un campo elettrico e quindi ne sono "sorgenti"

La CORRENTE di SPOSTAMENTO e la LEGGE di AMPÈRE-MAXWELL: secondo la legge di Faraday-Neumann-Lenz, una variazione di flusso magnetico genera un campo elettrico. Maxwell ipotizzò che anche una variazione di campo elettrico potesse generare un campo magnetico. Egli chiamò tale corrente corrente di spostamento I_s e ne determino il valore:

$$I_s = \varepsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}$$

Inserendola al secondo membro del teorema della circuitazione di Ampère rendendolo valido sia nelle situazioni statiche che dinamiche:

$$\oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot (I + I_s) = \mu_0 I + \mu_0 I_s = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}$$

$$\boxed{\oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}}$$

questo integrale, chiamato **circuitazione del campo magnetico B**, esprime matematicamente il fatto che variazioni di flusso elettrico generano un campo magnetico e quindi ne sono "sorgenti"

Le cariche elettriche sono “sorgenti” di un campo elettrico

le variazioni di flusso di campo magnetico sono “sorgenti” di un campo elettrico

Le equazioni di MAXWELL:

1. $\boxed{\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum q_{interna}}{\varepsilon_0}}$ Legge di GAUSS per il campo elettrico — C.F.Gauss (DE, 1777-1855)

2. $\boxed{\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0}$ Legge di GAUSS per il campo magnetico

3. $\boxed{\oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi\left(\vec{B}\right)}{dt}}$ Legge di FARADAY-NEUMANN-LENZ — M.Faraday (UK, 1791-1867)

F.E.Neumann (De,1798-1895)
H.Lenz (Ru, 1804-1865)

4. $\boxed{\oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi\left(\vec{E}\right)}{dt}}$ Legge di AMPÈRE-MAXWELL — A.M.Ampère (Fr, 1775-1836)

J.C.Maxwell (UK, 1831-1879)

le correnti sono “sorgenti” di un campo magnetico

$$\frac{1}{c^2} = \mu_0 \varepsilon_0$$

le variazioni di flusso di campo elettrico sono “sorgenti” di un campo magnetico

H.R.Hertz (De,1857-1894) rileva per primo l’esistenza delle onde e.m.
G.Marconi (IT,1874-1937) sviluppa un efficace sistema di telecomunicazioni per mezzo di onde e.m.

I campi E e B possono esistere anche in assenza di cariche elettriche e di correnti elettriche, inoltre la variazione di uno di essi genera l’altro e la variazione di questo, a sua volta, si riperquote sul primo; ciò produce due campi variabili nel tempo che si propagano nello spazio vuoto: tali equazioni descrivono il comportamento di tutte le onde elettromagnetiche e quindi anche della luce