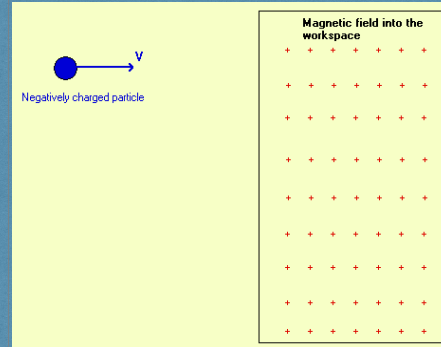
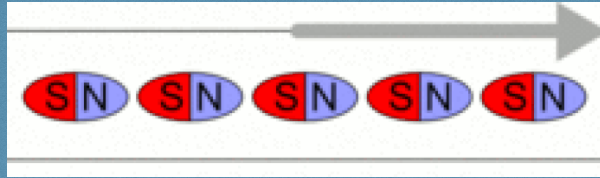
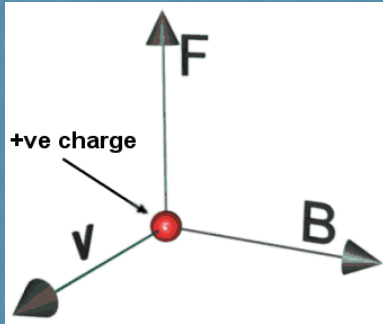


Scuola estiva fisica 2026

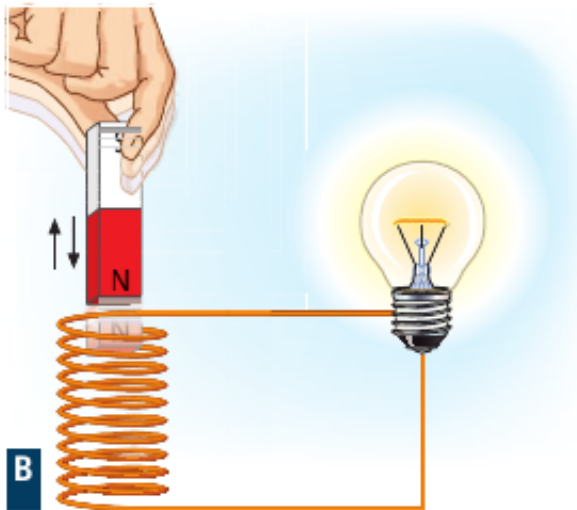
Dall'induzione e.m. alle onde e.m.

Le equazioni di Maxwell

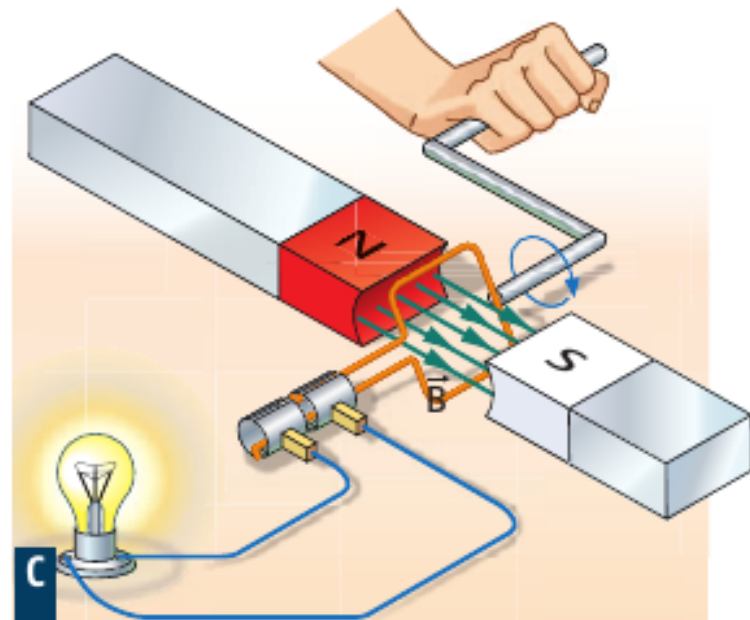


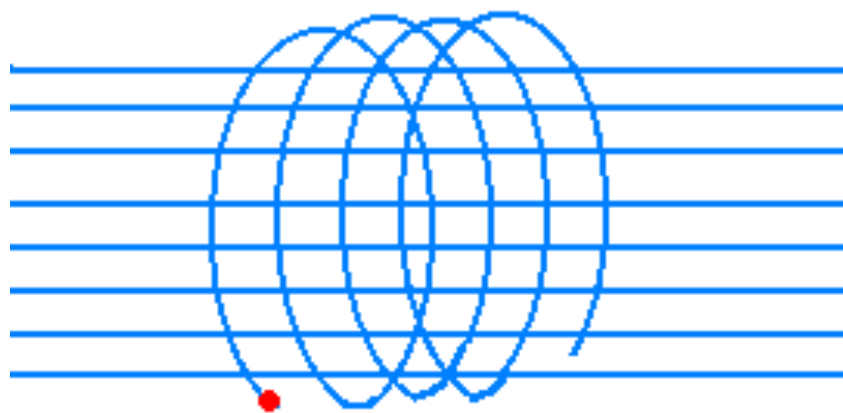
L'intensità della corrente indotta dipende da tre grandezze: la **variazione del campo magnetico esterno**, l'**area del circuito indotto** e il suo **orientamento**. Si verifica che la corrente indotta è più intensa quando:

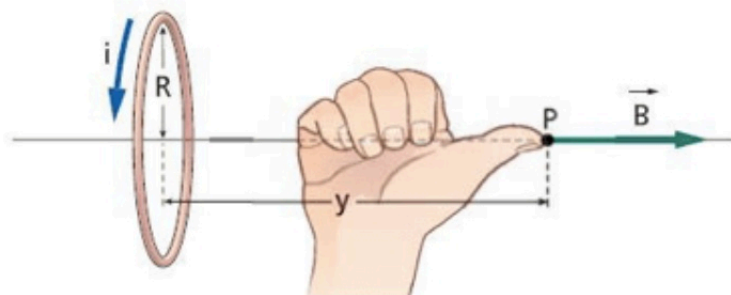
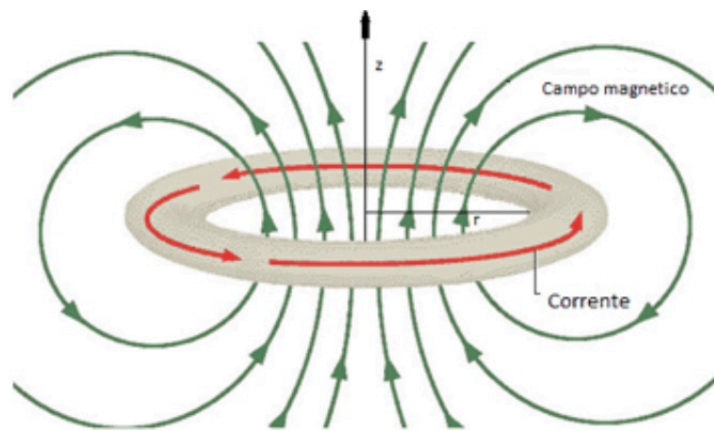
- la bobina ha un maggior numero di spire, così che l'area del circuito è più grande;



- cambiamo più rapidamente l'orientazione del circuito rispetto alle linee del campo magnetico.

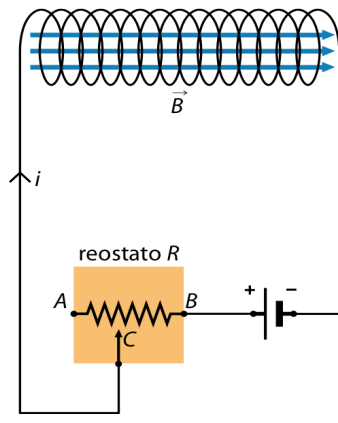






C'è variazione di flusso, quindi c'è **tensione indotta**. Si parla di **autoinduzione** e di tensione **autoindotta**. Per la legge di Faraday-Neumann-Lenz:

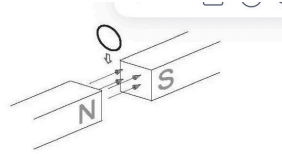
Con il reostato si può modificare la corrente che passa nella bobina. Al variare della corrente, varia il flusso del campo che attraversa la bobina stessa.



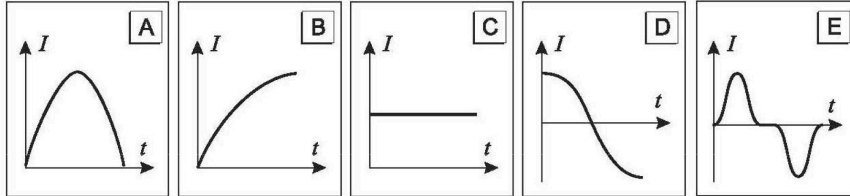
$$\Phi_1(B) = L \cdot i_1 \quad \Phi_2(B) = L \cdot i_2$$

$$\Delta V_{\text{autoindotta}} = - \frac{\Delta \Phi(B)}{\Delta T} = \frac{-L \cdot \Delta i}{\Delta t}$$

Una spira circolare metallica scende verticalmente a velocità costante e attraversa una regione in cui si trova un campo magnetico orizzontale e uniforme; durante il moto l'asse della spira si mantiene parallelo al campo magnetico.



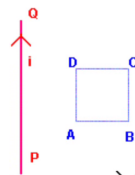
- Quale dei grafici seguenti rappresenta meglio l'intensità della corrente indotta nella spira in funzione del tempo, tra l'istante in cui la spira inizia a entrare nella regione di campo magnetico e quello in cui ne esce completamente?



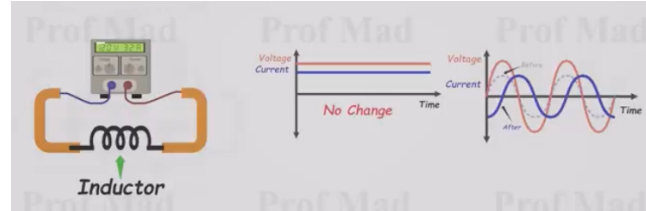
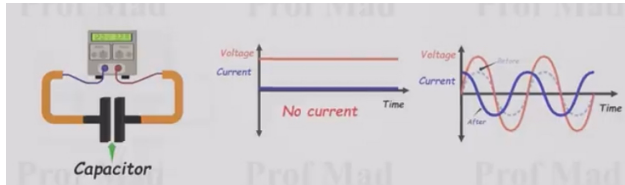
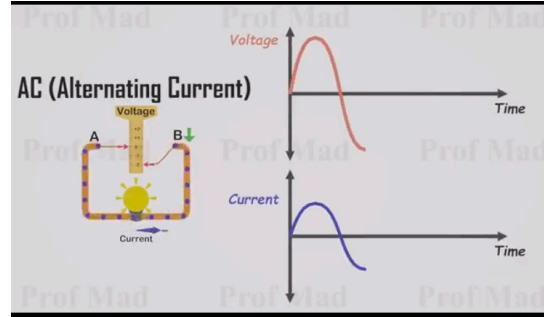
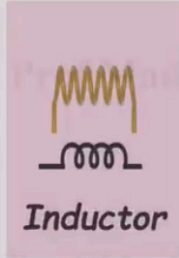
Problema discutiamo insieme

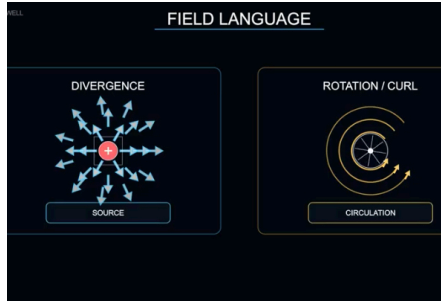
Una spira di forma quadrata di lato $L=1$ m ruota attorno ad un asse orizzontale con una velocità angolare $\omega=2\pi$ rad/s. La spira è immersa in un campo magnetico uniforme $B=2$ T diretto lungo l'asse z , ortogonale all'asse della spira. La spira, di resistenza trascurabile, è connessa ad una resistenza di carico $R=0.2$ Ω . Calcolare:

- 1) la corrente che circola nella spira in funzione del tempo.
- 2) il momento massimo che agisce sulla spira
- 3) l'energia dissipata sulla resistenza in $\Delta t=10$ s
- 4) la somma in valore assoluto delle cariche che circolano nella spira in $\Delta t=10$ s.



Resistance & Reactance





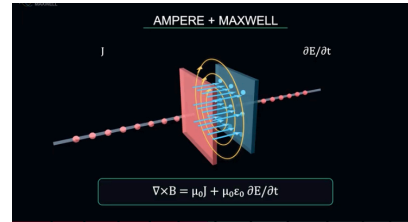
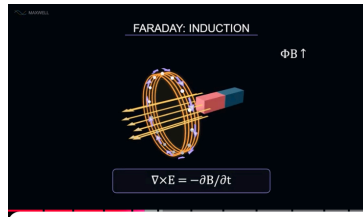
Maxwell's Equations

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

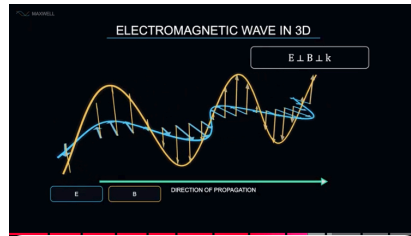
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



ALL FOUR EQUATIONS

$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ CHARGES & ELECTRIC E	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ NO MONOPOLIC CHARGES
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ CHANGING B & INDUCED E	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ CURRENT & CHANGING E INDUCE B

2 SOURCE LAWS • 2 COUPLING LAWS



SPEED OF LIGHT

ϵ_0
VACUUM PERMITTIVITY

μ_0
VACUUM PERMEABILITY

$$1/\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

MEASURED SPEED OF LIGHT

- In "assenza di sorgenti" (cariche e correnti)

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

il campo di induzione magnetica (non costante)
agisce come sorgente del campo elettrico
ed

il campo elettrico (non costante) agisce come
sorgente del campo di induzione magnetica

- In condizioni stazionarie

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

In condizioni non stazionarie

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Legge di
Faraday-Neumann-Lenz

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Teorema di
Ampere-Maxwell

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{\partial B_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

Consideriamo le eq. di Maxwell in assenza di sorgenti
esplicitiamo gli operatori differenziali
e, per semplicità, consideriamo onde piane
($E_y = \cos t$, $E_z = \cos t$, $B_y = \cos t$, $B_z = \cos t$)

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{\partial B_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

con qualche passaggio possiamo ottenere
un'equazione che contiene solo E_y

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial B_z}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial t} - \frac{\partial^2 B_z}{\partial t \partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

con qualche passaggio possiamo ottenere
un'equazione che contiene solo E_y

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial B_z}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial t \partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

Dalle equazioni di Maxwell all'equazione delle onde

- Le componenti "trasversali" (y e z) del campo elettrico e del campo di induzione magnetica devono rispettare l'equazione delle onde (piane)

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

$$\frac{1}{c^2} = \epsilon_0 \mu_0 \Rightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

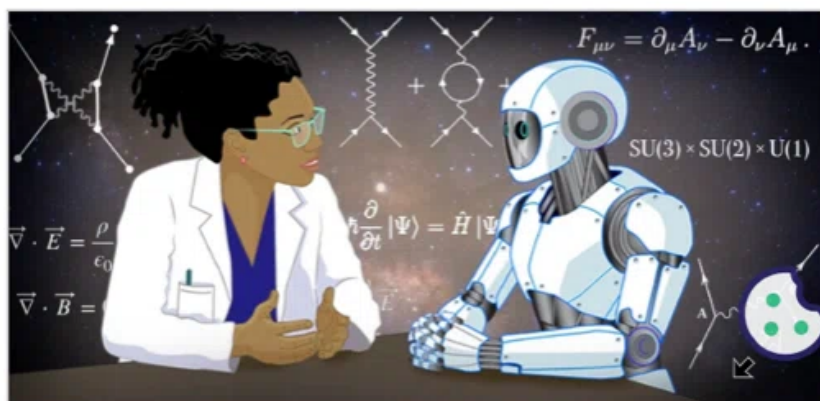
Le equazioni di Maxwell e le onde elettromagnetiche

- I campi elettromagnetici possono esistere in regioni lontane (spazialmente e temporalmente) dalle cariche e correnti che li hanno generato
- Tali campi si comportano come onde (onde elettromagnetiche) che si propagano con velocità

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{nel vuoto})$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} < c \quad (\text{nella materia})$$

- Le onde elettromagnetiche sono trasversali



I ricercatori stanno insegnando ai modelli di intelligenza artificiale il linguaggio della fisica delle particelle, dando loro la capacità di comporre nuove teorie. Ma l'input umano rimane essenziale.