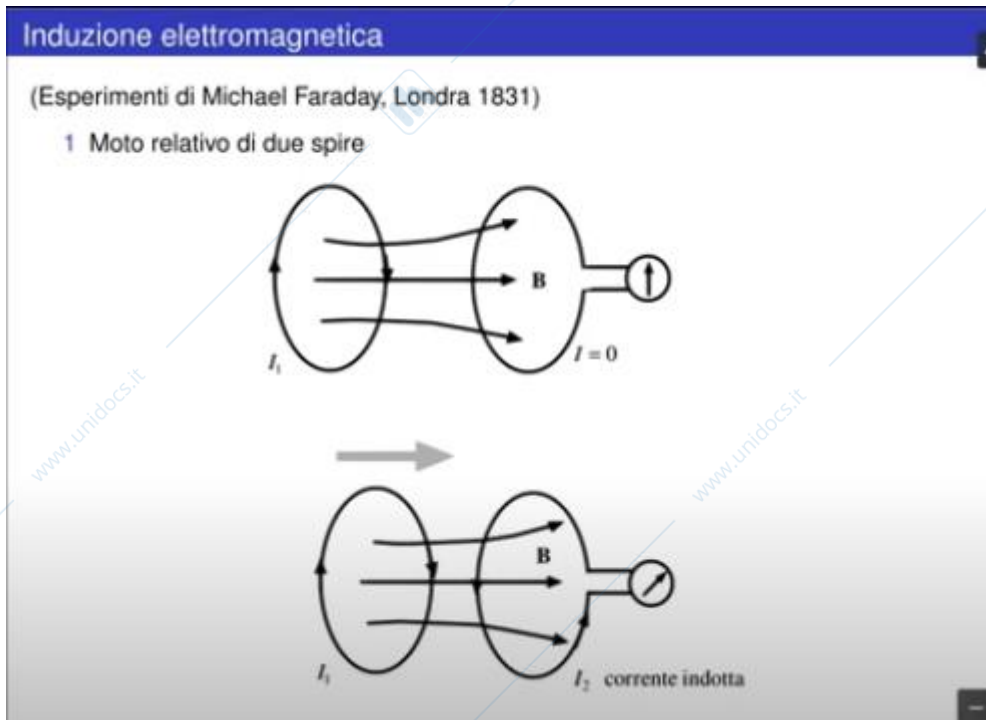


Continuazione campo magnetico..

11. forza elettromotrice indotta:



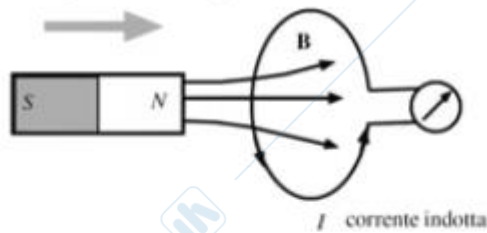
vediamo come campo elettrico e campo magnetico sono collegati e interdipendenti. Gli effetti sono stati scoperti da Faraday e riguardano l'influenza che ha un campo magnetico su un circuito elettrico.

Ad esempio, si possono avere queste situazioni:

abbiamo una spira che produce un campo magnetico B ; abbiamo una seconda spira dove introduciamo un amperometro molto sensibile anche a correnti molto piccole.

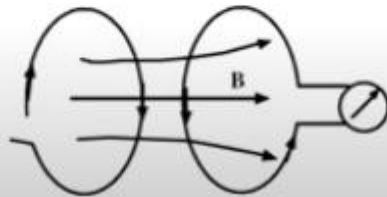
Se avviciniamo la spira che produce il campo alla spira con l'amperometro si osserva una corrente indotta, senza che vi sia un generatore presente in questo circuito.

2 Moto del magnete rispetto ad una spira



3 Mutua induzione

$$\begin{aligned} t < 0 & \quad I = 0 \\ t = 0 & \quad I = I_1 \\ t > 0 & \quad I = I_1 \end{aligned}$$



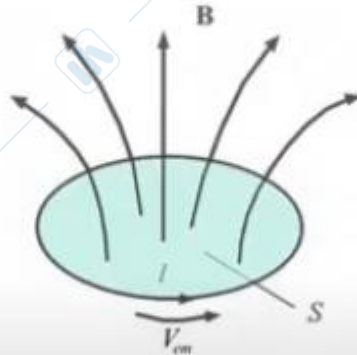
$$\begin{aligned} t < 0 & \quad I = 0 \\ t = 0 & \quad I = I_2 \end{aligned}$$

Questo succede se un magnete viene avvicinato alla spira. Il campo magnetico all'interno della spira con l'amperometro cambia e si induce una corrente su questo circuito.

La corrente nel primo circuito viene fatta variare senza muovere la spira. Ad esempio accendendo un generatore di corrente nel primo circuito, la corrente passa da zero ad un certo valore massimo; durante questa fase transitoria circola corrente anche nel secondo circuito, senza che sia presente un generatore.

Legge di Faraday

La variazione nel tempo del flusso del campo magnetico Φ_B attraverso la spira produce una forza elettromotrice indotta nella spira



La forza elettromotrice indotta può essere anche scritta in termini di campo elettrico:

$$V_{em} = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Tutti questi effetti sono spiegati dalla legge di Faraday.

Quindi se noi andiamo a considerare il campo elettrico lungo questa spira. In questo circuito chiuso l'integrale del campo elettrico è diverso da zero, perché in ogni punto della spira si genera un campo elettrico che produce un movimento di cariche lungo la spira.

Legge di Faraday

$$V = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

V forza elettromotrice indotta nella spira

Φ_B flusso del campo magnetico attraverso una superficie che ha come contorno la spira stessa

Osservazioni:

Il flusso può variare in seguito ad una variazione:

- del campo magnetico
- della superficie attraverso cui si calcola Φ_B
 - orientazione della superficie rispetto a \vec{B}
 - porzione di una spira immersa in \vec{B}
 - variazione della geometria della spira

La variazione del flusso del campo magnetico produce una forza elettromotrice indotta nella spira, che è uguale a - la variazione del flusso del campo magnetico sull'intervallo di tempo.

Nel primo caso si parla di variazione del flusso concatenato

- Circuito sorgente di \vec{B} (primario) e circuito secondario fissi nello spazio
 - ⇒ Una variazione della corrente nel circuito primario provoca una variazione del campo magnetico \vec{B}
 - ⇒ la variazione di \vec{B} provoca una variazione di Φ_B

Nel secondo caso si parla di variazione del flusso tagliato

- Il circuito si muove o si deforma in una regione dove è presente un campo magnetico
- alternativamente la sorgente di \vec{B} si muove rispetto al circuito

Non conservatività del campo elettrico indotto

$$V = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Tuttavia la forza elettrica è data da $\vec{F} = q\vec{E}$ e quindi il lavoro del campo elettrico lungo un percorso chiuso, in condizioni non stazionarie diventa:

$$W = qV = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -q \frac{d\Phi_B}{dt}$$

che è in generale diverso da zero

Il campo elettrico che in condizioni stazionarie è un campo conservativo, quando ci si trova in condizioni non stazionarie non è conservativo

Questa non conservazione del lavoro del campo elettrico lungo un percorso chiuso è dovuto al fatto che il campo magnetico è variabile, il flusso del campo magnetico varia nel tempo e genera un campo elettrico non conservativo.

Il campo elettrostatico è conservativo, perché costante.

Intensità della corrente indotta

R resistenza della spira

$$V = \frac{V_{em}}{R} \quad \Rightarrow \quad i = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi_B}{dt}$$

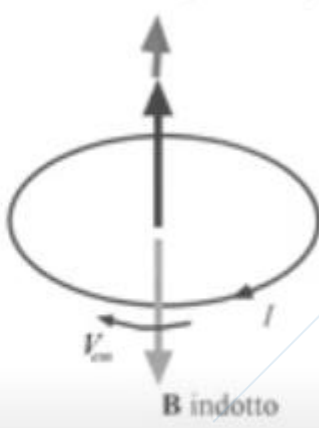
Se una bobina è formata da N spire in serie l'effetto viene moltiplicato per il numero di spire:

$$V_{em} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Legge di Lenz

La corrente indotta genera, un campo magnetico che si oppone alla variazione di flusso che l'ha prodotta.

Il segno (-) nella legge di Faraday esprime la legge di Lenz



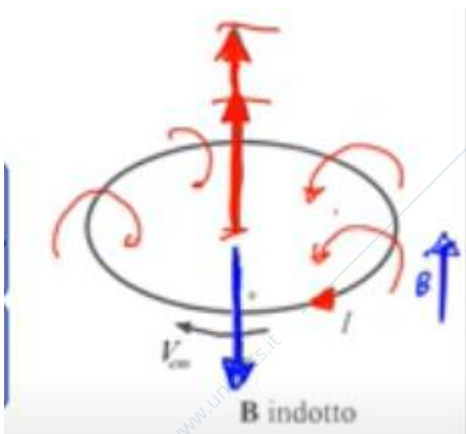
$\Phi_B > 0$ $\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$ $V_{ind} < 0$

La legge di Lenz specifica qual è la natura di questa forza elettromotrice.

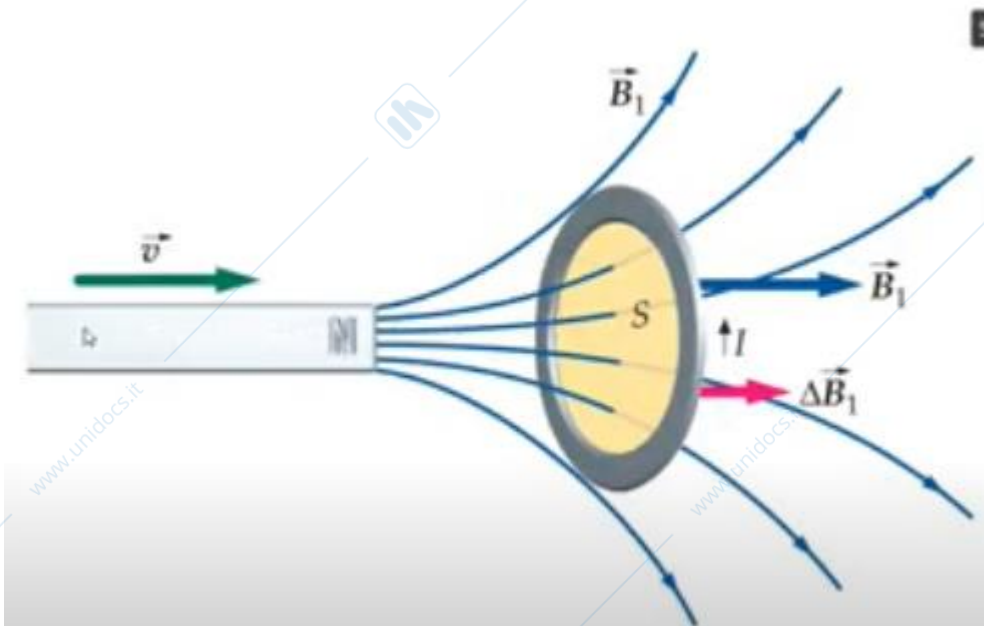
Abbiamo un campo magnetico b , passando da un valore indicato dalla freccia all'altro, si aumenta il campo inducente ed aumenta anche il flusso e questa corrente attraversando la spirale genera un campo magnetico.

Se utilizziamo la regola della mano destra possiamo capire come sono orientate le linee di campo.

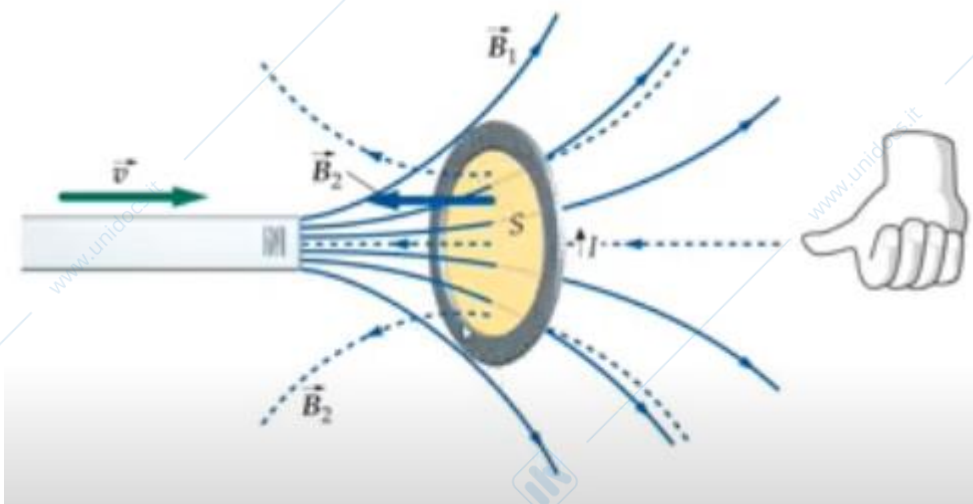
Il campo magnetico generato dalla corrente blu è all'esterno della spirale, ma è orientato in modo opposto all'interno della spirale.



Quindi questo campo magnetico dovuto alla corrente indotta cerca di contrastare la variazione del campo magnetico esterno.



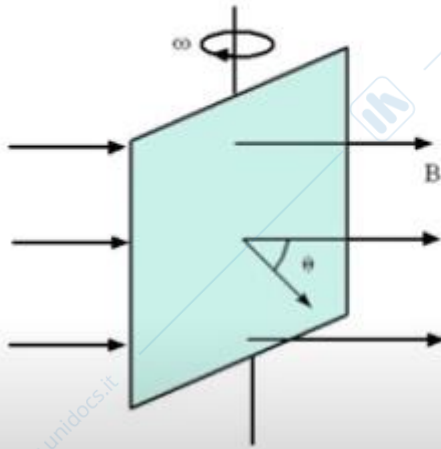
Anche se io avvicino un magnete ad una spirale, il flusso varia, inizia a circolare una corrente e questa corrente cerca di produrre un campo magnetico che si oppone alla variazione del campo esterno.



La regola della mano destra utilizzata con quello che ci permette di vedere il momento magnetico indotto dalla corrente indotta che cerca di contrastare la variazione del flusso.

Applicazioni: generatore di corrente alternata

Spira rotante in campo magnetico



Spira rotante in un campo magnetico uniforme

A area della spira

ω velocità angolare costante

$$\Phi_B = AB \cos \omega t$$

$$V_{em} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = AB\omega \sin \omega t$$

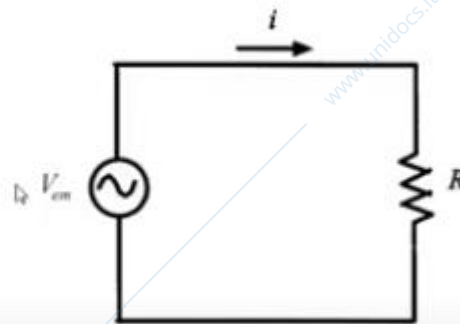
Facendo variare il flusso del campo magnetico attraverso una spira rotante, è possibile generare una corrente alternata, cioè una forza elettromotrice che varia nel tempo seguendo la rotazione di questa spira.

E quindi avere la produzione di energia elettrica sottoforma di corrente alternata.

Si può realizzare in questo modo un generatore di corrente alternata

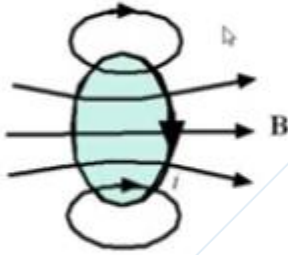
Bobina con N spire rotante in un campo magnetico uniforme
forza elettromotrice alternata

$$V_{em} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = NAB\omega \sin \omega t$$



variando il flusso del campo magnetico si genera una forza elettromotrice che varia in funzione del tempo con andamento sinusoidale.

Autoinduzione



La corrente i genera in campo magnetico \vec{B}
Flusso del campo \vec{B} attraverso creato dalla corrente i

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Ma

$$B \propto i \quad \Rightarrow \quad \Phi_B \propto i$$

Si può scrivere:

$$\Phi_B = Li$$

L viene detto coefficiente di autoinduzione del circuito o induttanza

Se il circuito non può muoversi ed è indeformabile l'induttanza è una costante del circuito

Unità di misura S.I.:

$$\frac{T m^2}{A} = \frac{Wb m^2}{m^2 A} = \frac{Wb}{A} = \frac{Vs}{A} = \Omega s = H = \text{henry}$$

La stessa produzione di un campo magnetico richiede energia proprio come è necessario compiere del lavoro per creare un campo elettrico nel condensatore.

Quindi anche il campo magnetico è un modo per immagazzinare energia. Anche il campo magnetico ha energia.

Energia del campo magnetico

Per effetto del fenomeno dell'autoinduzione occorre compiere lavoro per variare la corrente nel circuito poiché ci si deve opporre alla forza elettromotrice indotta:

$$dW = -V_{em} dq = L \frac{di}{dt} dq = Li di$$

Il lavoro totale che bisogna compiere per portare la corrente al valore I vale:

$$U = \int_0^I Li di = \frac{1}{2} LI^2$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2$$

Questa espressione ha un'interpretazione diretta se si considera il caso di un campo magnetico uniforme e cioè il caso di un solenoide.

Ha una forma simile a quella per il condensatore.

L viene detto coefficiente di auto induzione.

Energia del campo magnetico in un solenoide

66/

$$L = \mu_0 n^2 \pi R^2 l \quad B = \mu_0 n i$$

$$U = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 (\pi R^2 l) i^2 = \frac{1}{2 \mu_0} (\pi R^2 l) B^2$$

Il lavoro speso per incrementare la corrente è quindi associabile al campo magnetico creato all'interno del solenoide.

Si può esprimere la densità di energia magnetica come:

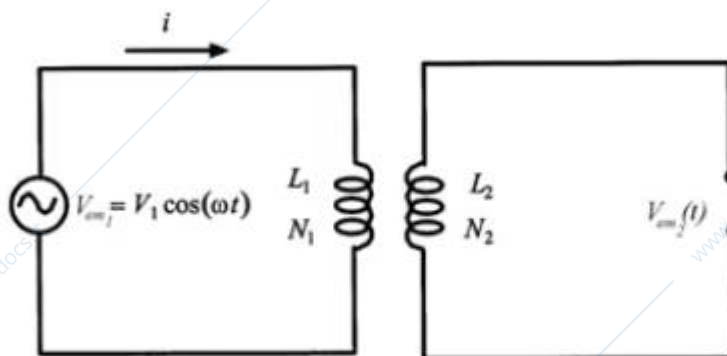
$$u_B = \frac{U}{\text{volume}} \Rightarrow \boxed{u_B = \frac{1}{2 \mu_0} B^2}$$

analoga a quanto evidenziato per il campo elettrico:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Per il campo elettrico avevamo ottenuto l'espressione dell'energia per unità di volume immagazzinata in un condensatore.

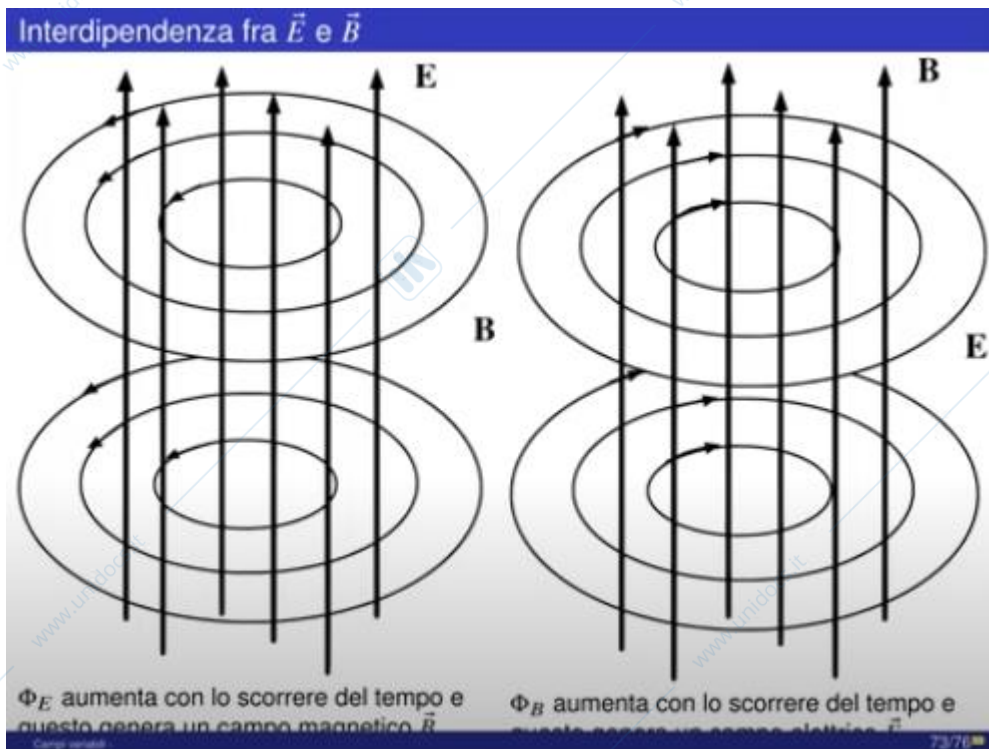
Trasformatori



Due circuiti accoppiati magneticamente. Sono costituiti da avvolgimenti con più spire N_1 per il circuito a sinistra (detto primario), N_2 per il circuito a destra (detto secondario). Per il primario si ha che

$$v_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} = 0 \quad V_1 \cos \omega t - L_1 \frac{di_1}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad i_1 = \frac{V_1}{\omega L_1} \sin \omega t$$

I trasformatori permettono di variare la tensione (+/-) alternata sfruttando il fenomeno di induzione elettromagnetica tra due circuiti.



Abbiamo visto una variazione del flusso del campo magnetico genera un campo elettrico con un andamento di forze che si chiudono su se stessi. Genera un campo elettrico anche senza la presenza della sorgente del campo elettrico.

Abbiamo quindi un campo senza sorgenti e la sorgente diventa una variazione del campo elettrico.

È vero che una variazione del campo elettrico è in grado di generare un campo magnetico, quindi abbiamo una doppia unità del campo magnetico: la variazione del campo magnetico genera un campo elettrico anche in assenza di cariche puntiformi che facciano da sorgenti nel campo, una variazione del campo elettrico è in grado di generare un campo magnetico, che non ha sorgenti date da cariche magnetiche.

Questa interdipendenza permette la propagazione dei campi elettromagnetici all'interno dello spazio.

Quindi si genera una configurazione di campi elettrici e magnetici che si possono propagare nello spazio anche molto lontano dalle correnti e dalle cariche che l'hanno generati.

