L'induzione elettromagnetica

Giuseppe Giuliani

Pavia

29 aprile 2022

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati
- In una teoria fisica matura i fenomeni sono descritte da equazioni

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati
- In una teoria fisica matura i fenomeni sono descritte da equazioni
- Un'equazione è deterministica se essa possiede una e una sola soluzione

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati
- In una teoria fisica matura i fenomeni sono descritte da equazioni
- Un'equazione è deterministica se essa possiede una e una sola soluzione
- In questo caso essa può essere interpretata causalmente

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati
- In una teoria fisica matura i fenomeni sono descritte da equazioni
- Un'equazione è deterministica se essa possiede una e una sola soluzione
- In questo caso essa può essere interpretata causalmente
- Per esempio, l'equazione

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

può essere interpretata affermando che la forza $\vec{F}$ causa una variazione della quantità di moto $\vec{p}$ di una particella

Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati
- In una teoria fisica matura i fenomeni sono descritte da equazioni
- Un'equazione è deterministica se essa possiede una e una sola soluzione
- In questo caso essa può essere interpretata causalmente
- Per esempio, l'equazione

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

  può essere interpretata affermando che la forza $\vec{F}$ causa una variazione della quantità di moto $\vec{p}$ di una particella
- Quindi la causa non è contenuta nell'equazione, ma è sovrapposta ad essa dalla nostra interpretazione

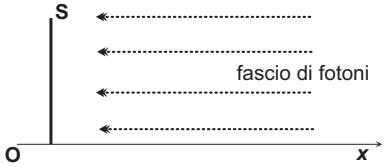
Principio di causalità. I

- "Ogni evento ha una causa"
- Questo principio deve essere inteso come un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause dei fenomeni osservati
- In una teoria fisica matura i fenomeni sono descritte da equazioni
- Un'equazione è deterministica se essa possiede una e una sola soluzione
- In questo caso essa può essere interpretata causalmente
- Per esempio, l'equazione

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

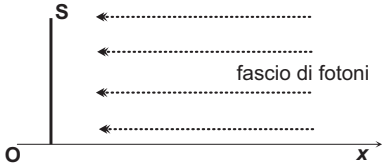
  può essere interpretata affermando che la forza $\vec{F}$ causa una variazione della quantità di moto $\vec{p}$ di una particella
- Quindi la causa non è contenuta nell'equazione, ma è sovrapposta ad essa dalla nostra interpretazione
- Le cause delle nostre interpretazioni sono solo plausibili e la loro plausibilità aumenta al crescere del numero dei fenomeni ai quali questa interpretazione causale è stata applicata con successo

Principio di causalità. II



- La superficie S completamente assorbente è investita da un fascio di fotoni mono - energetici in volo lungo la direzione negativa dell'asse x

Principio di causalità. II

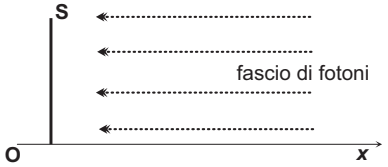


- La superficie S completamente assorbente è investita da un fascio di fotoni mono - energetici in volo lungo la direzione negativa dell'asse x
- Vale l'equazione:

$$\frac{dP_x}{dt} = -N\frac{h\nu}{c}S = F_x$$

Dove P_x è la quantità di moto della superficie, N è il numero di fotoni che, in un secondo, incide sull'unità di superficie e F_x la forza che si esercita sulla superficie S

Principio di causalità. II

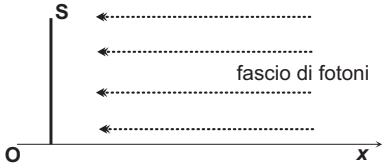


- La superficie S completamente assorbente è investita da un fascio di fotoni mono - energetici in volo lungo la direzione negativa dell'asse x
- Vale l'equazione:

$$\frac{dP_x}{dt} = -N\frac{h\nu}{c}S = F_x$$

  Dove P_x è la quantità di moto della superficie, N è il numero di fotoni che, in un secondo, incide sull'unità di superficie e F_x la forza che si esercita sulla superficie S
- Quindi, in questo caso, possiamo dire che la variazione della quantità di moto della superficie ha prodotto (causato) una forza

Principio di causalità. II



- La superficie S completamente assorbente è investita da un fascio di fotoni mono - energetici in volo lungo la direzione negativa dell'asse x
- Vale l'equazione:

$$\frac{dP_x}{dt} = -N\frac{h\nu}{c}S = F_x$$

  Dove P_x è la quantità di moto della superficie, N è il numero di fotoni che, in un secondo, incide sull'unità di superficie e F_x la forza che si esercita sulla superficie S
- Quindi, in questo caso, possiamo dire che la variazione della quantità di moto della superficie ha prodotto (causato) una forza
- Un caso analogo si ha nella teoria cinetica dei gas dove la quantità di moto delle particelle genera una pressione (forza/superficie) sulle pareti

Principio di causalità. III

- Ogni connessione causale deve soddisfare il principio di località della relatività speciale: un evento che accade nel punto $P_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ può essere connesso causalmente con un evento che accade nel punto $P_2(x_2, y_2, z_2, t_2)$ – con $t_2 > t_1$ solo se la distanza d tra i due punti è tale che $d \leq c(t_2 - t_1)$

Principio di causalità. III

- Ogni connessione causale deve soddisfare il principio di località della relatività speciale: un evento che accade nel punto $P_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ può essere connesso causalmente con un evento che accade nel punto $P_2(x_2, y_2, z_2, t_2)$ – con $t_2 > t_1$ solo se la distanza d tra i due punti è tale che $d \leq c(t_2 - t_1)$
- Se un fenomeno si svolge in una linea chiusa, questo fenomeno – ad un certo istante – non può essere connesso causalmente a ciò che accade – allo stesso istante – su una superficie arbitraria che abbia la linea chiusa come contorno.

Principio di causalità. III

- Ogni connessione causale deve soddisfare il principio di località della relatività speciale: un evento che accade nel punto $P_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ può essere connesso causalmente con un evento che accade nel punto $P_2(x_2, y_2, z_2, t_2)$ – con $t_2 > t_1$ solo se la distanza d tra i due punti è tale che $d \leq c(t_2 - t_1)$
- Se un fenomeno si svolge in una linea chiusa, questo fenomeno – ad un certo istante – non può essere connesso causalmente a ciò che accade – allo stesso istante – su una superficie arbitraria che abbia la linea chiusa come contorno.
- Per due ragioni: 1) perché considerati due punti qualsiasi – uno sulla linea e l'altro sulla superficie – due eventi che accadono in essi allo stesso istante non possono essere connessi causalmente

Principio di causalità. III

- Ogni connessione causale deve soddisfare il principio di località della relatività speciale: un evento che accade nel punto $P_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ può essere connesso causalmente con un evento che accade nel punto $P_2(x_2, y_2, z_2, t_2)$ – con $t_2 > t_1$ solo se la distanza d tra i due punti è tale che $d \leq c(t_2 - t_1)$
- Se un fenomeno si svolge in una linea chiusa, questo fenomeno – ad un certo istante – non può essere connesso causalmente a ciò che accade – allo stesso istante – su una superficie arbitraria che abbia la linea chiusa come contorno.
- Per due ragioni: 1) perché considerati due punti qualsiasi – uno sulla linea e l'altro sulla superficie – due eventi che accadono in essi allo stesso istante non possono essere connessi causalmente
- 2) perchè, siccome la superficie è arbitraria si avrebbero infinite cause dello stesso effetto

La legge dell'induzione elettromagnetica. I

- La legge dell'induzione elettromagnetica:

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{v}_c \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} = \oint \left[\left(-\nabla\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + (\vec{v}_c \times \vec{B}) \right] \cdot \vec{dl}$$

$$\Downarrow$$

La legge dell'induzione elettromagnetica. I

- La legge dell'induzione elettromagnetica:

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{v}_c \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} = \oint \left[\left(-\nabla\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + (\vec{v}_c \times \vec{B}) \right] \cdot \vec{dl}$$

$$\Downarrow$$

- $$\mathcal{E} = \oint \left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + (\vec{v}_c \times \vec{B}) \right] \cdot \vec{dl}$$

La legge dell'induzione elettromagnetica. II

- È una legge locale

La legge dell'induzione elettromagnetica. II

- È una legge locale
- Nel caso di circuiti filiformi, è invariante per trasformazioni di Lorentz

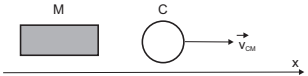
La legge dell'induzione elettromagnetica. II

- È una legge locale
- Nel caso di circuiti filiformi, è invariante per trasformazioni di Lorentz
- Descrive tutti i fenomeni di induzione elettromagnetica noti

La legge dell'induzione elettromagnetica. II

- È una legge locale
- Nel caso di circuiti filiformi, è invariante per trasformazioni di Lorentz
- Descrive tutti i fenomeni di induzione elettromagnetica noti
- "Predice" fenomeni sperimentali noti, quali la magneto - resistenza del disco di Corbino (1911)

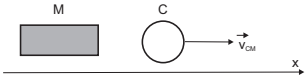
Moto inerziale relativo tra magnete e spira filiforme



- Nel sistema di riferimento della spira, scriviamo:

$$\mathcal{E}' = \oint \vec{E}' \cdot d\vec{l}' + \oint (\vec{v}'_d \times \vec{B}') \cdot d\vec{l}' = \oint \vec{E}' \cdot d\vec{l}'$$

Moto inerziale relativo tra magnete e spira filiforme



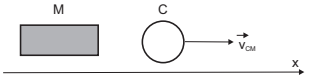
- Nel sistema di riferimento della spira, scriviamo:

$$\mathcal{E}' = \oint \vec{E}' \cdot d\vec{l}' + \oint (\vec{v}'_d \times \vec{B}') \cdot d\vec{l}' = \oint \vec{E}' \cdot d\vec{l}'$$

- Tenendo conto delle equazioni di trasformazione dei campi e delle coordinate si ottiene:

$$\mathcal{E}' = \Gamma \oint [\vec{E} + (\vec{V}_{CM} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}]$$

Moto inerziale relativo tra magnete e spira filiforme



- Nel sistema di riferimento della spira, scriviamo:

$$\mathcal{E}' = \oint \vec{E}' \cdot \vec{dl}' + \oint (\vec{v}'_d \times \vec{B}') \cdot \vec{dl}' = \oint \vec{E}' \cdot \vec{dl}'$$

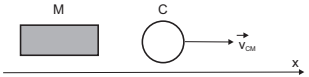
- Tenendo conto delle equazioni di trasformazione dei campi e delle coordinate si ottiene:

$$\mathcal{E}' = \Gamma \oint [\vec{E} + (\vec{V}_{CM} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}]$$

- Nel sistema di riferimento del magnete abbiamo invece:

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{V}_{CM} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

Moto inerziale relativo tra magnete e spira filiforme



- Nel sistema di riferimento della spira, scriviamo:

$$\mathcal{E}' = \oint \vec{E}' \cdot \vec{dl}' + \oint (\vec{v}'_d \times \vec{B}') \cdot \vec{dl}' = \oint \vec{E}' \cdot \vec{dl}'$$

- Tenendo conto delle equazioni di trasformazione dei campi e delle coordinate si ottiene:

$$\mathcal{E}' = \Gamma \oint [\vec{E} + (\vec{V}_{CM} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}]$$

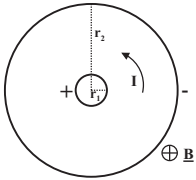
- Nel sistema di riferimento del magnete abbiamo invece:

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{V}_{CM} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

- Quindi:

$$\mathcal{E}' = \Gamma \mathcal{E}$$

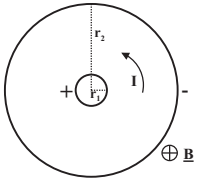
Il disco di Corbino (1911). I



Un disco conduttore di raggio r_2 ha un foro circolare al suo centro di raggio r_1; elettrodi altamente conduttori coprono la periferia circolare interna ed esterna. Una batteria produce una corrente radiale nel disco. Quando un campo magnetico statico $\vec{B}$ è applicato perpendicolarmente al disco, si genera una corrente circolare Galdabini, Giuliani, 1991; Giuliani, 2008.

- Si calcola la densità di corrente radiale e, successivamente, la velocità di deriva radiale delle cariche

Il disco di Corbino (1911). I

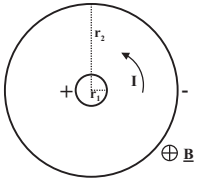


Un disco conduttore di raggio r_2 ha un foro circolare al suo centro di raggio r_1; elettrodi altamente conduttori coprono la periferia circolare interna ed esterna. Una batteria produce una corrente radiale nel disco. Quando un campo magnetico statico $\vec{B}$ è applicato perpendicolarmente al disco, si genera una corrente circolare Galdabini, Giuliani, 1991; Giuliani, 2008.

- Si calcola la densità di corrente radiale e, successivamente, la velocità di deriva radiale delle cariche
- Questa velocità di deriva radiale genera una *fem* circolare data da:

$$\mathcal{E}_{circolare} = \oint_0^{2\pi r} (\vec{v}(r)_d \times \vec{B}) \cdot \vec{dr} = \frac{I_{radiale}\, B}{sne}$$

Il disco di Corbino (1911). I



Un disco conduttore di raggio r_2 ha un foro circolare al suo centro di raggio r_1; elettrodi altamente conduttori coprono la periferia circolare interna ed esterna. Una batteria produce una corrente radiale nel disco. Quando un campo magnetico statico $\vec{B}$ è applicato perpendicolarmente al disco, si genera una corrente circolare Galdabini, Giuliani, 1991; Giuliani, 2008.

- Si calcola la densità di corrente radiale e, successivamente, la velocità di deriva radiale delle cariche
- Questa velocità di deriva radiale genera una *fem* circolare data da:

$$\mathcal{E}_{circolare} = \oint_0^{2\pi r} (\vec{v}(r)_d \times \vec{B}) \cdot \vec{dr} = \frac{I_{radiale}\, B}{sne}$$

- La corrente circolare totale è data da:

$$I_{circolare} = \frac{\mu B}{2\pi} I_{radiale} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

dove $\mu = 1/\rho\, n\, e$ è la mobilità degli elettroni

Il disco di Corbino (1911). II

- La potenza dissipata nel disco è:

$$\begin{aligned} W &= (I^2 R)_{radiale} + (I^2 R)_{circolare} = I^2_{radiale} R_{radiale}(1 + \mu^2 B^2) \\ &= \mathcal{E}_{radiale} I_{radiale} \end{aligned}$$

dove $\mathcal{E}_{radiale} = I_{radiale} R_{radiale}(1 + \mu^2 B^2)$.

Il disco di Corbino (1911). II

- La potenza dissipata nel disco è:

$$\begin{aligned} W &= (I^2R)_{radiale} + (I^2R)_{circolare} = I^2_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2) \\ &= \mathcal{E}_{radiale} I_{radiale} \end{aligned}$$

  dove $\mathcal{E}_{radiale} = I_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2)$.

- Questa equazione mostra che il fenomeno può essere descritto in termini di un incremento della resistenza radiale di un fattore uguale a $(1+\mu^2B^2)$: questo effetto è chiamato *magnetoresistenza*

Il disco di Corbino (1911). II

- La potenza dissipata nel disco è:

$$\begin{aligned} W &= (I^2R)_{radiale} + (I^2R)_{circolare} = I^2_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2) \\ &= \mathcal{E}_{radiale} I_{radiale} \end{aligned}$$

  dove $\mathcal{E}_{radiale} = I_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2)$.

- Questa equazione mostra che il fenomeno può essere descritto in termini di un incremento della resistenza radiale di un fattore uguale a $(1+\mu^2B^2)$: questo effetto è chiamato *magnetoresistenza*
- La *fem* circolare indotta è distribuita omogeneamente lungo ogni circonferenza: ogni corona circolare di sezione $s \cdot dr$ agisce come una pila che produce corrente sulla propria resistenza; pertanto la differenza di potenziale tra due punti qualsiasi di una circonferenza è nulla. Quindi ogni circonferenza è una linea equipotenziale.

Il disco di Corbino (1911). II

- La potenza dissipata nel disco è:

$$\begin{aligned} W &= (I^2R)_{radiale} + (I^2R)_{circolare} = I^2_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2) \\ &= \mathcal{E}_{radiale} I_{radiale} \end{aligned}$$

  dove $\mathcal{E}_{radiale} = I_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2)$.

- Questa equazione mostra che il fenomeno può essere descritto in termini di un incremento della resistenza radiale di un fattore uguale a $(1+\mu^2B^2)$: questo effetto è chiamato *magnetoresistenza*
- La *fem* circolare indotta è distribuita omogeneamente lungo ogni circonferenza: ogni corona circolare di sezione $s \cdot dr$ agisce come una pila che produce corrente sulla propria resistenza; pertanto la differenza di potenziale tra due punti qualsiasi di una circonferenza è nulla. Quindi ogni circonferenza è una linea equipotenziale.
- L'effetto Hall quantistico può essere descritto come un disco di Corbino in cui la corrente è solo circolare e quantizzata

Il disco di Corbino (1911). II

- La potenza dissipata nel disco è:

$$\begin{aligned} W &= (I^2R)_{radiale} + (I^2R)_{circolare} = I^2_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2) \\ &= \mathcal{E}_{radiale} I_{radiale} \end{aligned}$$

  dove $\mathcal{E}_{radiale} = I_{radiale} R_{radiale}(1+\mu^2B^2)$.

- Questa equazione mostra che il fenomeno può essere descritto in termini di un incremento della resistenza radiale di un fattore uguale a $(1+\mu^2B^2)$: questo effetto è chiamato *magnetoresistenza*
- La *fem* circolare indotta è distribuita omogeneamente lungo ogni circonferenza: ogni corona circolare di sezione $s \cdot dr$ agisce come una pila che produce corrente sulla propria resistenza; pertanto la differenza di potenziale tra due punti qualsiasi di una circonferenza è nulla. Quindi ogni circonferenza è una linea equipotenziale.
- L'effetto Hall quantistico può essere descritto come un disco di Corbino in cui la corrente è solo circolare e quantizzata
- L'effetto Hall quantistico è regolato dalla costante di von Klitzing

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.80745\ \Omega$$

La “regola del flusso”. I

- $$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

La “regola del flusso”. I

- $$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$$
- Non è una equazione locale

La “regola del flusso”. I

- $$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$$
- Non è una equazione locale
- Non sa predire dove è localizzata la forza elettromotrice $\Rightarrow$ barra il moto su un telaio

La “regola del flusso”. I

- $$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$$
- Non è una equazione locale
- Non sa predire dove è localizzata la forza elettromotrice $\Rightarrow$ barra il moto su un telaio
- In molte situazioni deve scegliere *ad hoc* la linea di integrazione $\Rightarrow$ per esempio, il disco di Faraday

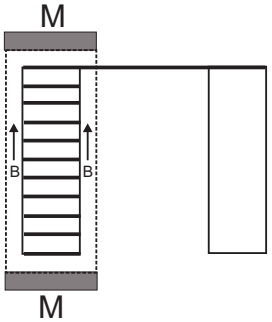
La "regola del flusso". I

- $$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$$
- Non è una equazione locale
- Non sa predire dove è localizzata la forza elettromotrice $\Rightarrow$ barra il moto su un telaio
- In molte situazioni deve scegliere *ad hoc* la linea di integrazione $\Rightarrow$ per esempio, il disco di Faraday
- Non può essere applicata a materiali estesi

La "regola del flusso". I

- $$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$$
- Non è una equazione locale
- Non sa predire dove è localizzata la forza elettromotrice $\Rightarrow$ barra il moto su un telaio
- In molte situazioni deve scegliere *ad hoc* la linea di integrazione $\Rightarrow$ per esempio, il disco di Faraday
- Non può essere applicata a materiali estesi
- È falsificata dall'esperimento di André Blondel (1914)

L'esperimento di Blondel (1914)

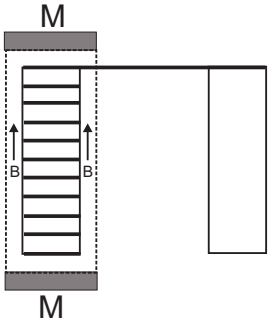


- La "regola del flusso" prevede che:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\phi\frac{dN}{dt}$$

ove ϕ è il flusso del campo magnetico attraverso una spira

L'esperimento di Blondel (1914)

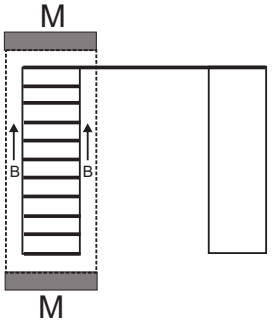


- La "regola del flusso" prevede che:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\phi\frac{dN}{dt}$$

  ove ϕ è il flusso del campo magnetico attraverso una spira
- La forza elettromotrice misurata è invece nulla

L'esperimento di Blondel (1914)



- La "regola del flusso" prevede che:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\phi\frac{dN}{dt}$$

  ove ϕ è il flusso del campo magnetico attraverso una spira
- La forza elettromotrice misurata è invece nulla
- Vedi qui

Michael Faraday (1791 - 1867). I

- Il 24 novembre dell'anno 1831, Michael Faraday presentò alla Royal Society di Londra una ricerca intitolata "Induzione di correnti elettriche". Nel maggio 1832 il lavoro fu pubblicato sulle *Philosophical Transactions* e avrebbe poi aperto il primo volume delle *Experimental Researches in Electricity* (1839)

Michael Faraday (1791 - 1867). I

- Il 24 novembre dell'anno 1831, Michael Faraday presentò alla Royal Society di Londra una ricerca intitolata "Induzione di correnti elettriche". Nel maggio 1832 il lavoro fu pubblicato sulle *Philosophical Transactions* e avrebbe poi aperto il primo volume delle *Experimental Researches in Electricity* (1839)
- Gli esperimenti realizzati da Faraday sono, ancora oggi, descritti nei libri di testo o riprodotti nei laboratori didattici come punto di partenza per introdurre i fenomeni di induzione elettromagnetica.

Michael Faraday (1791 - 1867). I

- Il 24 novembre dell'anno 1831, Michael Faraday presentò alla Royal Society di Londra una ricerca intitolata "Induzione di correnti elettriche". Nel maggio 1832 il lavoro fu pubblicato sulle *Philosophical Transactions* e avrebbe poi aperto il primo volume delle *Experimental Researches in Electricity* (1839)
- Gli esperimenti realizzati da Faraday sono, ancora oggi, descritti nei libri di testo o riprodotti nei laboratori didattici come punto di partenza per introdurre i fenomeni di induzione elettromagnetica.
- Faraday, senza mai scrivere una formula, ha sviluppato una teoria dell'induzione elettromagnetica in grado di descrivere, anche quantitativamente, i fenomeni

Michael Faraday (1791 - 1867). I

- Il 24 novembre dell'anno 1831, Michael Faraday presentò alla Royal Society di Londra una ricerca intitolata "Induzione di correnti elettriche". Nel maggio 1832 il lavoro fu pubblicato sulle *Philosophical Transactions* e avrebbe poi aperto il primo volume delle *Experimental Researches in Electricity* (1839)
- Gli esperimenti realizzati da Faraday sono, ancora oggi, descritti nei libri di testo o riprodotti nei laboratori didattici come punto di partenza per introdurre i fenomeni di induzione elettromagnetica.
- Faraday, senza mai scrivere una formula, ha sviluppato una teoria dell'induzione elettromagnetica in grado di descrivere, anche quantitativamente, i fenomeni
- Secondo Faraday c'è corrente indotta in un circuito conduttore ogniqualvolta c'è un moto relativo tra conduttore e linee di forza magnetiche

Michael Faraday (1791 - 1867). I

- Il 24 novembre dell'anno 1831, Michael Faraday presentò alla Royal Society di Londra una ricerca intitolata "Induzione di correnti elettriche". Nel maggio 1832 il lavoro fu pubblicato sulle *Philosophical Transactions* e avrebbe poi aperto il primo volume delle *Experimental Researches in Electricity* (1839)
- Gli esperimenti realizzati da Faraday sono, ancora oggi, descritti nei libri di testo o riprodotti nei laboratori didattici come punto di partenza per introdurre i fenomeni di induzione elettromagnetica.
- Faraday, senza mai scrivere una formula, ha sviluppato una teoria dell'induzione elettromagnetica in grado di descrivere, anche quantitativamente, i fenomeni
- Secondo Faraday c'è corrente indotta in un circuito conduttore ogniqualvolta c'è un moto relativo tra conduttore e linee di forza magnetiche
- Tuttavia, questo moto relativo è altamente asimmetrico: mentre la velocità del conduttore è quella tipica di un corpo materiale le variazioni delle linee di forza magnetiche si propagano "con la velocità della luce, o addirittura con quella velocità più elevata o istantaneità che noi supponiamo appartenere alle linee della forza gravitazionale. Se le cose stanno così, una perturbazione magnetica in un posto sarebbe istantaneamente avvertita sull'intero globo Faraday - III, p. 264"

Michael Faraday (1791 - 1867). II

- "Le linee di forza magnetiche sono quelle linee che sono mostrate, in generale, dalla disposizione della limatura di ferro o di piccoli aghi magnetici intorno o tra magneti; ho mostrato, spero in modo soddisfacente, come queste linee possano essere assunte quali indicatori del potere magnetico, sia per quanto concerne la disposizione che la quantità; inoltre [ho mostrato] come esse possano essere riconosciute da un filo in moto in un modo del tutto differente, in linea di principio, dalle indicazioni fornite da un ago magnetico, e, in numerosi casi, con grandi e peculiari vantaggi Faraday - III, p. 407"

Michael Faraday (1791 - 1867). II

- "Le linee di forza magnetiche sono quelle linee che sono mostrate, in generale, dalla disposizione della limatura di ferro o di piccoli aghi magnetici intorno o tra magneti; ho mostrato, spero in modo soddisfacente, come queste linee possano essere assunte quali indicatori del potere magnetico, sia per quanto concerne la disposizione che la quantità; inoltre [ho mostrato] come esse possano essere riconosciute da un filo in moto in un modo del tutto differente, in linea di principio, dalle indicazioni fornite da un ago magnetico, e, in numerosi casi, con grandi e peculiari vantaggi Faraday - III, p. 407"
- Faraday conduce esperimenti con un circuito inducente e un circuito indotto. Il primo è costituito da un filo metallico connesso, attraverso un interruttore ad una pila. Il secondo, semplicemente, da un filo metallico chiuso su sé stesso.

Michael Faraday (1791 - 1867). II

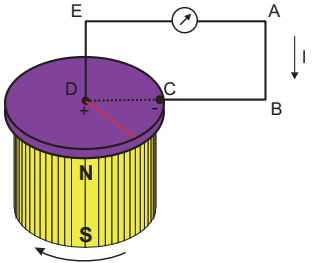
- "Le linee di forza magnetiche sono quelle linee che sono mostrate, in generale, dalla disposizione della limatura di ferro o di piccoli aghi magnetici intorno o tra magneti; ho mostrato, spero in modo soddisfacente, come queste linee possano essere assunte quali indicatori del potere magnetico, sia per quanto concerne la disposizione che la quantità; inoltre [ho mostrato] come esse possano essere riconosciute da un filo in moto in un modo del tutto differente, in linea di principio, dalle indicazioni fornite da un ago magnetico, e, in numerosi casi, con grandi e peculiari vantaggi Faraday - III, p. 407"
- Faraday conduce esperimenti con un circuito inducente e un circuito indotto. Il primo è costituito da un filo metallico connesso, attraverso un interruttore ad una pila. Il secondo, semplicemente, da un filo metallico chiuso su sé stesso.
- Connettendo il circuito inducente alla pila, ". . . le linee di forza debbono essere considerate in moto (se posso usare questa espressione) attraverso la spira indotta, dall'istante in cui esse iniziano ad essere sviluppate finché la forza magnetica della corrente raggiunge il suo massimo"

Michael Faraday (1791 - 1867). II

- "Le linee di forza magnetiche sono quelle linee che sono mostrate, in generale, dalla disposizione della limatura di ferro o di piccoli aghi magnetici intorno o tra magneti; ho mostrato, spero in modo soddisfacente, come queste linee possano essere assunte quali indicatori del potere magnetico, sia per quanto concerne la disposizione che la quantità; inoltre [ho mostrato] come esse possano essere riconosciute da un filo in moto in un modo del tutto differente, in linea di principio, dalle indicazioni fornite da un ago magnetico, e, in numerosi casi, con grandi e peculiari vantaggi Faraday - III, p. 407"
- Faraday conduce esperimenti con un circuito inducente e un circuito indotto. Il primo è costituito da un filo metallico connesso, attraverso un interruttore ad una pila. Il secondo, semplicemente, da un filo metallico chiuso su sé stesso.
- Connettendo il circuito inducente alla pila, ". . . le linee di forza debbono essere considerate in moto (se posso usare questa espressione) attraverso la spira indotta, dall'istante in cui esse iniziano ad essere sviluppate finché la forza magnetica della corrente raggiunge il suo massimo"
- Aprendo il circuito inducente, "le curve magnetiche. . . possono essere descritte come se si contraessero su sè stesse e tornassero verso la corrente elettrica in fase calante; pertanto, esse si muovono nella direzione opposta attraverso il filo e causano una corrente indotta opposta a quella prodotta in precedenza Faraday - I, p. 68"

Michael Faraday (1791 - 1867). III

Quindi le linee di forza magnetiche si possono muovere. Ciò accade quando il magnete trasla verso la spira o se ne allontana; ma non quando il magnete ruota su sé stesso.



Un disco conduttore (viola) ruota in senso antiorario in un campo magnetico uniforme generato dal magnete M (giallo). **La regola del flusso deve scegliere una linea di integrazione ad hoc contenente un raggio (in rosso) in moto con il disco**

La fisica di un disco di Faraday con simmetria circolare è identica a quella del disco di Corbino. Cambia solo la sorgente della forza elettromotrice: una pila, nel caso di Corbino; una *fem* indotta nel caso di Faraday.

Michael Faraday (1791 - 1867). IV

Cosa si muove?	**Moto relativo disco - magnete**	**Moto relativo disco - laboratorio**	**Corrente indotta**
Disco	Sì	Sì	Sì
Magnete	Sì	No	No
Disco e magnete	No	Sì	Sì

Michael Faraday (1791 - 1867). V

- Come tradurre in formule la teoria di Faraday?

Michael Faraday (1791 - 1867). V

- Come tradurre in formule la teoria di Faraday?
- Moto relativo tra conduttore e circuito $\Rightarrow \mathcal{E} = \oint (\vec{v}_c \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$

Michael Faraday (1791 - 1867). V

- Come tradurre in formule la teoria di Faraday?
- Moto relativo tra conduttore e circuito $\Rightarrow \mathcal{E} = \oint (\vec{v}_c \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$
- Questa traduzione è basata su una descrizione quantitativa espressa a parole di Faraday, quando studia il moto di un filo conduttore in un campo magnetico uniforme

Michael Faraday (1791 - 1867). V

- Come tradurre in formule la teoria di Faraday?
- Moto relativo tra conduttore e circuito $\Rightarrow \mathcal{E} = \oint (\vec{v}_c \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$
- Questa traduzione è basata su una descrizione quantitativa espressa a parole di Faraday, quando studia il moto di un filo conduttore in un campo magnetico uniforme
- Moto relativo tra linee di forza magnetiche e circuito

$$\Downarrow$$

- $$\mathcal{E} = \oint -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{dl}$$

Michael Faraday (1791 - 1867). V

- Come tradurre in formule la teoria di Faraday?
- Moto relativo tra conduttore e circuito $\Rightarrow \mathcal{E} = \oint (\vec{v}_c \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$
- Questa traduzione è basata su una descrizione quantitativa espressa a parole di Faraday, quando studia il moto di un filo conduttore in un campo magnetico uniforme
- Moto relativo tra linee di forza magnetiche e circuito

$$\Downarrow$$

- $$\mathcal{E} = \oint -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{dl}$$
- Questa traduzione è basata sulla descrizione di Faraday dell'interazione tra circuito inducente e circuito indotto. La descrizione di Faraday é locale

Faraday, secondo Maxwell

- " . . . È stato forse un vantaggio per la scienza il fatto che Faraday, sebbene perfettamente consapevole delle forme fondamentali dello spazio, del tempo e della forza, egli non fosse un matematico di professione. Egli non fu tentato di sviluppare le tante e interessanti ricerche matematiche che le sue ricerche avrebbero suggerito se esse fossero state espresse in forma matematica; e non si sentì impegnato a forzare i suoi risultati in una forma accettabile per il gusto matematico del tempo, o ad esprimerli in una forma che i matematici avrebbero potuto attaccare. Fu così lasciato a svolgere a piacere il proprio lavoro, a coordinare le sue idee con i fatti e ad esprimerli in un linguaggio naturale, non tecnico. Ho intrapreso questo trattato essenzialmente con la speranza di fare di queste idee la base di un metodo matematico Trattato, 2 vol, p. 164".

Faraday, secondo Maxwell

- " . . . È stato forse un vantaggio per la scienza il fatto che Faraday, sebbene perfettamente consapevole delle forme fondamentali dello spazio, del tempo e della forza, egli non fosse un matematico di professione. Egli non fu tentato di sviluppare le tante e interessanti ricerche matematiche che le sue ricerche avrebbero suggerito se esse fossero state espresse in forma matematica; e non si sentì impegnato a forzare i suoi risultati in una forma accettabile per il gusto matematico del tempo, o ad esprimerli in una forma che i matematici avrebbero potuto attaccare. Fu così lasciato a svolgere a piacere il proprio lavoro, a coordinare le sue idee con i fatti e ad esprimerli in un linguaggio naturale, non tecnico. Ho intrapreso questo trattato essenzialmente con la speranza di fare di queste idee la base di un metodo matematico Trattato, 2 vol, p. 164".
- "Il metodo usato da Faraday nelle sue ricerche consisteva in un appello costante all'esperimento come mezzo per verificare la correttezza delle sue idee, e in un costante sviluppo (cultivation) delle idee sotto la diretta influenza dell'esperimento Trattato, 2 vol, p. 163"

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). I

- Dopo la illustrazione di una serie di esperimenti di Faraday, Maxwell afferma che "L'insieme di questi fenomeni può essere sintetizzata in una legge" ed enuncia a parole la legge del flusso, senza scriverne la formula.

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). I

- Dopo la illustrazione di una serie di esperimenti di Faraday, Maxwell afferma che "L'insieme di questi fenomeni può essere sintetizzata in una legge" ed enuncia a parole la legge del flusso, senza scriverne la formula.
- "La corrente elettrica può essere concepita solo come un fenomeno cinetico. . . Per quanto riguarda la velocità della corrente, abbiamo mostrato che non sappiamo nulla: potrebbe essere di un decimo di pollice all'ora o di migliaia di miglia al secondo. Siamo così lontani dal conoscere il suo valore corretto che non conosciamo neppure se quello che chiamiamo la direzione positiva è la direzione reale del moto o la sua opposta.
  Ma tutto quello che assumiamo qui, è che la corrente elettrica implica il moto di qualcosa" Trattato, 2 vol, pp. 196 - 197.

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). II

- L'idea che la corrente è un fenomeno cinetico, permette a Maxwell di trattare i circuiti elettrici con il formalismo Lagrangiano e di utilizzare un'analogia meccanica.

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). II

- L'idea che la corrente è un fenomeno cinetico, permette a Maxwell di trattare i circuiti elettrici con il formalismo Lagrangiano e di utilizzare un'analogia meccanica.
- Considerato un sistema di due circuiti elettrici, Maxwell scrive:

$$T = \frac{1}{2} L_1 \dot{y_1}^2 + \frac{1}{2} L_2 \dot{y_2}^2 + M_{12} \dot{y_1} \dot{y_2}$$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). II

- L'idea che la corrente è un fenomeno cinetico, permette a Maxwell di trattare i circuiti elettrici con il formalismo Lagrangiano e di utilizzare un'analogia meccanica.
- Considerato un sistema di due circuiti elettrici, Maxwell scrive:

$$T = \frac{1}{2} L_1 \dot{y_1}^2 + \frac{1}{2} L_2 \dot{y_2}^2 + M_{12} \dot{y_1} \dot{y_2}$$

- Pertanto, il *momento elettrocinetico* del circuito 2 è dato da:

$$p_2 = \frac{dT}{d\dot{y_2}} = L_2 \dot{y_2} + M_{12} \dot{y_1}$$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). II

- L'idea che la corrente è un fenomeno cinetico, permette a Maxwell di trattare i circuiti elettrici con il formalismo Lagrangiano e di utilizzare un'analogia meccanica.
- Considerato un sistema di due circuiti elettrici, Maxwell scrive:

$$T = \frac{1}{2} L_1 \dot{y_1}^2 + \frac{1}{2} L_2 \dot{y_2}^2 + M_{12} \dot{y_1} \dot{y_2}$$

- Pertanto, il *momento elettrocinetico* del circuito 2 è dato da:

$$p_2 = \frac{dT}{d\dot{y_2}} = L_2 \dot{y_2} + M_{12} \dot{y_1}$$

- Le dimensioni fisiche di T sono quelle di un'energia; quelle del momento elettrocinetico p – cioè l'analogo del momento meccanico – ha invece le dimensioni di un potenziale elettrico moltiplicato per il tempo.

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). II

- L'idea che la corrente è un fenomeno cinetico, permette a Maxwell di trattare i circuiti elettrici con il formalismo Lagrangiano e di utilizzare un'analogia meccanica.
- Considerato un sistema di due circuiti elettrici, Maxwell scrive:

$$T = \frac{1}{2} L_1 \dot{y_1}^2 + \frac{1}{2} L_2 \dot{y_2}^2 + M_{12} \dot{y_1} \dot{y_2}$$

- Pertanto, il *momento elettrocinetico* del circuito 2 è dato da:

$$p_2 = \frac{dT}{d\dot{y_2}} = L_2 \dot{y_2} + M_{12} \dot{y_1}$$

- Le dimensioni fisiche di T sono quelle di un'energia; quelle del momento elettrocinetico p – cioè l'analogo del momento meccanico – ha invece le dimensioni di un potenziale elettrico moltiplicato per il tempo.
- Nel caso di un circuito isolato, si ha:

$$T = \frac{1}{2} L i^2; \qquad p = Li = \Phi$$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). III

- Siccome $\Phi = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$ l'espressione del momento elettrocinetico diventa:

$$p = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). III

- Siccome $\Phi = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$ l'espressione del momento elettrocinetico diventa:

$$p = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

- Maxwell dimostra che, per un circuito isolato, si ha:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

e che questa formula vale anche nel caso di due o più circuiti

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). III

- Siccome $\Phi = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$ l'espressione del momento elettrocinetico diventa:

$$p = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

- Maxwell dimostra che, per un circuito isolato, si ha:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

  e che questa formula vale anche nel caso di due o più circuiti
- Considerati due circuiti, Maxwell suppone che il circuito 1 sia in quiete e che la sua corrente sia costante e che il circuito 2 si muova con una velocità diversa per ogni elemento del circuito: il circuito 2 può anche deformarsi

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). III

- Siccome $\Phi = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$ l'espressione del momento elettrocinetico diventa:

$$p = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

- Maxwell dimostra che, per un circuito isolato, si ha:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

  e che questa formula vale anche nel caso di due o più circuiti
- Considerati due circuiti, Maxwell suppone che il circuito 1 sia in quiete e che la sua corrente sia costante e che il circuito 2 si muova con una velocità diversa per ogni elemento del circuito: il circuito 2 può anche deformarsi
- La *fem* indotta nel circuito 2 è allora data da:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint_{l_2} \vec{A}(\vec{r}, t) \cdot \vec{dl}_2$$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). III

- Siccome $\Phi = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$ l'espressione del momento elettrocinetico diventa:

$$p = \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

- Maxwell dimostra che, per un circuito isolato, si ha:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{A} \cdot \vec{dl}$$

  e che questa formula vale anche nel caso di due o più circuiti
- Considerati due circuiti, Maxwell suppone che il circuito 1 sia in quiete e che la sua corrente sia costante e che il circuito 2 si muova con una velocità diversa per ogni elemento del circuito: il circuito 2 può anche deformarsi
- La *fem* indotta nel circuito 2 è allora data da:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint_{l_2} \vec{A}(\vec{r}, t) \cdot \vec{dl}_2$$

- Maxwell delinea solo i calcoli. Essi sono stati recentemente sviluppati da Yaghjian. Maxwell ottiene:

$$\mathcal{E} = -\frac{dp}{dt} = \oint_{l_2} \left[(\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \right] \cdot \vec{dl}_2$$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). IV

- A rigore, la velocità che compare nella legge di induzione di Maxwell è la velocità dell'elemento del circuito

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). IV

- A rigore, la velocità che compare nella legge di induzione di Maxwell è la velocità dell'elemento del circuito
- Tuttavia, a proposito di questa velocità, Maxwell scrive: "La forza elettromotrice in un punto [campo elettrico] è stata già definita nel §68. È anche chiamata il risultante della forza elettrica, essendo la forza esercitata su una carica unitaria positiva posta in quel punto".

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). IV

- A rigore, la velocità che compare nella legge di induzione di Maxwell è la velocità dell'elemento del circuito
- Tuttavia, a proposito di questa velocità, Maxwell scrive: "La forza elettromotrice in un punto [campo elettrico] è stata già definita nel §68. È anche chiamata il risultante della forza elettrica, essendo la forza esercitata su una carica unitaria positiva posta in quel punto".
- Come abbiamo visto, Maxwell non possedeva un modello per la corrente elettrica. Tuttavia, questa sua forzatura nell'interpretazione della legge dell'induzione si è rivelata corretta

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). IV

- A rigore, la velocità che compare nella legge di induzione di Maxwell è la velocità dell'elemento del circuito
- Tuttavia, a proposito di questa velocità, Maxwell scrive: "La forza elettromotrice in un punto [campo elettrico] è stata già definita nel §68. È anche chiamata il risultante della forza elettrica, essendo la forza esercitata su una carica unitaria positiva posta in quel punto".
- Come abbiamo visto, Maxwell non possedeva un modello per la corrente elettrica. Tuttavia, questa sua forzatura nell'interpretazione della legge dell'induzione si è rivelata corretta
- Infatti, noi oggi sappiamo che, per circuiti filiformi, la velocità di deriva delle cariche danno un contributo nullo alla *fem* indotta perché $(\vec{v}_d \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} = 0$

James Clerk Maxwell (1831 - 1879). IV

- A rigore, la velocità che compare nella legge di induzione di Maxwell è la velocità dell'elemento del circuito
- Tuttavia, a proposito di questa velocità, Maxwell scrive: "La forza elettromotrice in un punto [campo elettrico] è stata già definita nel §68. È anche chiamata il risultante della forza elettrica, essendo la forza esercitata su una carica unitaria positiva posta in quel punto".
- Come abbiamo visto, Maxwell non possedeva un modello per la corrente elettrica. Tuttavia, questa sua forzatura nell'interpretazione della legge dell'induzione si è rivelata corretta
- Infatti, noi oggi sappiamo che, per circuiti filiformi, la velocità di deriva delle cariche danno un contributo nullo alla *fem* indotta perché $(\vec{v}_d \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} = 0$
- Ma Maxwell non poteva saperlo

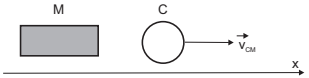
Albert Einstein (1879 - 1955)

- "È noto che l'elettrodinamica di Maxwell - come la si interpreta attualmente - nella sua applicazione ai corpi in movimento porta a delle asimmetrie, che non paiono essere inerenti ai fenomeni. Si pensi per esempio all'interazione elettromagnetica tra un magnete e un conduttore. I fenomeni osservabili in questo caso dipendono soltanto dal moto relativo del conduttore e del magnete, mentre secondo l'interpretazione consueta i due casi, a seconda che l'uno o l'altro di questi corpi sia quello in moto, vanno tenuti rigorosamente distinti."

Albert Einstein (1879 - 1955)

- "È noto che l'elettrodinamica di Maxwell - come la si interpreta attualmente - nella sua applicazione ai corpi in movimento porta a delle asimmetrie, che non paiono essere inerenti ai fenomeni. Si pensi per esempio all'interazione elettromagnetica tra un magnete e un conduttore. I fenomeni osservabili in questo caso dipendono soltanto dal moto relativo del conduttore e del magnete, mentre secondo l'interpretazione consueta i due casi, a seconda che l'uno o l'altro di questi corpi sia quello in moto, vanno tenuti rigorosamente distinti."
- "È inoltre chiaro che l'asimmetria menzionata nell'Introduzione riguardo alla trattazione della corrente generata mediante il moto relativo di un magnete e di un conduttore sparisce. Anche le questioni relative alla "sede" della forza elettromotrice elettrodinamica (macchine unipolari) sono infondate."

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. I

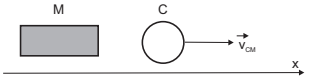


Il magnete M vede il circuito filiforme e rigido C muoversi con velocità $\vec{V}$ lungo la direzione positiva dell'asse x.

- Il magnete M scrive:

$$\mathcal{E} = \oint_l (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. I



Il magnete M vede il circuito filiforme e rigido C muoversi con velocità $\vec{V}$ lungo la direzione positiva dell'asse x.

- Il magnete M scrive:

$$\mathcal{E} = \oint_l (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

- Il circuito C scrive, invece:

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot \vec{dl}' = -\frac{d}{dt'} \int_{S'} \vec{B}' \cdot \hat{n}' dS'$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. II

- Vogliamo scrivere l'equazione precedente in funzione di un vettore $\vec{A}$ definito in ogni punto del circuito C e lo chiameremo "potenziale vettore":

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot d\vec{l}' = -\frac{d}{dt'} \int_{S'} \vec{B}' \cdot \hat{n}' dS' = -\frac{d}{dt'} \oint_{l'} \vec{A}' \cdot d\vec{l}'$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. II

- Vogliamo scrivere l'equazione precedente in funzione di un vettore $\vec{A}$ definito in ogni punto del circuito C e lo chiameremo "potenziale vettore":

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot d\vec{l}' = -\frac{d}{dt'} \int_{S'} \vec{B}' \cdot \hat{n}' dS' = -\frac{d}{dt'} \oint_{l'} \vec{A}' \cdot d\vec{l}'$$

- Poiché la linea di integrazione non dipende dal tempo, l'equazione precedente assume la forma:

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot d\vec{l}' = \oint_{l'} \left(-\frac{\partial \vec{A}'}{\partial t'} \cdot d\vec{l}' \right)$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. II

- Vogliamo scrivere l'equazione precedente in funzione di un vettore $\vec{A}$ definito in ogni punto del circuito C e lo chiameremo "potenziale vettore":

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot d\vec{l}' = -\frac{d}{dt'} \int_{S'} \vec{B}' \cdot \hat{n}' dS' = -\frac{d}{dt'} \oint_{l'} \vec{A}' \cdot d\vec{l}'$$

- Poiché la linea di integrazione non dipende dal tempo, l'equazione precedente assume la forma:

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot d\vec{l}' = \oint_{l'} \left(-\frac{\partial \vec{A}'}{\partial t'} \cdot d\vec{l}' \right)$$

- Infine, poiché una legge fisica deve avere la stessa forma in ogni SRI, ipotizziamo che la legge dell'induzione debba essere:

$$\mathcal{E} = \oint_{l} \left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + (\vec{V} \times \vec{B}) \right] \cdot d\vec{l}$$

che è la legge generale dell'induzione nel caso di circuiti filiformi e rigidi.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. III

Si osservi come questo tipo di argomentazione non possa essere applicato quando $\Rightarrow$

- Il magnete M scrive:

$$\mathcal{E} = \oint_l (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. III

Si osservi come questo tipo di argomentazione non possa essere applicato quando $\Rightarrow$

- Il magnete M scrive:

$$\mathcal{E} = \oint_l (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

- Il circuito C scrive, invece:

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot \vec{dl}' = -\frac{d\Phi'}{dt'}$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. III

Si osservi come questo tipo di argomentazione non possa essere applicato quando $\Rightarrow$

- Il magnete M scrive:

$$\mathcal{E} = \oint_l (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

- Il circuito C scrive, invece:

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot \vec{dl}' = -\frac{d\Phi'}{dt'}$$

- Perchè la somma dei due integrali NON è la legge dell'induzione

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. III

Si osservi come questo tipo di argomentazione non possa essere applicato quando $\Rightarrow$

- Il magnete M scrive:

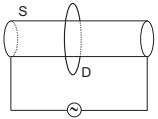
$$\mathcal{E} = \oint_l (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

- Il circuito C scrive, invece:

$$\mathcal{E}' = \oint_{l'} \vec{E}' \cdot \vec{dl}' = -\frac{d\Phi'}{dt'}$$

- Perchè la somma dei due integrali NON è la legge dell'induzione
- La ragione risiede nel fatto che abbiamo sommato un'equazione locale con un'equazione non - locale

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. IV



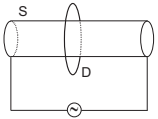
Una corrente alternata a bassa frequenza I circola nel lungo solenoide S di raggio a_S. Nell'anello filiforme D di raggio a_R centrato sull'asse del solenoide, viene indotta una *fem*. Nel caso di un solenoide ideale (costituito da una serie infinita di bobine circolari) il campo magnetico al di fuori del solenoide è nullo.

- La *fem* indotta nell'anello è data da:

$$\mathcal{E} = -\oint_{ring} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{dl} = -\frac{d}{dt} \oint_{ring} \vec{A} \cdot \vec{dl} = -2\pi a_R \frac{dA}{dt} \tag{1}$$

dove a_R è il raggio dell'anello.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. IV



Una corrente alternata a bassa frequenza I circola nel lungo solenoide S di raggio a_S. Nell'anello filiforme D di raggio a_R centrato sull'asse del solenoide, viene indotta una *fem*. Nel caso di un solenoide ideale (costituito da una serie infinita di bobine circolari) il campo magnetico al di fuori del solenoide è nullo.

- La *fem* indotta nell'anello è data da:

$$\mathcal{E} = -\oint_{ring} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{dl} = -\frac{d}{dt} \oint_{ring} \vec{A} \cdot \vec{dl} = -2\pi a_R \frac{dA}{dt} \tag{1}$$

  dove a_R è il raggio dell'anello.

- La *fem* indotta può essere scritta come:

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} \int_{\mathcal{S}} \vec{B} \cdot \hat{n}\, d\mathcal{S} = -\mu_0 n \pi a_S^2 \frac{dI}{dt} \tag{2}$$

  dove $\mathcal{S}$ è una superficie arbitraria che ha come contorno il circuito e n è il numero di spire per unità di lunghezza del solenoide.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. V

- Eguagliando gli ultimi membri delle due precedenti equazioni, si ottiene:

$$A = \mu_0 \frac{n a_S^2}{2 a_R} I \tag{3}$$

dove la costante di integrazione è stata posta uguale a zero per ottenere un campo vettoriale che si annulli lontano dalla sorgente.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. V

- Eguagliando gli ultimi membri delle due precedenti equazioni, si ottiene:

$$A = \mu_0 \frac{n a_S^2}{2 a_R} I \tag{3}$$

  dove la costante di integrazione è stata posta uguale a zero per ottenere un campo vettoriale che si annulli lontano dalla sorgente.

- Il potenziale vettore all'esterno del solenoide è un vettore tangente ad una circonferenza centrata sull'asse del solenoide e diretto come la corrente nel solenoide.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. V

- Eguagliando gli ultimi membri delle due precedenti equazioni, si ottiene:

$$A = \mu_0 \frac{n a_S^2}{2 a_R} I \tag{3}$$

  dove la costante di integrazione è stata posta uguale a zero per ottenere un campo vettoriale che si annulli lontano dalla sorgente.

- Il potenziale vettore all'esterno del solenoide è un vettore tangente ad una circonferenza centrata sull'asse del solenoide e diretto come la corrente nel solenoide.
- Il potenziale vettore ha lo stesso valore in ogni punto dell'anello e la *fem* indotta è distribuita uniformemente lungo l'anello.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. V

- Eguagliando gli ultimi membri delle due precedenti equazioni, si ottiene:

$$A = \mu_0 \frac{n a_S^2}{2 a_R} I \tag{3}$$

  dove la costante di integrazione è stata posta uguale a zero per ottenere un campo vettoriale che si annulli lontano dalla sorgente.

- Il potenziale vettore all'esterno del solenoide è un vettore tangente ad una circonferenza centrata sull'asse del solenoide e diretto come la corrente nel solenoide.
- Il potenziale vettore ha lo stesso valore in ogni punto dell'anello e la *fem* indotta è distribuita uniformemente lungo l'anello.
- L'intero anello si comporta come una pila che produce corrente attraverso sé stessa.

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. V

- Eguagliando gli ultimi membri delle due precedenti equazioni, si ottiene:

$$A = \mu_0 \frac{n a_S^2}{2 a_R} I \tag{3}$$

  dove la costante di integrazione è stata posta uguale a zero per ottenere un campo vettoriale che si annulli lontano dalla sorgente.

- Il potenziale vettore all'esterno del solenoide è un vettore tangente ad una circonferenza centrata sull'asse del solenoide e diretto come la corrente nel solenoide.
- Il potenziale vettore ha lo stesso valore in ogni punto dell'anello e la *fem* indotta è distribuita uniformemente lungo l'anello.
- L'intero anello si comporta come una pila che produce corrente attraverso sé stessa.
- Dati due punti qualsiasi M e N sull'anello, si ha:

$$\varphi_M - \varphi_N = \mathcal{E} \frac{\Delta\alpha}{2\pi} - i\Delta R = \mathcal{E} \frac{\Delta\alpha}{2\pi} - \frac{\mathcal{E}}{R} \left(R \frac{\Delta\alpha}{2\pi} \right) = 0 \tag{4}$$

Come introdurre la legge dell'induzione elettromagnetica. V

- Eguagliando gli ultimi membri delle due precedenti equazioni, si ottiene:

$$A = \mu_0 \frac{n a_S^2}{2 a_R} I \tag{3}$$

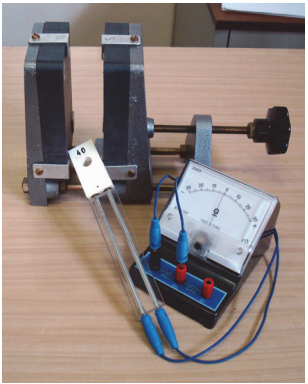
  dove la costante di integrazione è stata posta uguale a zero per ottenere un campo vettoriale che si annulli lontano dalla sorgente.

- Il potenziale vettore all'esterno del solenoide è un vettore tangente ad una circonferenza centrata sull'asse del solenoide e diretto come la corrente nel solenoide.
- Il potenziale vettore ha lo stesso valore in ogni punto dell'anello e la *fem* indotta è distribuita uniformemente lungo l'anello.
- L'intero anello si comporta come una pila che produce corrente attraverso sé stessa.
- Dati due punti qualsiasi M e N sull'anello, si ha:

$$\varphi_M - \varphi_N = \mathcal{E} \frac{\Delta\alpha}{2\pi} - i\Delta R = \mathcal{E} \frac{\Delta\alpha}{2\pi} - \frac{\mathcal{E}}{R}\left(R \frac{\Delta\alpha}{2\pi}\right) = 0 \tag{4}$$

- Quindi, l'anello è una linea equipotenziale.

Un esperimento in laboratorio



Gli studenti hanno a disposizione un magnete costituito da due espansioni (la cui distanza è regolabile), una serie avvolgimenti, di forma quadrata o rettangolare (con lati di lunghezza diversa), costituiti da un numero variabile di spire e un galvanometro a zero centrale. Vedi: un esperimento in laboratorio

L'induzione elettromagnetica nei manuali. I

Author	Title	Year
E. Riecke	Lehrbuch der Experimental Physik Zweiter Band, Magnetismus, Elektrizität. Wärme	1896
H. Bouasse	Cours de Magnétisme et d'Électricité Première Partie - Étude du Champ Magnétique	1914
O. D. Chwolson	Traité de Physique Tome V Prem. Fasc. - Champ Magnétique Variable	1914
J. C. Slater and N. H. Frank	Electromagnetism	1947
L. L. Landau and E. M. Lifshitz	Electrodynamics of Continuous Media	1960
R. Feynman, R. Leighton and M. Sands	The Feynman lectures on Physics vol 2	1963
J. D. Jackson	Classical Electrodynamics 3 ed.	1999
W. K. H. Panofsky and M . Phillips	Classical Electricity and Magnetism 2 ed.	1955
E. M. Purcell and D. J. Morin	Electricity and Magnetism 3 ed.	2013
A. Zangwill	Modern Electrodynamics	2013

Tabella: List of textbooks analyzed.

L'induzione elettromagnetica nei manuali. II

- L'unico che introduce la legge di Maxwell è Henri Bouasse (1914). Tuttavia, diversamente da Maxwell, Bouasse la costruisce pezzo per pezzo. Bouasse non cita Maxwell, coerentemente con la scelta esplicita di non citare alcun altro autore

L'induzione elettromagnetica nei manuali. II

- L'unico che introduce la legge di Maxwell è Henri Bouasse (1914). Tuttavia, diversamente da Maxwell, Bouasse la costruisce pezzo per pezzo. Bouasse non cita Maxwell, coerentemente con la scelta esplicita di non citare alcun altro autore
- Alcuni introducono la legge del flusso come risultato degli esperimenti condotti

L'induzione elettromagnetica nei manuali. II

- L'unico che introduce la legge di Maxwell è Henri Bouasse (1914). Tuttavia, diversamente da Maxwell, Bouasse la costruisce pezzo per pezzo. Bouasse non cita Maxwell, coerentemente con la scelta esplicita di non citare alcun altro autore
- Alcuni introducono la legge del flusso come risultato degli esperimenti condotti
- Altri, usando la legge del flusso, derivano l'equazione del rotore del campo elettrico

L'induzione elettromagnetica nei manuali. II

- L'unico che introduce la legge di Maxwell è Henri Bouasse (1914). Tuttavia, diversamente da Maxwell, Bouasse la costruisce pezzo per pezzo. Bouasse non cita Maxwell, coerentemente con la scelta esplicita di non citare alcun altro autore
- Alcuni introducono la legge del flusso come risultato degli esperimenti condotti
- Altri, usando la legge del flusso, derivano l'equazione del rotore del campo elettrico
- Altri definiscono la *fem* indotta come $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$, incontrando così seri problemi quando il circuito indotto si muove

L'induzione elettromagnetica nei manuali. II

- L'unico che introduce la legge di Maxwell è Henri Bouasse (1914). Tuttavia, diversamente da Maxwell, Bouasse la costruisce pezzo per pezzo. Bouasse non cita Maxwell, coerentemente con la scelta esplicita di non citare alcun altro autore
- Alcuni introducono la legge del flusso come risultato degli esperimenti condotti
- Altri, usando la legge del flusso, derivano l'equazione del rotore del campo elettrico
- Altri definiscono la *fem* indotta come $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$, incontrando così seri problemi quando il circuito indotto si muove
- In particolare, Panofsky & Phillips e Jackson scambiano tra di loro i due sistemi di riferimento pur di ottenere la formula corretta (nell'approssimazione di velocità piccole) per la trasformazione dei campi

L'induzione elettromagnetica nei manuali. II

- L'unico che introduce la legge di Maxwell è Henri Bouasse (1914). Tuttavia, diversamente da Maxwell, Bouasse la costruisce pezzo per pezzo. Bouasse non cita Maxwell, coerentemente con la scelta esplicita di non citare alcun altro autore
- Alcuni introducono la legge del flusso come risultato degli esperimenti condotti
- Altri, usando la legge del flusso, derivano l'equazione del rotore del campo elettrico
- Altri definiscono la *fem* indotta come $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$, incontrando così seri problemi quando il circuito indotto si muove
- In particolare, Panofsky & Phillips e Jackson scambiano tra di loro i due sistemi di riferimento pur di ottenere la formula corretta (nell'approssimazione di velocità piccole) per la trasformazione dei campi
- Coloro che definiscono correttamente la *fem* indotta non introducono il potenziale vettore

L'induzione elettromagnetica nei manuali. III

- In questo panorama emergono due eccezioni

L'induzione elettromagnetica nei manuali. III

- In questo panorama emergono due eccezioni
- Feynman sostiene che la legge del flusso è solo una regola di calcolo e introduce il termine "regola del flusso"...

L'induzione elettromagnetica nei manuali. III

- In questo panorama emergono due eccezioni
- Feynman sostiene che la legge del flusso è solo una regola di calcolo e introduce il termine "regola del flusso"...
- ...e afferma che la "regola del flusso" "deve essere applicata a circuiti nei quali il materiale rimane lo stesso. Quando il materiale cambia, dobbiamo ritornare alle leggi fondamentali. La fisica corretta è sempre data dalle due leggi fondamentali":

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

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

L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente

L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente
- Zangwill scrive: "La quarta forza, la forza di Coulomb - Lorentz, si esercita su una particella con carica q e velocità $\vec{v}$ in presenza di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{B}$:"

L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente
- Zangwill scrive: "La quarta forza, la forza di Coulomb - Lorentz, si esercita su una particella con carica q e velocità $\vec{v}$ in presenza di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{B}$:"
- L'induzione elettromagnetica è trattata calcolando l'integrale $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$

L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente
- Zangwill scrive: "La quarta forza, la forza di Coulomb - Lorentz, si esercita su una particella con carica q e velocità $\vec{v}$ in presenza di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{B}$:"
- L'induzione elettromagnetica è trattata calcolando l'integrale $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$
- Tuttavia, questo integrale non è posto uguale alla *fem* indotta

L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente
- Zangwill scrive: "La quarta forza, la forza di Coulomb - Lorentz, si esercita su una particella con carica q e velocità $\vec{v}$ in presenza di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{B}$:"
- L'induzione elettromagnetica è trattata calcolando l'integrale $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$
- Tuttavia, questo integrale non è posto uguale alla *fem* indotta
- La corretta definizione della *fem* indotta è invece ripresa solo nell'approssimazione di velocità piccole...

L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente
- Zangwill scrive: "La quarta forza, la forza di Coulomb - Lorentz, si esercita su una particella con carica q e velocità $\vec{v}$ in presenza di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{B}$:"
- L'induzione elettromagnetica è trattata calcolando l'integrale $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$
- Tuttavia, questo integrale non è posto uguale alla *fem* indotta
- La corretta definizione della *fem* indotta è invece ripresa solo nell'approssimazione di velocità piccole...
- ...pervenendo così alla formula

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} + \oint_l (\vec{v}_d \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

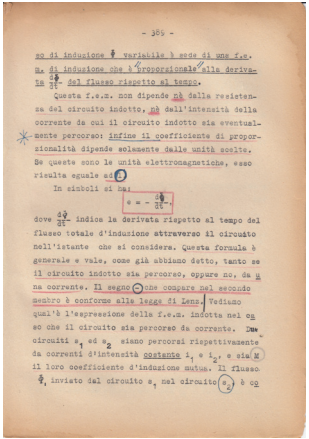
L'induzione elettromagnetica nei manuali. IV

- Il manuale di Andrew Zangwill, è il solo che tiene conto della letteratura recente
- Zangwill scrive: "La quarta forza, la forza di Coulomb - Lorentz, si esercita su una particella con carica q e velocità $\vec{v}$ in presenza di un campo elettrico $\vec{E}$ e di un campo magnetico $\vec{B}$:"
- L'induzione elettromagnetica è trattata calcolando l'integrale $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$
- Tuttavia, questo integrale non è posto uguale alla *fem* indotta
- La corretta definizione della *fem* indotta è invece ripresa solo nell'approssimazione di velocità piccole...
- ...pervenendo così alla formula

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} + \oint_l (\vec{v}_d \times \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

- Complessivamente, la trattazione è ambigua. Come dimostra la citazione di due articoli concettualmente antitetici: Scanlon et al., 1969 e Giuliani, 2008

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. I



- 385 -

zo di induzione Φ variabile è sede di una f.e.m. di induzione che è proportionale alla derivata $\frac{d\Phi}{dt}$ del flusso rispetto al tempo.

Questa f.e.m. non dipende nè dalla resistenza del circuito indotto, nè dell'intensità della corrente da cui il circuito indotto sia eventualmente percorso: infine il coefficiente di proporzionalità dipende solamente dalle unità scelte. Se queste sono le unità elettromagnetiche, esso risulta eguale ad -1.

In simboli si ha:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

dove $\frac{d\Phi}{dt}$ indica la derivata rispetto al tempo del flusso totale d'induzione attraverso il circuito nell'istante che si considera. Questa formula è generale e vale, come già abbiamo detto, tanto se il circuito indotto sia percorso, oppure no, da una corrente. Il segno $-$ che compare nel secondo membro è conforme alla legge di Lenz. Vediamo quali è l'espressione della f.e.m. indotta nel caso che il circuito sia percorso da corrente. Due circuiti s_1 ed s_2 siano percorsi rispettivamente da correnti d'intensità costante i_1 e i_2, e sia M il loro coefficiente d'induzione mutua. Il flusso Φ_1 inviato dal circuito s_1 nel circuito s_2 è co

Figura: Lezioni di Fisica Sperimentale - Elettrologia di Orazio Specchia, p. 389

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. II

Figura: Orazio Specchia, Gilda Olivelli, Luigi Giulotto. Villa Monastero, Varenna, anni '50

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."
- On electromagnetic induction [3 agosto 2000] qui

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."
- On electromagnetic induction [3 agosto 2000] qui
- Maxwell entra in scena (5 dicembre 2001) qui

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."
- On electromagnetic induction [3 agosto 2000] qui
- Maxwell entra in scena (5 dicembre 2001) qui
- "Il lavoro sul mio libro di testo di elettromagnetismo avanza costantemente ma molto lentamente. Sono al punto dove vorrei citare il tuo Preprint dal 2000, "On electromagnetic induction". È stato pubblicato? Se no, sono quasi incline a citare il tuo libro di testo (in italiano) - Andrew Zangwill [4 giugno 2007].

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."
- On electromagnetic induction [3 agosto 2000] qui
- Maxwell entra in scena (5 dicembre 2001) qui
- "Il lavoro sul mio libro di testo di elettromagnetismo avanza costantemente ma molto lentamente. Sono al punto dove vorrei citare il tuo Preprint dal 2000, "On electromagnetic induction". È stato pubblicato? Se no, sono quasi incline a citare il tuo libro di testo (in italiano) - Andrew Zangwill [4 giugno 2007].
- "Penso che...il lavoro ci dica qualcosa nuovo, perché l'autore richiama la nostra attenzione su alcuni punti sottili che hanno - con le sue parole - rilevanza concettuale prima di tutto nell'insegnamento della fisica, dove sono generalmente ignorati o trascurati...Mi pare che io abbia così risposto alla domanda se questo lavoro è abbastanza originale per essere pubblicato su EPL".

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."
- On electromagnetic induction [3 agosto 2000] qui
- Maxwell entra in scena (5 dicembre 2001) qui
- "Il lavoro sul mio libro di testo di elettromagnetismo avanza costantemente ma molto lentamente. Sono al punto dove vorrei citare il tuo Preprint dal 2000, "On electromagnetic induction". È stato pubblicato? Se no, sono quasi incline a citare il tuo libro di testo (in italiano) - Andrew Zangwill [4 giugno 2007].
- "Penso che...il lavoro ci dica qualcosa nuovo, perché l'autore richiama la nostra attenzione su alcuni punti sottili che hanno - con le sue parole - rilevanza concettuale prima di tutto nell'insegnamento della fisica, dove sono generalmente ignorati o trascurati...Mi pare che io abbia così risposto alla domanda se questo lavoro è abbastanza originale per essere pubblicato su EPL".
- "...è mostrato che la regola del flusso rende conto della forza elettromotrice indotta solo quando il circuito è filiforme. In altri casi più generali, deve essere sostituita da una legge generale derivata integrando la forza di Lorentz su una carica puntiforme su un circuito chiuso. Sebbene la sua natura sia essenzialmente didattica, il lavoro è interessante e degno di essere pubblicato".

Verso la legge dell'induzione elettromagnetica. III

- "Tuttavia, tre su quattro di noi che hanno studiato l'articolo ritengono che questo lavoro aggiunga solo confusione a questo difficile argomento [26 giugno 2000]."
- On electromagnetic induction [3 agosto 2000] qui
- Maxwell entra in scena (5 dicembre 2001) qui
- "Il lavoro sul mio libro di testo di elettromagnetismo avanza costantemente ma molto lentamente. Sono al punto dove vorrei citare il tuo Preprint dal 2000, "On electromagnetic induction". È stato pubblicato? Se no, sono quasi incline a citare il tuo libro di testo (in italiano) - Andrew Zangwill [4 giugno 2007].
- "Penso che...il lavoro ci dica qualcosa nuovo, perché l'autore richiama la nostra attenzione su alcuni punti sottili che hanno - con le sue parole - rilevanza concettuale prima di tutto nell'insegnamento della fisica, dove sono generalmente ignorati o trascurati...Mi pare che io abbia così risposto alla domanda se questo lavoro è abbastanza originale per essere pubblicato su EPL".
- "...è mostrato che la regola del flusso rende conto della forza elettromotrice indotta solo quando il circuito è filiforme. In altri casi più generali, deve essere sostituita da una legge generale derivata integrando la forza di Lorentz su una carica puntiforme su un circuito chiuso. Sebbene la sua natura sia essenzialmente didattica, il lavoro è interessante e degno di essere pubblicato".
- "Electromagnetic induction: how the flux rule has superseded Maxwell's general law [?,2022]"

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo
- Ampère, quelli di Elettrostatica, Magnetostatica ed Elettrodinamica

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo
- Ampère, quelli di Elettrostatica, Magnetostatica ed Elettrodinamica
- Ma il rinnovamento del lessico non fu lineare

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo
- Ampère, quelli di Elettrostatica, Magnetostatica ed Elettrodinamica
- Ma il rinnovamento del lessico non fu lineare
- Faraday raccolse le sue ricerche nelle "Experimental Researches in Electricity"

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo
- Ampère, quelli di Elettrostatica, Magnetostatica ed Elettrodinamica
- Ma il rinnovamento del lessico non fu lineare
- Faraday raccolse le sue ricerche nelle "Experimental Researches in Electricity"
- e Maxwell intitolò il suo Trattato "A Treatise of Electricity and Magnetism"

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo
- Ampère, quelli di Elettrostatica, Magnetostatica ed Elettrodinamica
- Ma il rinnovamento del lessico non fu lineare
- Faraday raccolse le sue ricerche nelle "Experimental Researches in Electricity"
- e Maxwell intitolò il suo Trattato "A Treatise of Electricity and Magnetism"
- Maxwell denotò con la parola campo elettrico "la porzione di spazio in prossimità di corpi elettrizzati, considerata con riferimento ai fenomeni elettrici"

Dei nomi e delle cose. I

- Nel corso dell'Ottocento, le nuove conoscenze furono accompagnate da un rinnovamento del lessico
- Oersted introdusse il termine Elettromagnetismo
- Ampère, quelli di Elettrostatica, Magnetostatica ed Elettrodinamica
- Ma il rinnovamento del lessico non fu lineare
- Faraday raccolse le sue ricerche nelle "Experimental Researches in Electricity"
- e Maxwell intitolò il suo Trattato "A Treatise of Electricity and Magnetism"
- Maxwell denotò con la parola campo elettrico "la porzione di spazio in prossimità di corpi elettrizzati, considerata con riferimento ai fenomeni elettrici"
- e, in tutto il suo Trattato, continuò ad usare il termine forza elettromotrice per denotare sia ciò che noi chiamiamo "campo elettrico" ($\vec{E}$), sia il suo integrale di linea $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl}$

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei
- L'Elettromagnetismo che oggi si insegna andrebbe designato con il termine Elettromagnetismo di Maxwell - Lorentz - Einstein

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei
- L'Elettromagnetismo che oggi si insegna andrebbe designato con il termine Elettromagnetismo di Maxwell - Lorentz - Einstein
- Non si dovrebbero vedere titoli del tipo Elettrodinamica Moderna

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei
- L'Elettromagnetismo che oggi si insegna andrebbe designato con il termine Elettromagnetismo di Maxwell - Lorentz - Einstein
- Non si dovrebbero vedere titoli del tipo Elettrodinamica Moderna
- Né si dovrebbe usare il termine Induzione magnetica per designare il vettore campo magnetico $\vec{B}$

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei
- L'Elettromagnetismo che oggi si insegna andrebbe designato con il termine Elettromagnetismo di Maxwell - Lorentz - Einstein
- Non si dovrebbero vedere titoli del tipo Elettrodinamica Moderna
- Né si dovrebbe usare il termine Induzione magnetica per designare il vettore campo magnetico $\vec{B}$
- O chiamare "campo magnetico" il vettore $\vec{H} = \vec{B}_0/\mu_0 \ldots$

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei
- L'Elettromagnetismo che oggi si insegna andrebbe designato con il termine Elettromagnetismo di Maxwell - Lorentz - Einstein
- Non si dovrebbero vedere titoli del tipo Elettrodinamica Moderna
- Né si dovrebbe usare il termine Induzione magnetica per designare il vettore campo magnetico $\vec{B}$
- O chiamare "campo magnetico" il vettore $\vec{H} = \vec{B}_0/\mu_0 \ldots$
- ... per poi dover specificare che, nell'espressione della forza di Lorentz non compare il campo magnetico $\vec{H}$, ma il campo $\vec{B}$

Dei nomi e delle cose. II

- La sedimentazione storica dei concetti e dei nomi riaffiora anche nei libri di testo contemporanei
- L'Elettromagnetismo che oggi si insegna andrebbe designato con il termine Elettromagnetismo di Maxwell - Lorentz - Einstein
- Non si dovrebbero vedere titoli del tipo Elettrodinamica Moderna
- Né si dovrebbe usare il termine Induzione magnetica per designare il vettore campo magnetico $\vec{B}$
- O chiamare "campo magnetico" il vettore $\vec{H} = \vec{B}_0/\mu_0 \ldots$
- . . . per poi dover specificare che, nell'espressione della forza di Lorentz non compare il campo magnetico $\vec{H}$, ma il campo $\vec{B}$
- Perché una denominazione non adeguata allo sviluppo delle conoscenze induce confusione concettuale

Dei nomi e delle cose. III

- E, a proposito della “regola del flusso”...

Dei nomi e delle cose. III

- E, a proposito della “regola del flusso”...
- ...essa è chiamata “legge di Faraday - Neumann - Lenz o varianti a piacere...

Dei nomi e delle cose. III

- E, a proposito della "regola del flusso"...
- ...essa è chiamata "legge di Faraday - Neumann - Lenz o varianti a piacere...
- ...ma, Faraday e Neumann con la "regola del flusso" non hanno nulla a che fare...

Dei nomi e delle cose. III

- E, a proposito della "regola del flusso"...
- ...essa è chiamata "legge di Faraday - Neumann - Lenz o varianti a piacere...
- ...ma, Faraday e Neumann con la "regola del flusso" non hanno nulla a che fare...
- ...e Lenz è chiamato in causa per il segno (-) che compare nella formula