

Faraday

Faraday analizzò il fenomeno dell'induzione elettromagnetica nelle sue diverse manifestazioni. Ne elenchiamo alcune: variazione di corrente elettrica nel circuito primario, movimento relativo tra circuito primario e secondario, movimento relativo tra magnete e circuito secondario. Un elemento messo in luce da Faraday fu la simmetria cinematica del fenomeno: a parità di tutte le altre condizioni, viene indotta nel circuito secondario la stessa corrente elettrica, sia che il magnete sia in moto rispetto al circuito, sia che il circuito sia in moto rispetto al magnete. Il fenomeno di induzione non dipende dal moto "assoluto" del circuito; dipende solo dal moto relativo tra circuito e magnete.

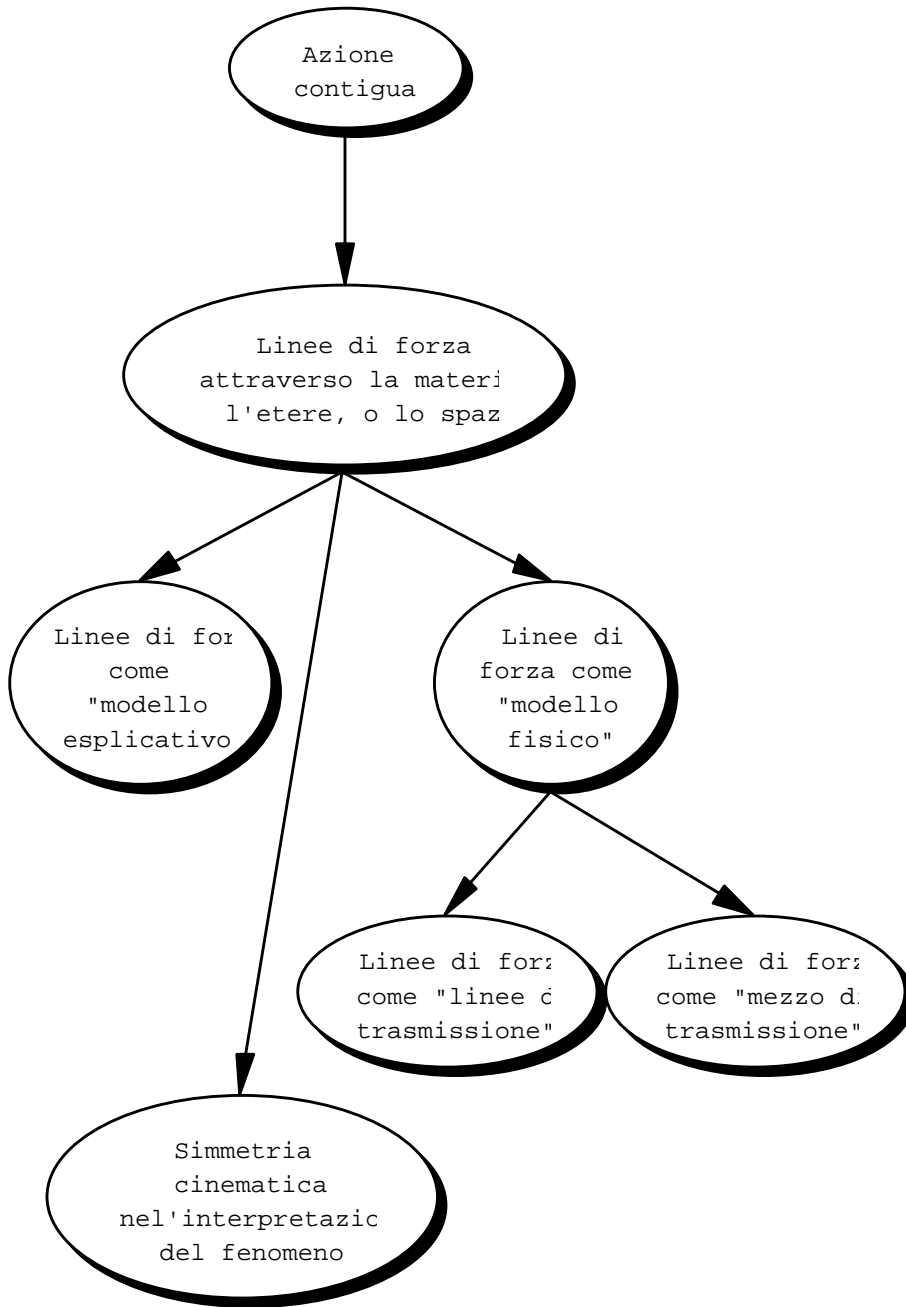
Faraday interpretò la corrente indotta come l'effetto dell'interazione tra il circuito secondario e le linee di forza magnetiche che si diffondono dal magnete o dal circuito primario. Un magnete o un circuito percorso da corrente elettrica propagano nello spazio una "azione" magnetica che ha la forma di linee di forza. Queste sono riconducibili alle curve descritte dalla limatura di ferro posta in prossimità di un magnete.

Viene indotta una corrente elettrica in un circuito quando questo attraversa le linee di forza oppure, reciprocamente, quando le linee di forza lo attraversano. L'intensità della corrente dipende dal numero di linee di forza attraversate nel tempo.

Quindi, per Faraday, il fenomeno dell'induzione elettromagnetica non è il risultato di forze che agiscono a distanza tra cariche o elementi di corrente, ma è una azione che si propaga attraverso le parti contigue dello spazio o del mezzo interposto. A questo proposito emergono, nell'opera di Faraday, due questioni sulle quali non è possibile formulare risposte definitive.

a) E' necessario un mezzo che supporti le linee di forza, oppure le linee di forza hanno sede nello spazio, oppure hanno una loro peculiare materialità? Se un mezzo è necessario, deve essere la materia ordinaria o può essere l'etere?

b) Le linee di forza sono per Faraday un modello esplicativo, oppure un modello fisico? Talvolta egli sembra optare per la prima ipotesi e talvolta per la seconda ipotesi; nel caso particolare dell'induzione elettromagnetica, egli sembra preferire la seconda interpretazione. Inoltre, questa seconda interpretazione può intendersi in due modi differenti: linee di forza come percorsi, traiettorie di trasmissione, oppure come veri e propri veicoli di trasmissione.



Maxwell

Maxwell si richiama esplicitamente a Faraday e al modello concettuale dell'azione contigua. In relazione al fenomeno dell'induzione elettromagnetica, troviamo in Maxwell due diverse trattazioni. Dapprima la spiegazione di Faraday in termini di linee di forza: la corrente elettrica indotta in un circuito è l'effetto del mutuo attraversamento tra il circuito e le linee di forza. Successivamente, Maxwell espone una teoria matematica per l'intensità elettromotrice \mathbf{E} :

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} - \frac{d\mathbf{A}}{dt} - \nabla\Psi,$$

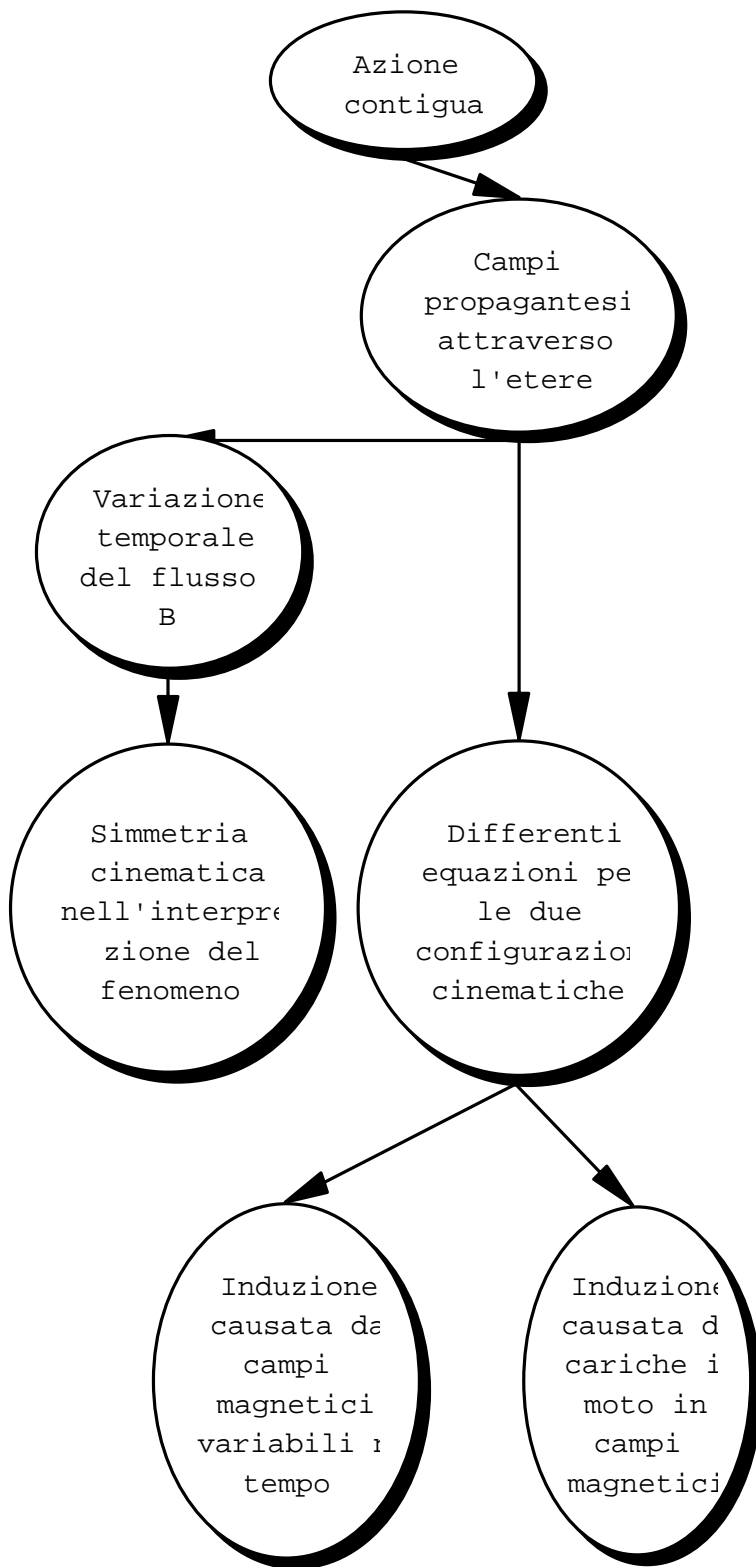
dove \mathbf{B} è l'"induzione magnetica" e \mathbf{A} è il "momento elettrocinetico", a noi noto come 'potenziale vettore'. I primi due termini a secondo membro rappresentano le due (simmetriche) configurazioni cinematiche: circuito in moto in un campo magnetico (il circuito 'va incontro' alle linee di forza) e campo magnetico variabile nell'intorno di un circuito in quiete (le linee di forza 'vanno incontro' al circuito), rispettivamente. Quietè e moto, per il circuito e per le linee di forza, non sono matematicamente equivalenti: si è persa la simmetria.

Il problema generale dell'invarianza cinematica era avvertito da Maxwell, il quale tenta di dimostrare che le equazioni per la forza elettromotrice non cambiano la loro forma per traslazione uniforme; egli constata che l'obiettivo è raggiunto solo nel caso delle correnti chiuse.

Nella descrizione del fenomeno dell'induzione elettromagnetica resta comunque l'asimmetria o dicotomia interpretativa per le due simmetriche configurazioni cinematiche. Questa dicotomia appare collegata ad una più generale dicotomia tra due diverse rappresentazioni o schemi concettuali, presenti nell'opera di Maxwell: campi e azione contigua, da una parte, particelle e forze, dall'altra. Le equazioni della teoria di Maxwell, che proponiamo nella trascrizione di Everitt, più compatta dell'originale, collegano reciprocamente campi con campi, campi con correnti, campi con forze, cariche, correnti.

[A] Induzione magnetica	$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$
[B] Forza elettromotrice	$\mathbf{E} = \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} - \dot{\mathbf{A}} - \nabla \psi$
[C] Forza meccanica	$\mathbf{F} = \mathbf{I} \wedge \mathbf{B} + e\mathbf{E} - m\nabla\Omega$
[D] Magnetizzazione	$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{J}$
[E] Correnti elettriche	$4\pi\mathbf{I} = \text{rot } \mathbf{H}$
[F] Corrente di conduzione	$\mathbf{I}' = \mathbf{CE}$
[G] Spostamento elettrico	$\mathbf{D} = (1/4\pi)\mathbf{KE}$
[H] Correnti vere	$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + \dot{\mathbf{D}}$
[J] Magnetizzazione indotta	$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$
[K] Densità elettrica di volume	$e = \text{div } \mathbf{D}$
[L] Densità magnetica di volume	$m = \text{div } \mathbf{J}$

Potremmo dire, semplificando estremamente, che l'elemento unificante, nella teoria di Maxwell, è l'etere. Attraverso l'etere, con velocità finita, si propagano le interazioni tra i campi e tra i campi e le loro sorgenti. Anche il fenomeno dell'induzione elettromagnetica ha sede nell'etere; questo è un sistema di riferimento privilegiato e distrugge, a priori, qualunque simmetria cinematica.



Lorentz

Lorentz esplicita compiutamente due nodi concettuali già presenti nell'opera di Maxwell:

- a) la duplice rappresentazione dei fenomeni elettromagnetici, sia in termini di azione contigua e campi, che in termini di forze e particelle,
- b) il problema della simmetria cinematica.

Si tratta di due questioni generali, che Lorentz affronta dal punto di vista dell'unificazione tra meccanica ed elettromagnetismo, ma che hanno una conseguenza anche sull'interpretazione del fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

Lorentz parte dall'ipotesi che, almeno al primo ordine, i fenomeni elettromagnetici debbano essere invarianti rispetto ad una traslazione uniforme. Ne segue matematicamente che, tra due differenti sistemi di riferimento inerziali, debbano valere particolari trasformazioni spazio-temporali e che i campi elettrici e magnetici si trasformino, al primo ordine, secondo la legge

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \wedge \mathbf{B}; \quad \mathbf{B}' = \mathbf{B} - \frac{\mathbf{v}}{c} \wedge \mathbf{E}$$

dove \mathbf{v} è la velocità relativa tra i due sistemi di riferimento.

Questo risultato indebolisce la distinzione tra campo elettrico e campo magnetico e indebolisce quindi l'interpretazione dicotomica del fenomeno dell'induzione elettromagnetica per le due differenti configurazioni cinematiche:

- a) forza magnetica agente sulle cariche elettriche del circuito in moto,
- b) forza elettrica prodotta dalla variazione del campo magnetico in prossimità del circuito in quiete.

Ma, da un altro punto di vista, Lorentz accentua e codifica la asimmetria tra forza elettrica e forza magnetica, introducendo una equazione che collega i valori dei campi \mathbf{D} e \mathbf{H} nell'etere con la forza subita da una particella da parte di questi campi:

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{D} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{H})$$

Questa equazione, secondo Lorentz, va aggiunta alle equazioni che collegano i campi fra loro e con le loro sorgenti, cariche e correnti elettriche.

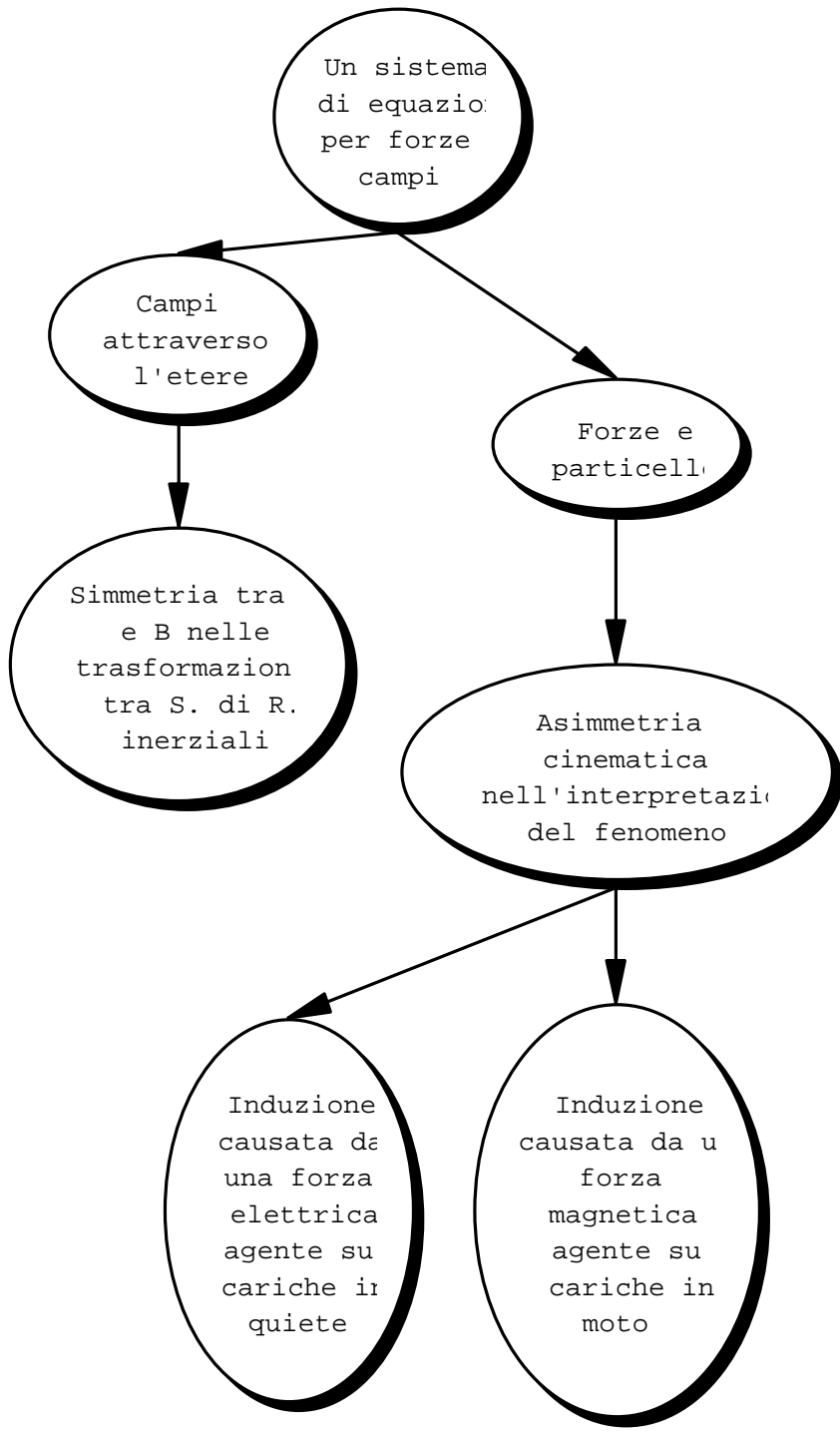
$$\text{div } \mathbf{D} = \rho$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = 4\pi (\mathbf{J} + \dot{\mathbf{D}})$$

$$4\pi c^2 \text{rot } \mathbf{D} = -\dot{\mathbf{H}}$$

Tutte le equazioni, complessivamente, dovevano formare un sistema completo in grado di interpretare tutti i fenomeni elettromagnetici.



Einstein

Nonostante possa sembrare, a prima vista, sorprendente citare Einstein tra i più importanti contributi all'interpretazione del fenomeno dell'induzione elettromagnetica, in realtà si tratta di una operazione assolutamente pertinente. Infatti, la memoria del 1905, nella quale Einstein formulò la teoria della Relatività Ristretta, inizia dichiarando insoddisfazione per il modo in cui veniva interpretata "l'azione elettrodinamica tra un magnete e un conduttore". Non pare soddisfacente ad Einstein che, sebbene le due simmetriche configurazioni cinematiche, conduttore in quiete e magnete in moto oppure conduttore in moto e magnete in quiete, conducano esattamente allo stesso fenomeno, l'interpretazione teorica faccia ricorso, nel primo caso, ad una forza elettrica, e, nel secondo caso, ad una forza magnetica.

Proprio queste considerazioni condussero Einstein alla formulazione della teoria della Relatività Ristretta. Come è noto, la teoria si fonda su due postulati:

- a) un principio di Relatività comune alla meccanica e all'elettromagnetismo,
- b) l'invarianza della velocità della luce nel vuoto.

L'obiettivo di Einstein presenta affinità con quello di Lorentz ma offre anche una diversa prospettiva. Sottolineiamo due elementi che distinguono Einstein da Lorentz:

- a) il rifiuto di un sistema di riferimento privilegiato e l'abbandono dell'etere,
- b) l'inversione del procedimento logico di Lorentz.

Einstein non procede più dall'invarianza delle equazioni elettromagnetiche alle leggi di trasformazione per lo spazio e il tempo ma dall'imposizione di condizioni sullo spazio e il tempo alle leggi di trasformazione per i campi elettromagnetici.

I campi elettrici e magnetici si trasformano, nel passaggio tra differenti sistemi di riferimento inerziali, secondo le leggi

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_{\parallel} &= \mathbf{E}_{\parallel} & \mathbf{B}'_{\parallel} &= \mathbf{B}_{\parallel} \\ \mathbf{E}'_{\perp} &= \gamma [\mathbf{E}_{\perp} + (\boldsymbol{\beta} \wedge \mathbf{B})_{\perp}] & \mathbf{B}'_{\perp} &= \gamma [\mathbf{B}_{\perp} - (\boldsymbol{\beta} \wedge \mathbf{E})_{\perp}] \end{aligned}$$

dove $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c$ e $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$.

Così come lo spazio e il tempo, il campo elettrico e il campo magnetico, considerati individualmente, dipendono dalla scelta del sistema di riferimento; ciò che un osservatore descrive come un semplice campo elettrico o un semplice campo magnetico, un altro osservatore descrive come la combinazione di un campo elettrico e di un campo magnetico. Scompare ogni asimmetria nella interpretazione dell'induzione elettromagnetica perché i campi elettrico e magnetico non sono entità distinte, così come non sono entità distinte la forza elettrica agente su un conduttore in quiete in un campo magnetico variabile e la forza magnetica agente su un conduttore in moto in un campo magnetico.

