

LA SINTESI DEI FENOMENI ELETTROMAGNETICI: LE EQUAZIONI DI MAXWELL

Le proprietà fondamentali dei campi elettrico e magnetico e le loro interazioni possono essere riassunte in quattro equazioni fondamentali dette *equazioni di Maxwell*.

Il fisico inglese James Clerk Maxwell (1831-1879) nel suo trattato *Treatise On Electricity and Magnetism* (Trattato sull'elettricità e il magnetismo), pubblicato nel 1873, dimostrò che tutte le proprietà dell'elettricità, del magnetismo e dell'induzione elettromagnetica possono essere derivate partendo da quattro sole equazioni.

Esse sono equazioni già note che prendono in considerazione sia il vettore campo elettrico \vec{E} e campo di induzione magnetica \vec{B} e ne esprimono il flusso e la circuitazione.

Pertanto, le equazioni sono le seguenti:

Equazione	Campo	Grandezza interessata	Principali conseguenze
$\Phi_{\Omega}(\vec{E}) = \frac{Q_{tot}}{\epsilon} \quad (6)$ (Teorema di Gauss per il campo elettrico)	\vec{E}	Flusso	Le cariche sono sorgenti del campo elettrico.
$\Gamma_{\mathcal{C}}(\vec{E}) = -\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t} \quad (7)$ (Teorema della circuitazione per il campo elettrico)	\vec{E}, \vec{B}	Circuitazione	<ul style="list-style-type: none"> • Correnti indotte. • Un campo magnetico variabile è sorgente di un campo elettrico.
$\Phi_{\Omega}(\vec{B}) = 0 \quad (8)$ (Teorema di Gauss per il campo magnetico)	\vec{B}	Flusso	Non esistono monopoli magnetici isolati.
$\Gamma_{\mathcal{C}}(\vec{B}) = \mu_0 \left(\sum_k i_k + \epsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right) \quad (9)$ (Teorema della circuitazione per il campo magnetico)	\vec{E}, \vec{B}	Circuitazione	Sorgenti del campo magnetico sono: <ul style="list-style-type: none"> • le correnti elettriche (primo addendo); • i campi elettrici variabili (secondo addendo).

La 1^a equazione (teorema di Gauss per il campo elettrico) dice che:

Il flusso del campo elettrico che attraversa una qualunque superficie chiusa S è pari al rapporto fra la carica netta contenuta nella superficie e la costante dielettrica ϵ_0 .

$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

è il **teorema di Gauss nel campo elettrostatico**, dal quale deriva che:

- le linee di forza di \vec{E} sono linee aperte;
- il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa non dipende dalla superficie che attraversa, ma solo dalle cariche interne che lo hanno generato.

La 2^a equazione (equazione di Faraday-Neumann-Lenz) dice che:

Una variazione nel tempo del flusso del campo magnetico attraverso una superficie ideale S (non chiusa) induce un campo elettrico la cui circuitazione è pari a:

$$\Gamma_{\mathcal{C}}(\vec{E}) = -\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}$$

dove $\Gamma_{\mathcal{C}}(\vec{E})$ è calcolata lungo la linea chiusa, contorno della superficie.

è la **legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann-Lenz**, da cui deriva che:

- un campo magnetico variabile genera in un conduttore una corrente indotta, e quindi un campo elettrico variabile, le cui linee di forza sono chiuse e concatenate con il campo magnetico.

La 3^a equazione (teorema di Gauss per il campo magnetico) dice che:

Il flusso del campo magnetico che attraversa una qualunque superficie chiusa S è sempre nullo.

$$\Phi_B = 0$$

è il **teorema di Gauss per il campo magnetico**, da cui deriva che:

- le linee di induzione magnetica sono chiuse;
- non esistono cariche magnetiche isolate.

La 4^a equazione (equazione di Ampere-Maxwell) dice che:

La circuitazione del campo magnetico, calcolata lungo una linea chiusa, è pari al prodotto fra la permeabilità magnetica e la somma della corrente effettiva e della corrente di spostamento è data dal prodotto fra la costante dielettrica e la rapidità di variazione nel tempo del flusso del campo elettrico E . La superficie considerata per il calcolo del flusso è quella che ha per contorno la linea chiusa lungo la quale si calcola la circuitazione.

$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{B}) = \mu_0 \left(\sum_k i_k + \epsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right)$$

è la **generalizzazione della legge di Ampère** da cui deriva che:

- un campo elettrico variabile genera un campo magnetico variabile concatenato con il campo elettrico.

Le equazioni di Maxwell rappresentano un punto fermo nella storia della fisica: la prima unificazione di fenomeni apparentemente diversi, come quelli elettrici e magnetici.

La simmetria delle quattro equazioni:

- la prima e la terza riguardano il flusso dei due campi;
- la seconda e la quarta riguardano la circuitazione dei due campi;
- la prima mette in relazione il campo elettrico con le sue sorgenti (le cariche elettriche);
- la quarta mette in relazione il campo magnetico con le sue sorgenti (le correnti elettriche).

Le asimmetrie:

- la prima è relativa al flusso dei due campi: sappiamo che ciò è dovuto alla mancanza di monopoli magnetici e quindi all'assenza di sorgenti puntiformi per il campo magnetico, ciò spiega il diverso tipo di linee di campo e il diverso risultato del flusso dei due campi, elettrico e magnetico, nelle due equazioni;
- la seconda asimmetria risulta dal confronto fra la seconda e la quarta equazione: mentre nella seconda una variazione del campo magnetico genera un campo elettrico indotto, nella quarta non c'è alcun termine simile; ovvero sembrerebbe che non esista un fenomeno e una legge corrispondente che potrebbe essere provvisoriamente così enunciata: *la variazione di un campo elettrico genera un campo magnetico indotto.*

Poiché nella seconda e nella quarta equazione compaiono entrambi i campi si deduce che essi sono due aspetti diversi di un unico ente fisico: il **campo elettromagnetico**.

Il campo elettrostatico e il campo magnetico statico sono casi particolari del campo elettromagnetico e si ottengono, rispettivamente, se si hanno soltanto cariche ferme oppure soltanto correnti continue.