Campi Elettromagnetici

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica, Biomedica e delle Telecomunicazioni

a.a. 2023-2024 – Laurea "Triennale" – Secondo semestre – Secondo anno

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

Stefano Perna

Campi elettromagnetici

Campi elettromagnetici

Campi **elettro**magnetici

Campi elettro**magnetici**

Riepilogo lezione precedente

Perché si parla di campo?

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo è una grandezza che dipende dalle coordinate dello spazio o, più generalmente, dello spaziotempo

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t)$$

Il campo elettrico è un vettore

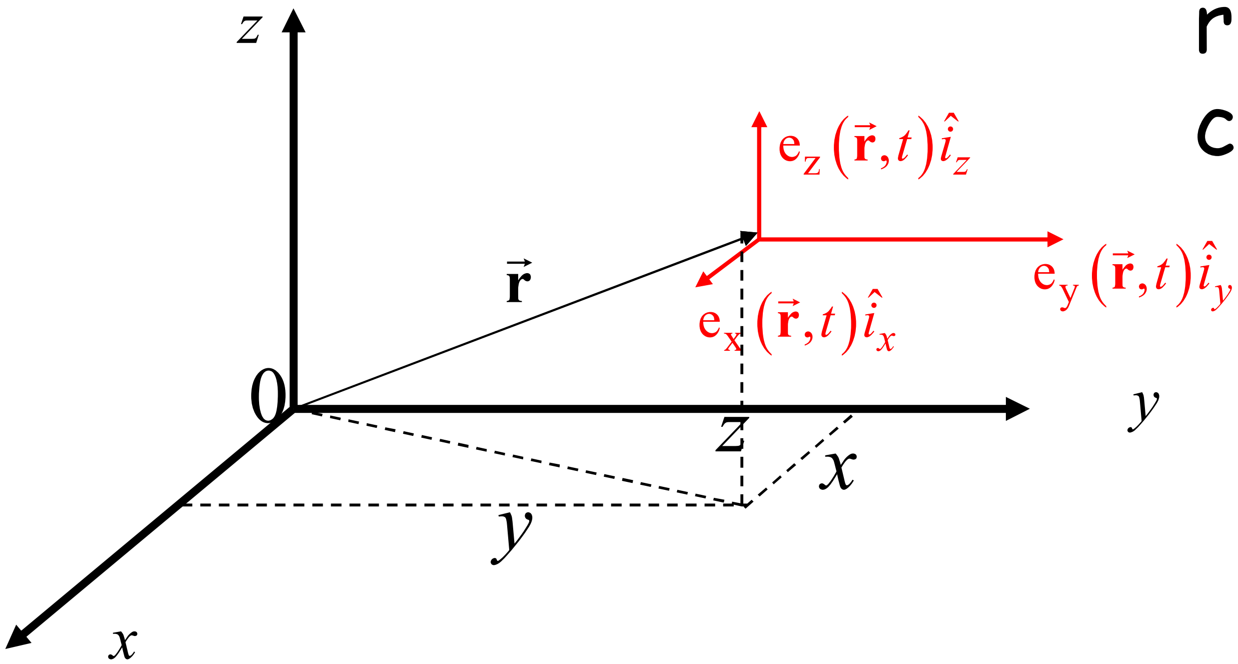
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_z$$

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(x,y,z,t)$$

$$\vec{\mathbf{r}} = (x,y,z)$$

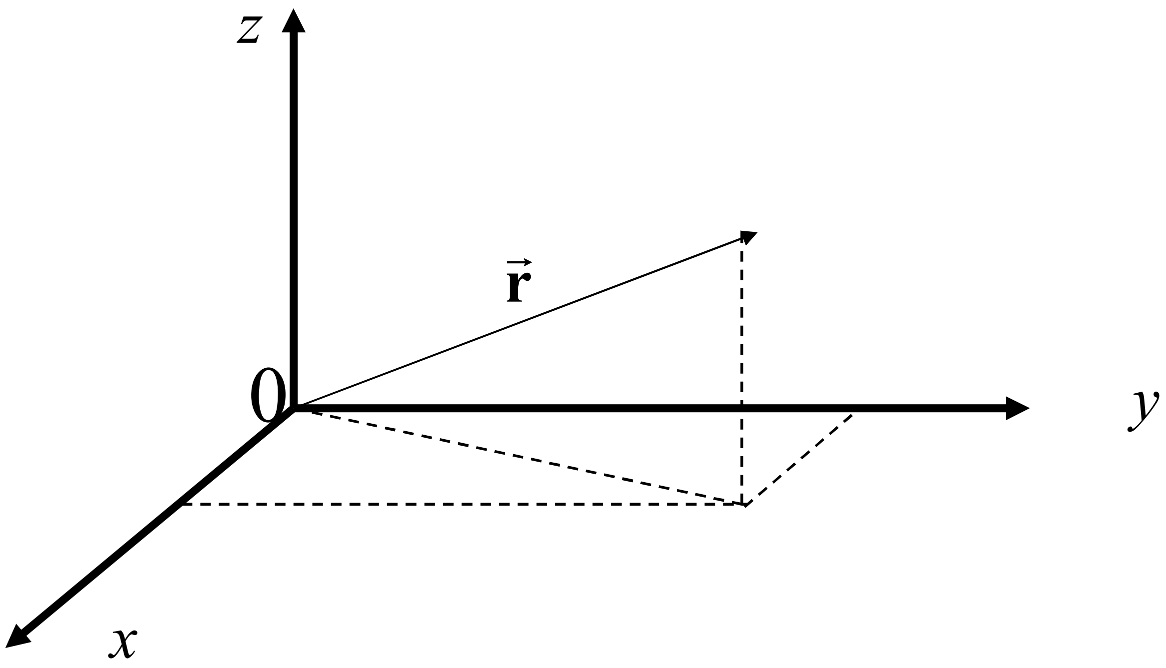


Sistema di riferimento cartesiano

Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \cancel{\vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z}$$

$$\cancel{\vec{\mathbf{r}} = (x, y, z)}$$

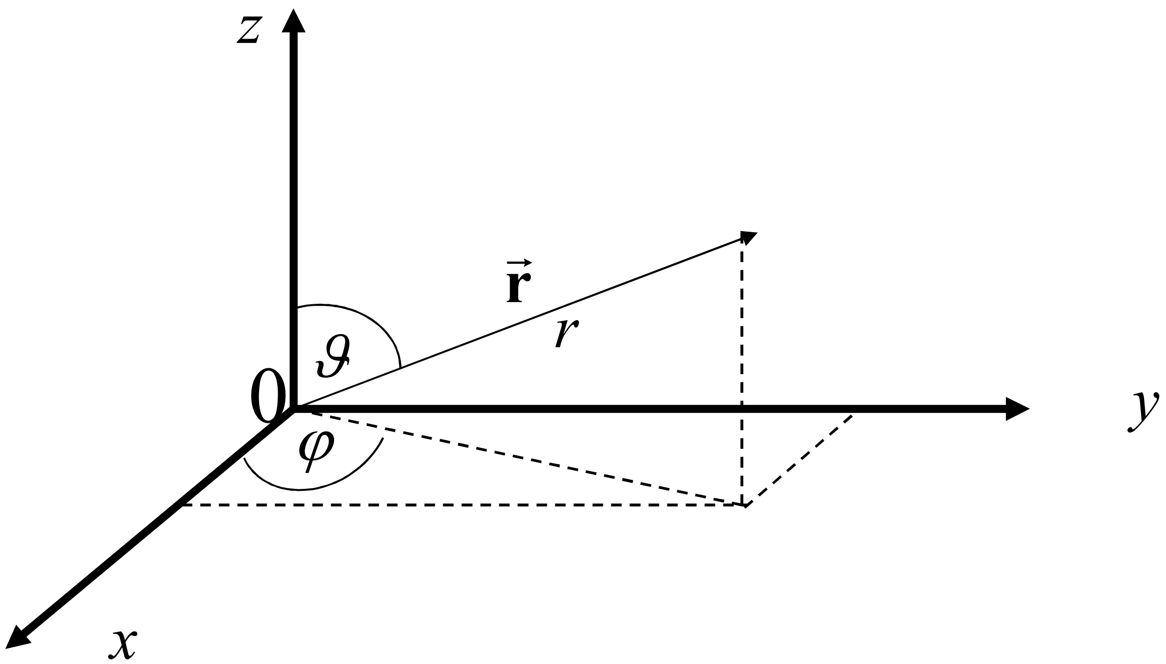


Sistema di riferimento sferico

Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \cancel{\vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z}$$

$$\vec{\mathbf{r}} = (r, \vartheta, \varphi)$$

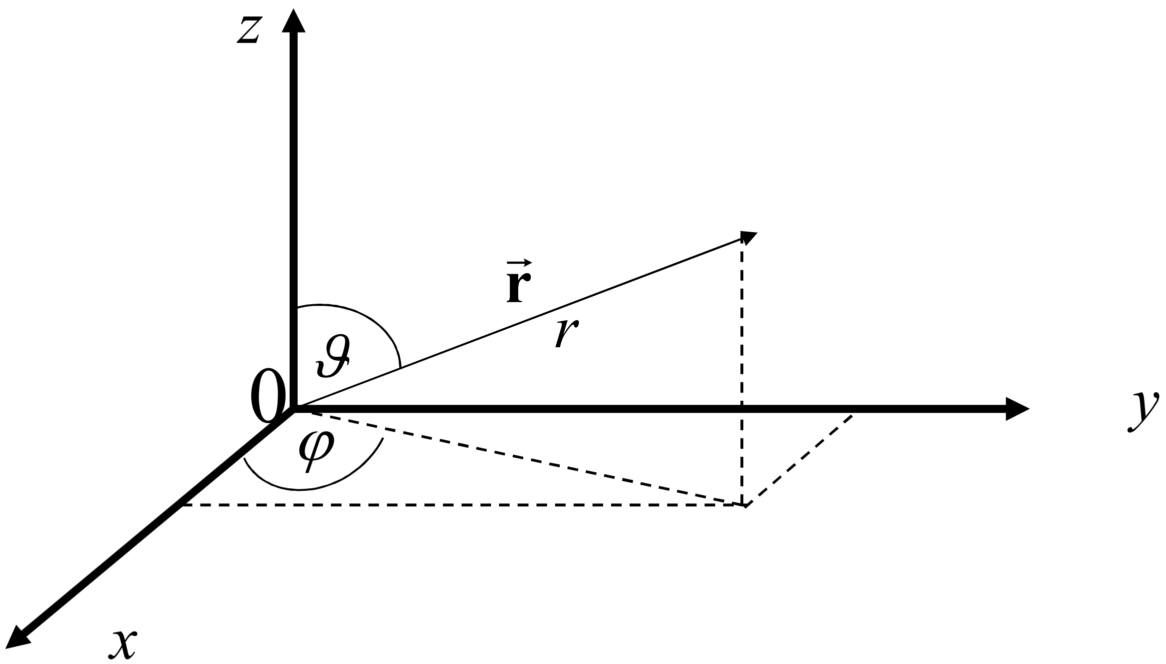


Sistema di riferimento sferico

Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \cancel{\vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)\hat{i}_z}$$

$$\vec{\mathbf{r}} = \left(r, \vartheta, \varphi\right)$$

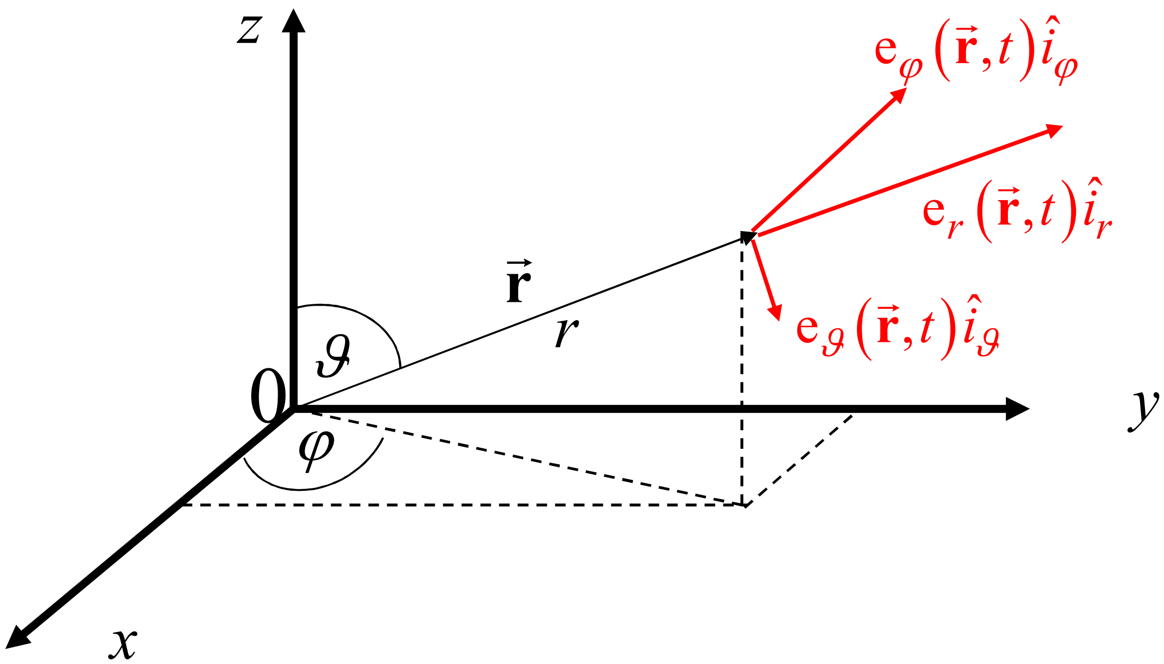


Sistema di riferimento sferico

Il <u>**campo elettrico**</u> dipende dallo <u>**spazio**</u> e dal <u>**tempo**</u>

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e}_r\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)\hat{i}_r + \mathrm{e}_\vartheta\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)\hat{i}_\vartheta + \mathrm{e}_\varphi\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)\hat{i}_\varphi$$

$$\vec{\mathbf{r}} = \left(r,\vartheta,\varphi\right)$$



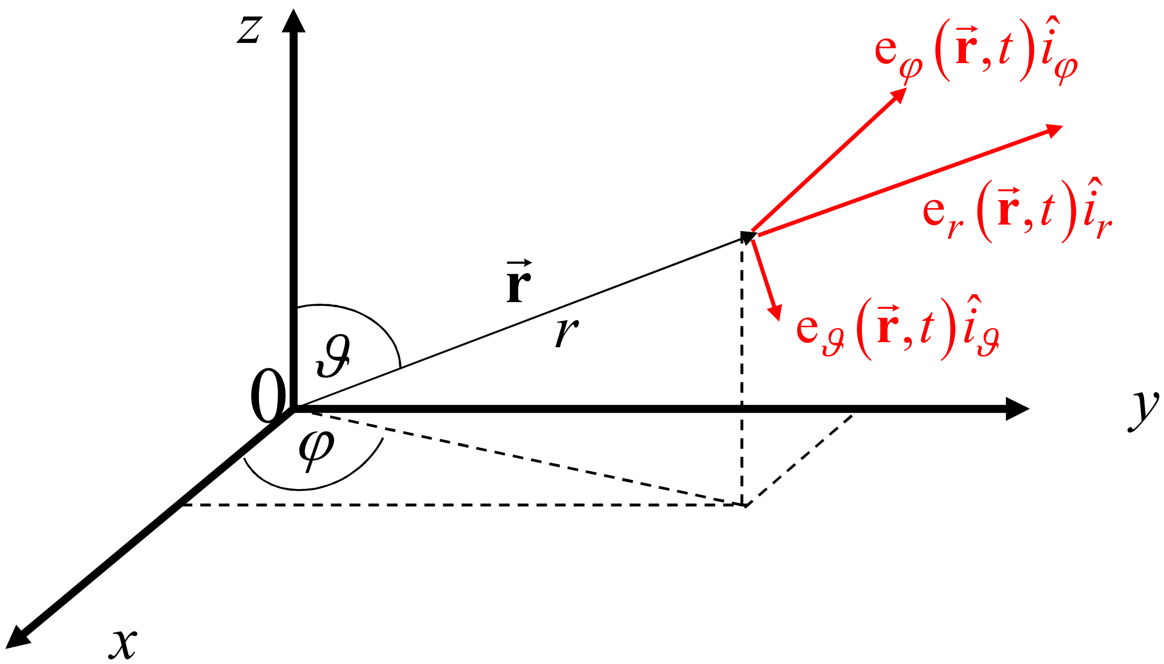
Sistema di riferimento sferico

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e}_r\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)\hat{i}_r + \mathrm{e}_\vartheta\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)\hat{i}_\vartheta + \mathrm{e}_\varphi\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)\hat{i}_\varphi$$

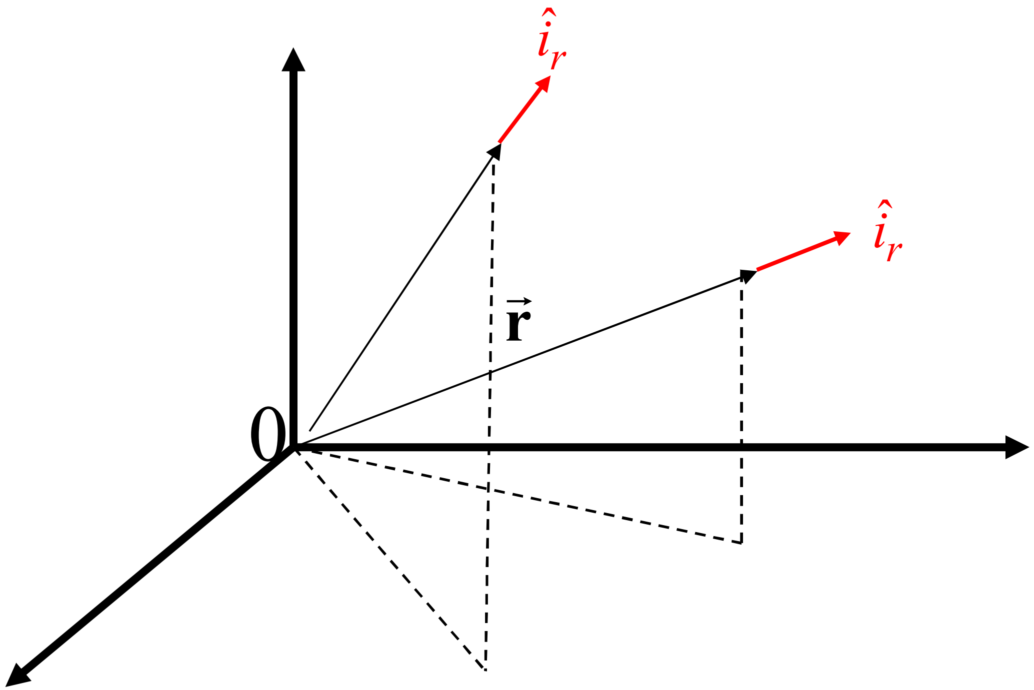
$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(r,\vartheta,\varphi,t)$$

$$\vec{\mathbf{r}} = \left(r,\vartheta,\varphi\right)$$



Sistema di riferimento sferico

Sistema di riferimento sferico



Campo elettromagnetico

Il **<u>campo elettrico</u>** dipende dallo **<u>spazio</u>** e dal **<u>tempo</u>**

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t)$$

$$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$

$$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \mathrm{e}_r(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_r + \mathrm{e}_\vartheta(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_\vartheta + \mathrm{e}_\varphi(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_\varphi$$

Campo elettromagnetico

Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)$$

$$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_z$$

$$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \mathrm{e}_r(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_r + \mathrm{e}_\vartheta(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_\vartheta + \mathrm{e}_\varphi(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_\varphi$$

Il **campo magnetico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

$$\vec{\mathbf{h}} = \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)$$

$$\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \mathrm{h_x}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_x + \mathrm{h_y}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_y + \mathrm{h_z}(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_z$$

$$\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \mathrm{h}_r(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_r + \mathrm{h}_\vartheta(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_\vartheta + \mathrm{h}_\varphi(\vec{\mathbf{r}},t)\hat{i}_\varphi$$

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

Campo elettromagnetico

James Clerk Maxwell 1831-1879

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right) = \rho\left(\vec{\mathbf{r}},t\right) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}\left(\vec{\mathbf{r}},t\right) = 0 \end{cases}$$

(Il lavoro di Maxwell) ..."è stato il più profondo e il più fruttuoso che la fisica ha sperimentato dal tempo di Newton"

Albert Einstein

Campo elettromagnetico

James Clerk Maxwell 1831-1879

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

(Il lavoro di Maxwell) ...”è stato il più profondo e il più fruttuoso che la fisica ha sperimentato dal tempo di Newton”

Albert Einstein

Color legend

New formulas, important considerations, important formulas, important concepts

Very important for the discussion

Memo

Mathematical tools to be exploited

Mathematics

Campo elettromagnetico

James Clerk Maxwell 1831-1879

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

(Il lavoro di Maxwell) ...”è stato il più profondo e il più fruttuoso che la fisica ha sperimentato dal tempo di Newton”

Albert Einstein

Cartesian Coordinates

$$\vec{\mathbf{A}}(\vec{\mathbf{r}},t)=A_x(x,y,z,t)\hat{i}_x+A_y(x,y,z,t)\hat{i}_y+A_z(x,y,z,t)\hat{i}_z$$

$$\nabla\cdot\vec{\mathbf{A}}(\vec{\mathbf{r}})=\frac{\partial A_x}{\partial x}+\frac{\partial A_y}{\partial y}+\frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla\times\vec{\mathbf{A}}(\vec{\mathbf{r}})=\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}-\frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\hat{i}_x+\left(\frac{\partial A_x}{\partial z}-\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)\hat{i}_y+\left(\frac{\partial A_y}{\partial x}-\frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\hat{i}_z$$

Campo elettromagnetico

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Campo elettrico	Volt/m
$\vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Induzione elettrica	Coulomb/m^2
$\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Campo magnetico	Ampere/m
$\vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Induzione magnetica	Weber/m^2
$\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Densità di corrente	Ampere/m^2
$\rho(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Densità di carica	Coulomb/m^3

Color legend

New formulas, important considerations,
important formulas, important concepts

Very important for the discussion

Memo

Mathematical tools to be exploited

Mathematics

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

		Unità di misura
$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Campo elettrico	Volt/m
$\vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Induzione elettrica	Coulomb/m^2
$\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Campo magnetico	Ampere/m
$\vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Induzione magnetica	Weber/m^2
$\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Densità di corrente	Ampere/m^2
$\rho(\vec{\mathbf{r}},t)$:	Densità di carica	Coulomb/m^3

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\cancel{\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t}} \\[2ex]
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \cancel{\dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t}} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\[2ex]
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\[1ex]
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

nel caso stazionario: derivate rispetto al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}) = 0 \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}}) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}}) = \rho(\vec{\mathbf{r}}) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = 0
\end{cases}
$$

nel caso stazionario: derivate rispetto al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}\left(\vec{\mathbf{r}}\right) = 0 \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}\left(\vec{\mathbf{r}}\right) = \rho\left(\vec{\mathbf{r}}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{h}}\left(\vec{\mathbf{r}}\right) = \vec{\mathbf{j}}\left(\vec{\mathbf{r}}\right) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}\left(\vec{\mathbf{r}}\right) = 0 \end{cases}$$

nel caso stazionario: derivate rispetto al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}) = 0 \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}}) = \rho(\vec{\mathbf{r}}) \end{cases}$$

Nell'ipotesi di stazionarietà, il campo elettrico e l'induzione elettrica sono indipendenti da campo magnetico e induzione magnetica

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}}) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}}) = 0 \end{cases}$$

nel caso stazionario: derivate rispetto al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

Nel caso più generale in cui si rimuove l'ipotesi di stazionarietà, fenomeni elettrici e fenomeni magnetici sono strettamente legati!

Non ha senso parlare di campo elettrico senza parlare di campo magnetico

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

Chi è la causa? Chi è l'effetto?

Campo elettromagnetico

Nel caso più generale in cui si rimuove l'ipotesi di stazionarietà, fenomeni elettrici e fenomeni magnetici sono strettamente legati!

Non ha senso parlare di campo elettrico senza parlare di campo magnetico

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

Chi è la causa? Chi è l'effetto?

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo?

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

Chi è la causa? Chi è l'effetto?

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di corrente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di carica} \end{cases}$$

… solito scenario …

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di corrente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di carica} \end{cases}$$

sorgenti!!

… solito scenario …

Campo elettromagnetico

..chi è la causa?

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di corrente della sorgente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di carica della sorgente} \end{cases}$$

…chi è l'effetto?

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{campo elettrico; } \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) \text{ induzione elettrica} \\ \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{campo magnetico; } \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) \text{ induzione magnetica} \end{cases}$$

Color legend

New formulas, important considerations, important formulas, important concepts

Very important for the discussion

Memo

Mathematical tools to be exploited

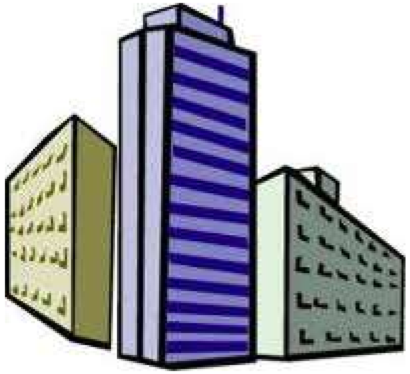
Mathematics

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di corrente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di carica} \end{cases}$$

sorgenti!!



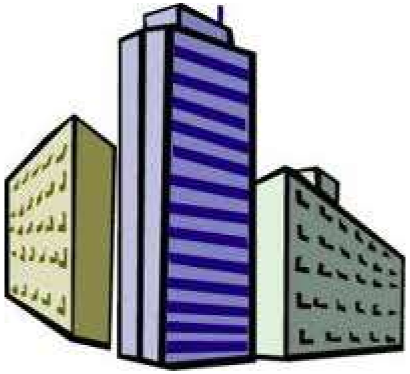
… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla\times\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial\vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla\times\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial\vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di corrente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di carica} \end{cases}$$

sorgenti!!



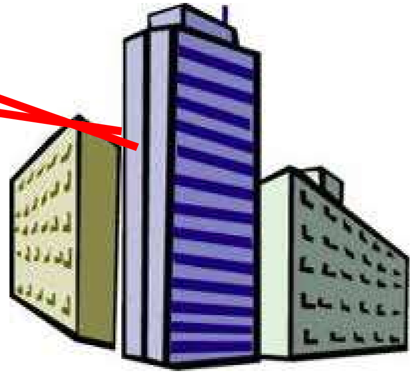
… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di corrente} \\
\rho(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

sorgenti!!



… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

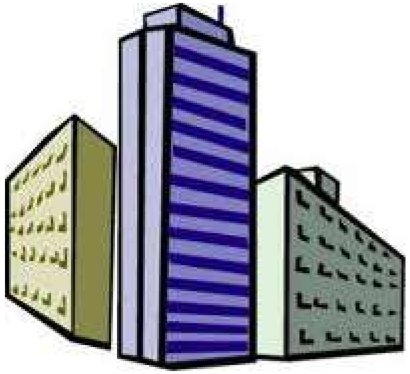
$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}_0(\vec{\mathbf{r}},t) + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho_0(\vec{\mathbf{r}},t) + \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}_0(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di corrente} \\
\rho_0(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

Sorgenti impresse

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di corrente} \\
\rho(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

Sorgenti indotte



… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

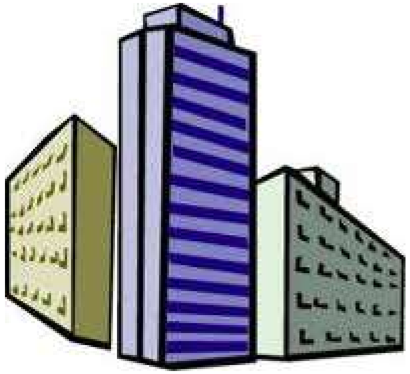
$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}_0(\vec{\mathbf{r}},t) + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho_0(\vec{\mathbf{r}},t) + \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}_0(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di corrente} \\
\rho_0(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

Sorgenti impresse

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di corrente} \\
\rho(\vec{\mathbf{r}},t): \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

Sorgenti indotte



… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

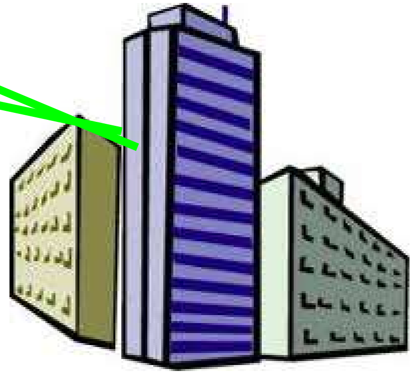
$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\dfrac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}_0(\vec{\mathbf{r}},t) + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \rho_0(\vec{\mathbf{r}},t) + \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}_0(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di corrente} \\
\rho_0(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

Sorgenti impresse

$$
\begin{cases}
\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di corrente} \\
\rho(\vec{\mathbf{r}},t) : \text{densità di carica}
\end{cases}
$$

Sorgenti indotte



... scenario più complicato ...