Corso di Laurea in Ingegneria Informatica, Biomedica e delle Telecomunicazioni

Corso di Campi Elettromagnetici
a.a. 2017-2018

3 Maggio 2018

Sommario

<u>Proprietà del campo elettrico e del campo magnetico</u>

Dipendenza dallo spazio e dal tempo

Sistema di riferimento

Campo elettrico – Campo magnetico – Campo elettromagnetico

Campo elettrico – **Campo** magnetico – **Campo** elettromagnetico

Campo elettrico – **Campo** magnetico – **Campo** elettromagnetico

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

Campo elettromagnetico

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

Il campo elettrico è un vettore

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

Campo elettromagnetico

Il **campo elettrico** è un vettore

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

Campo elettromagnetico

Il **campo elettrico** è un vettore

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

Campo elettromagnetico

Il **campo elettrico** è un vettore

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

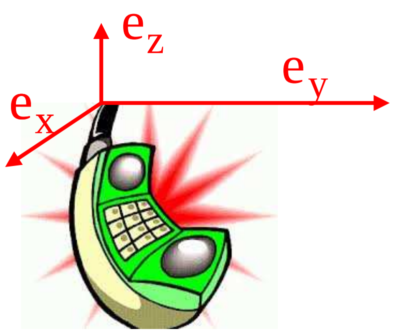
$$\vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}\hat{i}_x + \mathrm{e_y}\hat{i}_y + \mathrm{e_z}\hat{i}_z$$

Campo elettromagnetico

Il **campo elettrico** è un vettore

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

$$\vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e}_x \hat{i}_x + \mathrm{e}_y \hat{i}_y + \mathrm{e}_z \hat{i}_z$$



Campo elettromagnetico

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

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

Campo elettromagnetico

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

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

Campo elettromagnetico

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

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e}_{\mathrm{x}}(\vec{\mathbf{r}}, t)\,\hat{i}_x + \mathrm{e}_{\mathrm{y}}(\vec{\mathbf{r}}, t)\,\hat{i}_y + \mathrm{e}_{\mathrm{z}}(\vec{\mathbf{r}}, t)\,\hat{i}_z$$

Campo elettromagnetico

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

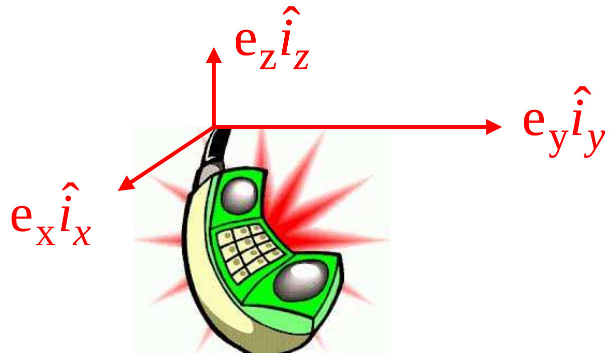
$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$

Campo elettromagnetico

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

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

$$\boxed{t = t_1}$$

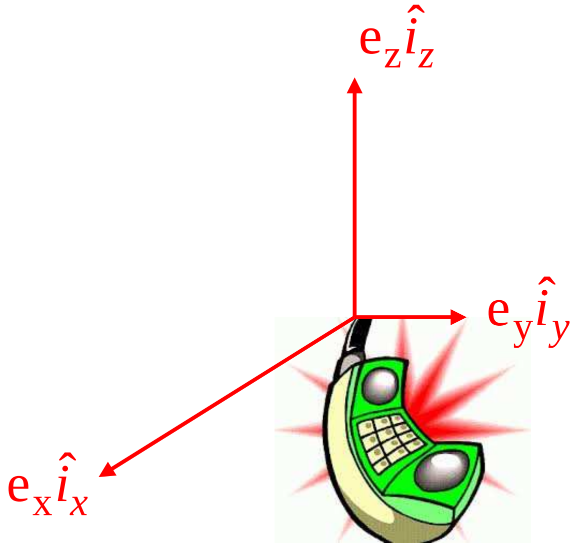


Campo elettromagnetico

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

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

$$\boxed{t = t_2}$$

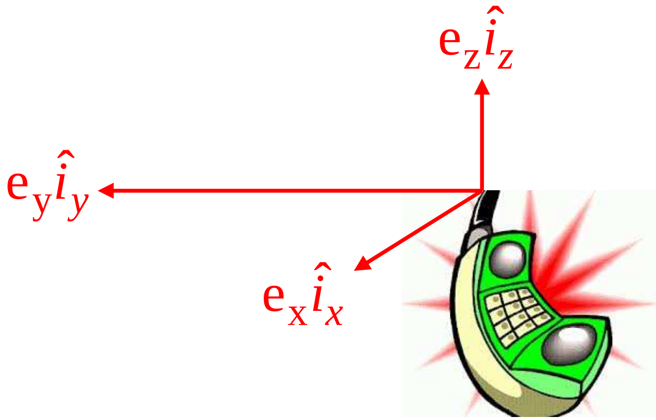


Campo elettromagnetico

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

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

$$\boxed{t = t_3}$$

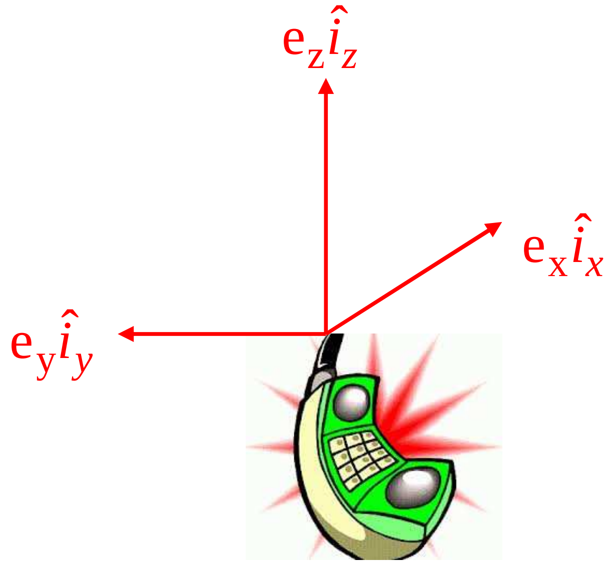


Campo elettromagnetico

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

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

$$\boxed{t = t_4}$$



Campo elettromagnetico

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

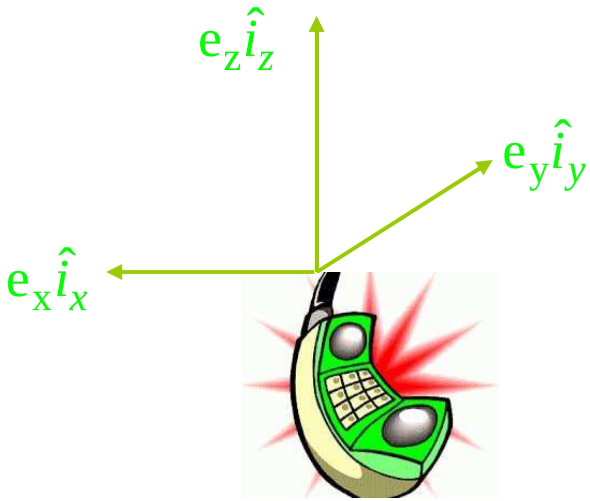
$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e}_x(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + \mathrm{e}_y(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + \mathrm{e}_z(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$

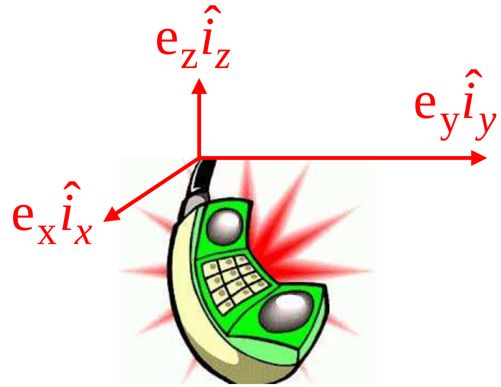
Campo elettromagnetico

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

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

$$\boxed{t = t_1}$$



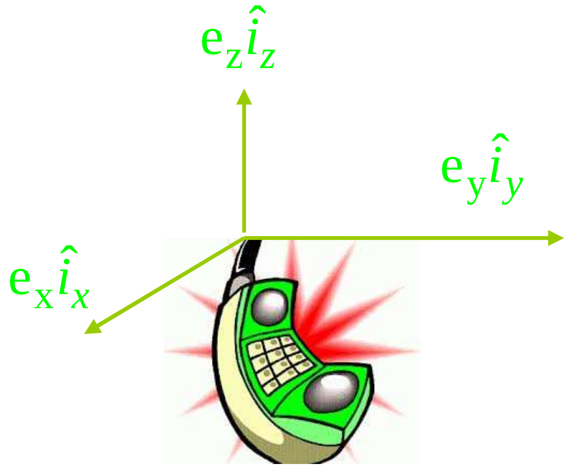


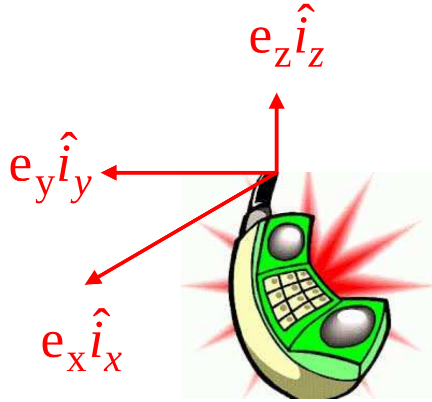
Campo elettromagnetico

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

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

$$\boxed{t = t_2}$$





Sommario

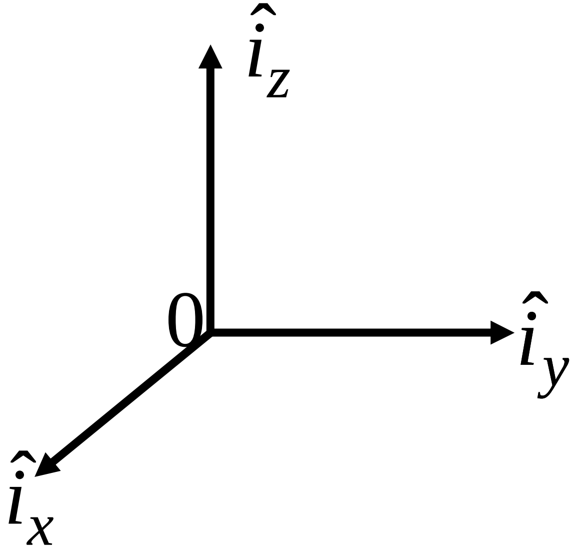
Proprietà del campo elettrico e del campo magnetico

Dipendenza dallo spazio e dal tempo

Sistema di riferimento

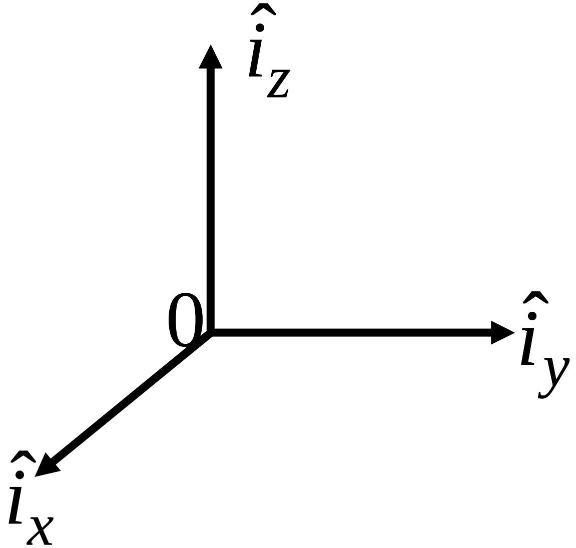
Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

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



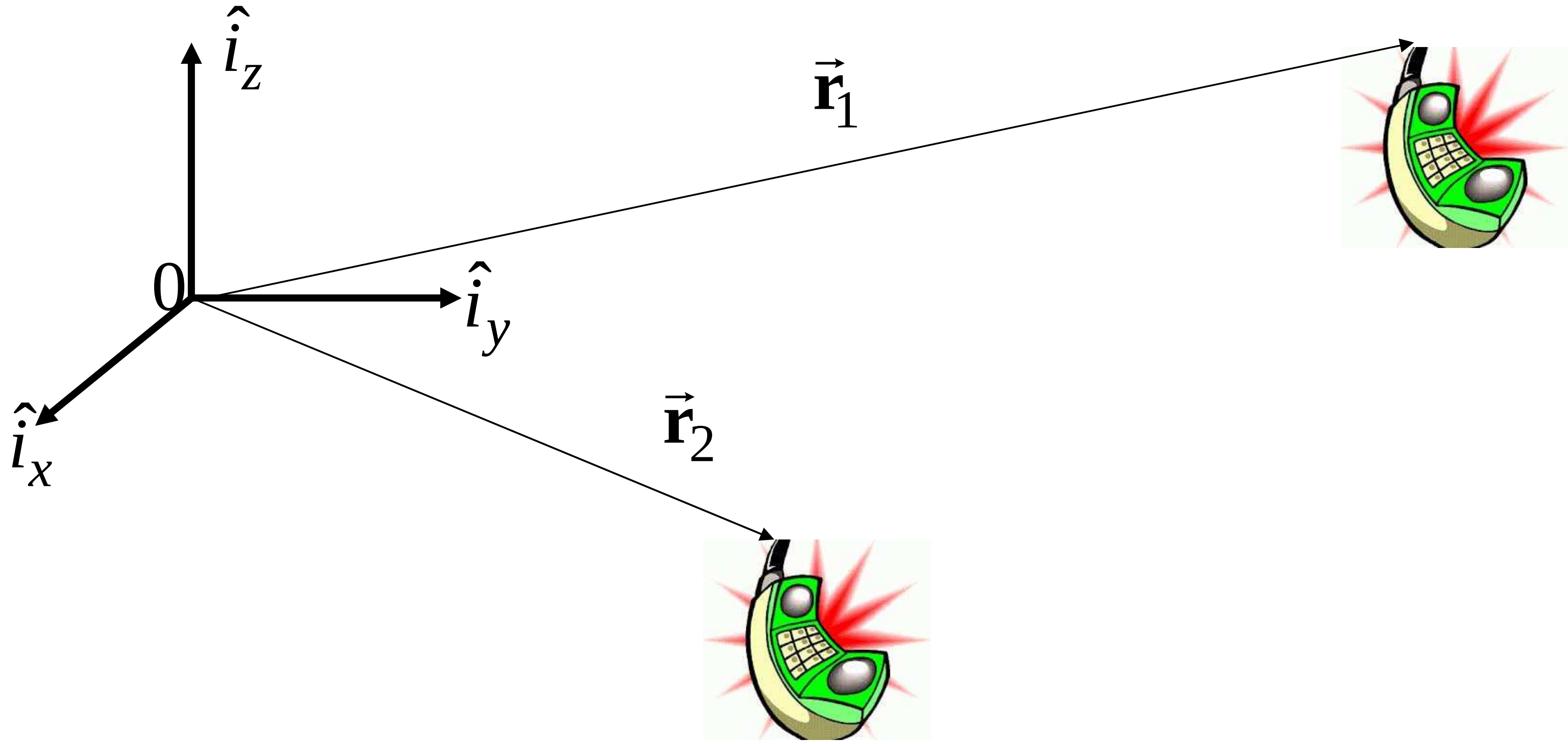
Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

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



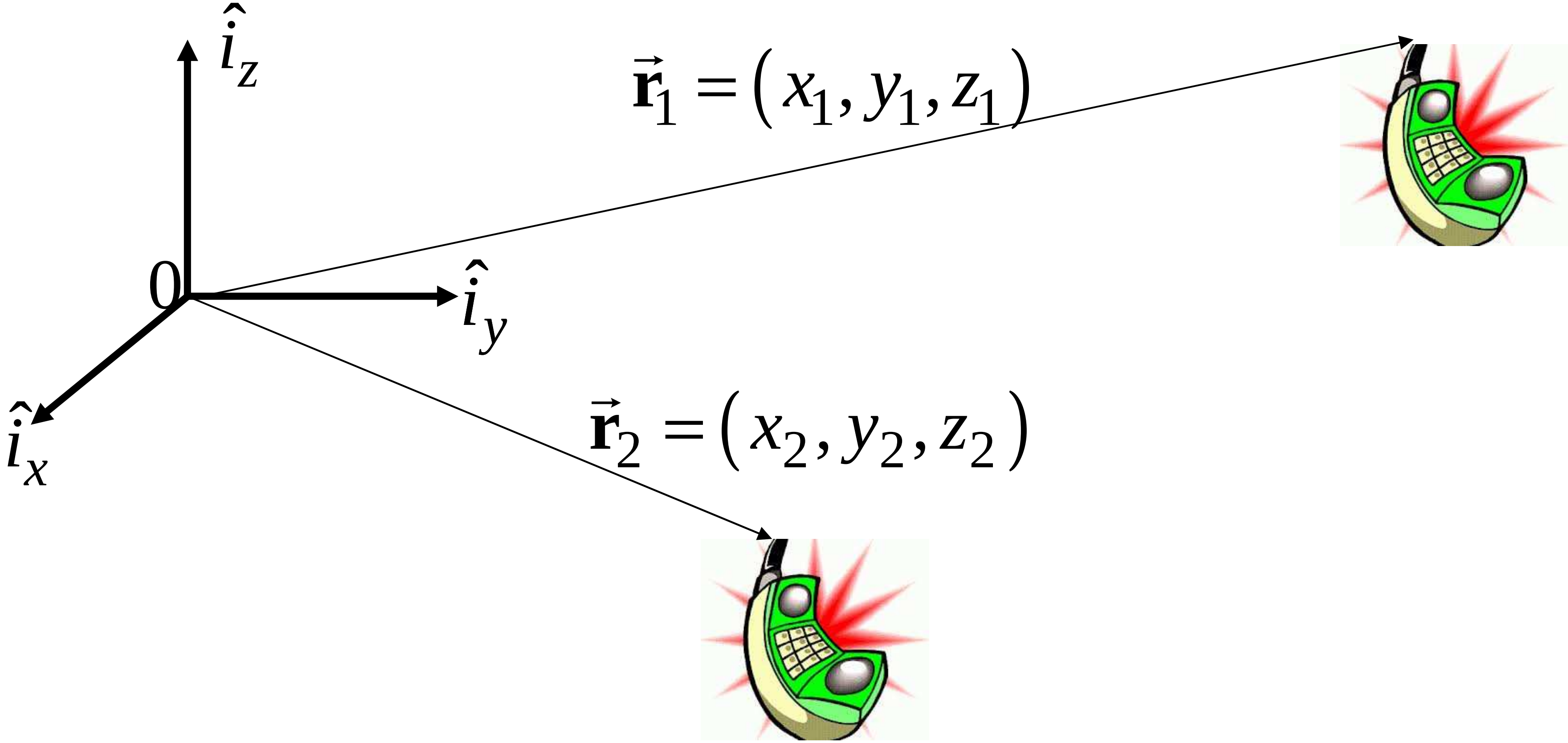
Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

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



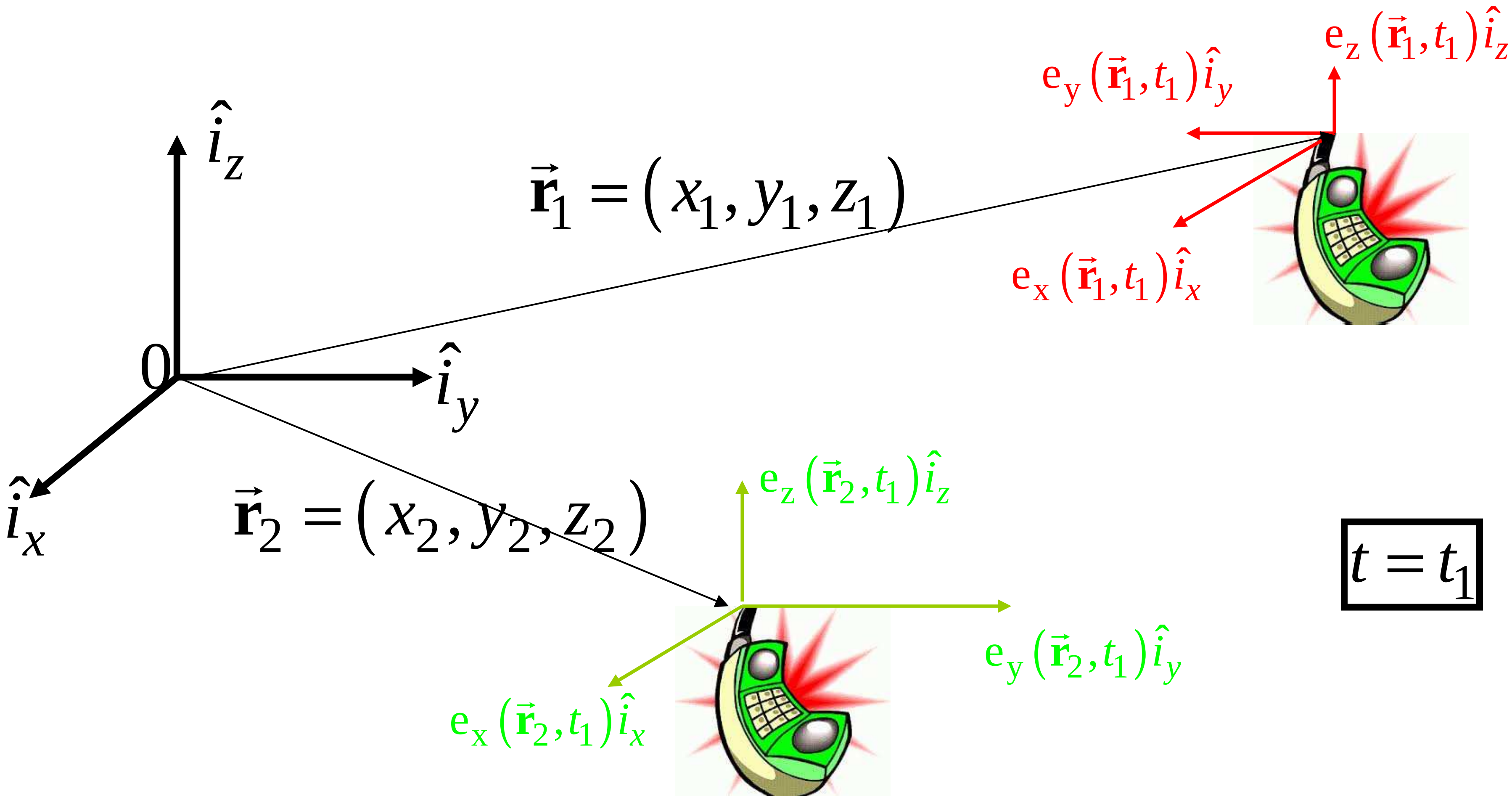
Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

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



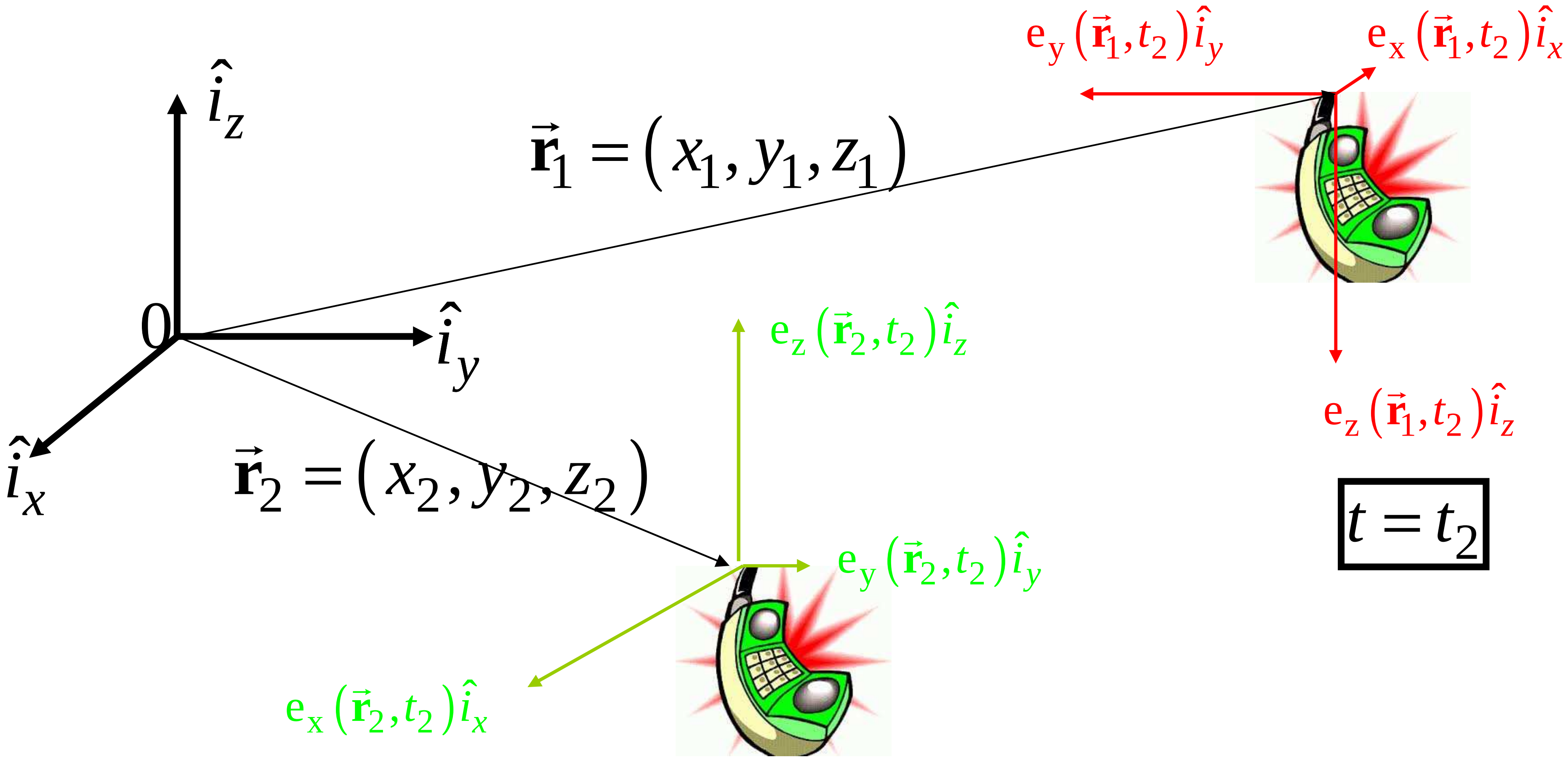
Il **campo elettrico** dipende dallo **spazio** e dal **tempo**

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



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

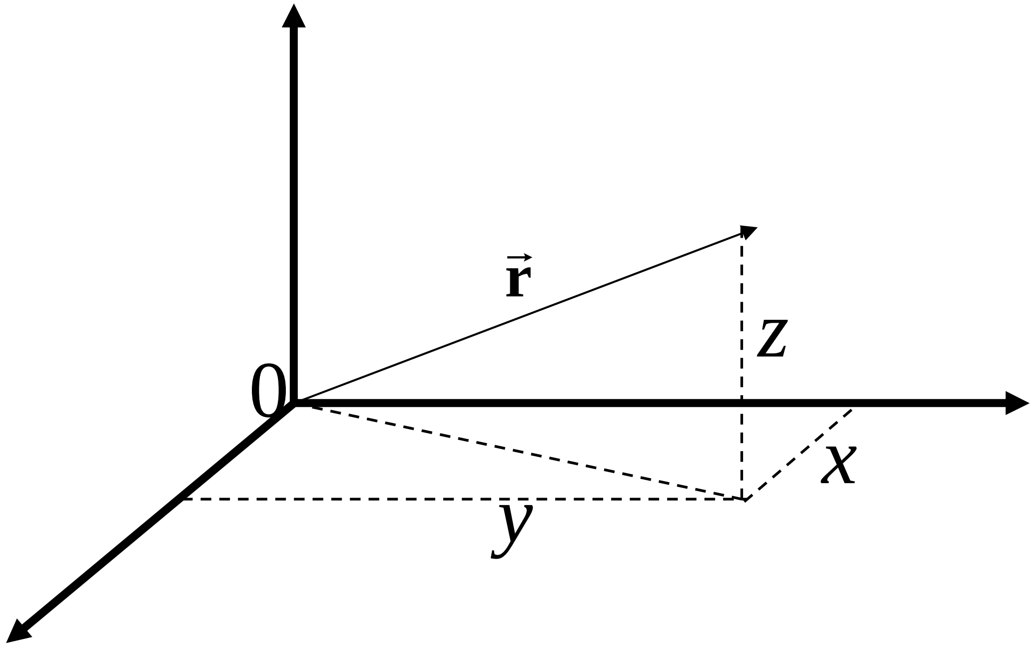
$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e_x}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + \mathrm{e_y}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + \mathrm{e_z}(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$



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

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

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

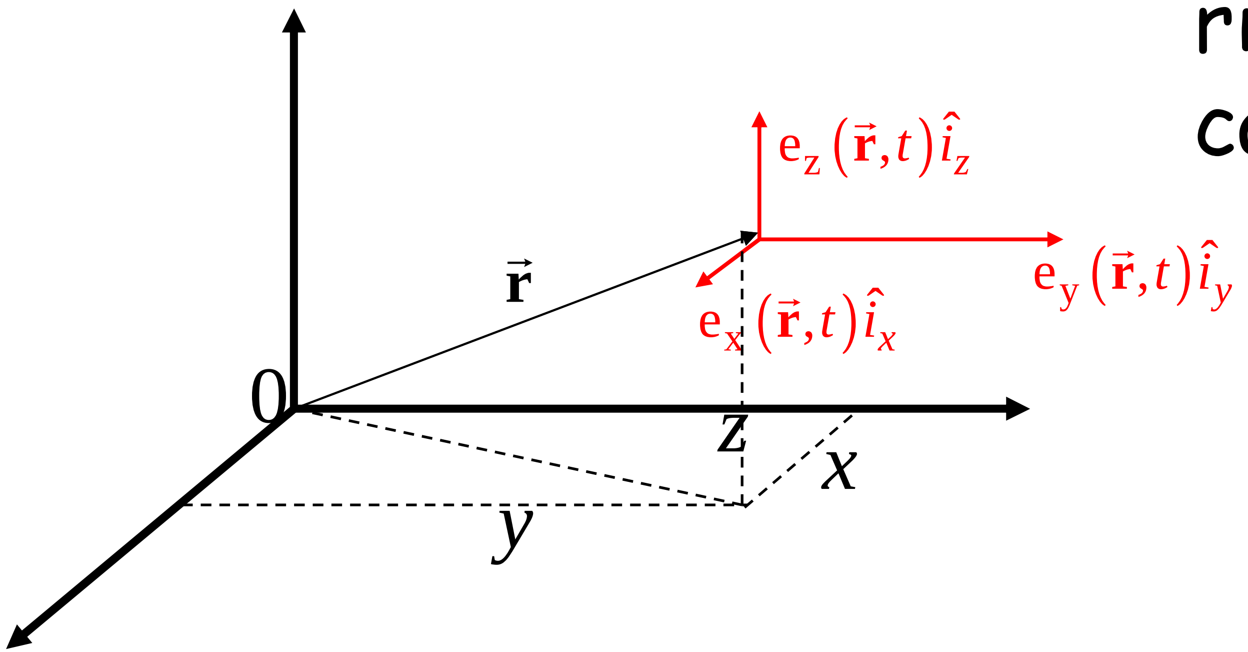


Sistema di riferimento cartesiano

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

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

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



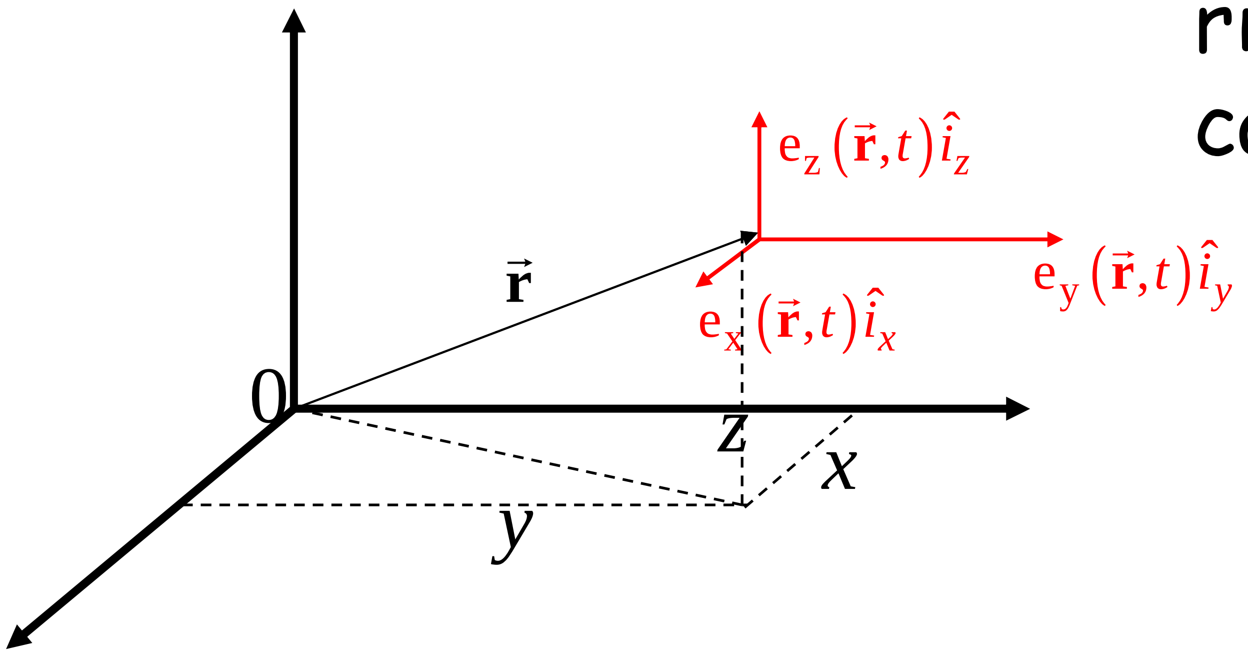
Sistema di riferimento cartesiano

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

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

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

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

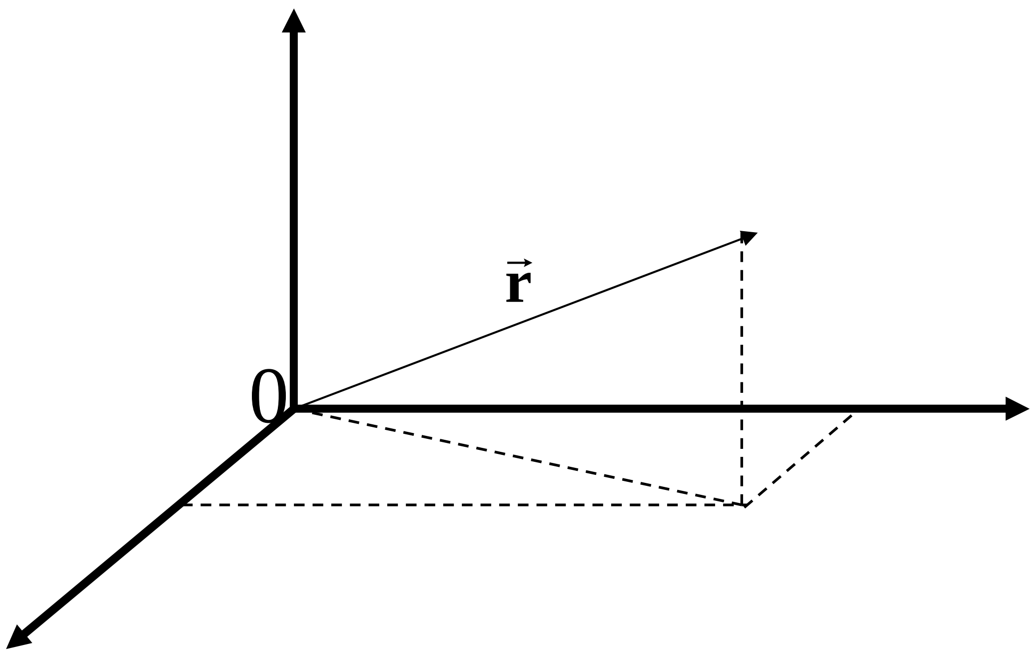


Sistema di riferimento cartesiano

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

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

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

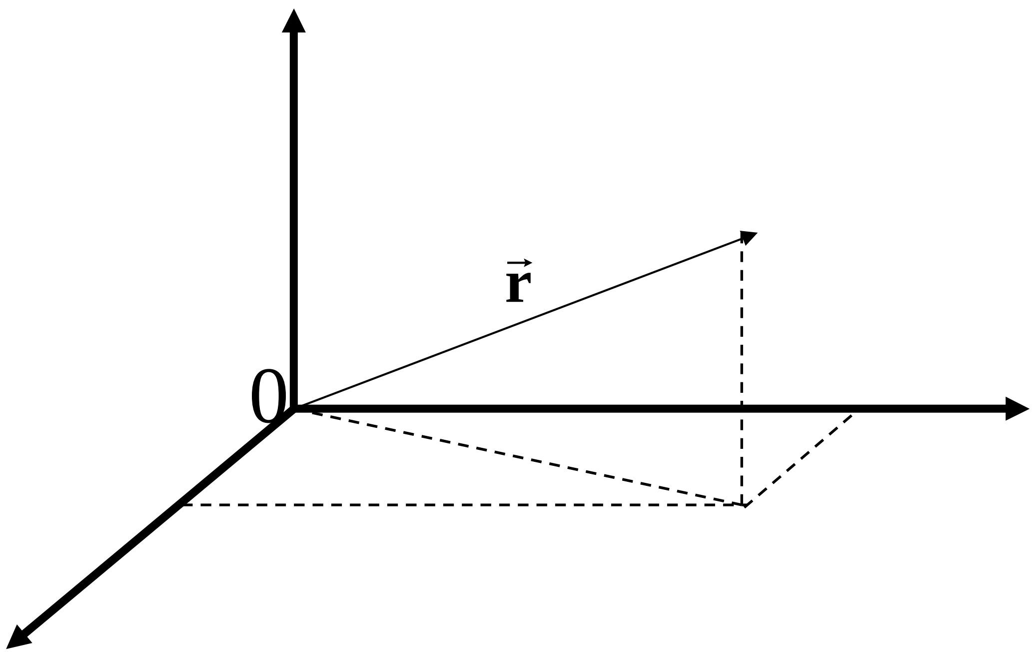


Sistema di riferimento sferico

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

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \qquad \cancel{\vec{\mathbf{e}} = \mathrm{e}_{\mathrm{x}}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)\hat{i}_x + \mathrm{e}_{\mathrm{y}}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)\hat{i}_y + \mathrm{e}_{\mathrm{z}}\left(\vec{\mathbf{r}}, t\right)\hat{i}_z}$$

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

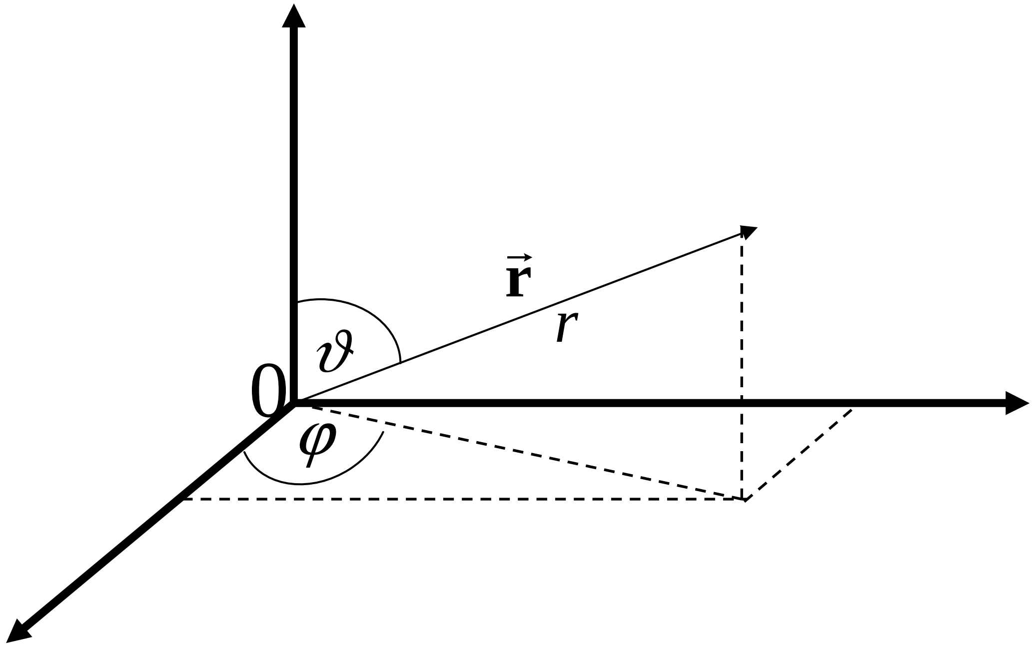


Sistema di riferimento sferico

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

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

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

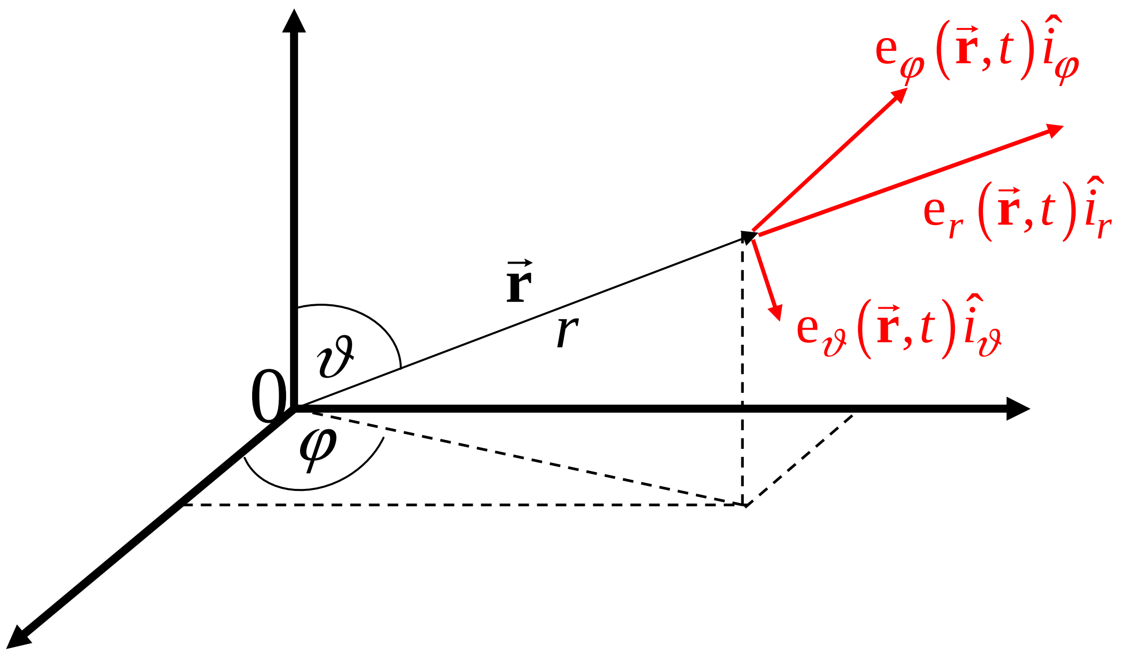


Sistema di riferimento sferico

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

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

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



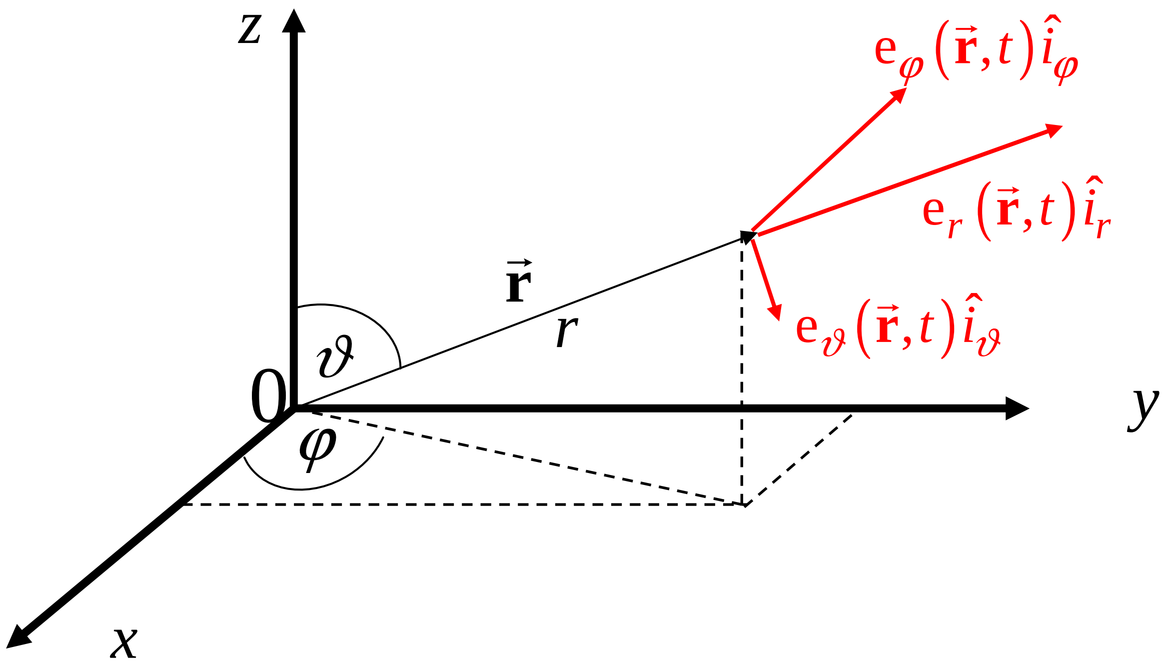
Sistema di riferimento sferico

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

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

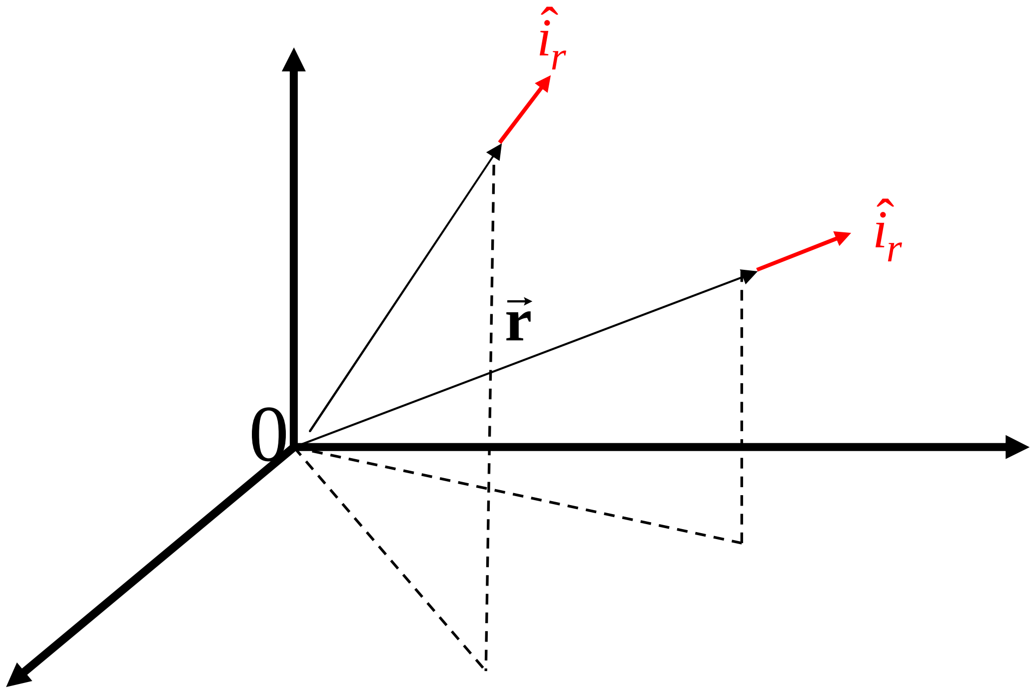
$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(r, \vartheta, \varphi, t)$$

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

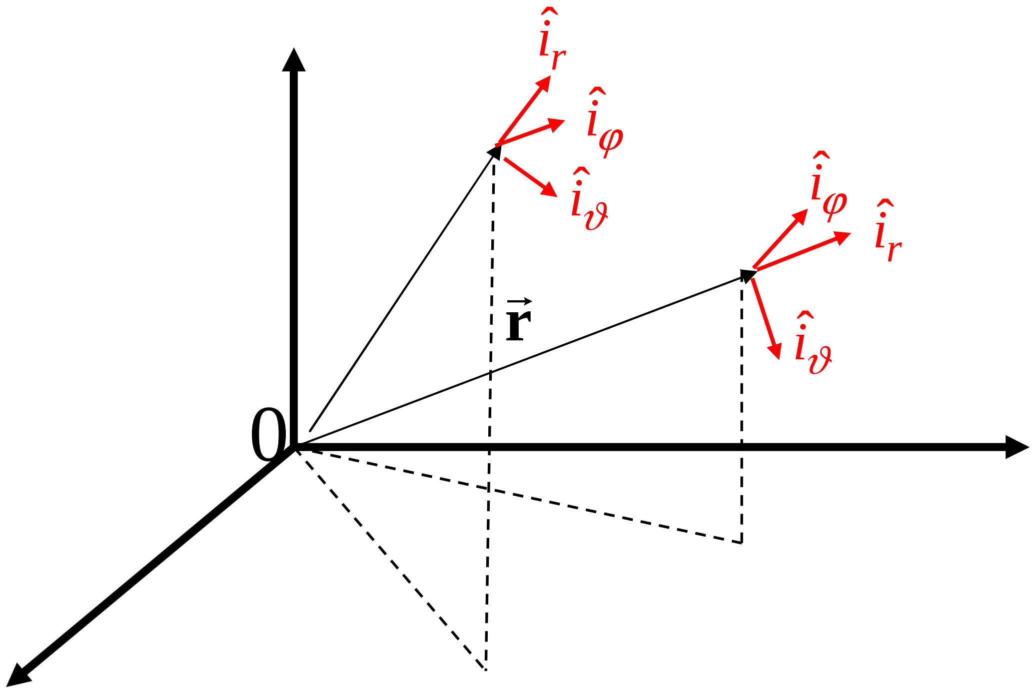


Sistema di riferimento sferico

Sistema di riferimento sferico

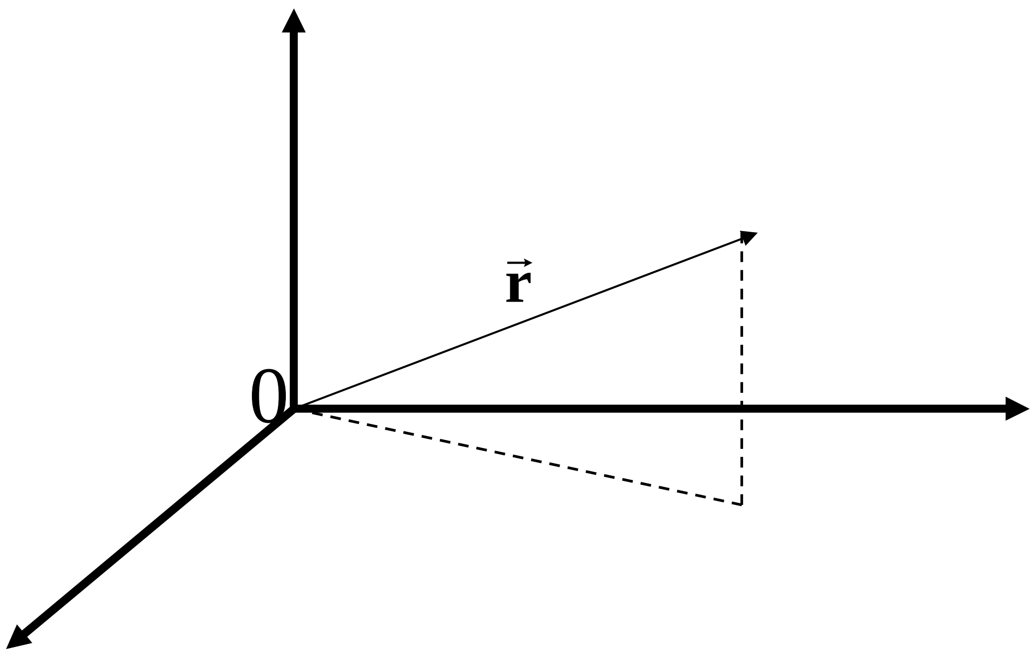


Sistema di riferimento sferico



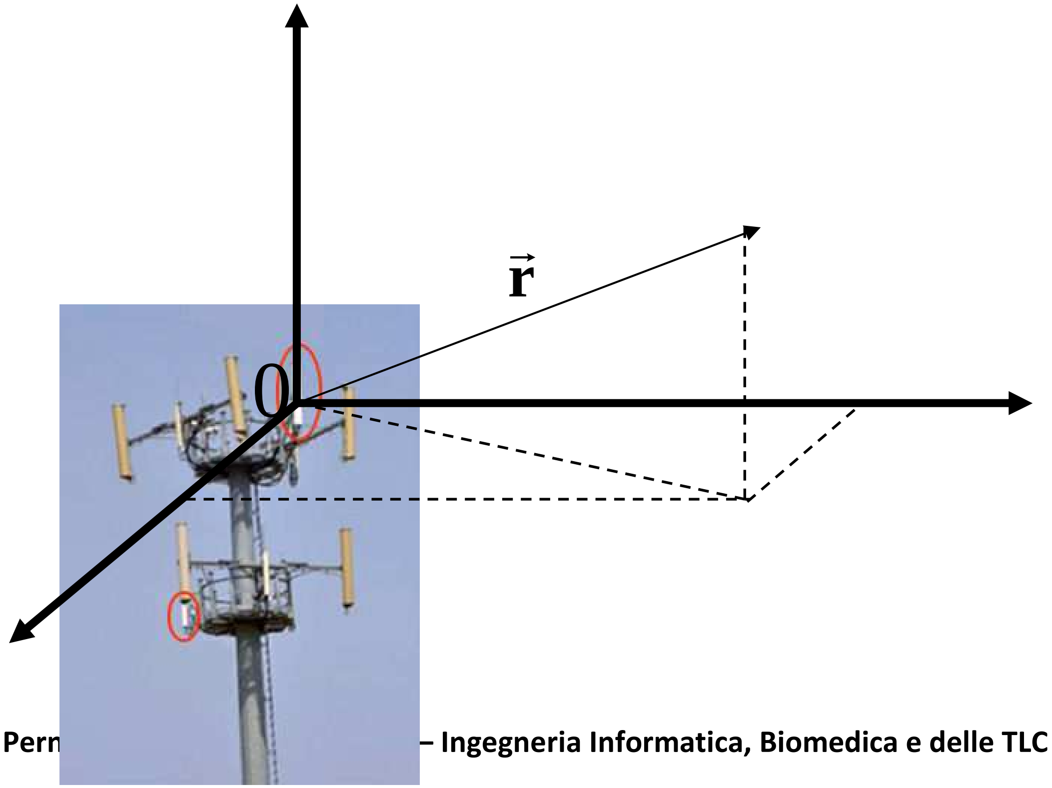
Sistema di riferimento sferico

… è molto diffuso in problemi di elettromagnetismo



Sistema di riferimento sferico

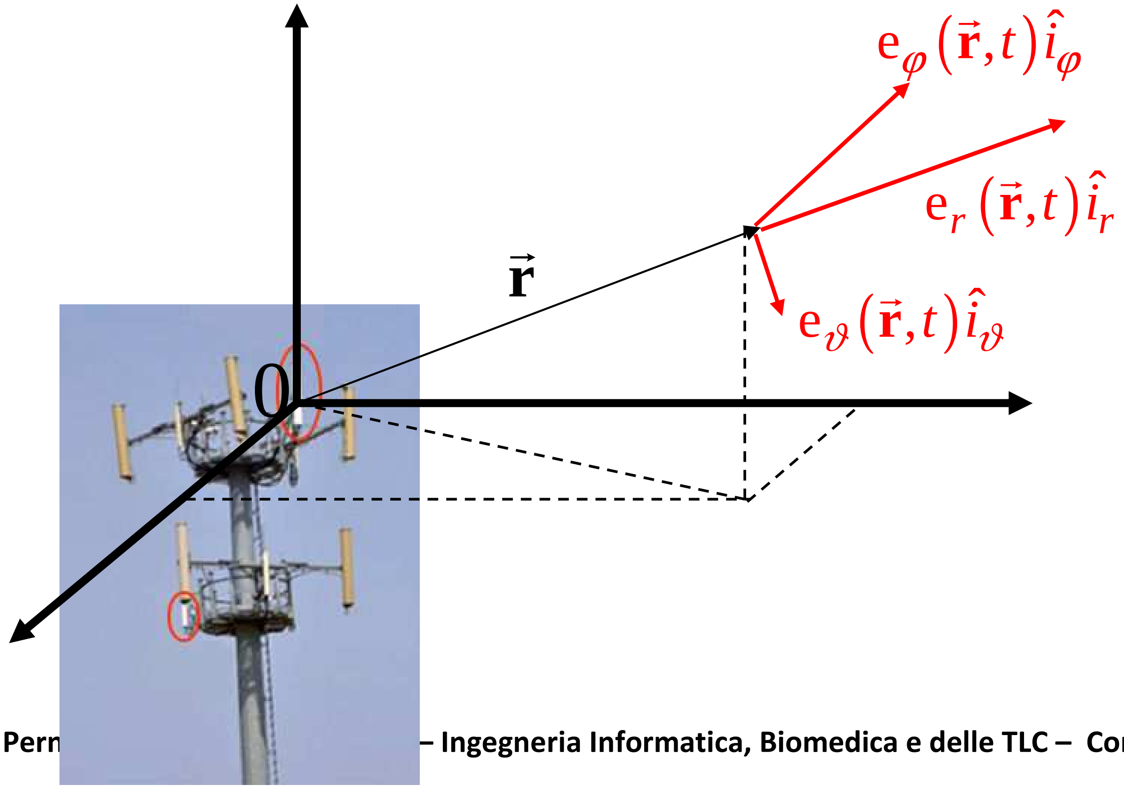
… è molto diffuso in problemi di elettromagnetismo



Sistema di riferimento sferico

… è molto diffuso in problemi di elettromagnetismo

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



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

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 elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Sommario

Proprietà del campo elettrico e del campo magnetico

Dipendenza dallo spazio e dal tempo

Sistema di riferimento

Proprietà del campo elettromagnetico

Equazioni di Maxwell

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

Campo elettromagnetico

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\mu \dfrac{\partial \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \varepsilon \dfrac{\partial \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{1}{\varepsilon}\rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\mu : \text{permeabilità magnetica} \\
\varepsilon : \text{permittività}
\end{cases}
$$

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

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\mu \dfrac{\partial \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \varepsilon \dfrac{\partial \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{1}{\varepsilon} \rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

... nel vuoto

$$\begin{cases} \mu = 4\pi \times 10^{-7} \quad Henry/m \\ \varepsilon = 8.8 \times 10^{-12} \quad Farad/m \end{cases}$$

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

Campo elettromagnetico

Perché si parla di campo elettromagnetico?

Il campo elettrico che fine ha fatto?

Il campo magnetico che fine ha fatto?

Nel caso più generale in cui si rimuove l'ipotesi di stazionarietà, il campo elettrico e il campo magnetico sono strettamente legati!!

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

Campo elettromagnetico

..chi è la causa?

… chi è l'effetto?

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla\times\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\mu\dfrac{\partial\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla\times\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \varepsilon\dfrac{\partial\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{1}{\varepsilon}\rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

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

… solito scenario …

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla\times\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)=-\mu\dfrac{\partial\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla\times\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)=\varepsilon\dfrac{\partial\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t}+\vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)=\dfrac{1}{\varepsilon}\rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)=0 \end{cases}$$

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

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?

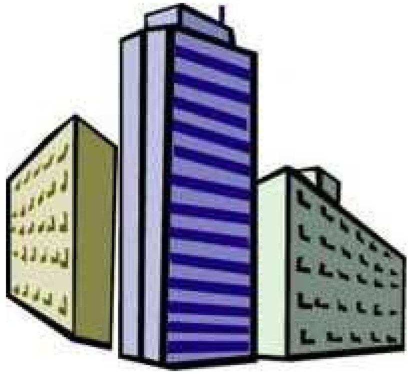
$$\begin{cases} \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{campo elettrico} \\ \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t): \text{campo magnetico} \end{cases}$$

Campo elettromagnetico

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\mu \dfrac{\partial \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \varepsilon \dfrac{\partial \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{1}{\varepsilon}\rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0 \end{cases}$$

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

sorgenti!!



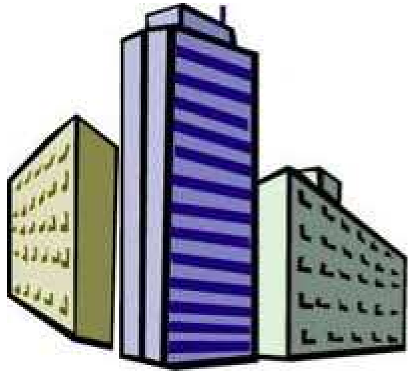
… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

$$
\begin{cases}
\nabla\times\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\mu\dfrac{\partial\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t}\\
\nabla\times\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \varepsilon\dfrac{\partial\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t)\\
\nabla\cdot\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{1}{\varepsilon}\rho(\vec{\mathbf{r}},t)\\
\nabla\cdot\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

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

sorgenti!!



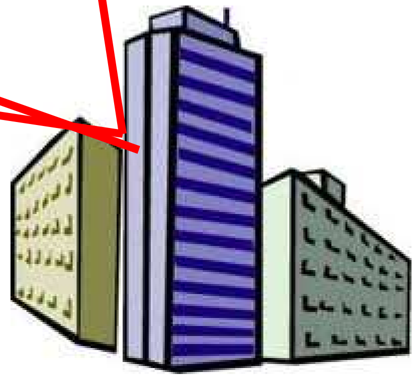
… scenario più complicato …

Campo elettromagnetico

$$
\begin{cases}
\nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = -\mu \dfrac{\partial \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \varepsilon \dfrac{\partial \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}},t) = \dfrac{1}{\varepsilon}\rho(\vec{\mathbf{r}},t) \\
\nabla \cdot \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}},t) = 0
\end{cases}
$$

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

sorgenti!!



… scenario più complicato …