

A large satellite dish antenna is mounted on a mountain peak. The background shows a sunset or sunrise with a warm, orange and yellow glow. The dish is dark and metallic, with a complex support structure. The overall scene is atmospheric and technical.

Campi Elettromagnetici

**Corso di Laurea in Ingegneria Informatica, Biomedica e delle
Telecomunicazioni**

a.a. 2021–2022 – Laurea “Triennale” – Secondo semestre – Secondo anno

Università degli Studi di Napoli “Parthenope”

Stefano Perna

Riepilogo lezione precedente

Campi elettromagnetici

Riepilogo lezione precedente

Campi elettromagnetici

Riepilogo lezione precedente

Campi **elettro**magnetici

Riepilogo lezione precedente

Campi elettromagnetici

Riepilogo lezione precedente

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?

Riepilogo lezione precedente

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

Riepilogo lezione precedente

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

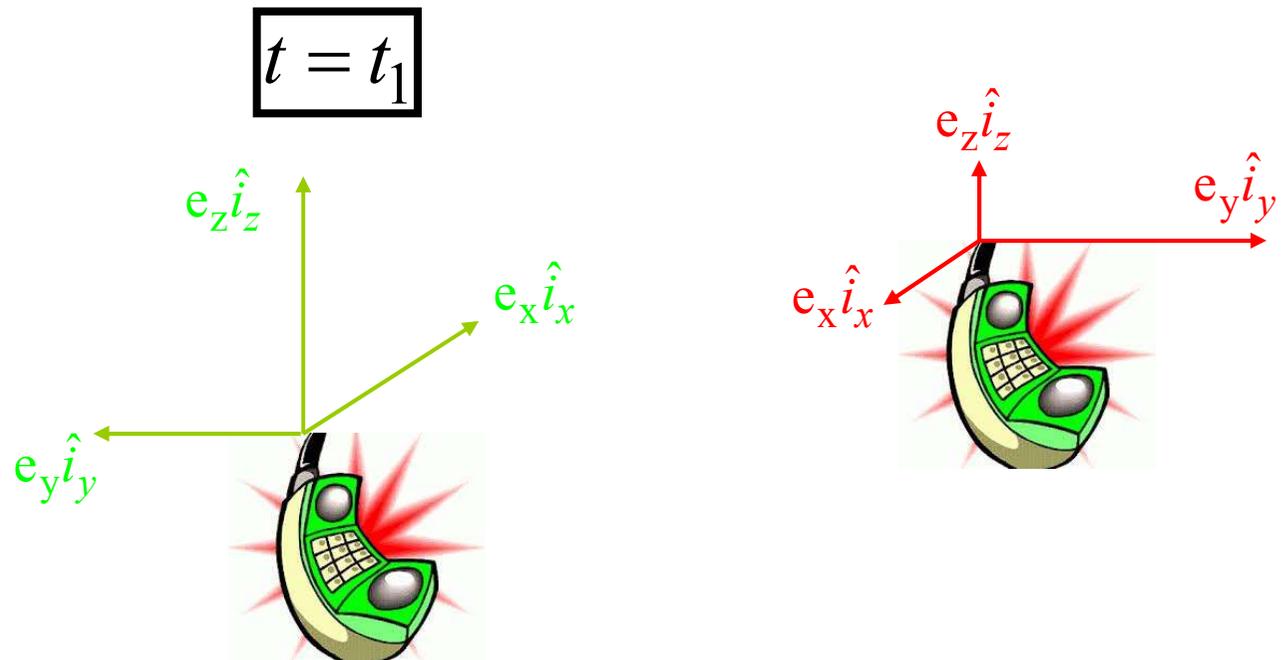
Il campo elettrico è un vettore

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

Riepilogo lezione precedente

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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



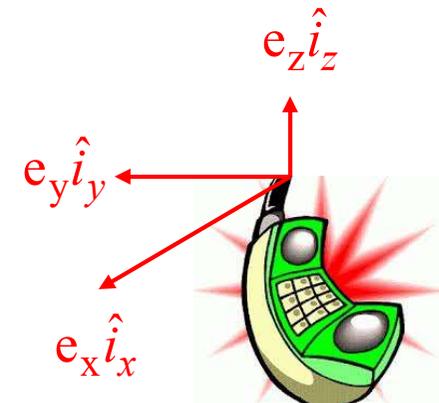
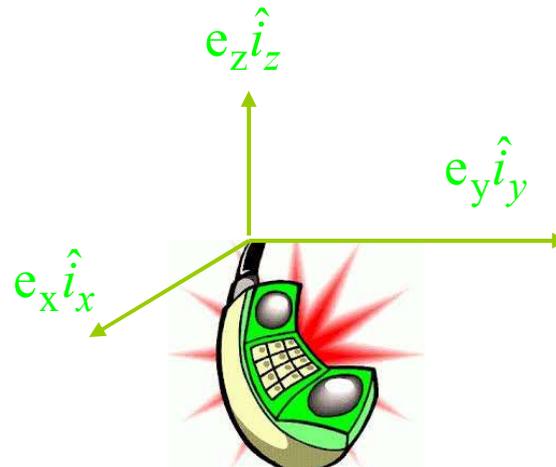
Riepilogo lezione precedente

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

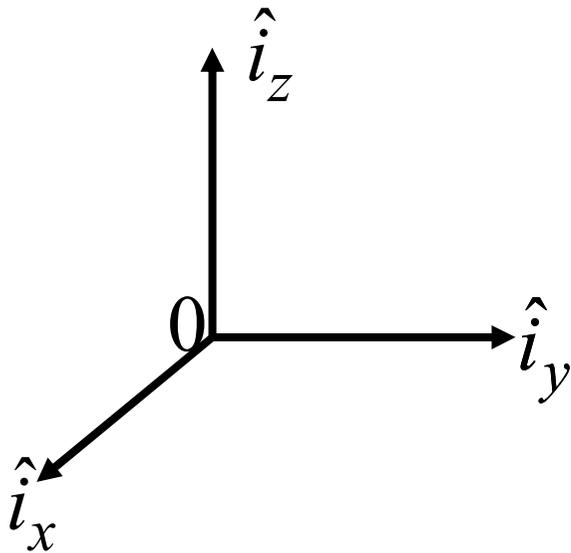


$t = t_2$



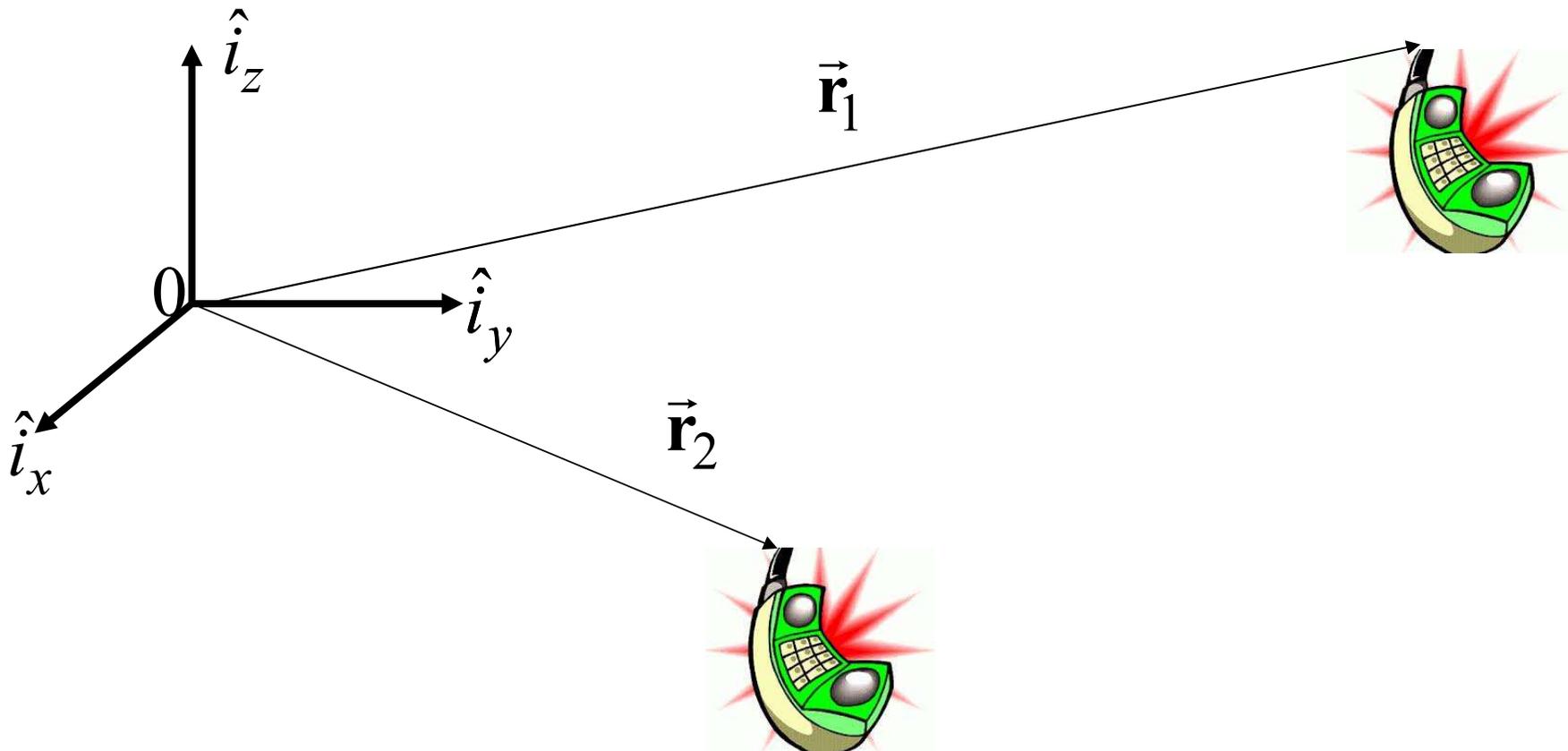
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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



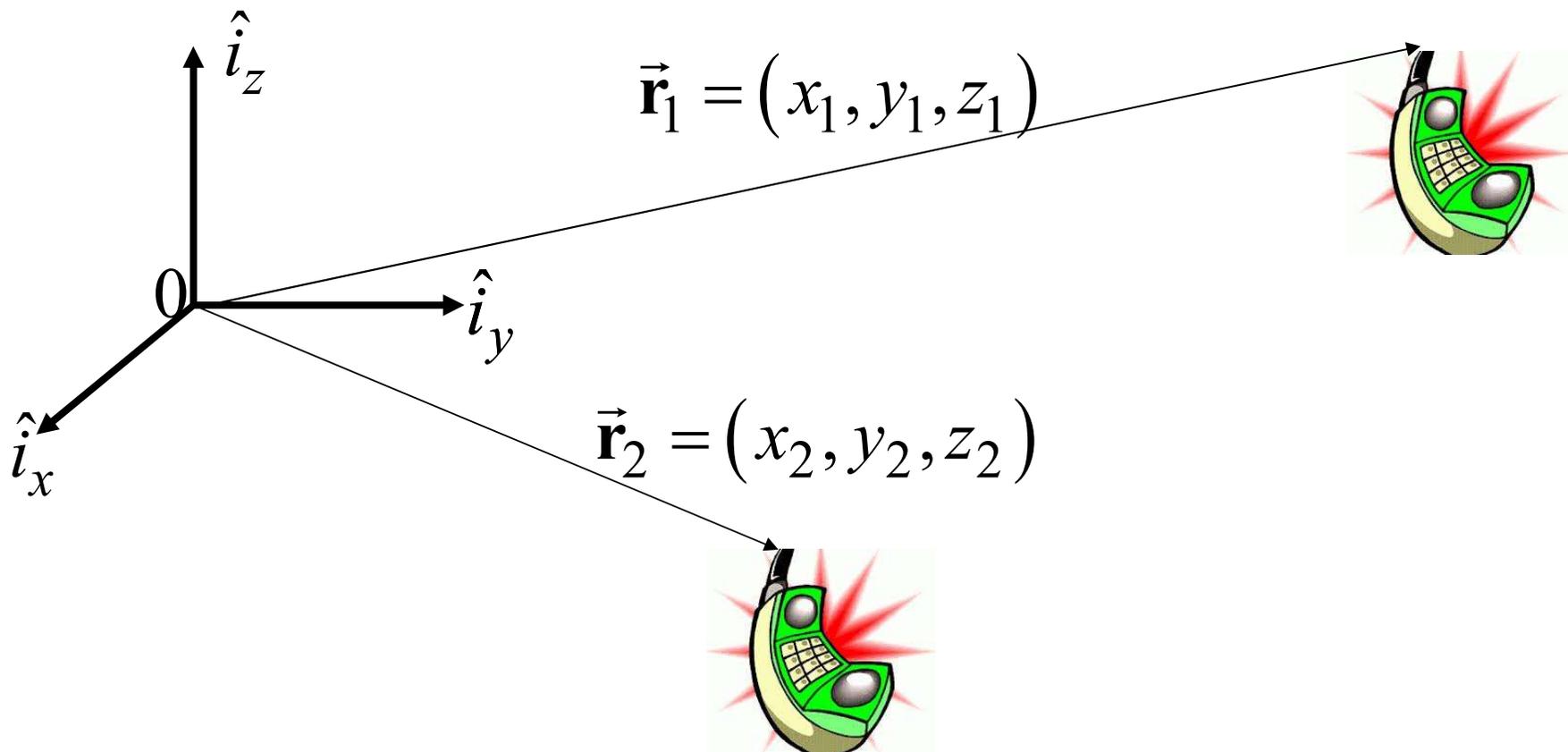
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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



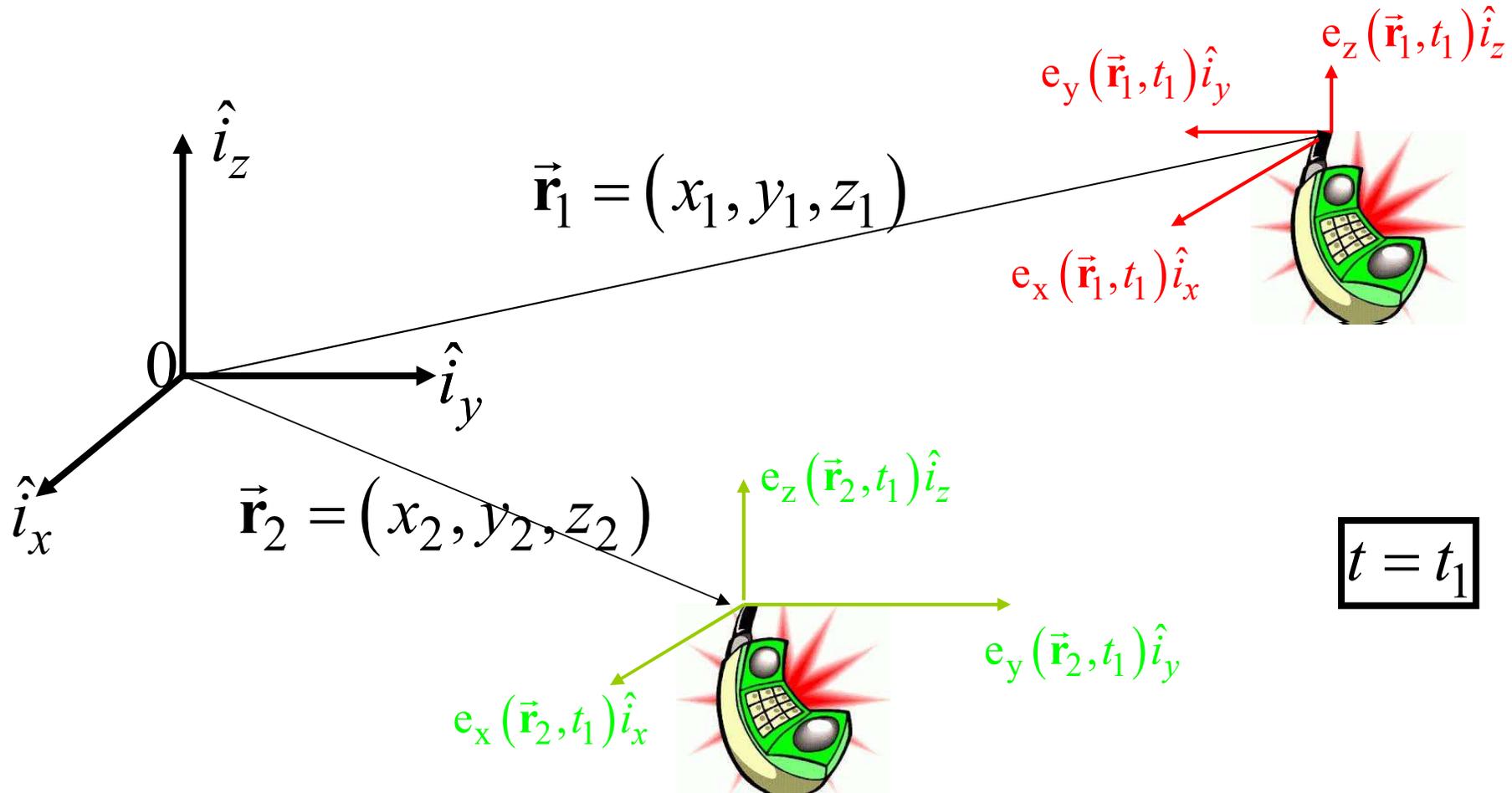
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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



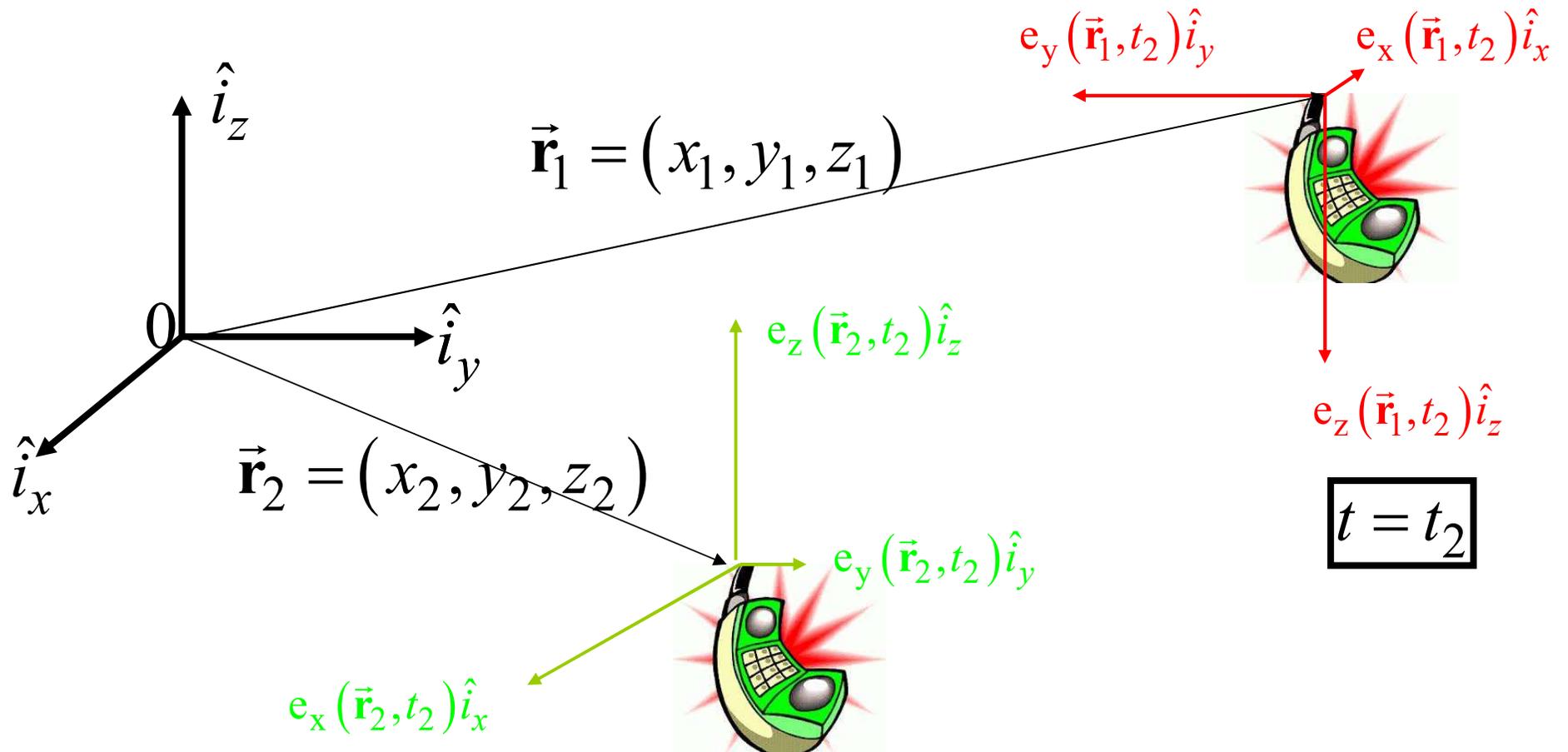
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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



Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

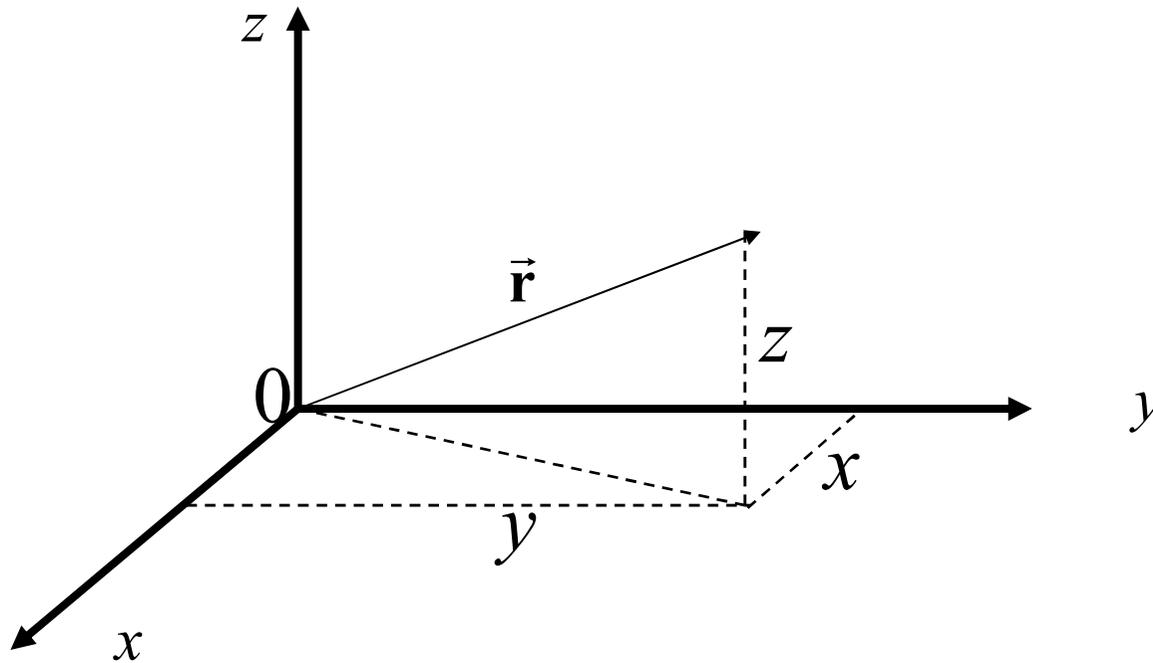


Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

Sistema di
riferimento
cartesiano

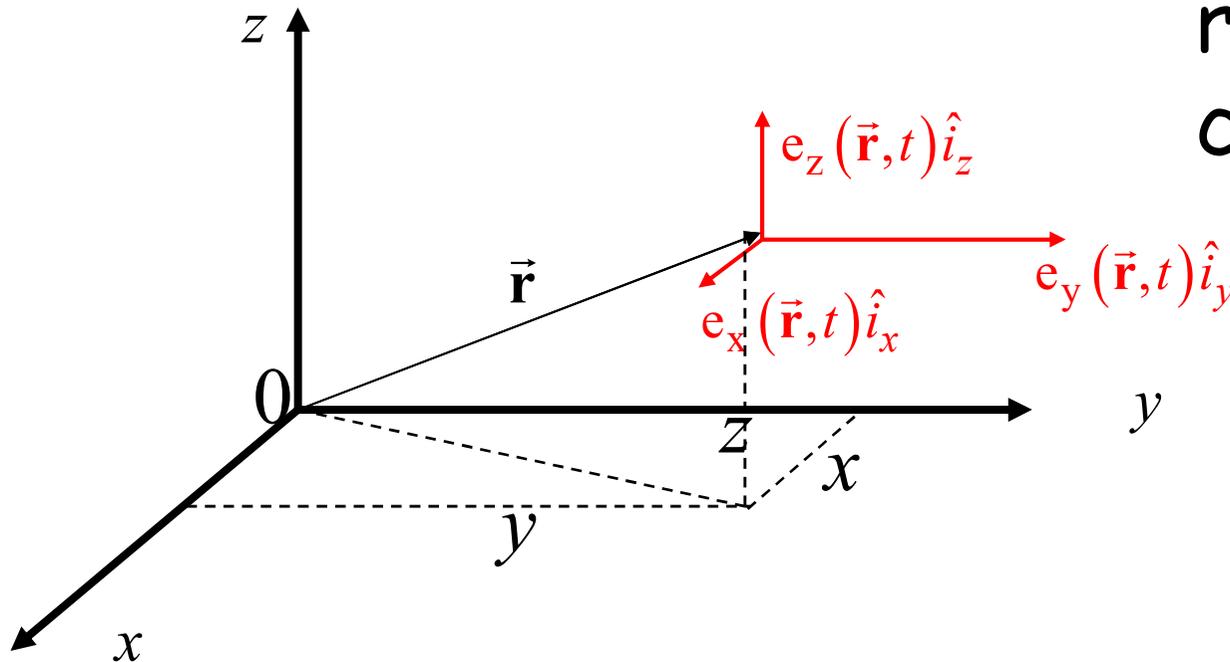


Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

Sistema di riferimento cartesiano



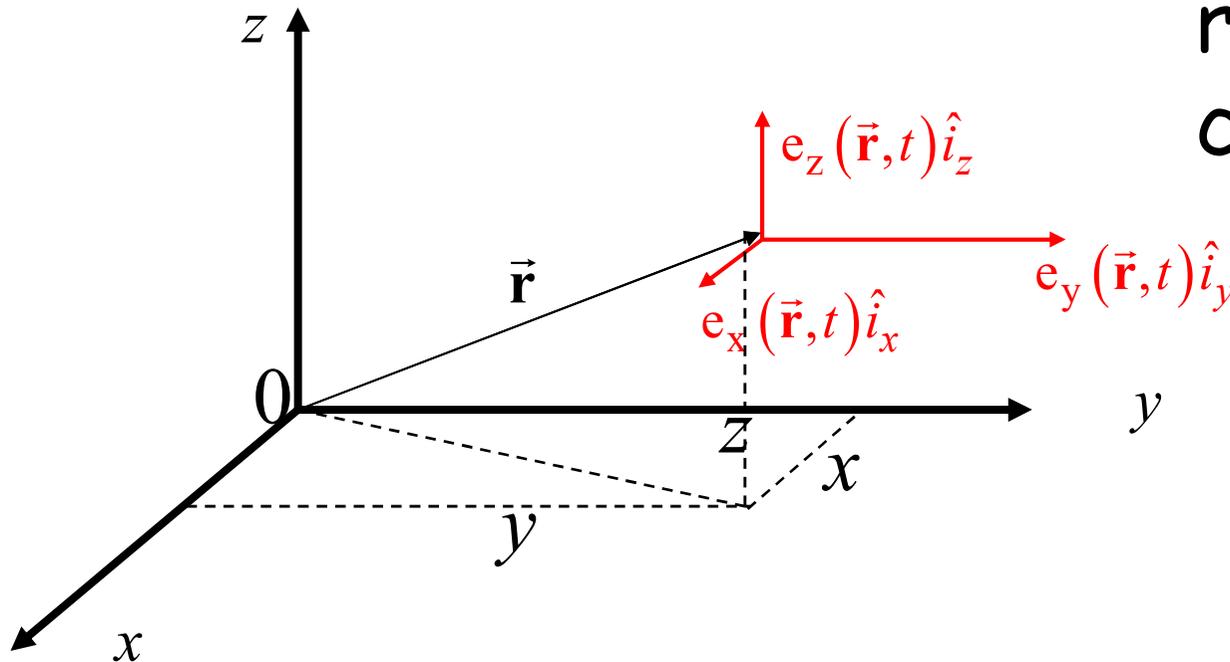
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

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

Sistema di riferimento cartesiano

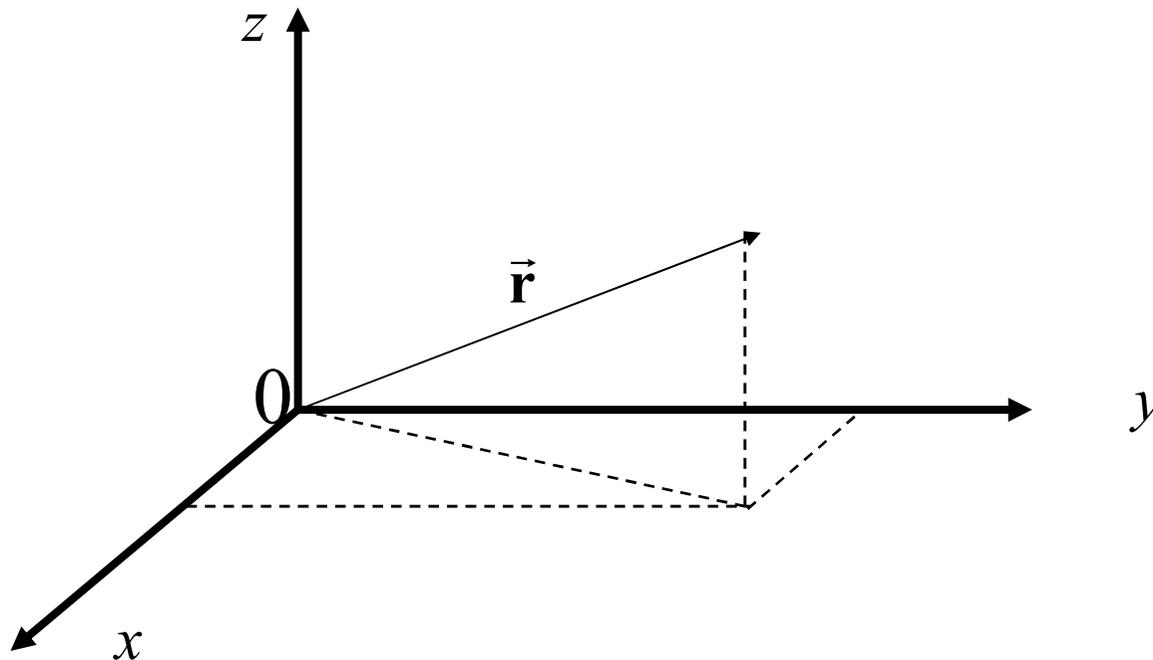


Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

Sistema di
riferimento
sferico



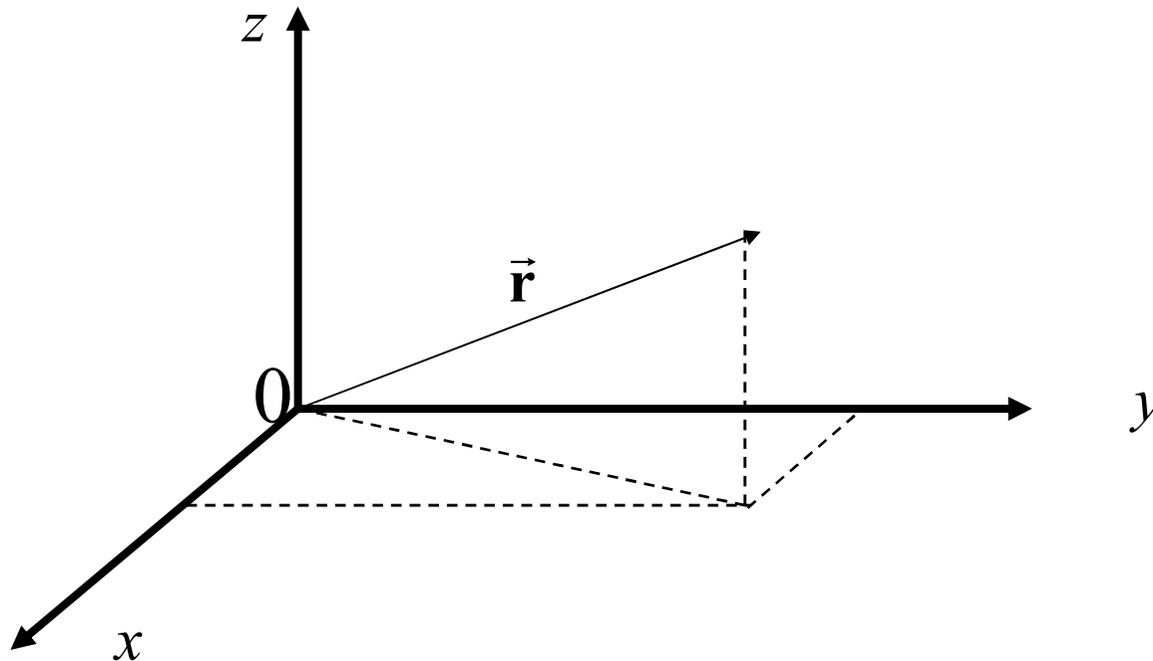
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

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

Sistema di
riferimento
sferico



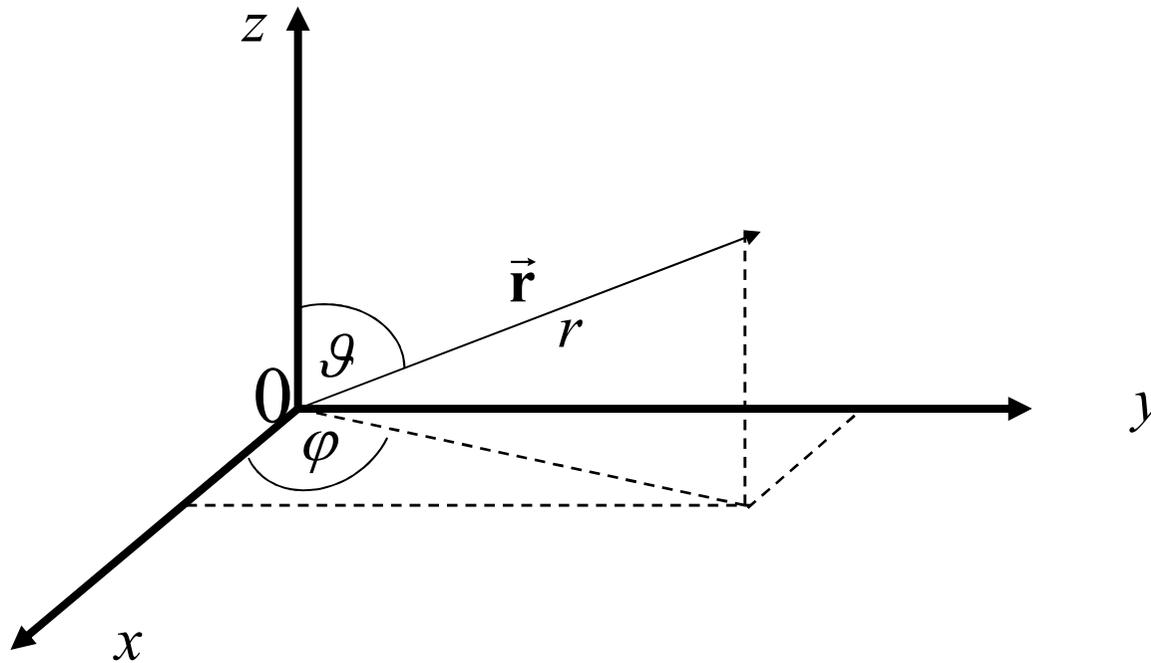
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

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

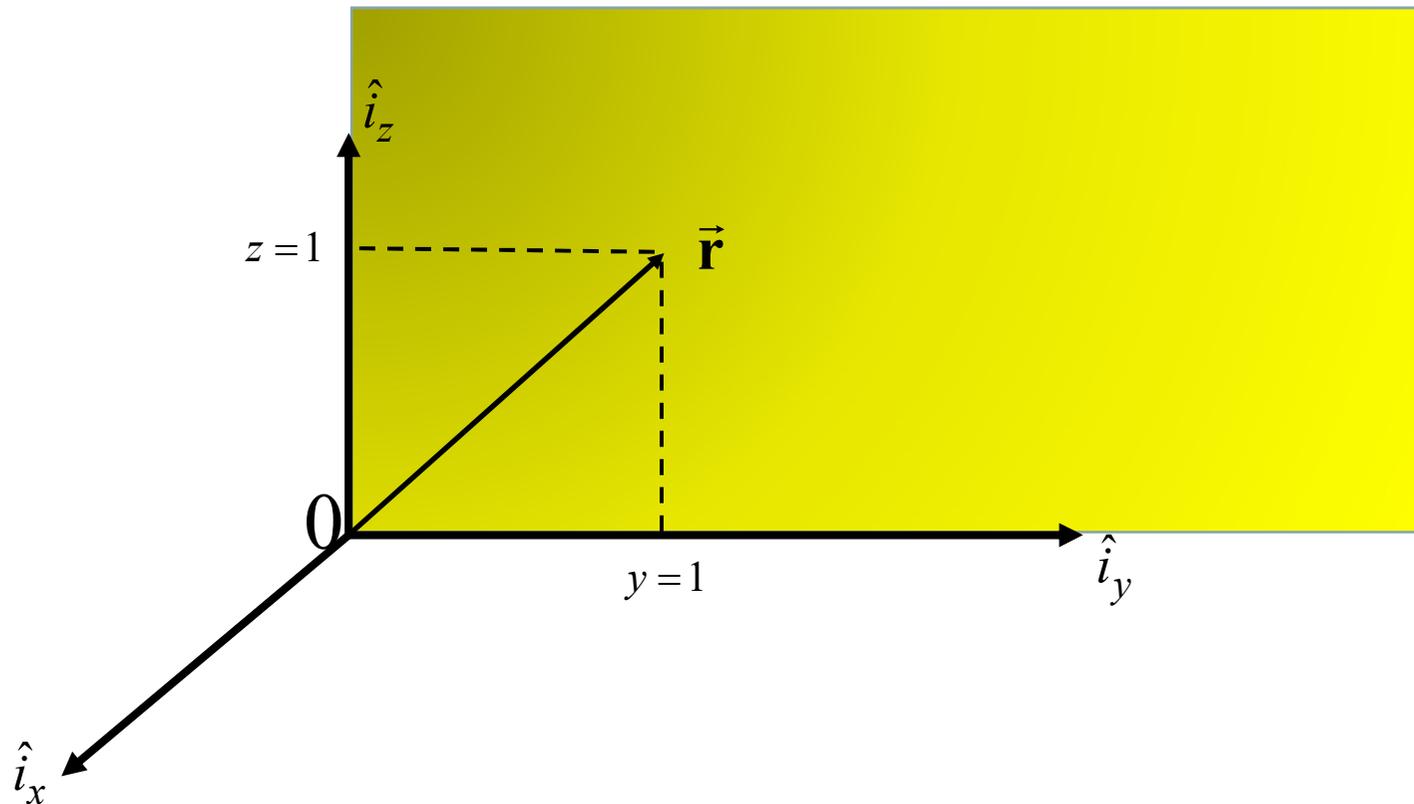
Sistema di riferimento sferico



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 1

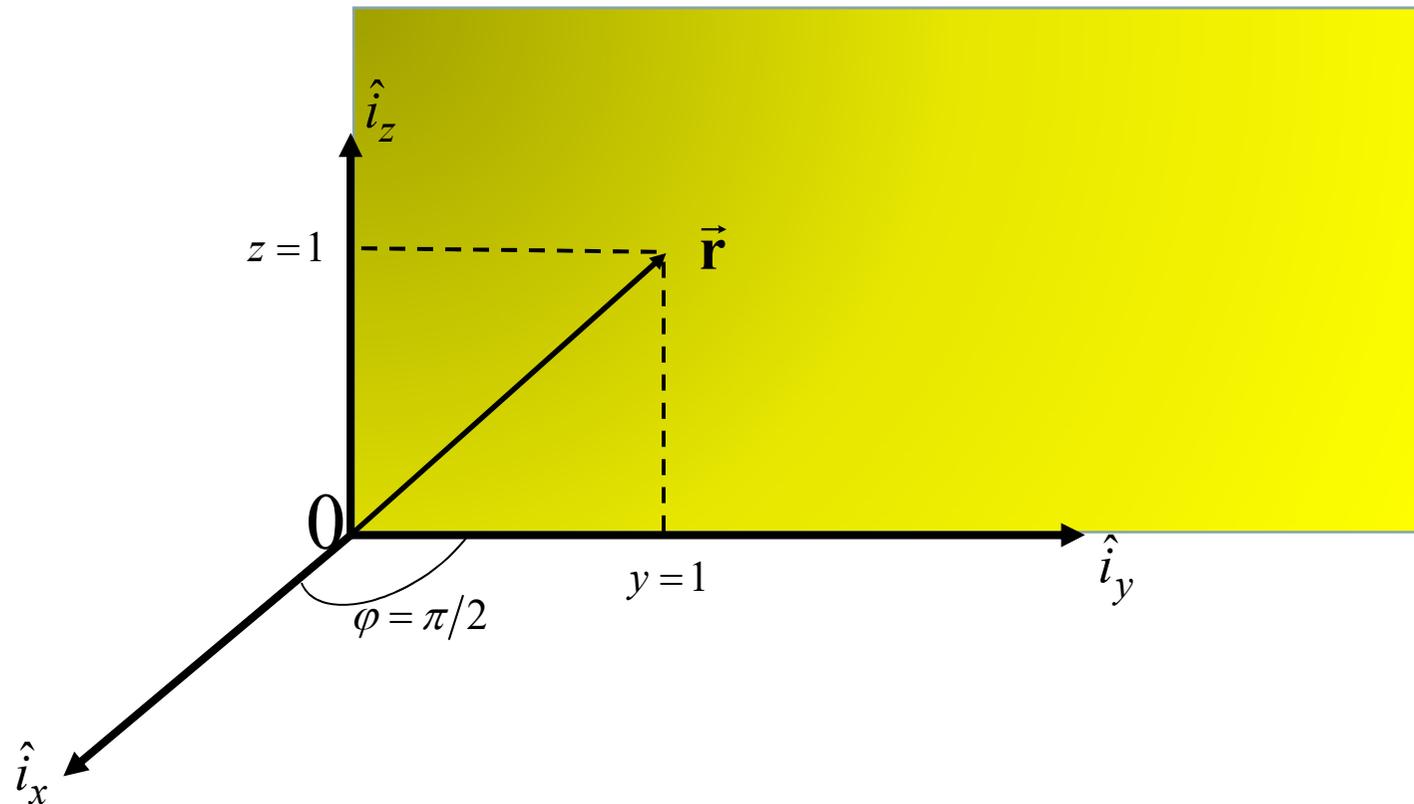
$$\vec{r} = (x = 0, y = 1, z = 1)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 1

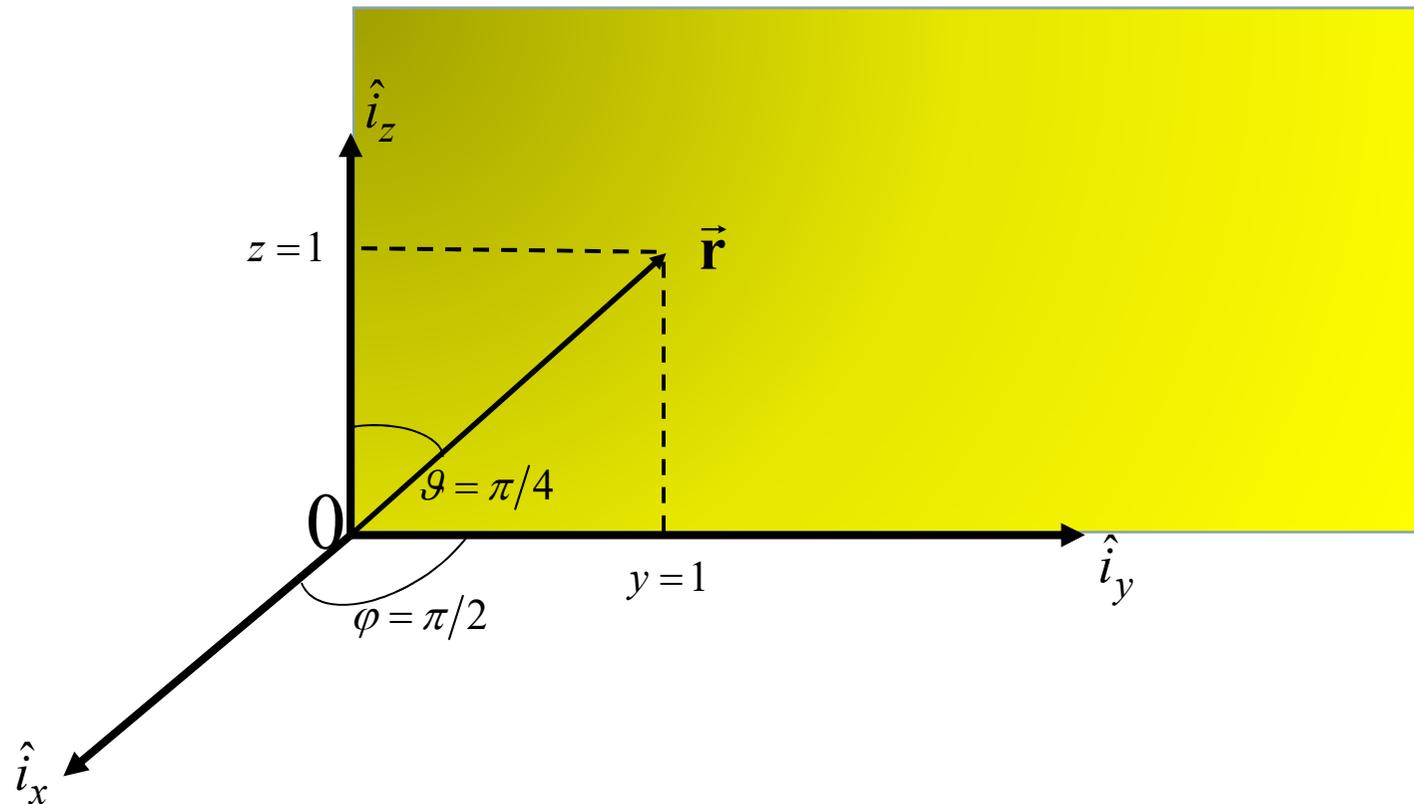
$$\vec{r} = (x = 0, y = 1, z = 1)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 1

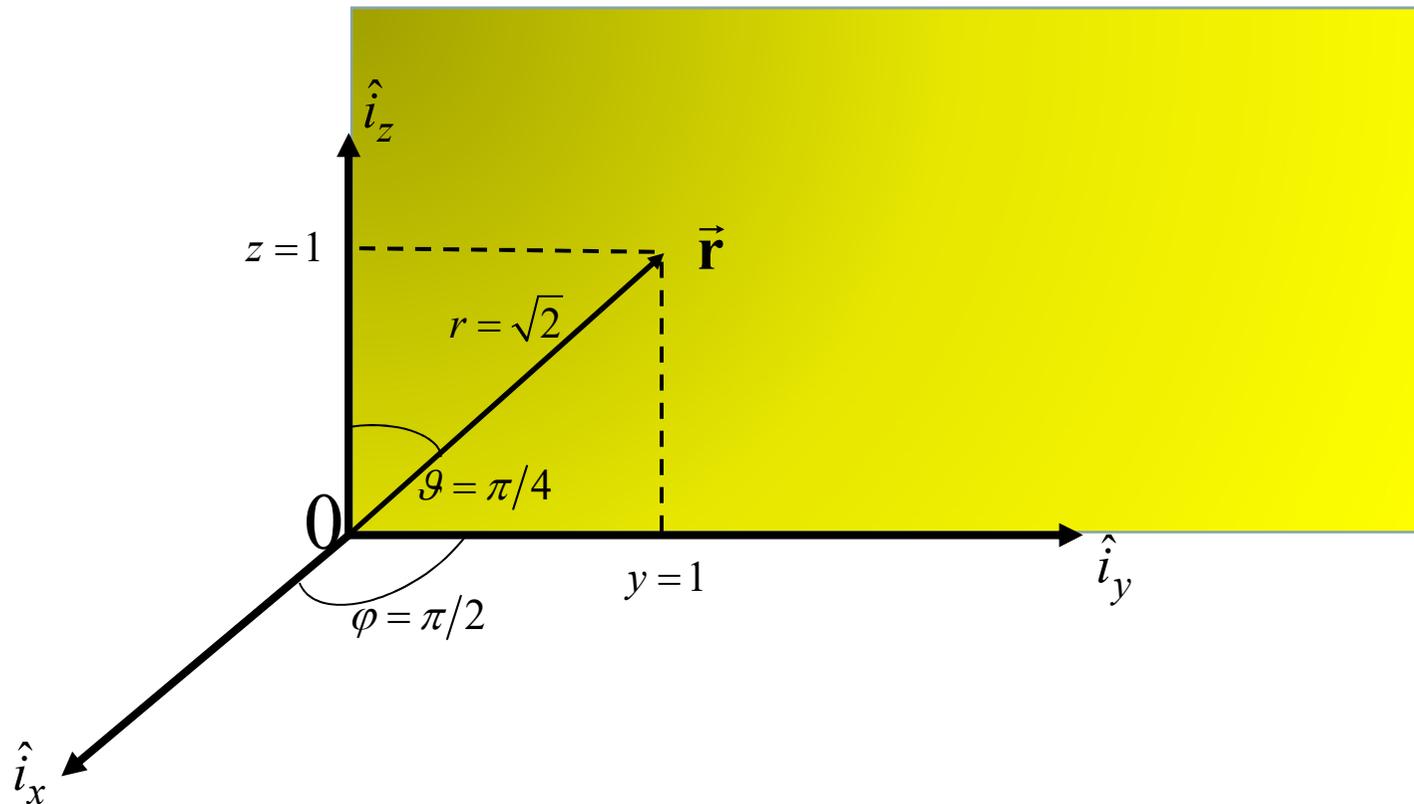
$$\vec{r} = (x = 0, y = 1, z = 1)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 1

$$\vec{r} = (x = 0, y = 1, z = 1)$$

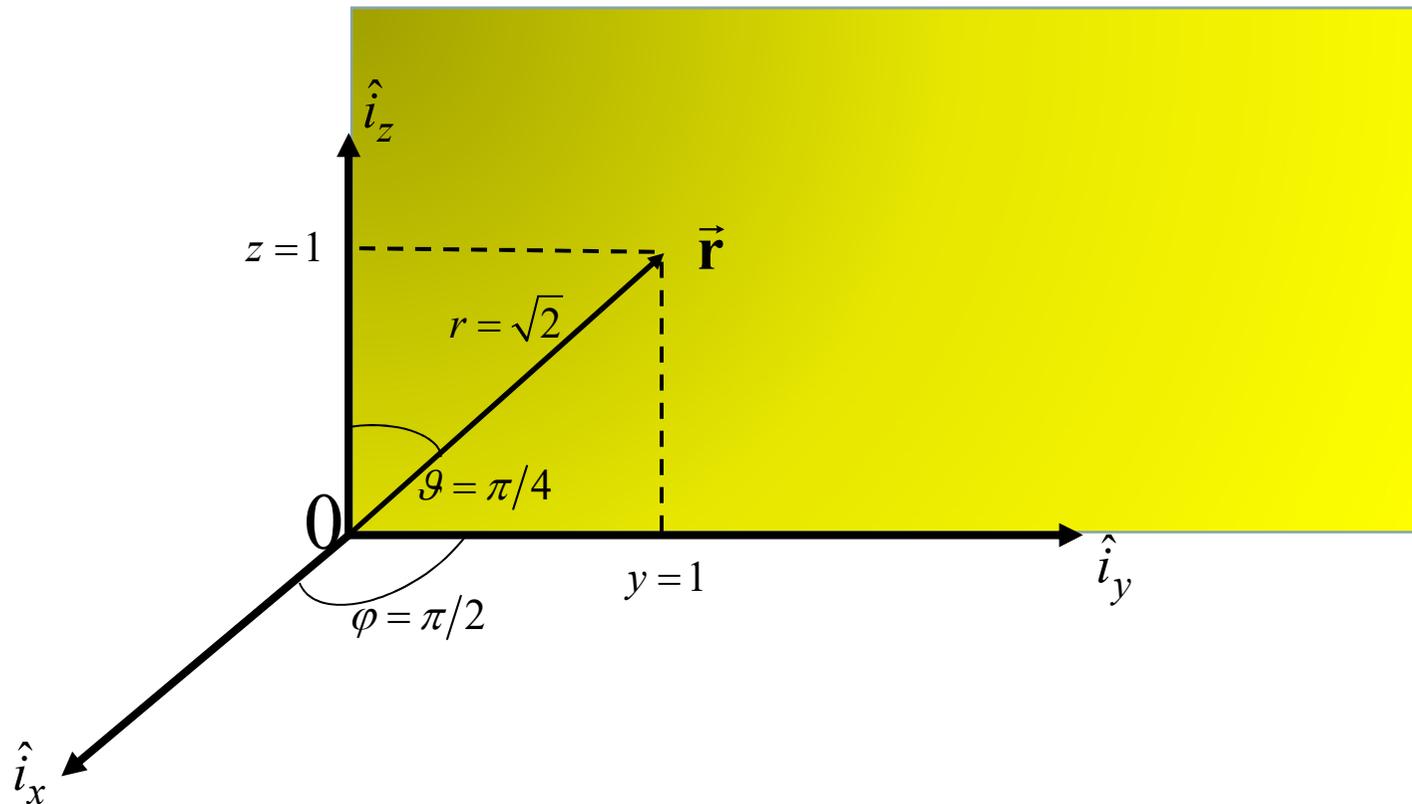


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 1

$$\vec{r} = (x = 0, y = 1, z = 1)$$

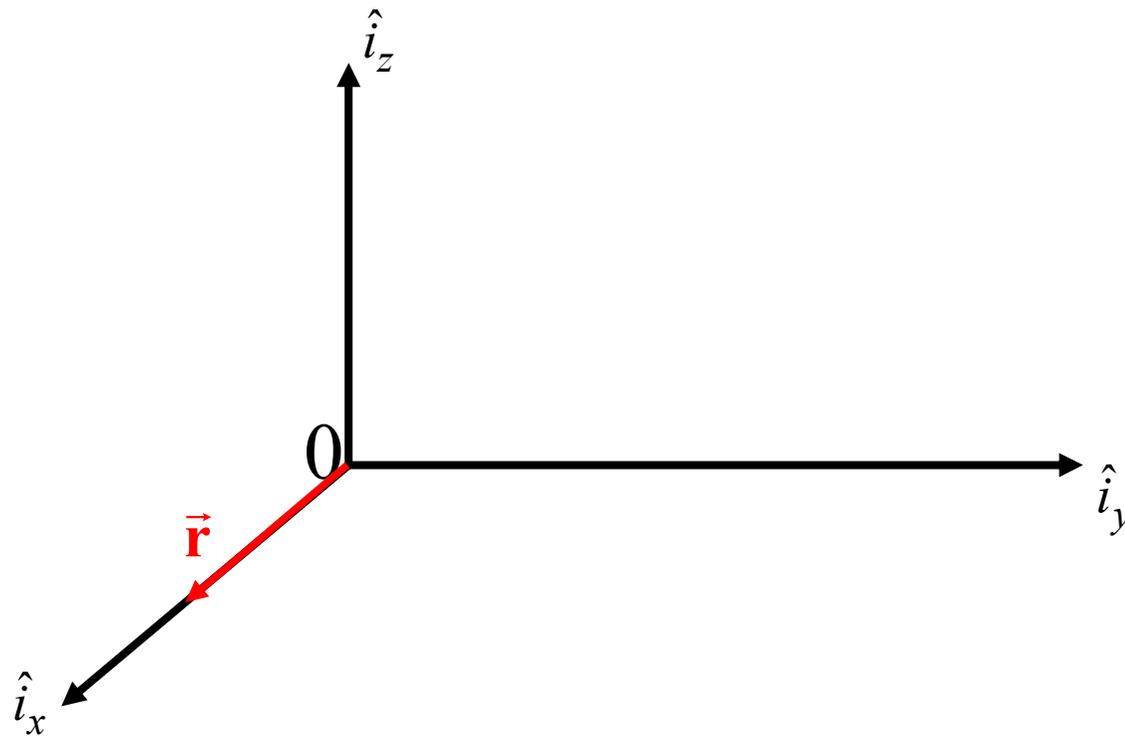
$$\vec{r} = (r = \sqrt{2}, \vartheta = \pi/4, \varphi = \pi/2)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 2

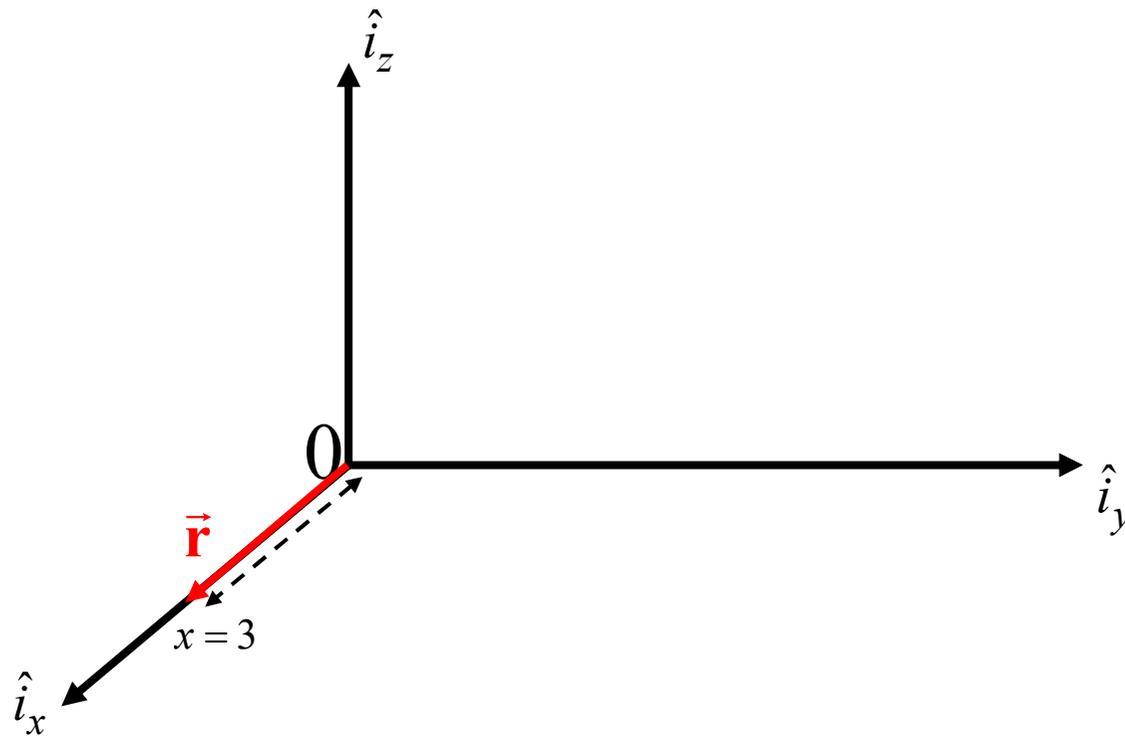
$$\vec{r} = (x = 3, y = 0, z = 0)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 2

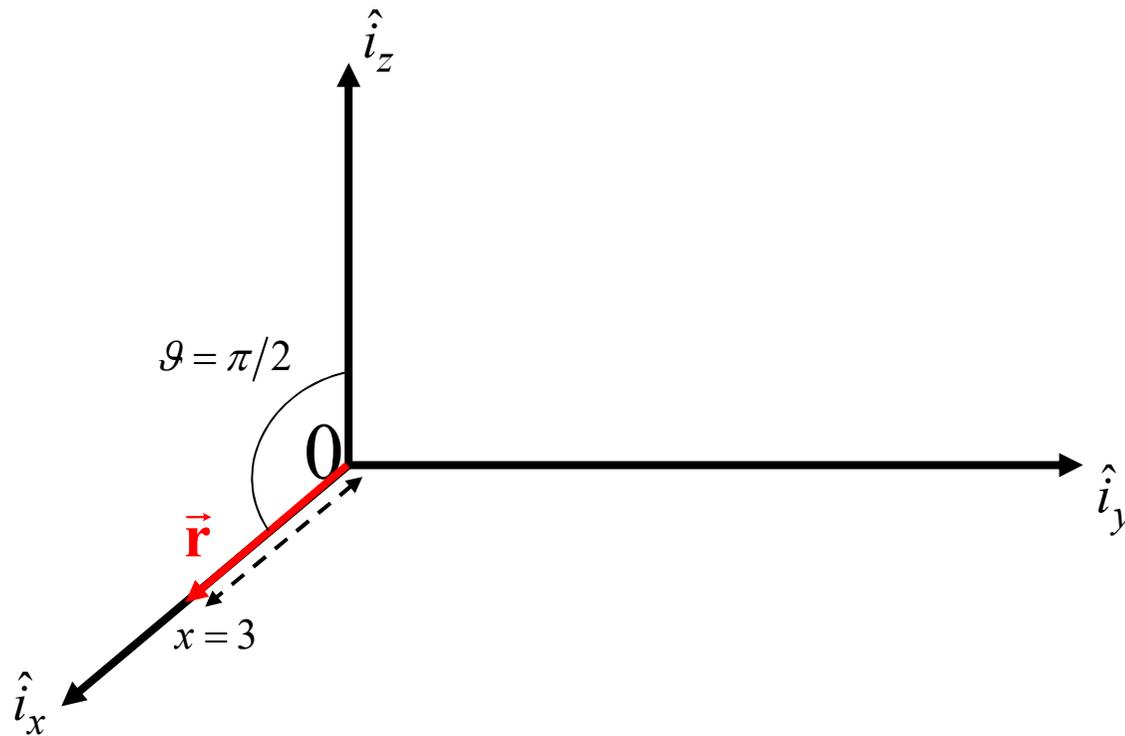
$$\vec{r} = (x = 3, y = 0, z = 0)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 2

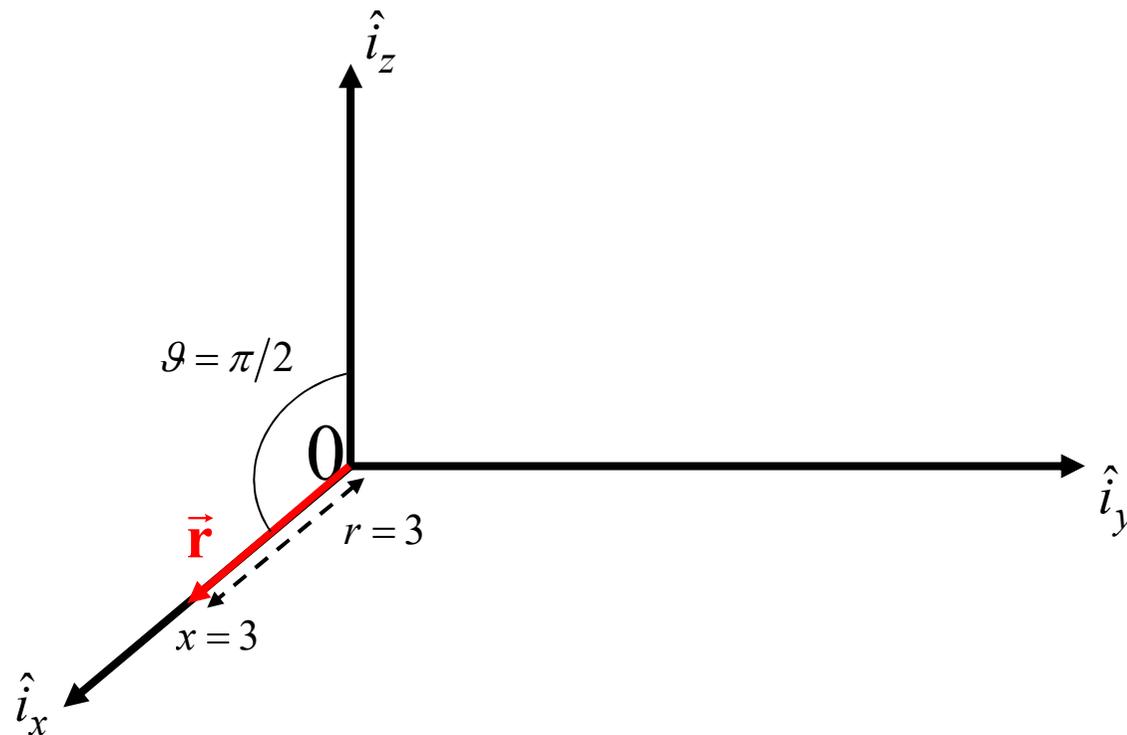
$$\vec{r} = (x = 3, y = 0, z = 0)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 2

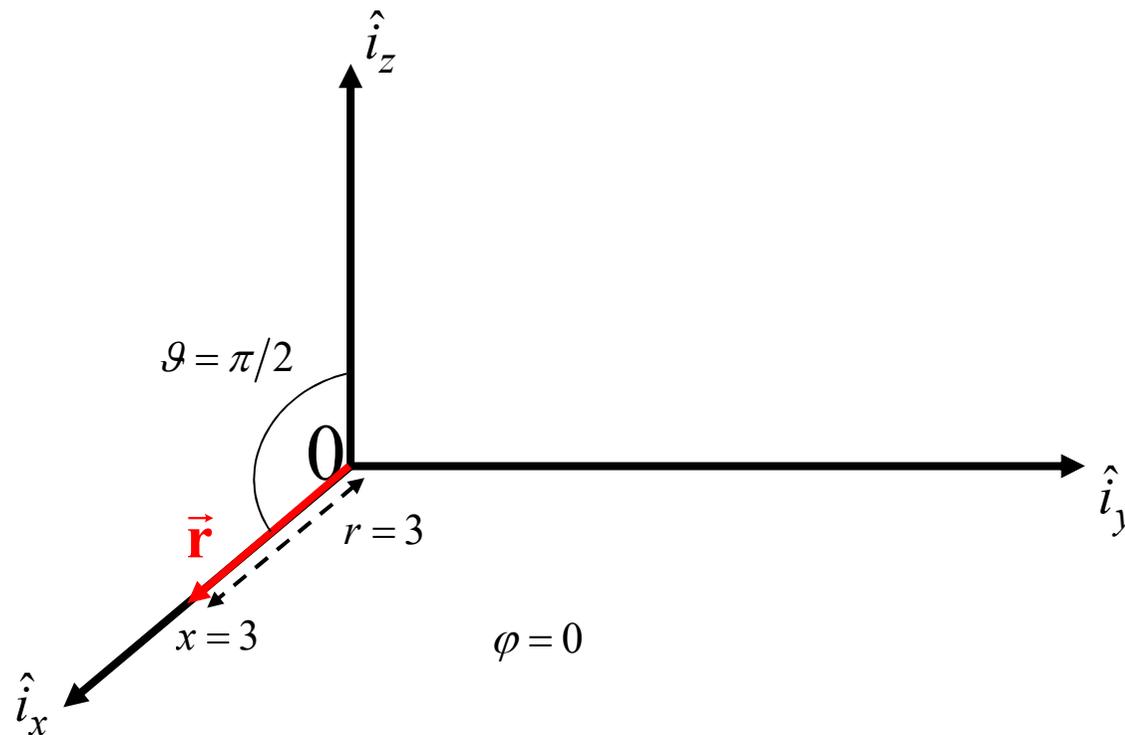
$$\vec{r} = (x = 3, y = 0, z = 0)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 2

$$\vec{r} = (x = 3, y = 0, z = 0)$$

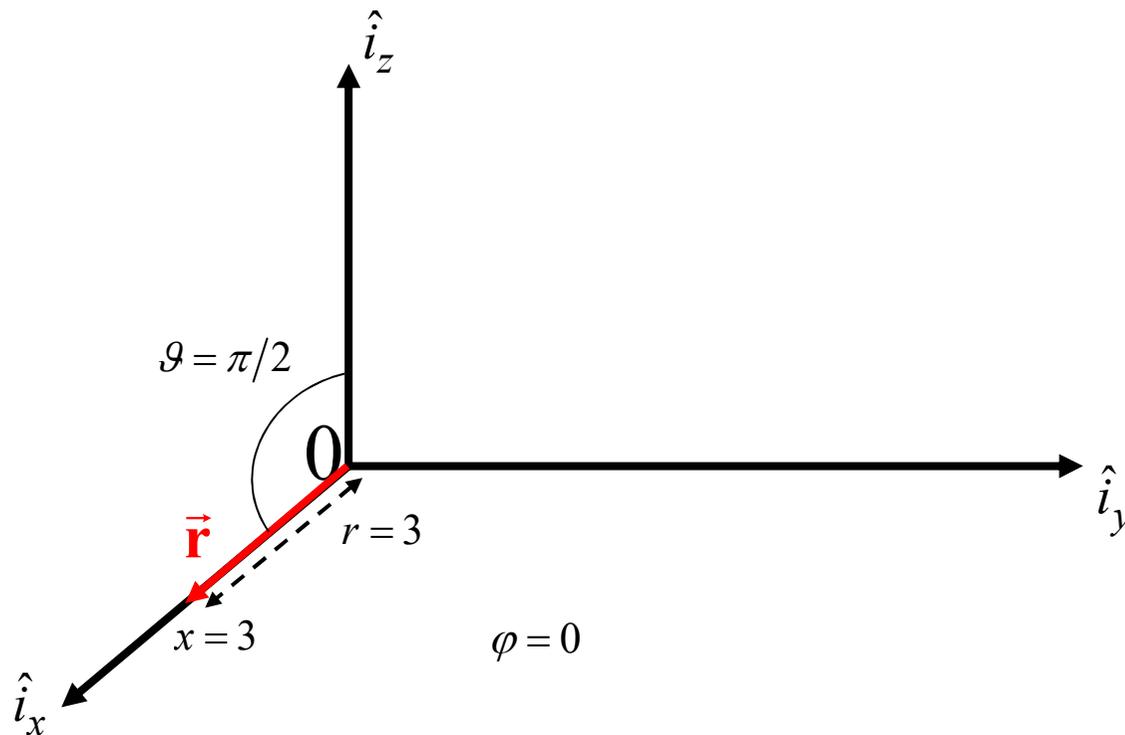


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 2

$$\vec{r} = (x = 3, y = 0, z = 0)$$

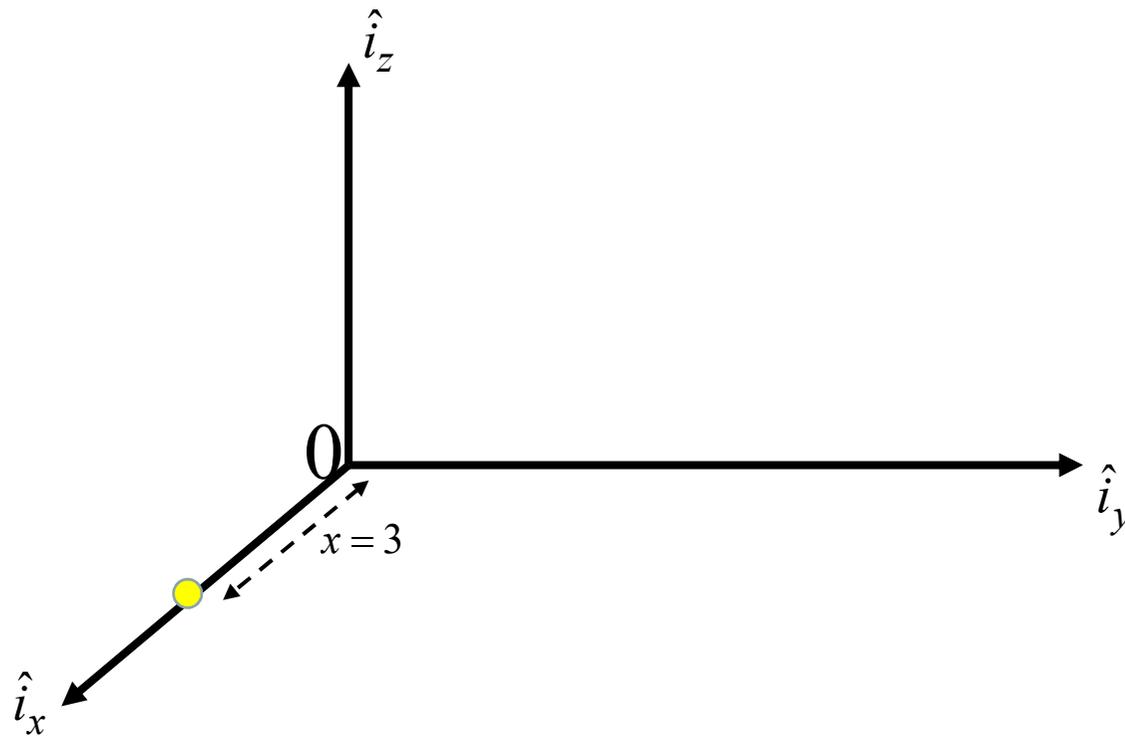
$$\vec{r} = (r = 3, \vartheta = \pi/2, \varphi = 0)$$



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 3

$$x = 3$$

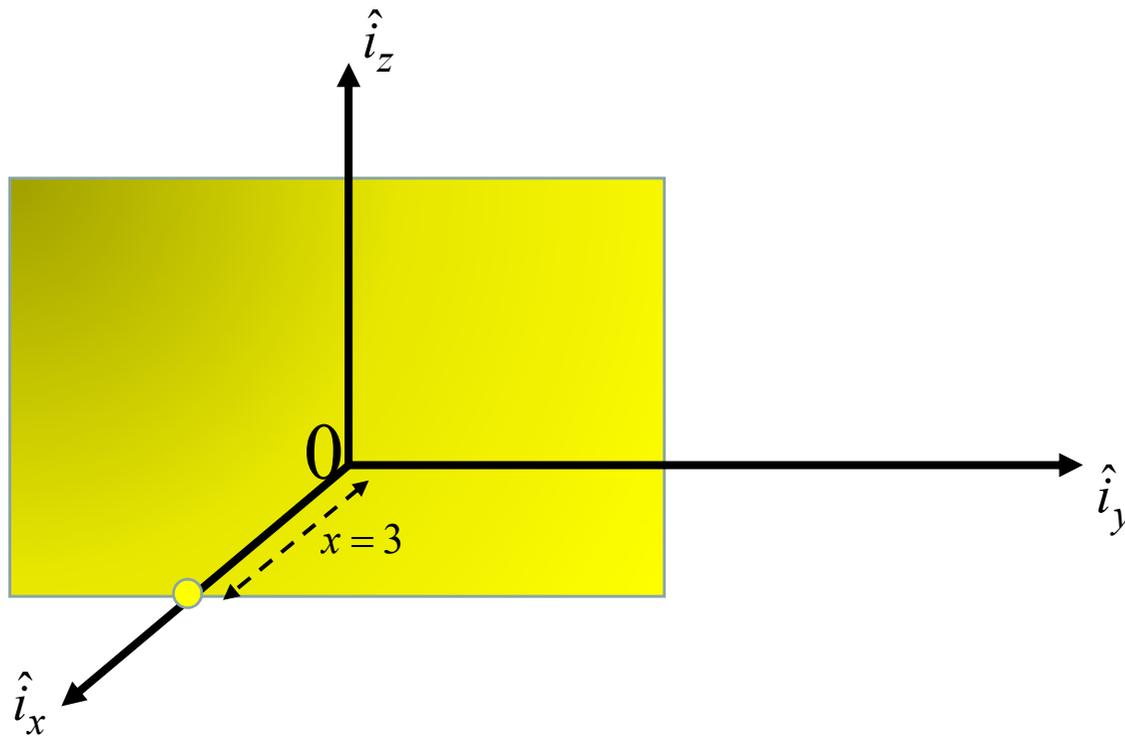


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 3

$$x = 3$$

... definisce un piano

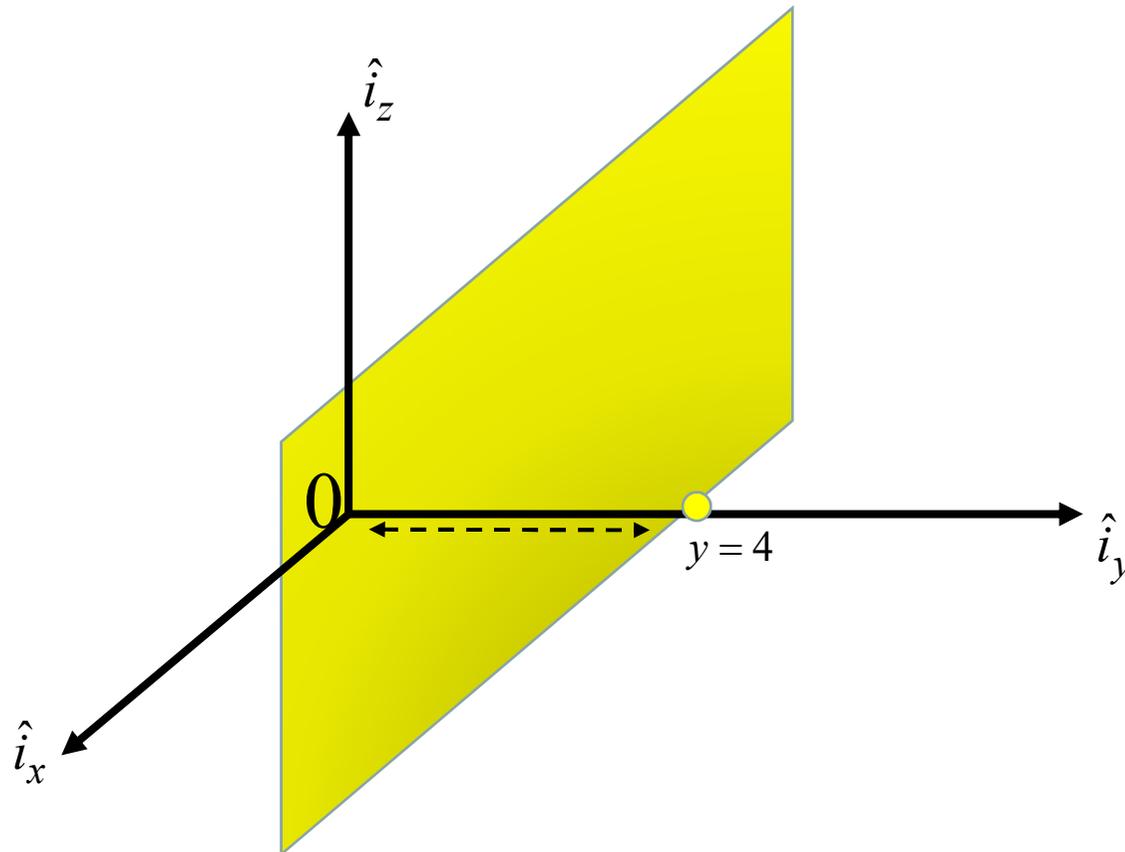


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 3

$$y = 4$$

... definisce un piano

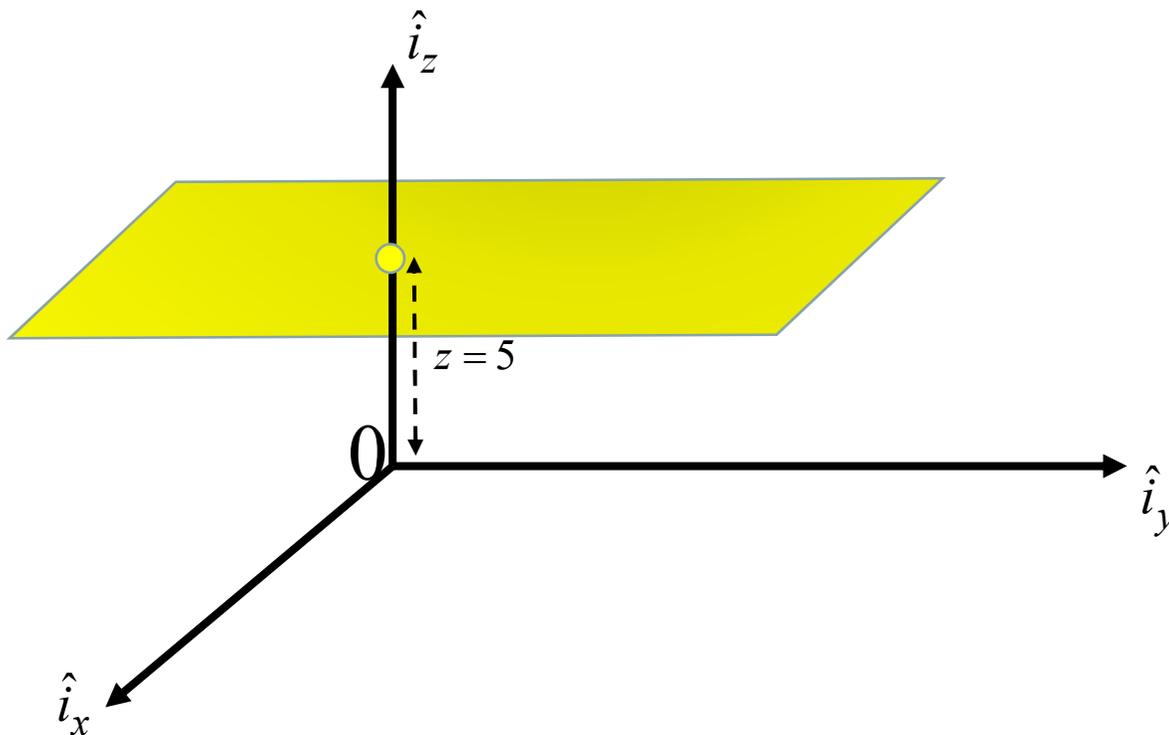


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 4

$$z = 5$$

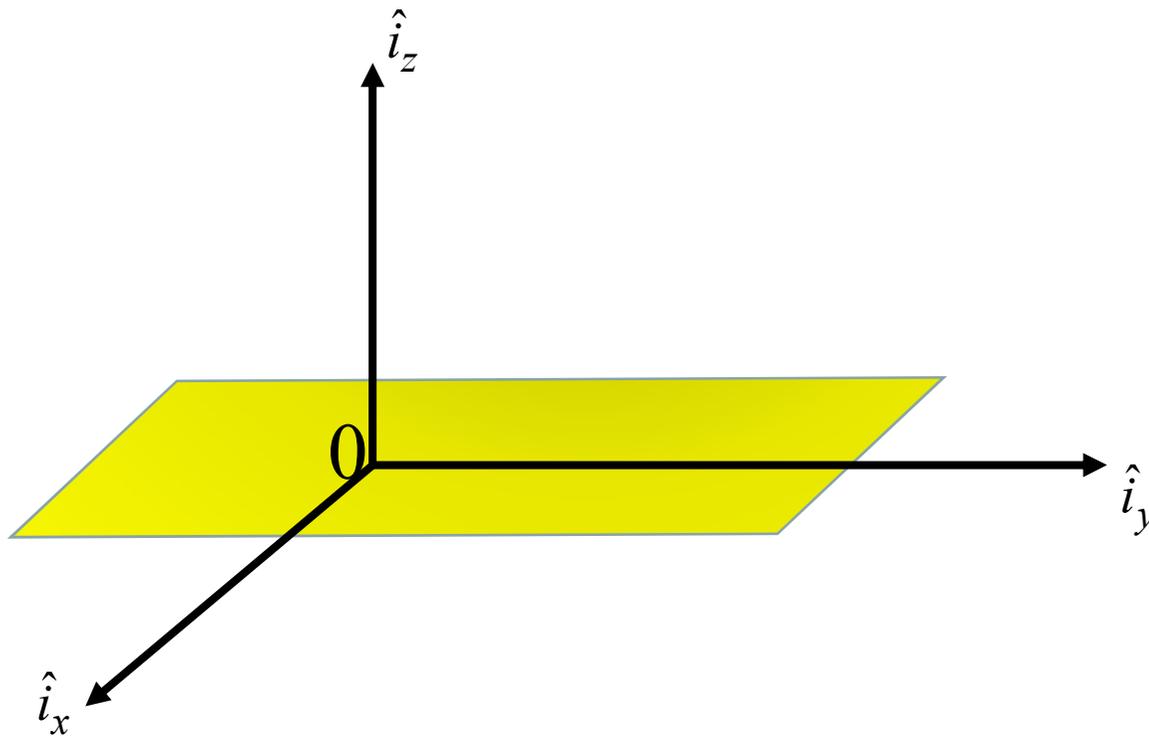
... definisce un piano



Sistema di riferimento sferico

Esercizio 5

Piano xy ?

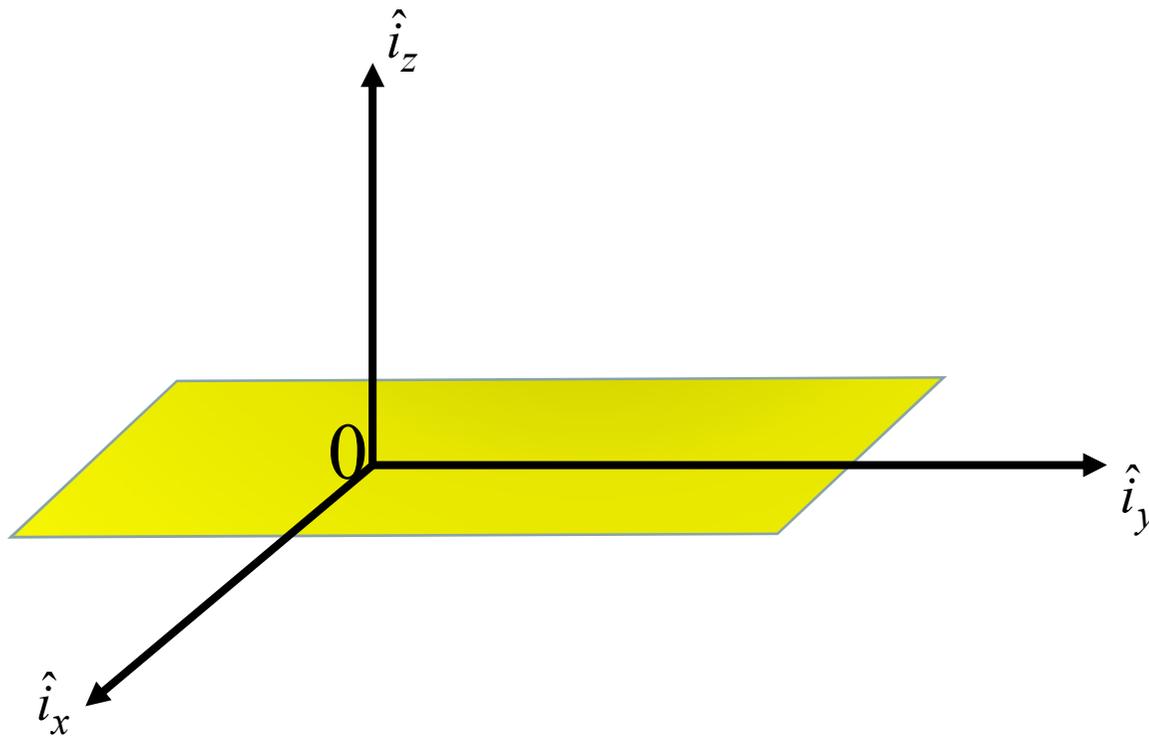


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 5

Piano xy ?

$$z = 0$$

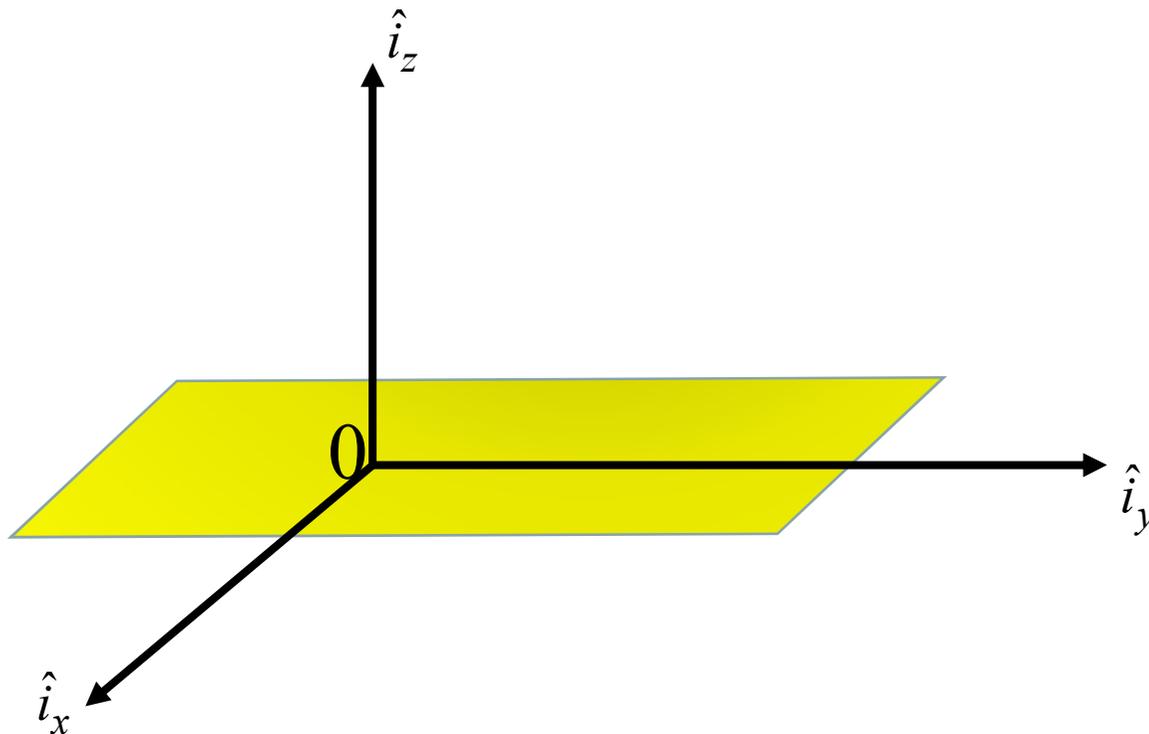


Sistema di riferimento sferico

Esercizio 5

Piano xy ?

$z = 0$ in coordinate cartesiane



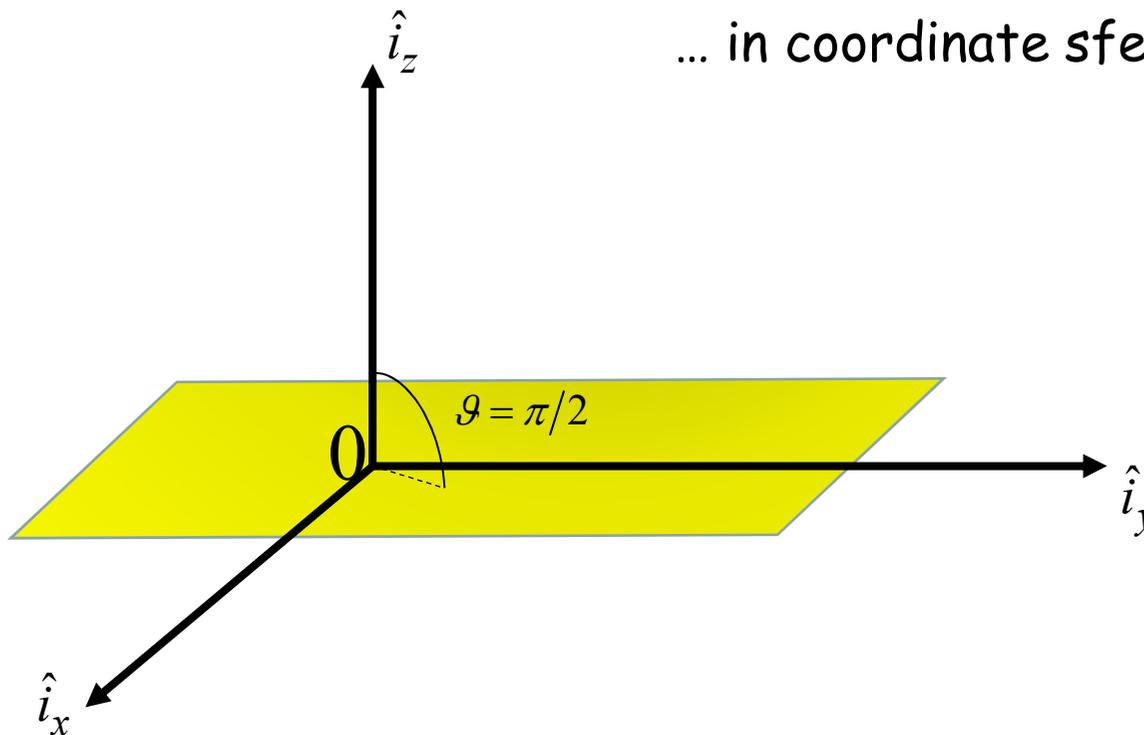
Sistema di riferimento sferico

Esercizio 5

Piano xy ?

$z = 0$ in coordinate cartesiane

... in coordinate sferiche $\vartheta = \pi/2$



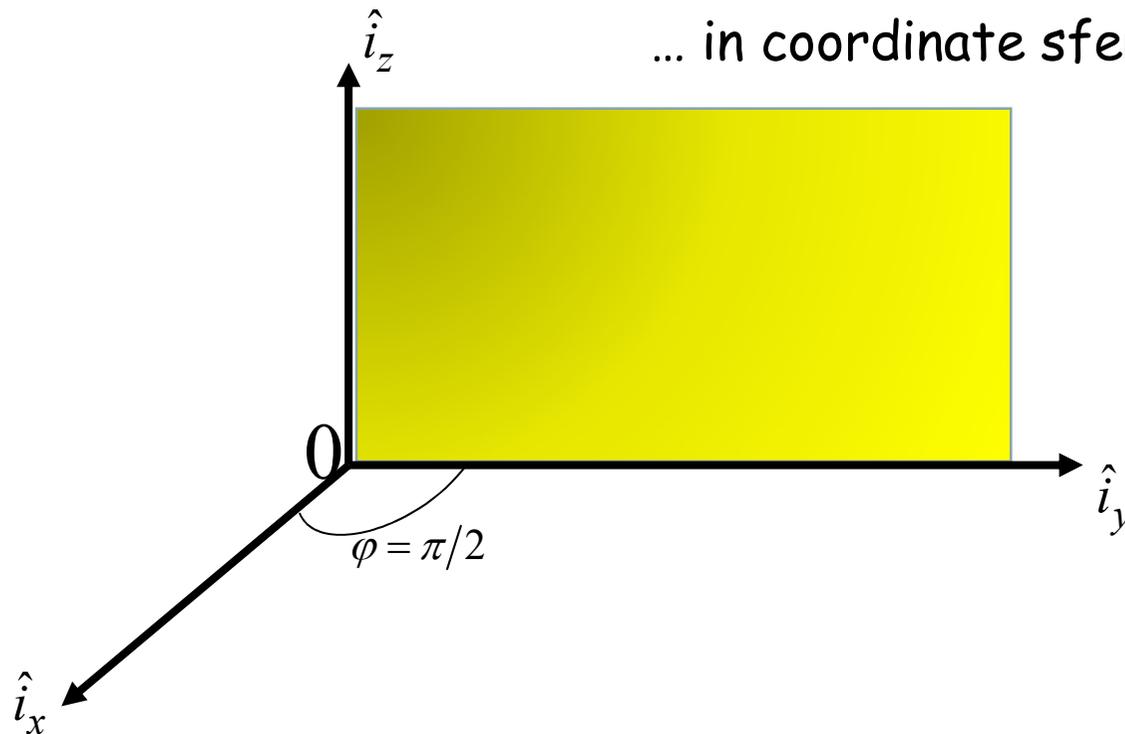
Sistema di riferimento sferico

Esercizio 6

Piano zy ?

$x = 0$ in coordinate cartesiane

... in coordinate sferiche $\varphi = \pi/2$



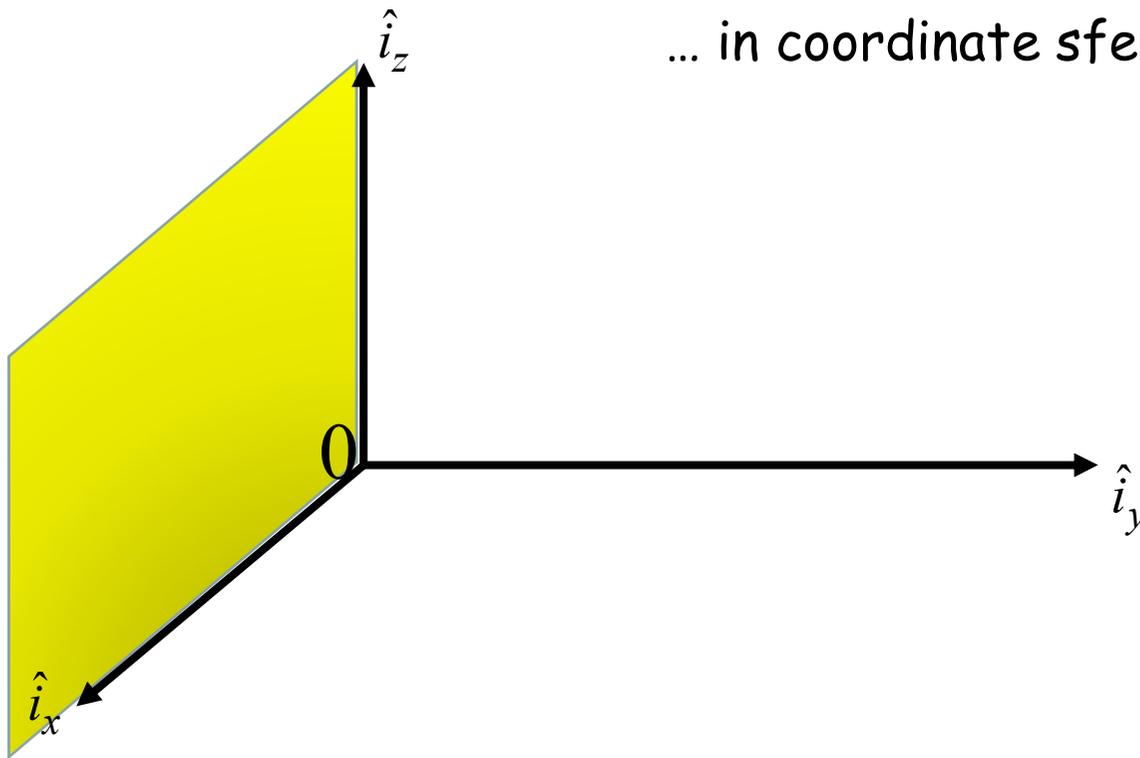
Sistema di riferimento sferico

Esercizio 7

Piano xz ?

$y = 0$ in coordinate cartesiane

... in coordinate sferiche $\varphi = 0$



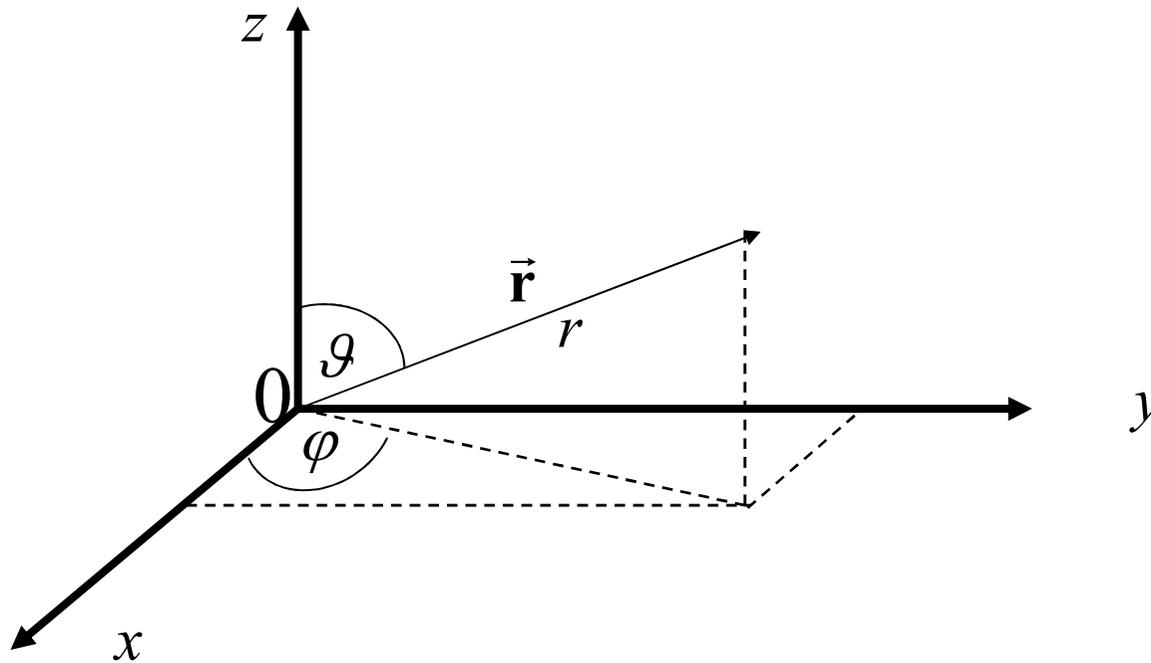
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

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

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

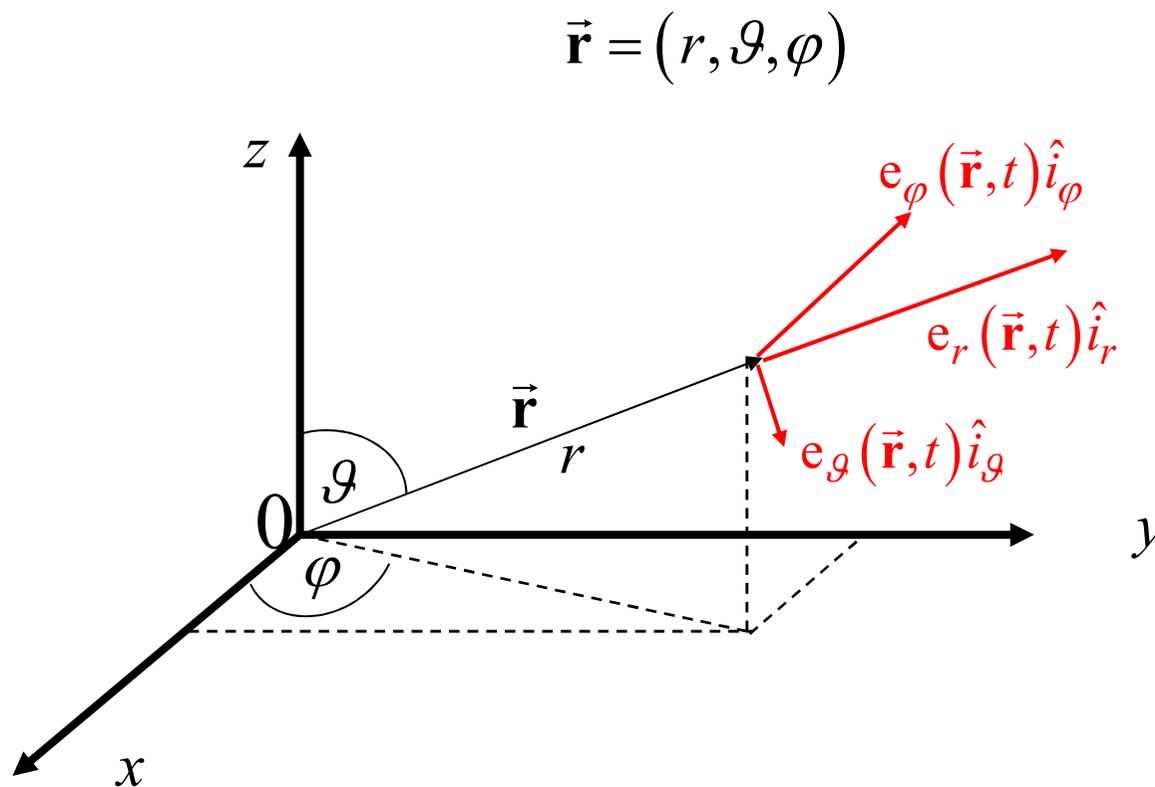
$$\vec{r} = (r, \vartheta, \varphi)$$

Sistema di riferimento sferico



Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

$$\vec{e} = \vec{e}(\vec{r}, t) \quad \vec{e} = e_r(\vec{r}, t)\hat{i}_r + e_\vartheta(\vec{r}, t)\hat{i}_\vartheta + e_\varphi(\vec{r}, t)\hat{i}_\varphi$$



Sistema di riferimento sferico

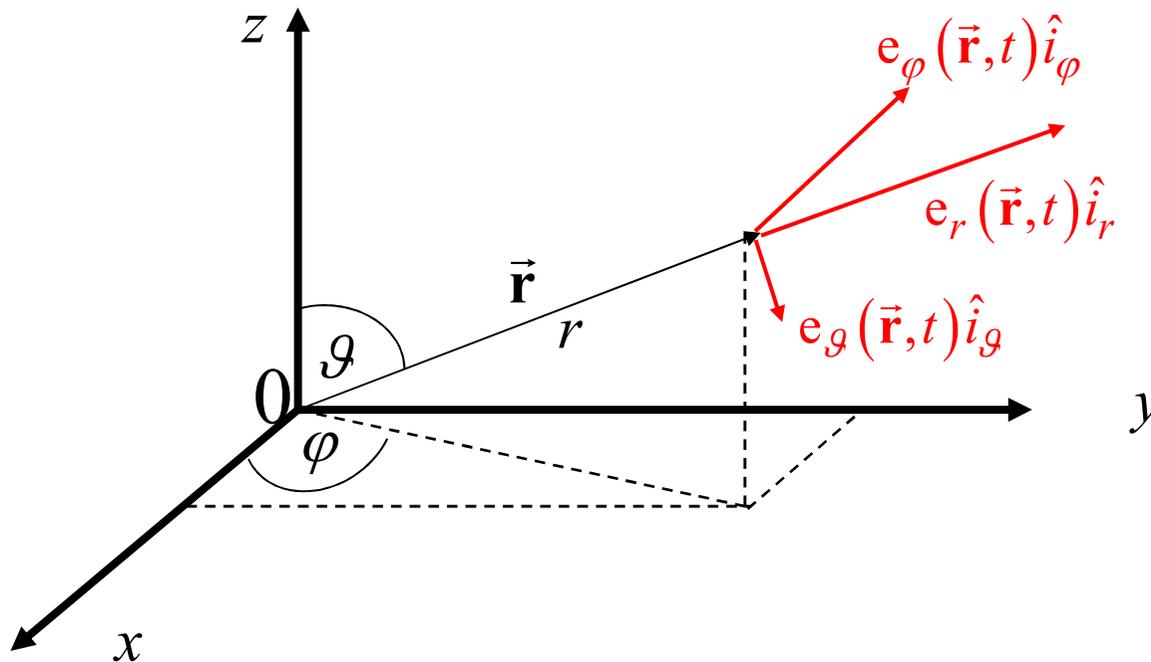
Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

$$\vec{e} = \vec{e}(\vec{r}, t) \quad \vec{e} = e_r(\vec{r}, t)\hat{i}_r + e_g(\vec{r}, t)\hat{i}_g + e_\varphi(\vec{r}, t)\hat{i}_\varphi$$

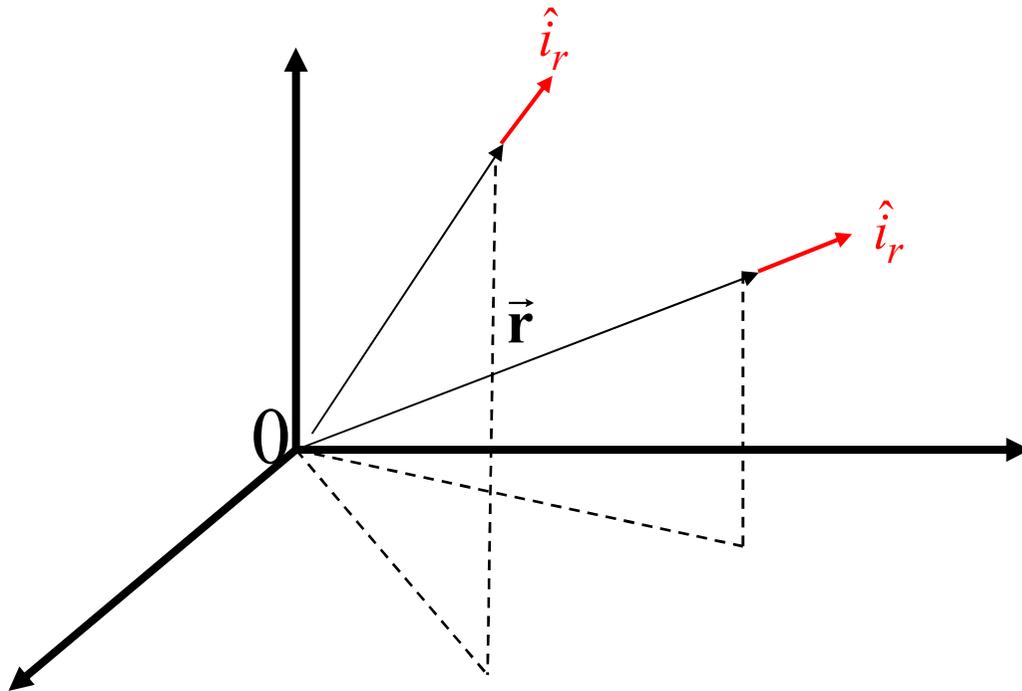
$$\vec{e} = \vec{e}(r, \vartheta, \varphi, t)$$

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

Sistema di riferimento sferico



Sistema di riferimento sferico



Campo elettromagnetico

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \quad \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = e_x(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + e_y(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + e_z(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$
$$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = e_r(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_r + e_g(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_g + e_\varphi(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_\varphi$$

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico dipende dallo spazio e dal tempo

$$\vec{\mathbf{e}} = \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \quad \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = e_x(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + e_y(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + e_z(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$
$$\vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = e_r(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_r + e_g(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_g + e_\varphi(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_\varphi$$

Il campo magnetico dipende dallo spazio e dal tempo

$$\vec{\mathbf{h}} = \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \quad \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = h_x(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_x + h_y(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_y + h_z(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_z$$
$$\vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = h_r(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_r + h_g(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_g + h_\varphi(\vec{\mathbf{r}}, t)\hat{i}_\varphi$$

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



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

(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



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

(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



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

(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

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

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

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

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

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

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

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

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

nel caso
stazionario:
derivate rispetto
al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico
sono legati?

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{e}(\vec{r}, t) = 0 \\ \nabla \times \vec{h}(\vec{r}, t) = \vec{j}(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{d}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{b}(\vec{r}, t) = 0 \end{array} \right.$$

nel caso
stazionario:
derivate rispetto
al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico
sono legati?

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

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



nel caso
stazionario:
derivate rispetto
al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

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

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

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

nel caso stazionario:
derivate rispetto al tempo nulle

Campo elettromagnetico

Il campo elettrico e il campo magnetico sono legati?

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{\mathbf{e}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = -\frac{\partial \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}}, t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{h}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \frac{\partial \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}}, t)}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}}, t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{d}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \rho(\vec{\mathbf{r}}, t) \\ \nabla \cdot \vec{\mathbf{b}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}}, t) : \text{densità di corrente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}}, t) : \text{densità di carica} \end{array} \right.$$



... solito scenario ...

Campo elettromagnetico

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

$\vec{j}(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r},t)$: densità di carica

sorgenti!!



... solito scenario ...

Campo elettromagnetico

..chi è la causa?

$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{j}}(\vec{\mathbf{r}}, t) : \text{densità di corrente della sorgente} \\ \rho(\vec{\mathbf{r}}, t) : \text{densità di carica della sorgente} \end{array} \right.$

...chi è l'effetto?

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

Color legend

New formulas, important considerations,
important formulas, important concepts

Very important for the discussion

Memo

Mathematical tools to be exploited

Mathematics

Campo elettromagnetico

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

$\vec{j}(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r},t)$: densità di carica

sorgenti!!



... scenario più complicato ...



Campo elettromagnetico

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

$\vec{j}(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r},t)$: densità di carica

sorgenti!!



... scenario più complicato ...

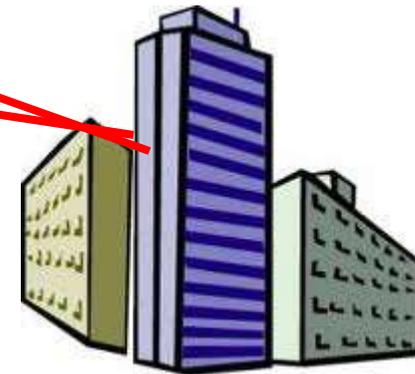


Campo elettromagnetico

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

$\vec{j}(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r},t)$: densità di carica

sorgenti!!



... scenario più complicato ...



Campo elettromagnetico

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{e}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{b}(\vec{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{h}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{d}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{j}_0(\vec{r}, t) + \vec{j}(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{d}(\vec{r}, t) = \rho_0(\vec{r}, t) + \rho(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{b}(\vec{r}, t) = 0 \end{array} \right.$$

$\vec{j}_0(\vec{r}, t)$: densità di corrente
 $\rho_0(\vec{r}, t)$: densità di carica

Sorgenti impresse

$\vec{j}(\vec{r}, t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r}, t)$: densità di carica

Sorgenti indotte



... scenario più complicato ...



Campo elettromagnetico

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

$\vec{j}_0(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho_0(\vec{r},t)$: densità di carica

Sorgenti impresse

$\vec{j}(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r},t)$: densità di carica

Sorgenti indotte



... scenario più complicato ...



Campo elettromagnetico

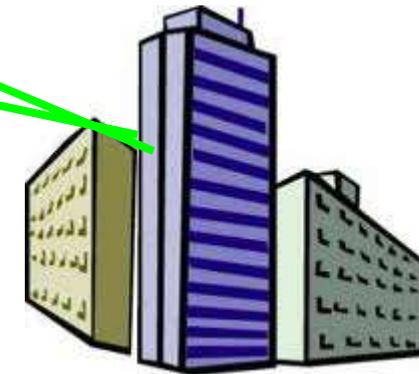
$$\begin{cases} \nabla \times \vec{e}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{b}(\vec{r},t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{h}(\vec{r},t) = \frac{\partial \vec{d}(\vec{r},t)}{\partial t} + \vec{j}_0(\vec{r},t) + \vec{j}(\vec{r},t) \\ \nabla \cdot \vec{d}(\vec{r},t) = \rho_0(\vec{r},t) + \rho(\vec{r},t)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

$\vec{j}_0(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho_0(\vec{r},t)$: densità di carica

Sorgenti impresse

$\vec{j}(\vec{r},t)$: densità di corrente
 $\rho(\vec{r},t)$: densità di carica

Sorgenti indotte



... scenario più complicato ...



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?

Equazioni di Maxwell

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



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