

## Equazioni di Maxwell

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{ch}}{\epsilon_0}$$

Legge di Gauss per il campo elettrico

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Legge di Gauss per il campo magnetico

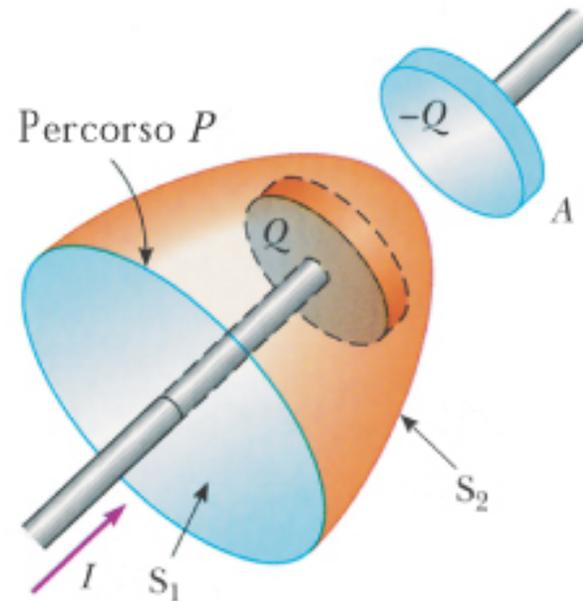
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}$$

Legge dell'induzione di Faraday

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{ch} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}$$

Legge dell'induzione di Maxwell-Ampere

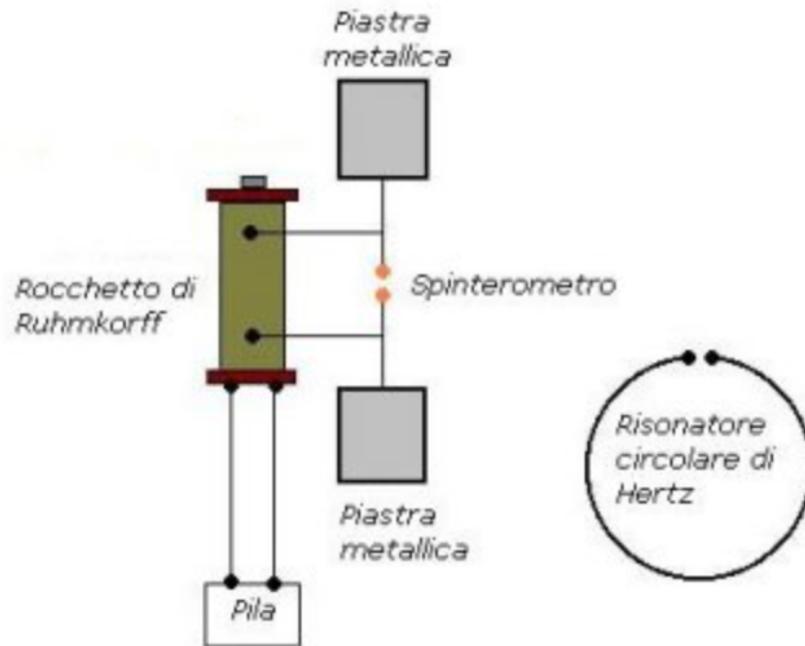
## Corrente di spostamento



**Figura 24.1**

Le superfici  $S_1$  ed  $S_2$  hanno come contorno lo stesso percorso  $P$ . La corrente di conduzione nel filo passa soltanto attraverso  $S_1$ . Ciò conduce a una contraddizione nel teorema di Ampère che viene risolta soltanto se si postula una corrente di spostamento attraverso  $S_2$ .

# Onde elettromagnetiche



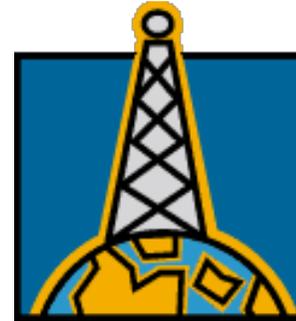
Nel 1862 Maxwell a partire dalle sue equazioni teorizzò **l'esistenza delle onde elettromagnetiche.**

Nel 1887 Hertz **riuscì a produrre onde e.m.**, ne verificò il comportamento, ne misurò la lunghezza e la velocità e seppure di pochi metri ne irradiò nello spazio.

Nel suo esperimento utilizzò un rocchetto di Ruhmkorff, cioè un generatore in grado di produrre delle forti scariche (scintille) dando luogo a delle oscillazioni elettromagnetiche che venivano rilevate a breve distanza da un semplice anello di metallo interrotto in un punto.

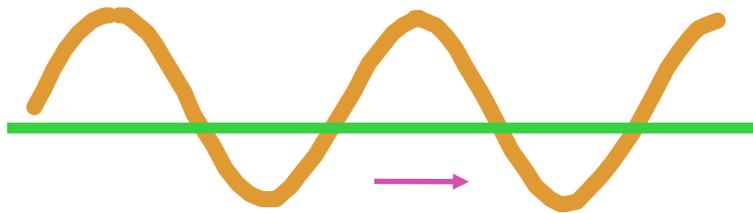
# LE ONDE

Fenomeni ondulatori  
Periodo e frequenza  
Lunghezza d'onda e velocità  
Legge di propagazione  
Energia trasportata  
Onde meccaniche: il suono  
Onde elettromagnetiche  
Velocità della luce  
Spettro elettromagnetico  
Energia dell'onda elettromagnetica

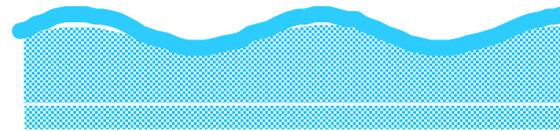


# Fenomeni ondulatori

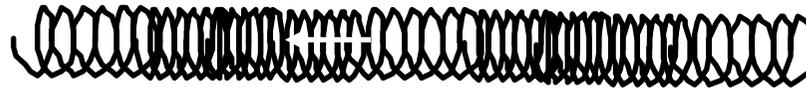
Oscillazioni meccaniche



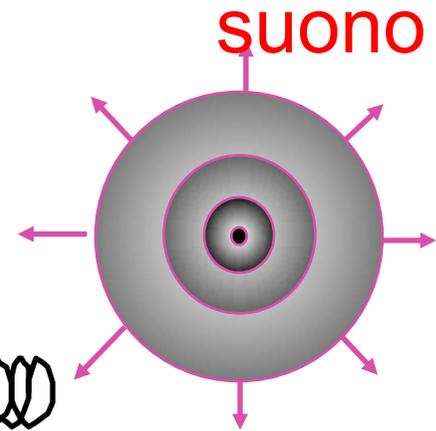
corda che vibra



mare

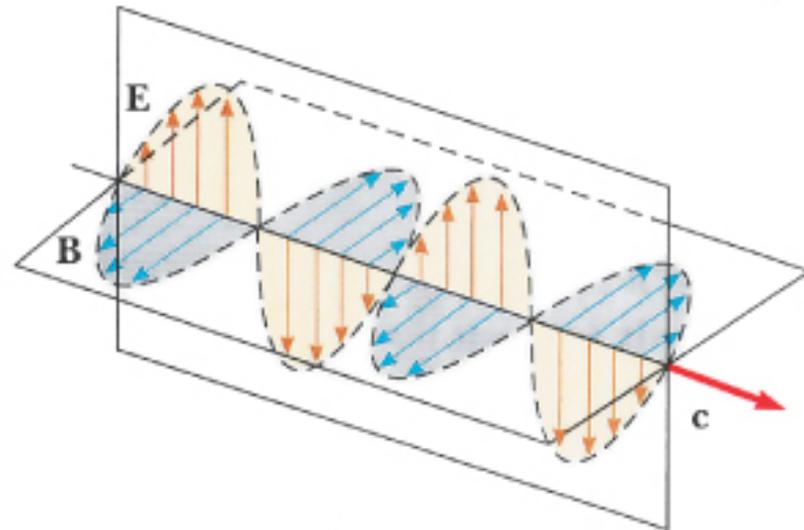


molla



suono

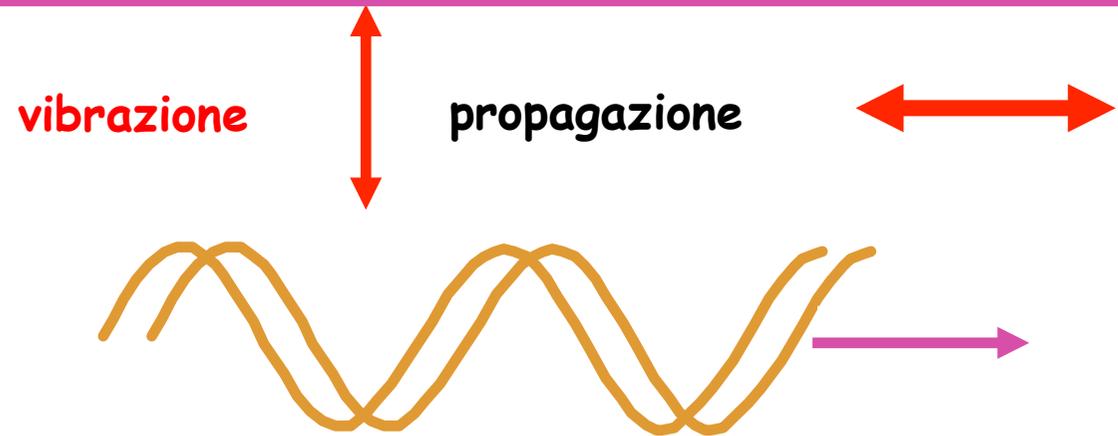
Oscillazioni  
elettromagnetiche



# Onde trasversali e longitudinali

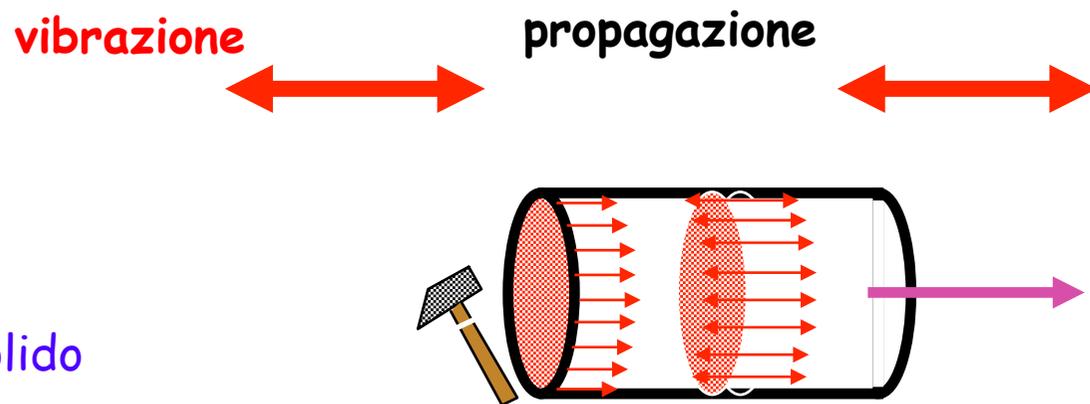
## ■ trasversali

esempio :  
onda lungo una corda



## ■ longitudinali

esempio :  
onda di percussione in un solido



# Periodo e frequenza

Fenomeno periodico:  $f(t) = f(t+T)$

ritorna alla stessa configurazione dopo uno stesso intervallo di tempo

**Periodo T** = minimo intervallo di tempo

dopo il quale il fenomeno ritorna alla stessa configurazione  
= durata di una oscillazione (unita' di misura: **secondo**).

$$\begin{aligned}f(t) &= A \operatorname{sen}(2\pi t/T) \\ &= A \operatorname{sen}[(2\pi/T) t] \\ &= A \operatorname{sen}(\omega t)\end{aligned}$$

pulsazione  $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$

Se 1 oscillazione dura n secondi,  
in 1 secondo ci sono 1/n oscillazioni

frequenza =  
n. oscillazioni/sec

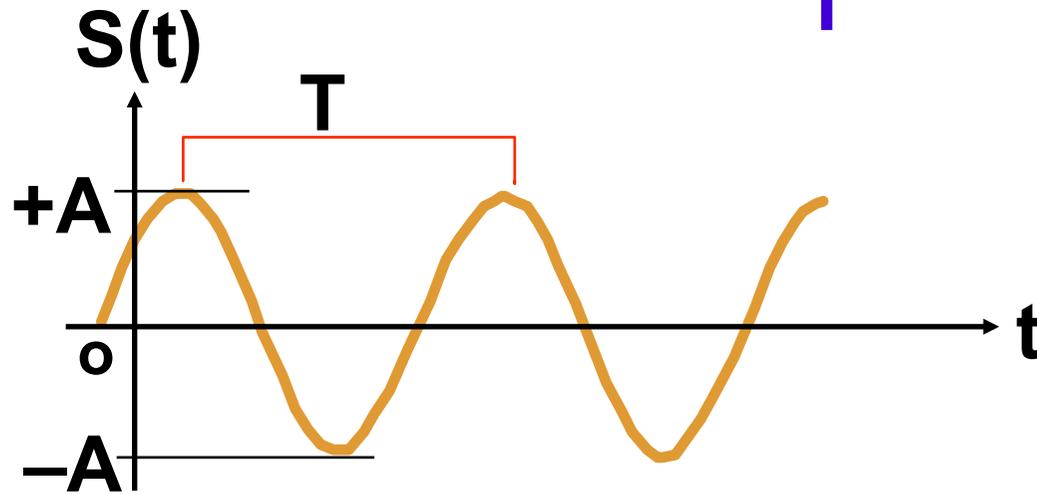
$$\nu = 1/T$$

$$\text{Hz} = 1/\text{s}$$

# Ampiezza e energia di un' onda

$$S(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \nu$$



A = ampiezza  
T = periodo  
 $\nu$  = frequenza  
 $\phi$  = fase

**ENERGIA  
DI UN' ONDA**

$$E \propto A^2$$

# Legge di propagazione delle onde

Ogni onda si propaga con una propria **velocità** costante

**Lunghezza d'onda**  $\lambda$  =  
minima distanza

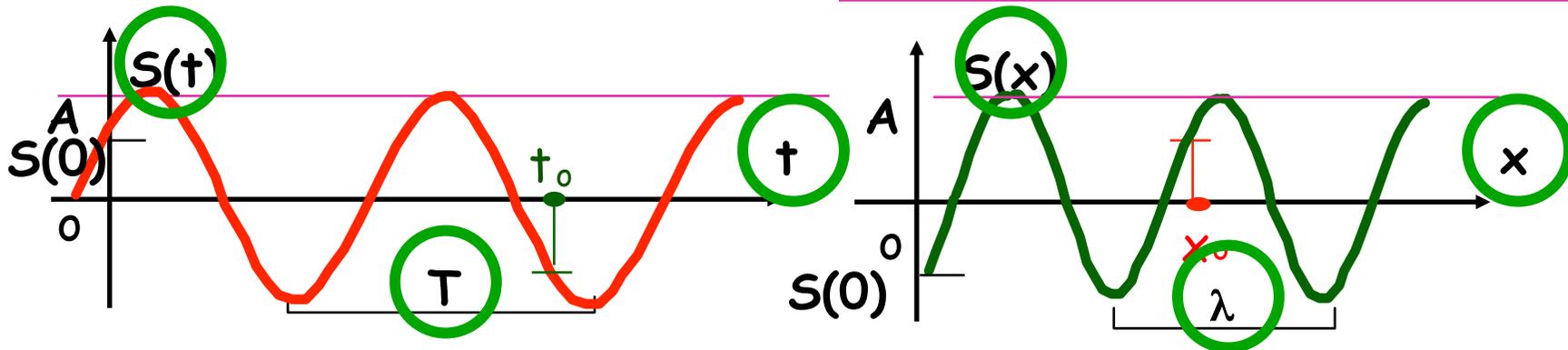
dopo la quale il fenomeno riprende  
la stessa configurazione =  
distanza percorsa in un periodo  
(unita' di misura: **metro**).

Moto rettilineo uniforme:

$$x = vt \rightarrow \lambda = vT$$

$$\lambda = vT = v/v \quad \lambda v = v$$

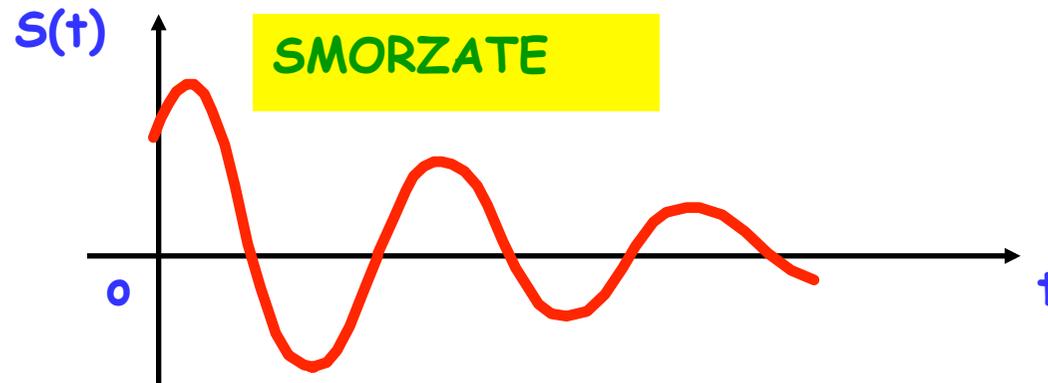
Lunghezza d'onda e frequenza  
sono direttamente proporzionali:  
il loro prodotto e' la velocita'



# Oscillazioni smorzate e forzate

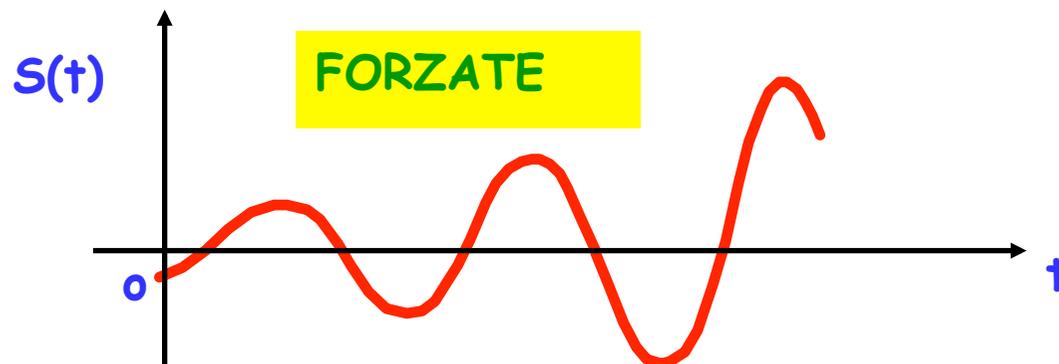
■ forze dissipative (attriti)

→ energia dissipata



↓  
graduale diminuzione  
dell'ampiezza  $A$

■ energia rifornita al sistema



↓  
graduale aumento  
dell'ampiezza  $A$

# Intensità di un' onda

Intensità = energia trasportata nell'unità di tempo  
attraverso l'unità di superficie

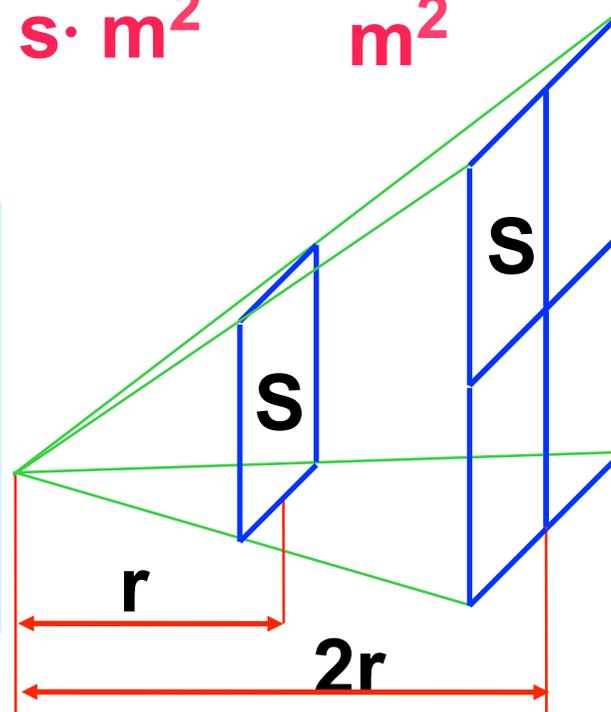
$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$

unità di misura:  $\frac{\text{joule}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{watt}}{\text{m}^2}$

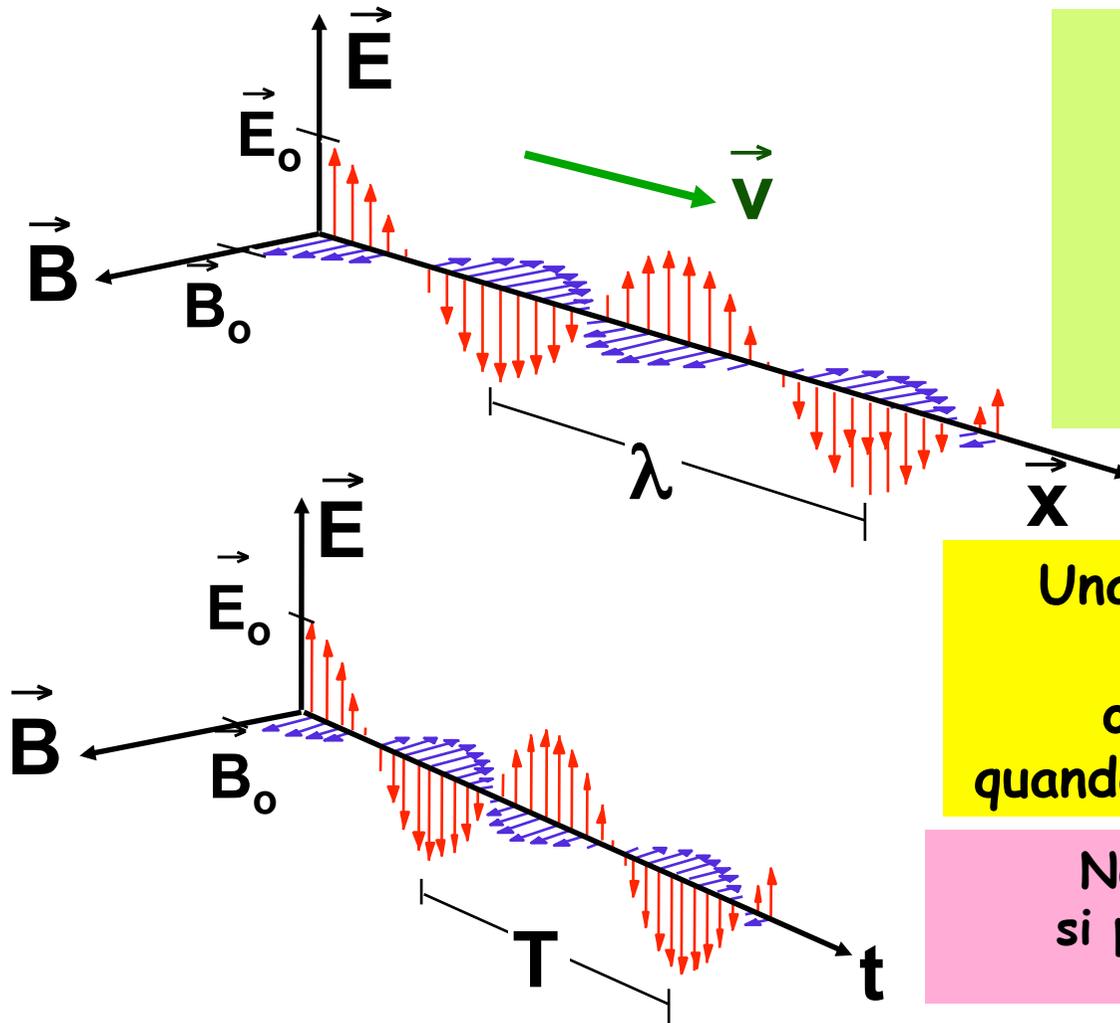
*onda sferica:  $S = 4\pi r^2$*

L'energia é costante (cons.energia)

L'intensità diminuisce  
con il quadrato della distanza



# Onde elettromagnetiche



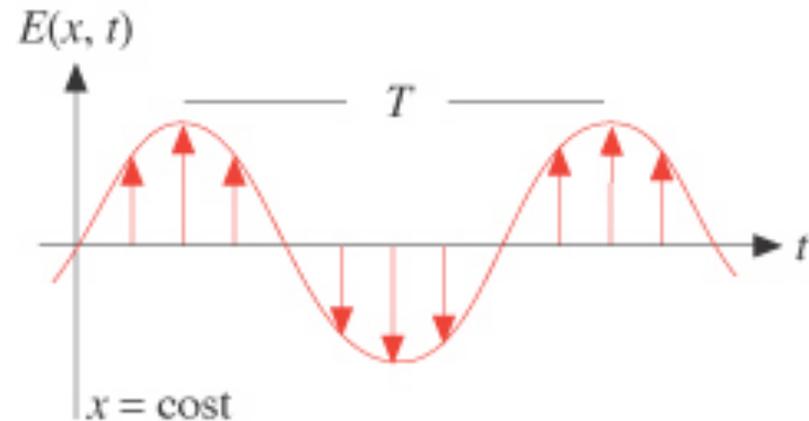
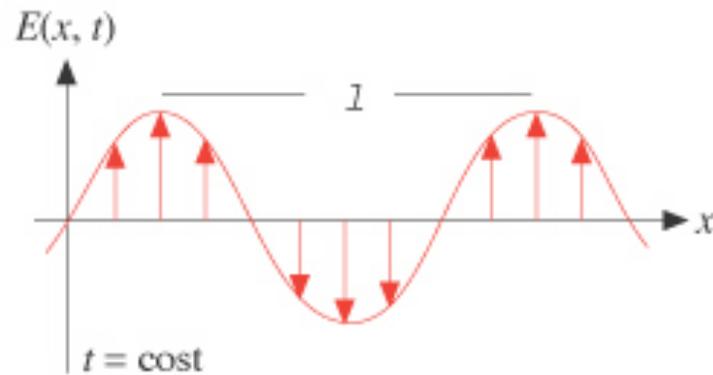
Onda elettromagnetica:  
“vibrazione”  
del campo elettrico  
e del campo magnetico  
in direzione  
perpendicolare a entrambi

Una carica elettrica in moto  
**emette o assorbe**  
onde elettromagnetiche  
quando soggetta ad accelerazione

Non serve materia: i campi  
si propagano **anche nel vuoto!**

## Legge di propagazione delle onde e.m.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad T = \frac{1}{\nu} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$



La loro velocità nel vuoto è  $c$

$c'$  la velocità della luce, ma anche di tutte le altre onde elettromagnetiche.

$c'$  la massima velocità raggiungibile in natura.

Nei mezzi materiali la velocità è  $c/n$  ( $<c$ ), dove  $n$  è l'indice di rifrazione

## Legge di propagazione delle onde e.m. (2)

$$\vec{E} = \vec{E}_M \sin(kx - \omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_M \sin(kx - \omega t)$$

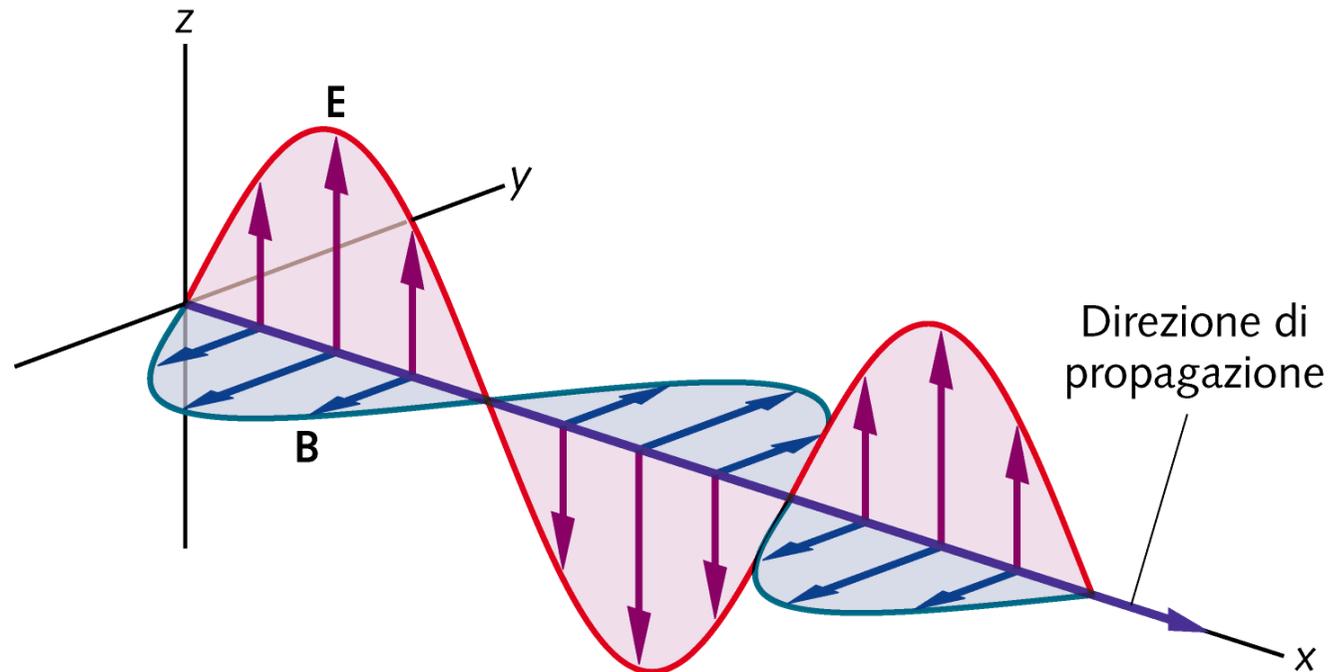
$$\vec{k} = \text{vettore d'onda} \quad |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Il vettore d'onda è parallelo alla direzione di propagazione}$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad \text{pulsazione}$$

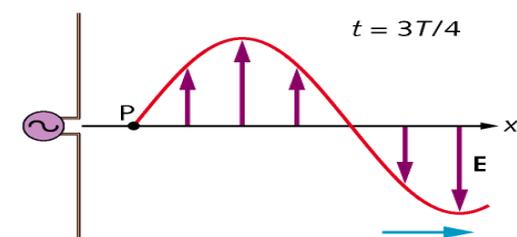
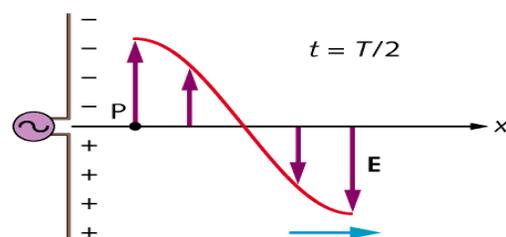
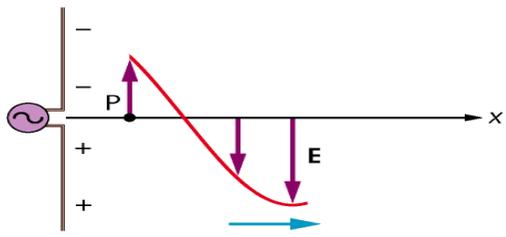
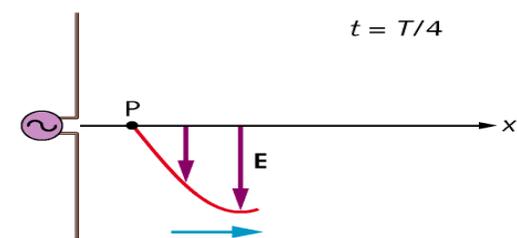
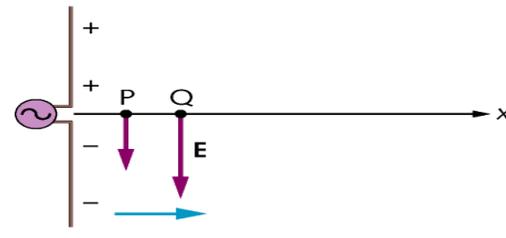
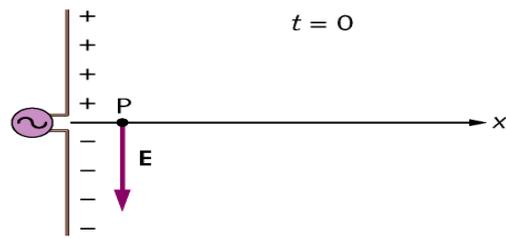
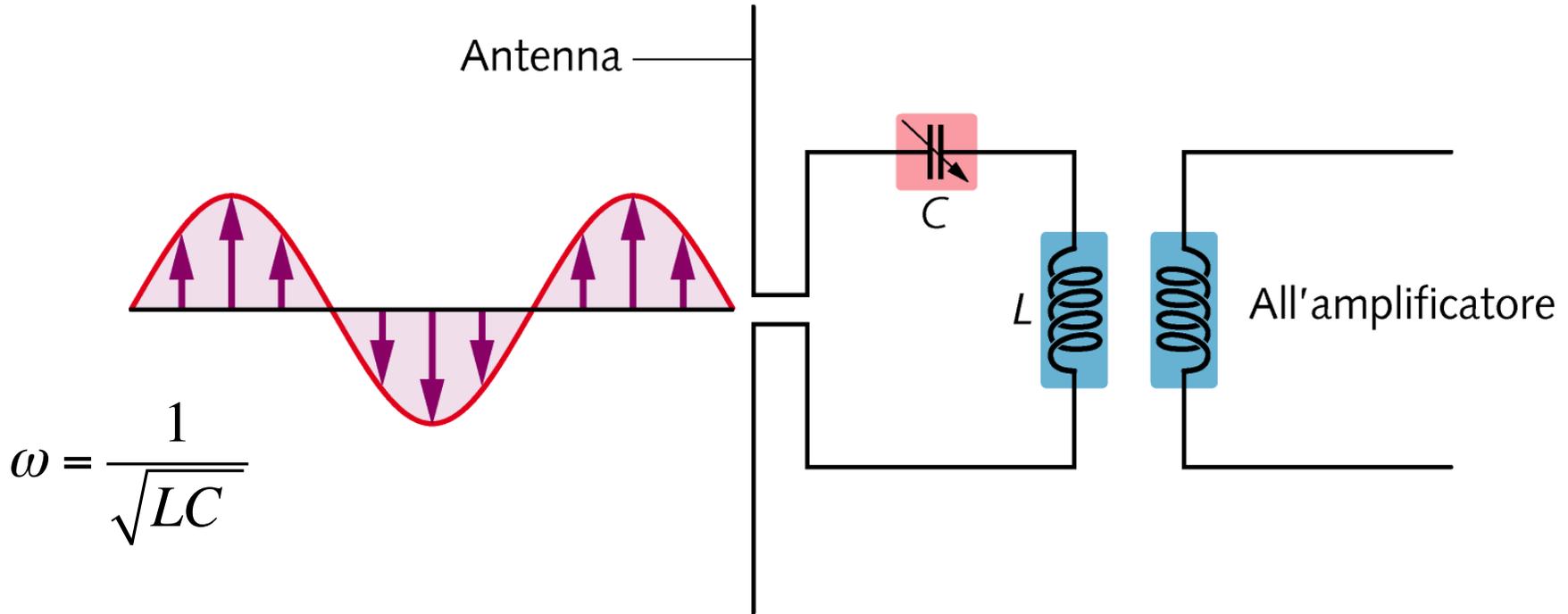
$$\frac{\vec{E}}{|\vec{E}|} \times \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|} = \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|}$$

Campi elettrico e magnetico sono perpendicolari alla direzione di propagazione

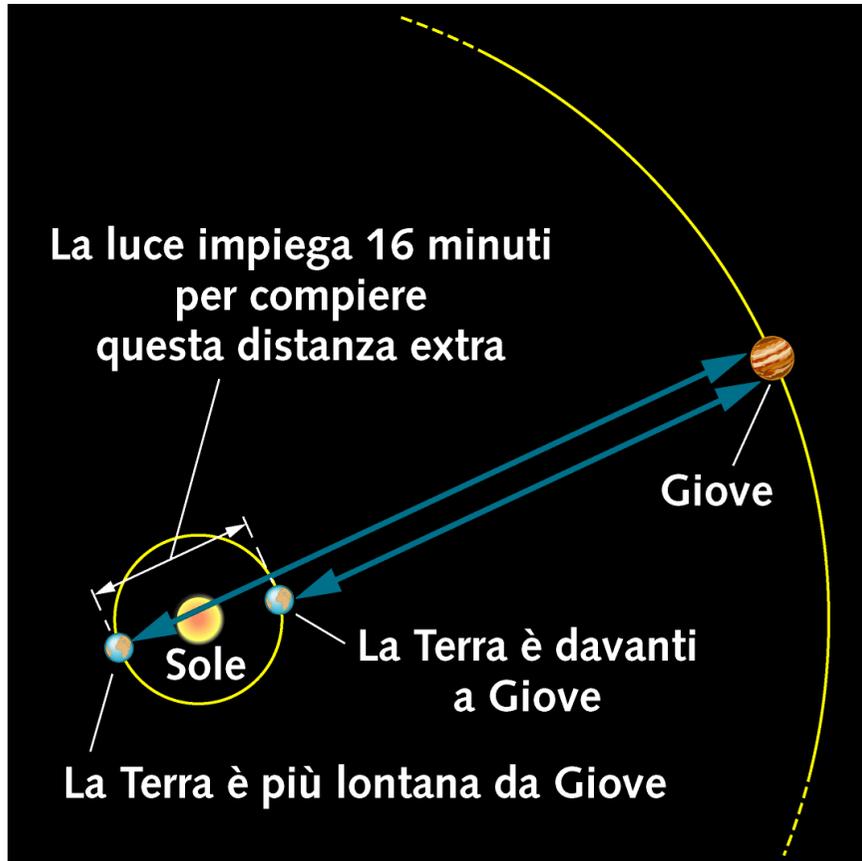
$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|} = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



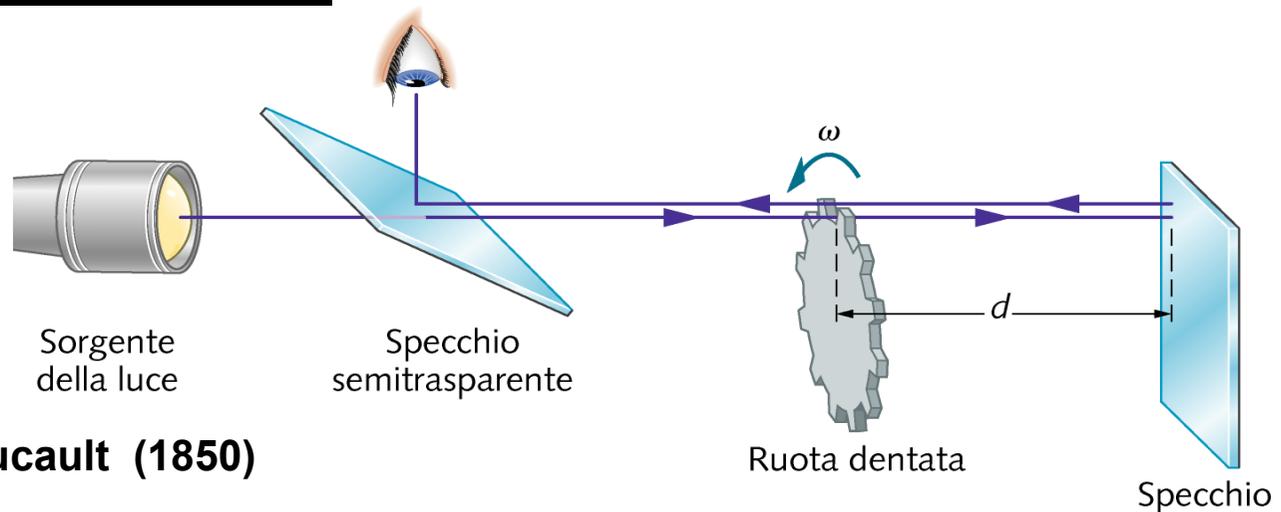
## Semplice dispositivo per generare onde e.m.



## Misura della velocità della luce

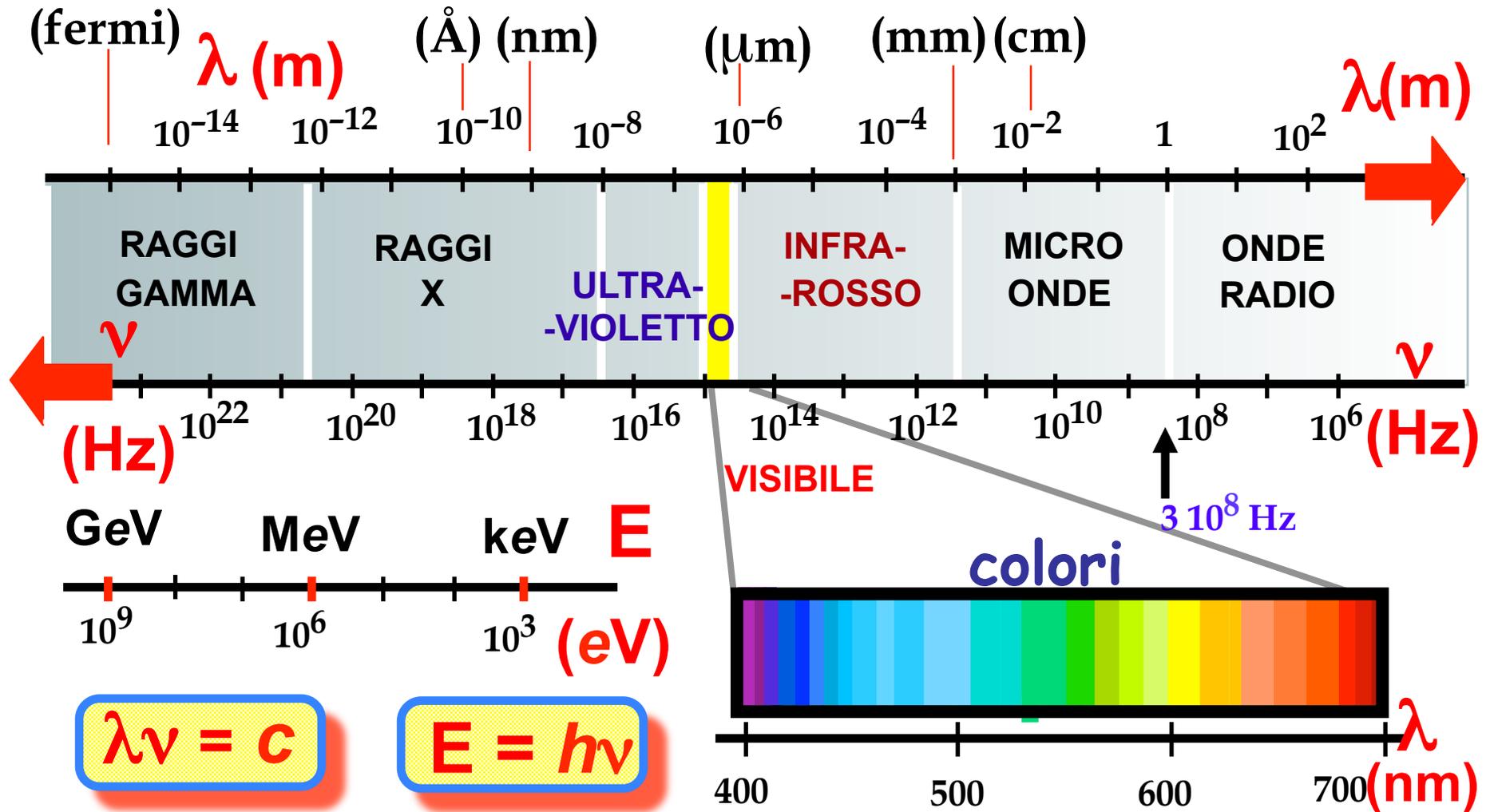


Roemer (1670).  
Osservazione della luna di Giove Io

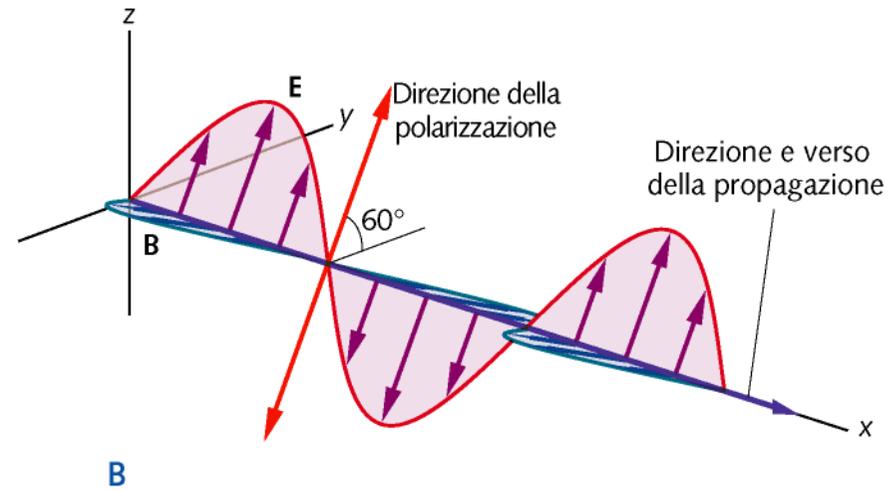
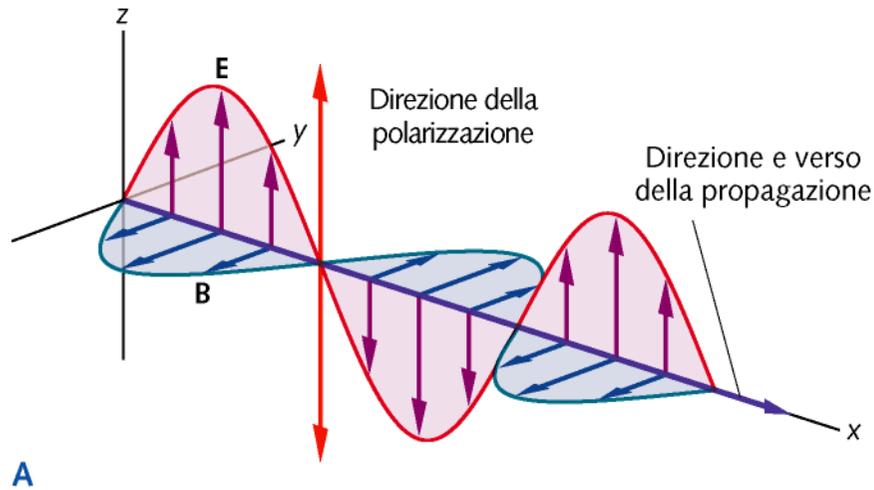


Apparato di Fizeau-Foucault (1850)

# Spettro elettromagnetico

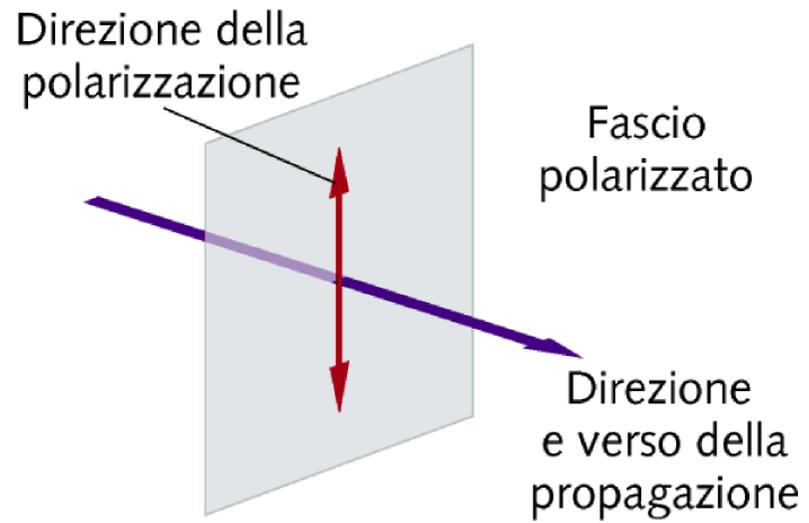


## Polarizzazione di un onda

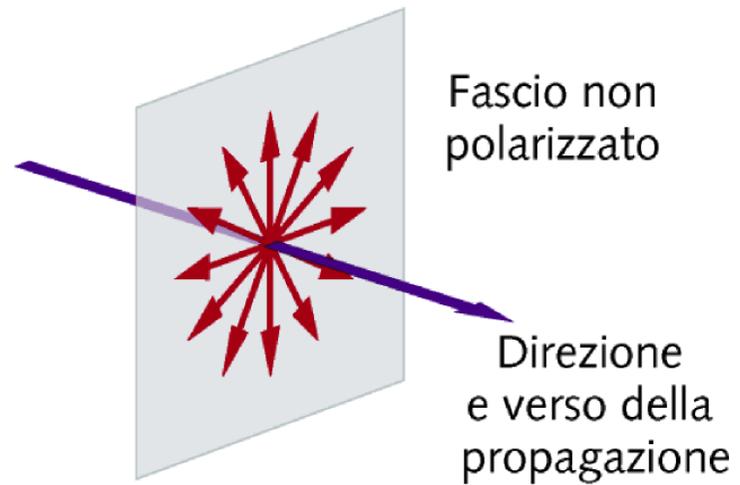


Le onde e.m. si dicono polarizzate se i vettori campo elettrico giacciono tutti sullo stesso piano, detto piano di polarizzazione.

La luce emessa dalla più comuni sorgenti non è polarizzata, ovvero il campo elettrico in un punto è sempre perpendicolare alla direzione di propagazione, ma cambia continuamente direzione di oscillazione, in modo casuale



A



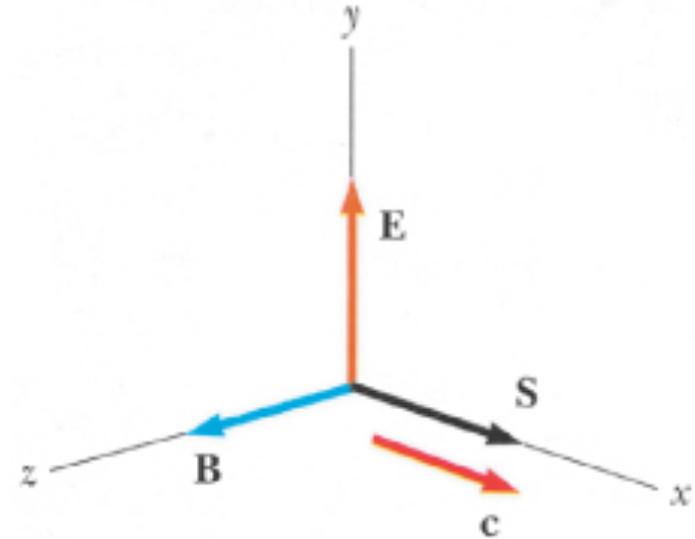
B

## Trasporto di energia in un onda e.m.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad \text{Vettore di Poynting}$$

$$|\vec{S}| = \frac{1}{\mu_0 c} |\vec{E}|^2 = \frac{c}{\mu_0} |\vec{B}|^2$$

$$[S] = \frac{[A]}{[T][m]} \frac{[V]}{[m]} [T] = \frac{[J]}{[s][m]^2} = \frac{[W]}{[m]^2}$$



$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0 c} \bar{E}^2 = \frac{1}{2\mu_0 c} E_M^2 \quad \text{L'intensità dell'onda è la media del vettore di Poynting nel tempo}$$

$$I = \frac{\epsilon_0}{2\mu_0 c \epsilon_0} E_M^2 = c \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 E_M^2 \right) = c u_E = c \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 c^2 B_M^2 \right) = c \left( \frac{B_M^2}{2\mu_0} \right) = c u_B$$

$u_E$  e  $u_B$  sono le densità di energia per unità di volume dei campi elettrico e magnetico

# Pressione di radiazione

$$\Delta P = \frac{\Delta U}{c} \quad (\text{assorbimento totale})$$

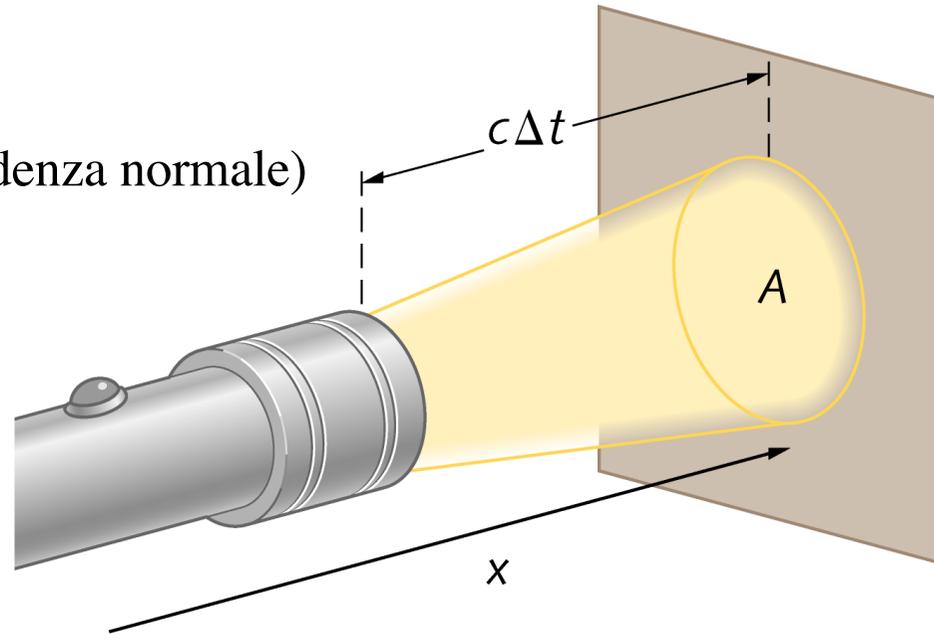
$$\Delta P = \frac{2\Delta U}{c} \quad (\text{riflessione totale per incidenza normale})$$

$$\Delta U = IA\Delta t$$

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{IA}{c}$$

$$p_r = \frac{I}{c} \quad (\text{assorbimento totale})$$

$$p_r = \frac{2I}{c} \quad (\text{riflessione totale per incidenza normale})$$



# Energia dell'onda elettromagnetica

Le onde elettromagnetiche trasportano energia sotto forma di “particelle di luce” dette **fotoni**, emessi o assorbiti in transizioni atomiche o molecolari. L'energia è proporzionale alla frequenza:

$$E = h\nu$$

con  $h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  (costante di Planck).

Nella luce visibile l'emissione o l'assorbimento dei fotoni determina il colore dei corpi:

bianco = emissione di tutte le frequenze visibili

nero = assorbimento di tutte le frequenze visibili

**Luce gialla:  $\lambda = 600 \text{ nm}$**

$$\rightarrow \nu = c/\lambda = (3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) / (6 \cdot 10^{-7} \text{ m}) = 0.5 \cdot 10^{15} \text{ Hz} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\rightarrow E = h\nu = (6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}) = 3.3 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2 \text{ eV}$$

*Es.*