

# Onde elettromagnetiche

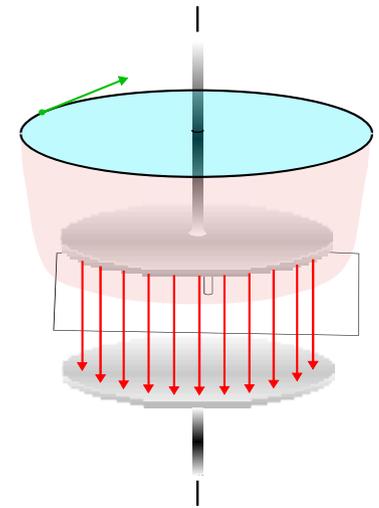
- Alla metà del *XIX* secolo Maxwell prevede teoricamente le onde e.m.
- Sono scoperte sperimentalmente da Hertz
- Danno la possibilità di comunicare a distanza (radio, televisione, telecomandi e cellulari)
- Differiscono per la loro frequenza e prendono nomi diversi: raggi X, ultravioletti, luce visibile, onde radio

# Equazioni di Maxwell

- Sono il compendio dell'elettromagnetismo
- Sono compatibili con la relatività (al contrario delle leggi di Newton)
- Sono in numero di quattro (in realtà due sono vettoriali e due scalari, pari a otto equazioni scalari). Sono
  - Legge di Gauss (contiene la legge di Coulomb)
  - Non esistenza del monopolo magnetico (le linee di campo di  $\mathbf{B}$  sono tutte chiuse)
  - Generazione di un campo elettrico da uno magnetico (legge di Faraday)
  - Correnti elettriche producono campi magnetici (legge di Ampère)

# Corrente di spostamento

- La legge di Ampère è incompleta come dimostra la corrente che passa per un condensatore che si scarica
- La circuitazione del campo magnetico non dipende dalla superficie che si “appoggia” sul circuito
- Per fare tornare i conti occorre aggiungere un altro pezzo alla legge di Ampère



# Corrente di spostamento -2-

- La circuitazione vale

$$\sum_i \vec{B}_i \Delta \vec{x}_i = \mu_0 (I + I_D)$$

- $I_D$  è la corrente di spostamento e vale

$$I_D = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t}$$

- Per cui l'equazione esatta è

$$\sum_i \vec{B}_i \Delta \vec{x}_i = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t}$$

# Onde

- La variazione di campo magnetico può generare un campo elettrico
- La variazione di un campo elettrico può generare un campo magnetico
- Due campi, uno elettrico e uno magnetico, si possono sostenere a vicenda
- Il campo così prodotto si può propagare nello spazio

# Proprietà delle onde e.m.

- L'ampiezza delle onde è inversamente proporzionale alla distanza:  $E(r), B(r) \sim 1/r$
- L'energia è proporzionale al quadrato delle ampiezze, quindi  $U \sim E^2, B^2 \sim 1/r^2$
- A grandi distanze dalla sorgente le onde hanno fronti piani (onde piane)
- Il campo elettrico e quello magnetico sono perpendicolari tra loro e alla direzione di propagazione (onde trasversali)

# Velocità delle onde

- Maxwell ha dimostrato che  $v=E/B$
- E che

$$v = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

- Se metto i valori numerici trovo

$$v = \frac{1}{\sqrt{8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \cdot 12.56 \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} = c$$

- Se ne conclude che la luce è un'onda e.m. e che tutte le onde e.m. Hanno la stessa velocità, pari a quella della luce

# Lunghezze d'onda e spettro e.m.

- Lunghezza d'onda, velocità e frequenza sono legate dalla relazione  $c = \lambda \cdot f$
- Per la luce visibile, per cui  $\lambda \approx 500 \text{ nm}$  ho  $f \approx 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

Tipo di onda	Lunghezza d'onda (m)
Raggi gamma	$10^{-12}$
Raggi X	$10^{-10}$
Ultravioletto	$10^{-8}$
Visibile	$5 \cdot 10^{-7}$
Infrarosso	$10^{-4}$
microonde	$10^{-2}$
Onde radio	$>10^{-1}$ circa

# Effetti biologici e origine delle onde e.m.

- Le radiazioni ad altissima frequenza sono dannose per la vita: più di tutto i raggi gamma, poi gli X, quindi gli ultravioletti
- L'occhio umano percepisce lunghezze d'onda comprese tra 400 e 750 nm
- I raggi gamma provengono da transizioni nucleari, e sono la forma di radioattività più pericolosa tra alfa, beta, gamma
- I raggi X provengono da cariche accelerate
- La luce ultravioletta, visibile e infrarossa deriva da transizioni atomiche

# Velocità della luce

- Le prime misure sono di Røemer, astronomo danese del XVII secolo, che aveva misurato il ritardo delle eclissi delle lune di Giove a sei mesi di distanza
- Alla fine dell'ottocento Michelson fa una misura precisa con lo specchio rotante a otto facce
- Se non siamo nel vuoto, la velocità non è  $c$  ma  $c/n$ , dove  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo in cui la luce si propaga

# Energia del campo e.m.

- Si dimostra che la densità di energia ( $\text{J/m}^3$ ) è

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

- Dato che  $B=E/c$  posso anche scrivere

$$w = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} EB$$

- Attraverso una superficie  $A$  fluisce nel tempo  $\Delta t$  un'energia  $\Delta U = wAc\Delta t$  e quindi l'intensità della radiazione e.m. vale

$$I = \Delta U / (A \Delta t) = w \cdot c = \frac{EB}{2\mu_0}$$

# Energia del campo e.m. -2-

- Dato che  $E$  e  $B$  variano sinusoidalmente ho che

$$E_{qm} = E_{max} / \sqrt{2} \quad B_{qm} = B_{max} / \sqrt{2}$$

- Per cui l'intensità media vale

$$\bar{I} = \frac{E_{qm} B_{qm}}{\mu_0}$$

# Problemi

- Le onde e.m. Si possono propagare nel vuoto? E quelle sonore?
- Che tipo di onda dello spettro e.m. Ha lunghezza d'onda di  $10^3$  Km? 1Km? 1m? 1cm? 1mm?  $1\mu\text{m}$ ?
- Le onde radio possono avere la stessa frequenza di quelle sonore (20-20000Hz)?
- Qual è la lunghezza d'onda utilizzata dal fornetto a microonde? Perché proprio quella? E dal cellulare? Perché dovete fare attenzione alle periferiche bluetooth? Perché ci si preoccupa delle radiazioni dei cellulari?

# Esercizi

- In un certo punto il valore massimo di  $B$  di un'onda e.m. Vale  $17.5 \text{ nT}$ . Quanto vale  $E$  massimo?
- Quanto vale la frequenza di una microonda che ha lunghezza d'onda di  $1.60 \text{ cm}$ ?
- La stella più vicina alla Terra, dopo il sole, dista  $4.2$  anni luce. Quanto è in  $\text{Km}$ ?
- Calcolare l'energia totale che attraversa in un'ora un'area di  $1 \text{ cm}^2$  investita da un'onda per cui  $E_{\text{qm}}$  vale  $38.6 \text{ mV/m}$
- L'ampiezza di  $B$  di un'onda e.m. Vale  $2.5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$ . Calcolare  $E$  e la potenza media trasportata per unità di area