

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 dipolo 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 (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

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

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

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

Energia del campo e.m. -2-

- Dato che E e B variano sinusoidalmente ho che

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

- 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 fornello a microonde? Perché proprio quella? E dal cellulare? Perché ci si preoccupa delle radiazioni dei cellulari?

Esercizi

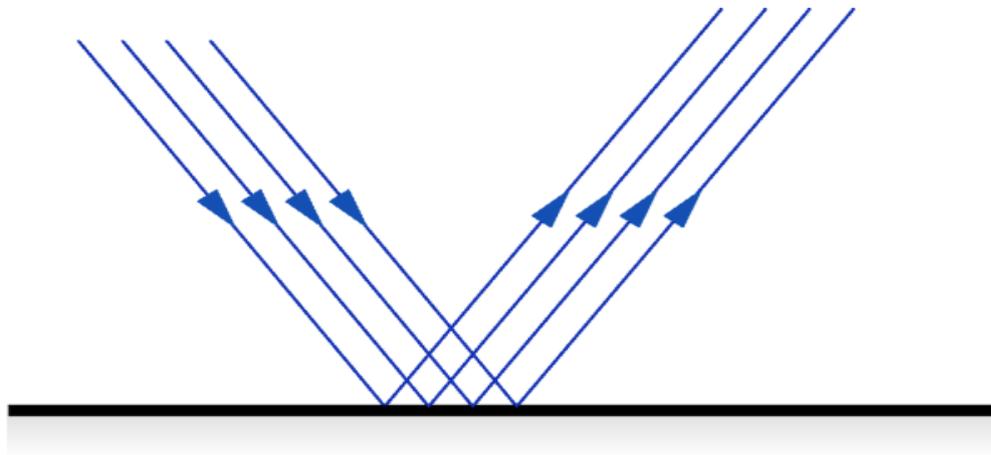
- In un certo punto il valore massimo di B di un'onda e.m. Vale 17.5 nT . Quanto vale E massimo?
- Quanto vale la frequenza di una microonda che ha lunghezza d'onda di 1.60 cm ?
- La stella più vicina alla Terra, dopo il sole, dista 4.2 anni luce. Quanto è in Km ?
- Calcolare l'energia totale che attraversa in un'ora un'area di 1 cm^2 investita da un'onda per cui E_{qm} vale 38.6 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

Ottica geometrica

- Percepiamo la luce perché ci arriva direttamente dalla sorgente oppure riflessa dagli oggetti
- L'emissione della luce è complessa da capire, mentre la propagazione è, di solito, più semplice
- In molte circostanze si può studiare la luce come se si propagasse in linea retta con dei raggi
- Quest'idea è contraria alla natura ondulatoria della luce, e non spiega quindi tutti i fenomeni

Riflessione

- Se la luce incontra una superficie piana viene in parte riflessa
- La riflessione è caratterizzata da un raggio incidente e uno riflesso e dalla normale alla superficie
- L'angolo che i raggi incidente e riflesso fanno con la normale è lo stesso, e i due raggi e la normale stanno nello stesso piano



Indice di rifrazione

- Nei mezzi materiali la luce si propaga più lentamente che non nel vuoto
- Si definisce l'indice di rifrazione come

$$n = c / v$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto

- Nel vuoto la velocità è la stessa per tutte le lunghezze d'onda, negli altri mezzi no

Rifrazione della luce

- Passando da un mezzo trasparente a un altro la luce cambia direzione
- Gli angoli che fa con la normale si chiamano angoli di incidenza e di rifrazione
- Se l'indice di rifrazione è più grande nel secondo mezzo, la luce si avvicina alla normale
- Miraggi, navi volanti e bastoni spezzati

Legge di Snell

- Se n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione dei due mezzi

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

- Per via della rifrazione, la profondità apparente in acqua è minore
- Se $n_1 > n_2$ e θ_2 è maggiore di 90 gradi, non si può avere rifrazione e la luce è interamente riflessa (fibre ottiche). L'angolo per cui questo si verifica è l'angolo critico per cui

$$\sin(\theta_C) = n_2 / n_1$$

Dispersione

- L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce
- Può essere visualizzata con lo spettrometro (ad esempio, un prisma)
- Questo fatto può essere utilizzato per fare le analisi chimiche, dato che ogni sostanza emette radiazione di lunghezze d'onda caratteristiche
- Ci da' informazione anche sulla composizione di stelle e galassie lontane

Problemi

- Riflessione, rifrazione e dispersione danno origine all'arcobaleno. Come?
- Perché un prisma ci dice qualcosa sulla velocità delle galassie?
- Spiegate com'è un bel panorama visto da un pesce

Esercizi

- Quanto deve essere alto, come minimo, uno specchio, perché una persona alta 1,80 m ci si possa specchiare interamente?
- La luce si propaga nel ghiaccio con velocità $v=2.29 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Qual è l'indice di rifrazione del ghiaccio?
- Qual è l'angolo critico per l'interfaccia acqua-plexiglas? Gli indici di rifrazione sono rispettivamente 1.33 e 1.51. Da quale parte deve incidere la luce per avere riflessione totale?