

## Lezione 44: le onde elettromagnetiche

## 44.1. Oscillazioni che si propagano

Le equazioni di Maxwell prevedono l'esistenza di campi elettrici e magnetici le cui oscillazioni si propagano nello spazio: cioè onde elettromagnetiche. La prossima figura (► fig.44.1) ci aiuta a capire perché.

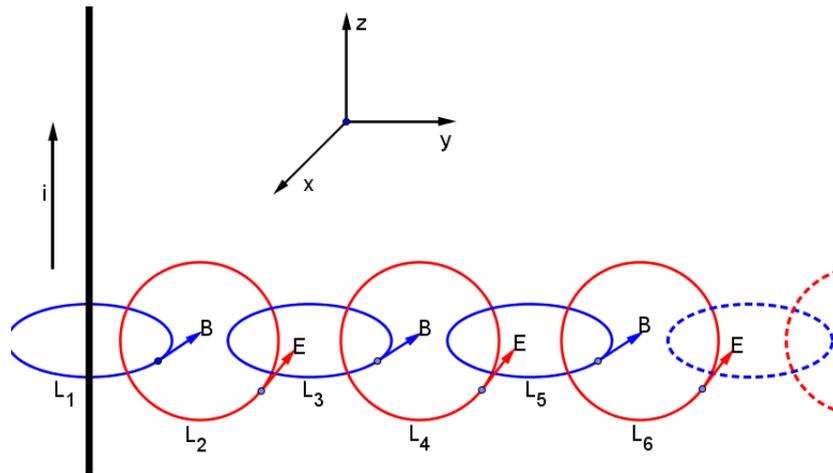


fig. 44.1 un'antenna emette un'onda elettromagnetica

Il filo che si vede a sinistra è la schematizzazione di un'antenna emettitrice orientata lungo l'asse  $z$ . L'esempio più semplice di antenna è un conduttore rettilineo (ma la forma può cambiare) in cui le cariche elettriche oscillano, guidate da un generatore di tensione alternata. L'oscillazione delle cariche fa sì che l'antenna sia sede di una corrente elettrica  $i$ , variabile nel tempo. Nello spazio intorno all'antenna abbiamo rappresentato alcuni cammini chiusi circolari, concatenati tra di loro:  $L_1, L_3, L_5, \dots$  stanno nel piano  $xy$ ,  $L_2, L_4, L_6, \dots$  stanno nel piano  $yz$ .

Cominciamo con l'esaminare il cammino  $L_1$ : la corrente  $i$  gli è concatenata, quindi lungo  $L_1$  circola un campo magnetico, variabile nel tempo perché varia nel tempo la sua sorgente  $i$ .

Ma allora l'area racchiusa dal cammino  $L_2$  è investita da un flusso variabile di campo magnetico: quello che circola lungo  $L_1$ , che è concatenato con  $L_2$ . Quindi lungo il cammino  $L_2$  circola un campo elettrico, indotto dalla variazione del flusso di campo magnetico.

Ma allora l'area racchiusa dal cammino  $L_3$  è investita da un flusso variabile di campo elettrico, quindi si induce un campo magnetico che circola lungo  $L_3$  ...

Si potrebbe continuare. Non lo faremo, perché il meccanismo ormai l'avete capito. Ma lo spazio che circonda l'antenna lo fa eccome: l'oscillazione dei campi, a poco a poco, si propaga a distanze sempre maggiori dalla sorgente. Abbiamo detto "a poco a poco",

perché ci vuol tempo a descrivere il meccanismo. Ma nella realtà dei fatti, qual è la velocità con cui si propaga l'oscillazione dei campi?

#### 44.2. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche

Le equazioni di Maxwell permettono di calcolare la velocità  $v$  con cui un'onda di tipo elettromagnetico si propaga nel vuoto: si trova che  $v = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . La dimostrazione di questo fatto richiede la padronanza di tutti i simboli che compaiono nelle equazioni di Maxwell, quindi non la vedremo. Faremo invece una verifica sul valore del termine  $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Sappiamo che le due costanti, quella elettrica e quella magnetica, hanno un valore esatto, quindi ha un valore esatto anche il termine che vogliamo calcolare. Cominciamo dalle unità di misura:  $\epsilon_0$  si misura in  $C^2/N/m^2$ ,  $\mu_0$  in  $N/A^2$ . Il loro prodotto si misura quindi in  $s^2/m^2$ , perciò è il reciproco del quadrato di una velocità misurata in m/s. Ora vediamo il valore numerico: in unità SI  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  e  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , quindi  $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 3 \cdot 10^8$  m/s. Abbiamo approssimato il risultato ad una sola cifra significativa, ma se utilizziamo i valori esatti troviamo che  $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 299792458$  m/s: le onde elettromagnetiche, nel vuoto, si propagano con la stessa velocità con cui, nel vuoto, si propaga la luce! La conclusione cui giunse Maxwell fu quindi che la luce è un'onda elettromagnetica.

#### 44.3. Come è fatta un'onda elettromagnetica

La prossima figura (► fig.44.2) mostra un'onda elettromagnetica che si propaga nella direzione dell'asse  $y$ .

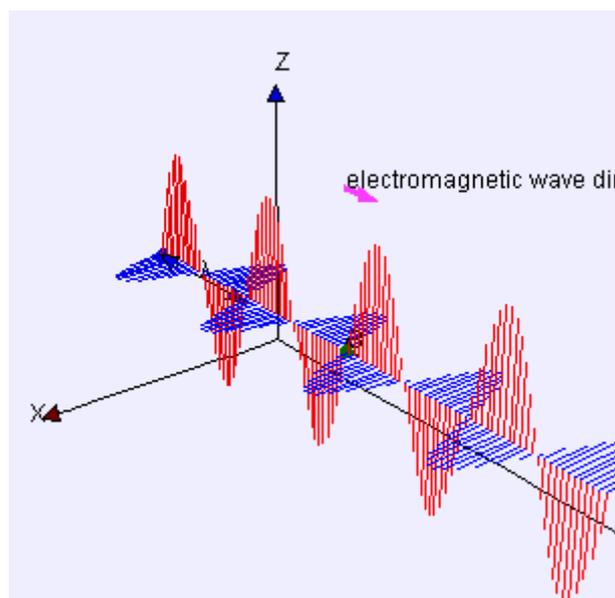


fig. 44.2 un'onda elettromagnetica si propaga nella direzione dell'asse  $y$

Osserviamo, per prima cosa, che si tratta di un'onda trasversale: il campo elettrico e quello magnetico oscillano lungo direzioni perpendicolari a quella di propagazione, oltre che perpendicolari tra di loro. Già nella lezione 32 avevamo detto, quasi di sfuggita, che la luce è un'onda trasversale: l'avevamo capito dal fatto che la luce, a differenza del suono, si può polarizzare. Ora possiamo comprenderne il motivo: le equazioni di Maxwell impongono che l'oscillazione dei campi sia trasversale. Come al solito non tenteremo di dimostrarlo; accontentiamoci di osservare che la figura 44.1 suggerisce in qualche modo questo fatto: osservate come sono diretti, nei punti dell'asse  $y$ , il campo elettrico  $\mathbf{E}$  e quello magnetico  $\mathbf{B}$ .

In ogni punto dello spazio è costante il rapporto tra l'intensità del campo elettrico e quella del campo magnetico: per l'esattezza si trova che il rapporto  $E/B$  è uguale alla velocità della luce  $c$ . Come sempre questa conclusione si raggiunge risolvendo le equazioni di Maxwell; questa volta ci accontentiamo di un'osservazione di tipo dimensionale. Il campo elettrico si misura in  $N/C$ , quello magnetico in  $N/(Am)$ : il rapporto  $E/B$  si misura quindi in:  $\frac{N}{C} \cdot \frac{A \cdot m}{N} = \frac{m}{s}$ . Si tratta insomma di una velocità, e di quale velocità potrebbe mai trattarsi, se non di quella della luce?

Come tutte le onde, anche quelle elettromagnetiche sono caratterizzate da una certa lunghezza d'onda  $\lambda$ : si tratta, come sappiamo, della minima distanza che separa due punti in cui l'oscillazione è in fase. Sono inoltre contraddistinte da una certa frequenza  $f$ , cioè il numero di oscillazioni complete che avvengono nel tempo di 1 secondo. L'onda che vediamo rappresentata in figura è contraddistinta da una sola lunghezza d'onda (e quindi da una sola frequenza) e si dice perciò monocromatica. Possiamo naturalmente costruire onde sovrapponendo diverse lunghezze d'onda (e quindi diverse frequenze): un esempio che ben conosciamo è costituito dalla luce bianca che ci arriva dal sole, fatta dalla sovrapposizione di diverse componenti monocromatiche.

Frequenza e lunghezza d'onda non sono indipendenti, ma sono legate dalla velocità di propagazione:  $c = f \cdot \lambda$ .

#### 44.4. In quale mezzo avviene la propagazione?

La domanda ha una risposta ovvia: non c'è bisogno di alcun mezzo, perché la propagazione avviene nello spazio vuoto. Ma nella seconda metà dell'ottocento, quando la teoria di Maxwell nacque e si affermò, l'idea di un'oscillazione che si propaga nello spazio vuoto sembrava priva di senso. Si preferiva perciò pensare che lo spazio fosse in realtà permeato di una sostanza cui si dava il nome di etere. L'etere avrebbe dovuto possedere proprietà davvero straordinarie: trasparente e imponderabile, tanto da risultare in pratica inosservabile, abbastanza rarefatto da lasciarsi attraversare

senza conseguenze dai corpi in moto, e tuttavia rigido abbastanza da poter sostenere un'oscillazione trasversale come la luce. Pensate infatti a una sostanza rarefatta come un gas ideale: non essendoci interazione tra una molecola e l'altra non è possibile che un'oscillazione si propaghi trasversalmente. Longitudinalmente sì, a causa degli urti che avvengono tra una molecola e l'altra: infatti il suono che viaggia nell'aria è un'onda longitudinale.

Ma le straordinarie proprietà dell'etere non costituivano il problema principale: ce n'era un altro, assai più grave. Se la luce si propaga con velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  rispetto all'etere, un osservatore a sua volta in moto rispetto all'etere dovrebbe misurare una velocità di propagazione diversa da  $c$ .

A questo punto ci troviamo davanti ad una situazione imbarazzante. Da un lato sappiamo che la velocità non è una grandezza invariante nel passaggio da un sistema di riferimento inerziale ad un altro. Se il secondo sistema ha velocità  $u$  rispetto al primo, un corpo che si muove con velocità  $v$  rispetto al primo avrà velocità  $v' = v - u$  rispetto al secondo. Se la stessa proprietà vale anche per la luce, allora la luce avrà velocità  $c$  rispetto all'etere, e velocità  $c' = c - u$  in un riferimento che si muove con velocità  $u$  rispetto all'etere.

Dall'altro lato sappiamo che i fenomeni meccanici sono gli stessi in tutti i sistemi di riferimento inerziali: tutti i moti sono relativi, e non esiste un sistema di riferimento privilegiato. Ma se la velocità della luce è  $c$  solo nel riferimento dell'etere, allora quello è l'unico sistema di riferimento in cui valgono le equazioni di Maxwell. Possiamo stabilire se il nostro sistema di riferimento si muove rispetto all'etere semplicemente misurando la velocità con cui si propaga un raggio di luce!

Ci troviamo davanti a un bivio di straordinaria importanza:

*o la velocità della luce dipende dal sistema di riferimento,  
quindi il principio di relatività vale solo per i fenomeni meccanici  
e non per quelli elettromagnetici*

*oppure la velocità della luce è la stessa in tutti i riferimenti inerziali,  
quindi il principio di relatività vale per tutte le leggi della fisica,  
quindi è sbagliata la legge classica di addizione delle velocità*

#### 44.5. Lo spettro elettromagnetico

Si chiama spettro elettromagnetico l'insieme di tutte le possibili frequenze che un'onda elettromagnetica può avere: si tratta di un'insieme continuo, ma convenzionalmente lo si divide in intervalli chiamati bande di frequenza.

Tutte le onde elettromagnetiche hanno la stessa velocità di propagazione  $c$ , quindi lo spettro si può descrivere anche in termini di lunghezza d'onda: frequenza e lunghezza

d'onda sono inversamente proporzionali, perché il loro prodotto è proprio la velocità di propagazione, quindi

$$\lambda \cdot f = \lambda/T = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La prossima immagine (►fig.44.3) mostra come convenzionalmente si suddivide lo spettro elettromagnetico

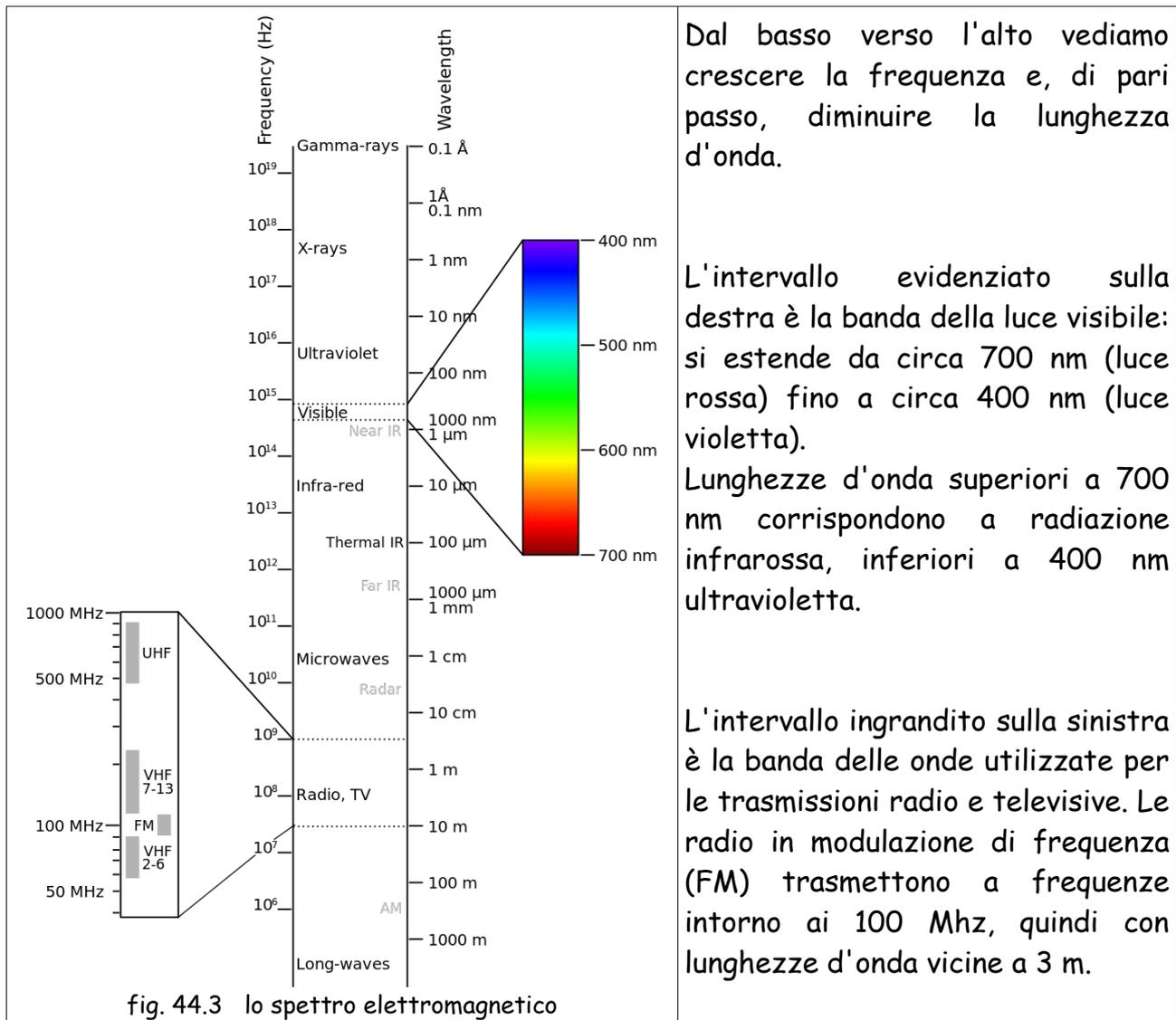


fig. 44.3 lo spettro elettromagnetico

Dal basso verso l'alto vediamo crescere la frequenza e, di pari passo, diminuire la lunghezza d'onda.

L'intervallo evidenziato sulla destra è la banda della luce visibile: si estende da circa 700 nm (luce rossa) fino a circa 400 nm (luce violetta).

Lunghezze d'onda superiori a 700 nm corrispondono a radiazione infrarossa, inferiori a 400 nm ultravioletta.

L'intervallo ingrandito sulla sinistra è la banda delle onde utilizzate per le trasmissioni radio e televisive. Le radio in modulazione di frequenza (FM) trasmettono a frequenze intorno ai 100 Mhz, quindi con lunghezze d'onda vicine a 3 m.