

# Complementi di Fisica - XX Lezione

## Onde elettromagnetiche

---

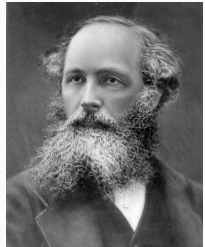
Andrea Bettucci

16 maggio 2024

Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria  
Sapienza Università di Roma

## IL CAMPO ELETTROMAGNETICO

- Il culmine nella comprensione dei fenomeni elettrici e magnetici venne raggiunto nel XIX secolo da **James Clerk Maxwell** che riuscì a fornire un quadro unitario di tali fenomeni.
- Le quattro **equazioni di Maxwell** permettono di descrivere tutti i fenomeni elettrici e magnetici in termini di **campo elettrico** e **campo magnetico** o, più in generale di **campo elettromagnetico**.
- **Le equazioni di Maxwell forniscono una visione unitaria dei fenomeni elettrici e magnetici e costituiscono le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo.**



J. C. Maxwell, 1831-1879

## LEGAMI FONDAMENTALI TRA CAMPO ELETTRICO E CAMPO MAGNETICO

1. Una corrente elettrica genera un campo magnetico.
2. Un campo magnetico esercita una forza su una carica elettrica che si muova al suo interno e, di conseguenza su un conduttore percorso da corrente in esso immerso.
3. La variazione di un campo magnetico induce in un conduttore in esso immerso una forza elettromotrice. Più in generale, **se in un punto dello spazio vi è un campo magnetico che varia nel tempo, in quel punto nasce un campo elettrico.**

Se una variazione del campo magnetico  
genera un campo elettrico,  
una variazione del campo elettrico  
può generare un campo magnetico?

- Maxwell, sulla base di sole considerazioni teoriche e senza evidenze sperimentali, fu portato a ipotizzare che:

**CAMPI MAGNETICI POTESSERO ESSERE GENERATI  
DA CAMPI ELETTRICI VARIABILI NEL TEMPO.**

- Se i campi elettrici e magnetici non sono dipendenti dal tempo possono essere trattati gli uni indipendentemente dagli altri.
- Se i campi elettrici e magnetici variano nel tempo, non possono più essere trattati separatamente: **un campo magnetico variabile genera un campo elettrico, e un campo elettrico variabile genera un campo magnetico.**
- La conseguenza fondamentale di ciò è la produzione di

**ONDE ELETTROMAGNETICHE.**

## IL CAMPO ELETTROMAGNETICO SI PROPAGA PER ONDE

- Attorno al 1870 Maxwell fu in grado di prevedere l'esistenza di un fenomeno allora sconosciuto: **le onde elettromagnetiche**.
- In termini intuitivi, il ragionamento di Maxwell fu il seguente. Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico variabile il quale, a sua volta genera, un campo elettrico variabile e così via. L'oscillazione di un campo elettrico, cioè la variazione della sua intensità in un punto al variare del tempo, genera l'oscillazione di un campo magnetico in punti vicini e così via: l'oscillazione si propaga nello spazio sotto forma di onda elettromagnetica.
- Diversamente dalle onde meccaniche che si propagano solo in un mezzo elastico, **le onde elettromagnetiche si propagano anche nello spazio vuoto, privo di materia**. Nelle onde elettromagnetiche infatti non oscillano le particelle di un mezzo materiale, ma sono le intensità dei campi elettrico e magnetico variano nello spazio e nel tempo.

- Oltre a prevederne l'esistenza, Maxwell dimostrò che le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto con una velocità:

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

dove  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  sono rispettivamente le costante dielettrica del vuoto e la permeabilità magnetica del vuoto.

- Sostituendo nell'espressione di  $v$  i valori di  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  si ottiene che  
**LA VELOCITÀ DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE NEL VUOTO È NUMERICAMENTE UGUALE ALLA VELOCITÀ DELLA LUCE  $c$ :**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}\right) \left(\frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}}{\text{A}}\right)}} \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s.}$$

Quindi:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

- L'uguaglianza della velocità di propagazione nel vuoto della luce e delle onde elettromagnetiche suggerisce una conclusione di importanza fondamentale:

### LA LUCE È COSTITUITA DA ONDE ELETTROMAGNETICHE.

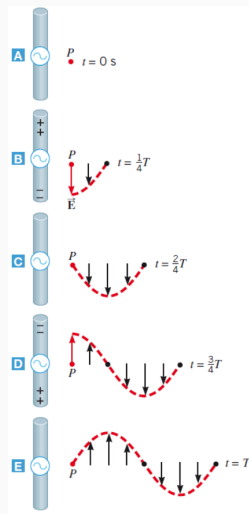
- L'esistenza delle onde elettromagnetiche fu dimostrata sperimentalmente dal fisico tedesco Heinrich Hertz (1857-1894) nel 1888.
- La possibilità di trasmettere e ricevere onde elettromagnetiche aprì nuove prospettive nel campo della comunicazione:
  - telegrafo senza fili;
  - radio e televisione;
  - telefonia cellulare (WiFi e Bluetooth);
  - comunicazioni via satellite.



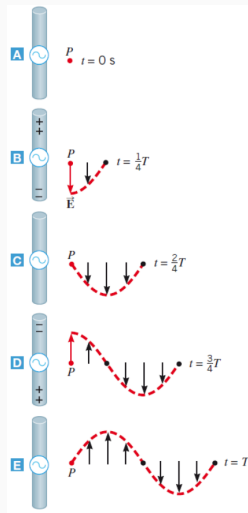
# La generazione delle onde elettromagnetiche

---

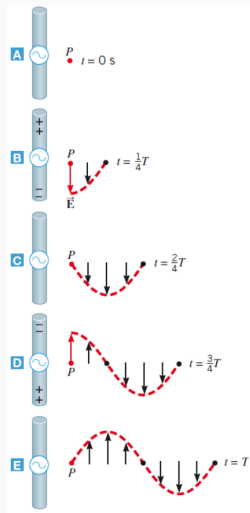
- Il dispositivo per l'emissione delle onde elettromagnetiche consiste di due fili metallici rettilinei che sono connessi ai terminali di un alternatore e funzionano come **antenna**. La differenza di potenziale fra i terminali varia nel tempo in maniera sinusoidale con un periodo  $T$ .
- In  $A$  è visualizzata la situazione all'istante  $t = 0$  quando agli estremi del filo non c'è carica e nel punto  $P$  vicino all'antenna non c'è alcun campo elettrico. Al passare del tempo, l'estremità superiore del filo si carica positivamente e quella inferiore negativamente.
- Un quarto di ciclo più tardi ( $t = T/4$ ) le cariche raggiungono il loro valore massimo, come mostra la figura  $B$ .



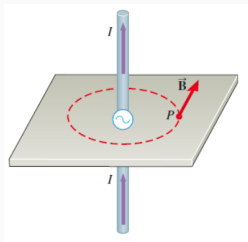
- In figura *B*, sempre all'istante  $t = T/4$ , la freccia rossa indica il campo elettrico  $\mathbf{E}$  nel punto *P*:  $\mathbf{E}$  è diretto verso il basso e cresciuto fino al suo massimo valore.
- In *B*, con la freccia nera, è rappresentato il campo elettrico creato in istanti di tempo precedenti nel punto *P*: esso non è scomparso, ma si è mosso verso destra.
- **IL CAMPO ELETTRICO NON VIENE RILEVATO ISTANTANEAMENTE NEI PUNTI LONTANI.**
- Il campo elettrico è creato prima vicino ai fili e poi, come l'onda che si genera quando un sasso viene gettato in uno stagno, si propaga verso l'esterno in tutte le direzioni (per semplicità, la figura mostra solo il campo elettrico che si muove verso destra).



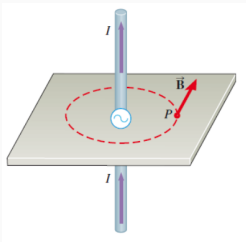
- Le figure  $C$ ,  $D$  ed  $E$ , mostrano per istanti di tempo separati da  $T/4$  il campo elettrico nel punto  $P$  (freccia rossa).
- Nelle stesse figure i campi elettrici generati precedentemente nel punto  $P$  (freccie nere) continuano a propagarsi verso destra.
- Nella figura  $E$  della sequenza è stato disegnato un periodo completo congiungendo le punte dei vettori campo elettrico per dimostrare che il campo cambia in modo sinusoidale.
- **In un punto il campo elettrico varia sinusoidalmente con il tempo.**
- **In un dato istante, il campo elettrico varia sinusoidalmente nella direzione di propagazione.**



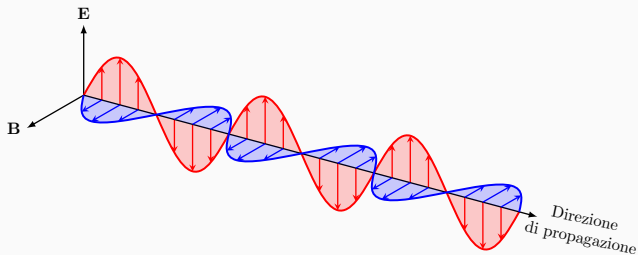
## Ma le correnti generano un campo magnetico!



- Quando la corrente è diretta nel filo verso l'alto, il campo magnetico  $\mathbf{B}$  nel punto  $P$  è diretto nel verso entrante nella pagina (Legge di Biot-Savart).
- Mentre la corrente oscilla, il campo magnetico oscilla con essa: **il campo magnetico creato si propaga verso l'esterno sotto forma di onda, come fa il campo elettrico.**

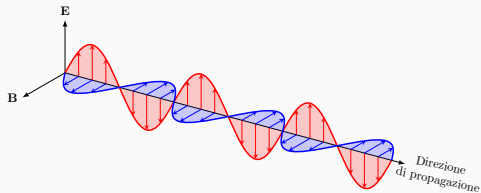


- Il campo magnetico in ogni punto  $P$  giace in un piano perpendicolare al filo, mentre il campo elettrico è perpendicolare a tale piano, cioè è parallelo al filo.
- **In ogni punto i campi elettrico e magnetico creati dall'antenna sono perpendicolari fra loro.**
- Inoltre entrambi i campi sono perpendicolari alla direzione di propagazione.
- Questi campi elettrici e magnetici fra loro perpendicolari che si propagano insieme nello spazio alla velocità  $c = 3 \times 10^8$  m/s costituiscono **un'onda elettromagnetica.**



Onde elettromagnetiche molto lontane dall'antenna.  $\mathbf{B}$  ed  $\mathbf{E}$  sono perpendicolari fra loro e sono anche perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

- Un'onda elettromagnetica è un'onda trasversale perché i campi elettrico e magnetico sono entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

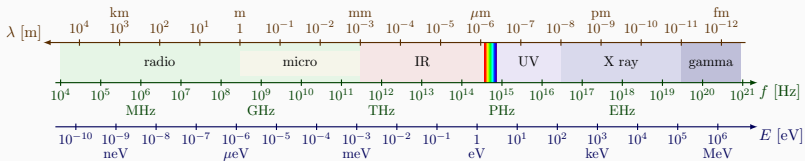


- Come ogni onda periodica, un'onda elettromagnetica ha una **frequenza**  $\nu$ , corrispondente al numero di oscillazioni al secondo compiute dal campo elettrico (o dal campo magnetico) e una **lunghezza d'onda**  $\lambda$ , corrispondente alla distanza tra due massimi o due minimi del campo elettrico (e del campo magnetico), ovvero la distanza percorsa da una vibrazione durante un periodo.
- Lunghezza d'onda, frequenza e velocità di propagazione  $c$  dell'onda sono legate dalla relazione

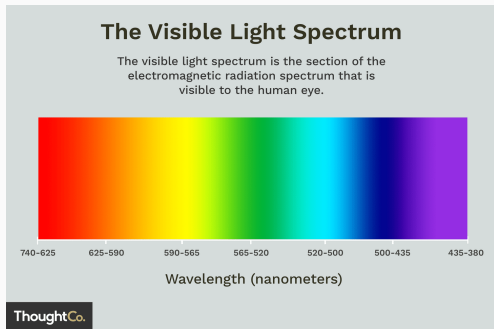
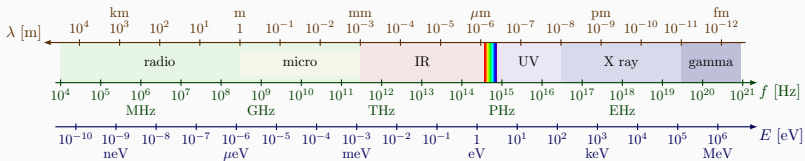
$$\lambda\nu = c \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$



# SPETTRO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

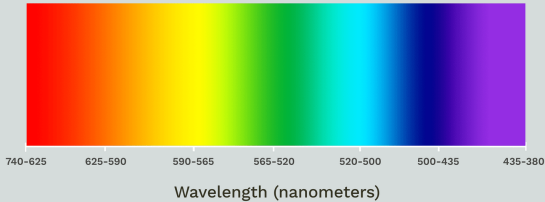


# SPETTRO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE



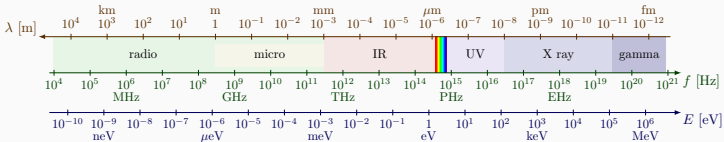
# The Visible Light Spectrum

The visible light spectrum is the section of the electromagnetic radiation spectrum that is visible to the human eye.



ThoughtCo.

Il sistema occhio-cervello associa luce di diverse lunghezze d'onda a colori diversi. La lunghezza d'onda di 750 nm nel vuoto è approssimativamente la più grande lunghezza d'onda della luce rossa percepibile, mentre 380 nm nel vuoto è approssimativamente la più piccola lunghezza d'onda della luce viola percepibile. Fra questi due limiti si trovano tutti gli altri colori.



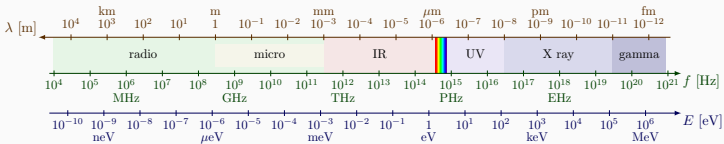
**radioonde** Le onde radio (lunghezze d'onda comprese fra qualche decina di chilometri e 30 cm) sono utilizzate per le trasmissioni radiofoniche e televisive.

**microonde** Le microonde (lunghezze d'onda comprese fra 30 cm e 1 mm) conoscono vari usi; per esempio, nelle comunicazioni satellitari e nella telefonia mobile. Nella telefonia mobile, in particolare, vengono utilizzate le frequenze di 800, 1500, 2100, 2600 MHz (ad esempio, a 2100 MHz la lunghezza d'onda è circa 14 cm).

## LE MICROONDE SERVONO ANCHE PER CUCINARE!



Nel forno a microonde vengono generate onde elettromagnetiche con una frequenza di  $2,45 \text{ GHz}$ , cioè con lunghezza d'onda di circa  $12 \text{ cm}$ . Le molecole d'acqua presenti nei cibi sono messe in rotazione dal campo elettrico dell'onda e quindi acquistano energia che trasferiscono ai cibi aumentandone la temperatura.



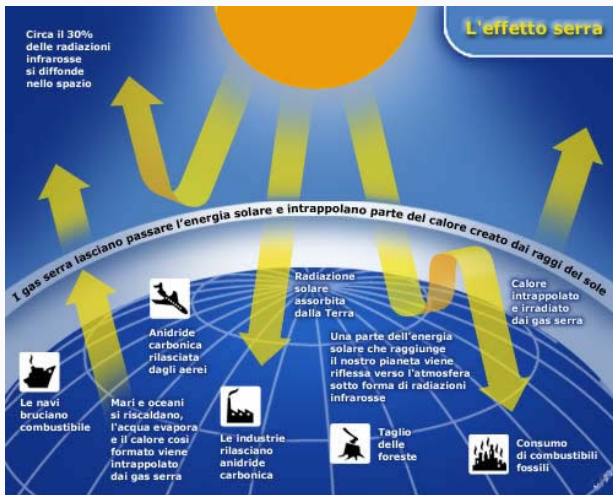
**infrarosso** Le radiazioni infrarosse (lunghezze d onda comprese fra 1 mm e 750 nm) sono generate dalla vibrazione e dalla rotazione delle molecole all'interno di un materiale. Quando le radiazioni infrarosse sono assorbite dalla nostra pelle sentiamo una sensazione di calore.

## IL TERMOMETRO A INFRAROSSI



- Un termometro a infrarossi rileva la temperatura del corpo misurando la quantità di radiazione infrarossa emessa dal timpano e dai tessuti circostanti.
- L'orecchio è uno degli organi più adatti alla misurazione della temperatura corporea perché è vicino all'ipotalamo, l'area del cervello che regola la temperatura del corpo.
- L'orecchio inoltre non viene raffreddato o riscaldato durante le normali funzioni corporee come mangiare, bere o respirare.
- Quando la sonda del termometro viene inserita nel canale uditivo, la radiazione infrarossa incide sul sensore, che si scalda e cambia la sua resistenza. Questa variazione è misurata da un circuito elettronico, che calcola la temperatura corporea e mostra il risultato su un display digitale.

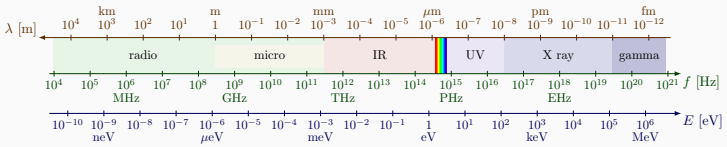
L'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche nelle regioni infrarossa e visibile dello spettro ha un ruolo chiave nell'effetto serra, che è una delle cause del riscaldamento globale.



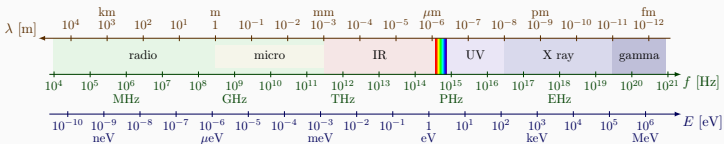


## RISCALDAMENTO DELL'ATMOSFERA TERRESTRE

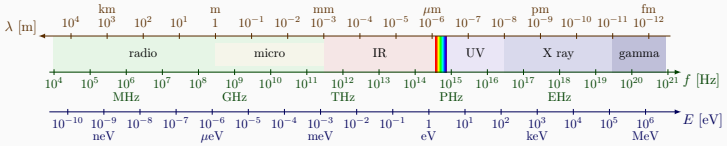
- Gran parte delle radiazioni infrarosse che provengono dal Sole non raggiungono la superficie terrestre perché il diossido di carbonio e l'acqua presenti nell'atmosfera le riflettono nello spazio. Al contrario, le radiazioni visibili raggiungono la superficie terrestre e la riscaldano.
- Inoltre un flusso di calore giunge alla superficie dall'interno della Terra. La superficie terrestre a sua volta irradia radiazioni infrarosse che, se non incontrano ostacoli, trasportano energia nello spazio.
- Tuttavia il diossido di carbonio, l'acqua e i **gas serra** presenti nell'atmosfera riflettono le radiazioni infrarosse indietro verso la Terra, proprio come riflettono le radiazioni provenienti dal Sole. In tal modo la loro energia è intrappolata, proprio come avviene in una serra, e la Terra si riscalda.



**ultravioletto** Le radiazioni ultraviolette (UV - lunghezze d'onda comprese fra 380 nm e 10 nm) penetrano negli strati superficiali della nostra pelle e attivano molte reazioni chimiche fondamentali per la nostra salute, come per esempio la produzione di vitamina D e di melanina. L'esposizione eccessiva alla radiazione ultravioletta è però dannosa perché può provocare malattie degenerative della pelle, come tumori o patologie del cristallino. Il Sole emette intensamente nell'ultravioletto nelle bande UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) e UV-C (280-10 nm). L'atmosfera terrestre assorbe quasi tutta la banda UV-B: quindi per esporsi al sole è bene usare una crema con un filtro UV-A.



**raggi X** I raggi X (lunghezze d'onda comprese fra 10 nm e 0,001 nm, ossia  $10^{-12}$  m) sono emessi durante le violente decelerazioni di elettroni ad alta velocità all'interno di metalli pesanti. Sono diffusamente impiegati in medicina perché attraversano i tessuti molli ma sono assorbiti dalle ossa. Poiché hanno lunghezze d'onda comparabili con le distanze interatomiche, i raggi X sono usati in cristallografia per studiare i reticoli cristallini.



**raggi gamma** I raggi gamma (lunghezze d'onda minori di 0,001 nm, cioè  $10^{-12}$  m) sono radiazioni emesse nei decadimenti nucleari. Si tratta di radiazioni molto penetranti che trovano largo impiego per esempio nella sterilizzazione di strumenti chirurgici, perché uccidono i batteri su cui incidono. I raggi gamma sono usati anche nella radioterapia dei tumori perché danneggiano il DNA delle cellule neoplastiche.