

# Lezione 21 - Onde elettromagnetiche

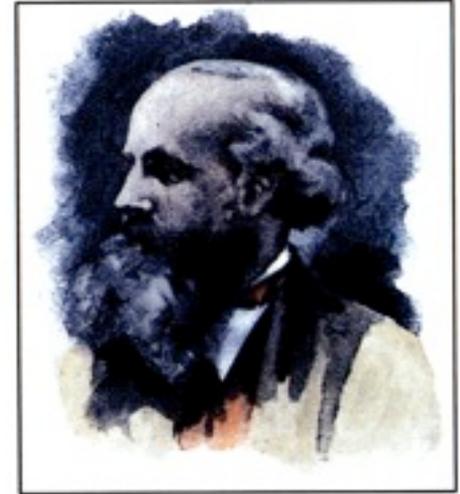
- Nella prima metà dell'800 **Maxwell** dimostrò definitivamente che un raggio di luce non è altro che una configurazione di campi elettrici e magnetici in moto
- Si deve quindi parlare di

## **ONDE ELETTROMAGNETICHE**

- L'ottica deve essere vista come una branca dell'elettromagnetismo

# Prime scoperte

- Ai tempi di **Maxwell** si conoscevano solo
  - IR
  - Luce visibile
  - UV
- **Hertz** a fine '800 scoprì le **onde radio** e verificò che viaggiavano con la velocità della luce
  - Da Hertz prende il nome l'unità di misura della frequenza



James Clerk Maxwell  
(1831-1879)



Heinrich Rudolf Hertz  
(1857-1894)

# Spettro delle onde elettromagnetiche

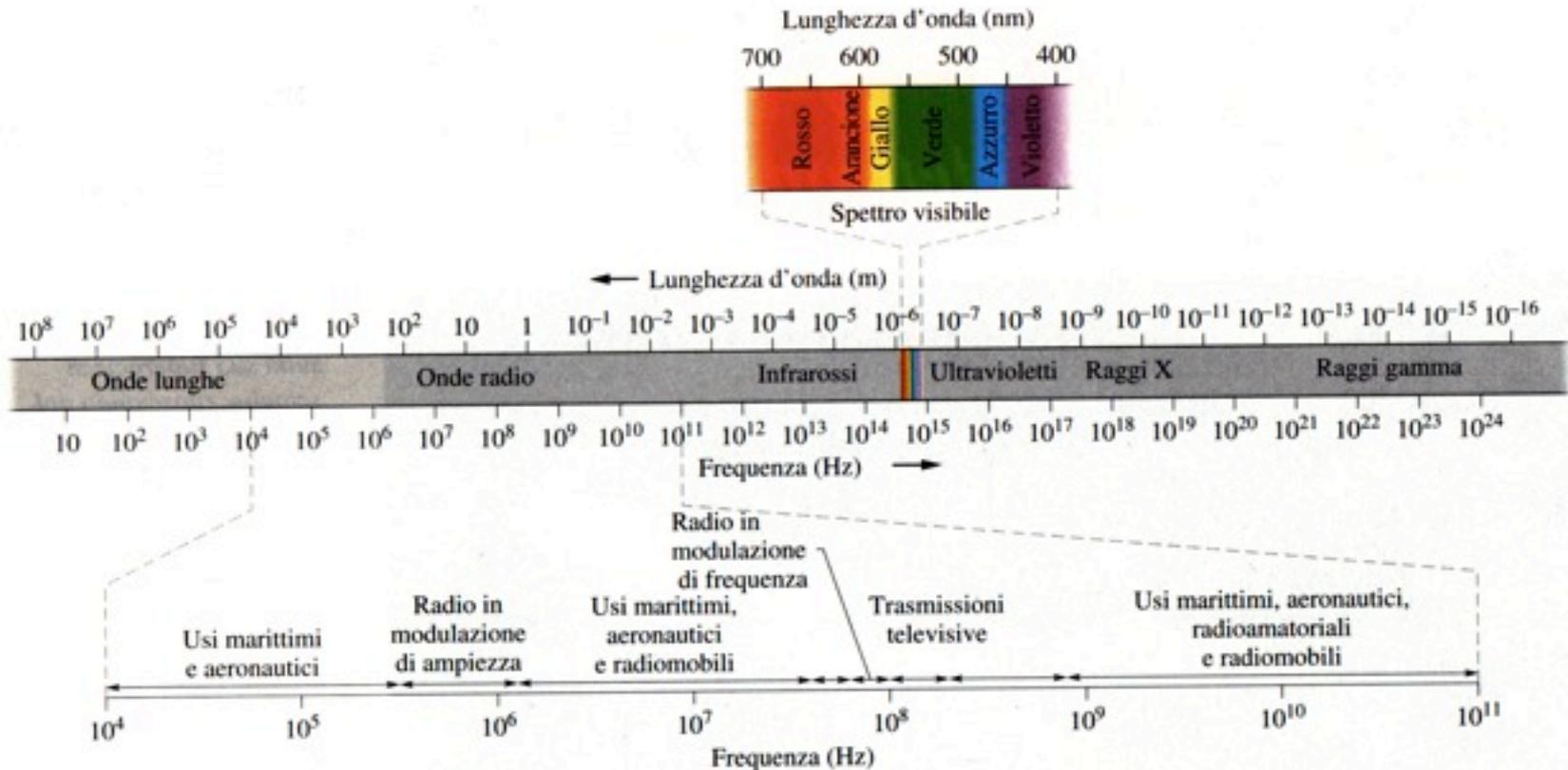


illustrazione tratta da: Halliday-Resnick-Walker, "Fondamenti di Fisica", IV Ed., Ambrosiana, Milano

# Luce visibile e occhio umano

- L'occhio umano non è sensibile allo stesso modo a tutte le lunghezze d'onda (colori):

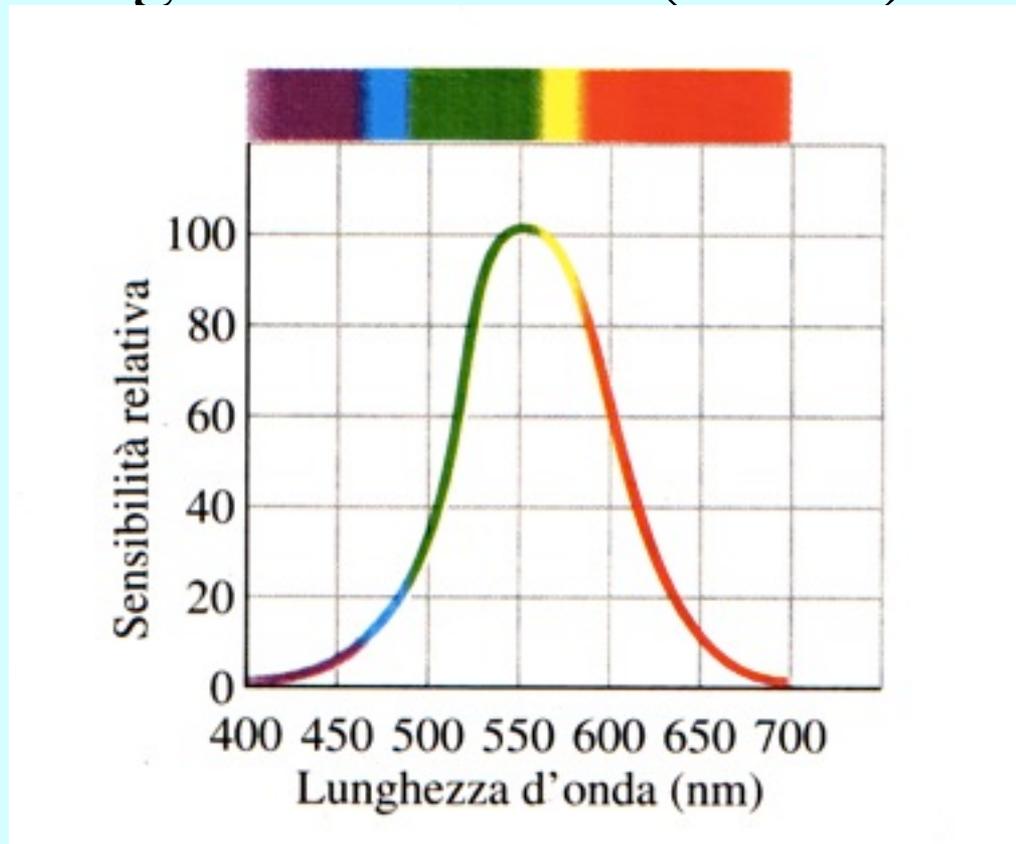


illustrazione tratta da: Halliday-Resnick-Walker, "Fondamenti di Fisica", IV Ed., Ambrosiana, Milano

# Campi “elettromagnetici”

- L’esistenza dell’onda dipende dal fatto che campi elettrici variabili inducono campi magnetici e viceversa:
  - il campo **E** oscilla e genera un campo magnetico **B** oscillante
  - il campo **B**, che è appunto variabile, induce a sua volta un campo **E** pure variabile
  - il processo continua con i due campi che si inducono a vicenda propagandosi nello spazio

# Campi oscillanti

- Possiamo visualizzare un'onda e.m. così

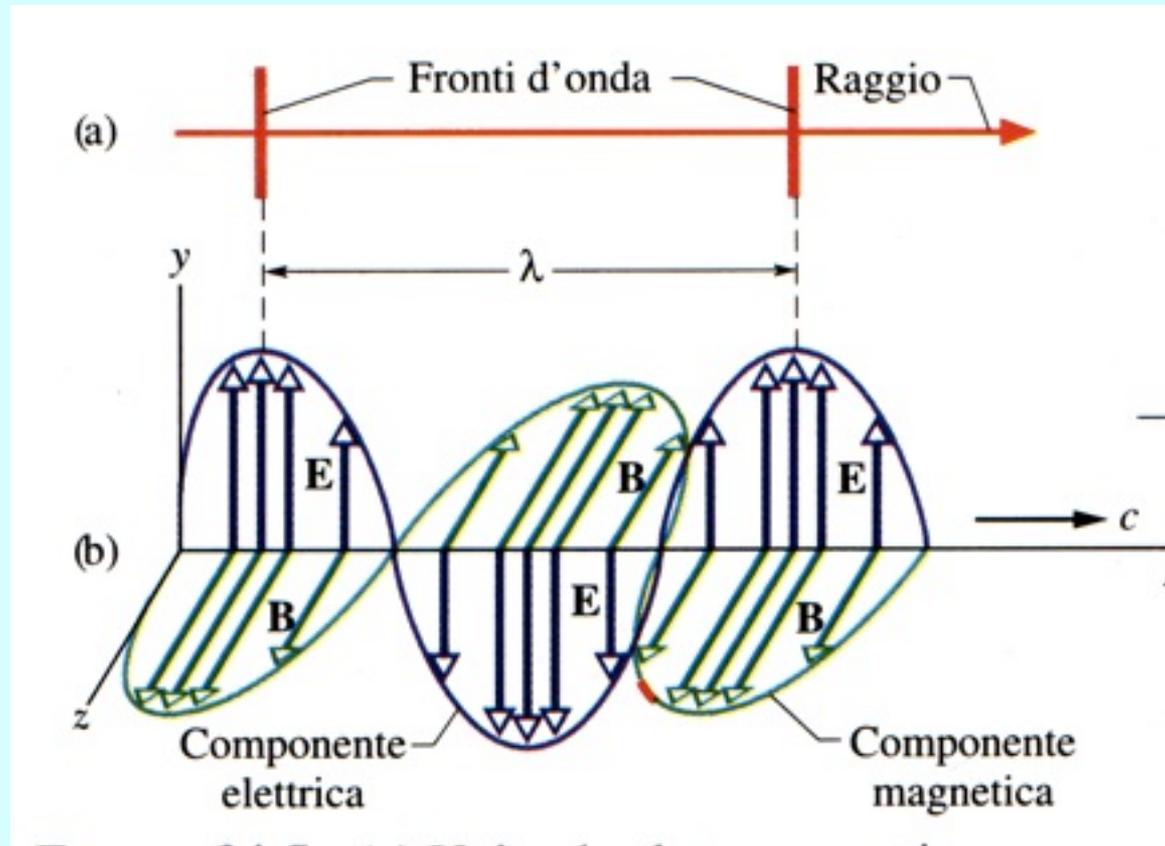


illustrazione tratta da: Halliday-Resnick-Walker, "Fondamenti di Fisica", IV Ed., Ambrosiana, Milano

# Alcune caratteristiche delle onde e.m.

- Le onde e.m. sono **trasversali**:
  - le direzioni di oscillazione di B ed E sono sempre ortogonali tra loro ed ortogonali alla direzione di propagazione
- Viaggiano tutte a  $c = 3 \times 10^8$  m/s
- Le onde e.m. presentano la sorprendente proprietà di non avere bisogno di alcun mezzo per propagarsi: possono viaggiare anche nello spazio vuoto

# Generatore di onde E.M.

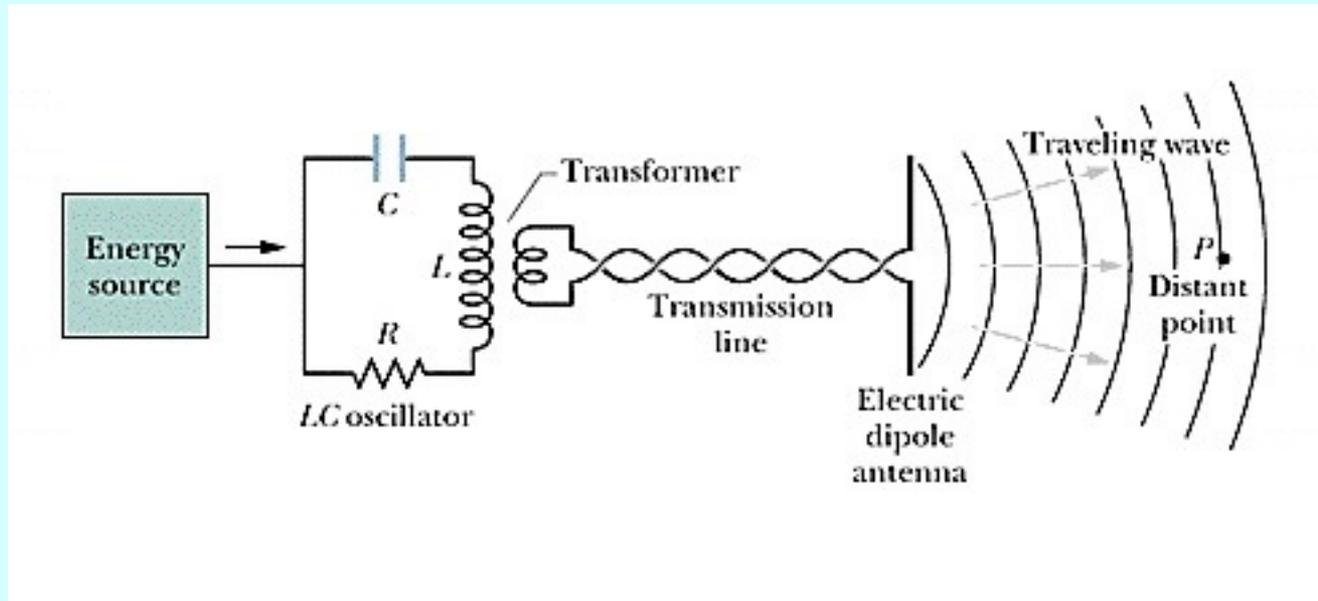


illustrazione tratta da: Halliday-Resnick-Walker, "Fondamenti di Fisica", IV Ed., Ambrosiana, Milano

# Onda piana

- A grandi distanze da un emettitore di onde e.m. i fronti d'onda sono piani distanti fra loro una lunghezza d'onda
- Se ci si pone un punto  $P$  l'andamento dei campi è di tipo sinusoidale:

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t) ; B = B_0 \sin(kx - \omega t)$$

dove  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  è il *numero d'onda* e  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$  è la *pulsazione*

Per la velocità dell'onda abbiamo  $c = \frac{\omega}{k} = \lambda\nu = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$

- La velocità di propagazione è la stessa per tutte le onde e.m. nel vuoto (anche non piane) ed è legata alle costanti elettromagnetiche del vuoto

# Trasporto di energia: vettore di Poynting

- Le onde e.m. trasportano energia: la quantità di energia trasportata per unità di tempo e per unità di superficie è descritta del **vettore di Poynting**

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

l'unità di misura di  $\mathbf{S}$  è  $\text{W/m}^2$

- Siccome il rapporto tra i moduli dei campi  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$  di un'onda e.m. vale  $E/B = c$ , si ha anche che l'intensità di  $\mathbf{S}$  è

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB = \frac{1}{\mu_0 c} E^2$$

$S$  corrisponde ad un flusso istantaneo di energia

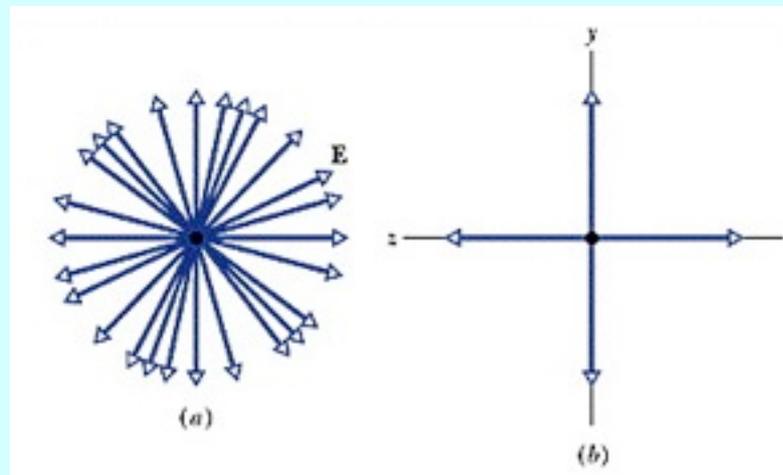
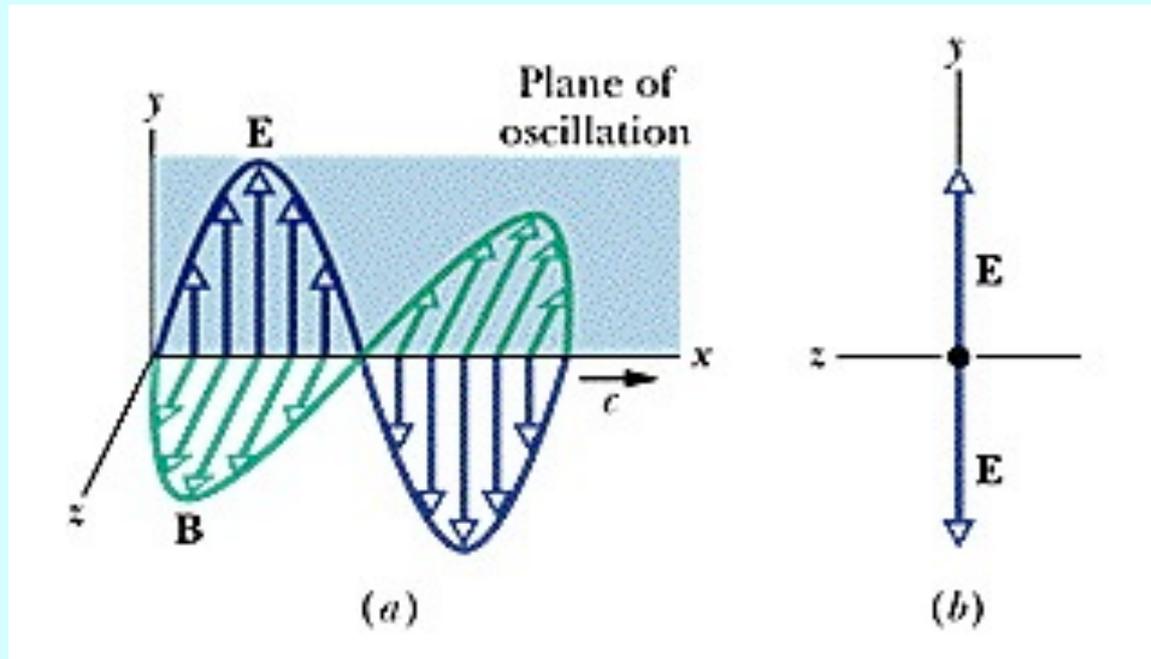
- Se vogliamo definire l'*intensità* dell'onda elettromagnetica, dobbiamo calcolare la media temporale di  $\mathbf{S}$  per un gran numero di periodi. Il risultato è:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0 c} \frac{E^2}{2}$$

# Polarizzazione della luce

- La direzione lungo la quale vibra il campo elettrico di un'onda e.m. si dice *direzione di polarizzazione*
- Un fascio luminoso emesso dagli atomi di un certo oggetto contiene più onde e.m., ciascuna delle quali vibra normalmente in una direzione diversa: si ha *luce non polarizzata*
- Quando la direzione di vibrazione dell'onda luminosa è invece unica si parla di *luce polarizzata linearmente*

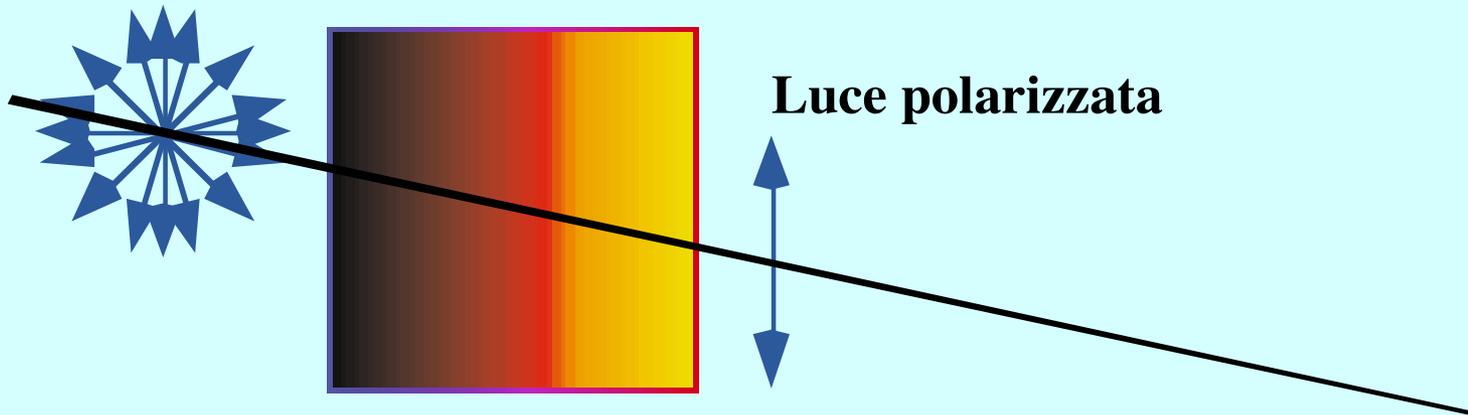
# Luce polarizzata



# Come si polarizza la luce?

- Per polarizzare la luce si possono usare materiali, come il *Polaroid*, che assorbono selettivamente tutte le direzioni possibili del campo elettrico tranne una, detta **asse di trasmissione**

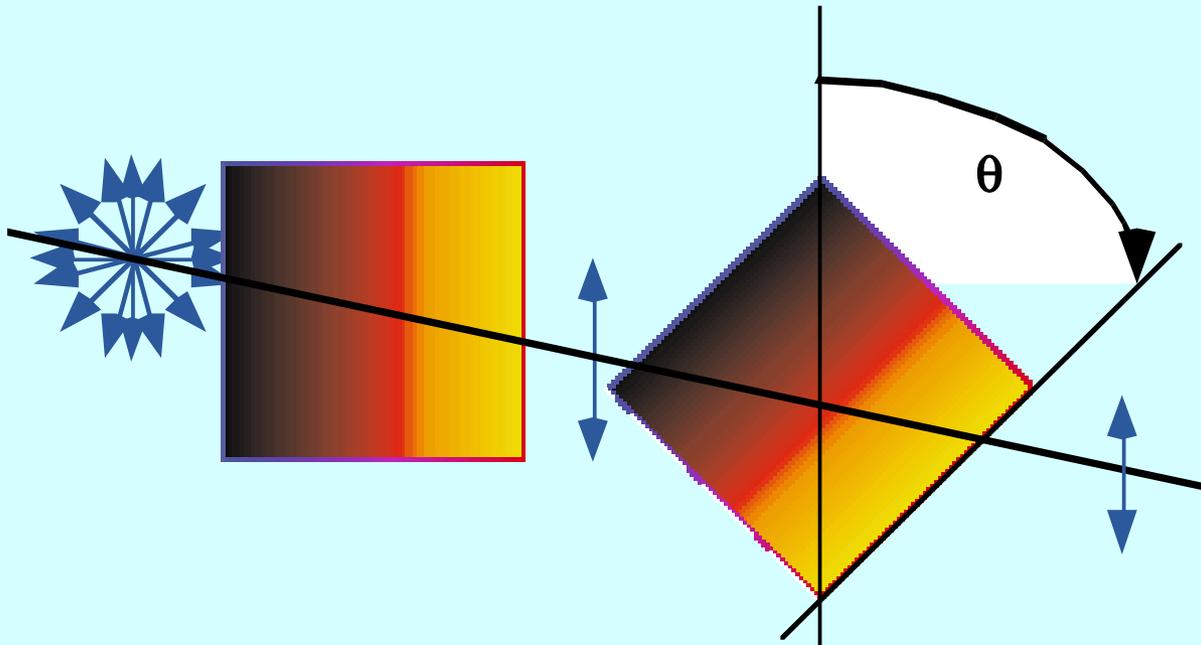
Luce non polarizzata



# Due polaroid ...

- Se si mettono due polaroid uno dopo l'altro l'intensità della luce trasmessa varia in funzione dell'angolo tra i due assi di trasmissione (**legge di Malus**):

$$I_t = I_0 \cos^2 \theta$$



# Trasmissione tra due polaroid

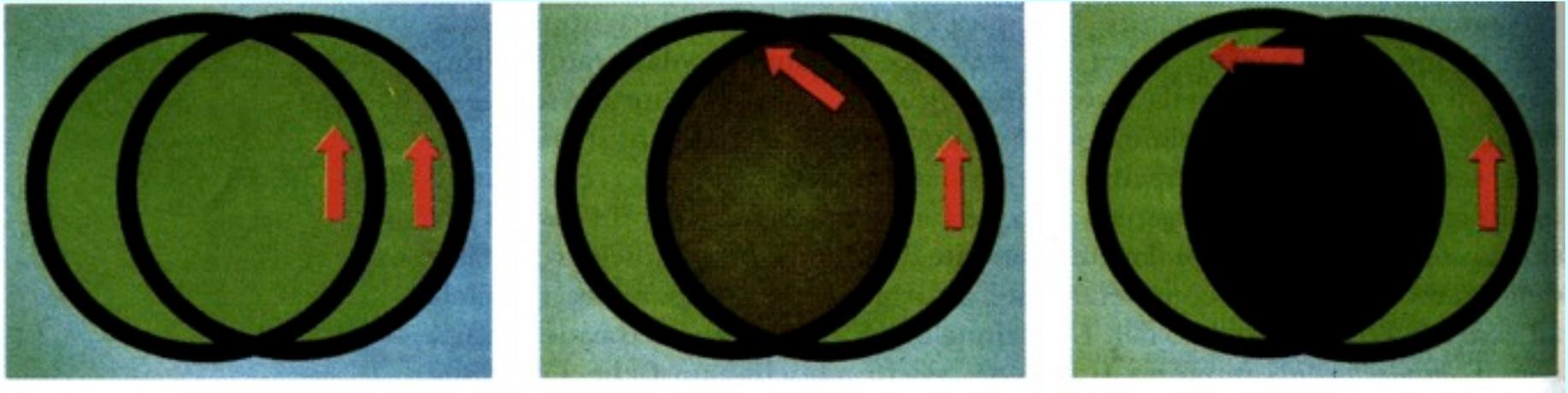


illustrazione tratta da: Halliday-Resnick-Walker, "Fondamenti di Fisica", IV Ed., Ambrosiana, Milano

# Attività ottica

- Si dice che una certa sostanza è **otticamente attiva** quando produce una rotazione del piano di polarizzazione della luce che la attraversa
- L'angolo di rotazione dipende tra l'altro da
  - natura del materiale
  - spessore del campione
  - condizione di stress
- Questo conduce ad applicazioni pratiche della luce polarizzata

# Analisi ottica delle tensioni

- Se la plastica è sottoposta a sforzi meccanici le regioni in cui le tensioni sono maggiori producono angoli di rotazione maggiori
- Un pezzo di plastica sotto sforzo può quindi essere analizzato in luce polarizzata
- Questa tecnica può essere usata nella fase di progetto di strutture e dispositivi costruendo modelli in plastica, sottoponendoli ad opportuni sforzi ed analizzandoli in luce polarizzata



# Visualizzazione delle tensioni

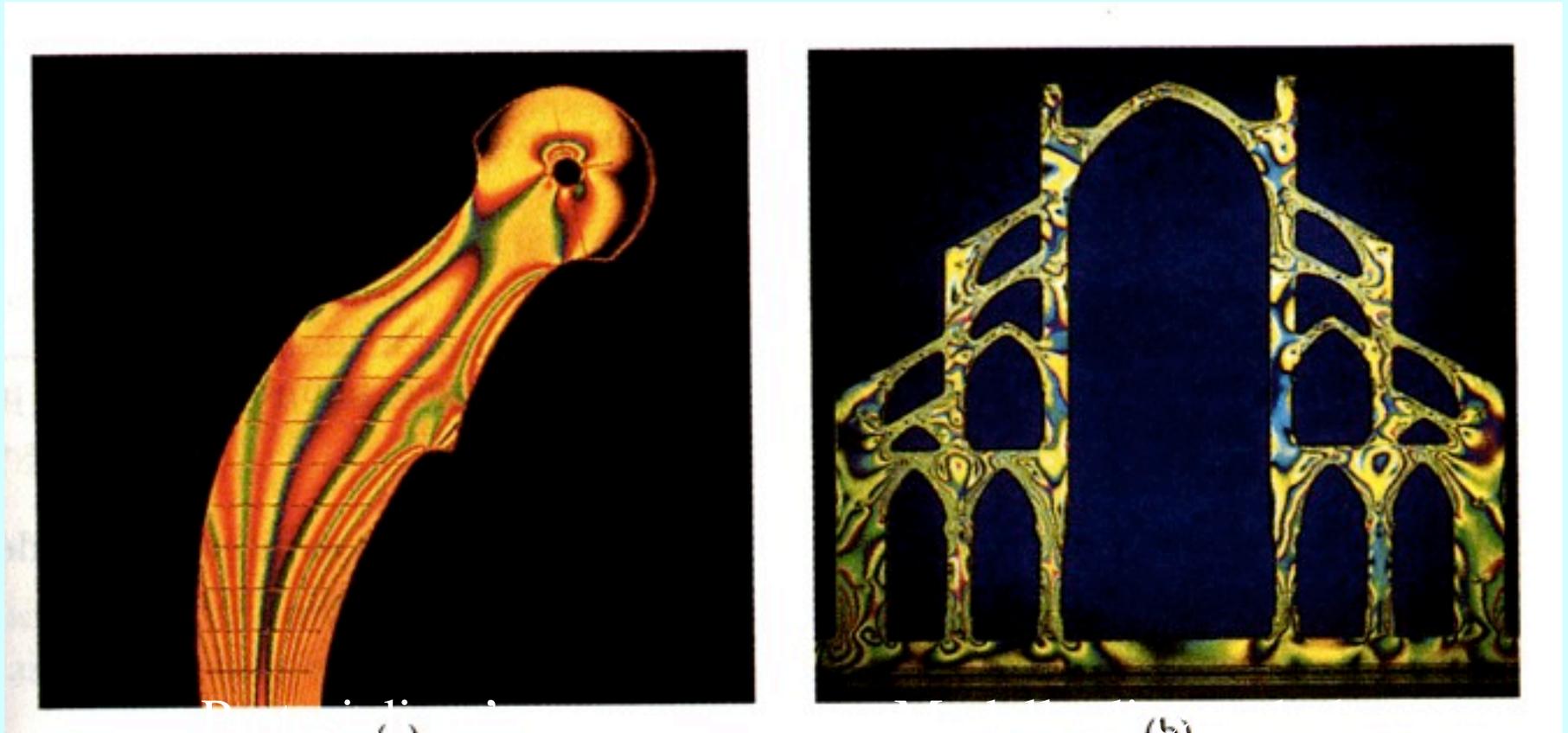


illustrazione tratta da: Halliday-Resnick-Walker, "Fondamenti di Fisica", IV Ed., Ambrosiana, Milano