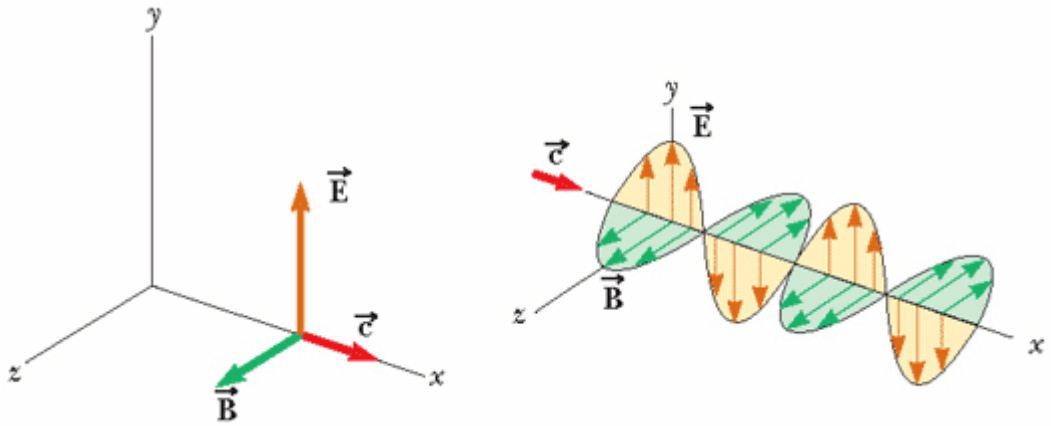
Le onde elettromagnetiche

Origine e natura, spettro delle onde e.m., la polarizzazione

Origine e natura delle onde elettromagnetiche:

Una carica elettrica che oscilla genera un campo elettrico *E* che oscilla e a questo è associato un campo magnetico *B* anch'esso oscillante.
I due campi si propagano mantenendo direzioni di oscillazione perpendicolari l'uno all'altro e perpendicolari alla direzione di propagazione



La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è $\boldsymbol{c = 3 \cdot 10^8\ m/s}$.

La luce è un'onda elettromagnetica
(così come le onde radio, le microonde, i raggi X,….)

Origine e natura delle onde elettromagnetiche:

Le onde e.m. hanno una **doppia natura: ondulatoria e corpuscolare**

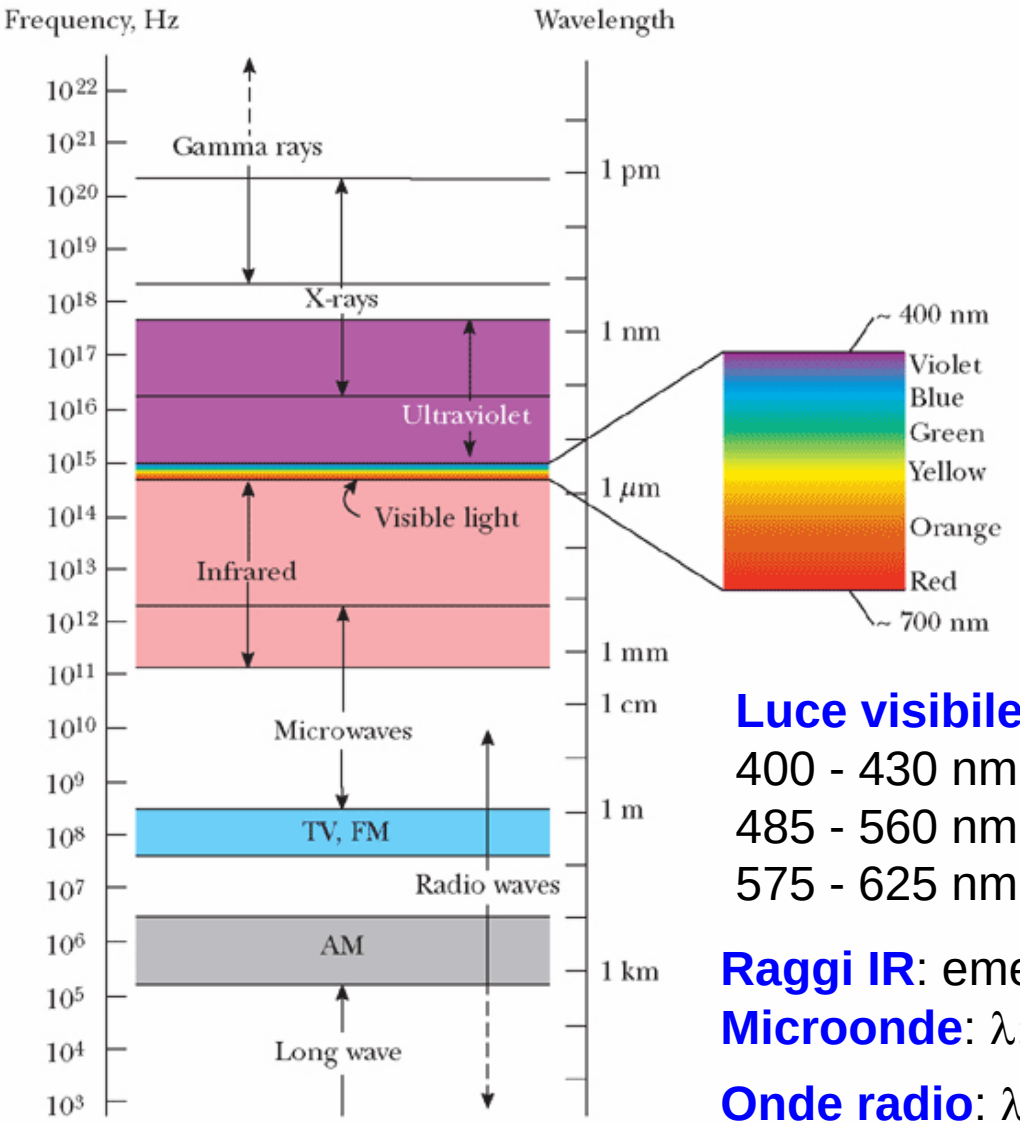
In alcuni casi il comportamento è di tipo ondulatorio, ad esempio nei fenomeni di **interferenza e diffrazione**, mentre in altri casi, quando si ha un'**interazione con la materia** a cui viene trasferita l'energia dell'onda, il comportamento è di tipo corpuscolare.

L'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche è concentrata in pacchetti detti quanti o **fotoni**. L'energia *E* dei fotoni è direttamente proporzionale alla frequenza *f* secondo la relazione:

$$E = h \cdot f$$

dove *h* è la **costante di Planck**, il cui valore è: $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$.

Lo spettro delle onde elettromagnetiche:



Raggi gamma: origine nucleare, λ: 10^{-10}-10^{-14} m

Raggi X: prodotti tramite la decelerazione di elettroni su un bersaglio, λ: 10^{-8}-10^{-13} m (10 nm - 10^{-4} nm)

Raggi UV: emissione dal sole – assorbimento in stratosfera (ozono), λ: 4×10^{-7} - 6×10^{-10} m (400 nm – 0.6 nm)

Luce visibile: corrispondenza approx. colori:
400 - 430 nm – violetto ; 430 – 485 nm – blu
485 - 560 nm – verde ; 560 – 575 nm – giallo
575 - 625 nm – arancio ; 625 –700 nm – rosso

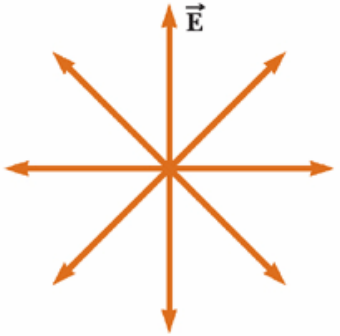
Raggi IR: emessi dai corpi caldi; λ: 700 nm - 1 mm

Microonde: λ: 1 mm- 30 cm (es. forni)

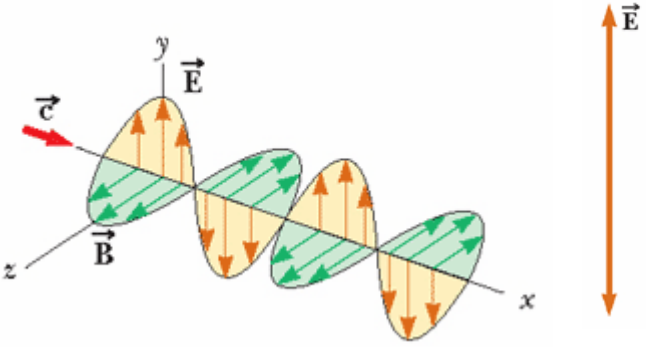
Onde radio: λ: > 30 cm (es. telecomunicazione)

La polarizzazione:

Un fascio di luce è normalmente il risultato della sovrapposizione di un gran numero di onde emesse dagli atomi o molecole della sorgente di luce. Ne consegue che il vettore campo elettrico può vibrare in ogni direzione, mantenendosi però sempre perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. Si dice allora che l'onda è **non polarizzata.**

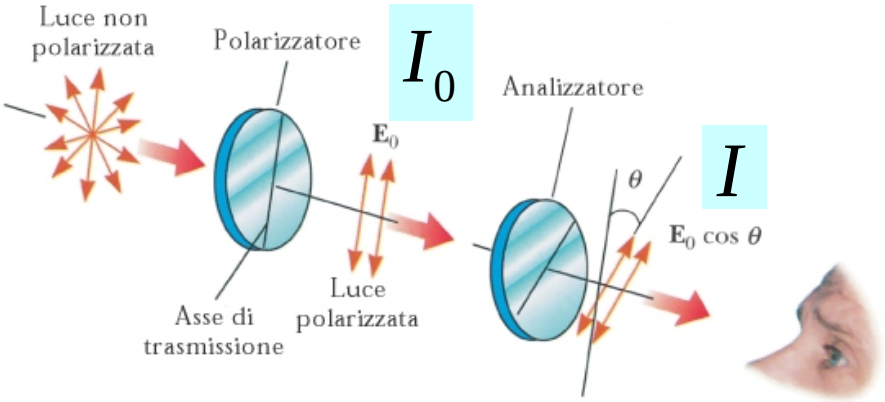


Un'onda è **polarizzata linearmente** se il vettore campo elettrico oscilla in ogni istante lungo una sola direzione. Il piano formato dalla direzione del campo elettrico e dalla direzione di propagazione è il **piano di polarizzazione**

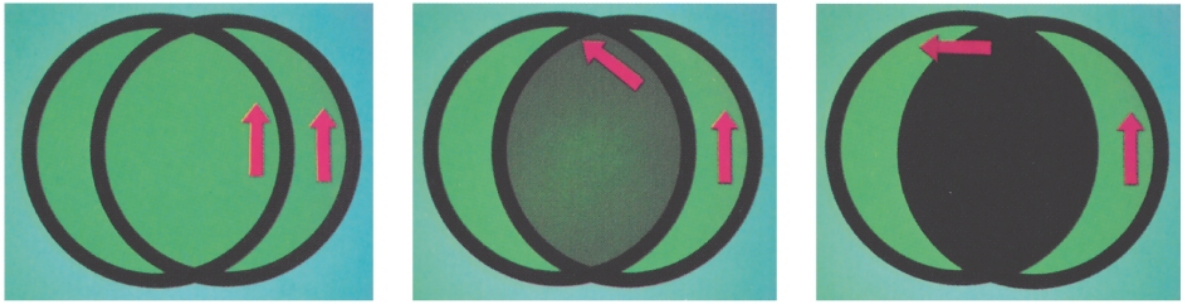


La polarizzazione:

La polarizzazione della luce avviene facendo passare l'onda attraverso un **polarizzatore,** che trasmette solo i componenti del vettore campo elettrico che sono paralleli al suo **asse di trasmissione .** E' possibile verificare la direzione di polarizzazione e variare l'intensità della luce polarizzata utilizzando un **analizzatore**.



$$I = I_0 \cdot \cos^2 \vartheta$$ legge di Malus



Inoltre visto che il valor medio di $\cos^2\theta$ è pari ad ½, si ha che l'intensità della luce inizialmente non polarizzata viene dimezzata quando passa tramite un solo polarizzatore

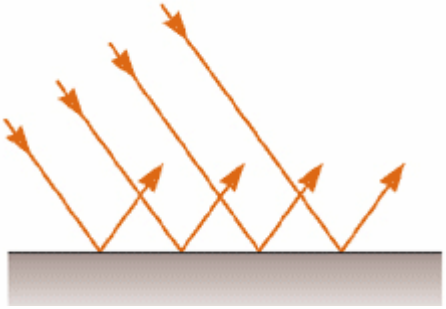
Ottica geometrica

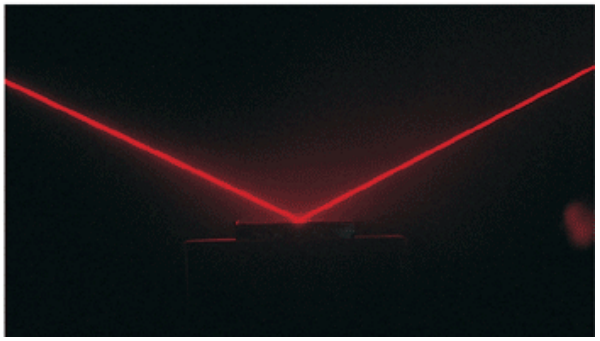
Riflessione, rifrazione,
dispersione

Riflessione di un’onda

Raggio di luce che incide su una superficie:

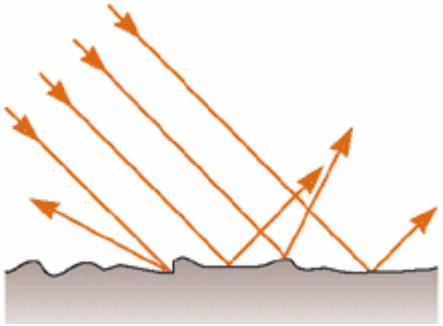
Riflessione speculare:

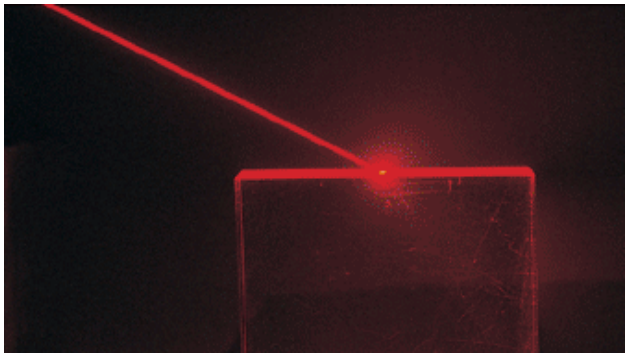




superficie piana e liscia

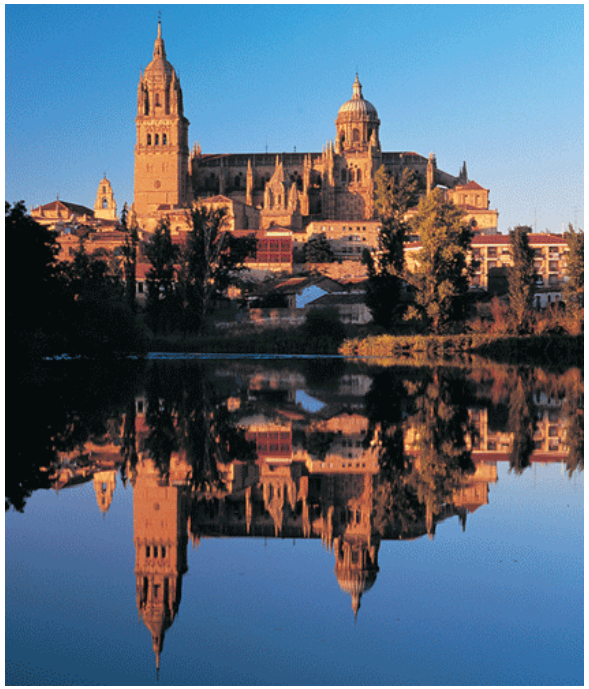
Riflessione diffusa:





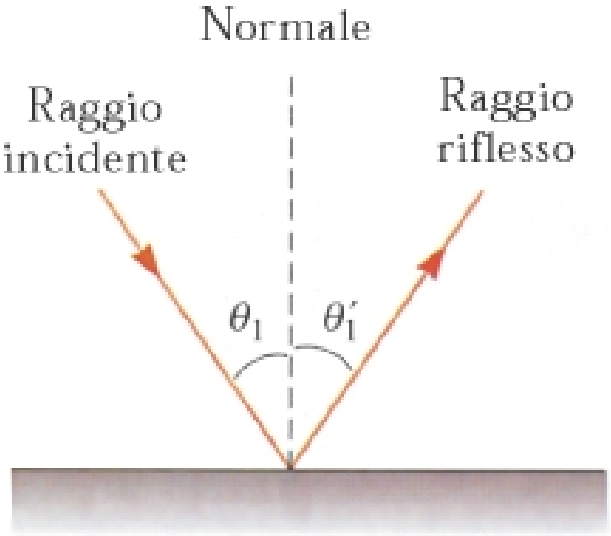
superficie “ruvida”:
irregolarità delle stesse dimensioni della λ

Riflessione di un’onda



Riflessione speculare:

- **il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie di incidenza, passante per il punto di incidenza, giacciono su uno stesso piano;**
- **l’angolo di incidenza è uguale all’angolo di riflessione**

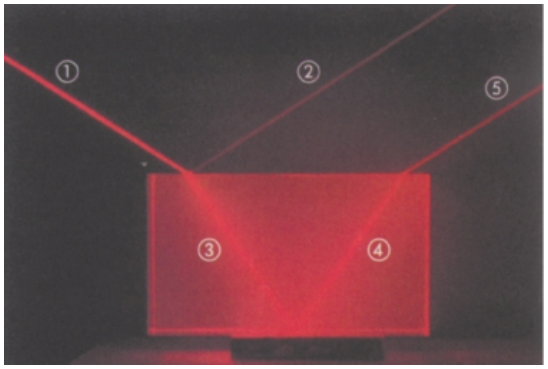


$$\vartheta_1 = \vartheta'_1$$

Rifrazione di un'onda

Indice di rifrazione di un mezzo:

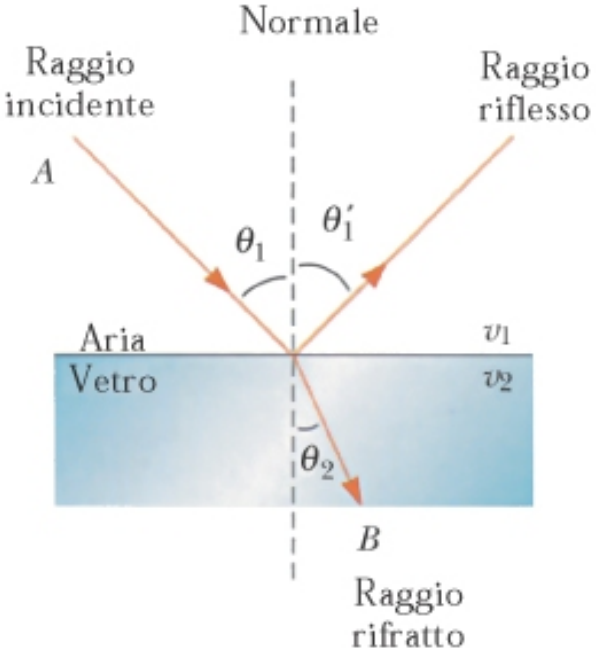
$$n = \frac{c}{v} = \frac{\textit{velocità della luce nel vuoto}}{\textit{velocità della luce nel mezzo}}$$



• il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione fra i due mezzi, passante per il punto di incidenza, giacciono su uno stesso piano;
• l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione dipendono dalla velocità della luce nei mezzi attraversati (e quindi dall'indice di rifrazione dei due mezzi) secondo la relazione:

$$\frac{\sin\vartheta_1}{\sin\vartheta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

legge di Snell



Rifrazione di un'onda

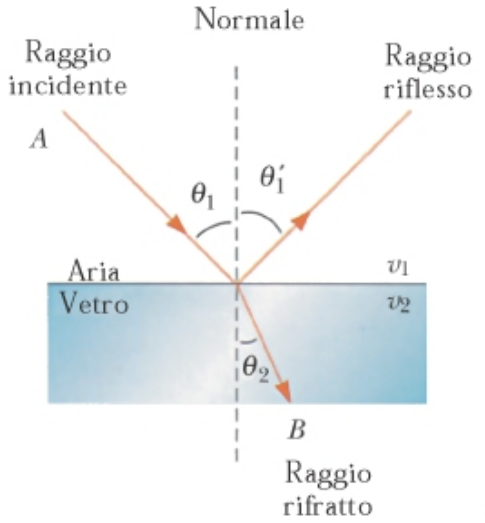
Quando un'onda passa da un mezzo ad un altro la sua **frequenza non varia. Variano invece la velocità e la lunghezza d'onda**

$$f_1 = \frac{v_1}{\lambda_1} \qquad f_2 = \frac{v_2}{\lambda_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \qquad n_2 = \frac{c}{v_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

L'indice di rifrazione di un qualsiasi mezzo può essere espresso come:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} = \frac{lunghezza\ d'onda\ nel\ vuoto}{lunghezza\ d'onda\ nel\ mezzo}$$



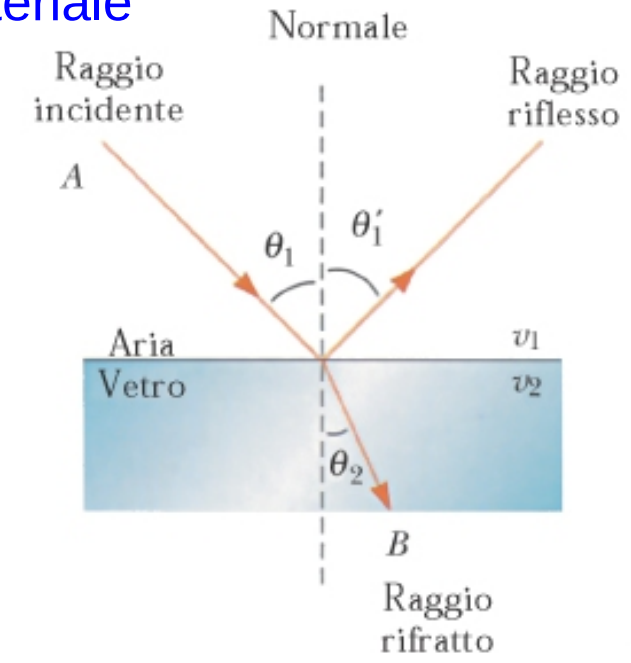
Rifrazione di un’onda (esempio)

Un fascio di luce di lunghezza d’onda di 550 nm che si propaga in aria incide su una lastra di materiale trasparente. Il fascio incidente forma un angolo di 40° con la normale ed il raggio rifratto forma un angolo di 26° con la normale.

A) Trovare l’indice di rifrazione del materiale

B) Trovare la velocità della luce nel materiale

C) Calcolare la lunghezza d’onda della luce nel materiale



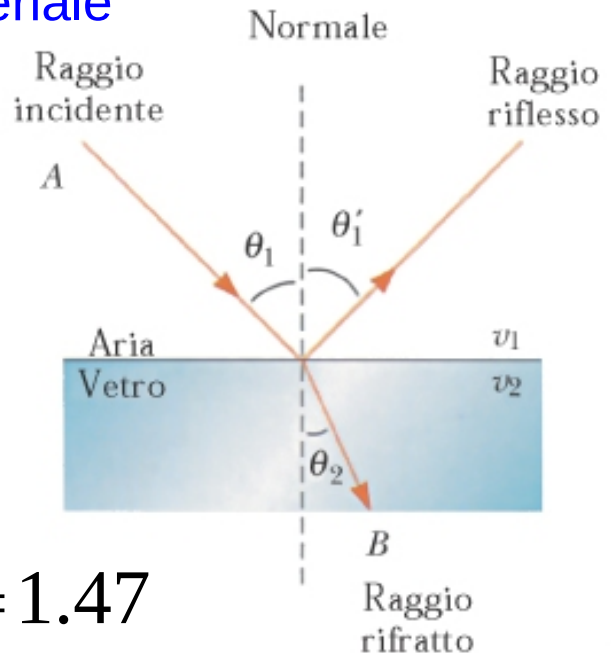
Rifrazione di un'onda (esempio)

Un fascio di luce di lunghezza d'onda di 550 nm che si propaga in aria incide su una lastra di materiale trasparente. Il fascio incidente forma un angolo di 40° con la normale ed il raggio rifratto forma un angolo di 26° con la normale.

A) Trovare l'indice di rifrazione del materiale

B) Trovare la velocità della luce nel materiale

C) Calcolare la lunghezza d'onda della luce nel materiale



Indice di rifrazione del materiale

$$\frac{\sin\vartheta_1}{\sin\vartheta_2}=\frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2=n_1\cdot\frac{\sin\vartheta_1}{\sin\vartheta_2}=1.00\cdot\frac{\sin 40°}{\sin 26°}=\frac{0.643}{0.438}=1.47$$

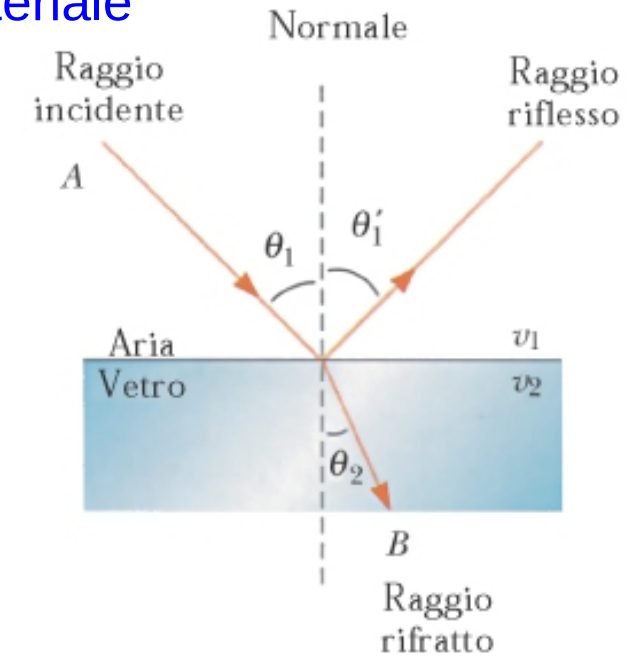
Rifrazione di un'onda (esempio)

Un fascio di luce di lunghezza d'onda di 550 nm che si propaga in aria incide su una lastra di materiale trasparente. Il fascio incidente forma un angolo di 40° con la normale ed il raggio rifratto forma un angolo di 26° con la normale.

A) Trovare l'indice di rifrazione del materiale

B) Trovare la velocità della luce nel materiale

C) Calcolare la lunghezza d'onda della luce nel materiale



Velocità della luce nel materiale

$$n = \frac{c}{\mathrm{v}} = \frac{\textit{velocità della luce nel vuoto}}{\textit{velocità della luce nel mezzo}}$$

$$\mathrm{v} = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \cdot 10^8\ m/s}{1.47} = 2.04 \cdot 10^8\ m/s$$

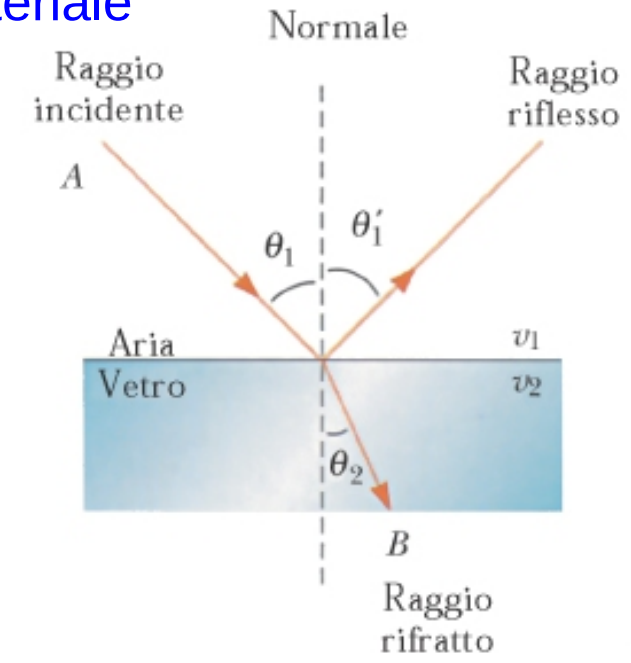
Rifrazione di un'onda (esempio)

Un fascio di luce di lunghezza d'onda di 550 nm che si propaga in aria incide su una lastra di materiale trasparente. Il fascio incidente forma un angolo di 40° con la normale ed il raggio rifratto forma un angolo di 26° con la normale.

A) Trovare l'indice di rifrazione del materiale

B) Trovare la velocità della luce nel materiale

C) Calcolare la lunghezza d'onda della luce nel materiale



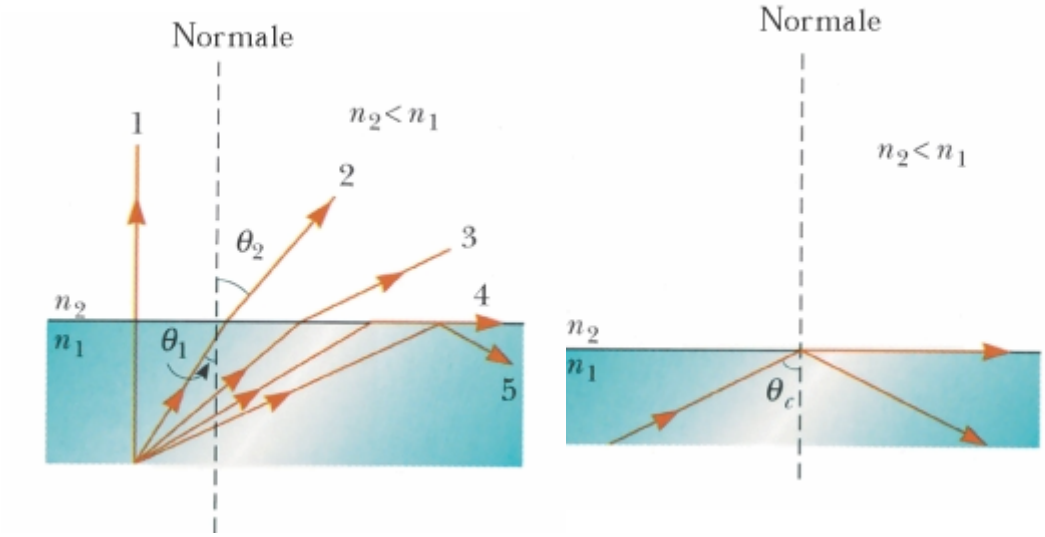
Lunghezza d'onda della luce nel materiale

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} = \frac{lunghezza\ d'onda\ nel\ vuoto}{lunghezza\ d'onda\ nel\ mezzo}$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{550\ nm}{1.47} = 374\ nm$$

Riflessione totale (interna)

Si verifica solo quando la luce passa da un mezzo di un dato indice di rifrazione n_1 ad un mezzo con indice di rifrazione n_2 minore di n_1 (esempio: acqua-aria)

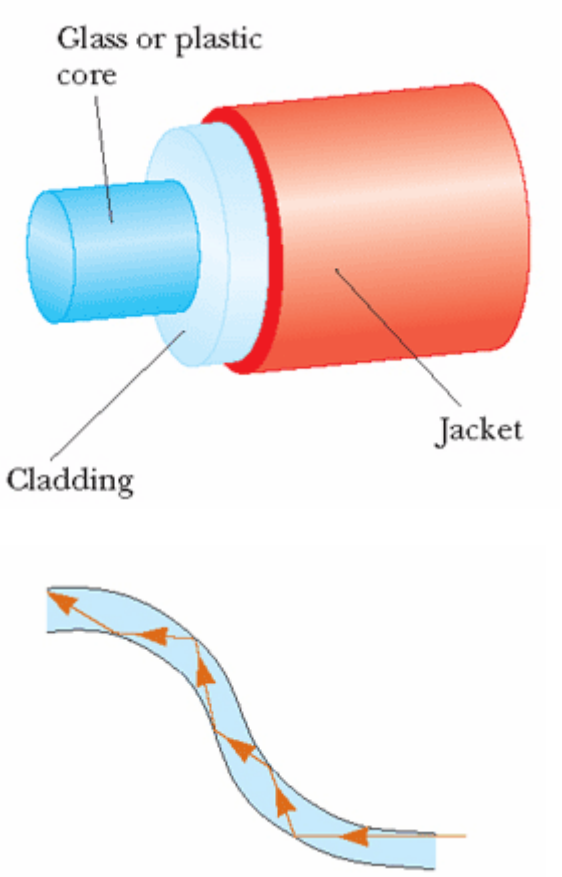


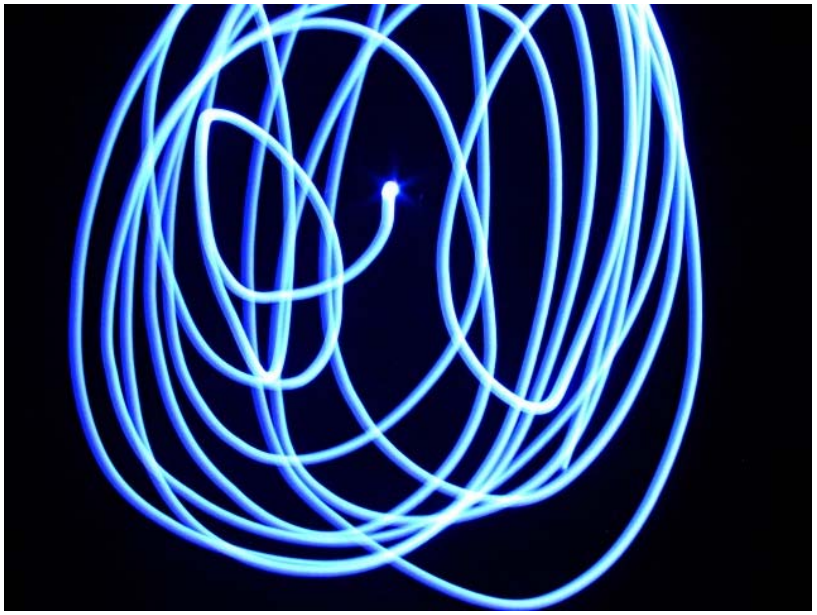
L'**angolo limite** θ_l è l'angolo tale per cui l'angolo di rifrazione è pari a 90°:

$$\frac{\sin \vartheta_l}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \vartheta_l = \frac{n_2}{n_1}$$

(vale per $n_2 < n_1$)

Riflessione totale (interna): la fibra ottica



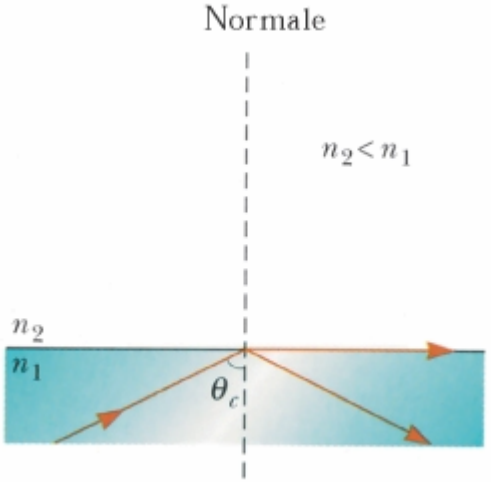


Riflessione totale (esempio)

Trovare l'angolo limite per la superficie acqua-aria se l'indice di rifrazione dell'acqua è pari a 1.33

$$\frac{\sin \vartheta_l}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \vartheta_l = \frac{n_2}{n_1}$$

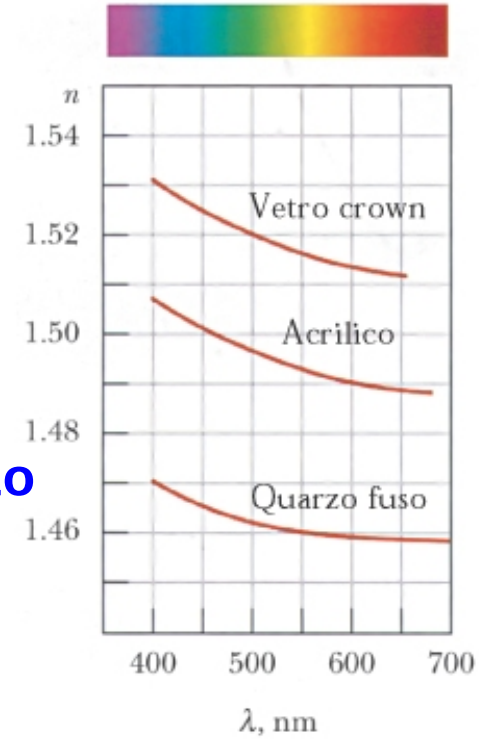
$$\sin \vartheta_l = \frac{1}{1.33} = 0.752 \Rightarrow \vartheta_l = 48.8^\circ$$



Dispersione

Indice di rifrazione di un mezzo:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\textit{velocità della luce nel vuoto}}{\textit{velocità della luce nel mezzo}} \qquad v = \frac{\lambda}{T}$$

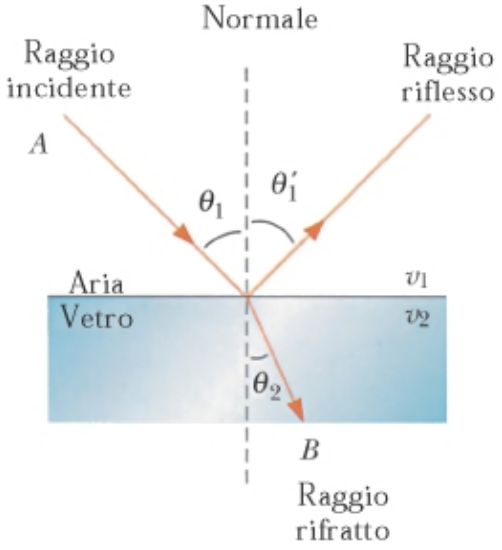


L'indice di rifrazione di un mezzo dipende dalla lunghezza d'onda della luce che si propaga nel mezzo

L'angolo di rifrazione che si ha quando la luce attraversa la superficie di separazione tra due mezzi dipende dalla lunghezza d'onda.

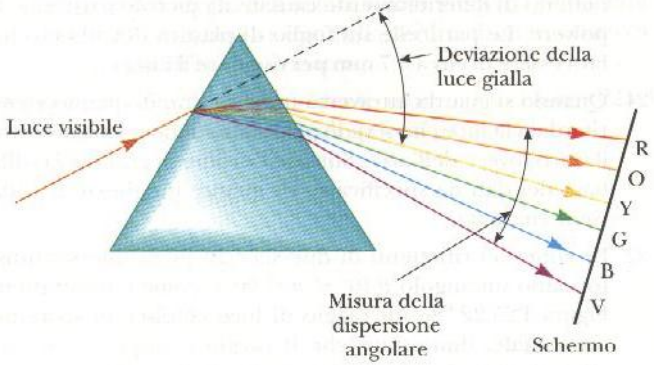
Per un raggio di luce policromatico (es. luce bianca) con la rifrazione si può ottenere la scomposizione delle varie componenti cromatiche

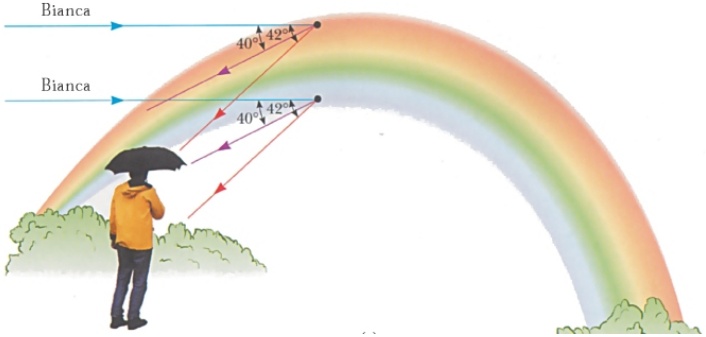
Prismi ed arcobaleno

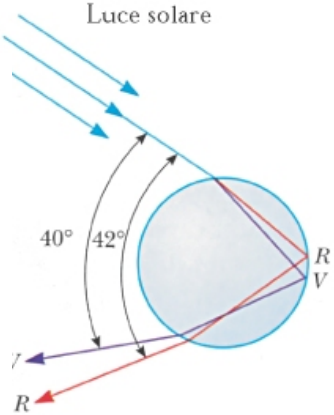


$$\frac{\sin\vartheta_1}{\sin\vartheta_2}=\frac{n_2}{n_1}\Rightarrow \sin\vartheta_2=\sin\vartheta_1\cdot\frac{n_1}{n_2}$$

Sono maggiormente rifratti (ossia θ_2 è minore) i raggi con lunghezza d'onda minore (per i quali l'indice di rifrazione è maggiore). Quindi la luce viola (λ~400 nm) viene rifratta di più della luce rossa (λ~ 650 nm) quando passa dall'aria ad un altro materiale

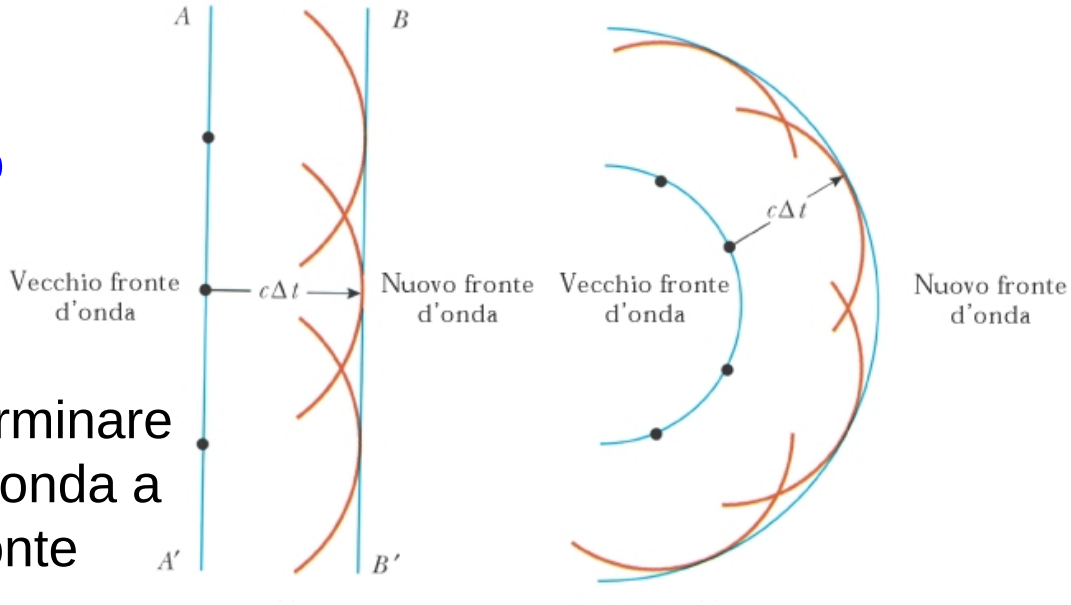




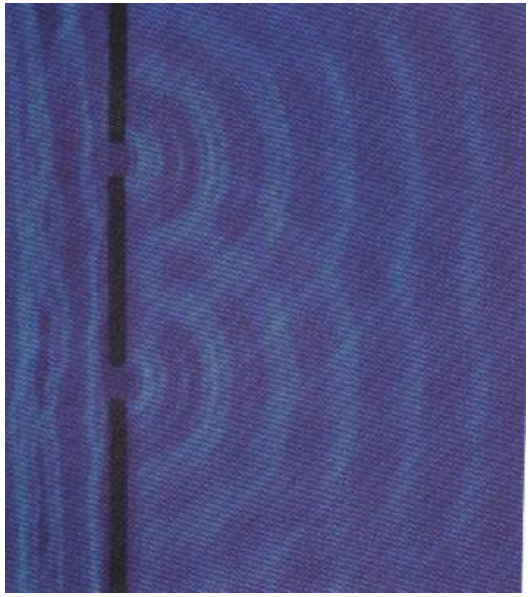


Principio di Huygens

Assunzione: modello ondulatorio
(la luce come un'onda e non un fascio di particelle)



Costruzione geometrica per determinare la posizione di un nuovo fronte d'onda a partire dalla conoscenza di un fronte d'onda precedente



Tutti i punti su un dato fronte d'onda si possono considerare come **sorgenti puntiformi di onde sferiche elementari**, che si propagano verso l'esterno con la velocità caratteristica dell'onda in quel mezzo. Dopo un certo intervallo di tempo la posizione del nuovo fronte d'onda è la superficie tangente alle onde elementari.