

VII



Elettromagnetismo e indice di rifrazione

Laboratorio di Chimica Fisica I

Corso di Laurea in Chimica
Anno accademico 2005/2006

2

Elettromagnetismo

- **Campi elettrici e campi magnetici sono intimamente correlati**
 - Una corrente circolante in un conduttore genera un campo magnetico
 - Un magnete, avvicinato ad una spira, vi fa circolare una corrente
- **Le equazioni di Maxwell permettono di descrivere il comportamento di qualsiasi sistema in cui agiscano campi elettrici e/o magnetici**
 - Esse derivano dalle precedenti scoperte di Ampere, Faraday e Gauss

Equazioni di Maxwell

$$\epsilon_0 \oint E \cdot dS = q$$

Teorema di Gauss per l'elettricità

$$\oint B \cdot dS = 0$$

Teorema di Gauss per il magnetismo

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \left(\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + i \right)$$

Generalizzazione di Maxwell del teorema di Ampere

$$\oint E \cdot dl = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Legge dell'induzione di Faraday

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Onde elettromagnetiche

- Le equazioni di Maxwell prevedono l'esistenza delle onde elettromagnetiche
- Il campo elettrico e quello magnetico sono:
 - Perpendicolari fra di loro
 - Perpendicolari alla direzione di propagazione
- Sono descrivibili tramite l'**equazione d'onda**

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Propagazione della luce nel vuoto

- La forma generale della equazione d'onda è:

$$\frac{\partial^2 f_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f_y}{\partial t^2}$$

- Dove v è la velocità alla quale si muove l'onda
- Nota come **equazione di D'Alembert**

- Nel caso delle onde elettromagnetiche quindi:

$$v=c=\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \Rightarrow \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

- Fu proprio la corrispondenza tra velocità delle luce e le due costanti a suggerire a Maxwell la natura delle onde luminose

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Onde sinusoidali (1)

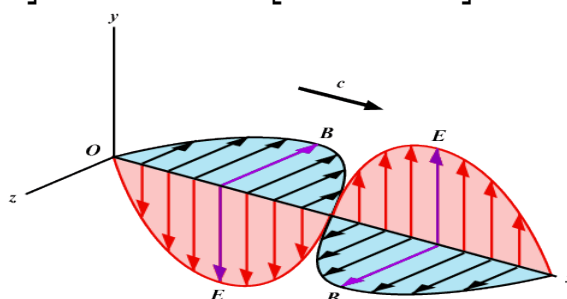
- L'equazione di D'Alembert è soddisfatta da onde progressive sinusoidali aventi forma:

$$E = E_0 \cdot \text{sen} \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]; B = B_0 \cdot \text{sen} \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

$$\omega = 2\pi\nu$$

Direzione di propagazione

Velocità dell'onda



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Onde sinusoidali (2)

- Nel caso di un'onda che si propaga in una generica direzione l'equazione che la descrive sarà del tipo:

$$E = E_0 \cdot \text{sen} \left[\omega \left(t - \frac{\mathbf{f}x + \mathbf{g}y + \mathbf{h}z}{v} \right) \right]$$

- Dove \mathbf{f} , \mathbf{g} , ed \mathbf{h} sono i versori nello spazio x,y,z

Onde elettromagnetiche in un mezzo (1)

- Una onda elettromagnetica si propaga in un mezzo materiale ad una velocità minore che nel vuoto
 - $v < c$ sempre
- Tale effetto è dovuto principalmente alle interazioni tra il campo elettrico ed le cariche nelle molecole
- Il rapporto tra la velocità di propagazione nel vuoto e nel mezzo è noto come **indice di rifrazione**

$$n = \frac{c}{v} > 1$$

Onde elettromagnetiche in un mezzo (2)

- Le equazioni che descrivono le onde elettromagnetiche in un mezzo materiale sono analoghe a quelle nel vuoto

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

- Impiegando la suscettività magnetica e la costante dielettrica del mezzo, invece che del vuoto

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

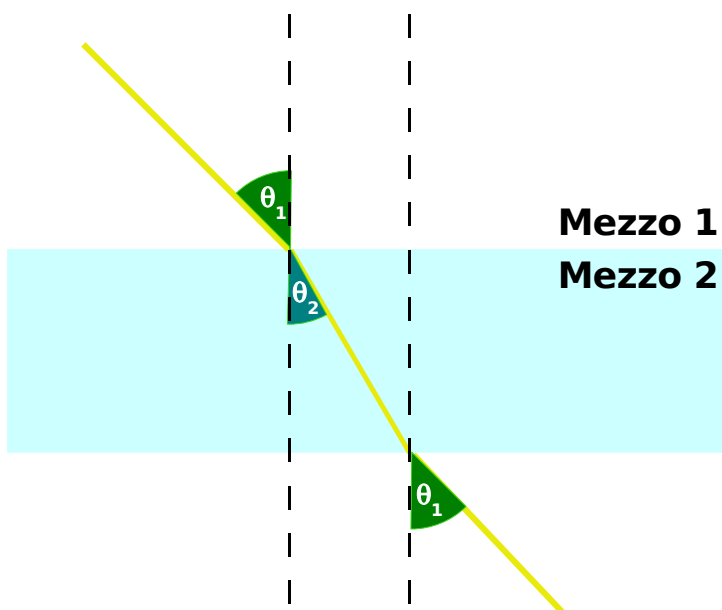
Rifrazione della luce

- Un fascio di luce che incide sulla superficie di separazione tra due mezzi viene deviato
 - La rifrazione può avvenire solo se il secondo mezzo è trasparente
 - Il fascio, in parte, viene anche riflesso
- Questa deviazione prende il nome di rifrazione
 - È il principio che spiega perché una cannuccia in un bicchiere pieno d'acqua appare spezzata



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Angolo di rifrazione



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Entità della rifrazione

- L'angolo di rifrazione è funzione
 - Dell'angolo di incidenza
 - Di una grandezza caratteristica dei mezzi nota come indice di rifrazione
- Se $n_2 > n_1$, il fascio tenderà ad avvicinarsi alla normale
 - $\theta_2 < \theta_1$
- Se $n_2 < n_1$, il fascio tenderà ad allontanarsi dalla normale
 - $\theta_2 > \theta_1$

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Legge di Snell

- Il fascio incidente, quello rifratto e quello riflesso sono tutti contenuti nello stesso piano
- La relazione che lega l'angolo di incidenza con quello di rifrazione attraverso gli indici di rifrazione è:

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

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Velocità di propagazione della luce

- La variazione di velocità dovuta al passaggio da un mezzo all'altro è responsabile della deviazione del fascio
- È possibile esprimere la legge di Snell in funzione delle velocità della luce nei rispettivi mezzi

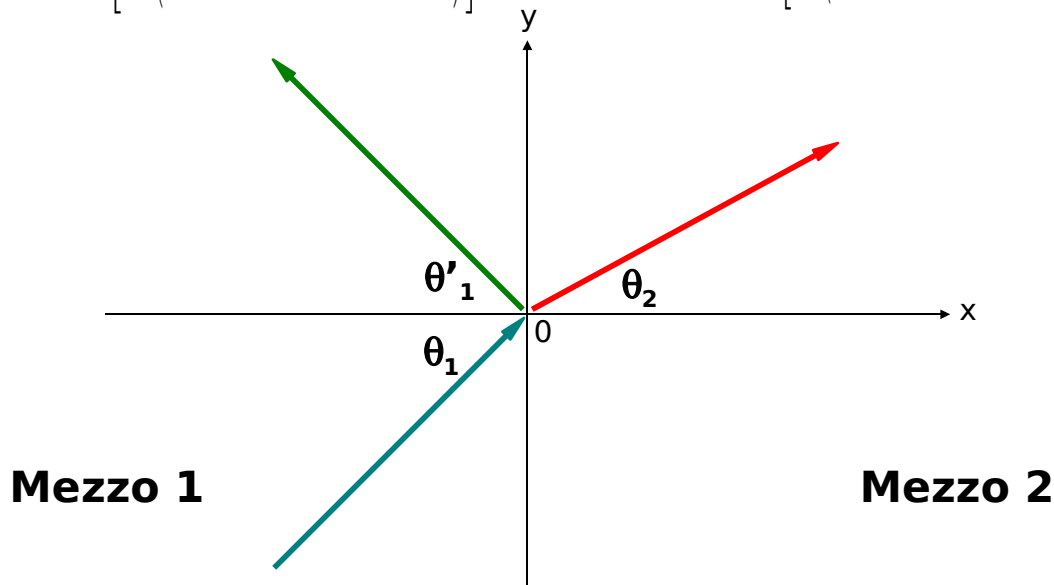
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Equazioni del campo elettrico

$$E^i = E^i \cdot \text{sen} \left[\omega \left(t - \frac{x \cos \theta_1 + y \text{sen} \theta_1}{v_1} \right) \right]$$

$$E^r = E^r \cdot \text{sen} \left[\omega \left(t - \frac{x \cos \theta_2 + y \text{sen} \theta_2}{v_2} \right) \right]$$



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Derivazione della legge di Snell

- Le condizioni di continuità delle componenti tangenziali del campo devono essere rispettate passando da un mezzo ad un altro:
 - $E_{\text{trasmessa}} = E_{\text{incidente}} + E_{\text{riflessa}}$
- L'unico modo perché questo possa avvenire è che:
 - $\omega_1 = \omega_2$ (e quindi la frequenza rimanga costante)
 - $(\text{sen} \theta_1 / v_1) = (\text{sen} \theta_2 / v_2)$ Che non è altro che la legge di Snell

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Relazione tra n e ϵ_r

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{c}{v} \quad \Leftarrow \quad c = \frac{v}{\sqrt{\epsilon, \mu}}$$

Per i materiali non ferromagnetici

$$\mu \approx \mu_0 \quad \Rightarrow \quad n = \sqrt{\frac{\epsilon \cancel{\mu}}{\epsilon_0 \cancel{\mu_0}}} \quad \Rightarrow \quad n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r}$$

La relazione vale solo quando n ed ϵ_r riflettono gli stessi effetti di polarizzazione

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

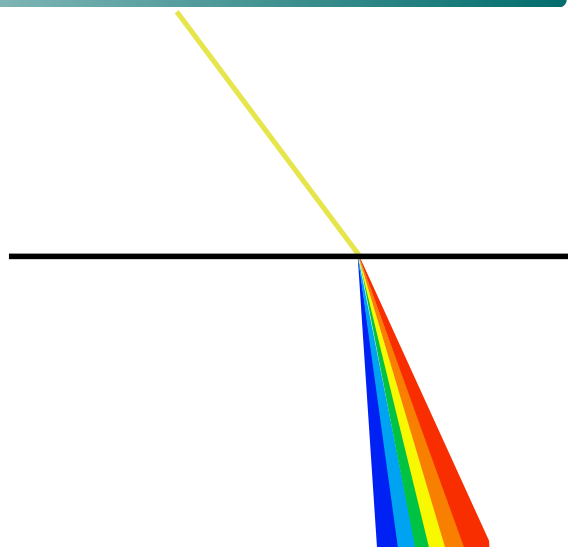
Indice di rifrazione di varie sostanze

Sostanza	n
Diamante	2,419
Quarzo	1.4
Vetro Flint	1,75
Ghiaccio	1,309
Benzene	1,501
Etanolo	1,361
Acqua	1.3325
Aria	1,000293
Anidride carbonica	1,00045

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Dispersione

- **L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda considerata**
 - Dispersione
 - Nel vuoto non c'è dispersione
- **L'indice di rifrazione diminuisce all'aumentare della lunghezza d'onda**
 - La luce blu viene deviata maggiormente della luce rossa
- **Il fenomeno della dispersione è alla base del funzionamento del prisma di Newton**
 - Ed anche della formazione dell'arcobaleno



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Rifrazione limite (1)

- Se il secondo mezzo è otticamente più denso ($n_2 > n_1$) si ha che:

$$\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} < 1$$

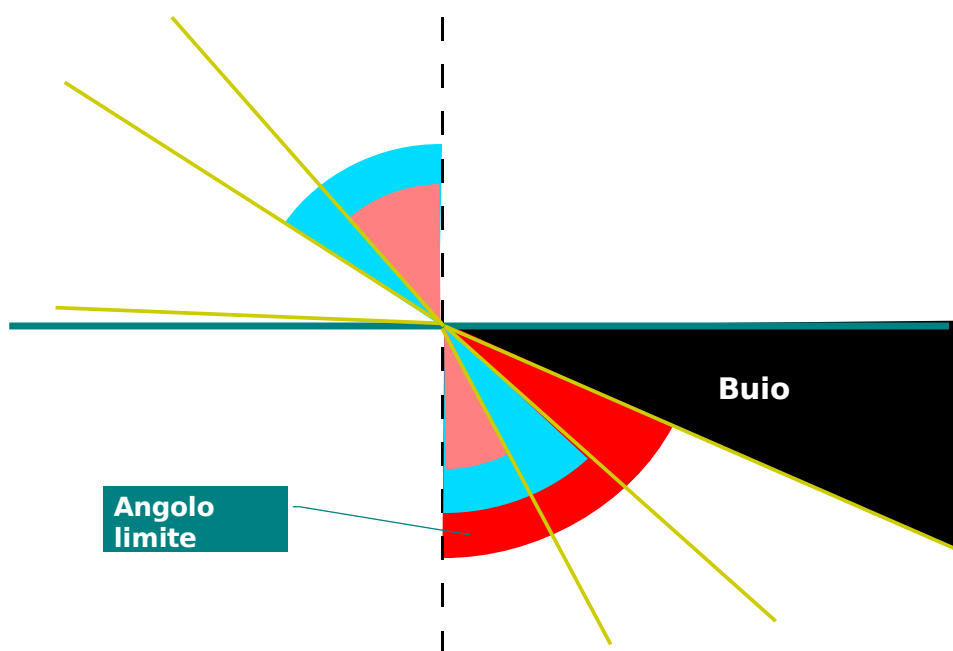
- Il raggio rifratto è più vicino alla normale
- Se l'angolo di incidenza $\theta_i = 90^\circ$ (incidenza radente) si ha che:

$$n_1 \sin 90^\circ = n_2 \sin \theta_{\text{lim}}$$

$$\sin \theta_{\text{lim}} = \frac{n_1}{n_2}$$

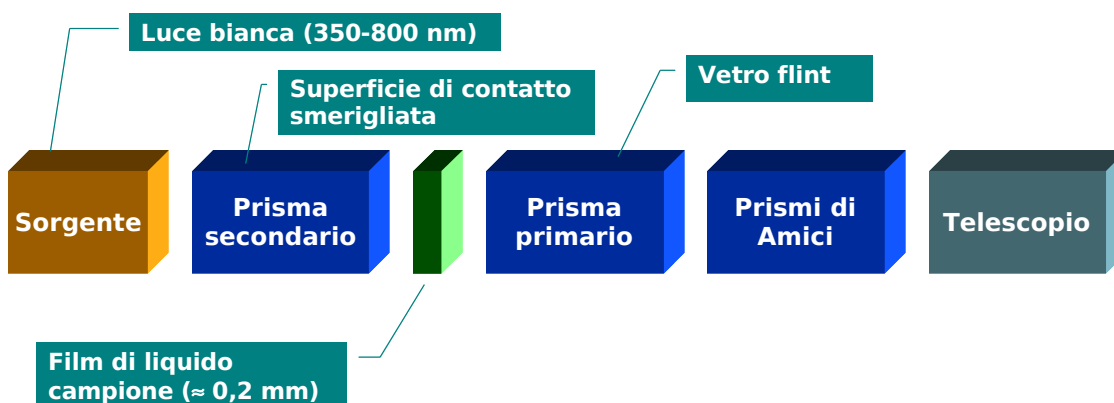
R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Rifrazione limite (2)



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Schema del rifrattometro



R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Funzionamento del rifrattometro

- Grazie al prisma secondario smerigliato, la luce attraversa il film campione e incide sul prisma principale con $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
 - La luce arriva uniformemente su tutta la emisfera
- Il prisma primario ha indice di rifrazione, n_v , maggiore di quello di qualsiasi liquido
- Applicando la legge di Snell è possibile ricavare l'indice di rifrazione del campione in esame
 - Il valore viene indicato direttamente nell'oculare dello strumento

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Modo di operare

- La posizione della linea di demarcazione luce/buio è determinata dall'angolo θ_{lim}
 - Che dipende dall'indice di rifrazione del campione
- Operando sulla manopola di misura si fa coincidere la linea di demarcazione con l'apposito reticolo di collimazione
- Dall'entità dello spostamento della manopola si può risalire all'indice di rifrazione
 - Attraverso semplici considerazioni trigonometriche e dall'applicazione della legge di Snell

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Compensazione della dispersione

- La dispersione delle componenti della luce bianca fa sì che la linea di demarcazione non sia netta
 - Si osservano frange colorate
- Per ovviare al problema si usano dei prismi di Amici in modo da far convergere tutte le componenti sulla posizione della riga D del sodio (589 nm)

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006

Licenza



Autore: Renato Lombardo, e-mail: r.lombardo@unipa.it Dipartimento di Chimica Fisica "F. Accascina", Università di Palermo Viale delle Scienze, Ed. 17, 90128 - Palermo - Italy tel: +39-091-6459838, fax: +39-091-590015

Atribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 2.5

Tu sei libero:

di riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare quest'opera di modificare quest'opera

Alle seguenti condizioni:

Atribuzione. Devi attribuire la paternità dell'opera nei modi indicati dall'autore o da chi ti ha dato l'opera in licenza.

Non commerciale. Non puoi usare quest'opera per fini commerciali.

Condividi allo stesso modo. Se alteri o trasformi quest'opera, o se la usi per crearne un'altra, puoi distribuire l'opera risultante solo con una licenza identica a questa.

Ogni volta che usi o distribuisce quest'opera, devi farlo secondo i termini di questa licenza, che va comunicata con chiarezza.

In ogni caso, puoi concordare col titolare dei diritti d'autore utilizzi di quest'opera non consentiti da questa licenza.

Le utilizzazioni consentite dalla legge sul diritto d'autore e gli altri diritti non sono in alcun modo limitati da quanto sopra.

Questo è un riassunto in linguaggio accessibile a tutti del **Codice Legale (la licenza integrale)** disponibile su <http://creativecommons.org/>.

R. Lombardo - Laboratorio di Chimica Fisica I - Corso di Laurea in Chimica - a.a. 2005/2006