

# Física Aplicada a Farmacia

Fernando Herranz  
[fherranz@pdi.ucm.es](mailto:fherranz@pdi.ucm.es)

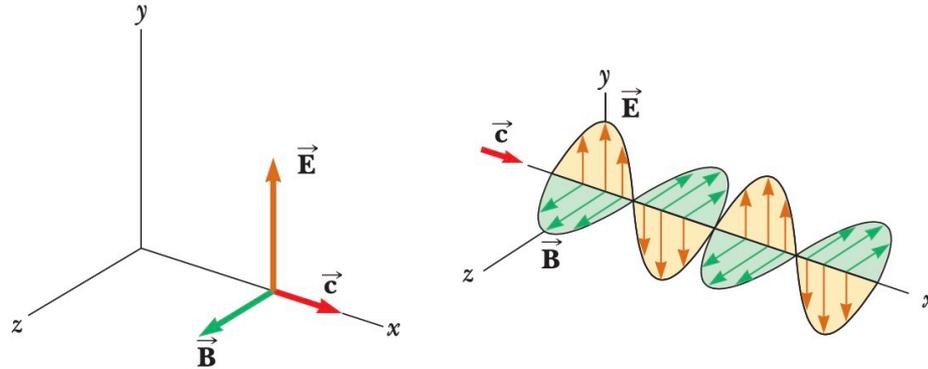
Tutorías L,X,V 17.30  
(avisad antes !)

## Parte 3ª. ONDAS

Tema 2: Ecuación de ondas. Espectro electromagnético. Energía y momento de una onda electromagnética. Radiación. Ondas electromagnéticas en medios materiales. Índice de refracción. Dispersión. Reflexión y refracción. Interferencia, difracción y polarización.

Las ecuaciones de Maxwell sugieren que los fenómenos eléctricos y magnéticos están estrechamente ligados = **teoría del electromagnetismo**

- **Un campo magnético variable en el tiempo actúa como fuente de campo eléctrico, y un campo eléctrico que varía con el tiempo genera un campo magnético**



Estos campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  se sostienen uno al otro y forman algo similar a una “**onda electromagnética**”

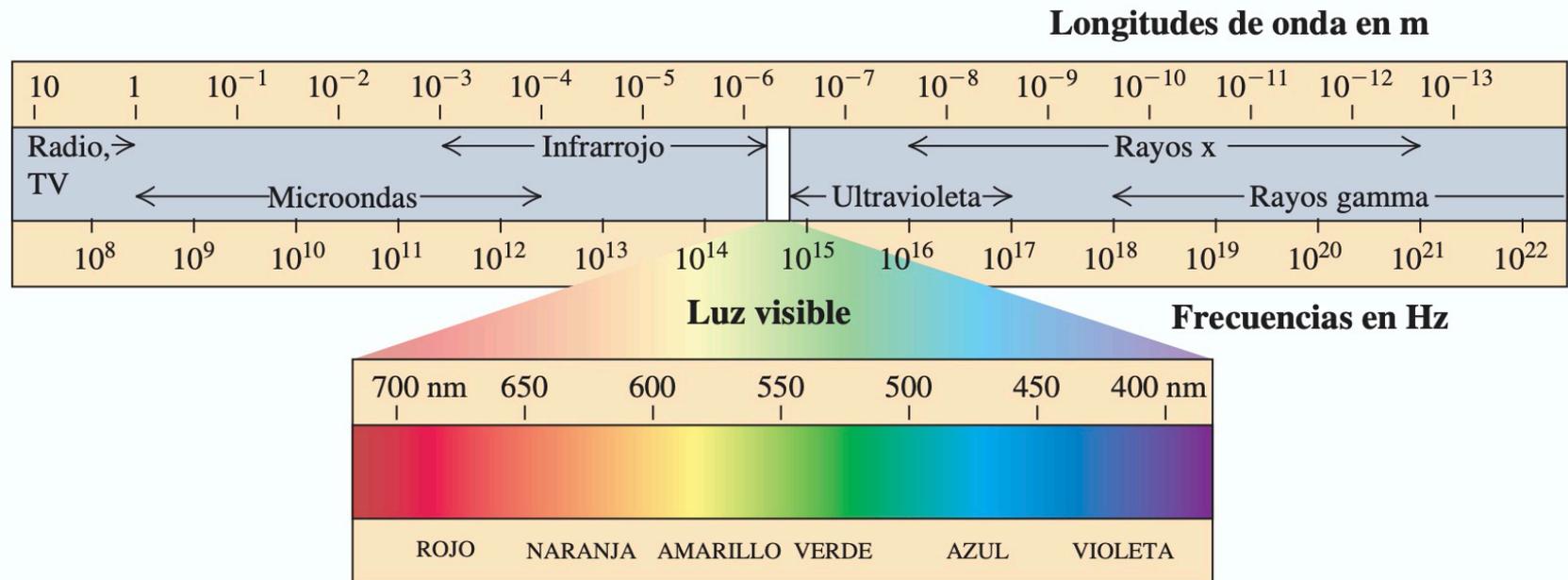
- Esto corresponde en realidad en la propagación (o transferencia entre partículas) de **energía y cantidad de movimiento**

La **luz visible** emitida por el filamento incandescente de una bombilla eléctrica es un ejemplo de onda electromagnética

Pero también energía emitidas por fuentes tales como las estaciones de **radio** y **televisión**, los osciladores de **microondas** para hornos y **radares**, las máquinas de **rayos X** y los **núcleos radiactivos**

En el **modelo de ondas electromagnéticas** los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  son funciones sinusoidales del tiempo y de la posición, con **frecuencia** y **longitud de onda** definidas

Los distintos tipos de ondas electromagnéticas—luz visible, ondas de radio, rayos X y otras—***difieren sólo en su frecuencia y longitud de onda = el espectro electromagnético***



## Tipos de radiación



- ***La luz blanca ordinaria incluye todas las longitudes de onda visibles***
- Sin embargo, con el uso de fuentes o filtros especiales es posible seleccionar una banda angosta de longitudes de onda dentro de un intervalo de unos cuantos nm
  - Esa luz es **aproximadamente monocromática** (de un solo color)
  - ***La luz totalmente monocromática con una sola longitud de onda es una idealización inalcanzable***
- La luz láser está mucho más cerca de ser monocromática que cualquiera que se obtenga de otra manera

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

(34.4) ◀ Ley de Gauss

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

(34.5) ◀ Ley de Gauss del magnetismo

La ecuación 34.4 es la ley de Gauss: **el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta dentro de dicha superficie dividida por  $\epsilon_0$** . Esta ley relaciona un campo eléctrico con la distribución de carga que lo produce.

La ecuación 34.5 es la ley de Gauss del magnetismo y afirma que **el flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es cero**. Es decir, el número de líneas de campo magnético que entra a un volumen cerrado debe ser igual al número que sale de dicho volumen, esto implica que las líneas de campo magnético no pueden comenzar o terminar en cualquier punto. Si lo hicieran, significaría que en dichos puntos existen monopolos magnéticos aislados; el hecho de que monopolos magnéticos aislados no se hayan observado en la naturaleza se considera una confirmación de la ecuación 34.5.

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

(34.6) ◀ Ley de Faraday

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

(34.7) ◀ Ley de Ampère-Maxwell

La ecuación 34.6 es la ley de Faraday de la inducción, que describe la creación de un campo eléctrico por un flujo magnético cambiante.

Una consecuencia de la ley de Faraday es la corriente inducida en una espira conductora colocada en un campo magnético variable en el tiempo.

La ecuación 34.7 es la ley Ampère-Maxwell, y describe la creación de un campo magnético por un campo eléctrico cambiante y por corriente eléctrica: **la integral de línea del campo magnético alrededor de cualquier trayectoria cerrada es la suma de  $\mu_0$  veces la corriente neta a través de dicha trayectoria y  $\epsilon_0 \mu_0$  veces la rapidez de cambio del flujo eléctrico a través de cualquier superficie limitada por dicha trayectoria.**

Una vez que se conocen los campos eléctrico y magnético en un punto en el espacio, la fuerza que actúa sobre una partícula de carga  $q$  se calcula a partir de la expresión

$$\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{E}} + q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \quad (34.8)$$

Esta correspondencia se llama **ley de fuerza de Lorenz**. (Esta correspondencia se vio anteriormente como ecuación 29.6.) Las ecuaciones de Maxwell, junto con esta ley de fuerza, describen por completo todas las interacciones electromagnéticas clásicas en un vacío.

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

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

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

Rapidez de ondas  
electromagnéticas

$\mu_0$  es una constante llamada permeabilidad magnética del espacio libre  
 $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del espacio libre

Para describir las ondas electromagnéticas sinusoidal usamos funciones de onda sinusoidal: para una onda transversal que viaja en la dirección  $+x$

$$E_y(x, t) = E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$B_z(x, t) = B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

- $E_y(x, t)$  y  $B_z(x, t)$  representen los **valores instantáneos** de las componentes de los campos
- $E_{\max}$  y  $B_{\max}$  representen los **valores máximos**, o **amplitudes**, de estos campos
- $\omega$  es su **frecuencia angular**, igual al producto de  $2\pi$  por la **frecuencia**  $f$
- $k$  es el **número de onda**, igual a  $2\pi/\lambda$  donde  $\lambda$  es la longitud de onda

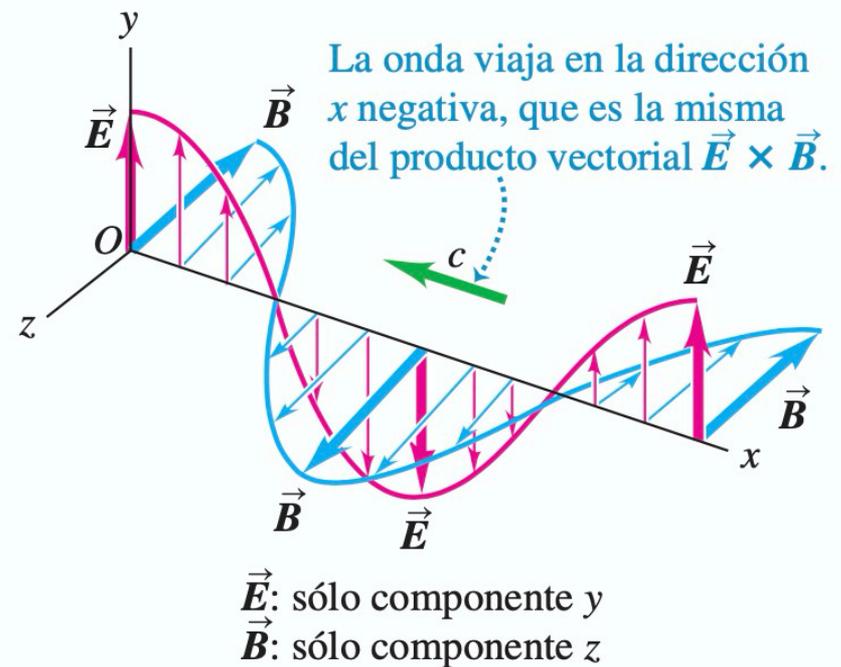
En forma vectorial:

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

La figura muestra los campos eléctrico y magnético de una onda que viaja en la dirección  $x$  negativa

Donde  $\vec{E}$  está en la dirección  $+y$ ,  $\vec{B}$  tiene la dirección  $-z$ ; y donde  $\vec{E}$  está en la dirección  $-y$ ,  $\vec{B}$  está en la dirección  $+z$



Las funciones de onda correspondientes:

$$\vec{E}(x,t) = \hat{j}E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x,t) = -\hat{k}B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

- Los campos eléctrico y magnético oscilan en fase y en todos los puntos, el producto vectorial  $\vec{E} \times \vec{B}$  está en la dirección en que se propaga la onda

Las ondas sinusoidales que se ilustran están **linealmente polarizadas** en la dirección  $y$

- Donde el campo  $\vec{E}$  siempre es paralelo al eje  $y$

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c \qquad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{f}$$

Al sustituir estos resultados en la ecuación 34.11, se demuestra que, en cualquier instante,

$$kE_{\text{máx}} = \omega B_{\text{máx}}$$

$$\frac{E_{\text{máx}}}{B_{\text{máx}}} = \frac{\omega}{k} = c$$

Al usar estos resultados junto con las ecuaciones 34.18 y 34.19 se obtiene

$$\frac{E_{\text{máx}}}{B_{\text{máx}}} = \frac{E}{B} = c \qquad (34.21)$$

**Es decir: en todo instante, la relación de la magnitud del campo eléctrico con la magnitud del campo magnético en una onda electromagnética es igual a la rapidez de la luz.**

La rapidez de flujo de la energía en una onda electromagnética se representa mediante un vector  $\vec{S}$ , llamado **vector de Poynting**, que se define por la expresión

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

La magnitud del vector de Poynting representa la rapidez a la cual fluye la energía a través de una superficie unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Por lo tanto, la magnitud  $S$  representa *energía por unidad de área*. El vector está dirigido en la dirección de propagación de la onda (figura 34.8). Las unidades del SI para  $\vec{S}$  son  $\text{J/s} \cdot \text{m}^2 = \text{W/m}^2$ .

el valor promedio de  $S$  (en otras palabras, la intensidad de la onda) es igual a

$$I = S_{\text{prom}} = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c B_{\text{máx}}^2}{2\mu_0}$$

## Ondas electromagnéticas en la materia

Las ondas electromagnéticas no son restringidas al vacío, también viajan en la materia:

- Ej. la luz viaja a través del aire, el agua o el vidrio

Para ondas electromagnéticas que se propagan en materiales que no son conductores, es decir, en dieléctricos, la rapidez de la onda no es la misma que en el vacío,  $v \neq c$

El otro cambio es que se debe substituir  $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon$  y  $\mu_0 \rightarrow \mu$

Por lo que tenemos nuevas relaciones en las ecuaciones de Maxwell:

$$(13.22) \quad E = vB \text{ y } B = \epsilon\mu vB$$

Esto nos da una nueva relación para la velocidad de propagación de la onda:

$$(13.23) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{KK_m}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{KK_m}}$$

Para la mayoría de los dieléctricos (excepto materiales ferromagnéticos aislantes), la permeabilidad relativa  $K_m \cong 1$  de modo que

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

Como  $K$  siempre es mayor que la unidad, la rapidez  $v$  de las ondas electromagnéticas en un dieléctrico siempre es menor que la rapidez  $c$  en el vacío por un factor de  $1/\sqrt{K}$

En óptica, la razón entre la rapidez  $c$  en el vacío y la rapidez  $v$  en un material = el **índice de refracción**  $n$  del material

$$(13.24) \quad \frac{c}{v} = n = \sqrt{KK_m} \cong \sqrt{K}$$

Por lo general, en esta ecuación no es posible utilizar los valores de  $K$  que se determino antes, porque esos valores se miden con base en campos eléctricos constantes

- Cuando los campos oscilan con rapidez, normalmente no hay tiempo para que ocurra la reorientación de los dipolos eléctricos que tiene lugar con los campos estáticos
- Los valores de  $K$  con campos que varían con rapidez, en general, son más pequeños que para campos estables
- Por ejemplo, el valor de  $K$  para el agua es de 80.4 con campos estables, pero sólo de 1.8 en el intervalo de frecuencias de la luz visible.

Así, la “constante” dieléctrica  $K$  en realidad es función de la frecuencia = **función dieléctrica**

# Refracción y reflexión

- Cuando la luz incide sobre la superficie de separación de dos medios que poseen velocidades de luz diferentes, parte de la energía luminosa se transmite (refracción) y parte se refleja (reflexión)
- ¿Pero la velocidad de la luz no era constante e igual a 300000 km/s?
- Nooo!!! La velocidad de la luz en un medio transparente como el aire, el agua o el vidrio, es menor que en el vacío.

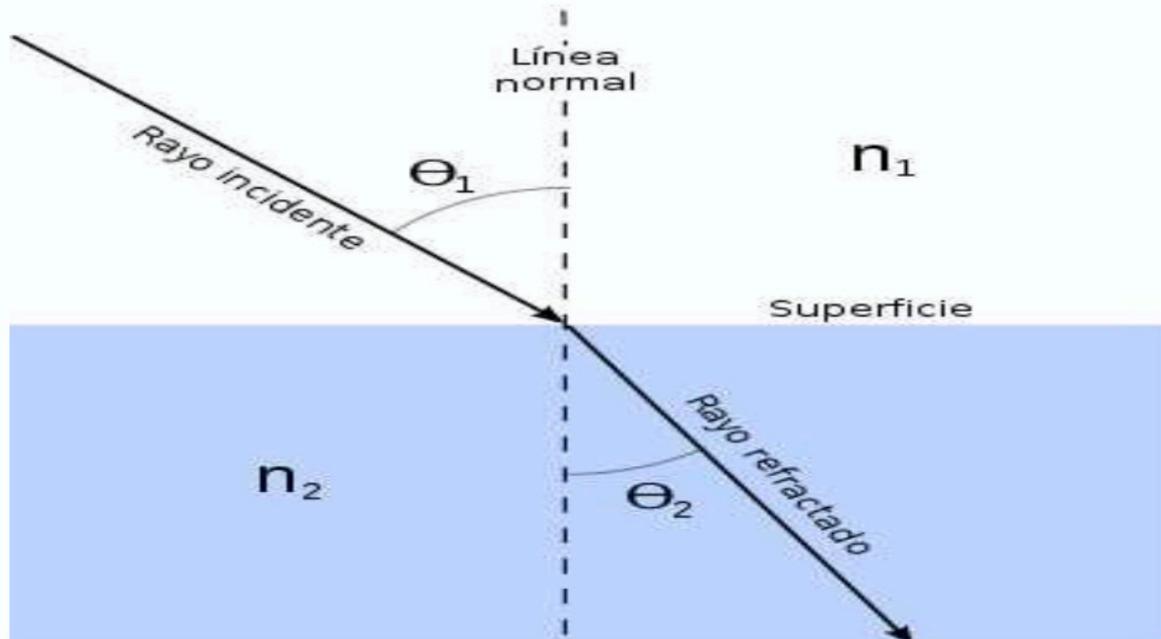
- Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen **índices de refracción** distintos.
- El índice de refracción,  $n$ , es un número adimensional que caracteriza a un medio transparente, y se define por:

$$n = c/v$$

- Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío, y  $v$  la velocidad de la luz en el medio

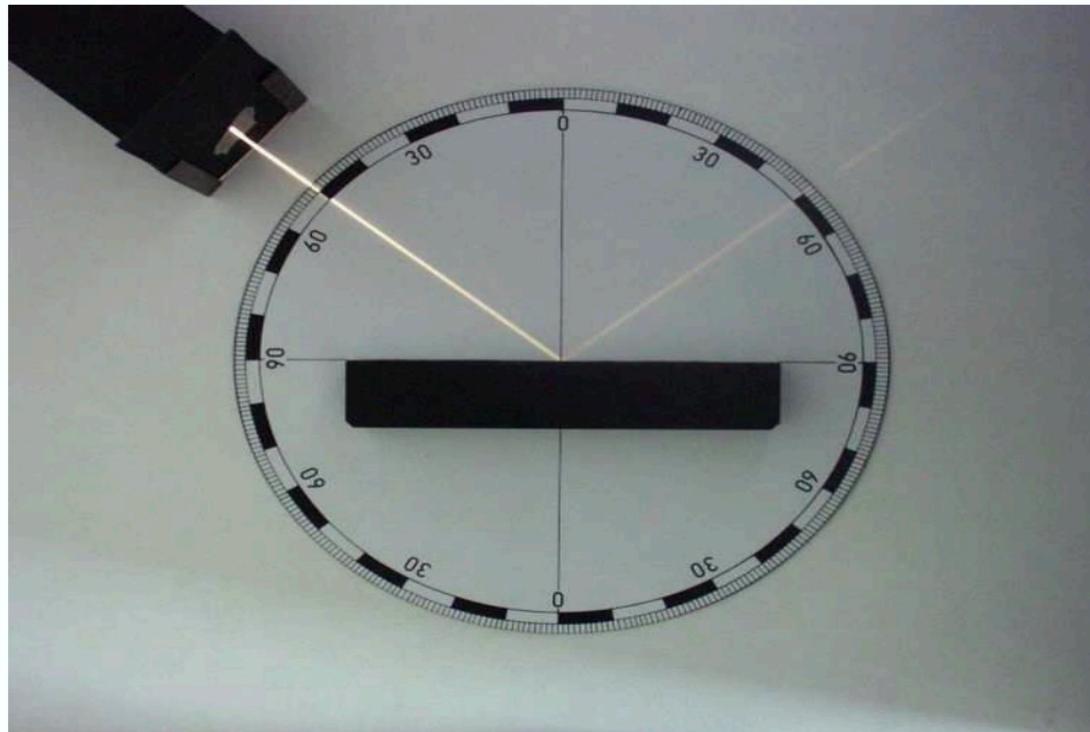
# Ley de Snell de la refracción

- Fue descubierta experimentalmente por Willebrod Snell en 1621.
- Y dice que los ángulos de incidencia y refracción vienen relacionados por:  $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$



# Reflexión

- La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial.



# Ángulo crítico

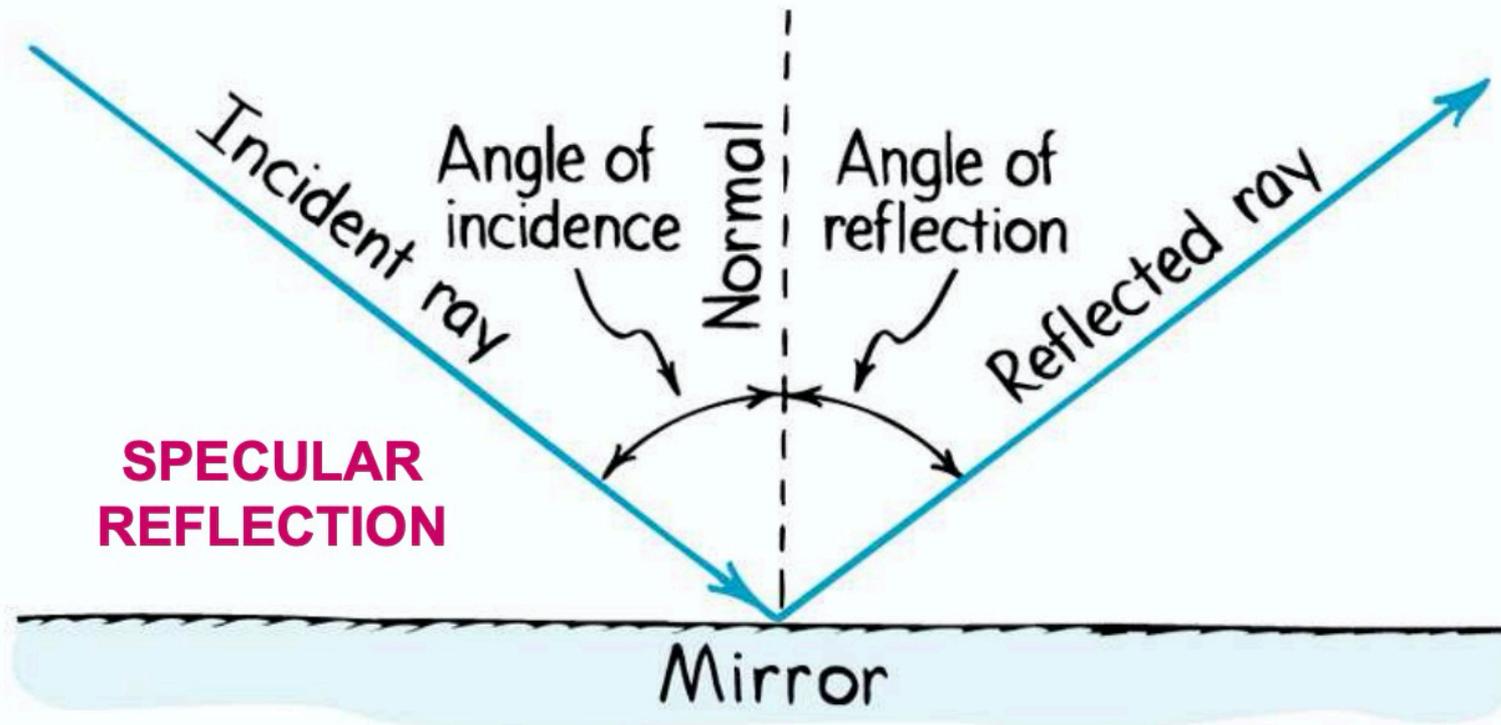
- El ángulo crítico se define como aquel ángulo de incidencia para el cual, el ángulo de refracción es  $90^\circ$
- Si hago  $\theta_2 = 90^\circ$  en la ley de Snell, podemos ver que el ángulo crítico viene dado por:

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_c = n_2 \operatorname{sen} 90^\circ = n_2 \cdot 1$$

- Luego tenemos que  **$\operatorname{sen} \theta_c = n_2 / n_1$**

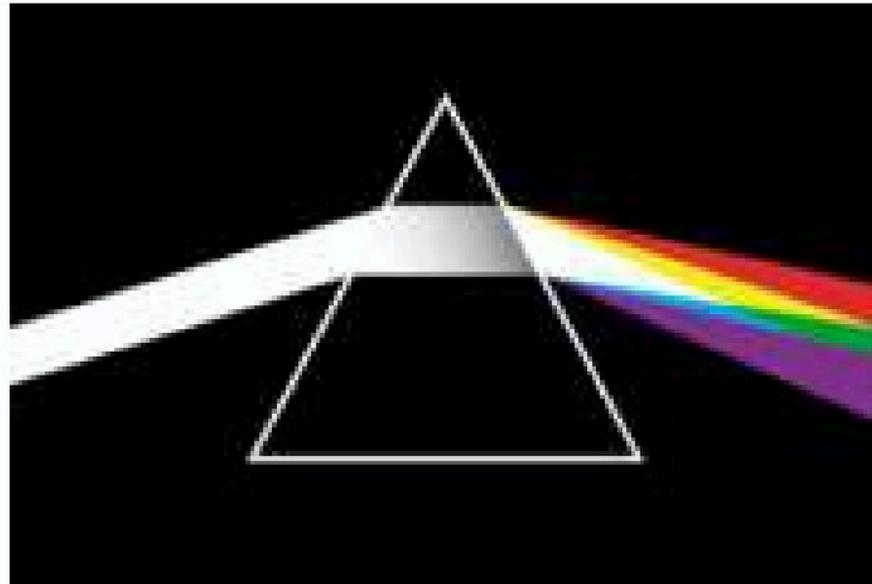
# Ley de la reflexión

En una reflexión total o reflexión especular el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión



# Dispersión

- La dispersión de la luz es un fenómeno que se produce cuando un rayo de luz compuesta se refracta en algún medio (por ejemplo un prisma), quedando separados sus colores constituyentes.



- La causa de que se produzca la dispersión es que el índice de refracción disminuye cuando aumenta la longitud de onda, de modo que las longitudes de onda más largas (rojo) se desvían menos que las cortas (azul).

