

# Óptica

## Física 2 B y G

Introducción  
Huygens  
Reflexion  
Refraccion

## Antes de empezar

- [materias.df.uba.ar/f2bygb2018c1](http://materias.df.uba.ar/f2bygb2018c1)
  - Cronograma (Teóricas pptx)
  - Guías
  - Material Adicional
- Practicas: Guillermo Solovey / Claudio Archubi
- Parciales:
  - 1ero Viernes 11 Mayo
  - 2do Viernes 29 Junio
  - Recup1ero Viernes 6 de Julio
  - Recup 2do Viernes 13 de Julio

## Antes de empezar

- “Optics” Eugene Hecht (5ed)
- “Fundamentos de Óptica”, F.A. Jenkins y HE. White (Ed.Aguilar)
- “Física para la ciencia y la tecnología”, P.Tipler y G. Mosca

## Qué es la luz?

En principio no sé, pero...

1. Se produce en algún lugar
2. Viaja
  - viaja en el vacío
  - atraviesa materiales (gases, líquidos, sólidos)
  - se refleja / refracta en interfaces
  - puede presentar fenómenos de difracción e interferencia
3. Transporta energía
4. Puede ser detectada (interactúa con la materia)

Por qué debería interesarles?  
Muy posiblemente a lo largo de sus carreras deban lidiar con algunos de estos aspectos. Cada uno de estos puntos involucra a un sistema físico que es posible interrogar, conociendo los mecanismos y propiedades físicas involucradas.

## Un muy poco de historia...

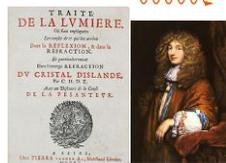
- Euclides (300 AC) habla de propagación rectilínea de la luz
- Aristófanes en su comedia las “Las nubes” menciona “...vidrio que hace arder...”
- Séneca (50AC) cuenta sobre un “...globo de vidrio lleno de agua” para magnificar imágenes

- Galileo (1564-1641) telescopio, con lentes pulidas a mano
- Janssen (1588-1632) microscopio compuesto
- Kepler (1611) en su *Dioptrice* estudia refracción y descubre lo que hoy se conoce como *refracción total interna*.
- Snell (1621) Formaliza lo que hoy se conoce como ley de refracción

si...pero qué es la luz?

## Huygens vs Newton

La luz es una onda!



1678

vs

La luz está compuesta por corpúsculos!



1709



## Dualidad onda-partícula

LUZ

**onda**

Wave impinges on a narrow slit  
Wave interference  
Wave impinges on a broad slit  
Barrier is longer than the wavelength

**partícula**

Adoptando el concepto ondulatorio no se podía explicar porqué luz de **baja frecuencia**, sin importar su **intensidad**, no arrancaba electrones, mientras que luz de **alta frecuencia** sí lo hacía.  
En 1905 Einstein introdujo la idea de **fotón**: partícula, sin masa en reposo, que lleva cantidad de movimiento y una energía  $E=h\nu$



## Dualidad onda-partícula

LUZ

- I. La realidad es que la naturaleza de la luz **no encaja** precisamente en el concepto de onda ni en el de partícula.
- II. La luz es otra cosa.
- III. Sin embargo, como nos sentimos cómodos con dichos conceptos (son los que el lenguaje de la física viene usando con éxito desde siempre) podemos utilizar uno u otro enfoque, cuando sea apropiado, para describir ciertos aspectos de interés relacionados con fenómenos luminicos.
- IV. Lo mismo sucede en realidad con la descripción cuántica de partículas...



## Teoria corpuscular



- ✓ La luz se propaga en línea recta
- ✓ Se puede propagar en el vacío (a diferencia de ondas mecánicas, únicas conocidas en esa época)
- ✓ Es posible explicar reflexión y refracción

Force Pulls Particles into Medium  
Particles  
Opposite Force Pulls Particles From Medium



## Teoria corpuscular



- ✓ La luz se propaga en línea recta
- ✓ Se puede propagar en el vacío (a diferencia de ondas mecánicas, únicas conocidas en esa época)
- ✓ Es posible explicar reflexión y refracción

Force Pulls Particles into Medium  
Particles  
Opposite Force Pulls Particles From Medium

Wave impinges on a broad slit

**WARNING**

- Según Newton *la luz no difractaba*: objetos iluminados producen sombra. La teoría corpuscular explicaba por qué sucedería esto con la luz, a diferencia del sonido (onda mecánica).
- La teoría no podía explicar fácilmente la ocurrencia conjunta de reflexión y refracción



## Teoría ondulatoria



Para Huygens la luz es una onda

dipper moved up and down by motor  
circular wavefront  
spherical dipper  
shape of waves  
direction of waves

straight dipper  
dipper moved up and down by motor  
shape of waves  
plane wavefront  
direction of waves

- La forma de la onda describe la perturbación instante a instante.
- Es posible reconocer puntos en el espacio que oscilan en fase. Definen lo que se conoce como **frente de onda**.
- La onda (i.e. la perturbación) viaja en el tiempo a una dada velocidad. Los frentes de onda se desplazan.
- Es posible describir la dirección de la propagación utilizando el concepto de **rayo**: dirección de propagación. Siempre resulta perpendicular a los frentes de onda.



## Teoría ondulatoria



Onda esférica en 3 dimensiones:  
Perfil de perturbaciones que se propaga en el espacio (qué es lo que se propaga en el caso de la luz?)

fuelle puntual

direccion de propagación (rayo)

frente de onda

## En serio...qué es la luz?



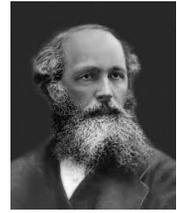
James Maxwell

- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.
- Sus ecuaciones predecían que los campos eléctricos y magnéticos podían propagarse como ondas viajeras...aun por vacío.
- La teoría predecía que la velocidad de propagación de dichas ondas resultaba:
 
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$
- Utilizando los valores experimentales para  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$  Maxwell se dio cuenta que:

"...Esta velocidad es tan cercana a la de la luz\* que tenemos razones para concluir que la luz en sí misma es una **perturbación electromagnética** que tiene la forma de una onda que se propaga a través del espacio siguiendo las leyes del electromagnetismo..."

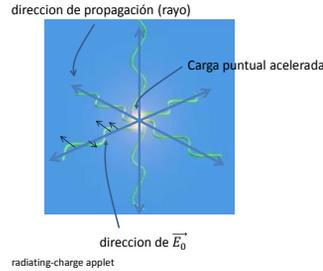
\*  $c = 300000 \text{ km/s}$

## En serio...qué es la luz?



James Maxwell

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



"...Esta velocidad es tan cercana a la de la luz\* que tenemos razones para concluir que la luz en sí misma es una **perturbación electromagnética** que tiene la forma de una onda que se propaga a través del espacio siguiendo las leyes del electromagnetismo..."

\*  $c = 300000 \text{ km/s}$

## Espectro electromagnético

Descripción matemática de la onda que se propaga (la vamos a ver en detalle más adelante)

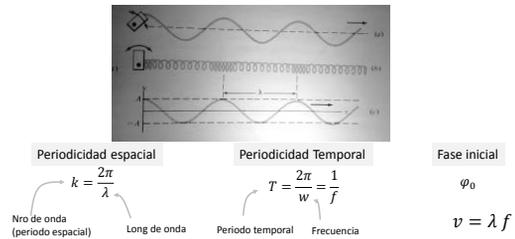
$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



## Espectro electromagnético

Descripción matemática de la onda que se propaga (la vamos a ver en detalle más adelante)

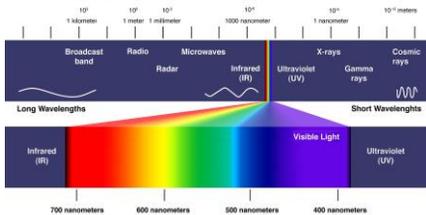
$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



## Espectro electromagnético

Descripción matemática de la onda que se propaga (la vamos a ver en detalle más adelante)

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$

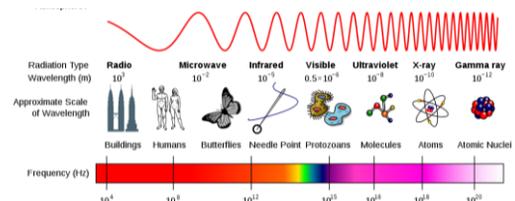


$$c = \lambda f$$

## Espectro electromagnético

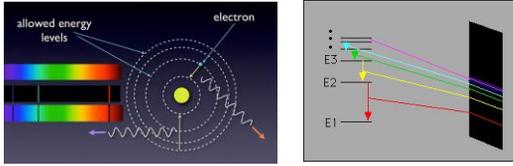
Descripción matemática de la onda que se propaga (la vamos a ver en detalle más adelante)

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



$$c = \lambda f$$

## Atomos y luz

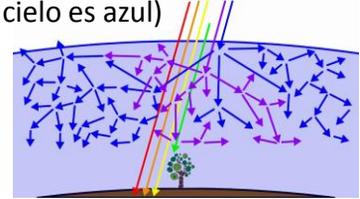


- Los electrones ligados al átomo sólo pueden tener ciertas energías
- A baja temperatura se encuentran en los niveles más bajos, pero los electrones más externos pueden ser excitados (es decir, aparecer en estados de alta energía) por colisiones o por interacción con radiación EM
- Los electrones solo pueden emitir o absorber energía de *a paquetes* (cuantos):

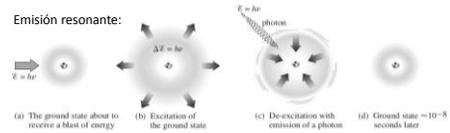
$$\Delta E = hf$$

## Scattering de Rayleigh (o por qué el cielo es azul)

- Electrones de las moléculas de la atmósfera (oxígeno, nitrógeno, etc) pueden absorber y reemitir luz de frecuencias UV-azul.
- No interactúan con radiación de otras longitudes de onda.



Emisión resonante:



## Principio de Huygens



- No estaba claro cual era la naturaleza de la perturbación, ni el medio por el cuál se propagaba...pero **Huygens** propuso un **método geométrico** para entender su propagación. Dijo: "...si supongo conocida la posición del frente de onda de la onda luminica en un determinado instante  $t_0$ , puedo calcularla para un tiempo siguiente  $t$  :

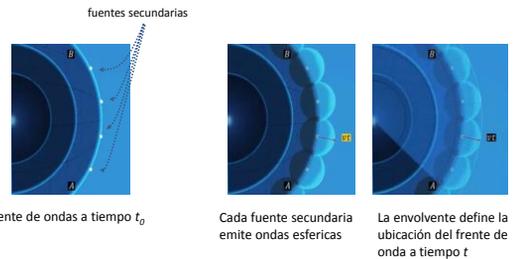
"...Cada punto del frente de ondas actua como un nuevo foco emisor secundario que genera ondas secundarias esféricas. Estas onditas se propagan a la velocidad de la onda en el medio. La posición de la superficie tangente a todas las onditas secundarias coincide con la posición que tendrá el frente de onda un instante despues"



"ah - agregó- tambien supongo que las fuentes secundarias emiten principalmente hacia la direccion de propagacion y nada hacia atrás"

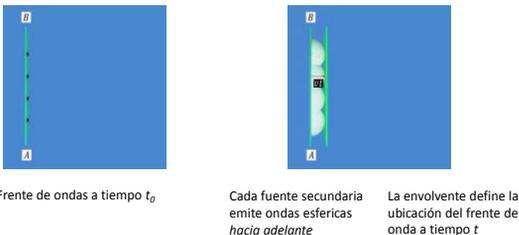
## Propagación en medio homogéneo

Supongamos un frente de ondas esférico propagándose en un medio homogéneo



## Propagación en medio homogéneo

Supongamos un frente de ondas plano propagándose en un medio homogéneo



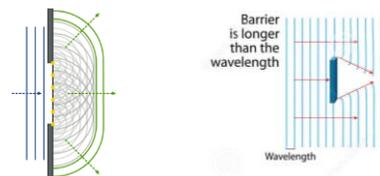
Frente de ondas a tiempo  $t_0$

Cada fuente secundaria emite ondas esfericas hacia adelante

La envoltura define la ubicación del frente de onda a tiempo  $t$

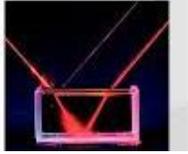
## Propagación frente a obstáculos

Utilizando el principio de Huygens era posible entender fácilmente cómo se propagaba la onda cuando se le anteponían obstáculos. Que bloqueaban la contribución de alguna porción de *onditas secundarias*



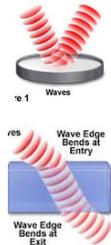
## Propagación y medios no homogéneos

- Utilizando el principio de Huygens, la teoría ondulatoria de la luz podía dar cuenta de fenómenos de **reflexión**, **refracción** que se producen toda vez que la propagación involucra atravesar una **interfase entre medios de propiedades diferentes**



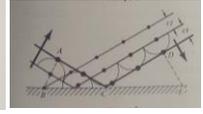
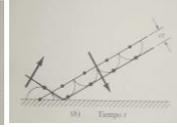
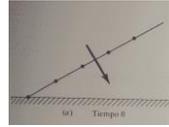
Al atravesar una interfase en general siempre se

- pueden reconocer ondas:
  - incidente
  - reflejada
  - refractada.



## Reflexión

- Utilizando el principio de Huygens, la teoría podía dar cuenta de fenómenos de **reflexión**...



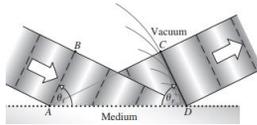
Un frente de onda alcanza una superficie reflectante

Luego de un tiempo  $t$  las ondas secundarias de las 5 fuentes secundarias recorrieron una distancia  $c \cdot t$ . Queda definido un nuevo frente de onda.

Las ondas del frente de ondas de (b) definen un nuevo frente a tiempo  $2t$ .



## Ley de reflexión



- AB: parte de un frente de onda incidente
- CD: parte de un frente de onda reflejado, envoltorio de todas las ondas emitidas por AB luego de un tiempo  $|BD|/c$
- De la figura se ve entonces que  $|BD|=|AC|$

$$\sin \theta_i = \frac{|BD|}{|AD|} = \frac{|AC|}{|AD|} = \sin \theta_r$$

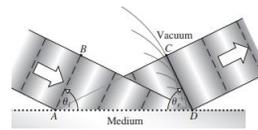
$$\sin \theta_i = \sin \theta_r$$

$$\theta_i = \theta_r$$

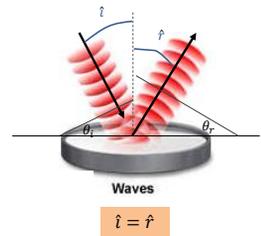
- Consideramos los triángulos ABD y ACD

$$\sin \theta_i = \frac{|BD|}{|AD|} \quad \sin \theta_r = \frac{|AC|}{|AD|}$$

## Ley de reflexión



$$\theta_i = \theta_r$$



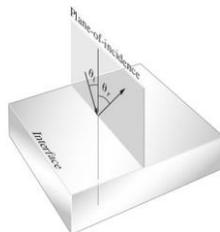
$$\hat{i} = \hat{r}$$

El ángulo  $\hat{i}$  que forma el rayo incidente con la normal es igual al que forma el rayo reflejado  $\hat{r}$

## Ley de reflexión

En términos de rayos: Ley de reflexión

- En el proceso de reflexión, el **rayo incidente**, la **normal a la interfase** y el **rayo reflejado** se encuentran contenidos en un mismo plano.
- El ángulo  $\hat{i}$  que forma el rayo incidente con la normal es igual al ángulo  $\hat{r}$  que forma el rayo reflejado con la misma



## Casos para reflexionar 1

Espejos/superficies ópticamente planas

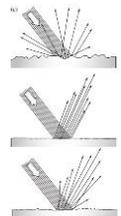
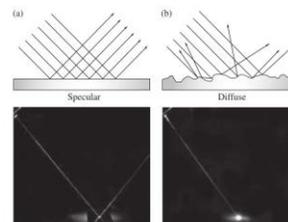


Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection on a surface. (c) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic drawing represents a range of reflections between the two that are likely to be encountered.

## Casos para reflexionar 2

**Aviones furtivos:** Diseñados para evitar reflexión difusa de ondas de radar. La idea es que el radar no reciba emisión reflejada en el fuselaje de la nave.



Que tipo de reflexión debería querer favorecerse en esta tecnología?

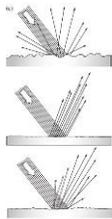
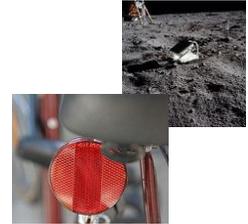
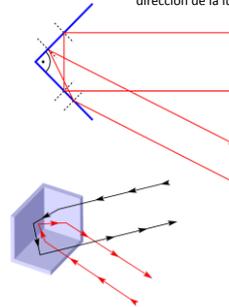


Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection. (c) Retroreflection. (d) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic is showing transmission in terms of reflections between the two that are likely to be encountered.

## Casos para reflexionar 3

**Retroreflectores** Arreglo de espejos que produce rayos reflejados en la dirección de la luz incidente

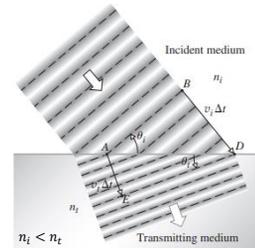


## Refracción

Ocurre cuando la luz **atraviesa una interfase** entre medios con diferentes propiedades ópticas: **diferente velocidad de propagación**.

Vel de propagación de la luz en el vacío:  $v = \frac{c}{n}$   
 Vel propagación de la luz en el medio:  $v$   
 Índice de refracción del medio:  $n$

Material	n
Vacío	1
Aire	1.0003
Agua	1.3333
Vidrio	1.5 (valor típico)
Diamante	2.4



## Ley de Snell

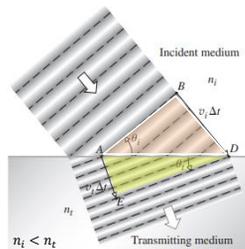
$$\sin \theta_i = \frac{|BD|}{|AD|} = \frac{v_t \Delta t}{|AD|}$$

$$\sin \theta_t = \frac{|AE|}{|AD|} = \frac{v_i \Delta t}{|AD|}$$

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

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{v_t \Delta t}{v_i \Delta t} = \frac{v_t}{v_i} = \frac{n_t}{n_i}$$

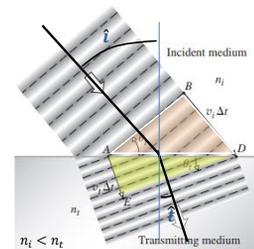
$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$



## Ley de Snell (versión rayos)

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

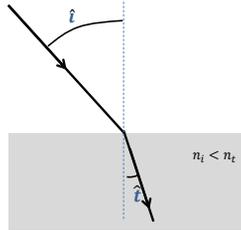
$$n_i \sin \hat{l} = n_t \sin \hat{t}$$



## Ley de Snell (versión rayos)

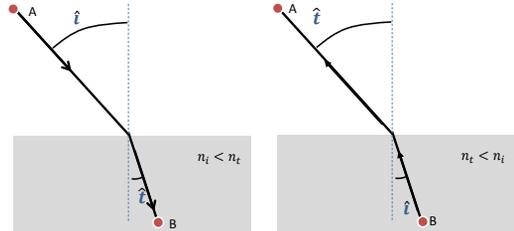
1. En el proceso de refracción, el **rayo incidente**, la **normal a la interfase** y el **rayo refractado** se encuentran contenidos en un mismo plano.
2. El ángulo  $\hat{i}$  que forma el rayo incidente con la normal se relaciona con el ángulo  $\hat{t}$  que forma el rayo refractado con la misma a través de la ley de Snell:

$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



## Ley de Snell e inversión temporal

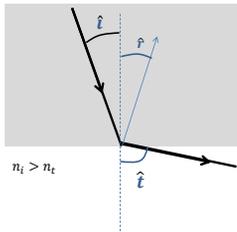
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



**Reversibilidad de los caminos ópticos:** La trayectoria que sigue un rayo de luz para, partiendo de un punto A alcanzar un punto B es la misma que la que sigue un rayo que, partiendo del punto B, alcanza el punto A

## Reflexión Total Interna

$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$

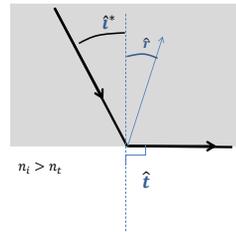


Supongamos que  $n_i > n_t$ . Que sucede si se incrementa el ángulo de incidencia **demasiado**?

$\hat{t} = 90$  *grados*

## Reflexión Total Interna

$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



Sea  $\hat{i}^*$  el ángulo de incidencia para el cual  $\hat{t} = \frac{\pi}{2}$

$$n_i \sin \hat{i}^* = n_t \sin \hat{t} = n_t$$

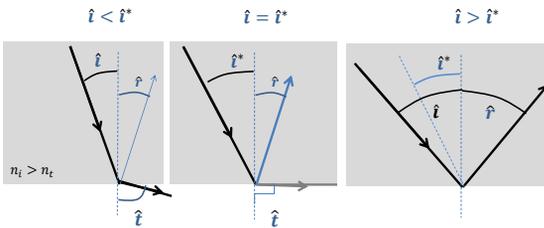
$$\sin \hat{i}^* = \frac{n_t}{n_i}$$

$$\hat{i}^* = \arcsin \frac{n_t}{n_i}$$

## Reflexión Total Interna

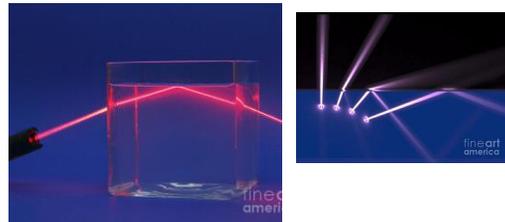
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$

Para ángulos de incidencia mayores al crítico **no hay onda transmitida**, la onda es reflejada por completo.



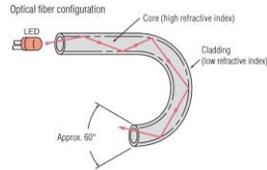
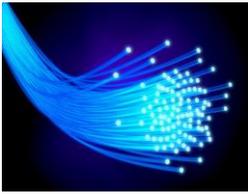
## Reflexión Total Interna

Para ángulos de incidencia mayores al crítico no hay onda transmitida, la onda es reflejada por completo.

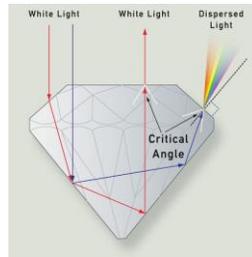


## RTI y comunicaciones

Las fibras ópticas son dispositivos que permiten transmitir información mediante la propagación de haces luminosos con muy poca dispersión sacando provecho del fenómeno de RTI



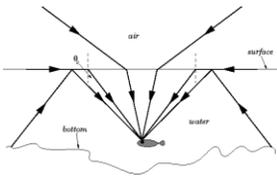
## RTI y Glamour



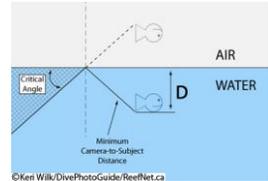
El alto índice de refracción del diamante hace que el ángulo crítico de la interfase diamante-aire sea muy chico. El corte y facetado provocan que puedan ocurrir numerosas RTI y que finalmente la luz emerja por la parte superior.

## La ventana de Snell

Para ángulos de incidencia mayores al crítico no hay onda transmitida, la onda es reflejada por completo.

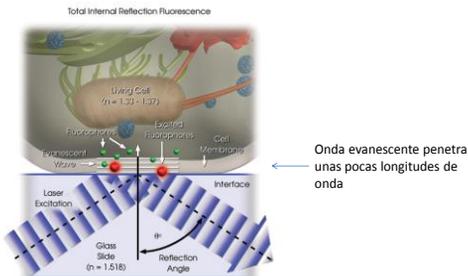


## RTI y fotografía



[www.divephotoguide.com/underwater-photographytechniques/articles/reflections](http://www.divephotoguide.com/underwater-photographytechniques/articles/reflections)

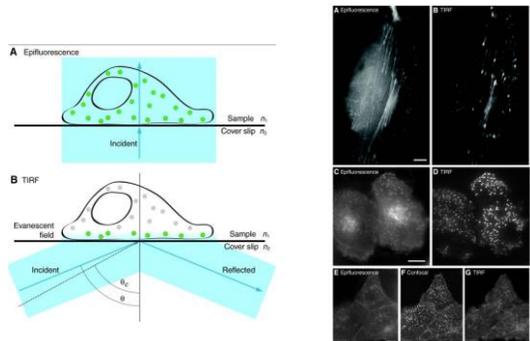
## RTI y microscopia



Onda evanescente penetra unas pocas longitudes de onda

Imaging with total internal reflection fluorescence microscopy for the cell biologist., J Cell Sci 2010, Matheyses & Rappoport

## RTI y microscopia



## Principio de Fermat

La trayectoria que sigue el rayo que conecta dos puntos dados es aquella que **minimiza la longitud del camino óptico** entre dichos puntos.

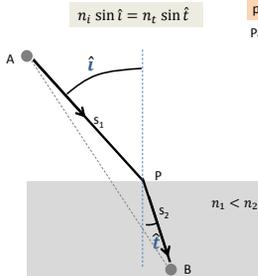
Para la trayectoria de la figura:  
Long.Camino Geométrico:  $s_1 + s_2$

Long.Camino Óptico:  $n_1 s_1 + n_2 s_2$

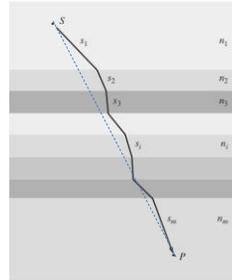
$$LCO = \frac{c}{v_1} s_1 + \frac{c}{v_2} s_2 = \text{Tiempo que tarda la luz en recorrer la trayectoria}$$

$$c \left( \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} \right) = c (t_1 + t_2)$$

La trayectoria que sigue el rayo que conecta dos puntos dados es aquella que **minimiza el tiempo que tarda la luz** en conectarlos



## Principio de Fermat

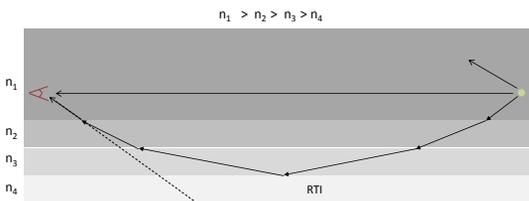


- La propagación a lo largo de diferentes medios puede estimarse a partir de la ley de Snell aplicada a cada interfase.
- La trayectoria que sigue el rayo que conecta dos puntos dados es aquella que **minimiza la longitud de camino óptico** entre dichos puntos (o equivalente, **minimiza el tiempo de recorrido de la luz** entre ambos puntos).

Camino geométrico:  $s_1 + s_2 + \dots + s_m$

Camino óptico:  $n_1 s_1 + n_2 s_2 + \dots + n_m s_m$

## Así se fabrica un espejismo



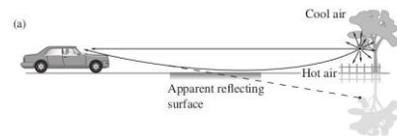
- Ambas trayectorias tienen similar LCO
- El observador vislumbra **dos** imágenes puntuales

Imagen virtual

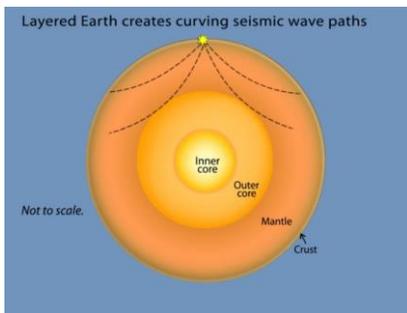
## Espejismos



El índice de refracción del aire disminuye con la temperatura.



## Curvado de ondas sísmicas

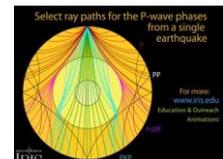
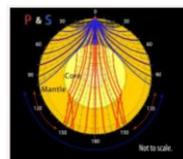


## Un poco de geo ...



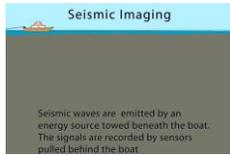
### Propagación de ondas en medios no homogéneos

Toda vez que una perturbación que se propaga alcanza una discontinuidad, i.e. atraviesa una **interfase entre medios de propiedades diferentes**, parte de la energía es reflejada y parte atraviesa la interfase hacia el nuevo medio

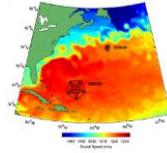


## Un poco más de geo ...

### Propagación de ondas en medios no homogéneos



Ocean Acoustic Tomography



## Bigliografia

- Hecht, Optics 5ed
- [www.iris.edu/hq/inclass/search#type=1](http://www.iris.edu/hq/inclass/search#type=1)
- wikipedia