

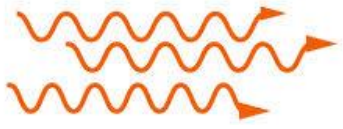
15 . Propagación 101

Introducción

Huygens

Reflexion

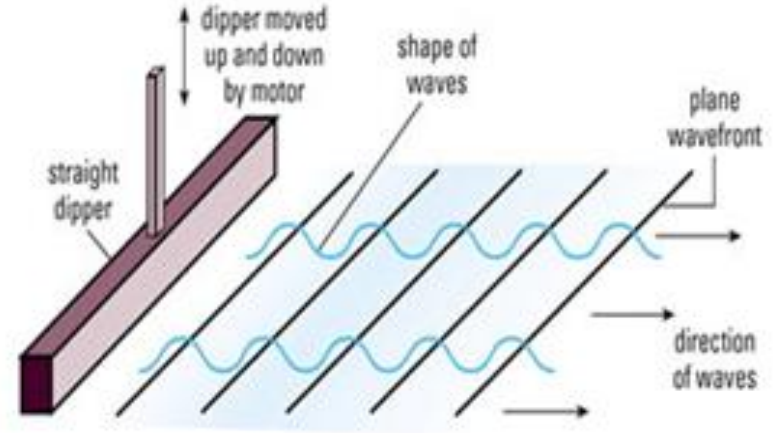
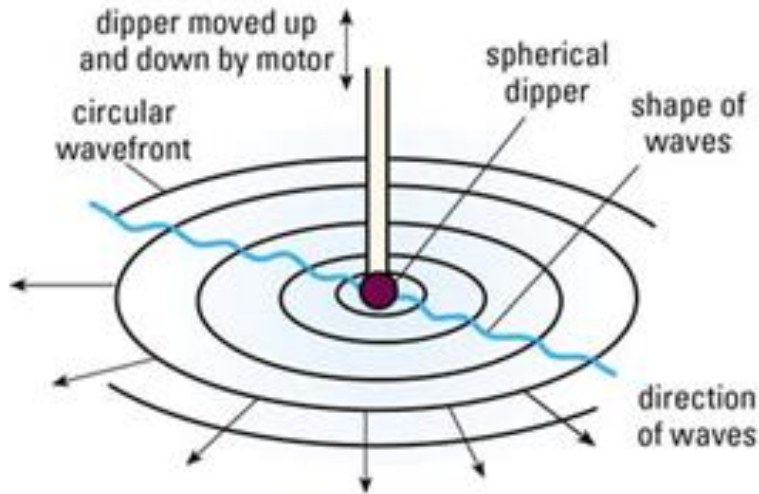
Refraccion



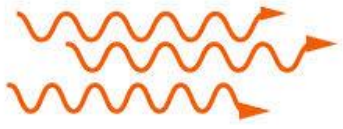
Teoría ondulatoria



Para Huygens la luz es una onda



- 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.

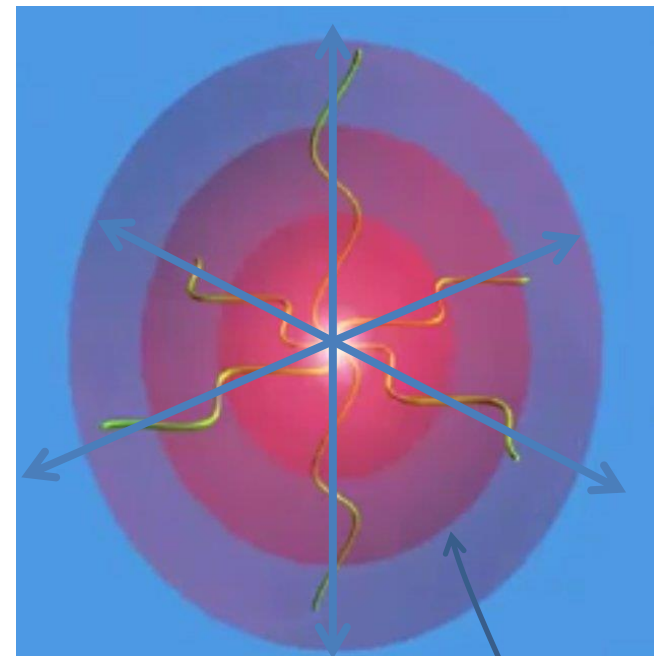
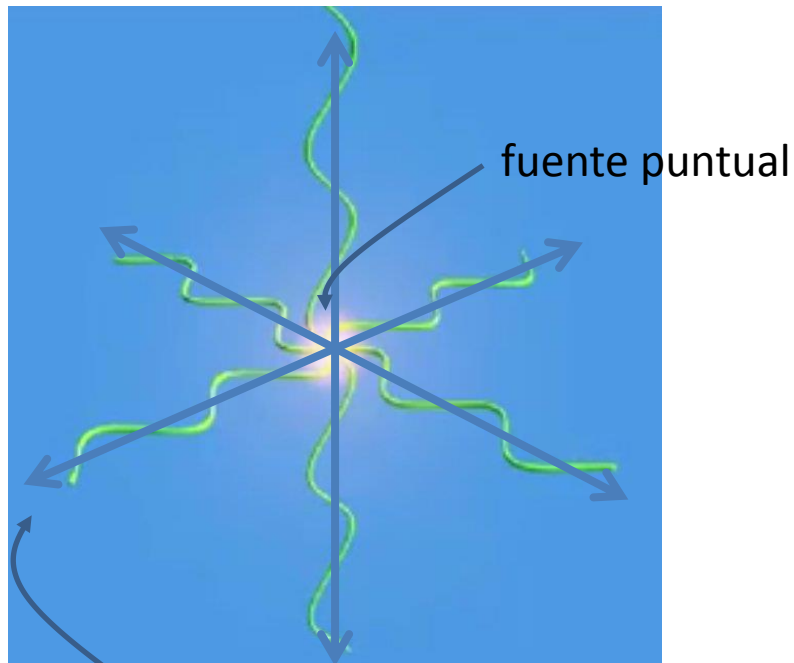


Teoría ondulatoria



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?)



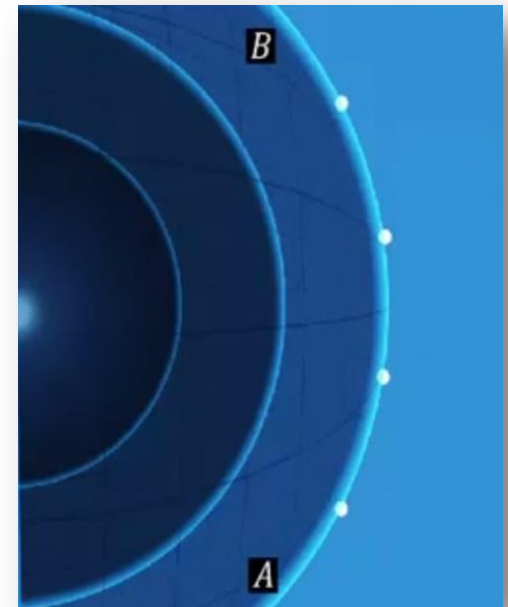
Principio de Huygens



- ✓ 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 lumínica en un determinado instante t_0 , puedo calcularla para un tiempo siguiente t :

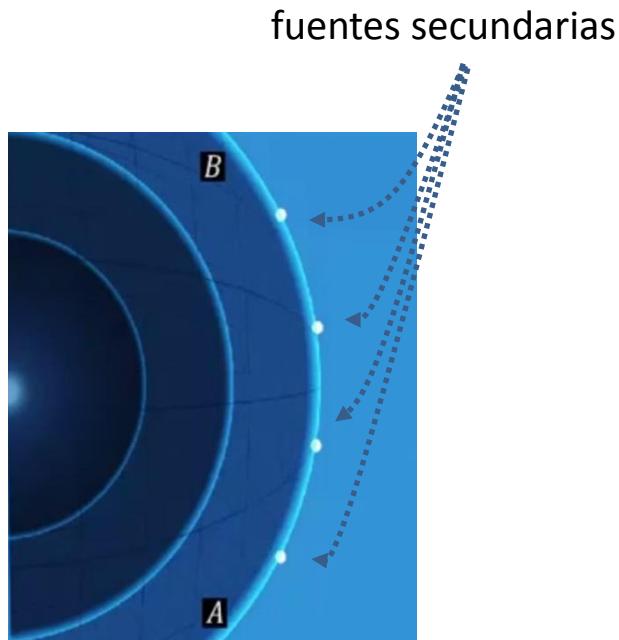
"...Cada punto del frente de ondas actua como un nuevo foco emisor secundario que genera ondas secundarias esfericas. Estas onditas se propagan a la velocidad de la onda en el medio. La posición de la superficie tangente a todas las onditas secundarias coincide con la posición que tendrá el frente de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

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

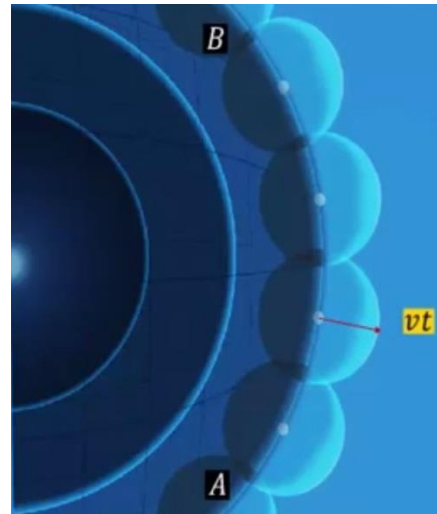


Propagación en medio homogéneo

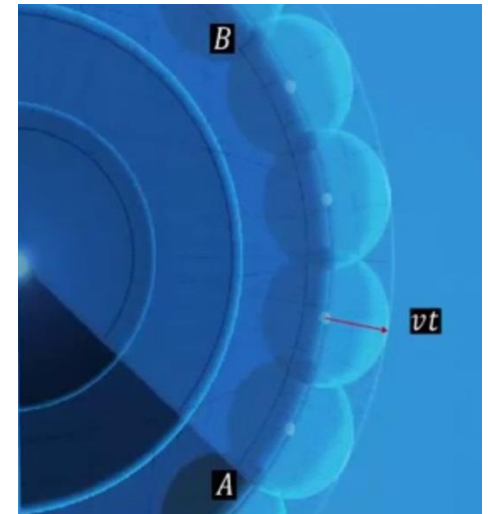
Supongamos un frente de ondas esférico propagándose en un medio homogéneo



Frente de ondas a tiempo t_0



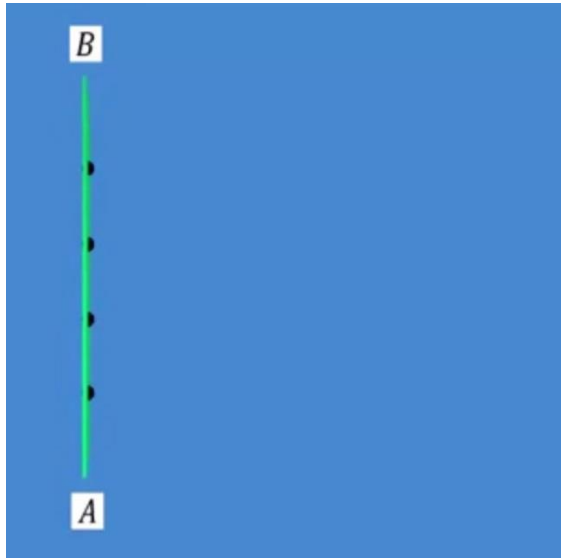
Cada fuente secundaria emite ondas esféricas



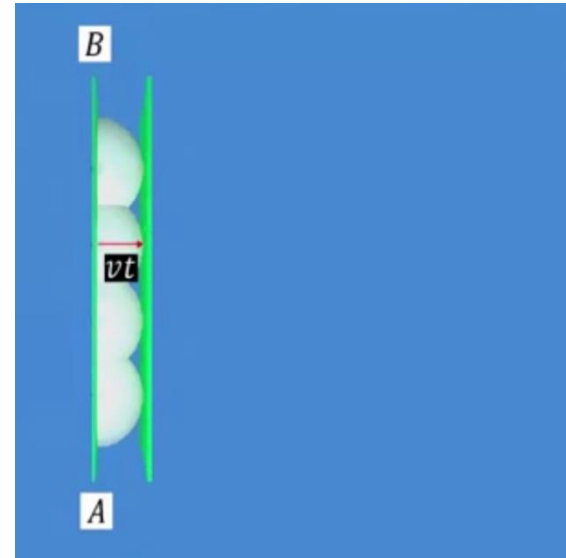
La envolvente define la ubicación del frente de onda a tiempo t

Propagación en medio homogéneo

Supongamos un frente de ondas plano propagándose en un medio homogéneo



Frente de ondas a tiempo t_0

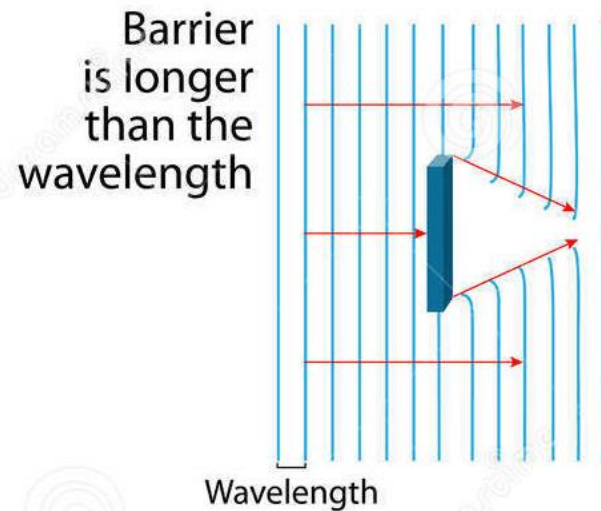
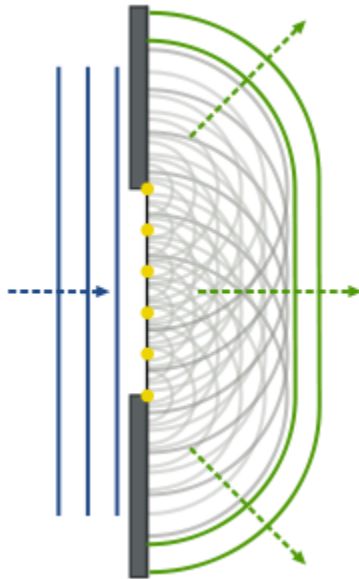


Cada fuente secundaria
emite ondas esféricas
hacia adelante

La envolvente define la
ubicación del frente de
onda a tiempo t

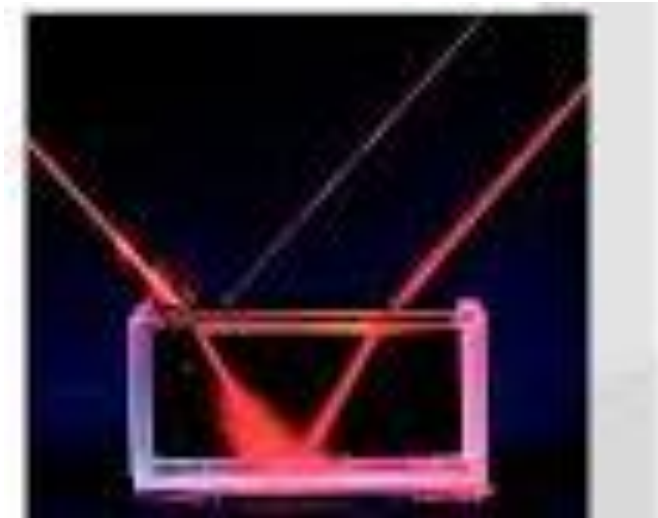
Propagación frente a obstáculos

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*



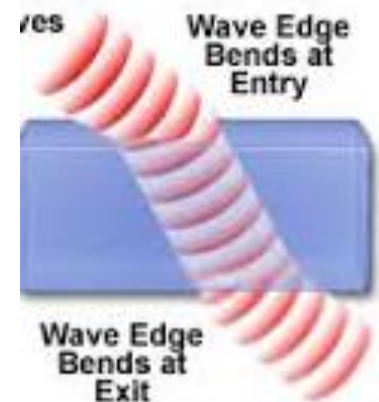
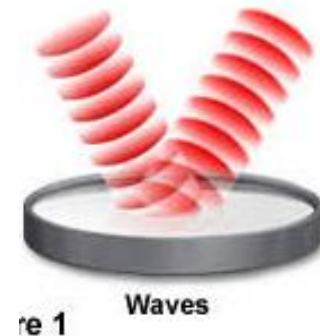
Propagación y medios no homogéneos

- ✓ 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:

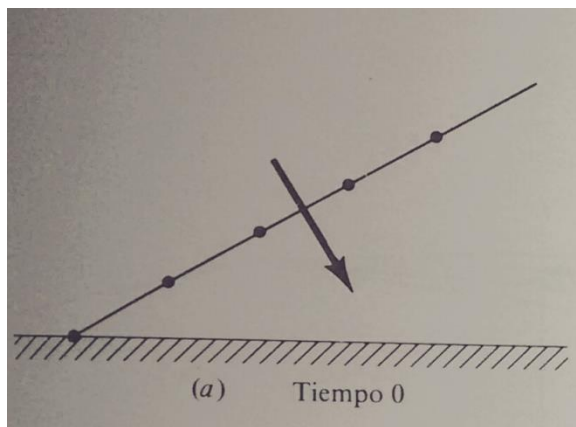
- incidente
- reflejada
- refractada.



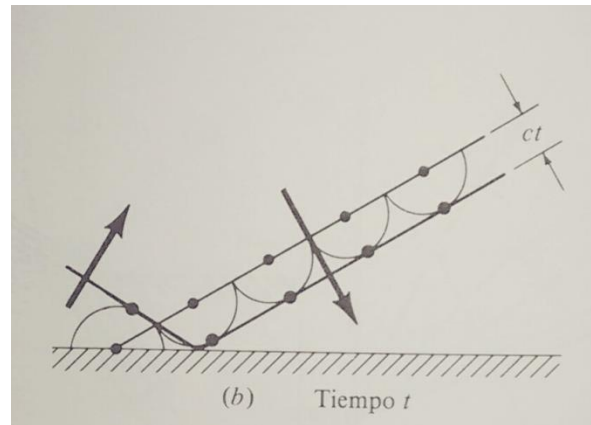


Reflexión

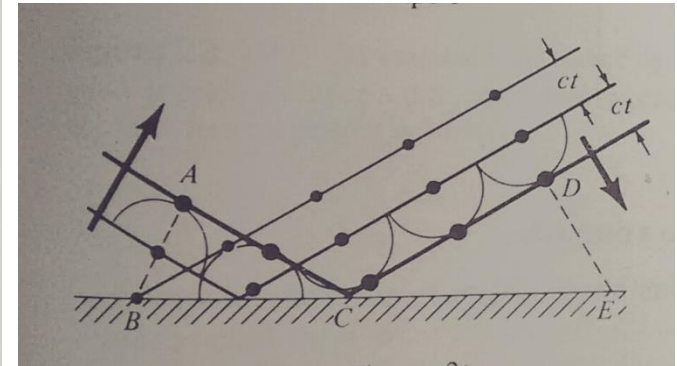
- ✓ Utilizando el principio de Huygens, la teoría podía dar cuenta de fenómenos de **reflexión....**



Un frente de onda alcanza una superficie reflectante



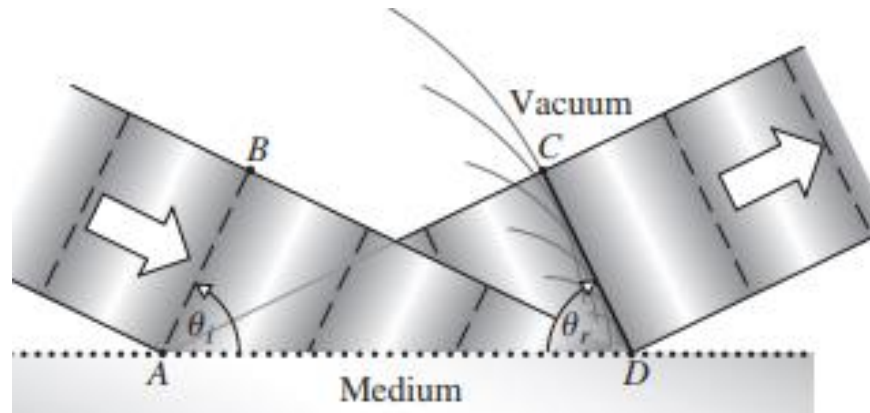
Luego de un tiempo t las ondas secundarias de las 5 fuentes secundarias recorrieron una distancia $c \cdot t$. Queda definido un nuevo frente de onda.



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, envolvente de todas las onditas emitidas por AB luego de un tiempo $|BD|/c$
- De la figura se ve entonces que $|BD| = |AC|$
- Consideramos los triángulos ABD y ACD

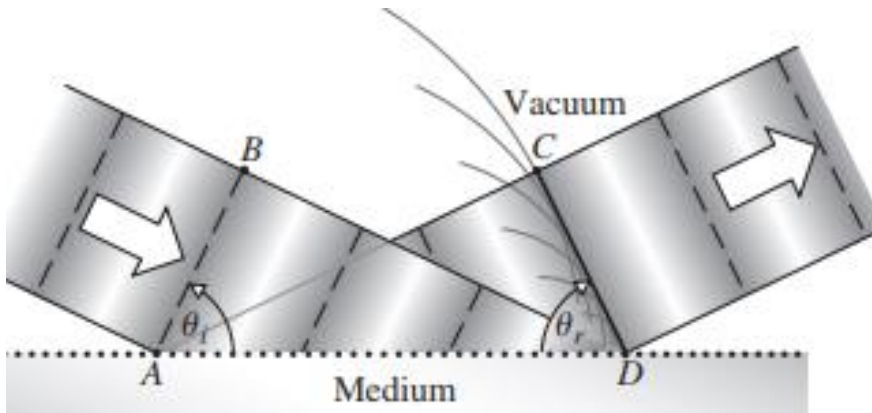
$$\frac{\sin \theta_i}{|BD|} = \frac{\sin \theta_r}{|AC|}$$

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

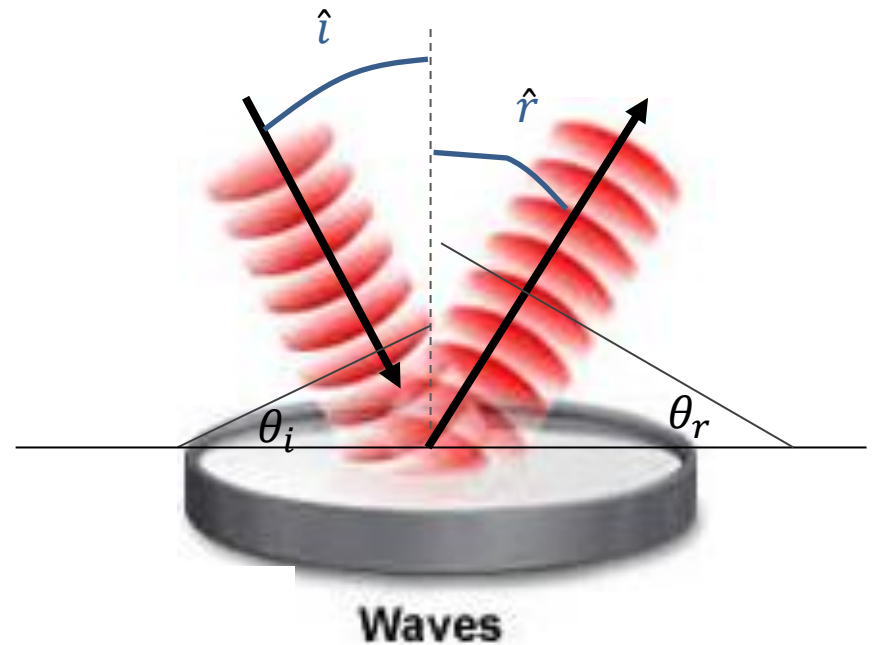
$$\theta_i = \theta_r$$

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

Ley de reflexión



$$\theta_i = \theta_r$$



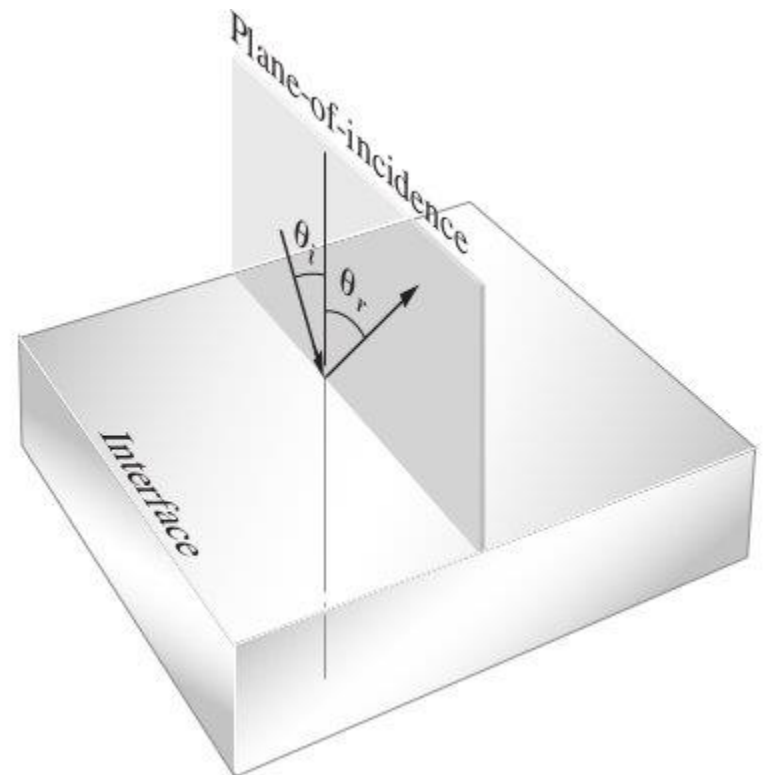
$$\hat{i} = \hat{r}$$

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

1. En el proceso de reflexión, el **rayo incidente**, la **normal a la interfase** y el **rayo reflejado** se encuentran contenidos en un mismo plano.
2. 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

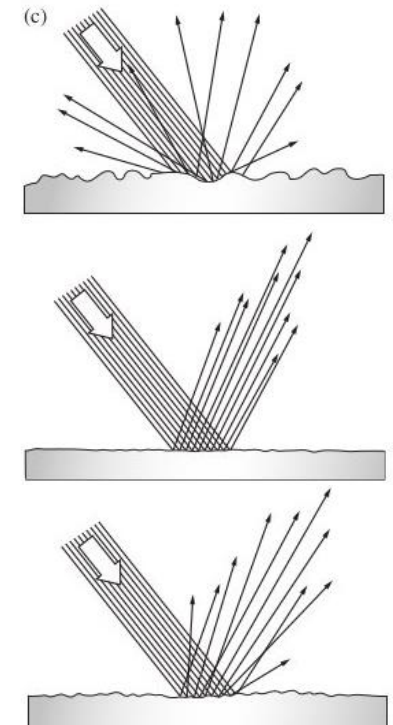
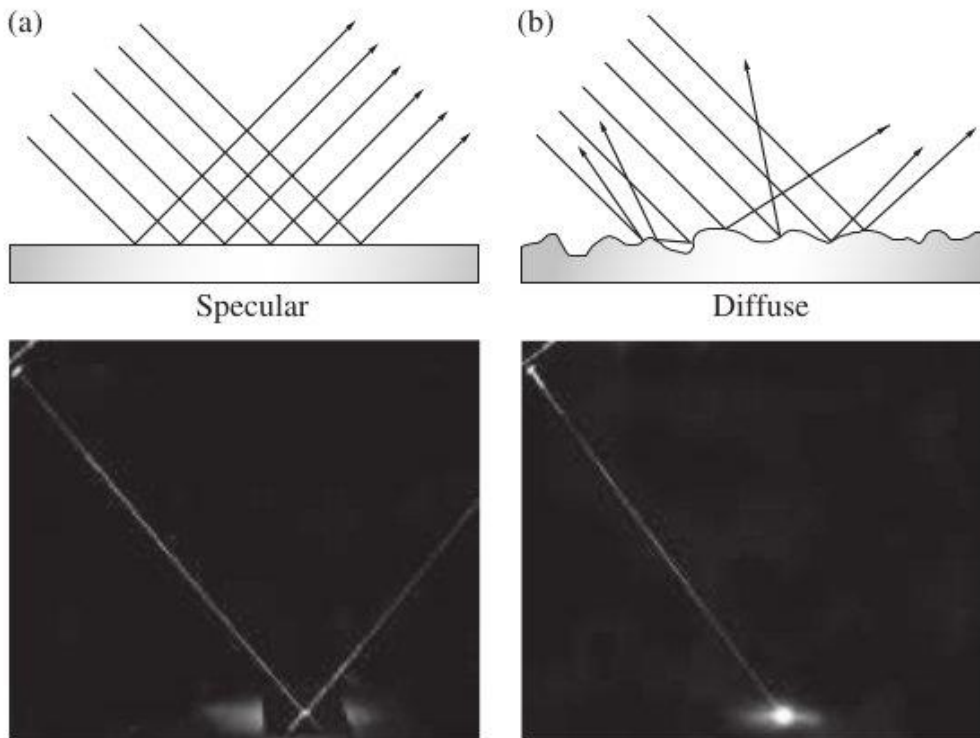


Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection. (Donald Dunitz) (c) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic drawing represents a range of reflections between the two that are likely to be encountered.

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.

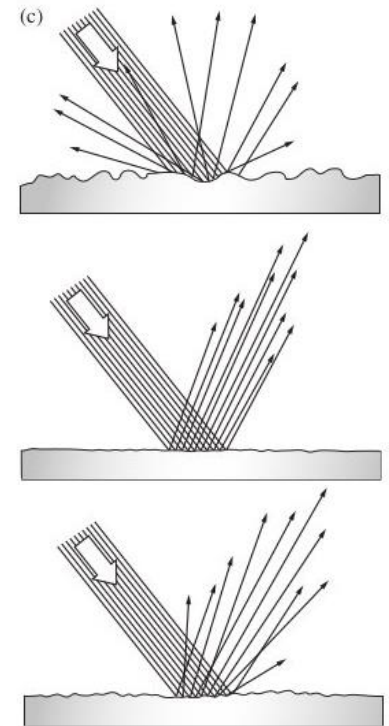


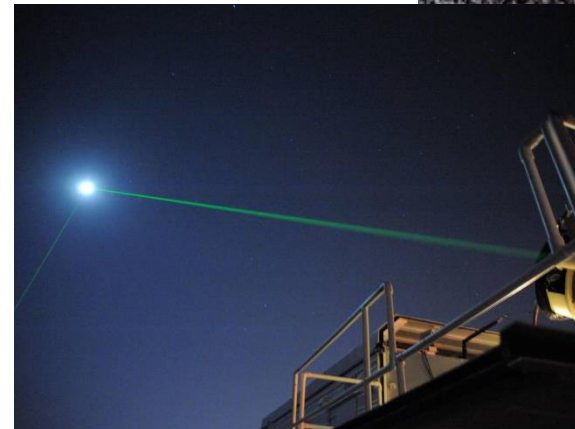
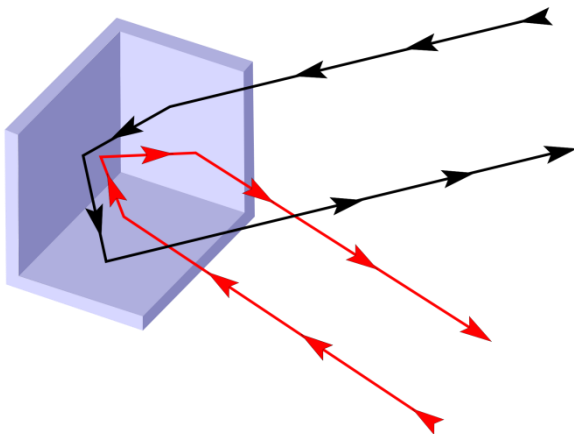
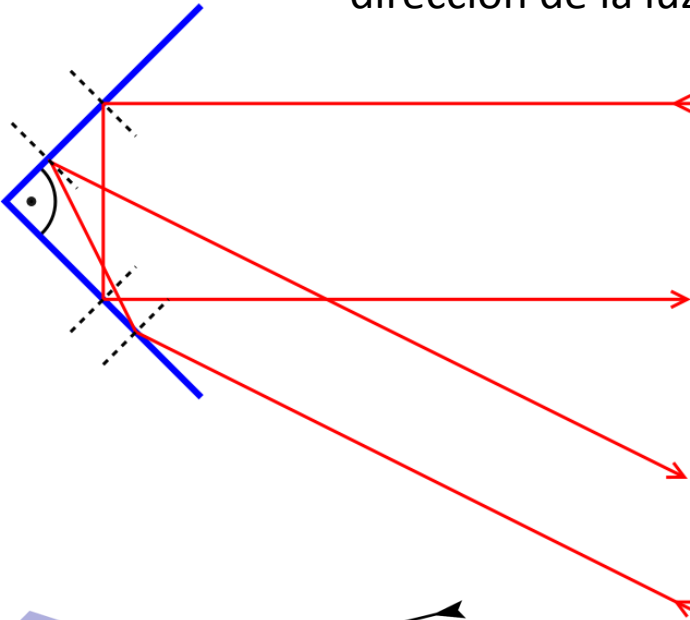
Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection. (Donald Dunitz) (c) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic drawing represents a range of reflections between the two that are likely to be encountered.

Que tipo de reflexión debería querer favorecerse en esta tecnología?

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**.

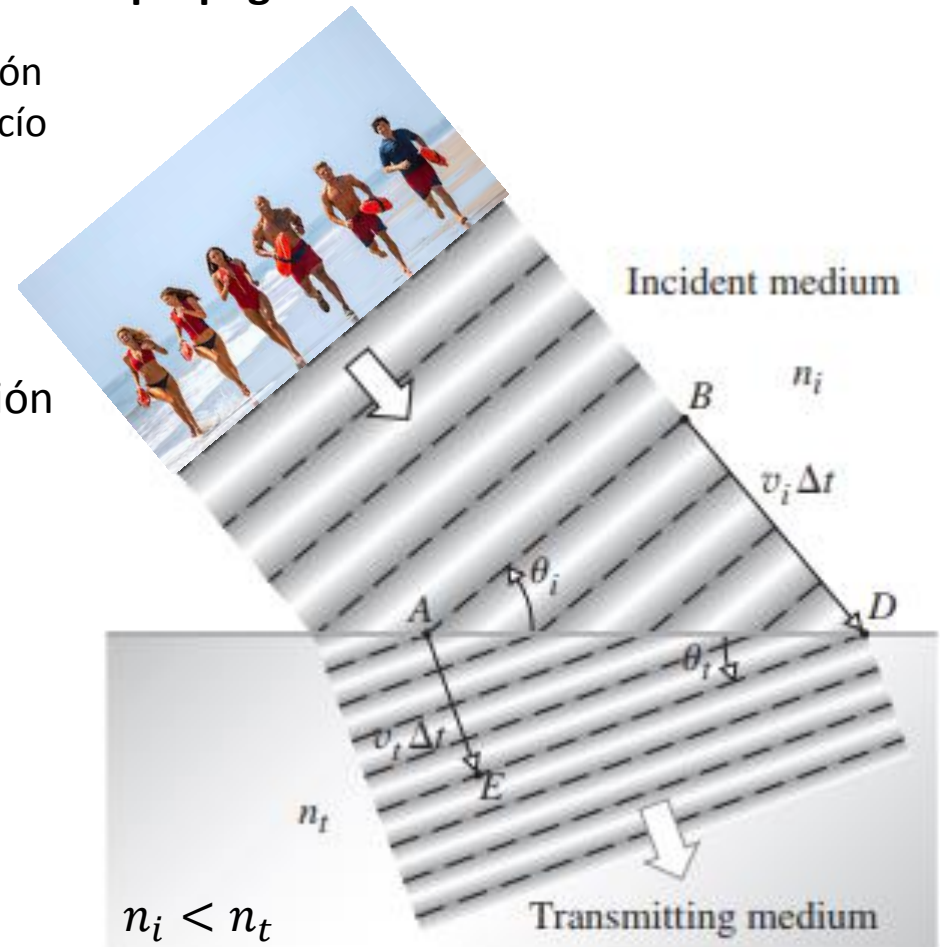
$$v = \frac{c}{n}$$

Vel de propagación
de la luz en el vacío

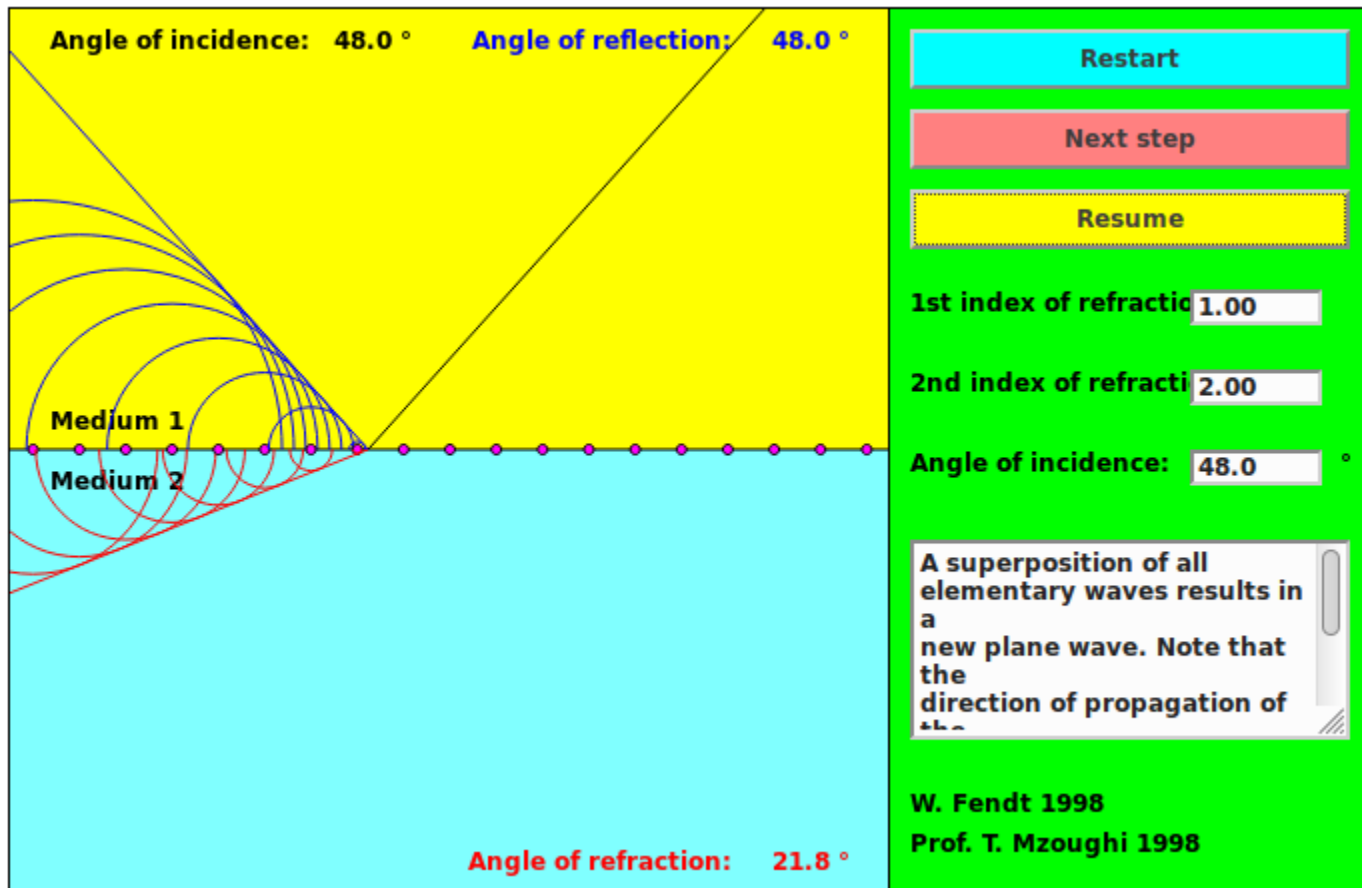
Índice de refracción
del medio

Vel propagación de la
luz en el medio

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

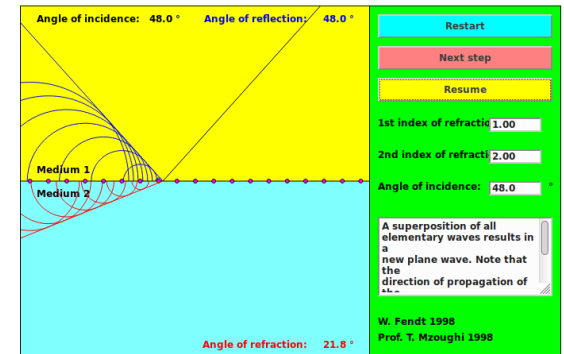


Refracción



http://www.walter-fendt.de/html5/phen/refractionhuygens_en.htm

Ley de Snell



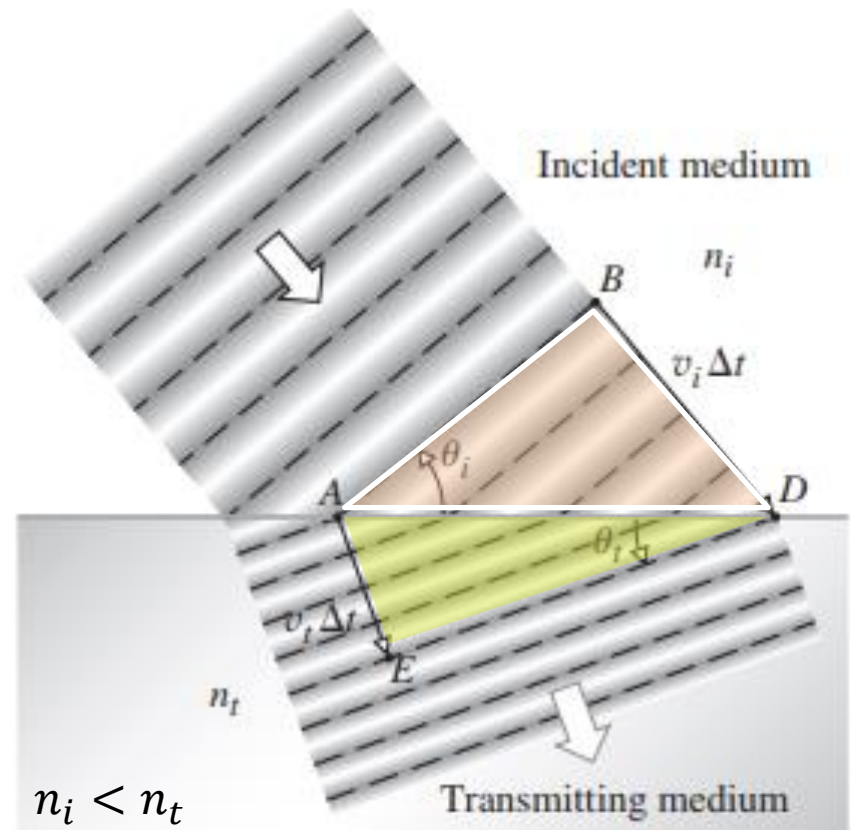
$$\sin \theta_i = \frac{|BD|}{|AD|} = \frac{v_i \Delta t}{|AD|}$$

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

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

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

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

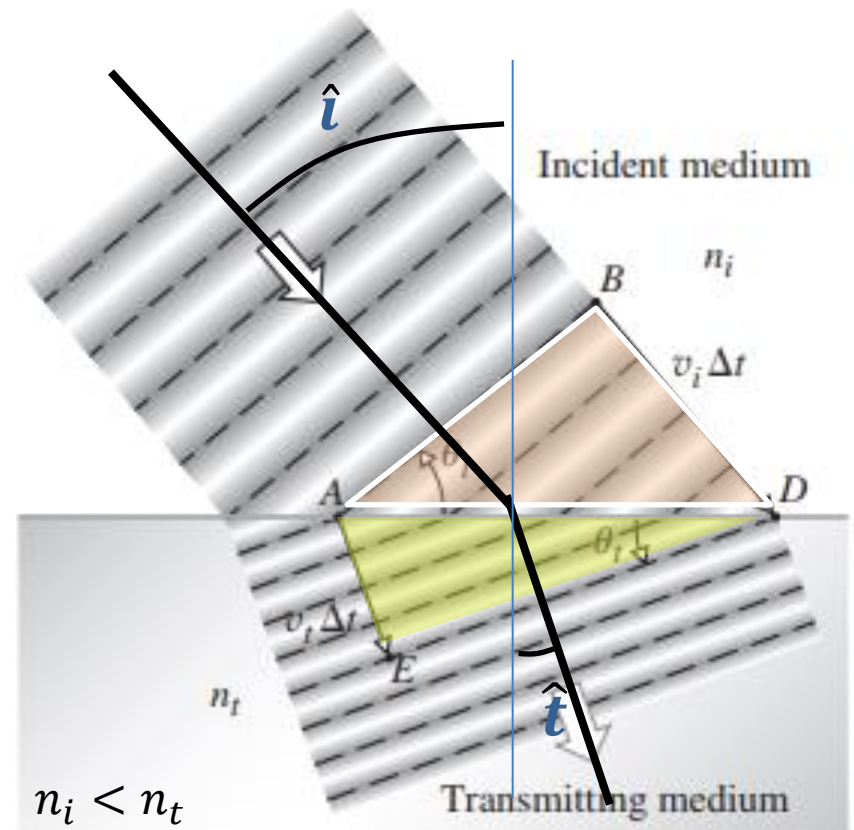


Ley de Snell (versión rayos)

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



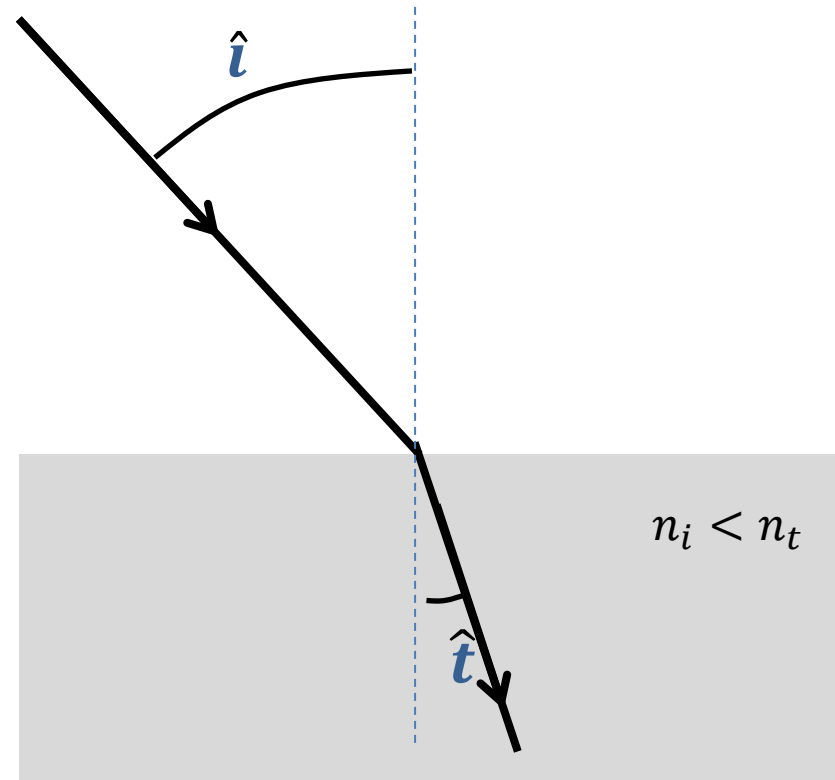
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



Ley de Snell (versión rayos)

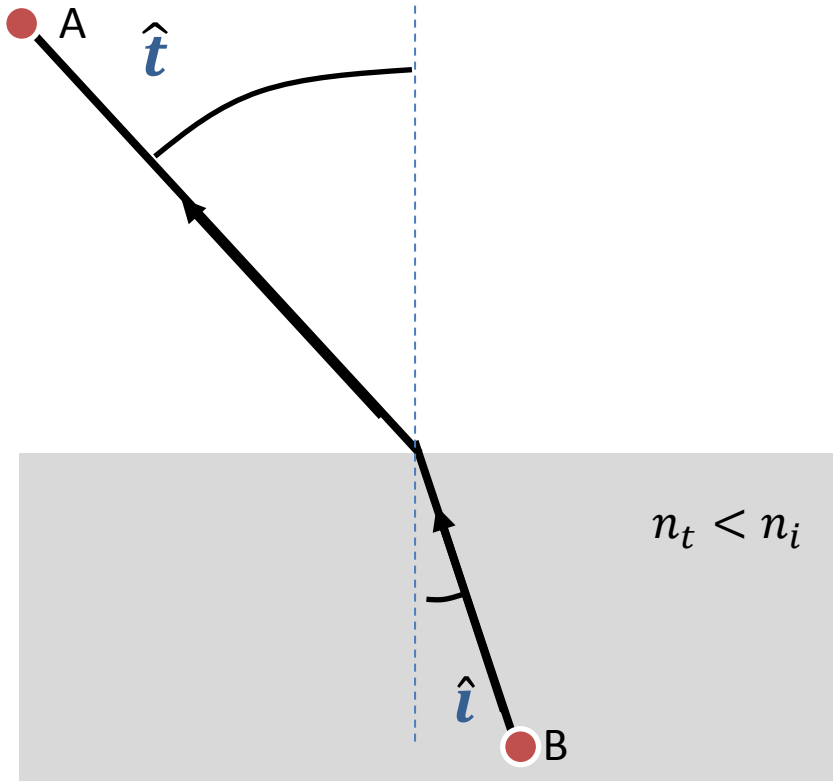
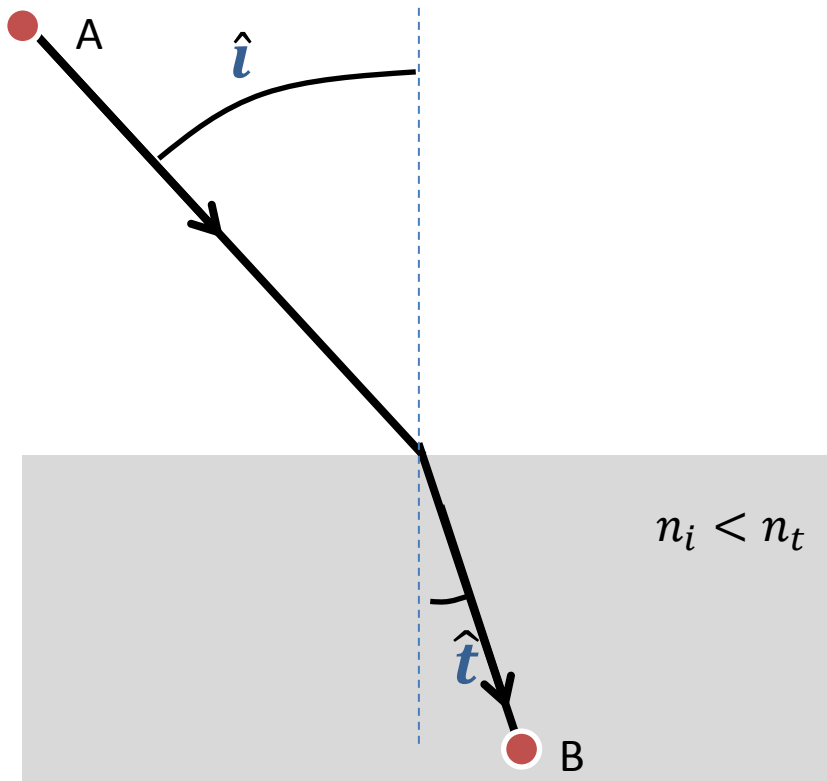
1. En el proceso de refracción, el **rayo incidente**, la **normal a la interfase** y el **rayo refractado** se encuentran contenidos en un mismo plano.
2. El ángulo $\hat{i}$ que forma el rayo incidente con la normal se relaciona con el ángulo $\hat{t}$ que forma el rayo refractado con la misma a través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

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



Ley de Snell e inversión temporal

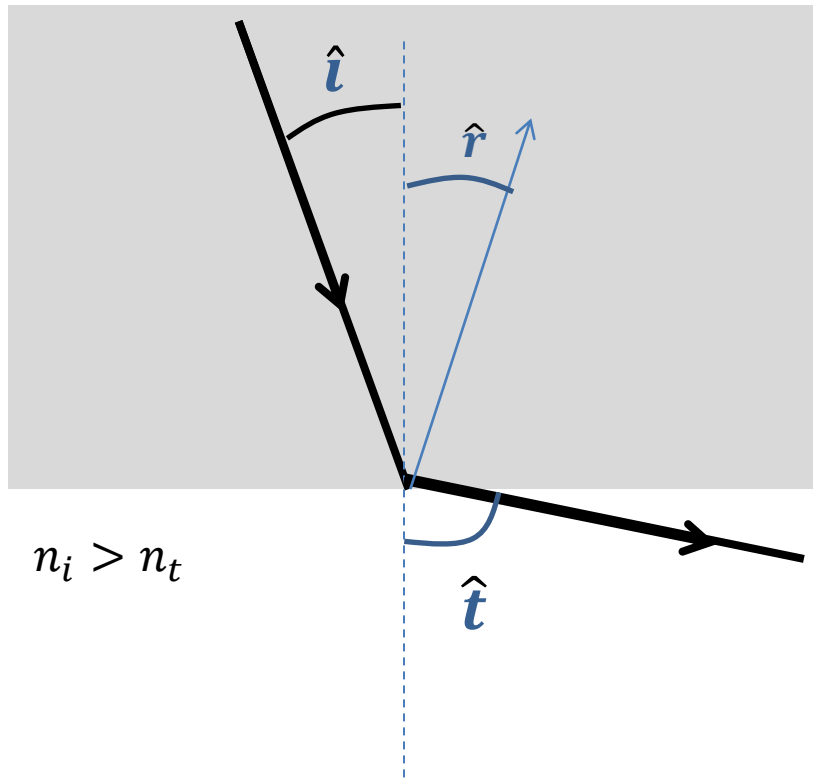
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



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

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



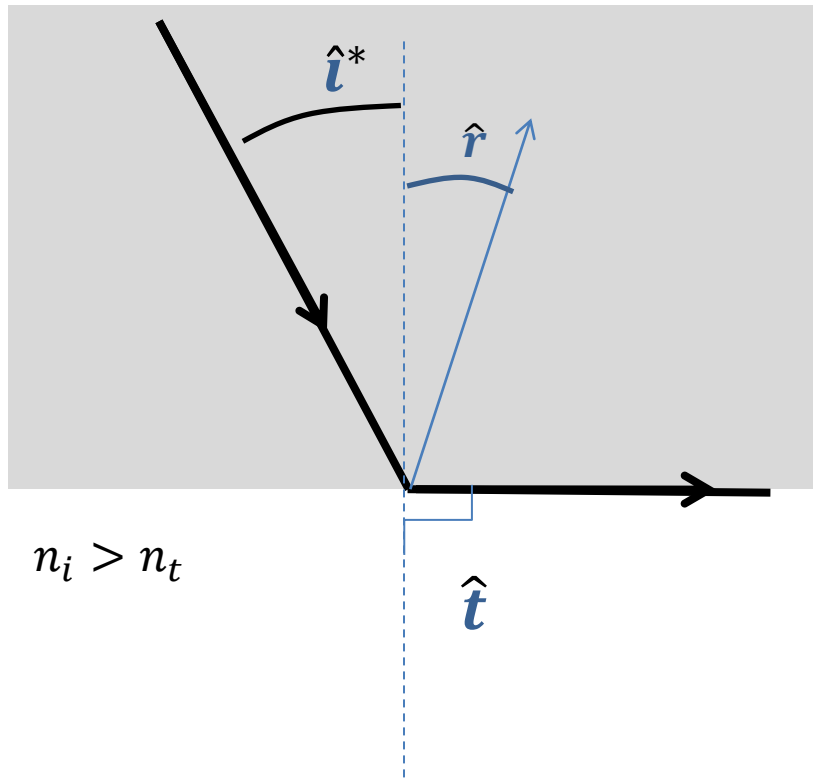
Supongamos que $n_i > n_t$. Que sucede si se incrementa el ángulo de incidencia ***demasiado***?

↓

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

Reflexión Total Interna

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



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

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

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

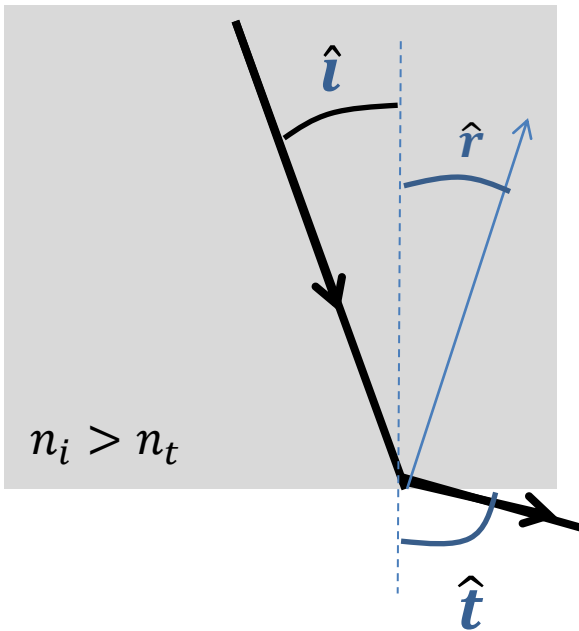
$$\hat{i}^* = \arcsin \frac{n_t}{n_i}$$

Reflexión Total Interna

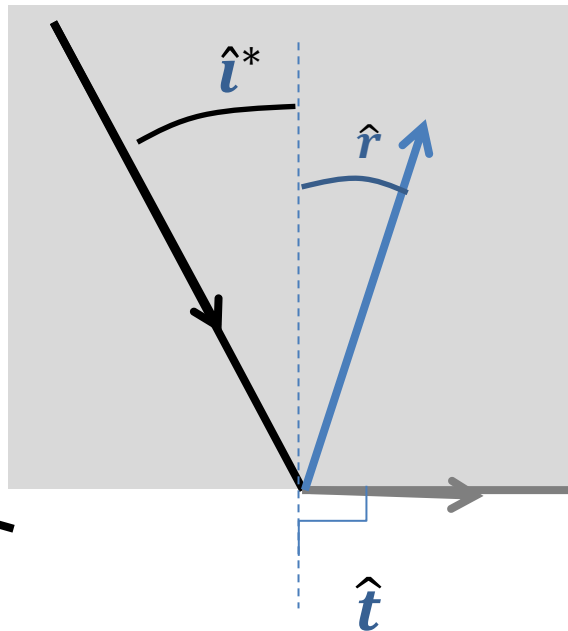
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$

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

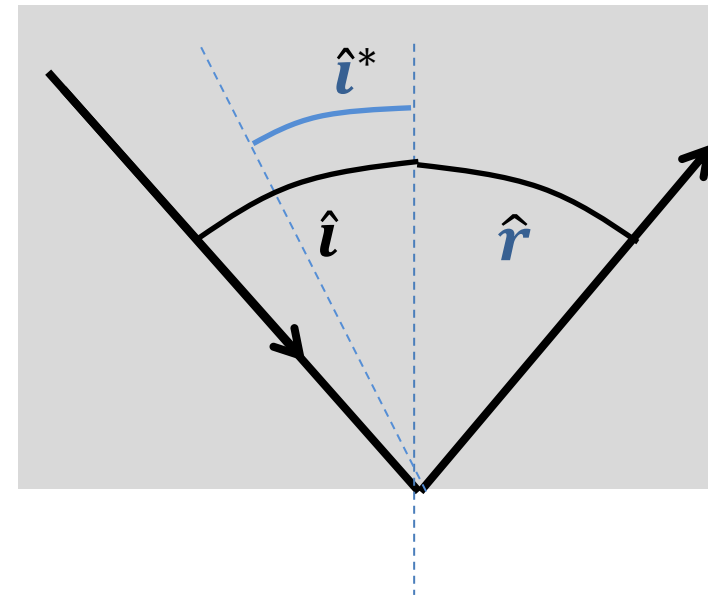
$$\hat{i} < \hat{i}^*$$



$$\hat{i} = \hat{i}^*$$

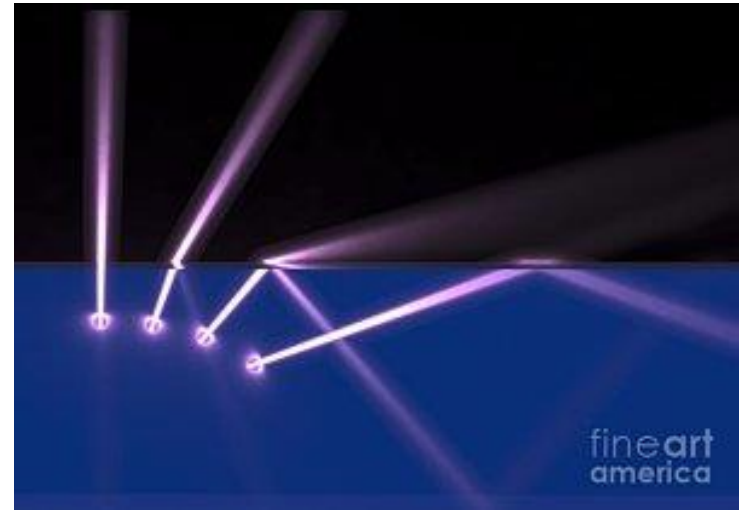


$$\hat{i} > \hat{i}^*$$



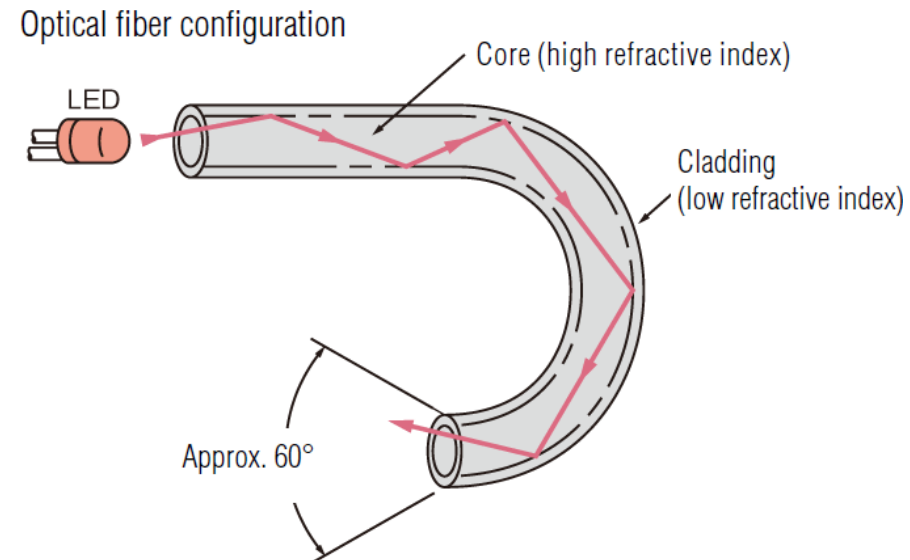
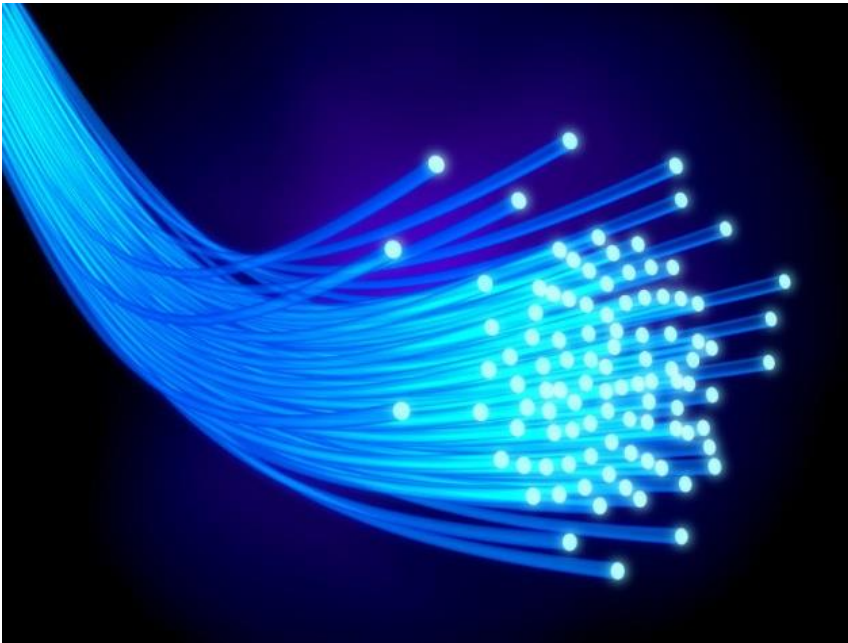
Reflexión Total Interna

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

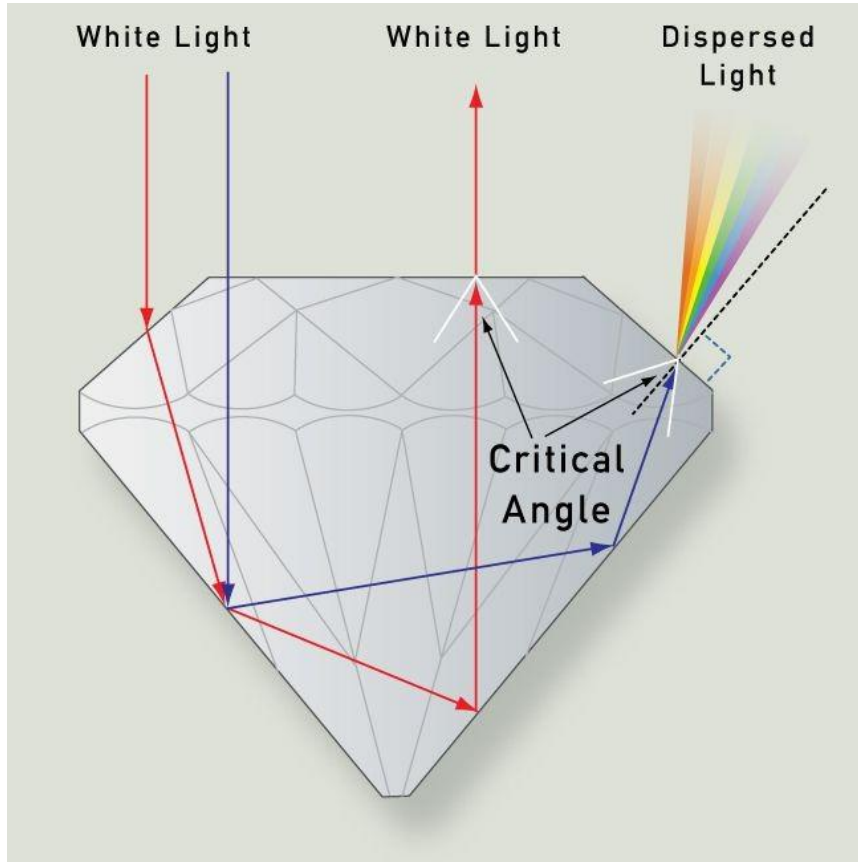


RTI y comunicaciones

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



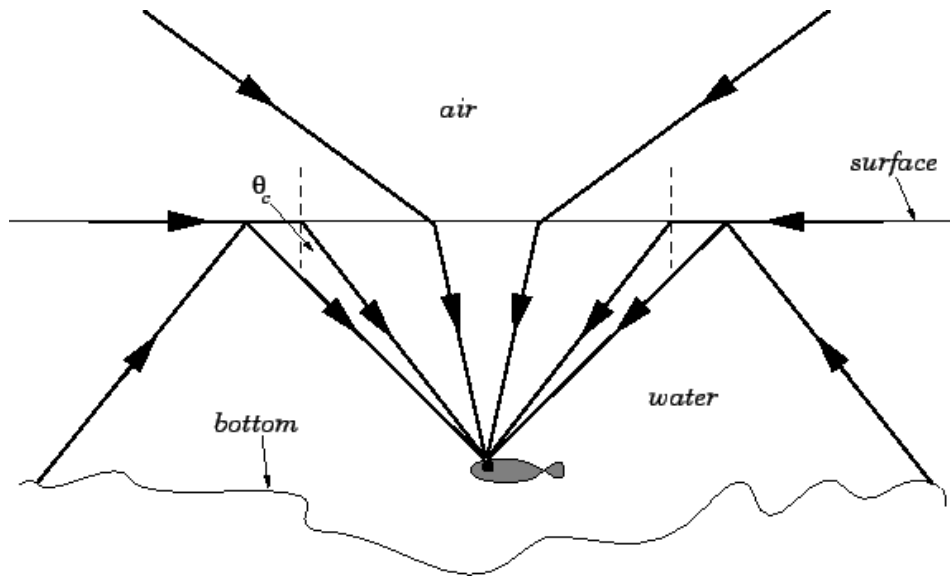
RTI y Glamour



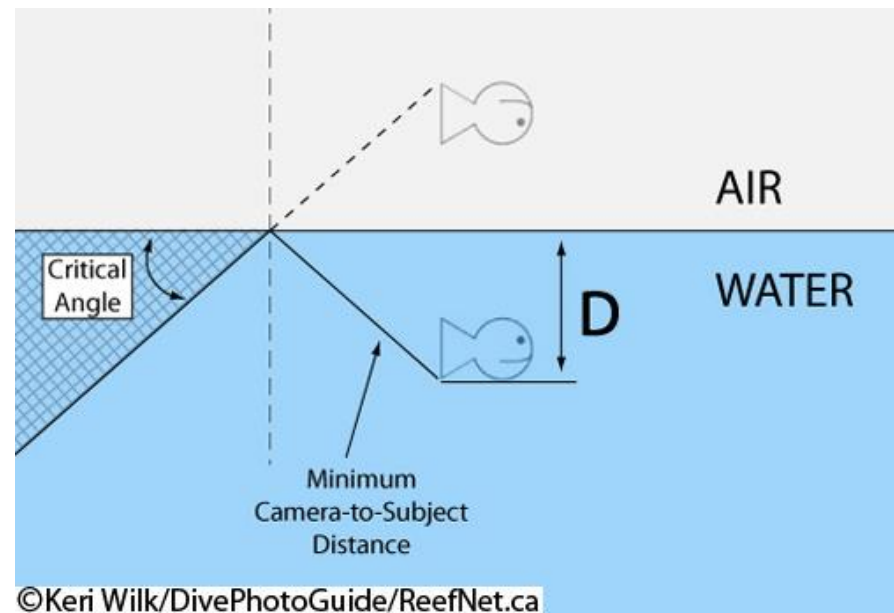
El alto índice de refracción del diamante hace que el ángulo crítico de la interface diamante-aire sea muy chico. El corte y facetado provocan que puedan ocurrir numerosas RTI y que finalmente la luz emerja por la parte superior.

La ventana de Snell

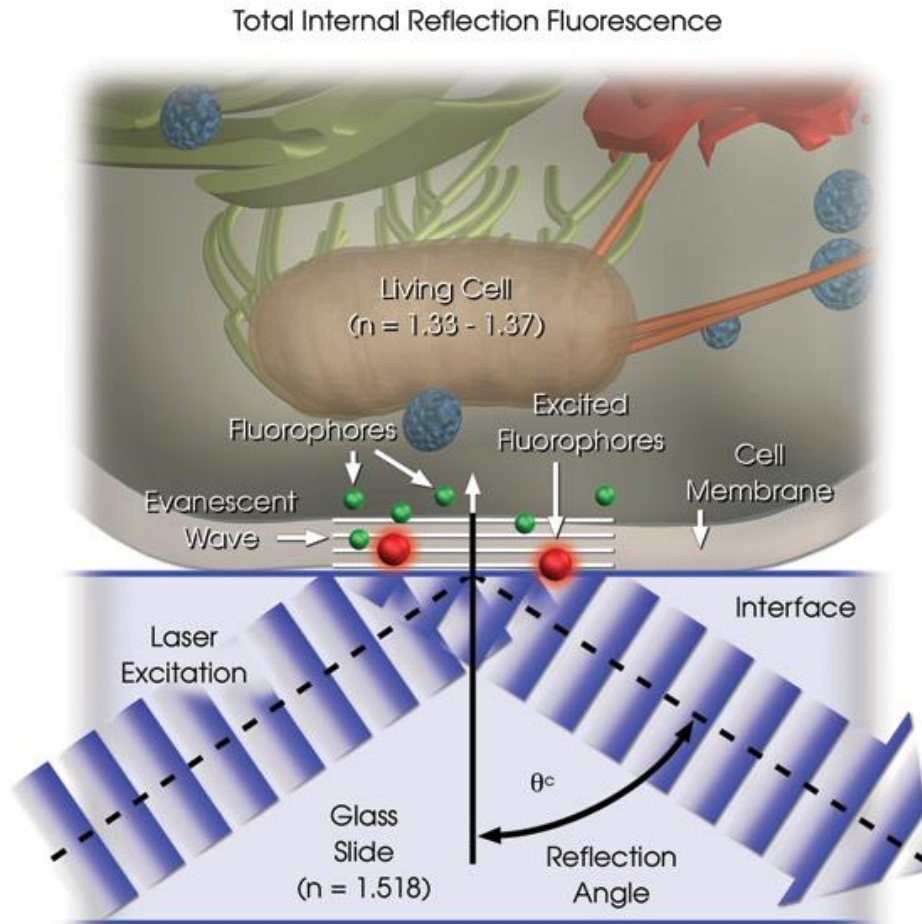
Para ángulos de incidencia mayores al crítico no hay onda transmitida, la onda es reflejada por completo.



RTI y fotografia



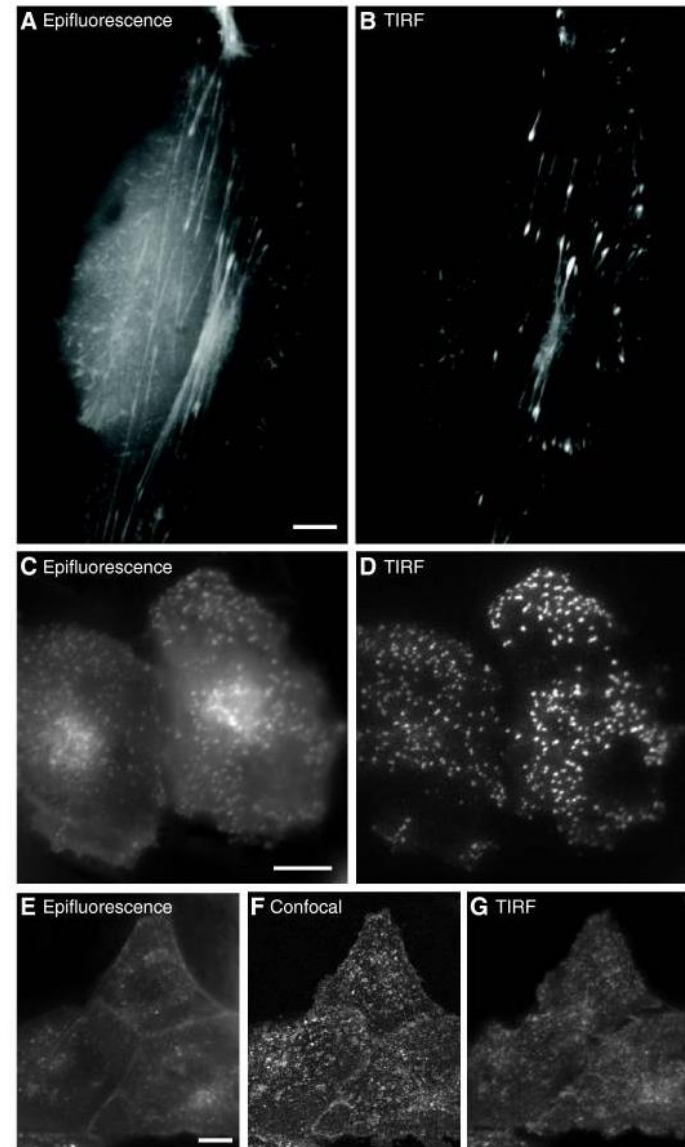
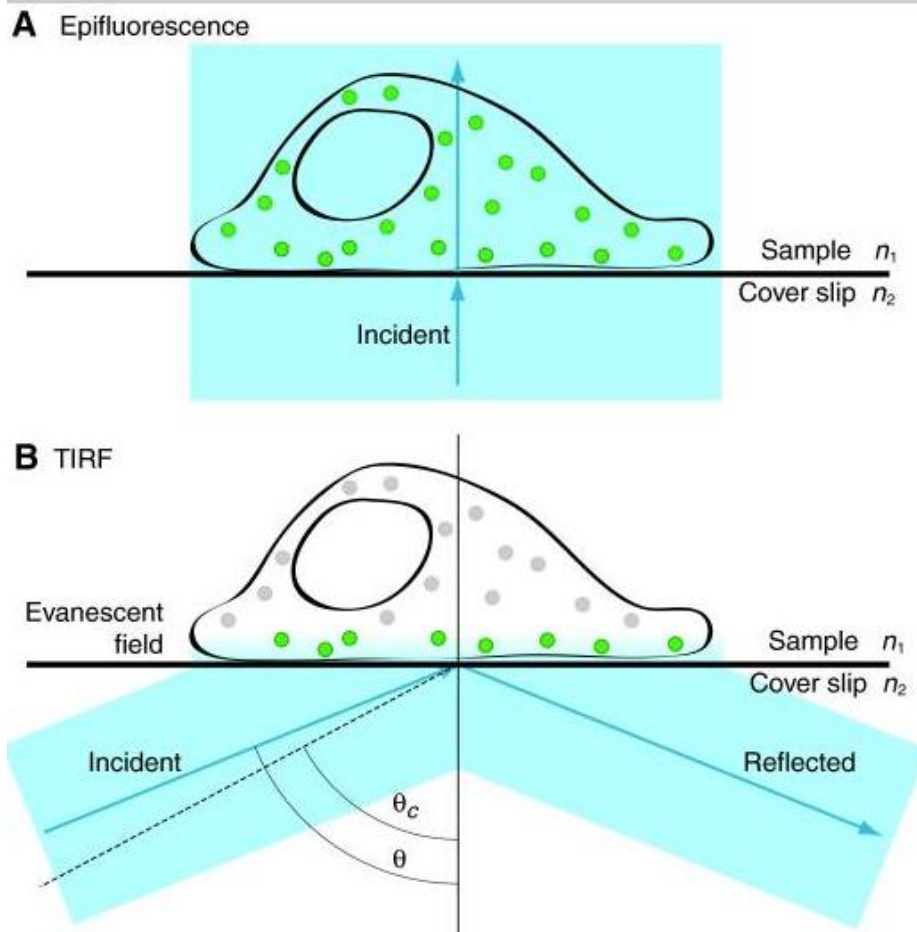
RTI y microscopia



← Onda evanescente penetra
unas pocas longitudes de
onda

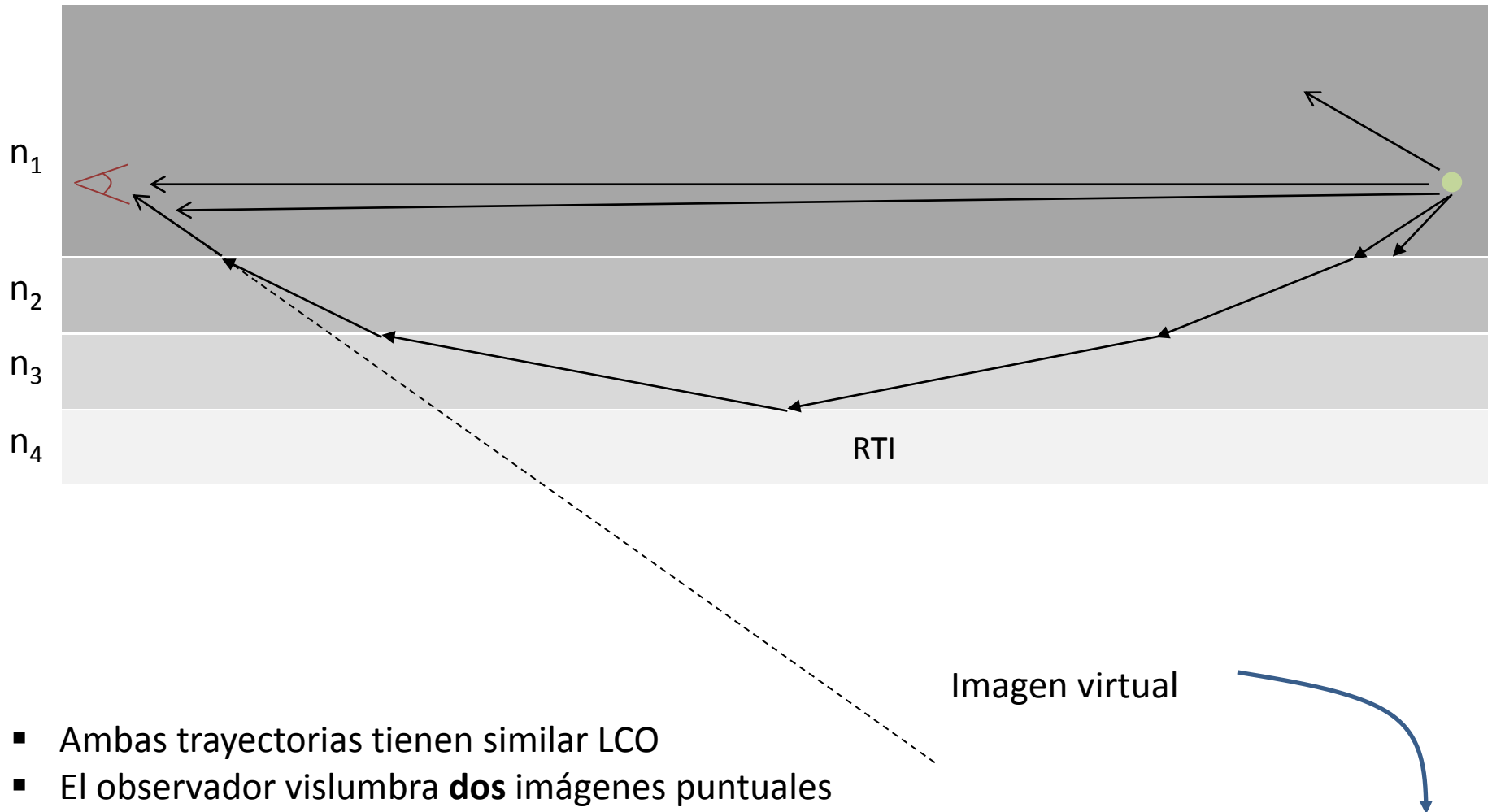
Imaging with total internal reflection fluorescence microscopy for
the cell biologist., J Cell Sci 2010, Matheyses & Rappoport

RTI y microscopia



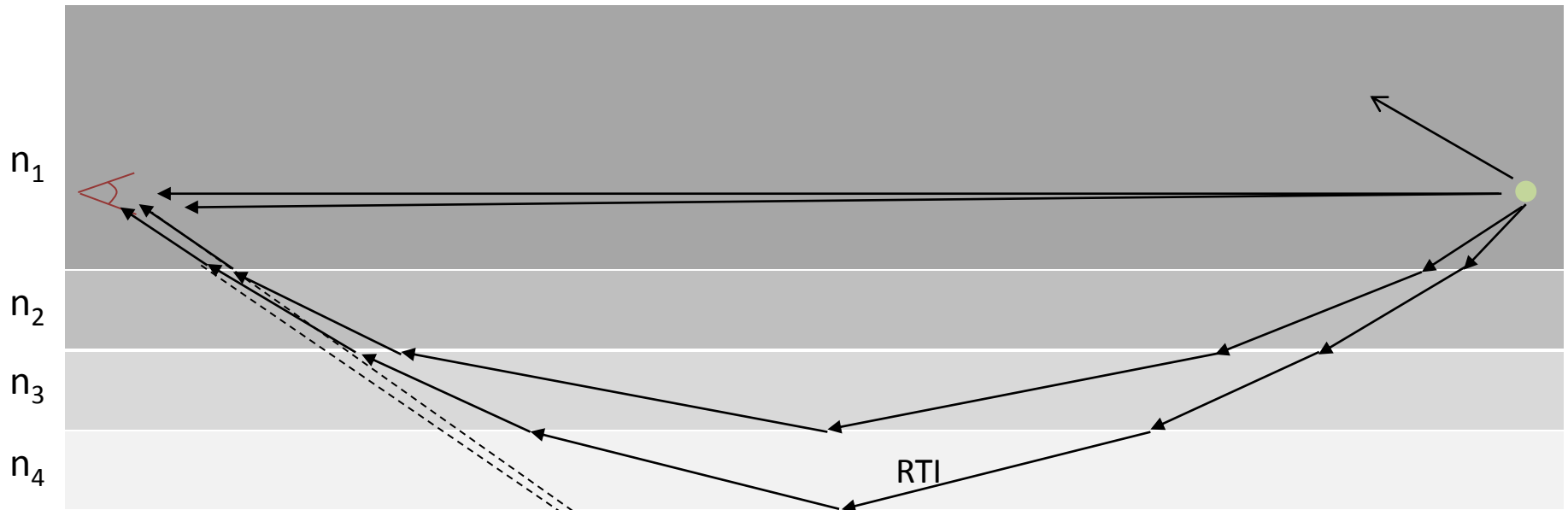
Así se fabrica un espejismo

$$n_1 > n_2 > n_3 > n_4$$



Así se fabrica un espejismo

$$n_1 > n_2 > n_3 > n_4$$



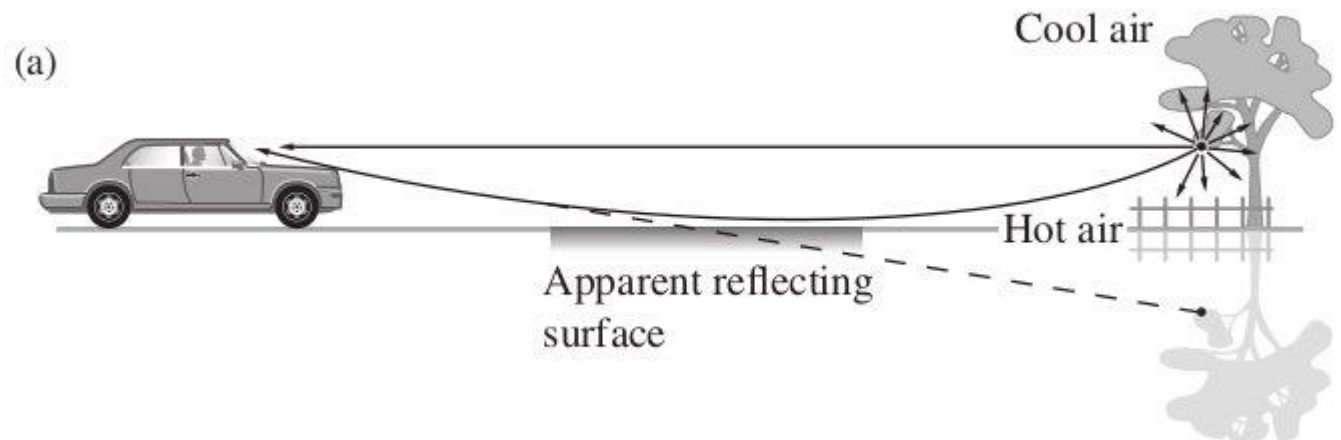
- El observador vislumbra **dos** imágenes puntuales
- Todas las trayectorias tienen diferente longitud geométrica pero idéntica **Longitud de Camino Óptico**

Imagen virtual

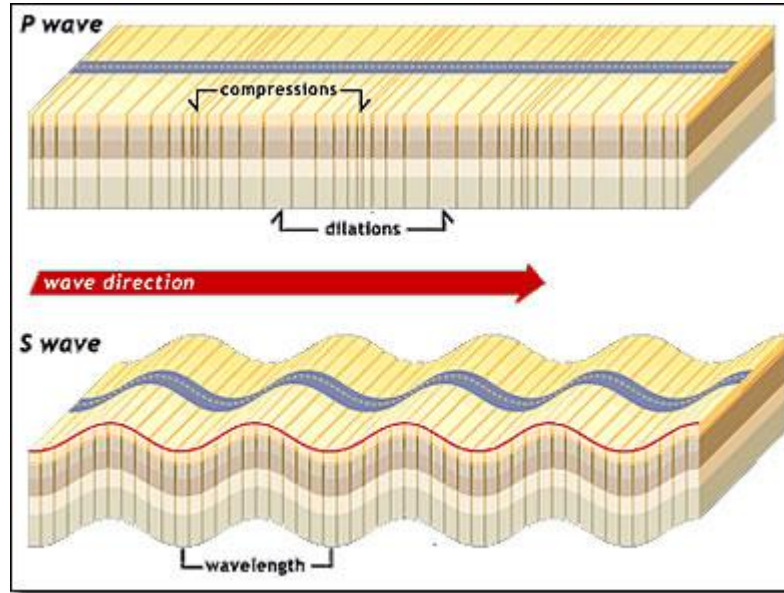
Espejismos



El índice de refracción del aire disminuye con la temperatura.

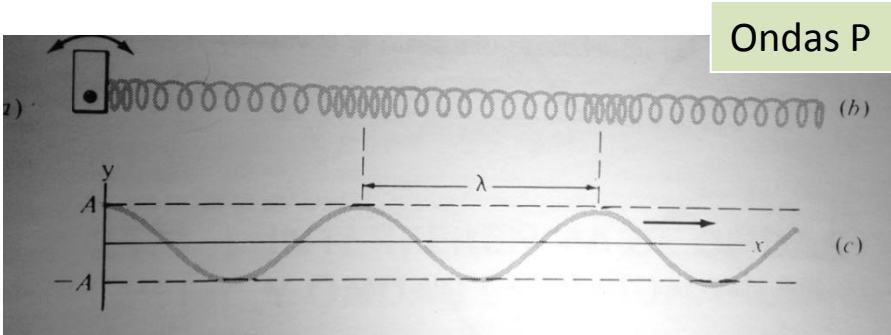


Un poco de sismica

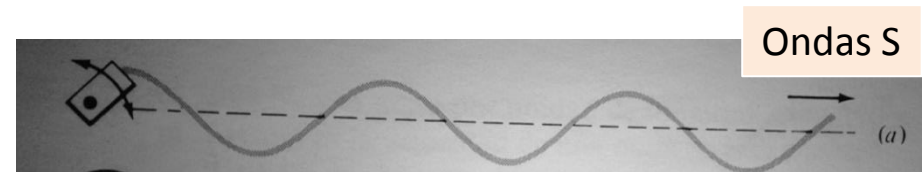


Ondas **longitudinales**

Ondas **transversales**



Ondas P

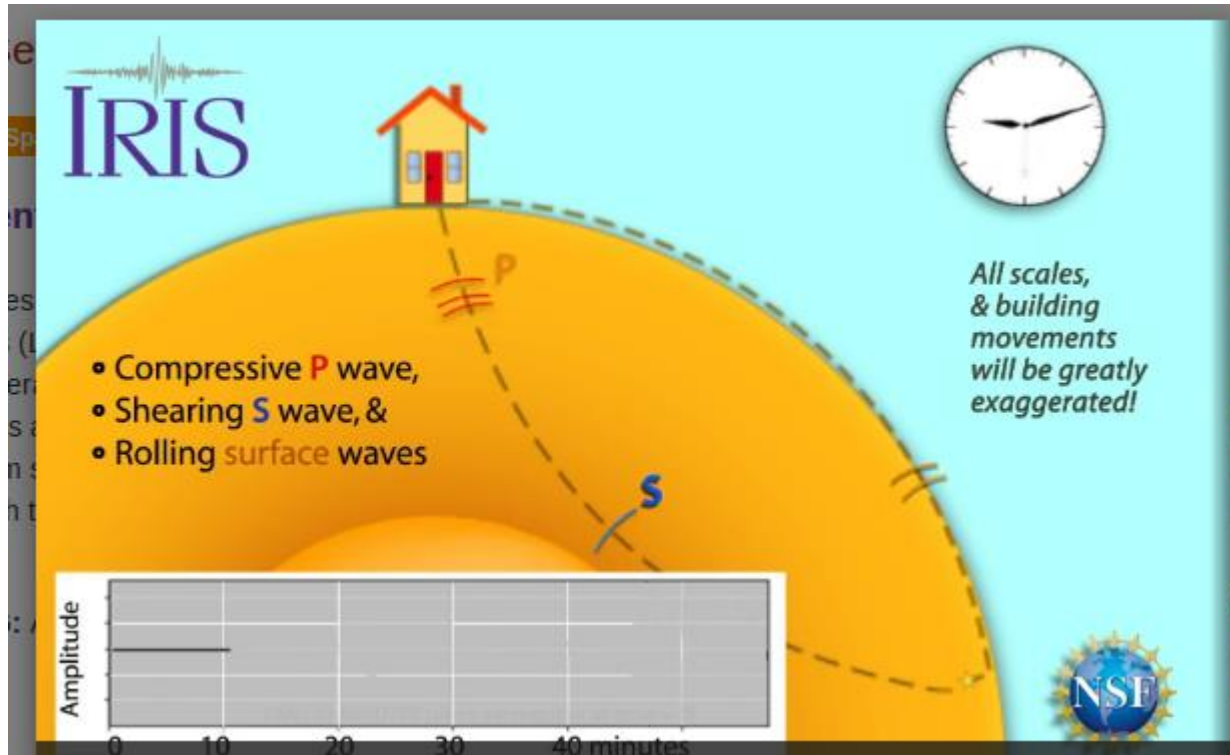


Ondas S

$$\rho(x, t) = \rho_0 \cos(kx - w t + \varphi_0)$$

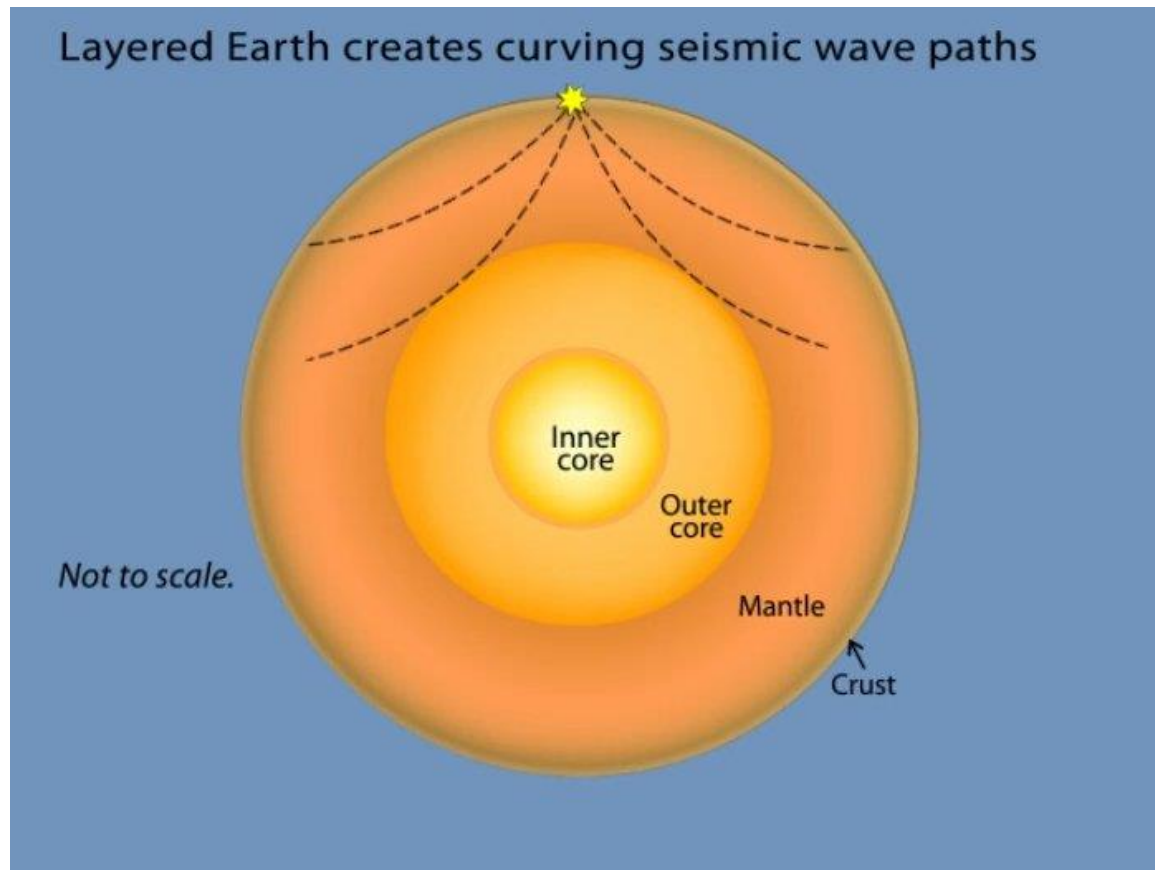
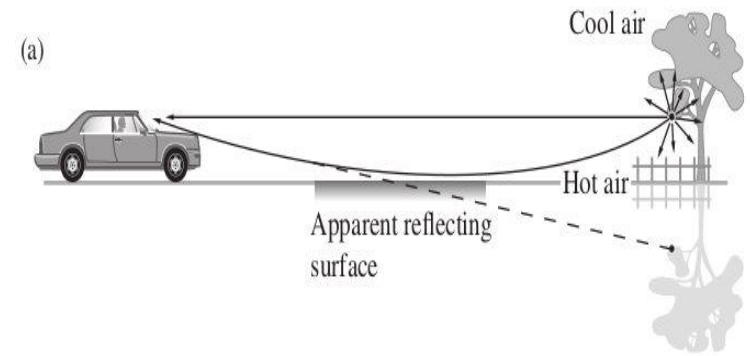
$$h(x, t) = h_0 \cos(kx - w t + \varphi_0)$$

Sísmica



https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/1component_seismogram_building_responds_to_p_s_surface_waves

Curvado de ondas sísmicas

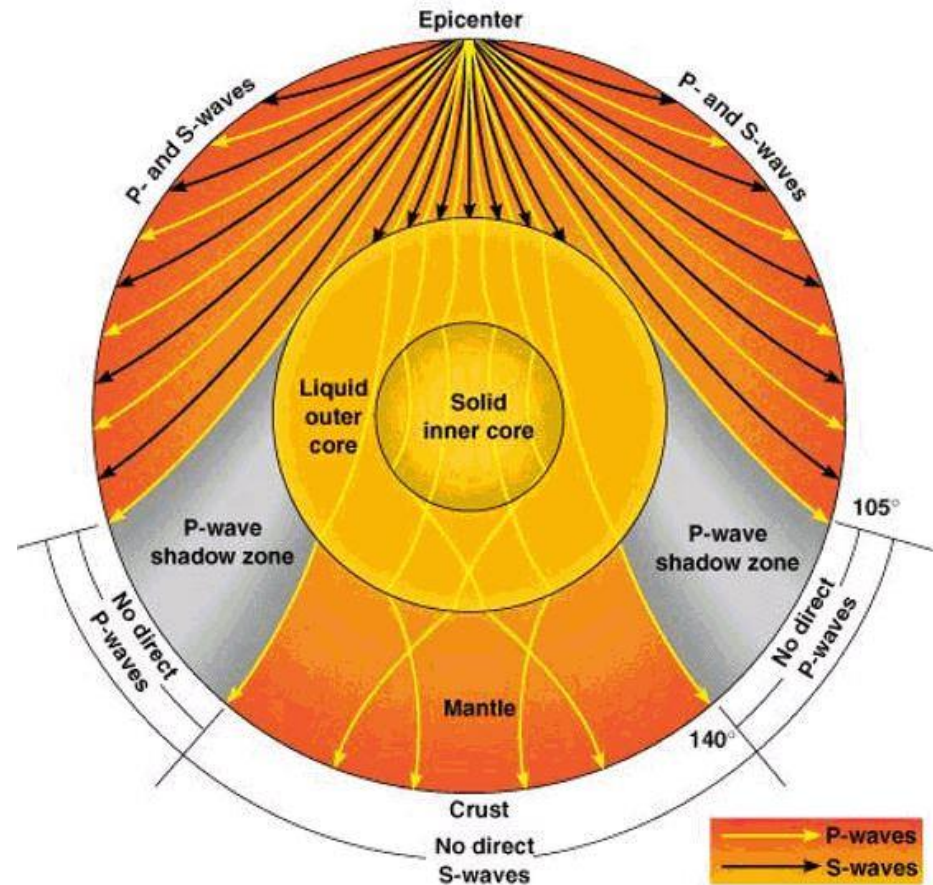


Un poco de sismica...



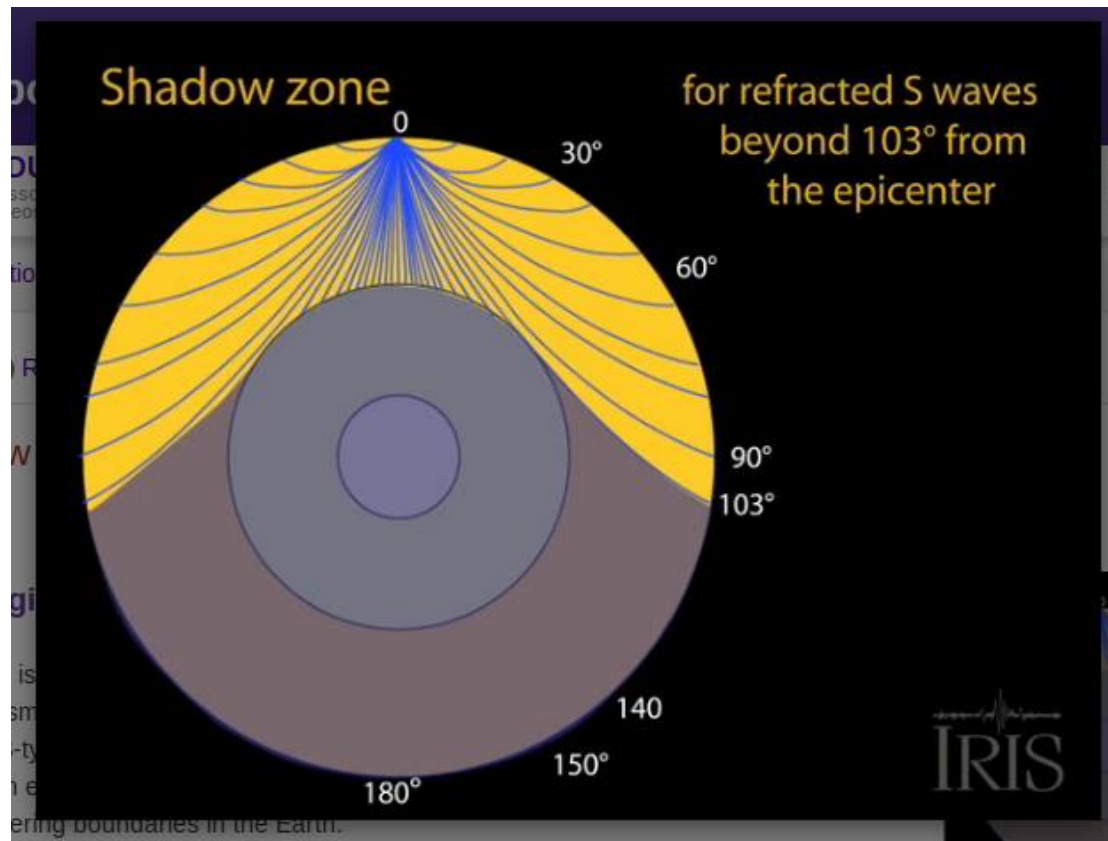
Propagación de ondas en medios no homogéneos

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



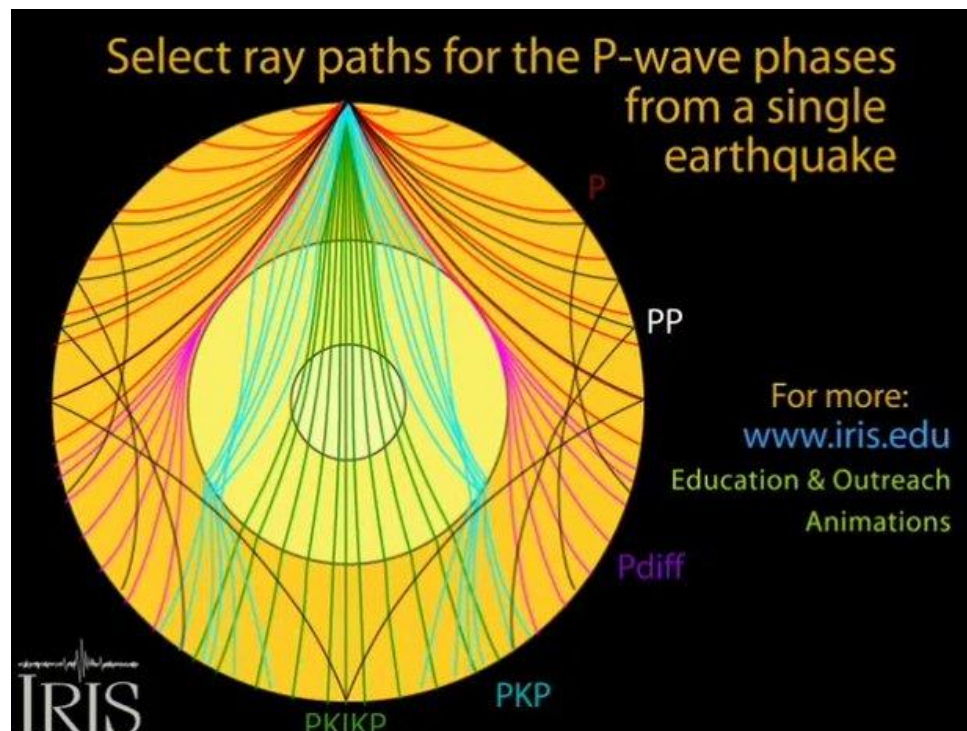
Un poco más de geo ...

Propagación de ondas S en medios no homogéneos



Un poco más de geo ...

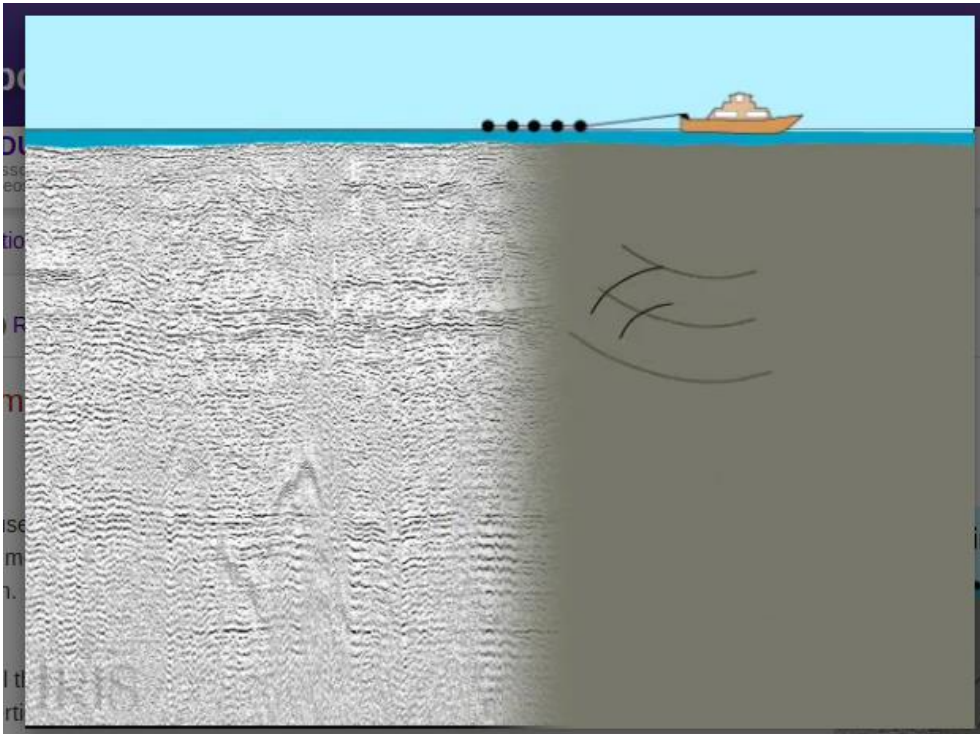
Propagación de ondas P en medios no homogéneos



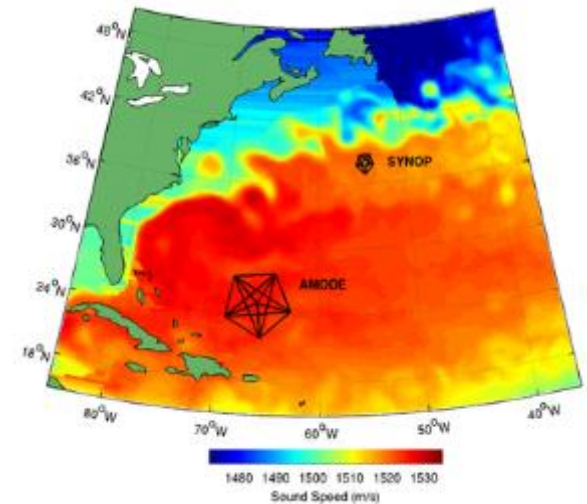
https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/seismic_shadow_zones_p_wave

Un poco de geo ...

Propagación de ondas en medios no homogéneos



Ocean Acoustic Tomography



https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/reflection_seismology_seeing_below_the_ground

Bigliografia

- Hecht, Optics 5ed
- www.iris.edu/hq/inclass/search#type=1
- wikipedia

