

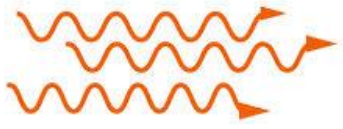
15 . Propagación 101

Introducción

Huygens

Reflexion

Refraccion

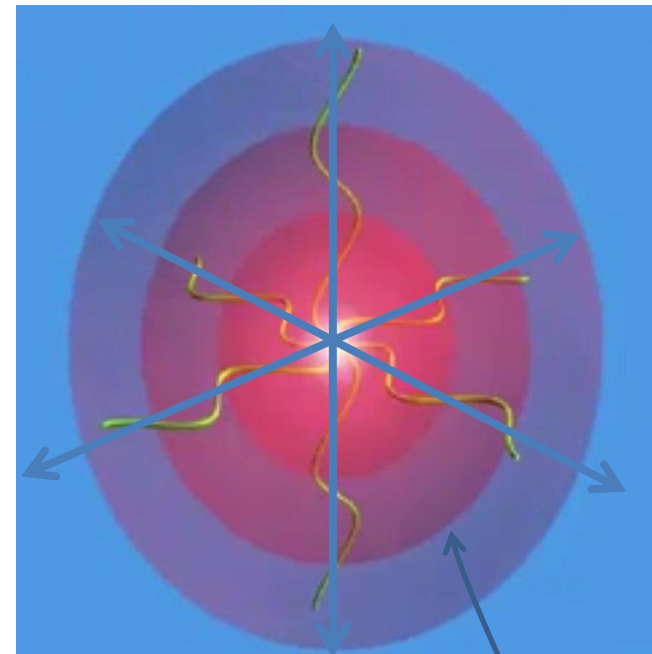
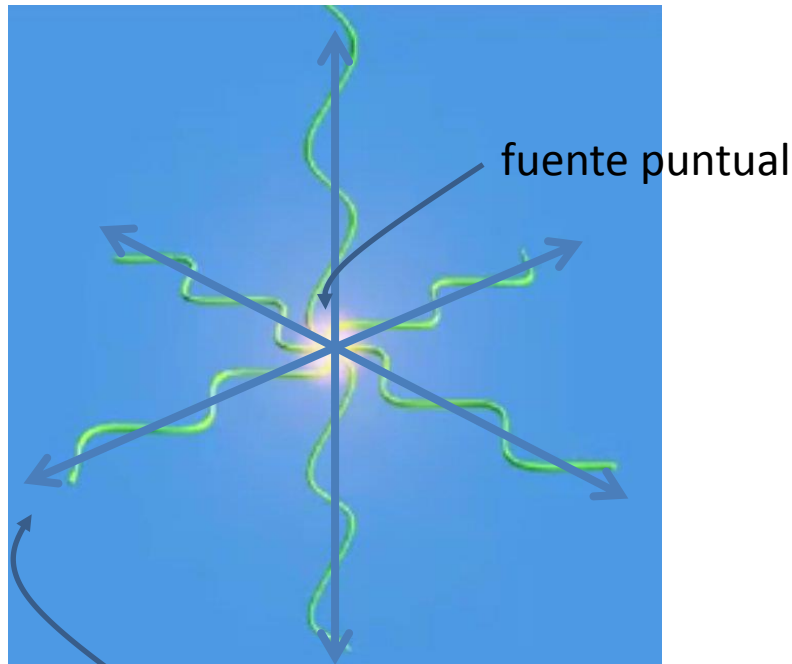


Teoría ondulatoria



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?)



direccion de propagación (rayo)

frente de onda

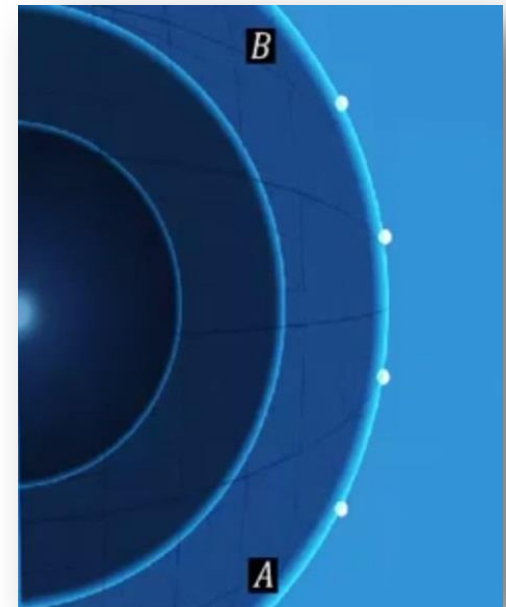
Principio de Huygens



- ✓ 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"

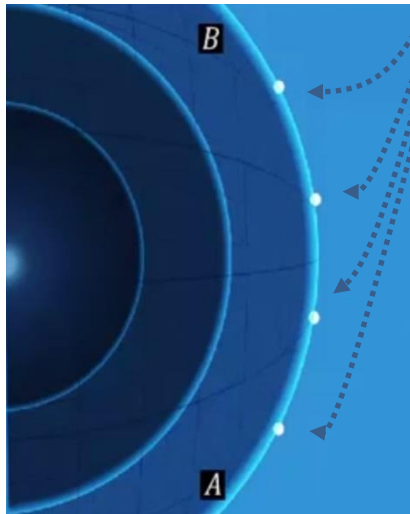
"ah – agregó- tambien supongo que las fuentes secundarias emiten principalmente hacia la direccion de propagacion y nada hacia atrás "



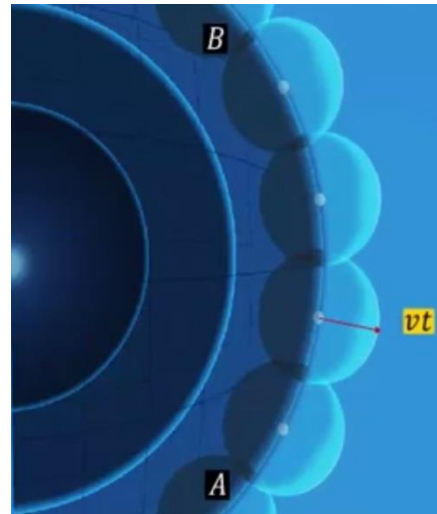
Propagación en medio homogéneo

Supongamos un frente de ondas esférico propagándose en un medio homogéneo

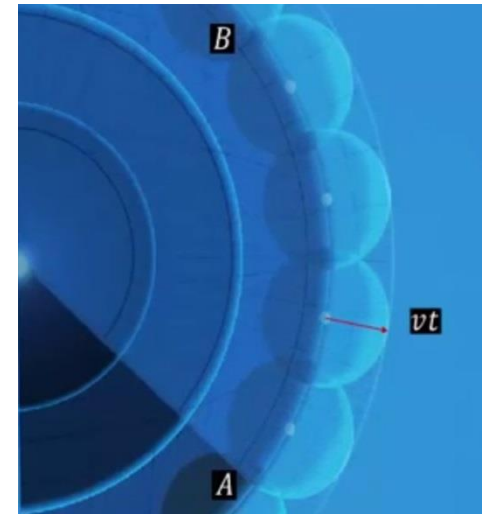
fuentes secundarias



Frente de ondas a tiempo t_0



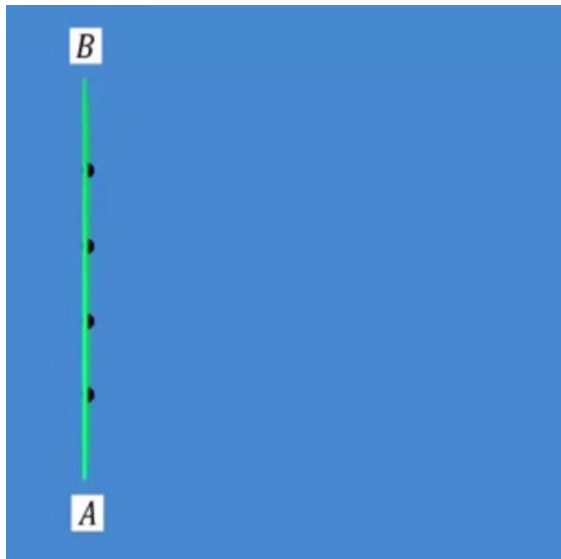
Cada fuente secundaria emite ondas esféricas



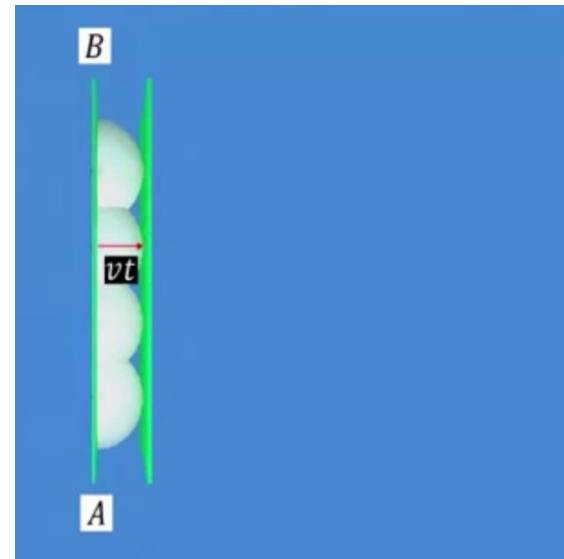
La envolvente define la ubicación del frente de onda a tiempo t

Propagación en medio homogéneo

Supongamos un frente de ondas plano propagándose en un medio homogéneo



Frente de ondas a tiempo t_0

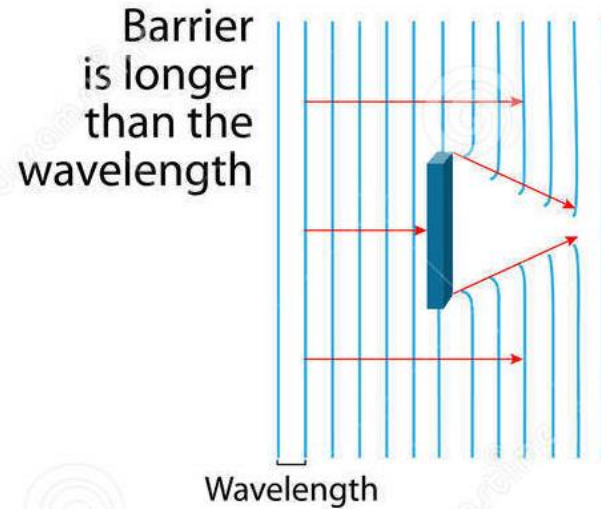
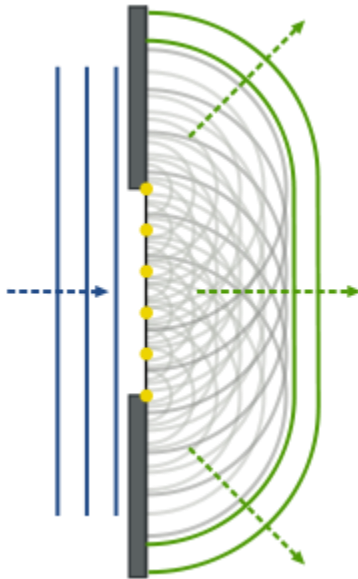


Cada fuente secundaria emite ondas esféricas *hacia adelante*

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

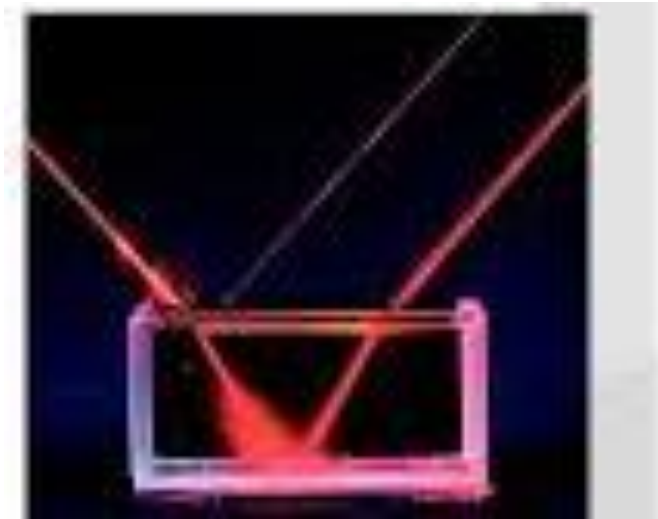
Propagación frente a obstáculos

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*



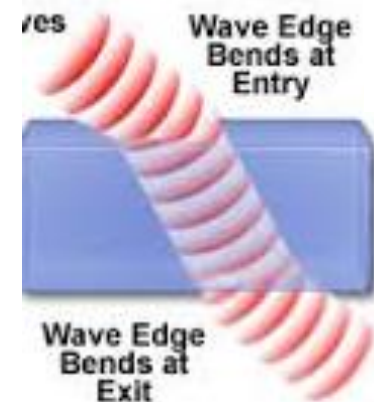
Propagación y medios no homogéneos

- ✓ 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:

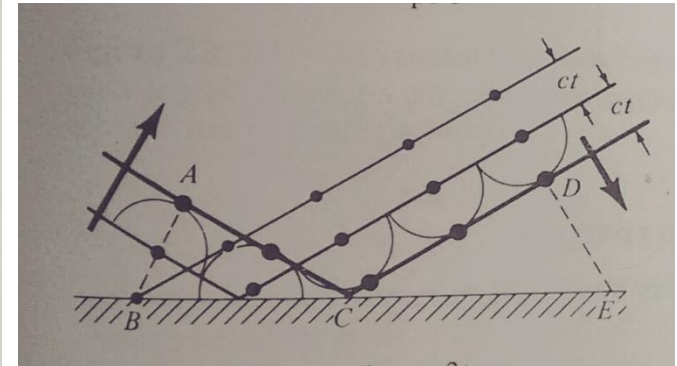
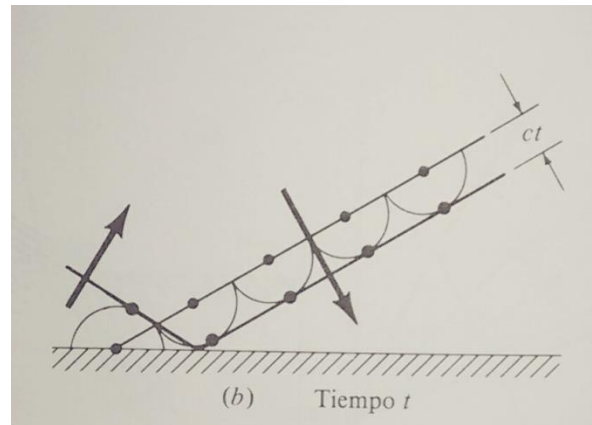
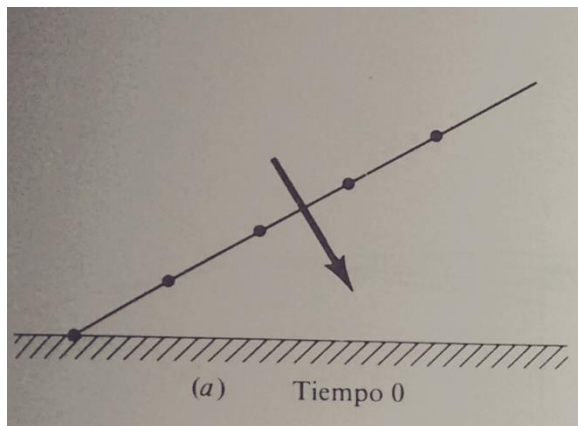
- incidente
- reflejada
- refractada.





Reflexión

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



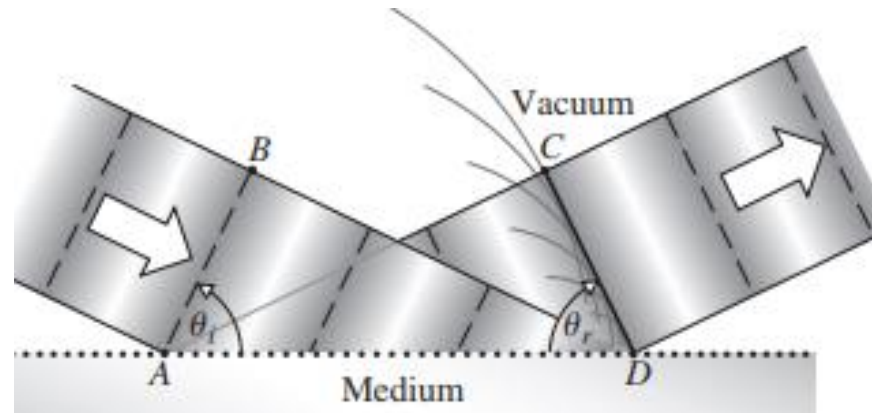
Un frente de onda alcanza una superficie reflectante

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

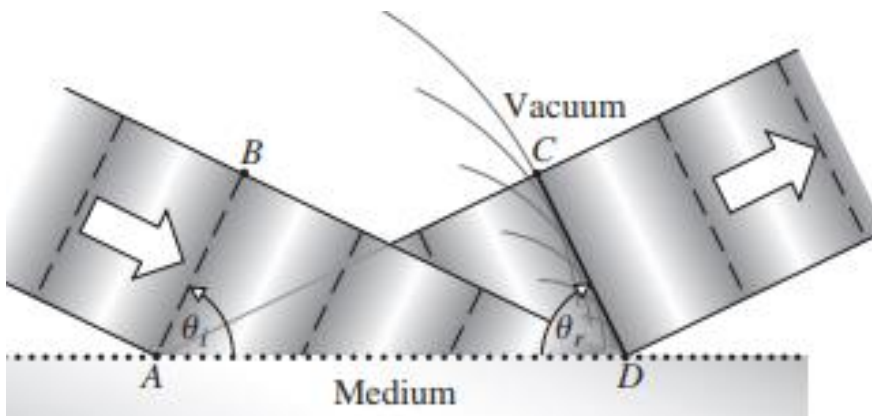
$$\frac{\sin \theta_i}{|BD|} = \frac{\sin \theta_r}{|AC|}$$

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

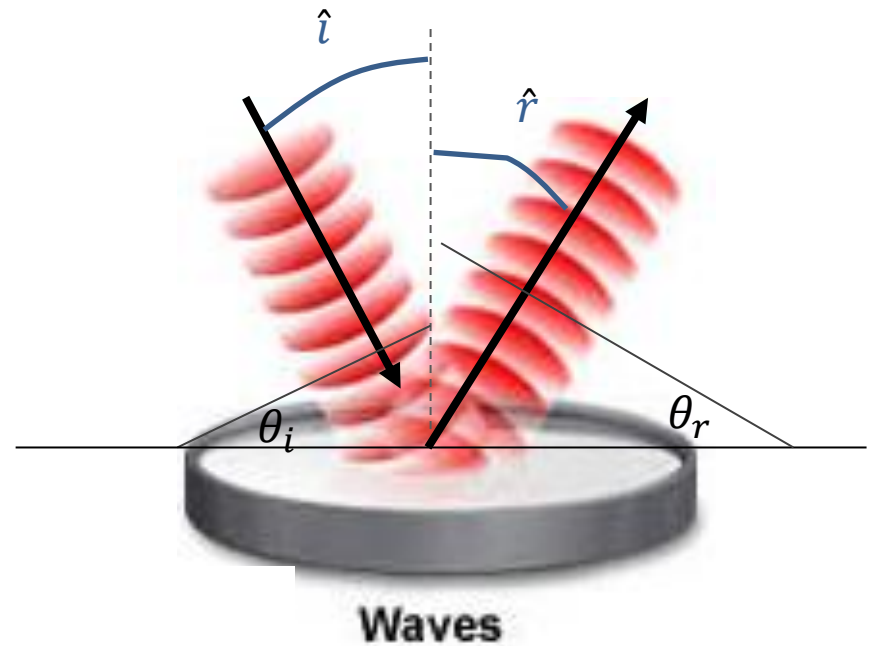
$$\theta_i = \theta_r$$

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

Ley de reflexión



$$\theta_i = \theta_r$$



Waves

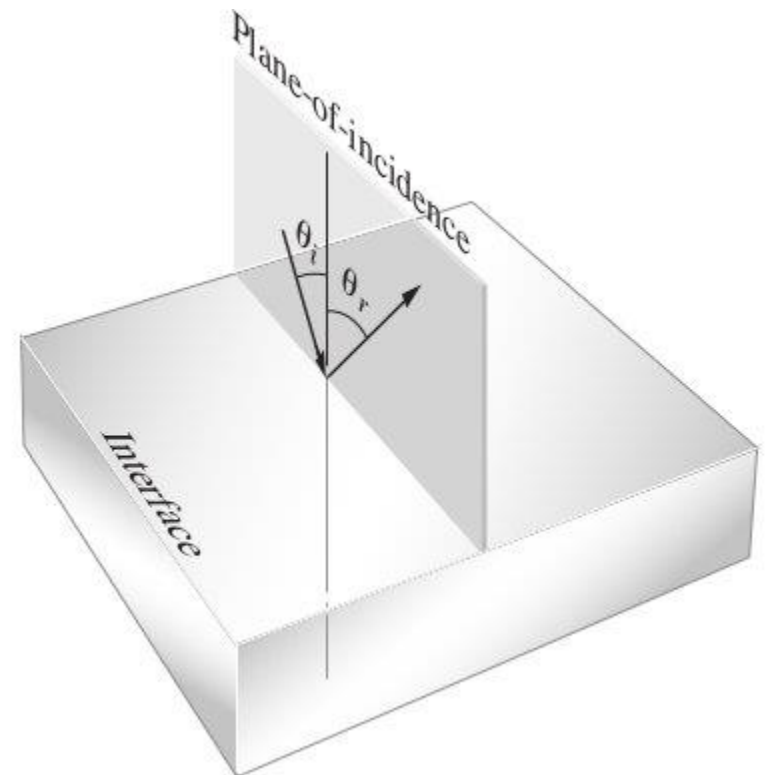
$$\hat{i} = \hat{r}$$

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

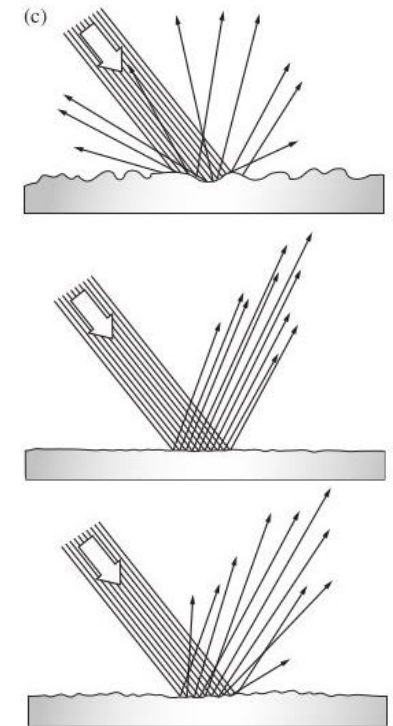
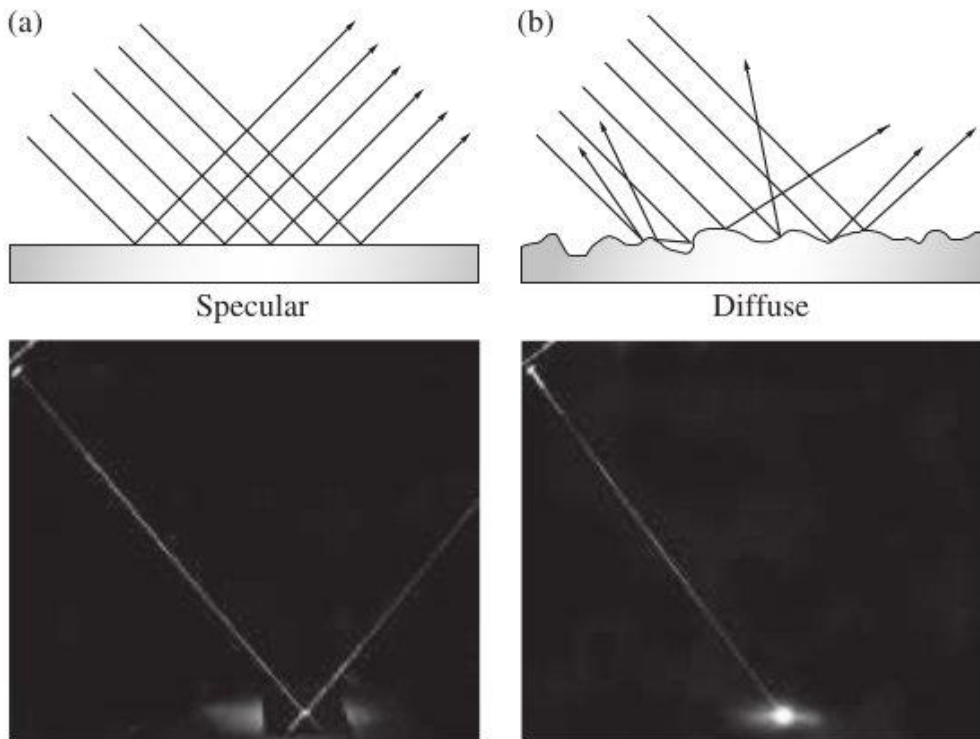


Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection. (Donald Dunitz) (c) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic drawing represents a range of reflections between the two that are likely to be encountered.

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.

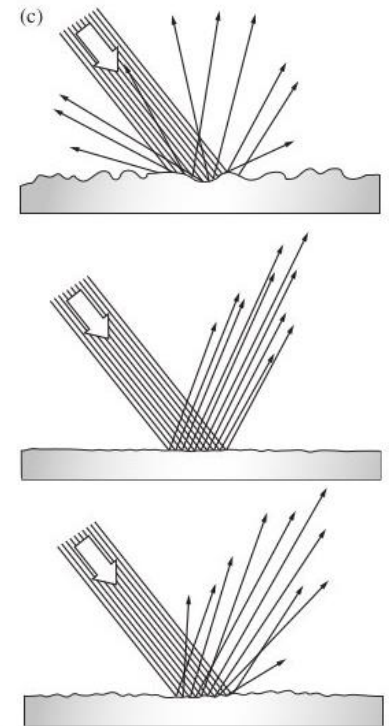


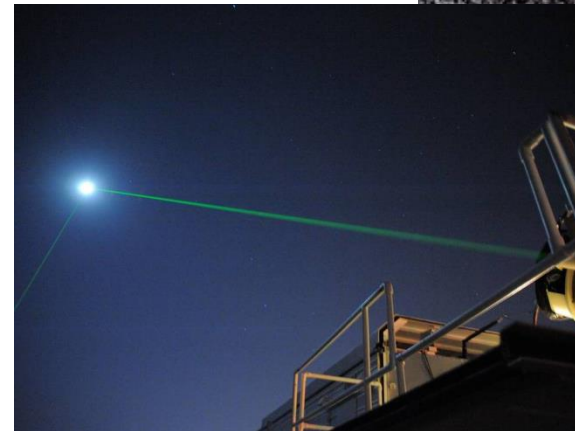
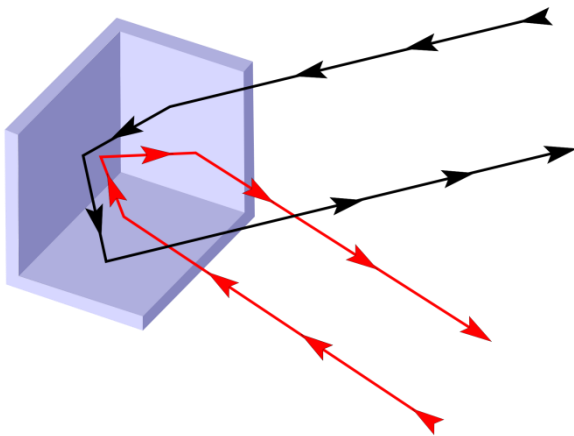
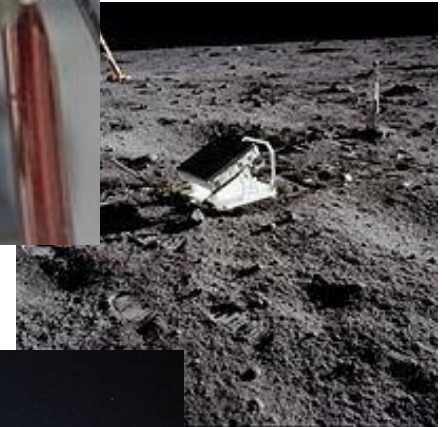
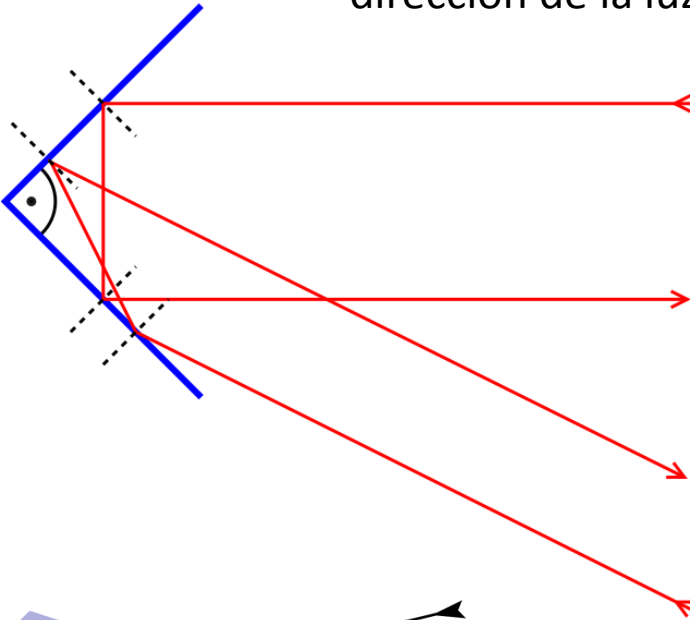
Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection. (Donald Dunitz) (c) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic drawing represents a range of reflections between the two that are likely to be encountered.

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**.

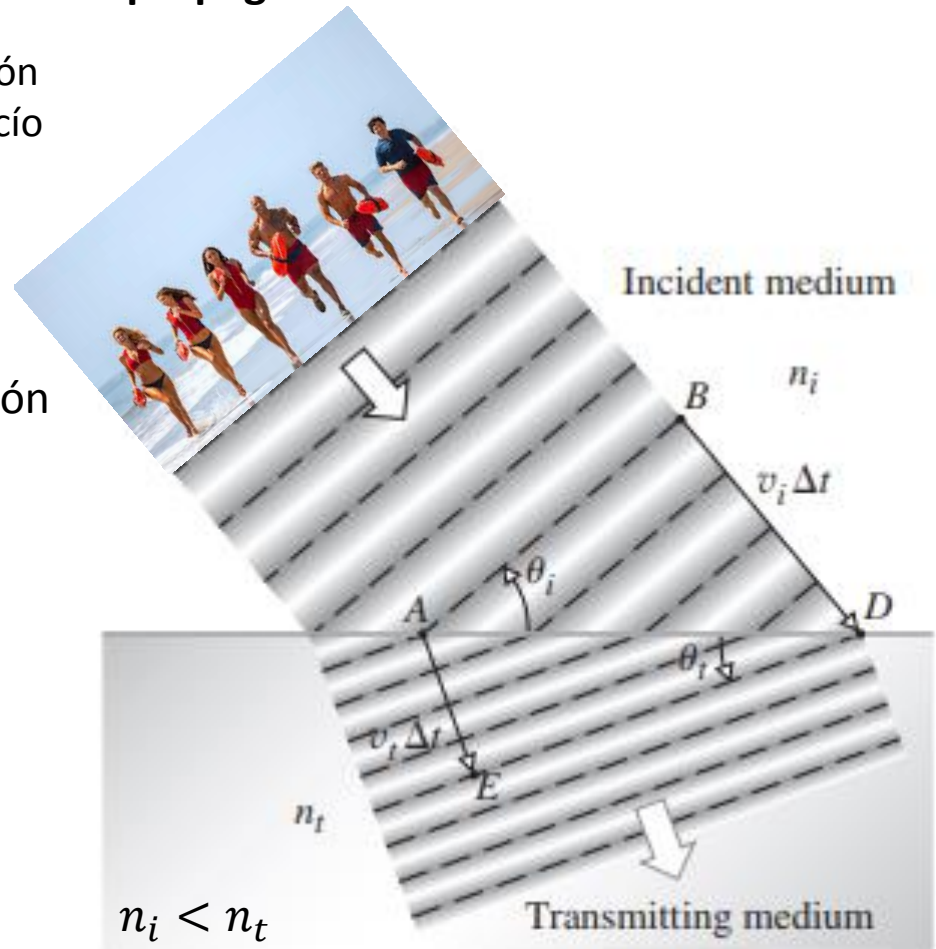
$$v = \frac{c}{n}$$

Vel de propagación de la luz en el vacío

Índice de refracción del medio

Vel propagacion 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

The diagram illustrates the Huygens-Fresnel principle for the refraction of a plane wave at the interface between two media. The upper region is yellow (Medium 1) and the lower region is cyan (Medium 2). A horizontal line represents the interface, with a series of pink dots representing secondary wavelets. An incident plane wave in Medium 1 is shown as a series of blue circles centered on the dots. A reflected plane wave in Medium 1 is shown as a series of blue circles centered on the dots. A refracted plane wave in Medium 2 is shown as a series of red circles centered on the dots. The angle of incidence is 48.0° , the angle of reflection is 48.0° , and the angle of refraction is 21.8° .

Angle of incidence: 48.0° Angle of reflection: 48.0°

Medium 1
Medium 2

Angle of refraction: 21.8°

Restart

Next step

Resume

1st index of refraction: 1.00

2nd index of refraction: 2.00

Angle of incidence: 48.0 $^\circ$

A superposition of all elementary waves results in a new plane wave. Note that the direction of propagation of

W. Fendt 1998
Prof. T. Mzoughi 1998

Ley de Snell

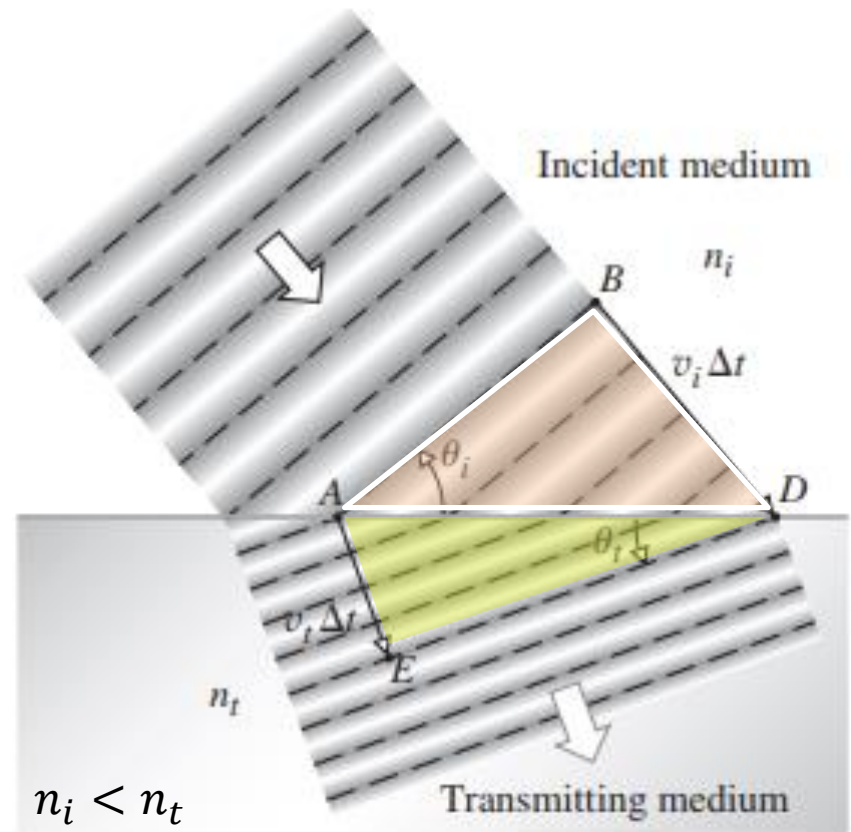
$$\sin \theta_i = \frac{|BD|}{|AD|} = \frac{v_i \Delta t}{|AD|}$$

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

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

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

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

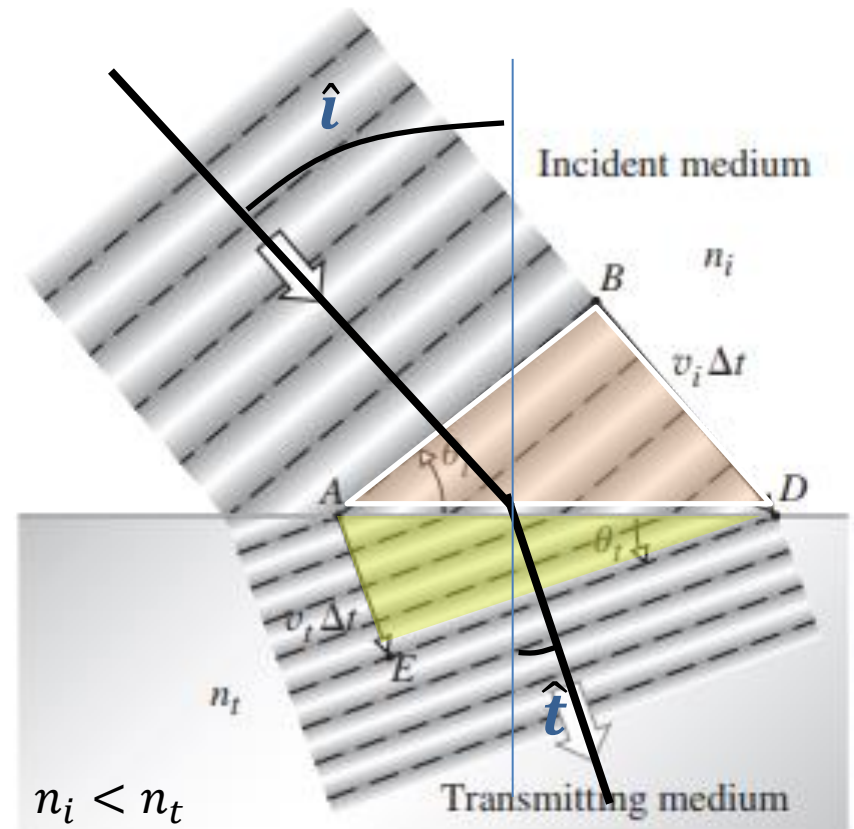


Ley de Snell (versión rayos)

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



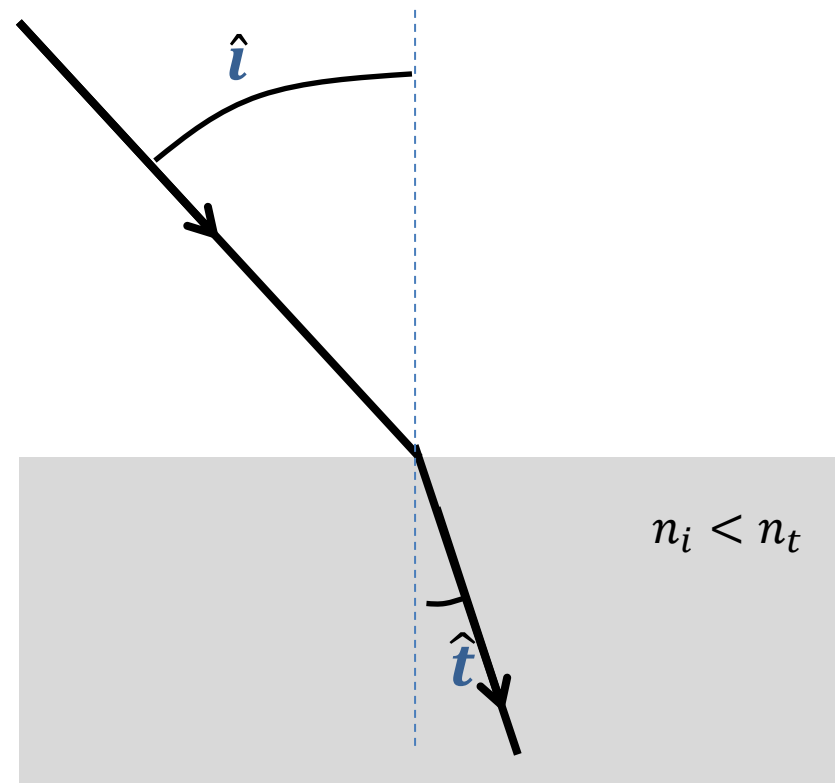
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



Ley de Snell (versión rayos)

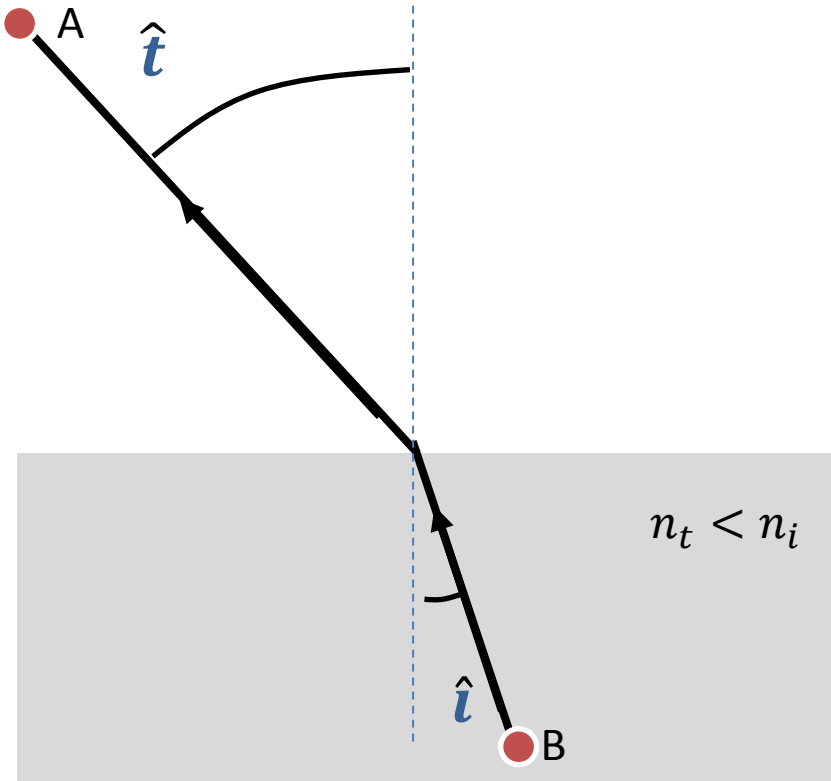
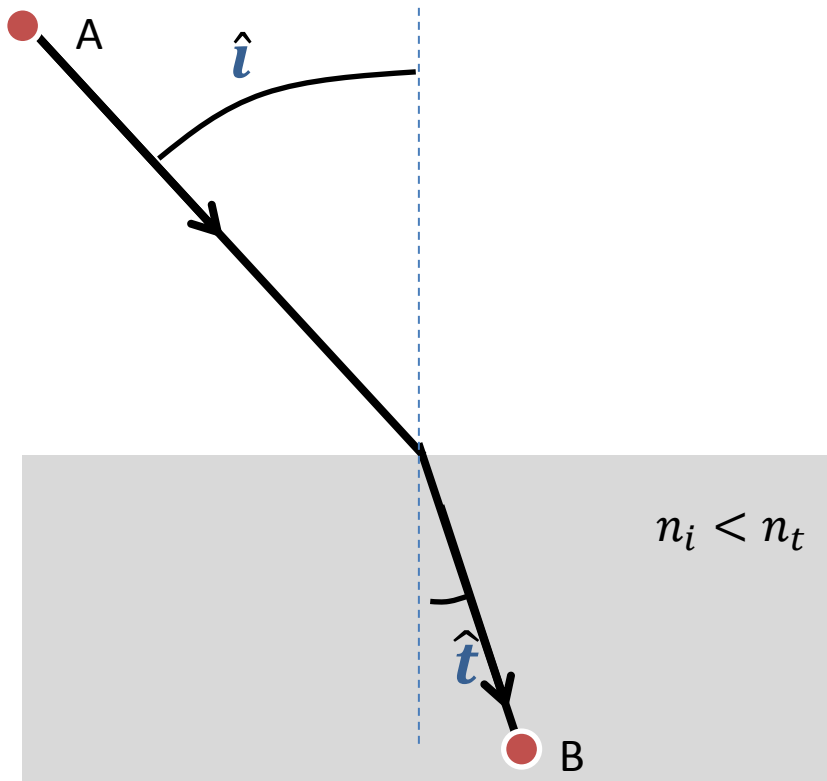
1. En el proceso de refracción, el **rayo incidente**, la **normal a la interfase** y el **rayo refractado** se encuentran contenidos en un mismo plano.
2. El ángulo \hat{i} que forma el rayo incidente con la normal se relaciona con el ángulo \hat{t} que forma el rayo refractado con la misma a través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

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



Ley de Snell e inversión temporal

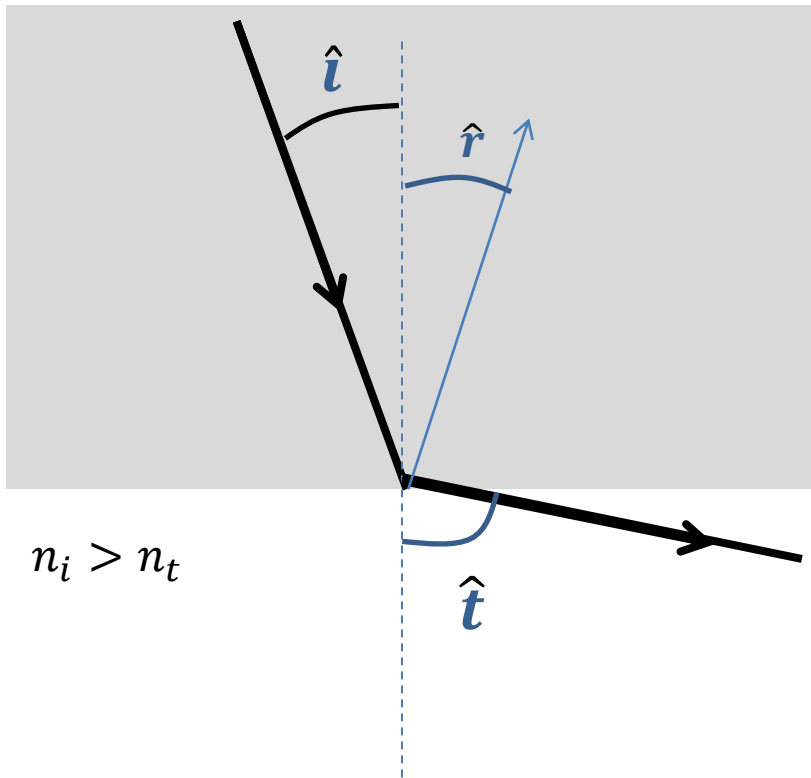
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$



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

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

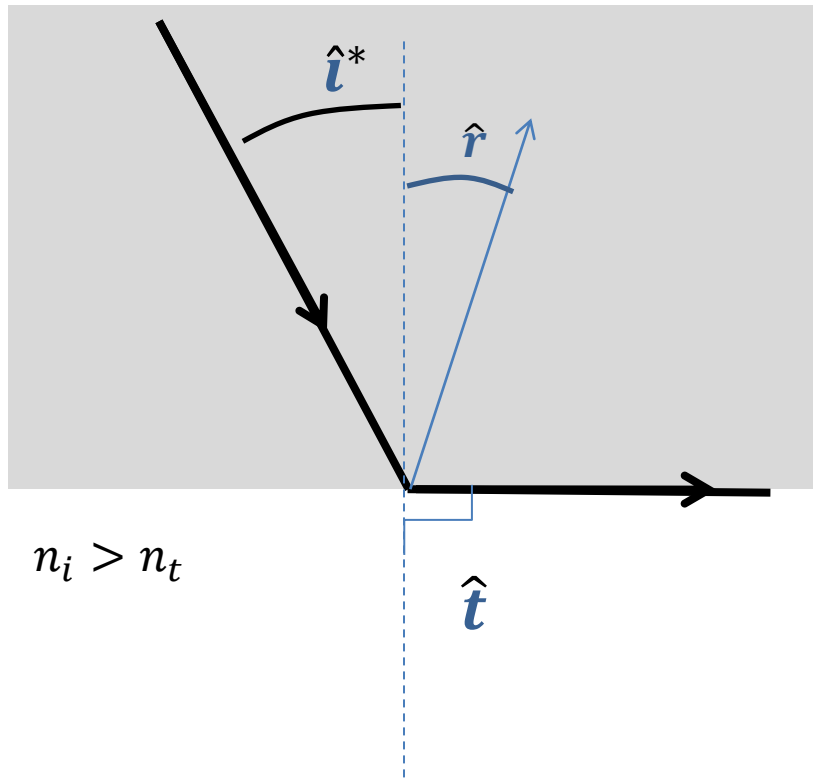


Supongamos que $n_i > n_t$. Que sucede si se incrementa el ángulo de incidencia **demasiado**?

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

Reflexión Total Interna

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



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

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

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

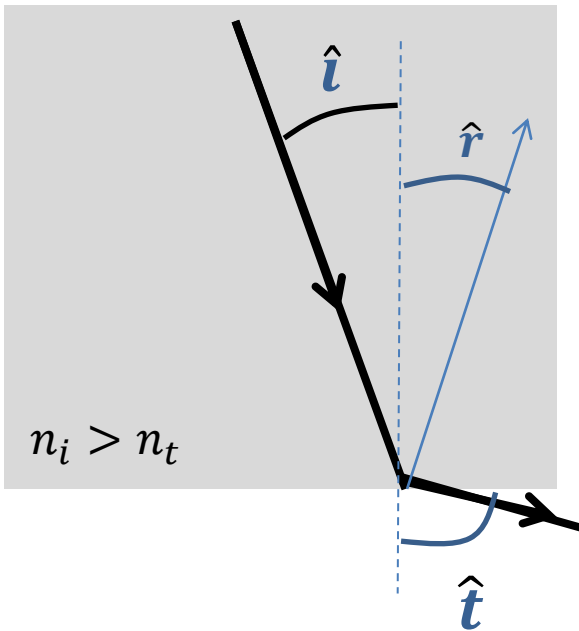
$$\hat{i}^* = \arcsin \frac{n_t}{n_i}$$

Reflexión Total Interna

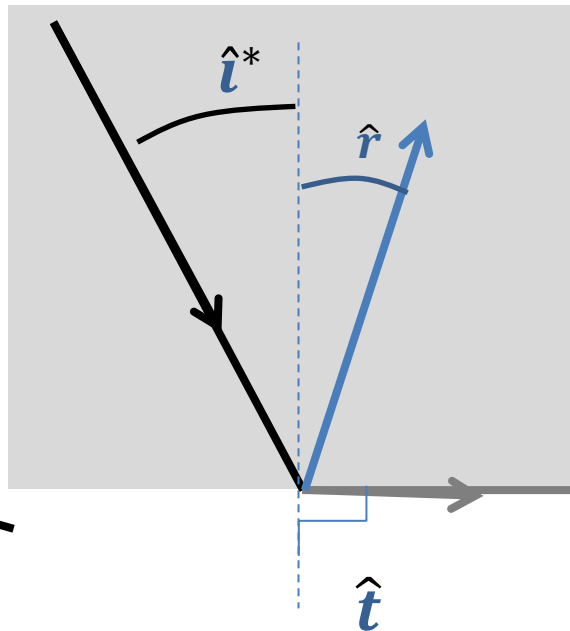
$$n_i \sin \hat{i} = n_t \sin \hat{t}$$

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

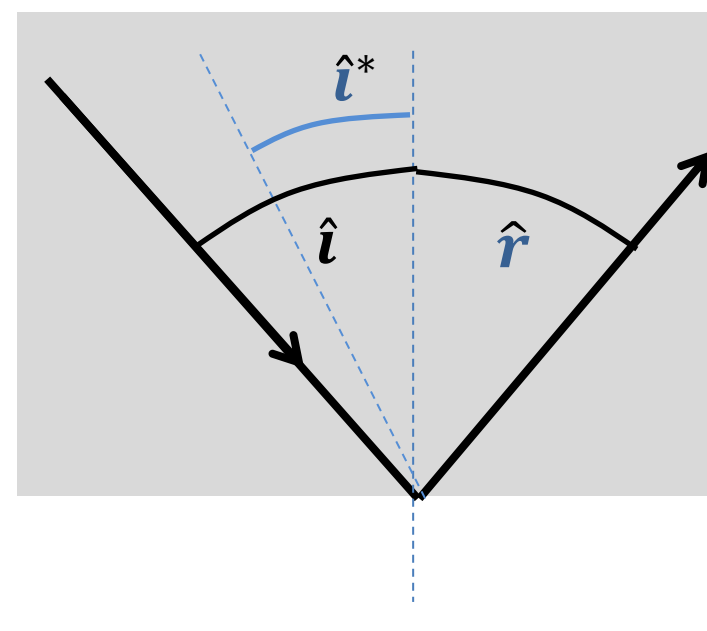
$$\hat{i} < \hat{i}^*$$



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

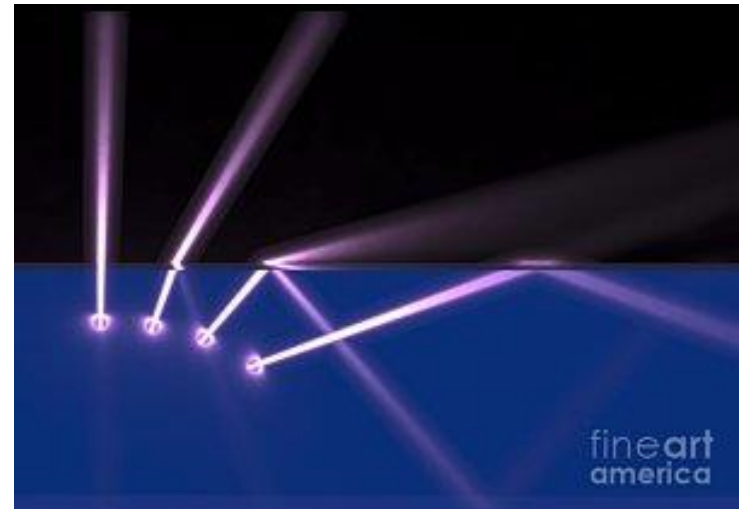


$$\hat{i} > \hat{i}^*$$



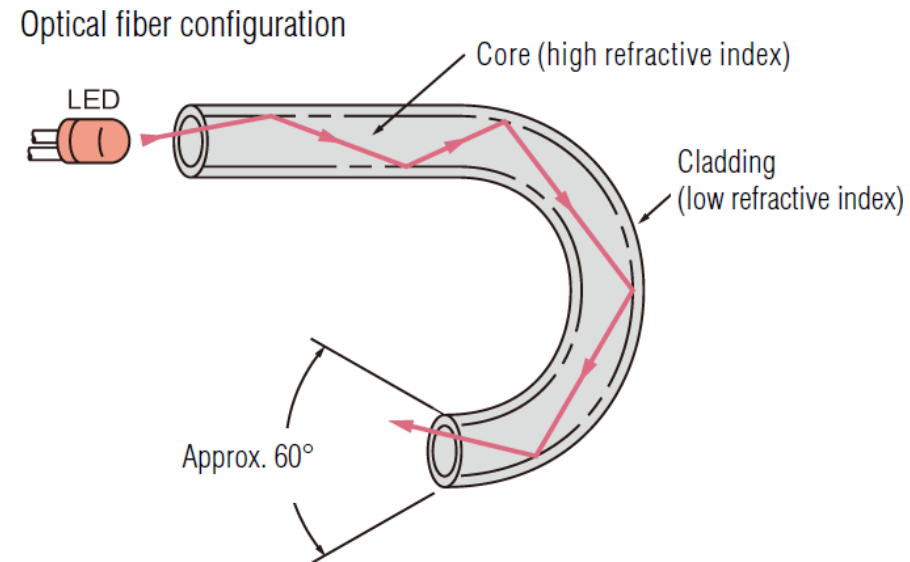
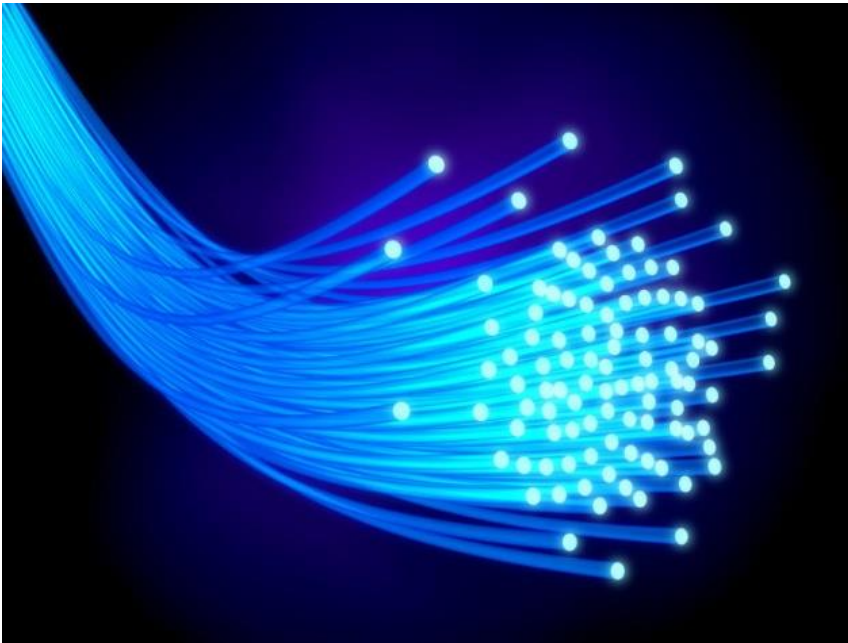
Reflexión Total Interna

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

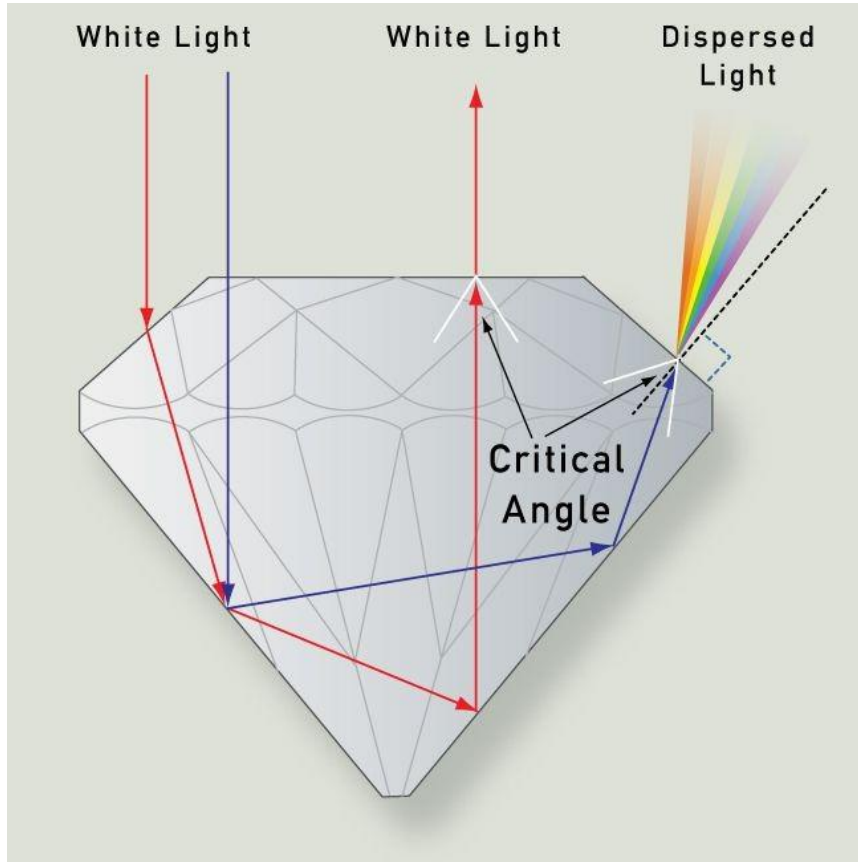


RTI y comunicaciones

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



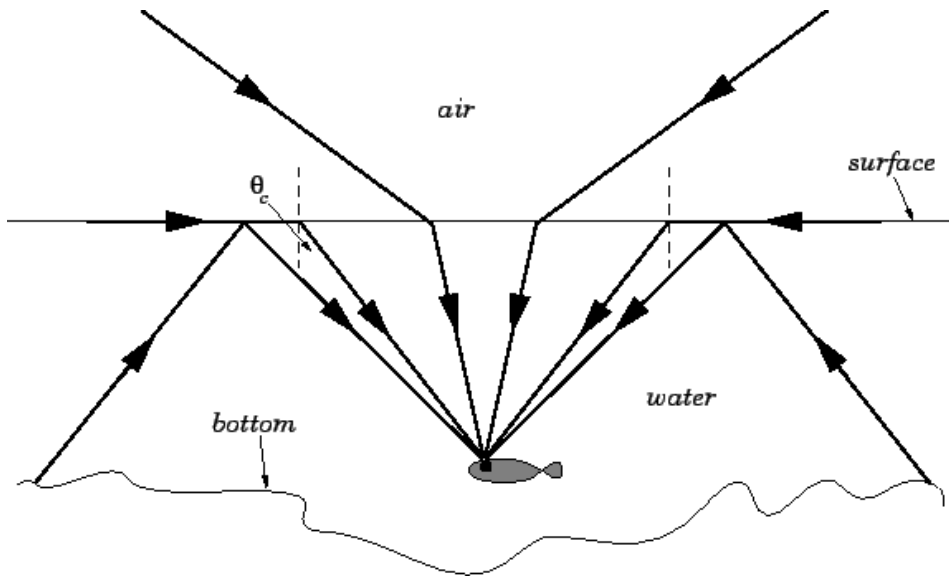
RTI y Glamour



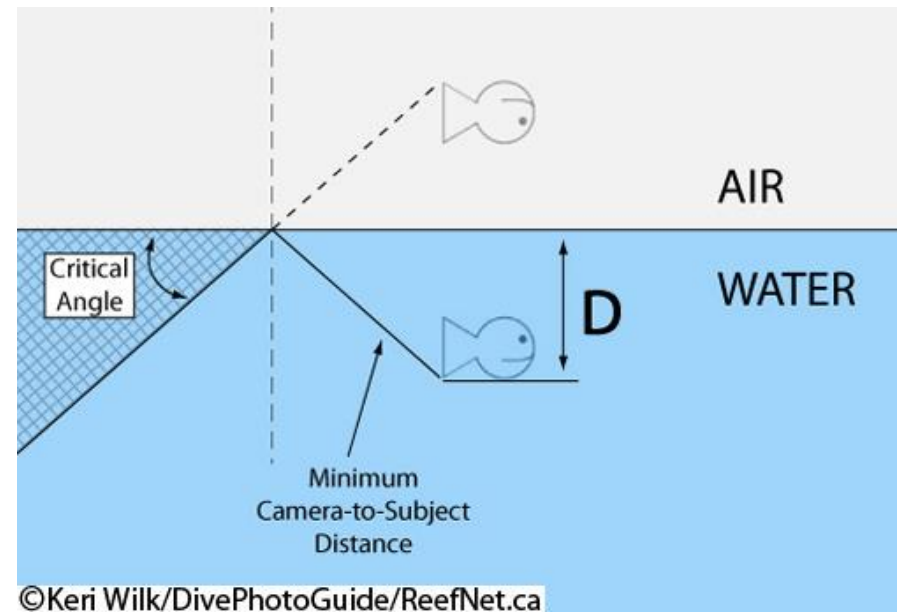
El alto índice de refracción del diamante hace que el ángulo crítico de la interface diamante-aire sea muy chico. El corte y facetado provocan que puedan ocurrir numerosas RTI y que finalmente la luz emerja por la parte superior.

La ventana de Snell

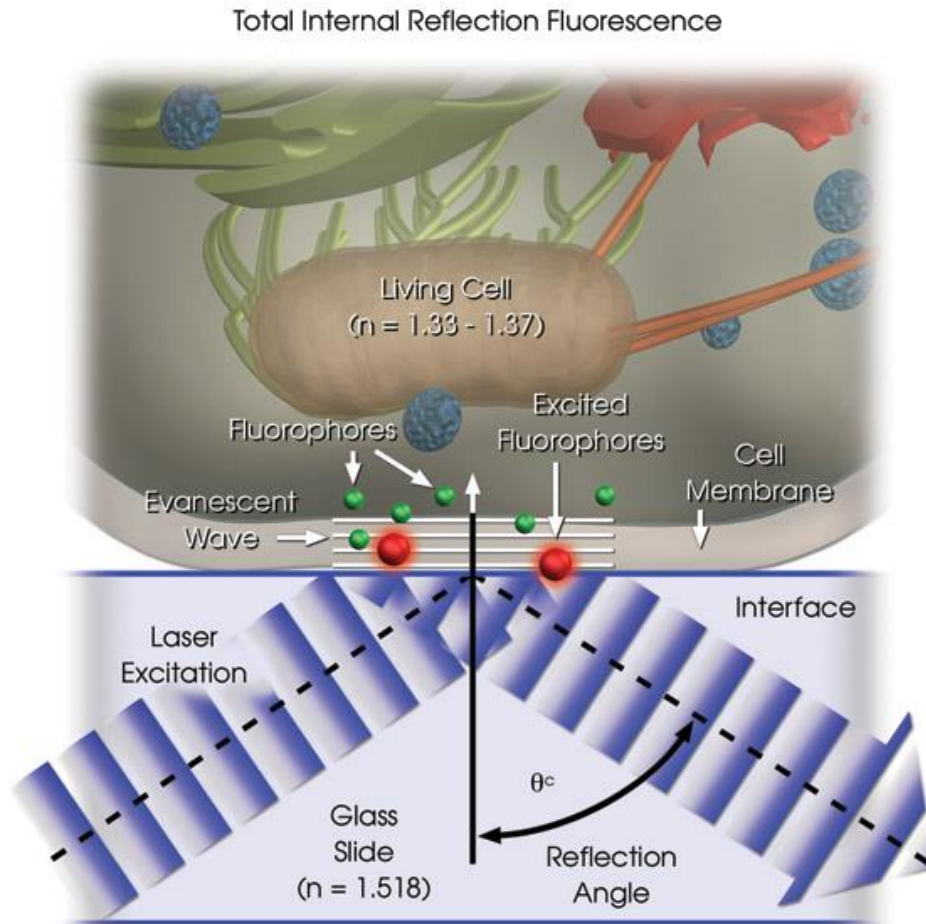
Para ángulos de incidencia mayores al crítico no hay onda transmitida, la onda es reflejada por completo.



RTI y fotografia



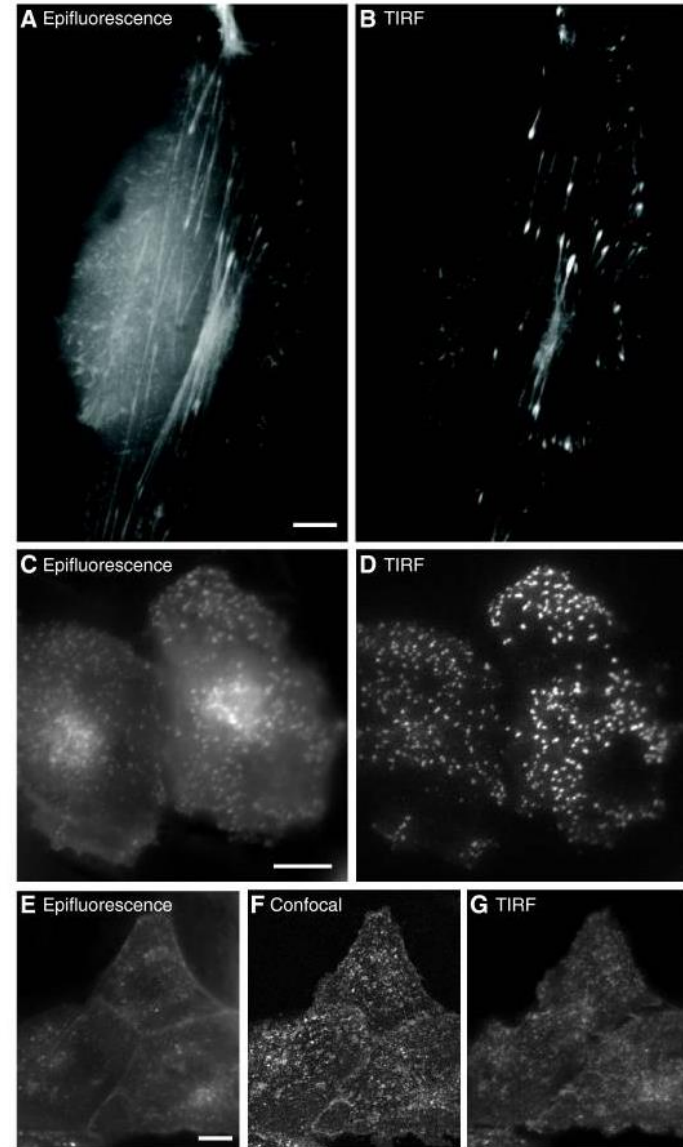
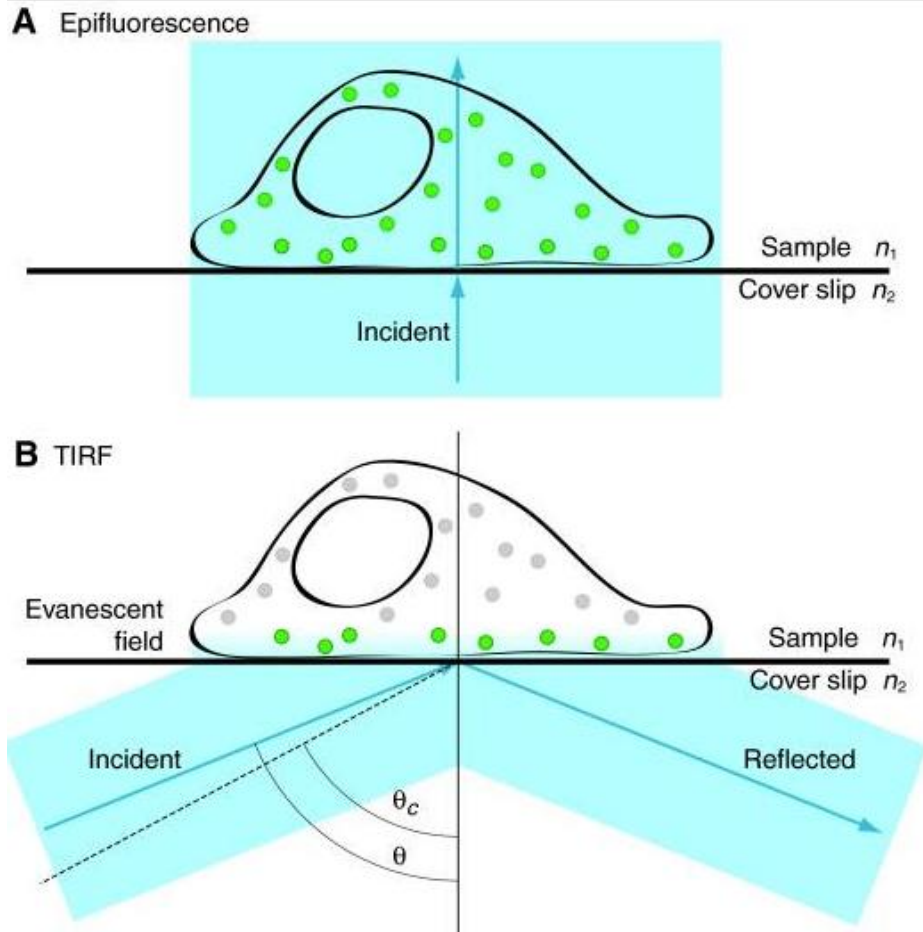
RTI y microscopia



← Onda evanescente penetra unas pocas longitudes de onda

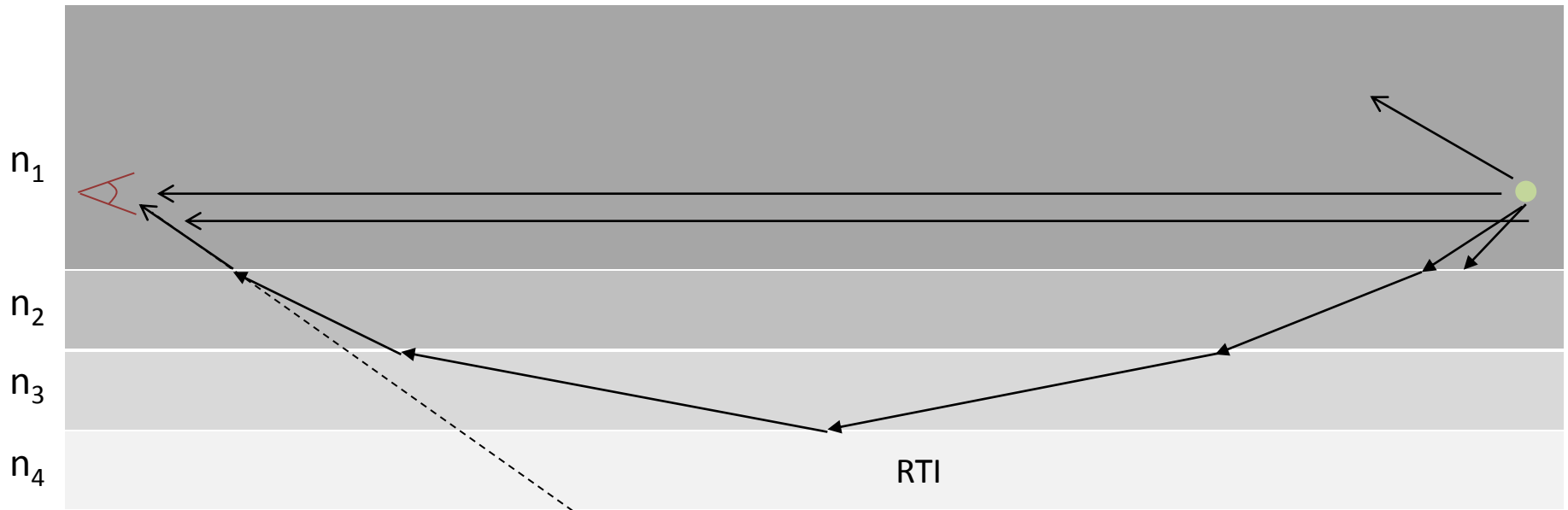
Imaging with total internal reflection fluorescence microscopy for the cell biologist., J Cell Sci 2010, Matheyses & Rappoport

RTI y microscopia



Así se fabrica un espejismo

$$n_1 > n_2 > n_3 > n_4$$

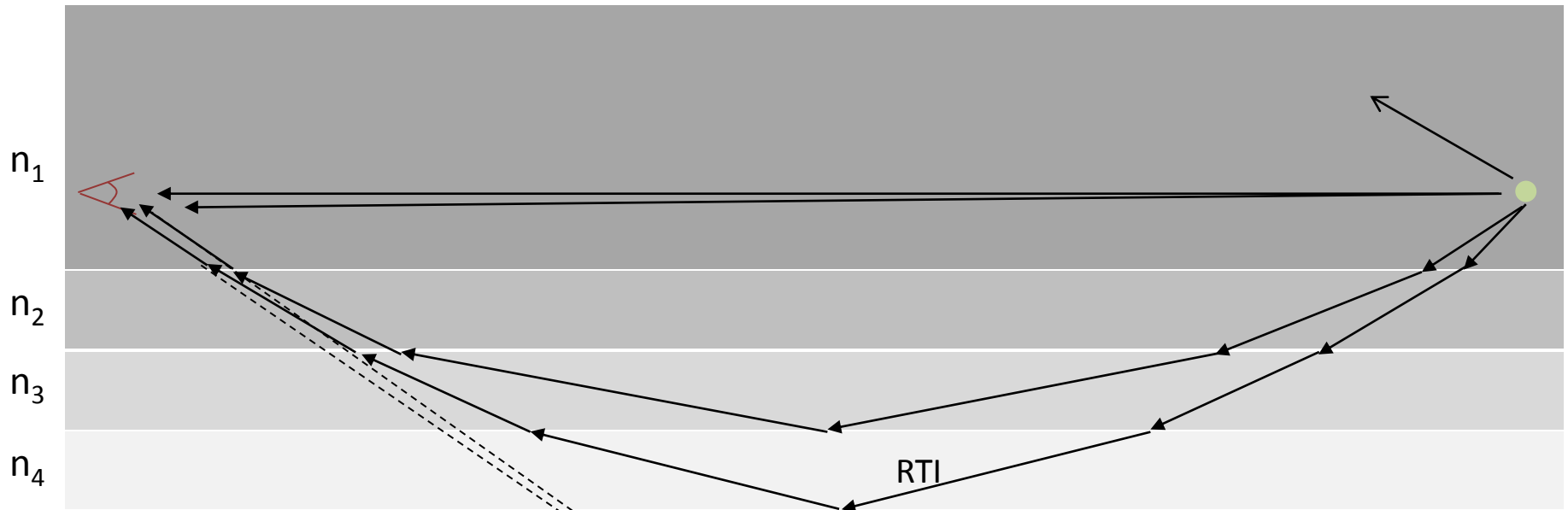


- Ambas trayectorias tienen similar LCO
- El observador vislumbra **dos** imágenes puntuales

Imagen virtual

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**

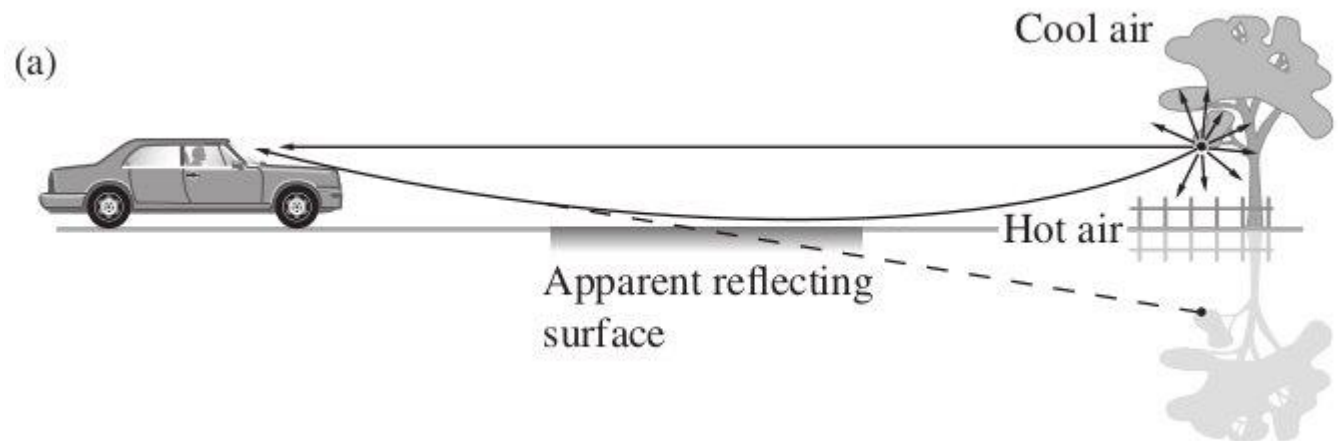
Imagen virtual



Espejismos



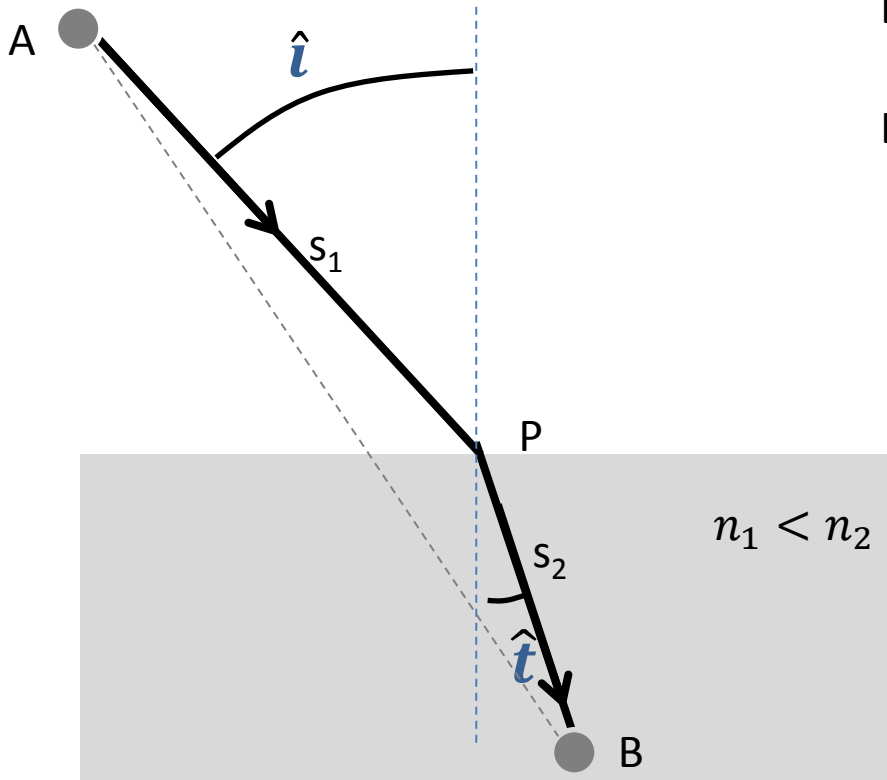
El índice de refracción del aire disminuye con la temperatura.



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.

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



Para la trayectoria de la figura:

Long.Camino Geométrico: $s_1 + s_2$

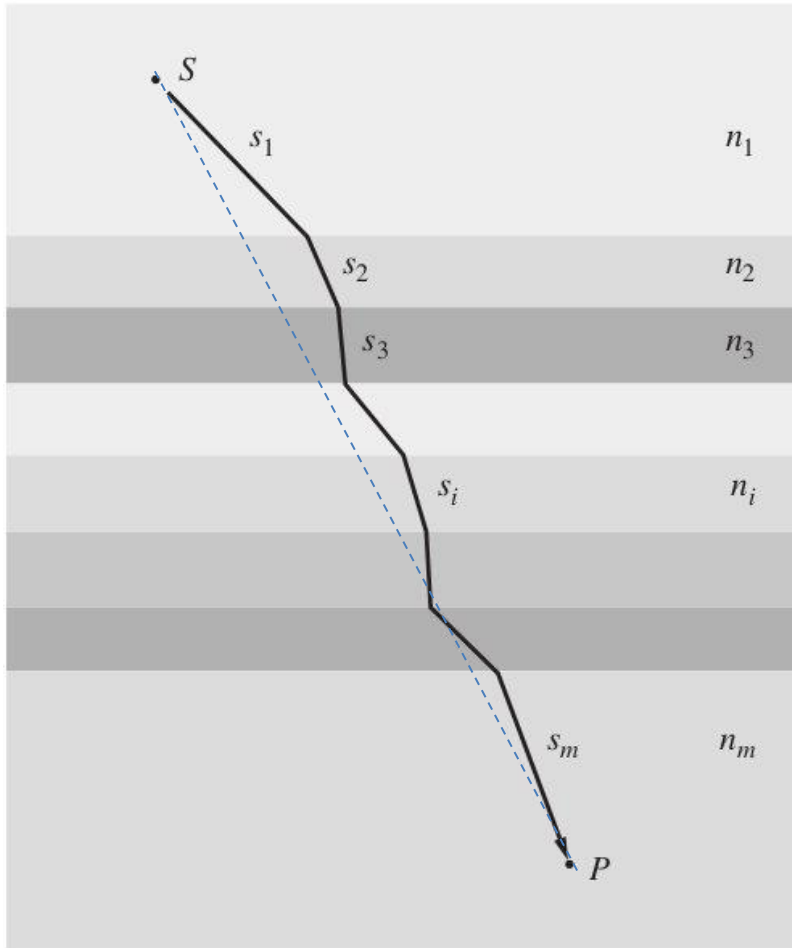
Long.Camino Óptico: $n_1 s_1 + n_2 s_2$

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

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

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



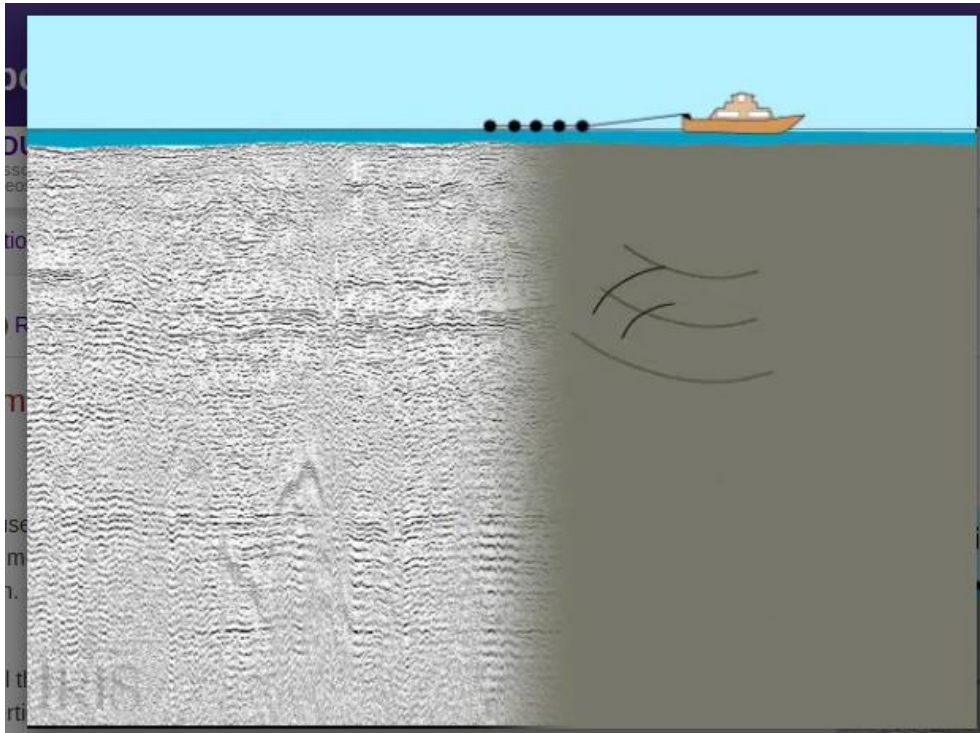
- La propagación a lo largo de diferentes medios puede estimarse a partir de la ley de Snell aplicada a cada interfase.
- La trayectoria que sigue el rayo que conecta dos puntos dados es aquella que **minimiza la longitud de camino óptico** entre dichos puntos (o equivalente, **minimiza el tiempo de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

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

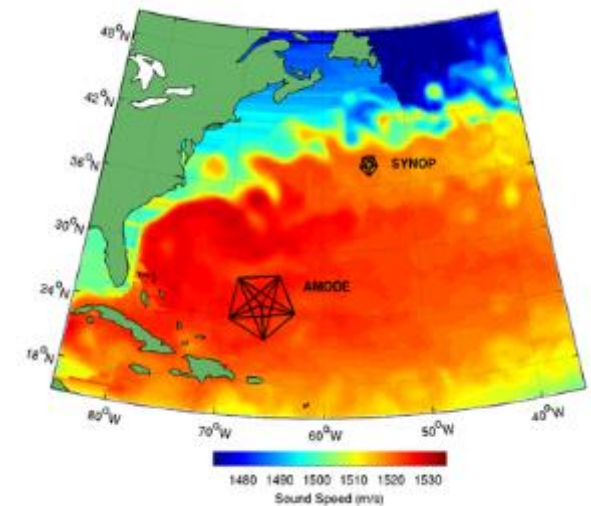
Camino óptico: $n_1 s_1 + n_2 s_2 + \dots + n_m s_m$

Un poco de geo ...

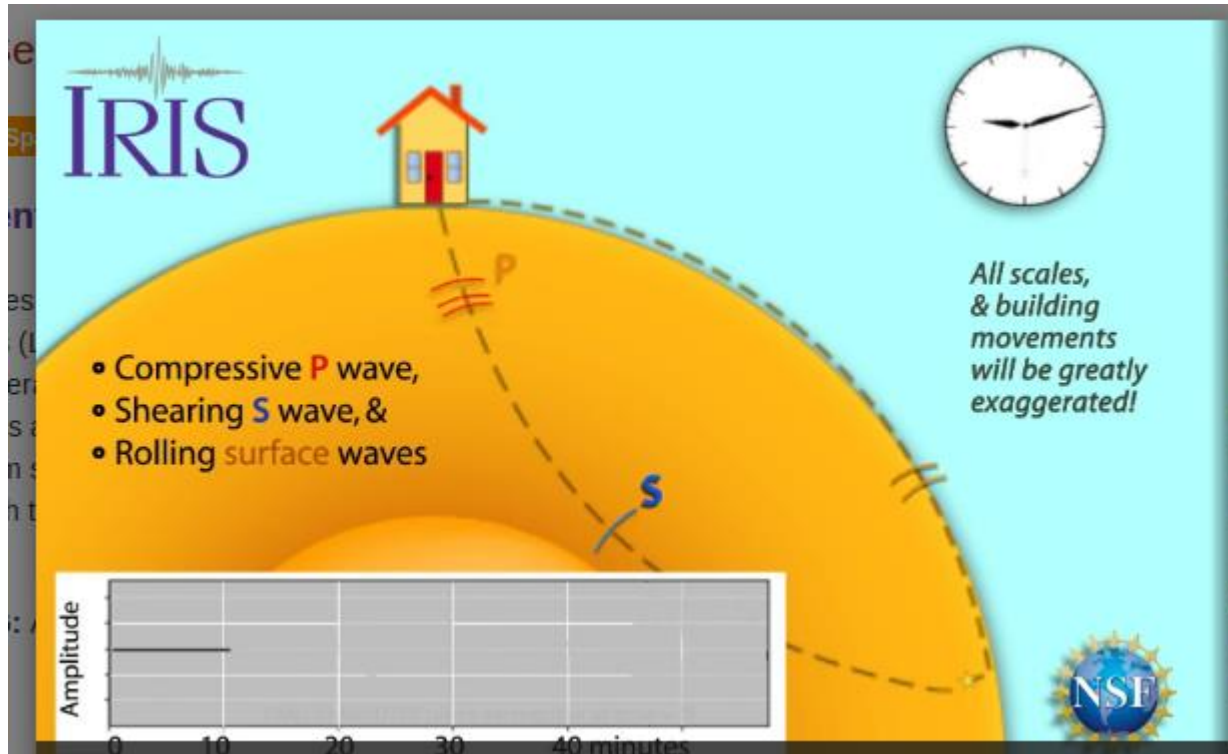
Propagación de ondas en medios no homogéneos



Ocean Acoustic Tomography

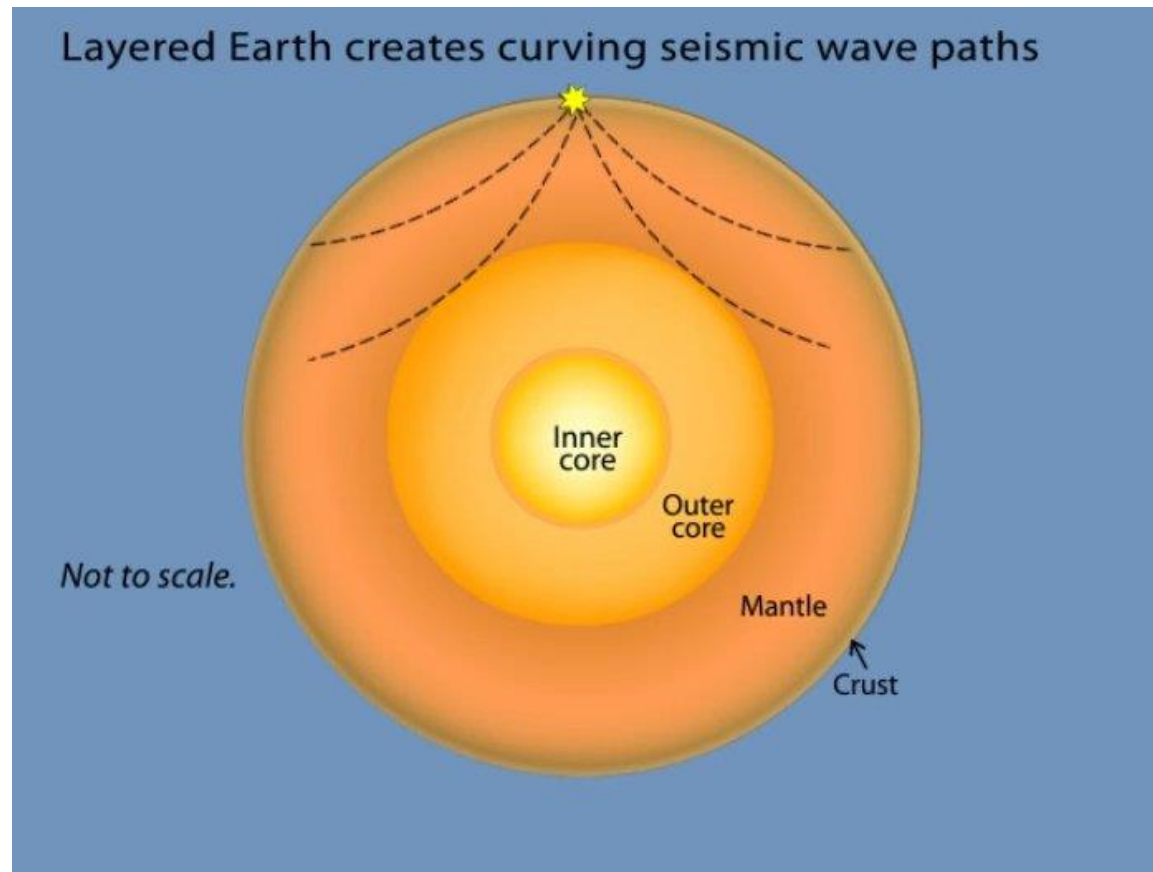
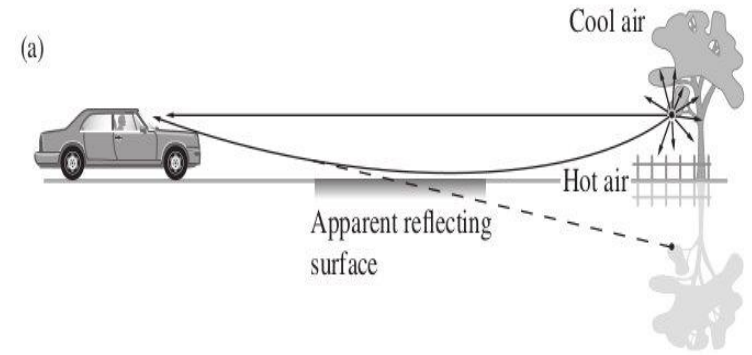


Sísmica



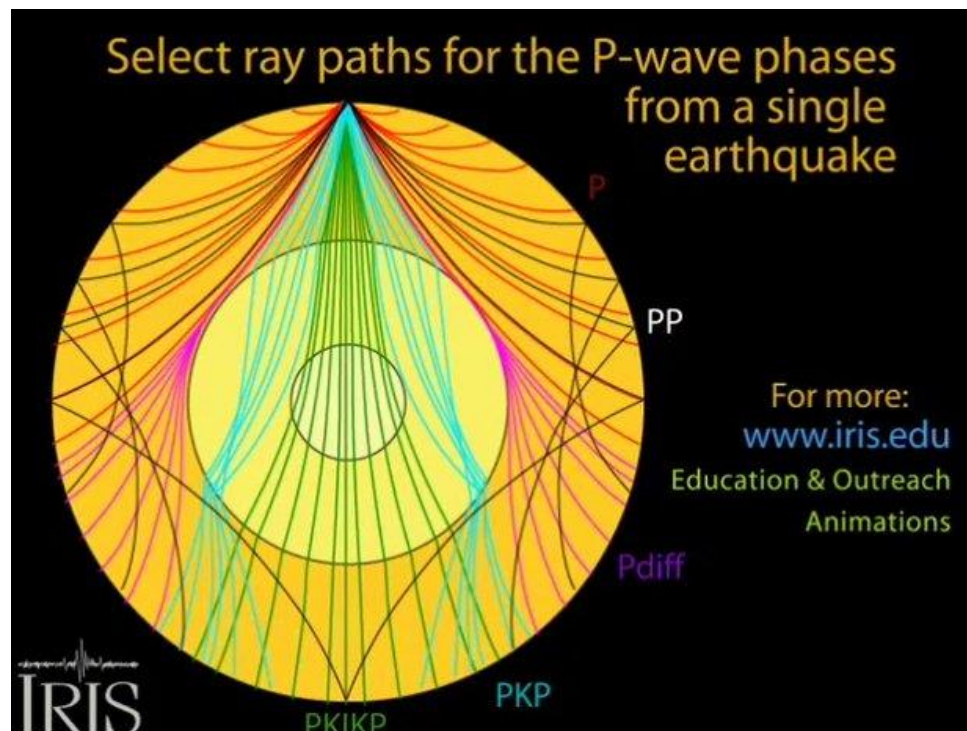
https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/1component_seismogram_building_responds_to_p_s_surface_waves

Curvado de ondas sísmicas



Un poco más de geo ...

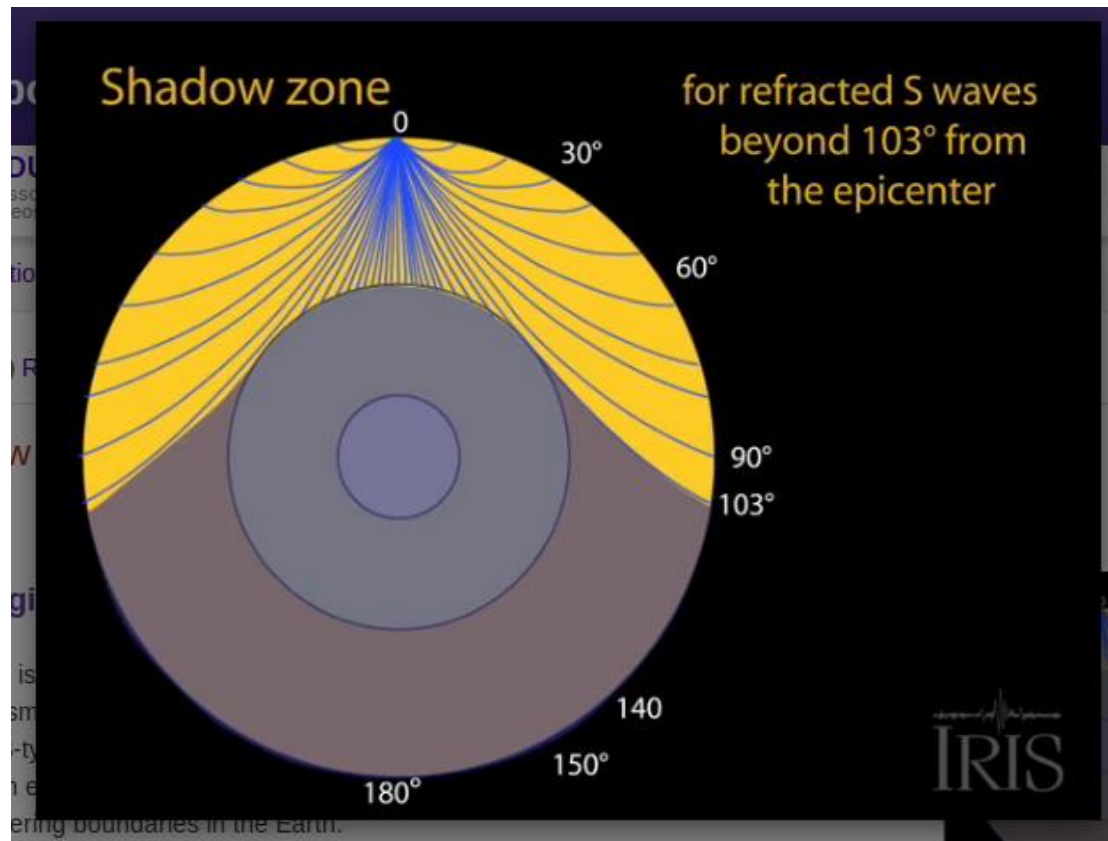
Propagación de ondas P en medios no homogéneos



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

Un poco más de geo ...

Propagación de ondas S en medios no homogéneos



Bigliografia

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