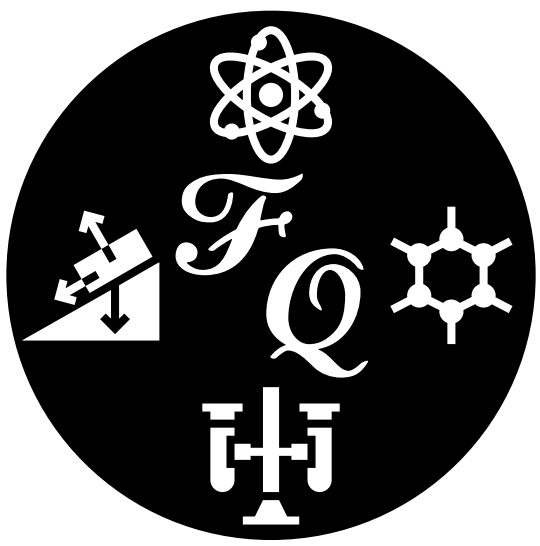




NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

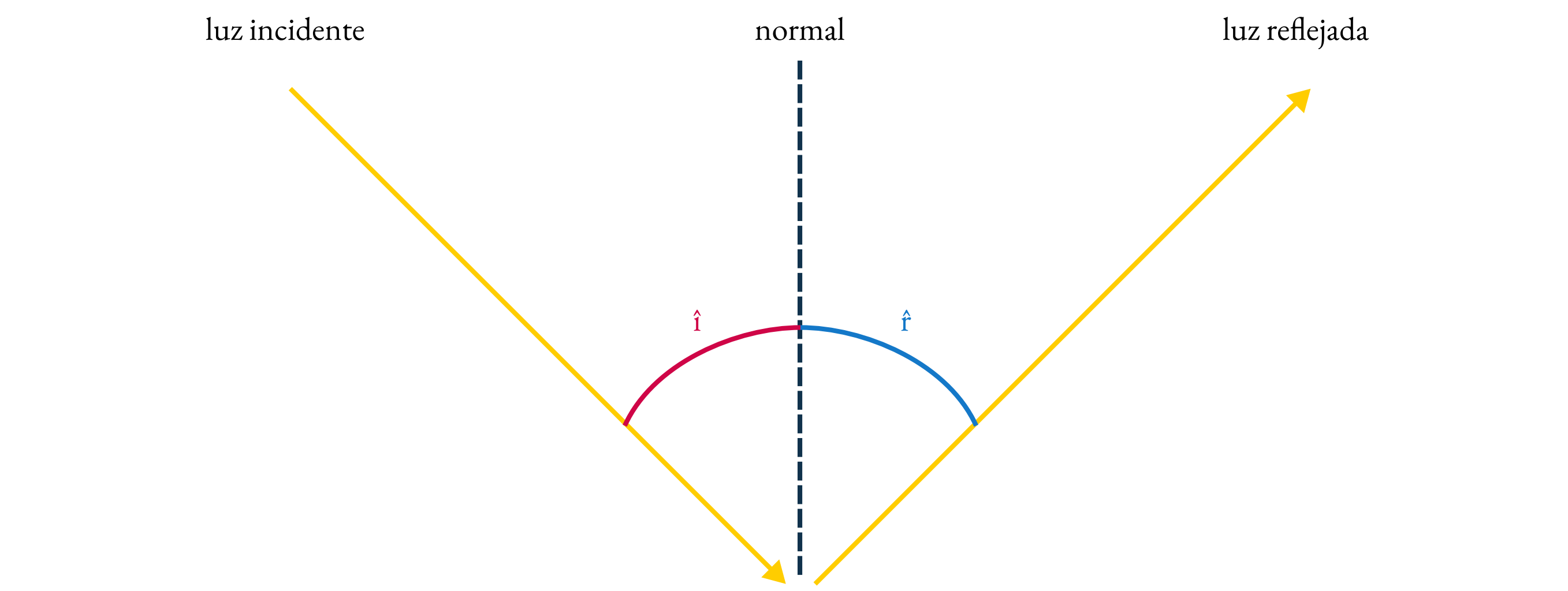
Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa

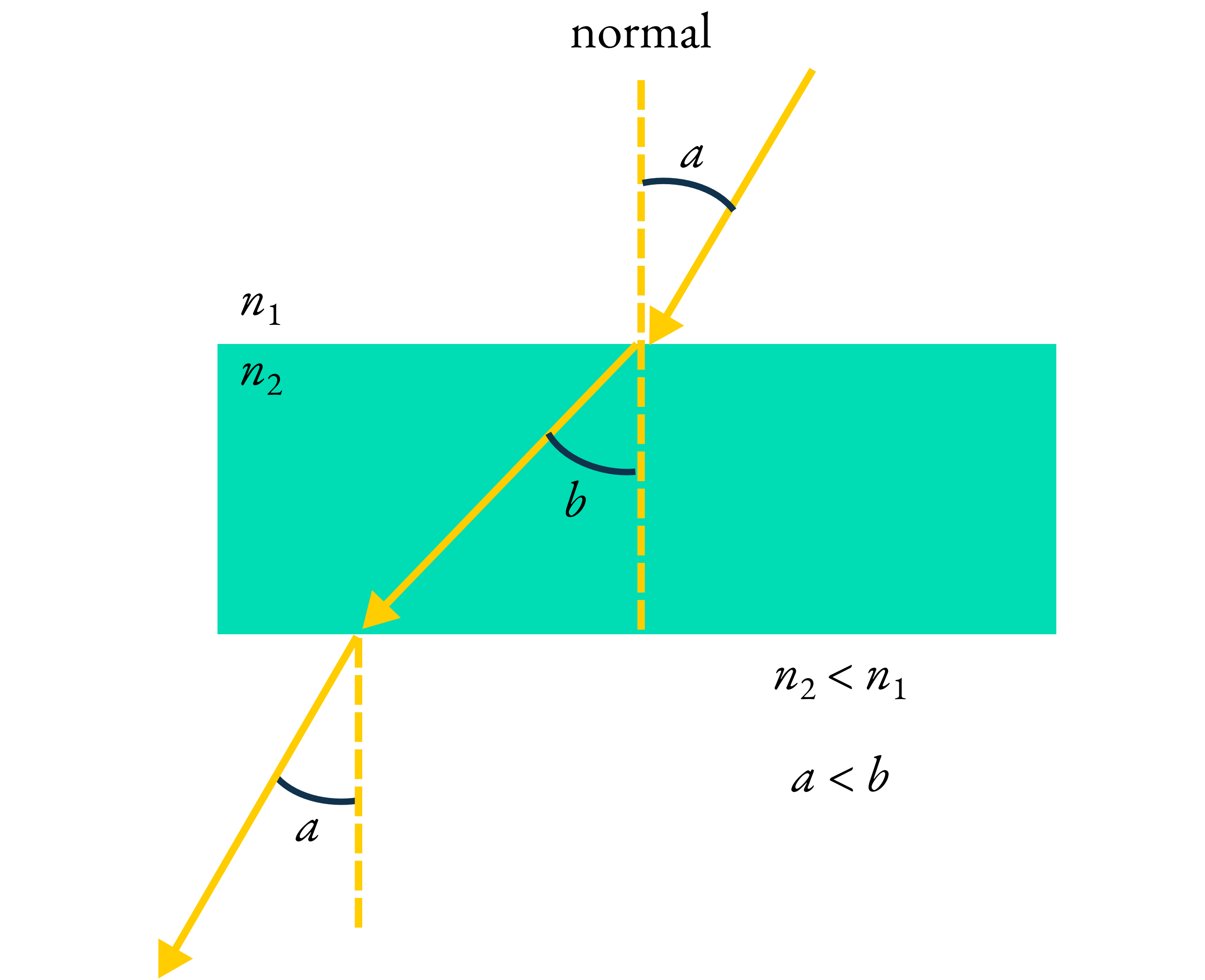


Teoría corpuscular de Newton

Newton apoyaba la teoría corpuscular según la cual la luz estaba formada por partículas que se desplazaban en línea recta desde la fuente emisora. Esta teoría permitía explicar satisfactoriamente la reflexión aplicando las leyes de la dinámica de Newton:



Sin embargo, para explicar la refracción, esta teoría presentaba mayores dificultades:

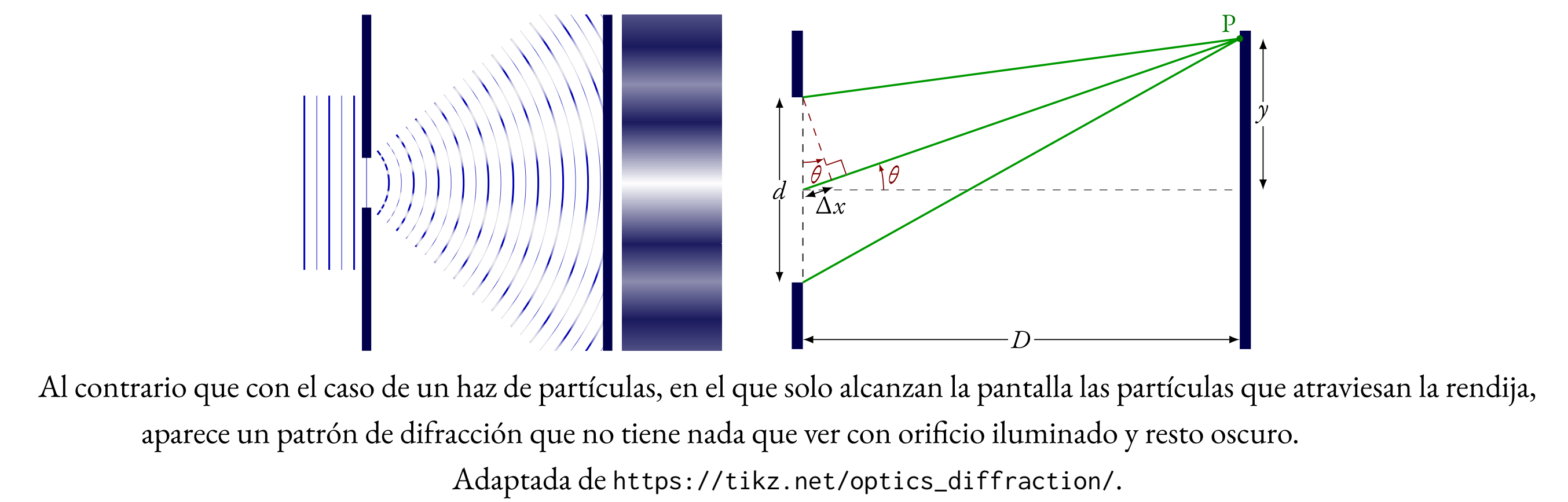


Teoría ondulatoria de Huygens

Huygens propuso una teoría alternativa a la de Newton conocida como teoría ondulatoria de la luz, según la cual la luz es una onda, o lo que es lo mismo, la propagación de una perturbación en el medio. Además, la teoría de Huygens predecía que la luz debía propagarse más rápido en el aire que en el agua, justo al contrario que Newton. Sin embargo, esta teoría no podía explicar la propagación rectilínea de la luz y la existencia, por tanto, de las sombras. Si la luz era una onda como el sonido, debía ser capaz de sortear obstáculos. Ambas teorías convivieron hasta el s. XIX, cuando al fin pudo demostrarse experimentalmente que la luz se propagaba más rápido en el aire que en el agua, corroborando así la predicción de la teoría ondulatoria. Además, comenzaron a hacerse nuevos experimentos que solo podían explicarse suponiendo que la luz era una onda.

Fresnel y la difracción

La difracción es un fenómeno que se produce cuando una onda de longitud de onda λ atraviesa un obstáculo cuyo tamaño d es comparable a λ :



Predicciones

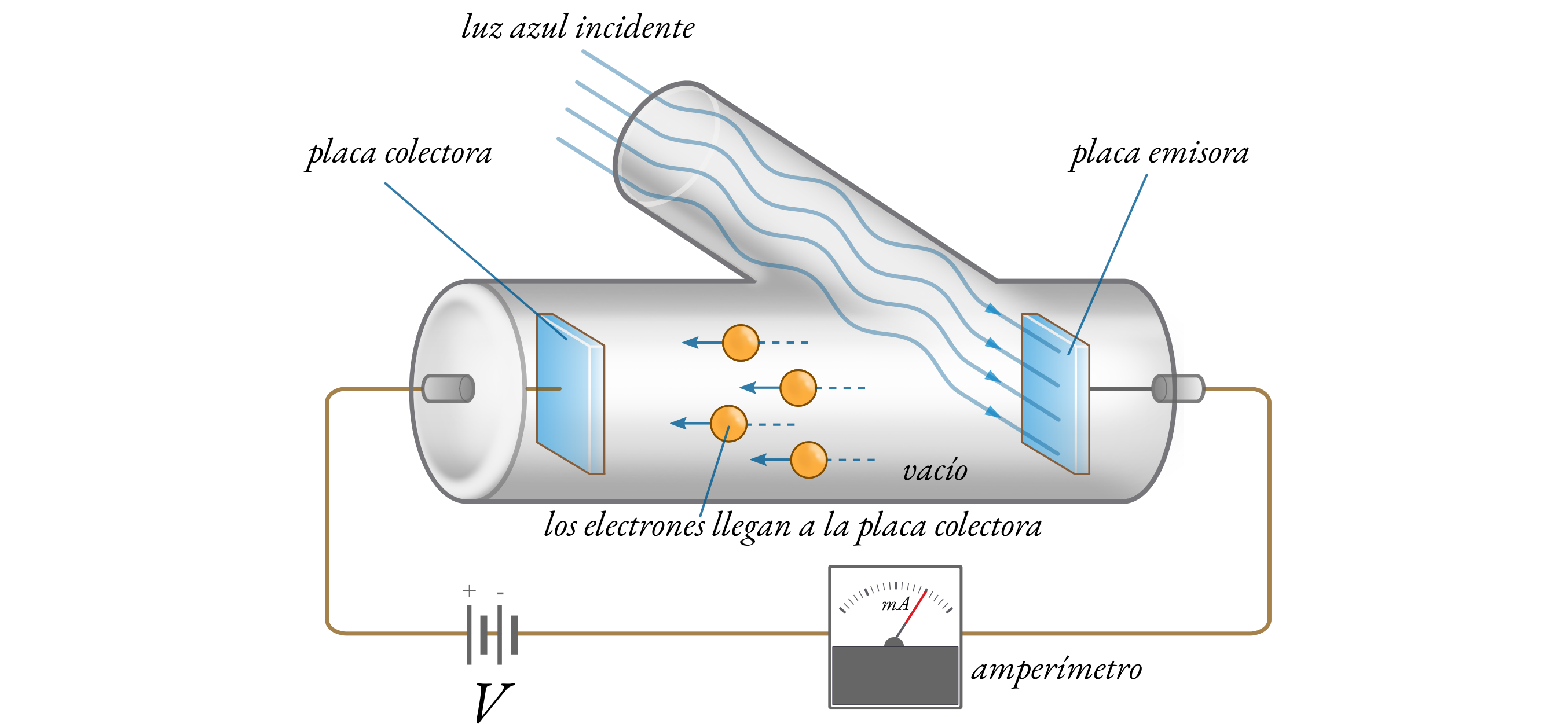
Teoría corpuscular Si la luz está formada por partículas que se propagan en línea recta, en la pantalla debería aparecer una figura similar a la rendija (visto de frente, un círculo luminoso y el resto sombra).

Teoría ondulatoria Fresnel predijo que debería obtenerse, debido a interferencias constructivas y destructivas, una figura formada por franjas (visto de frente, anillos concéntricos de luces y sombras).

Al realizar la experiencia, se obtuvo la predicción de Fresnel. Era muy poco intuitiva y al ver que se cumplía, esto reforzó notablemente la teoría ondulatoria de la luz. Aunque la teoría ondulatoria era mayoritariamente aceptada, con el nacimiento de la física moderna, comenzaron a realizarse nuevos experimentos inexplicables.

Efecto fotoeléctrico y Einstein

Se trata de un fenómeno en el que se emiten electrones desde una superficie conductora cuando se hace incidir luz sobre ella. Se estudia mediante un dispositivo del tipo:



Se obtienen los siguientes **resultados**:

1. Es instantáneo. Si se ilumina el electrodo se detecta corriente y si se deja de iluminar ya no se detecta.
2. El número de electrones es proporcional a la intensidad de la luz. Si se duplica la intensidad, se duplica el número de electrones.
3. La energía de los electrones depende de la frecuencia de la luz incidente, ν . Cuanto mayor es ν más energía (velocidad) tienen los electrones.
4. Existe una frecuencia umbral ν_0 tal que si $\nu < \nu_0$ no se produce efecto fotoeléctrico.

Resultó fácil ver que solo puede ser explicado mediante teoría corpuscular:

Teoría ondulatoria En ondas, la energía es proporcional a la intensidad. Cuanto mayor es la intensidad, mayor energía deberían tener los electrones, pero no sucede así.

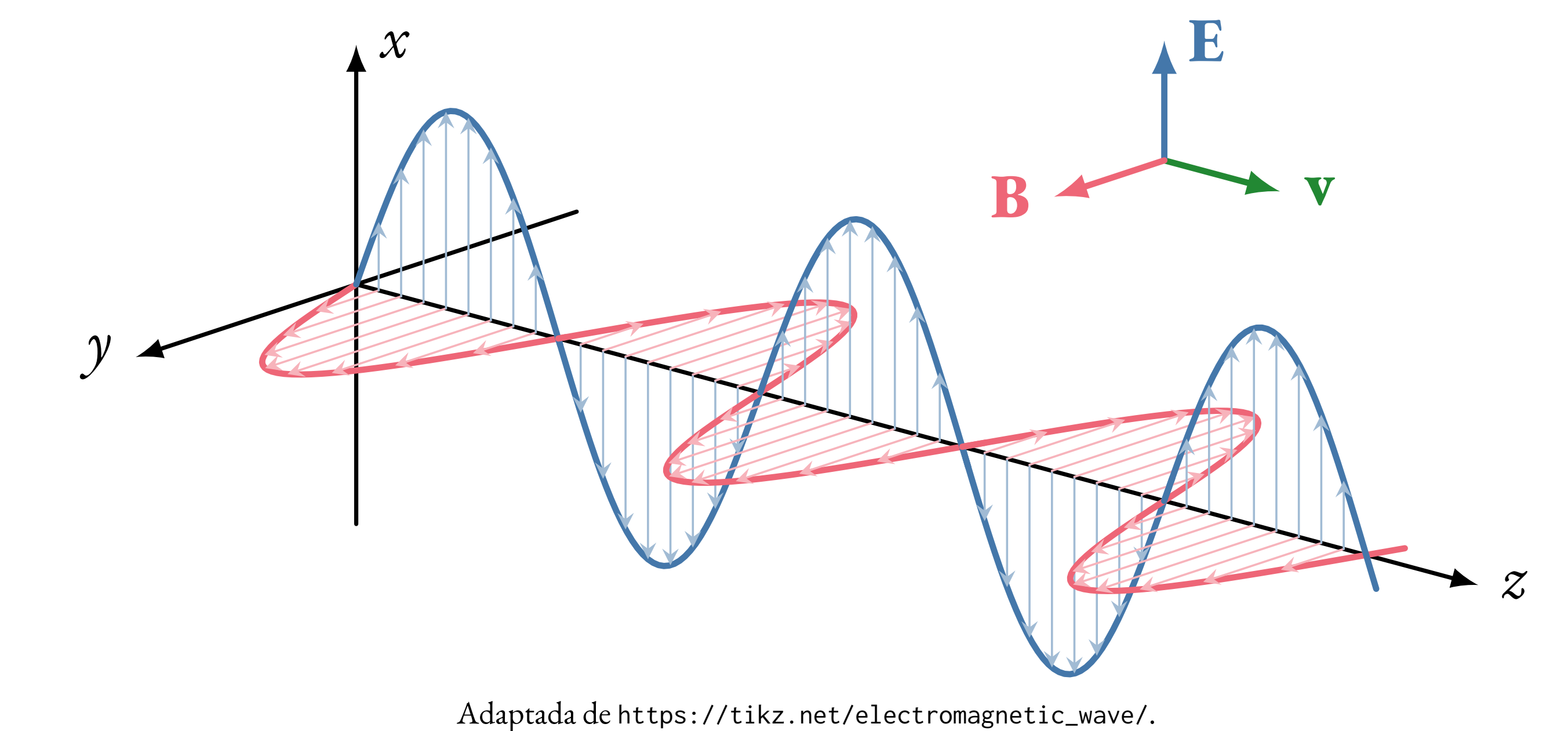
Teoría corpuscular Cuanto mayor es la intensidad, más partículas en la luz cuya energía es $h\nu$. Así, más choques y más electrones pero su energía no cambia.

Einstein recibió el **Premio Nobel** por la explicación corpuscular del efecto fotoeléctrico.

La luz y las ondas electromagnéticas

La luz es una onda electromagnética, es decir, una perturbación de campo eléctrico y campo magnético que se propaga por el espacio (incluso en el vacío). Se descubrió fue **James Clerk Maxwell**. Teniendo en cuenta las ecuaciones de Maxwell, sucede que cuando una carga eléctrica describe un movimiento acelerado, produce un campo eléctrico dependiente del tiempo, $E(t)$, a su alrededor, que a su vez crea un campo magnético dependiente del tiempo, $B(t)$, que a su vez crea un $E(t)$ y así sucesivamente. En consecuencia, la perturbación se propaga por el espacio dando lugar a una onda electromagnética, que se **caracteriza** por:

- Se originan por cargas eléctricas aceleradas.
- Consisten en la variación periódica de un campo eléctrico y otro magnético:



- El campo eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y perpendiculares al vector velocidad de propagación de la onda (onda transversal). Varían sinusoidalmente con el tiempo (ondas armónicas):

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx)$$
$$B = B_0 \sin(\omega t - kx)$$

- Las dos ondas se propagan en fase y sus elongaciones en una posición e instante determinados siempre cumplen:

$$E = vB$$

- No necesitan un medio para propagarse, aunque su velocidad depende de las características del medio:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

siendo ϵ la permitividad eléctrica y μ la permeabilidad magnética del medio.

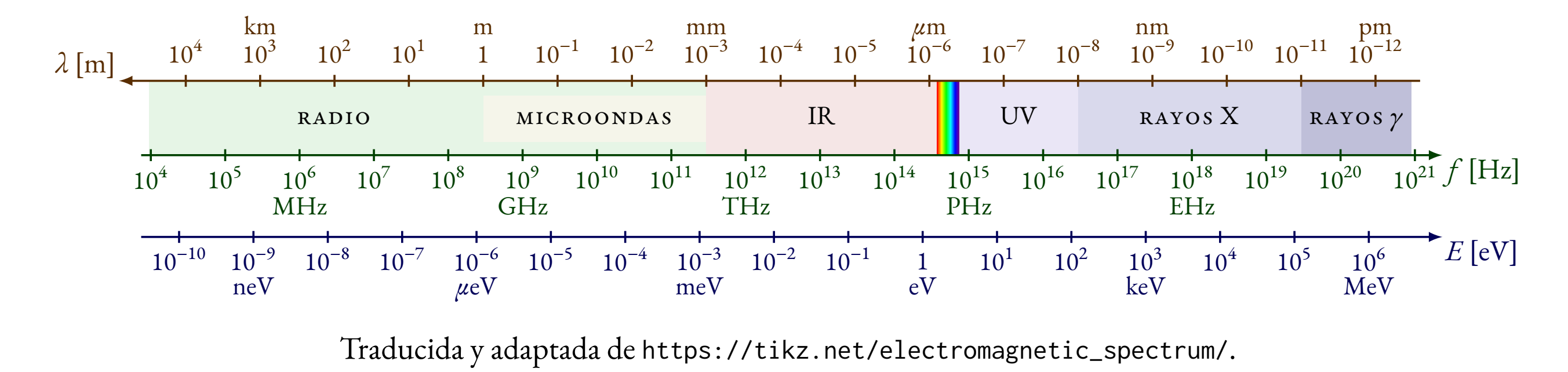
- Se caracterizan por λ y f que se relacionan entre sí:

$$v = \lambda f$$

- La energía que transportan es proporcional a la frecuencia, cuanto mayor sea la frecuencia mayor es la energía transportada.

El espectro electromagnético

Es el conjunto de todas las ondas electromagnéticas ordenadas por orden creciente de frecuencia o de longitud de onda:

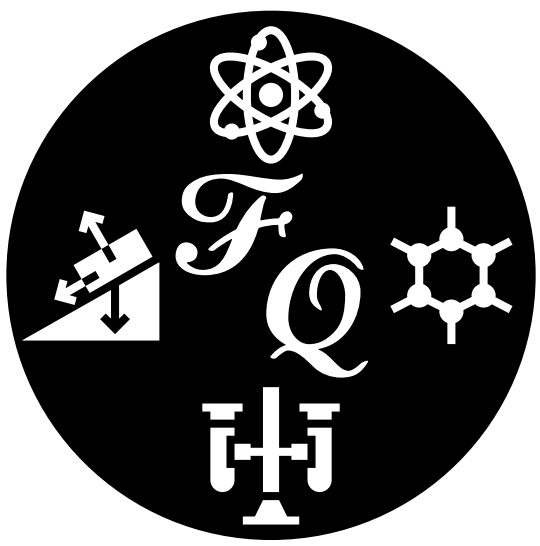


Dualidad onda-corpúsculo

“Al final, ¿qué es la luz? ¿Onda o corpúsculo?”

De momento no se ha puesto de manifiesto en un mismo experimento esta doble naturaleza de la luz. Después DE BROGLIE se preguntó: “Si las ondas son partículas, ¿las partículas son ondas?”

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



NATURALEZA Y PROPAGACIÓN DE LA LUZ

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



Características de la luz en su propagación

- A) En un medio homogéneo e isótropo la luz se propaga en línea recta. Para simplificar las cosas, teniendo en cuenta que la propagación es rectilínea, se emplea el concepto de **rayo**: línea que indica la dirección de propagación de la luz y es perpendicular al frente de ondas.
- B) La **velocidad** de propagación **depende del medio** por el que se propaga:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

siendo ϵ la permitividad eléctrica y μ la permeabilidad magnética del medio. En el vacío:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, y en discrepancia con las teorías griegas, la velocidad de la luz es finita. El primero que pudo demostrarlo experimentalmente fue el científico y astrónomo danés Rømer.

- C) La velocidad dentro de un mismo medio es constante. En cada medio puede definirse el denominado **índice de refracción**, n , definido como:

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

con c la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la luz en el medio. Es adimensional y su valor es siempre mayor o igual que 1. Cuanto mayor es n , menor es v en ese medio (más denso).

- D) Cuando la luz pasa de un medio a otro cambia su velocidad y su longitud de onda pero su frecuencia no cambia. Se cumple:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Fenómenos de la luz en su propagación

Reflexión

Es el proceso en el que un haz de luz incide sobre la superficie de separación entre dos medios y se refleja, esto es, se propaga en el mismo medio pero en otra dirección.

LEYES DE LA REFLEXIÓN

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales.

Para que se aprecie la reflexión, la superficie de separación debe ser especular (sus irregularidades pequeñas en comparación con la longitud de onda de la luz incidente). En ese caso los rayos reflejados son paralelos y la reflexión es especular. Cuando, por el contrario, las irregularidades son comparables a la longitud de onda de la luz incidente, se produce una reflexión difusa (los rayos reflejados tienen distintas direcciones; no son paralelos entre sí). Esta reflexión es la que nos permite diferenciar los bordes de los objetos y apreciar así su forma.

Existen superficies que no reflejan toda la luz, sino una parte de esta (p. ej. espejos semitransparentes que reflejan el 50 % y transmiten el 50 %). En este caso la luz reflejada transporta solo una parte de la energía de la luz incidente.

Refracción

Proceso en el cual los rayos de luz atraviesan la superficie de separación entre dos medios y modifican su dirección o se desvían.

LEYES DE LA REFRACCIÓN

- El rayo incidente, el refractado y la normal pertenecen al mismo plano.
- El ángulo de incidencia y el refractado cumplen la **LEY DE SNELL**:

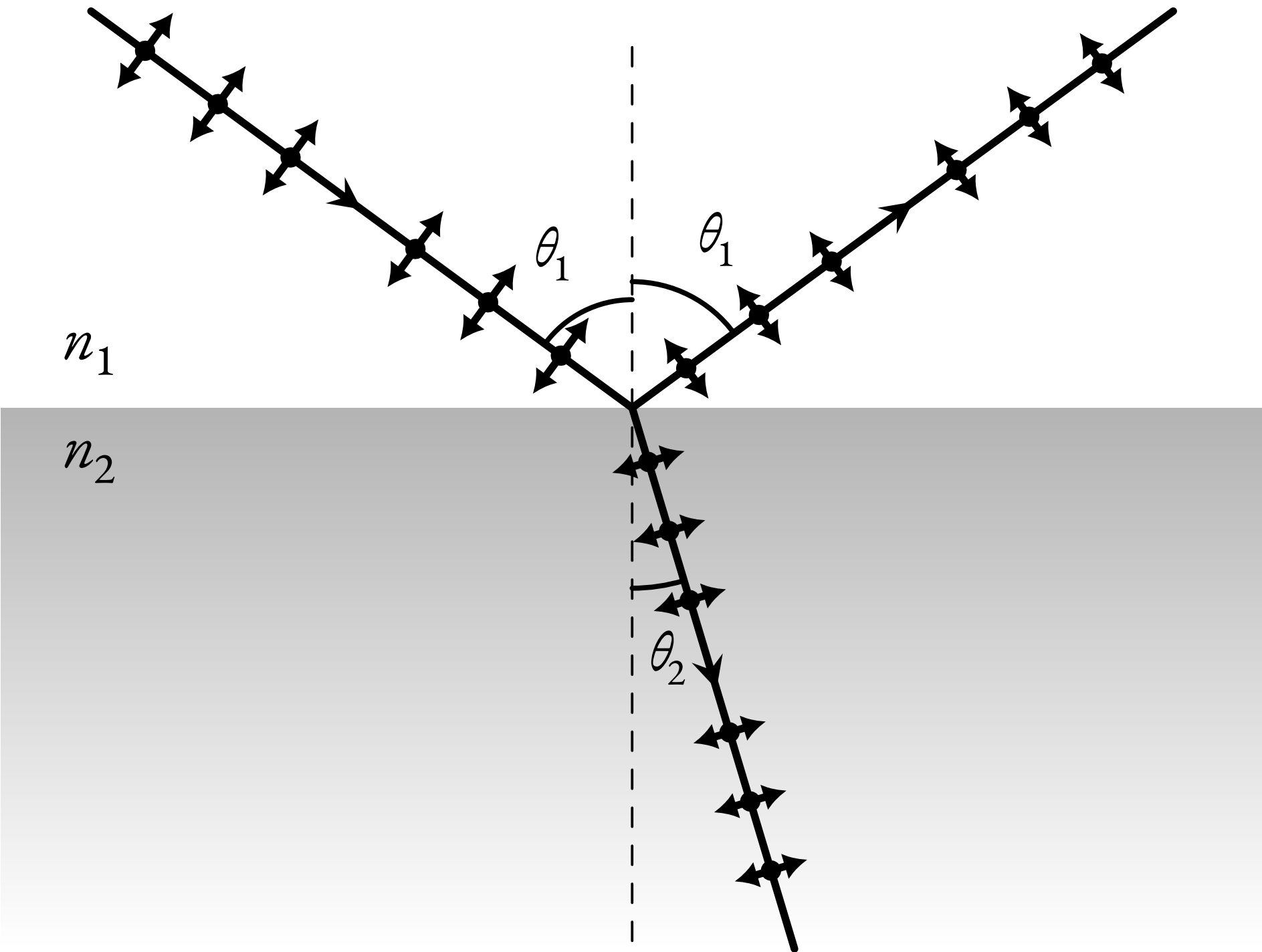
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

Teniendo en cuenta que $n_i = c/v_i$, también puede expresarse como:

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

Fenómenos de la luz en su propagación (cont.)

Refracción (cont.)



Reflexión y refracción. Adaptada de <https://tikz.net/reflection-refraction/>.

Reflexión interna total y ángulo límite

Habitualmente, cuando un rayo incide sobre una superficie de separación entre dos medios, parte del rayo incidente se refleja y parte se refracta al segundo medio. Tanto el rayo reflejado como el refractado cumplen las leyes que hemos descrito. Si $n_2 > n_1$, el rayo refractado se acerca a la normal. Si por el contrario $n_2 < n_1$, el rayo refractado se aleja de la normal.

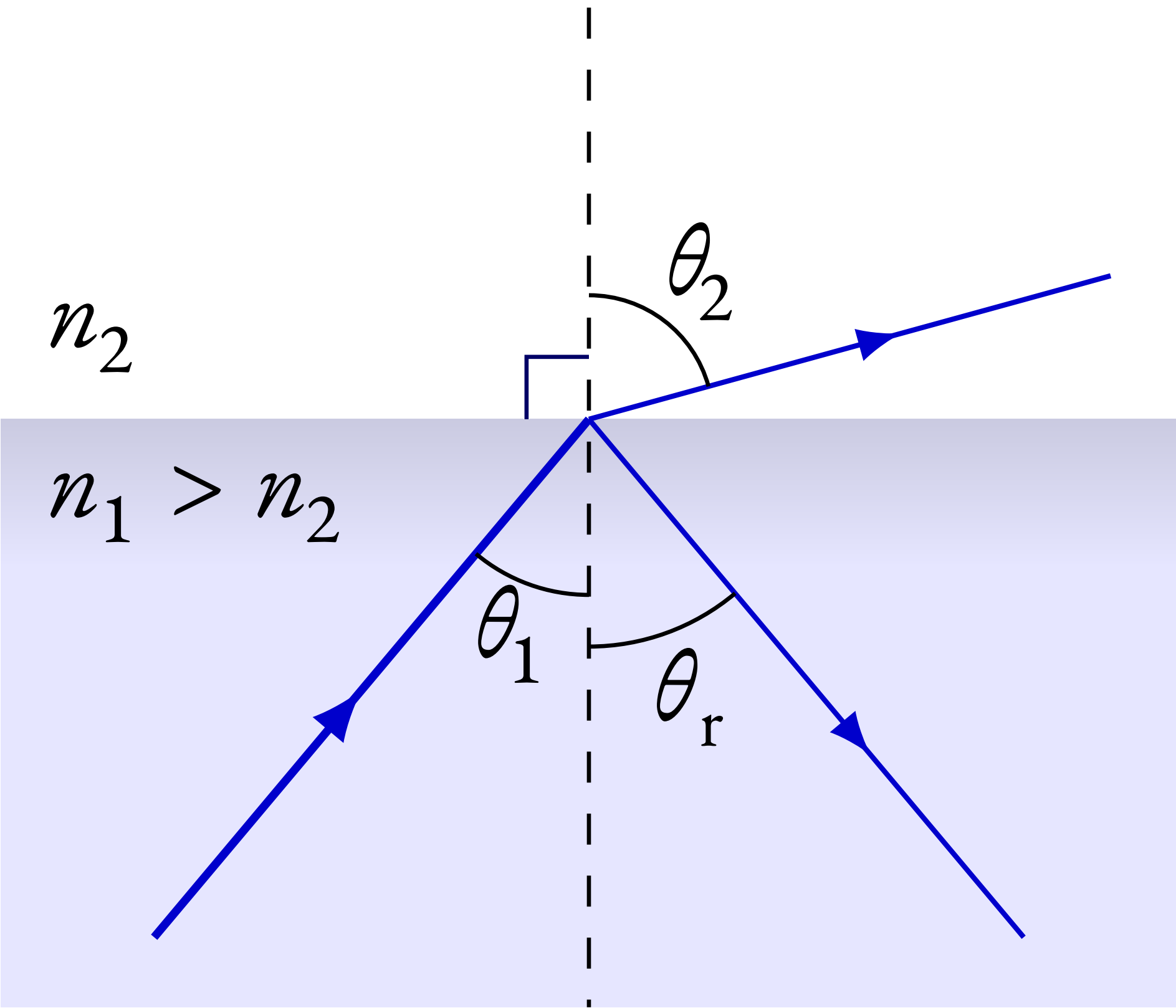


Ilustración del ÁNGULO CRÍTICO o ÁNGULO LÍMITE. Adaptada de https://tikz.net/optics_refractions/.

Cuanto mayor es el ángulo de incidencia θ_1 mayor será el ángulo refractado θ_2 (el rayo refractado se aleja de la normal). Existe un **ÁNGULO LÍMITE** o **ÁNGULO CRÍTICO** para el cual $\theta_2 = 90^\circ$ y el rayo refractado se propaga por la superficie de separación entre medios. Su valor puede calcularse aplicando la ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin 90^\circ \rightarrow \theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

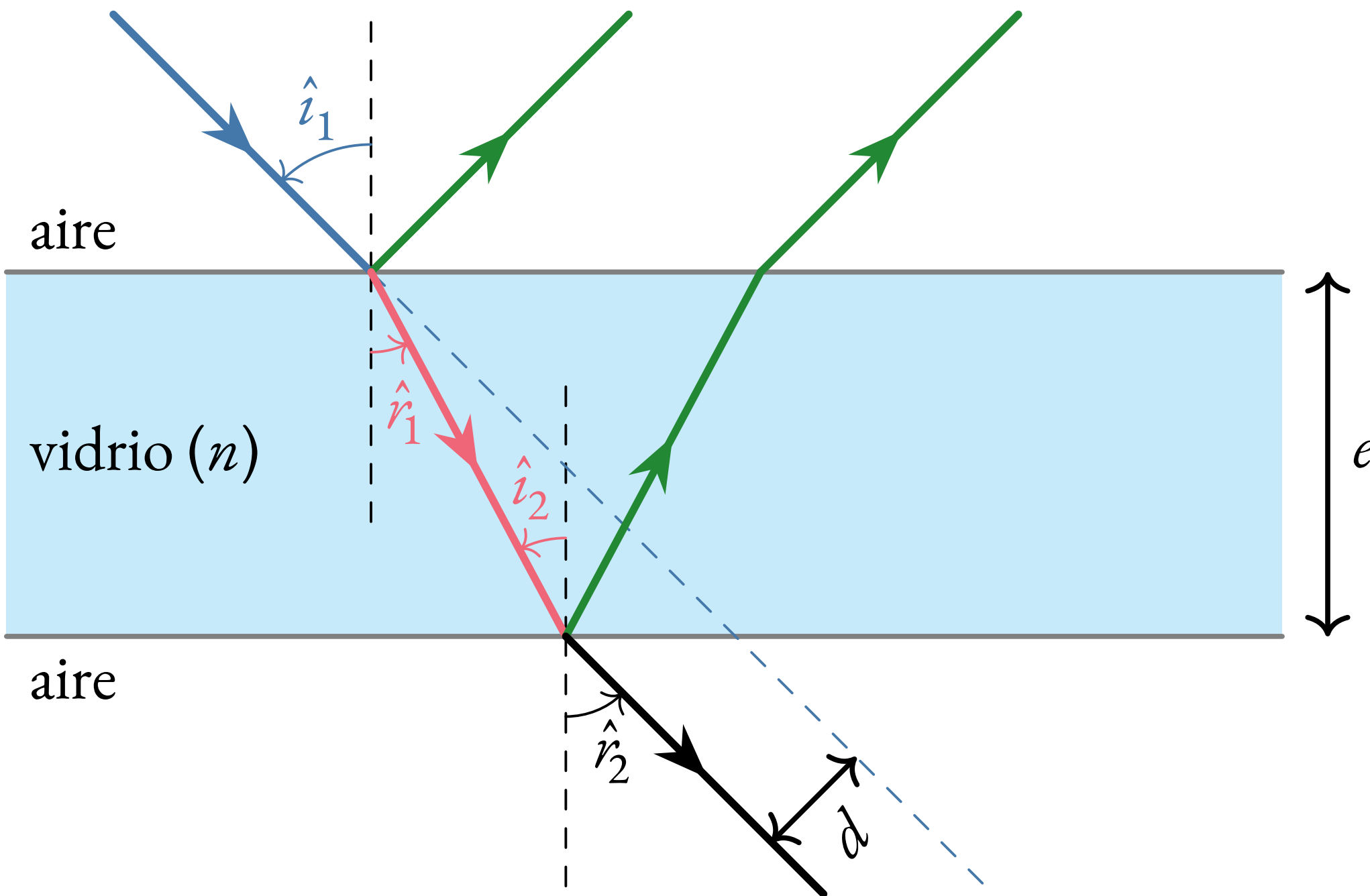
Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite, se produce la **REFLEXIÓN INTERNA TOTAL** en la que no hay rayo refractado. Es importante recalcar que solo se produce cuando $n_2 < n_1$ (p. ej. agua $\rightarrow$ aire).

Fibra óptica

Una aplicación de la reflexión interna total es la **FIBRA ÓPTICA**. Se trata de un cable fabricado con un material cuyo índice de refracción es muy elevado, de forma que el ángulo límite es muy pequeño. La luz transportada en casi todas las direcciones va a incidir en la superficie fibra-aire con un ángulo mayor que el crítico, produciéndose reflexión interna total. Así, la luz se reconduce dentro del cable por lo que hay muy pocas pérdidas, permitiendo transmitir información a largas distancias con buena calidad.

Casos particulares

Refracción en un bloque de caras plano-paralelas



Se comprueba experimentalmente que los rayos incidentes (azul) son paralelos a los emergentes (negro). De igual forma, los que refresan al primer medio lo son (verde). Basada en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thin_film_interference_-_soap_bubble.gif.

Aplicamos la ley de Snell en cada superficie (tomando $n = 1$ para el aire):

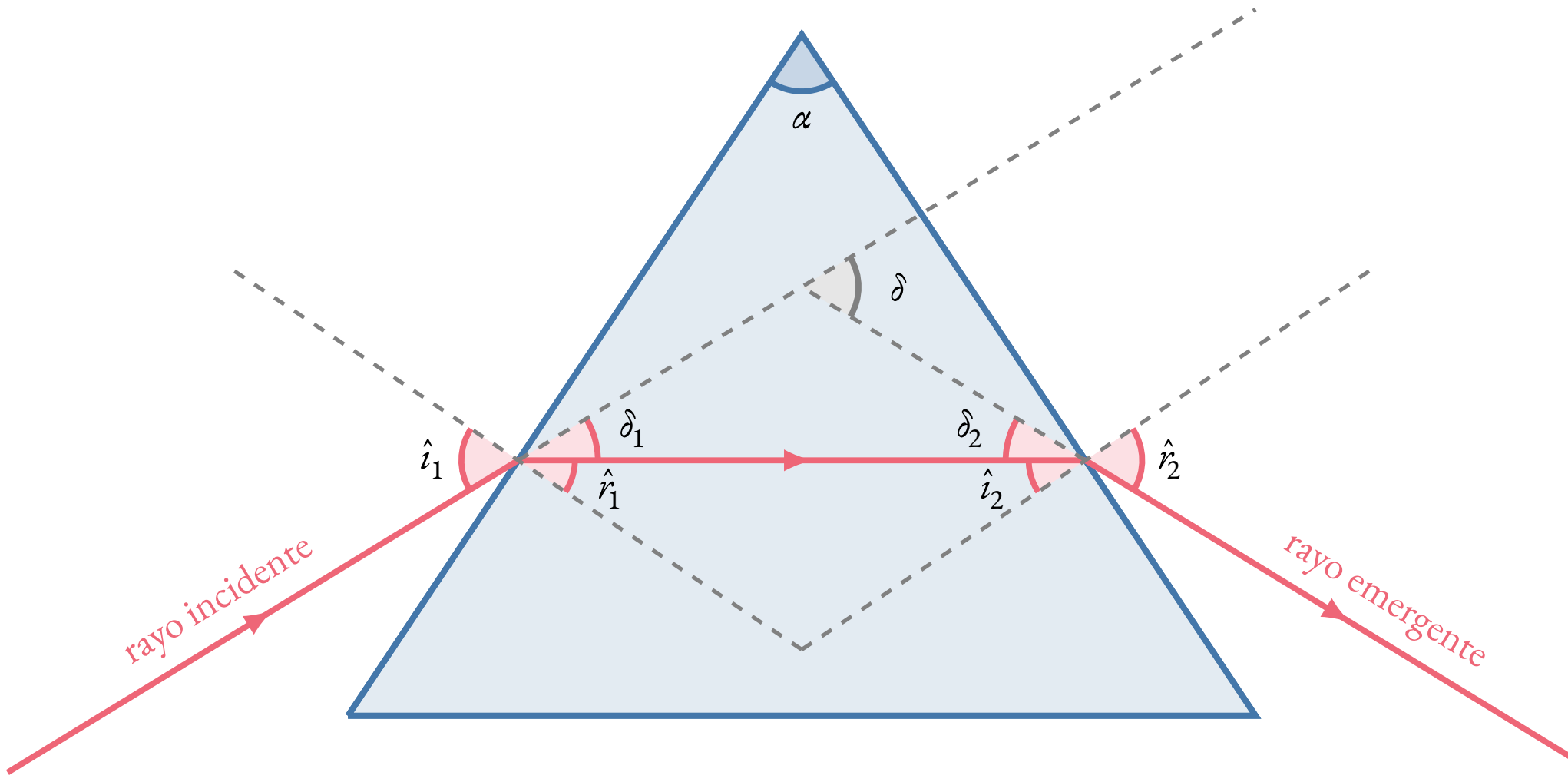
$$\begin{aligned} \sin \hat{i}_1 &= n \sin \hat{r}_1 \\ n \sin \hat{i}_2 &= \sin \hat{r}_2 \end{aligned}$$

Por geometría: $\hat{i}_2 = \hat{r}_1$. Los rayos incidente y emergente son paralelos y están separados una distancia d . Dicha distancia puede expresarse en función de $\hat{i}_1$ y $\hat{r}_1$:

$$d = e \cdot \frac{\sin(\hat{i}_1 - \hat{r}_1)}{\cos \hat{r}_1}$$

Refracción en un prisma óptico

Un prisma óptico es un material transparente que tiene dos superficies planas que forman entre sí un ángulo α (ángulo del prisma). Suponiendo que el prisma está en el aire y que su índice de refracción es n :



Traducida y adaptada de <https://tikz.net/prism1/>.

Aplicamos la ley de Snell en cada superficie:

$$\begin{aligned} \sin \hat{i}_1 &= n \sin \hat{r}_1 \\ n \sin \hat{i}_2 &= \sin \hat{r}_2 \end{aligned}$$

Es fácil demostrar que los ángulos internos cumplen $\alpha = \hat{r}_1 + \hat{i}_2$. En este caso el rayo incidente y el emergente ya no son paralelos. Sus direcciones forman un ángulo δ que puede expresarse en función de los ángulos:

$$\delta = \underbrace{(\hat{i}_1 - \hat{r}_1)}_{\text{desviación primera superficie}} + \underbrace{(\hat{r}_2 - \hat{i}_2)}_{\text{desviación segunda superficie}}$$

δ es mínimo cuando los rayos incidente y emergente son paralelos ($\hat{i}_1 = \hat{r}_2$). En ese caso:

$$\delta_{\min.} = \hat{i}_1 + \hat{i}_1 - \alpha = 2\hat{i}_1 - \alpha$$