

# FENÓMENOS ONDULATORIOS

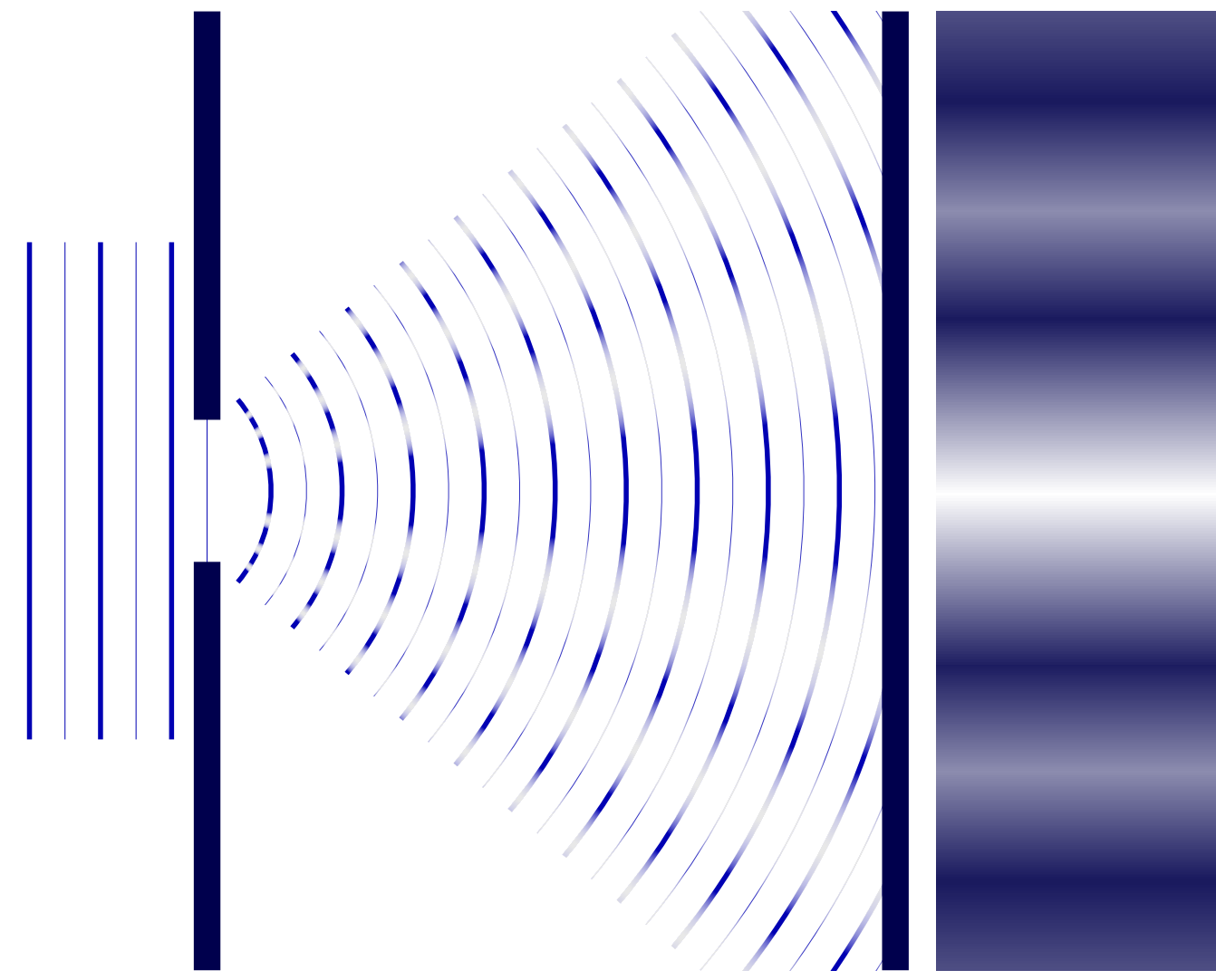
Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



## Principio de Huygens

Para comprender los fenómenos que experimentan las ondas al propagarse, es necesario admitir que se propagan de forma diferente a como lo hacen las partículas:



Al contrario que con el caso de un haz de partículas, en el que solo alcanzan la pantalla las partículas que atraviesan la rendija, aparece un patrón de difracción que no tiene nada que ver con orificio iluminado y resto oscuro. Adaptada de [https://tikz.net/optics\\_diffraction/](https://tikz.net/optics_diffraction/).

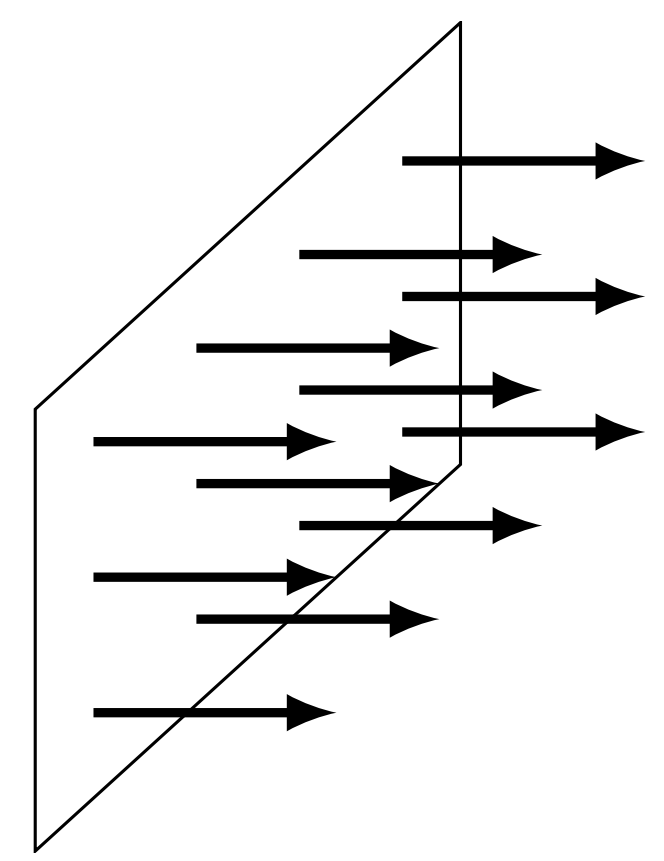
La primera solución al problema anterior fue proporcionada por el científico holandés Christiaan Huygens, quien expuso una teoría que explicaba geoméricamente la propagación de las ondas (esto es anterior a la ecuación de ondas). Antes de enunciar el principio de Huygens, resulta conveniente definir:

### Frente de onda

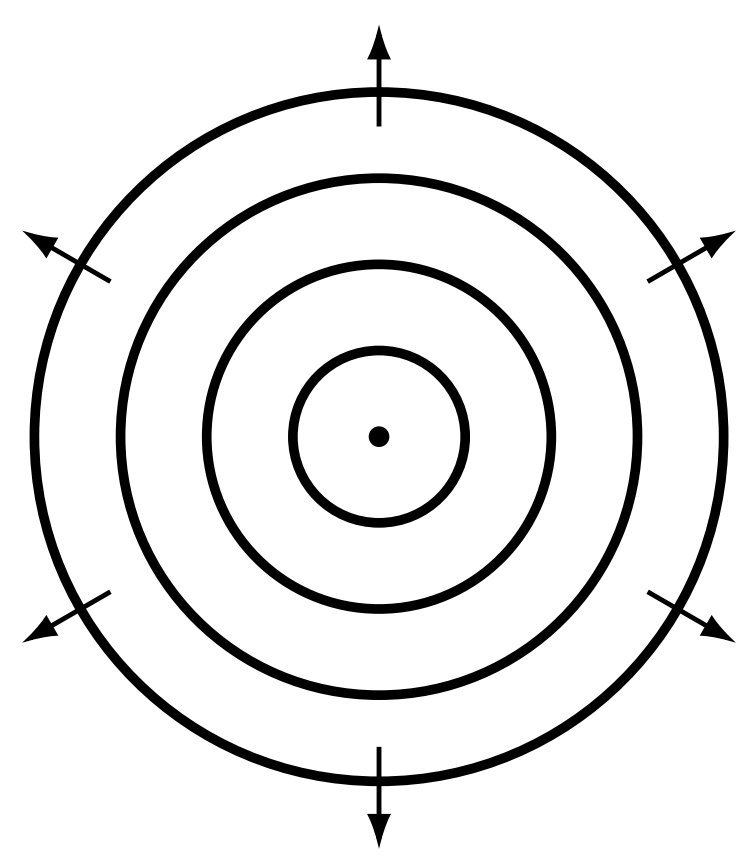
Superficie que forman todos los puntos alcanzados por la onda en el mismo instante de tiempo (tienen, en consecuencia, el mismo estado de vibración).

### Rayos

Flechas que se emplean para indicar la(s) dirección(es) de propagación de la onda (son una representación, no existen físicamente). Siempre son perpendiculares al frente de onda.



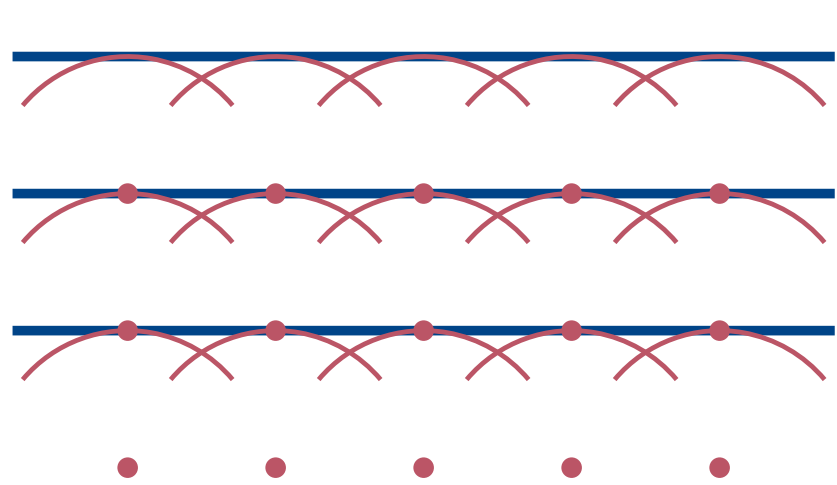
Frente de onda plano. Adaptada de [https://tikz.net/electric\\_field\\_slab/](https://tikz.net/electric_field_slab/).



Frente de onda esférico (en 3D). Adaptada de [https://tikz.net/optics\\_huygens/](https://tikz.net/optics_huygens/).

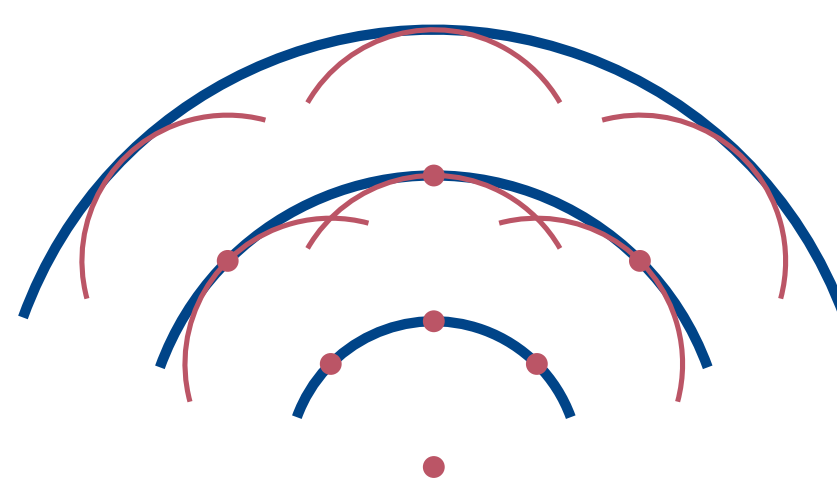
El **principio de Huygens** establece que:

“Cada punto del frente de ondas se comporta como un foco emisor de ondas secundarias de las mismas características, cuya envolvente constituye el nuevo frente de ondas.”.



Frente de onda plano.

Adaptada de [https://tikz.net/optics\\_huygens/](https://tikz.net/optics_huygens/).



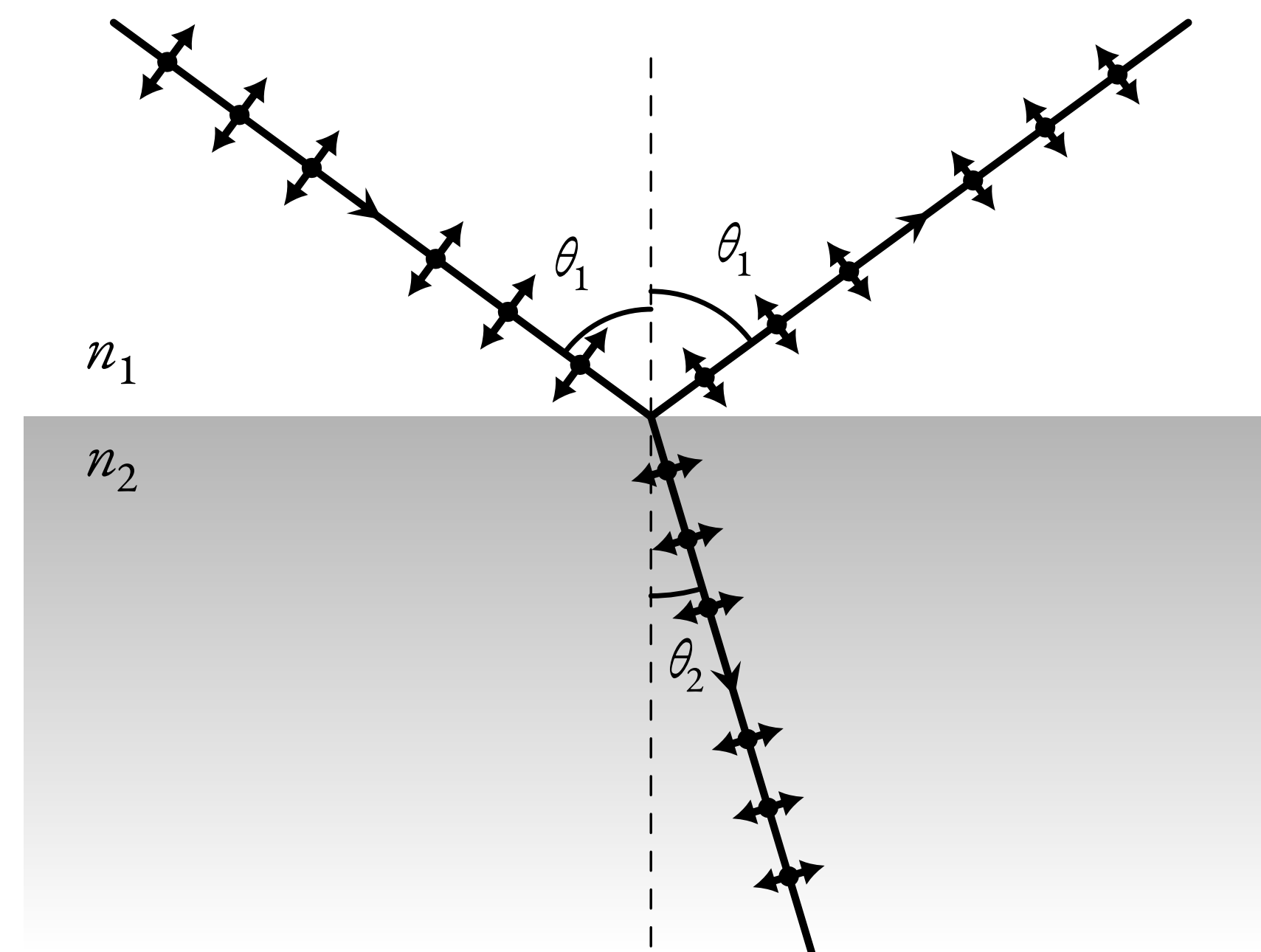
Frente de onda esférico (en 3D).

## Reflexión

Fenómeno por el cual una onda cambia su dirección de propagación al incidir en la superficie de separación de dos medios. Tras la reflexión, la onda continúa propagándose en el mismo medio y a la misma velocidad.

### Leyes de la reflexión

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal al punto de incidencia están en el mismo plano.
2. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



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

## Refracción

Fenómeno por el cual una onda cambia su dirección de propagación al pasar de un medio a otro diferente. En cada medio la onda se propaga a una velocidad distinta.

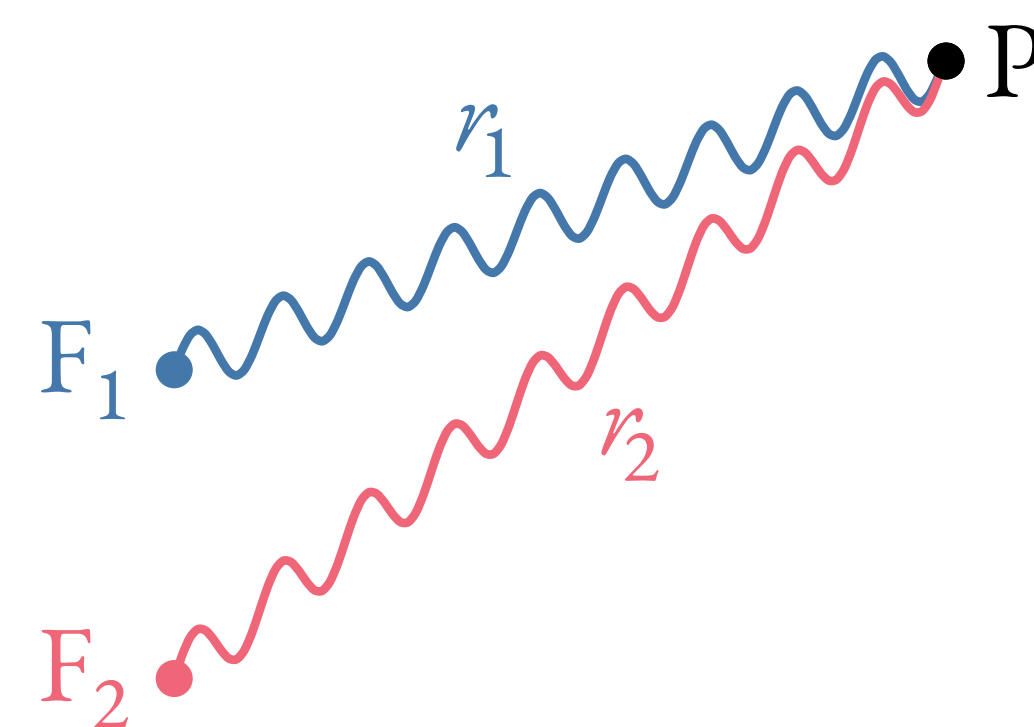
### Leyes de la refracción

1. El rayo incidente, el rayo refractado y la normal al punto de incidencia están en el mismo plano.
2. Ley de SNELL:

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

## Interferencias

Se producen cuando dos o más ondas se encuentran en un mismo punto del medio. En dicho punto se cumple el **principio de superposición**, que establece que la onda resultante es la suma algebraica de las ondas que se superponen.



Adaptada de

[https://tikz.net/optics\\_interference/](https://tikz.net/optics_interference/).

En el punto P se superponen cumpliéndose el principio de superposición:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= y_1(x, t) + y_2(x, t) = A \sin(\omega t - kx_1) + A \sin(\omega t - kx_2) \\ &= 2A \sin\left(\frac{\omega t - kx_1 + \omega t - kx_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega t - kx_1 - (\omega t - kx_2)}{2}\right) \\ &= 2A \cos\left(k \frac{x_2 - x_1}{2}\right) \sin\left(\omega t - k \frac{x_1 + x_2}{2}\right) \end{aligned}$$

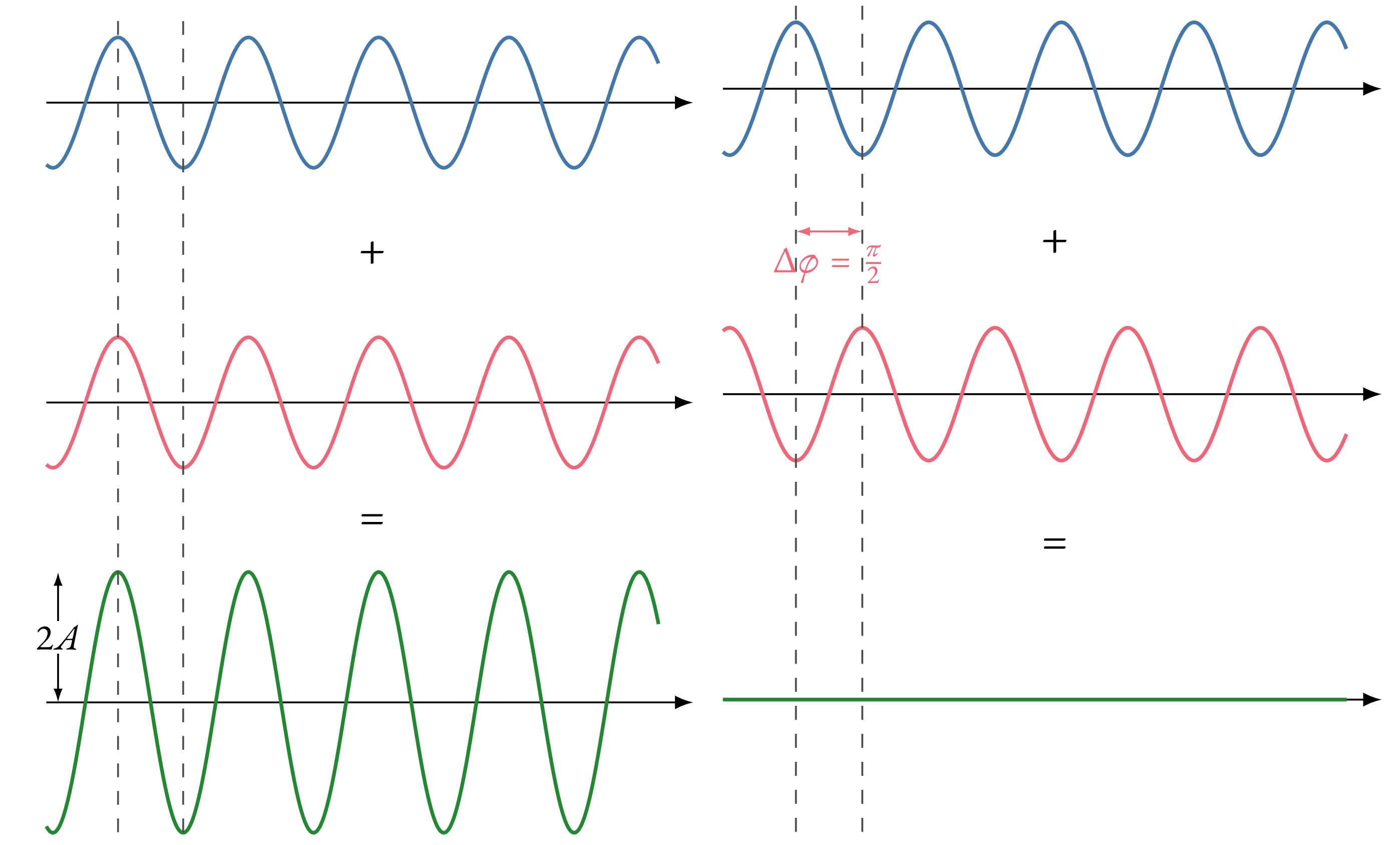
Así, la interferencia es otra onda armónica con la misma frecuencia y una amplitud  $2A \cos[k(x_2 - x_1)/2]$  independiente del tiempo pero que depende de la diferencia de camino recorrido por cada onda.

Vamos a estudiar el caso más sencillo, en el que interfieren dos ondas armónicas coherentes de la misma frecuencia  $f$  y longitud de onda  $\lambda$  y de igual amplitud  $A$ , ambas propagándose en el eje  $x$ :

$$y_1(x, t) = A \sin(\omega t - kx_1)$$

$$y_2(x, t) = A \sin(\omega t - kx_2)$$

## Interferencia constructiva y destructiva



INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA.

La amplitud resultante es máxima:

$$\cos\left(k \frac{x_2 - x_1}{2}\right) = \pm 1 \Leftrightarrow x_2 - x_1 = n\lambda$$

INTERFERENCIA DESTRUCTIVA.

La amplitud resultante es nula:

$$\cos\left(k \frac{x_2 - x_1}{2}\right) = 0 \Leftrightarrow x_2 - x_1 = (2n - 1) \frac{\lambda}{2}$$

Adaptada de [https://tikz.net/optics\\_interference/](https://tikz.net/optics_interference/).

## Ondas estacionarias

Son un caso particular de interferencia en el que se encuentran dos ondas armónicas con igual amplitud, frecuencia y longitud de onda, que se propagan en la misma dirección pero sentidos opuestos. La interferencia ya no se produce en un solo punto, sino en todos:

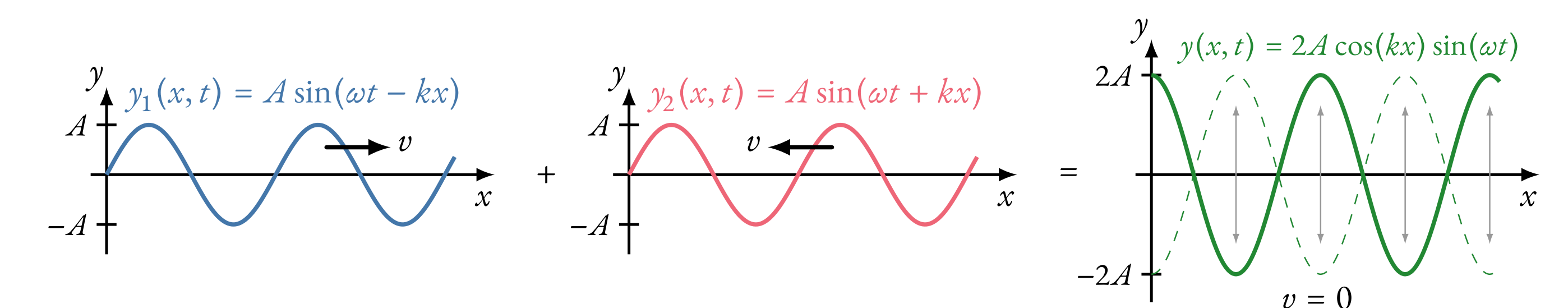
$$y_1(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

$$y_2(x, t) = A \sin(\omega t + kx)$$

Aplicando el principio de superposición:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= y_1(x, t) + y_2(x, t) \\ &= A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \\ &= 2A \cos(kx) \sin(\omega t) \end{aligned}$$

La onda resultante es una **onda estacionaria**, que no se propaga, sino que oscila en torno a una posición de equilibrio, con una amplitud  $2A \cos(kx)$ , independiente del tiempo aunque dependiente de la posición:



Adaptada de [https://tikz.net/waves\\_standing/](https://tikz.net/waves_standing/).

Dentro de una onda estacionaria diferenciamos dos tipos de puntos:

**Vientres (V)** La amplitud es máxima:

$$\cos(kx) = \pm 1 \Leftrightarrow x = n \frac{\lambda}{2}$$

Los vientres vibran con una amplitud máxima igual a  $2A$ .

**Nodos (N)** La amplitud es nula:

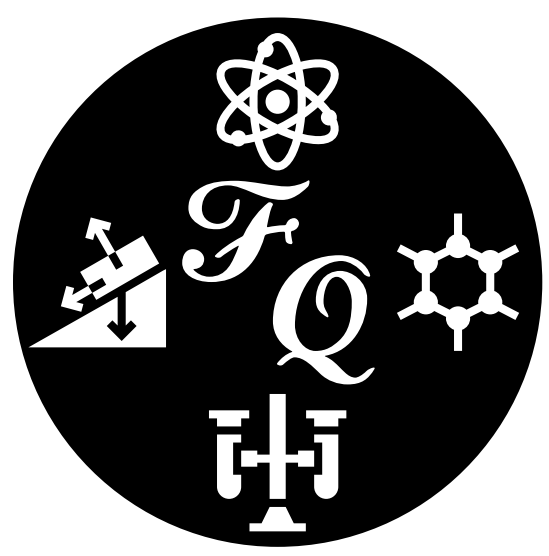
$$\cos(kx) = 0 \Leftrightarrow x = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}$$

Los nodos no vibran.

### Diferencia entre onda viajera y onda estacionaria

La principal diferencia radica en que en el caso de las ondas estacionarias la energía no se propaga por el medio, como sucede con las ondas viajeras. Por el contrario, queda *confinada* entre los nodos de la onda.





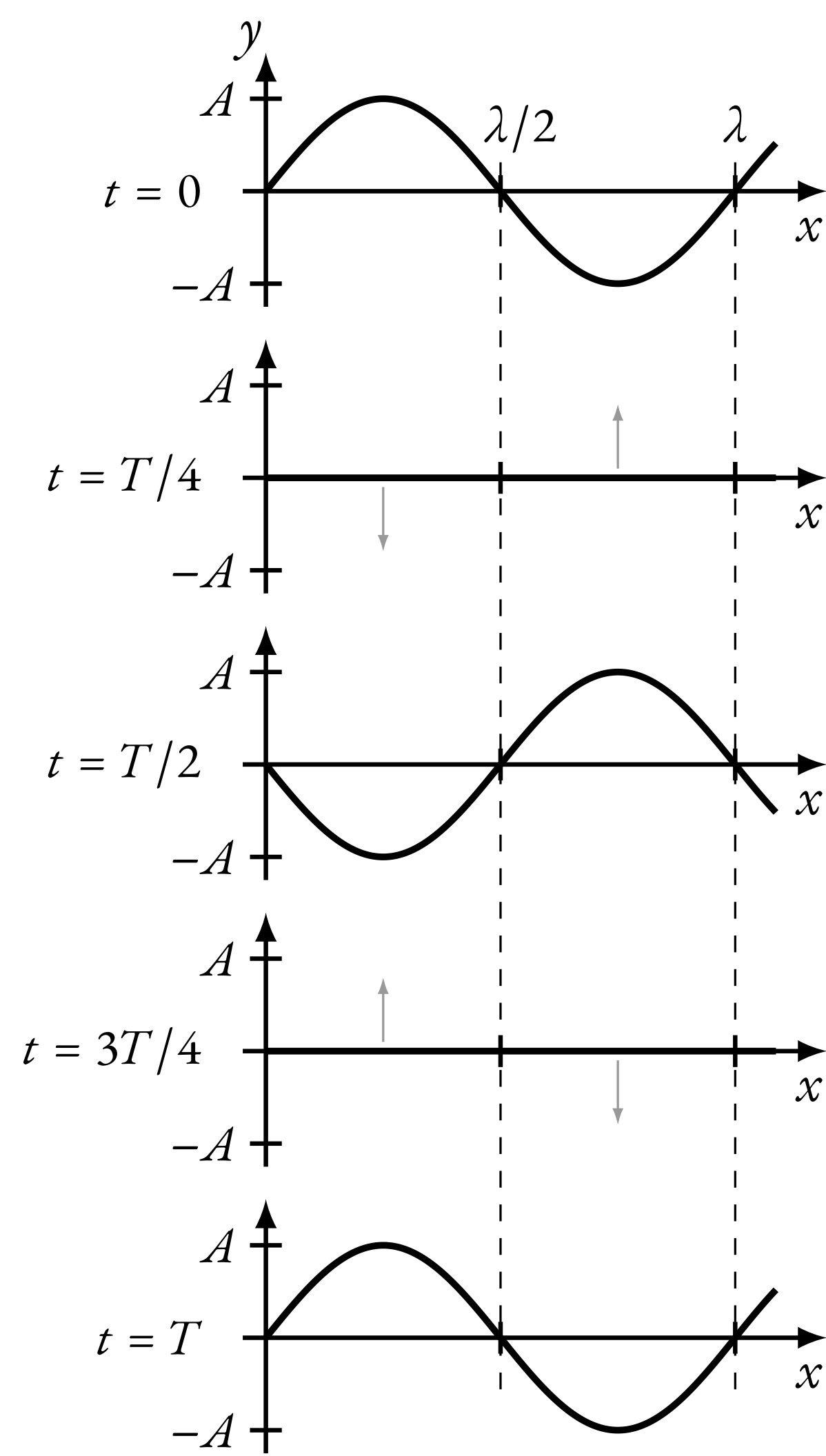
# FENÓMENOS ONDULATORIOS

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



## Ondas estacionarias (cont.)



Distintos instantes de una onda estacionaria. Adaptada de [https://tikz.net/waves\\_standing/](https://tikz.net/waves_standing/).

## Ondas estacionarias en cuerdas y tubos

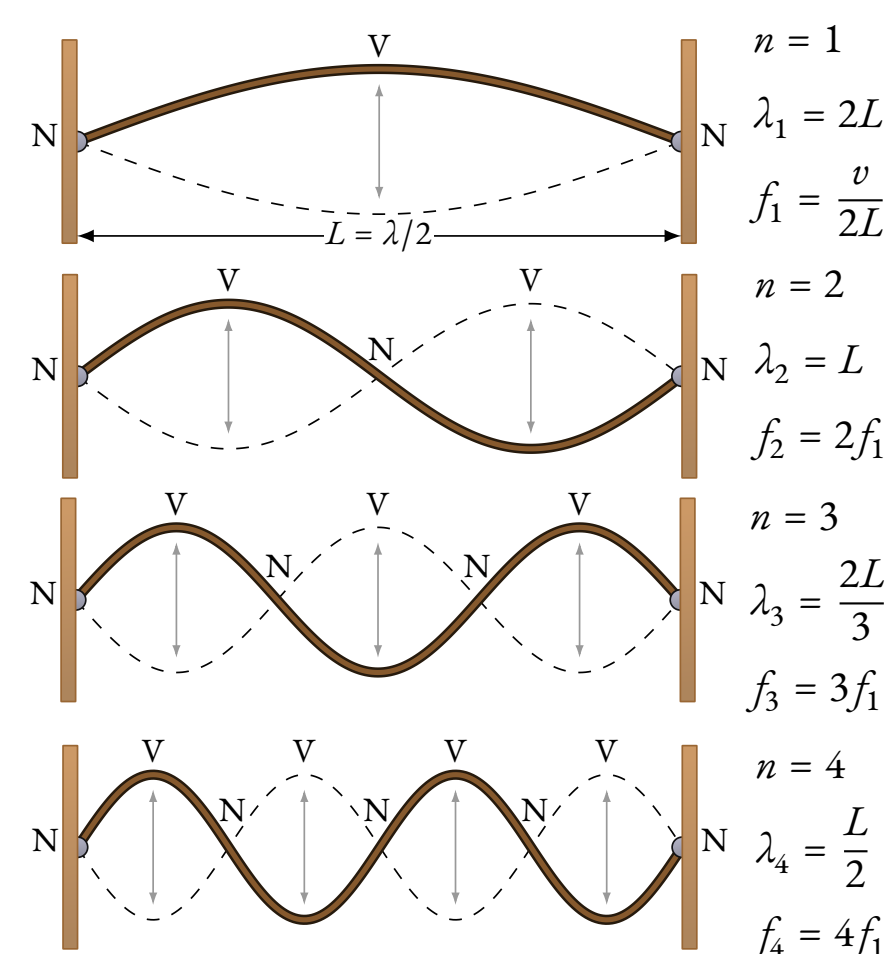
Para que se genere una onda estacionaria, la distancia entre el origen y el punto en el que se produce la reflexión debe coincidir con una proporción concreta de  $\lambda/2$  o  $\lambda/4$ , según el caso. Si no, no se producen ondas estacionarias.

### Cuerda/tubo de longitud $L$ fija/cerrado por sus dos extremos

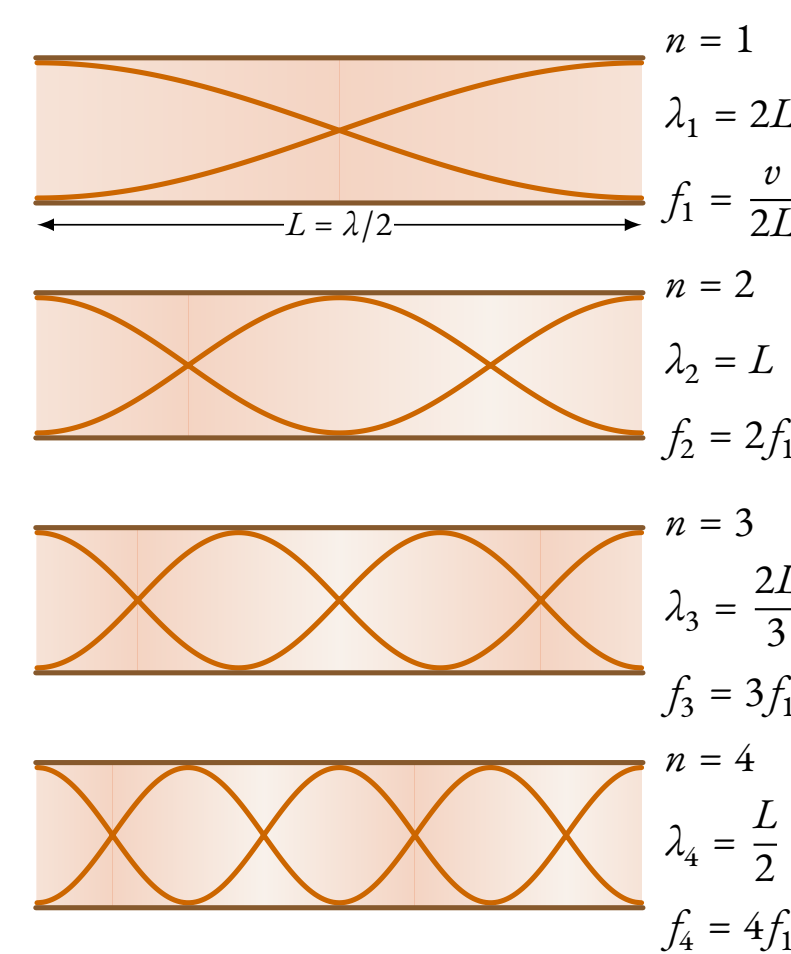
Si sus extremos están fijos, son nodos. Por lo tanto, la distancia entre ellos será, necesariamente, un número entero de semilongitudes de onda:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \Leftrightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n}; f_n = \frac{nv}{2L} \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots$$

Para cada valor de  $n$  tenemos una posible onda estacionaria, un ARMÓNICO, con su  $\lambda_n$  y  $f_n$  correspondientes. El primer armónico es el de menor  $f$ , y se denomina FUNDAMENTAL.



Cuerda/tubo fija/cerrado por sus dos extremos.  
Adaptada de [https://tikz.net/waves\\_standing/](https://tikz.net/waves_standing/).



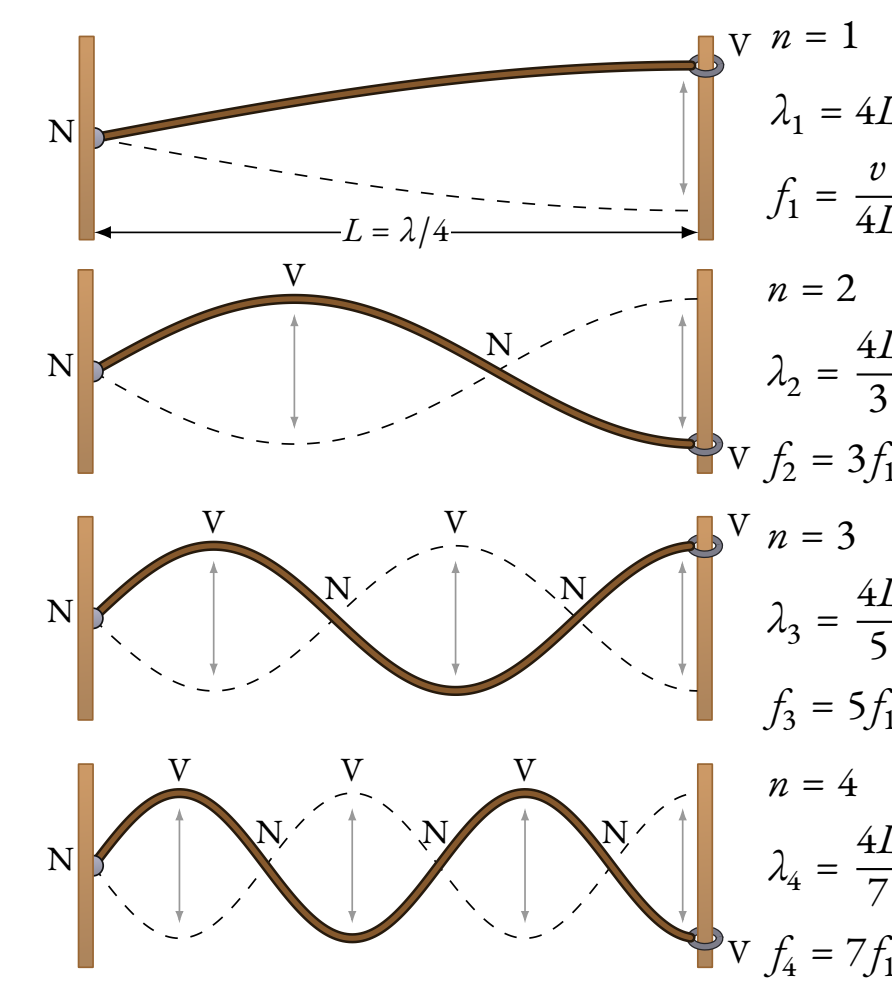
Tubo abierto por sus dos extremos. La situación es análoga pero ahora los extremos son vientres.

Adaptada de [https://tikz.net/waves\\_standing\\_air/](https://tikz.net/waves_standing_air/).

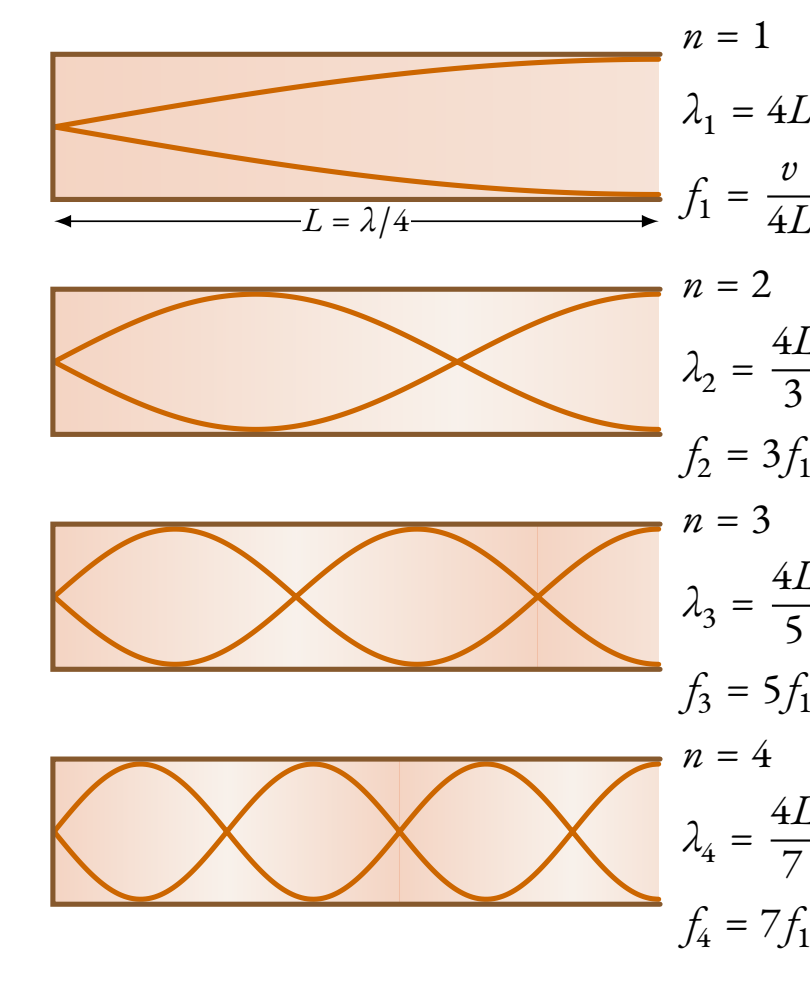
### Cuerda/tubo de longitud $L$ fija/cerrado por un extremo

El extremo fijo o cerrado es un nodo y el libre o abierto es un vientre. Así, la longitud debe ser un número impar de veces  $\lambda/4$ :

$$L = (2n - 1) \frac{\lambda_n}{4} \Leftrightarrow \lambda_n = \frac{4L}{2n - 1}; f_n = \frac{(2n - 1)v}{4L} \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots$$



Cuerda fija por un extremo.  
Adaptada de [https://tikz.net/waves\\_standing/](https://tikz.net/waves_standing/).

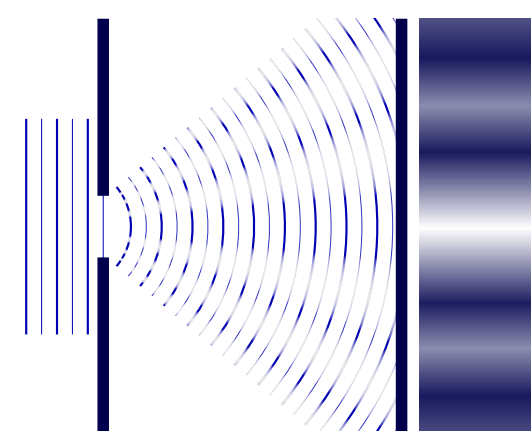


Tubo cerrado por un extremo. Adaptada de [https://tikz.net/waves\\_standing\\_air/](https://tikz.net/waves_standing_air/).

## Difracción

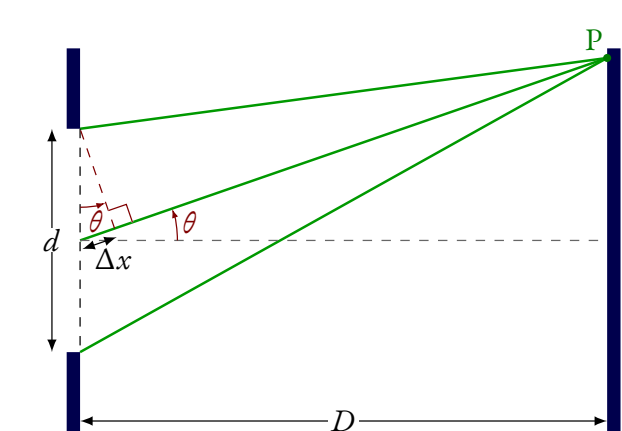
Es un fenómeno que se produce cuando las ondas encuentran un obstáculo, rendija u orificio, cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda. La difracción puede explicarse mediante el principio de Huygens, teniendo en cuenta que los extremos de la rendija se comportan como fuente de ondas secundarias que interfieren tras la rendija.

### Difracción por una rendija



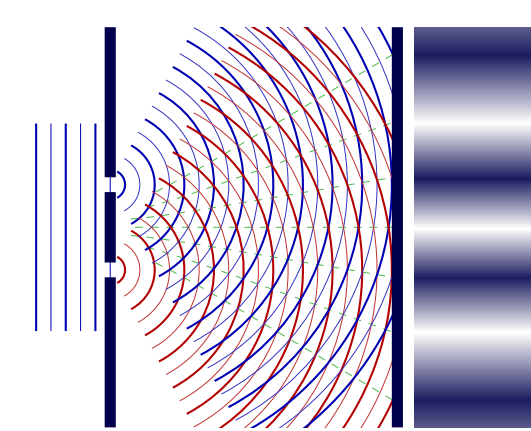
Los extremos de la rendija dan lugar a ondas esféricas secundarias que interfieren, produciendo el patrón de difracción característico con bandas de luz y oscuridad.

Adaptada de [https://tikz.net/optics\\_diffraction/](https://tikz.net/optics_diffraction/).



Los puntos en los que la interferencia es constructiva cumplen:  $\Delta x = n\lambda = d \sin \theta$ .  
Los puntos en los que la interferencia es destructiva cumplen:  $\Delta x = (2n - 1) \lambda/2 = d \sin \theta$ .  
Si  $d \ll D$ ,  $\sin \theta \approx \tan \theta = y/D$ .

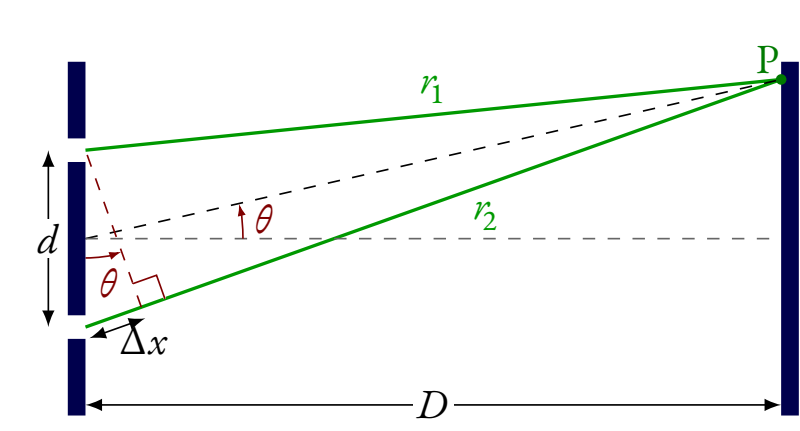
### Difracción por doble rendija



Cada rendija da lugar a ondas esféricas secundarias que interfieren entre sí.

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{y}{D}$$

Adaptada de [https://tikz.net/optics\\_diffraction/](https://tikz.net/optics_diffraction/).



Si  $d \ll D$ , de nuevo  $\sin \theta = y/D$ . Para los máximos llegamos a la misma ecuación:

$$d \sin \theta = \Delta x = n\lambda$$

### Aplicaciones

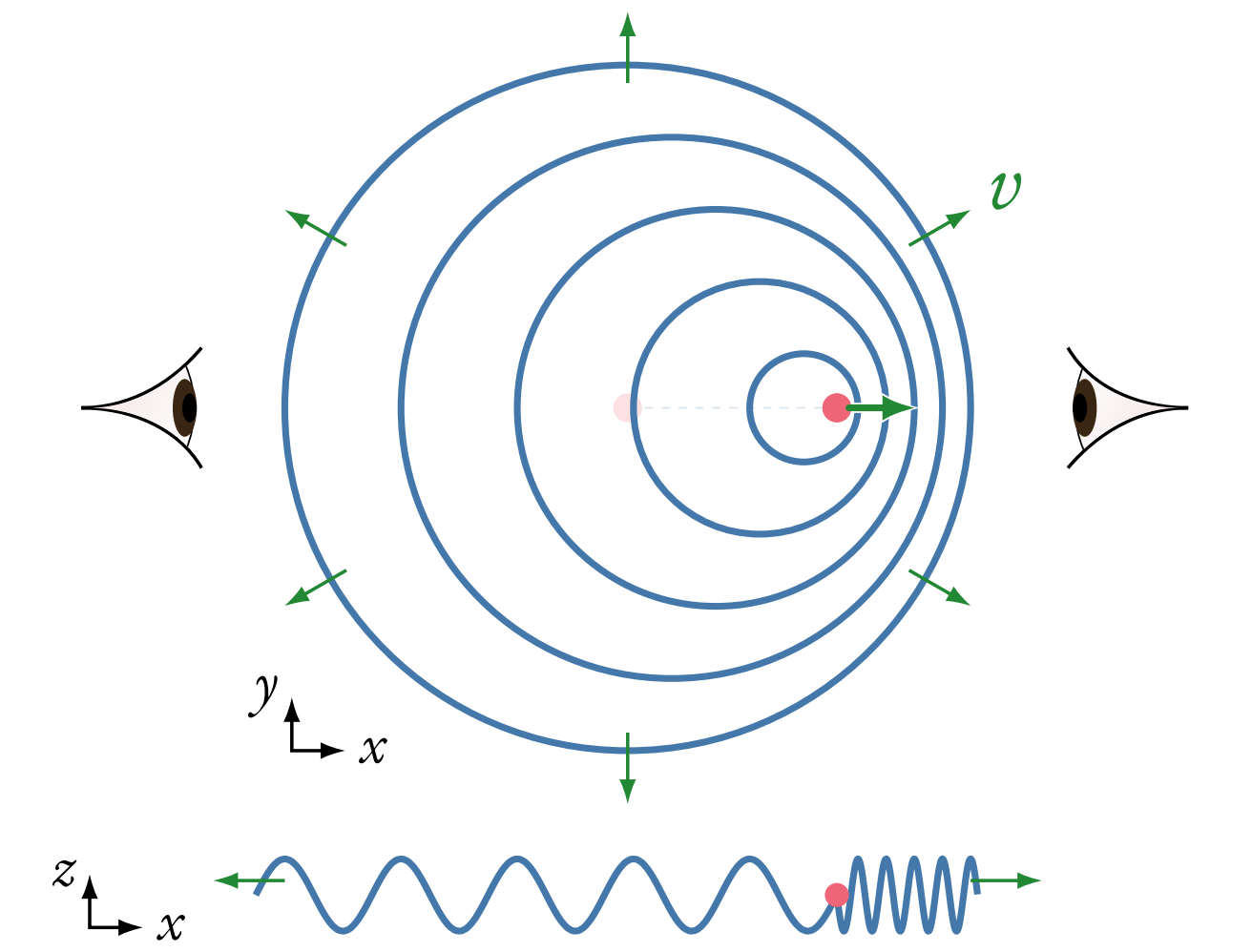
La difracción de rayos X (RX) es una de las principales aplicaciones y se emplea para caracterizar materiales. Los RX tienen una longitud de onda  $\lambda \sim 0.1 \text{ nm}$ , por lo que son ideales para estudiar la estructura de la materia, como distancias entre átomos/iones en una red cristalina o la geometría de moléculas.

## Efecto Doppler

Es el cambio que tiene lugar en la frecuencia de una onda como consecuencia del movimiento relativo entre el foco emisor y el receptor de la misma. La frecuencia  $f_R$  que percibe el receptor viene dada por:

$$f_R = f \cdot \frac{v \pm v_R}{v \mp v_F},$$

donde  $f$  es la frecuencia emitida,  $v$  la velocidad de propagación de la onda,  $v_R$  la velocidad del receptor y  $v_F$  la velocidad del emisor.



Adaptada de [https://tikz.net/wave\\_doppler/](https://tikz.net/wave_doppler/).

### Criterio de signos

Nos fijamos en el movimiento relativo entre el receptor y el foco emisor:

- Si se alejan, el receptor percibe  $f_R < f$  así que elegimos numerador  $-$  y denominador  $+$ .

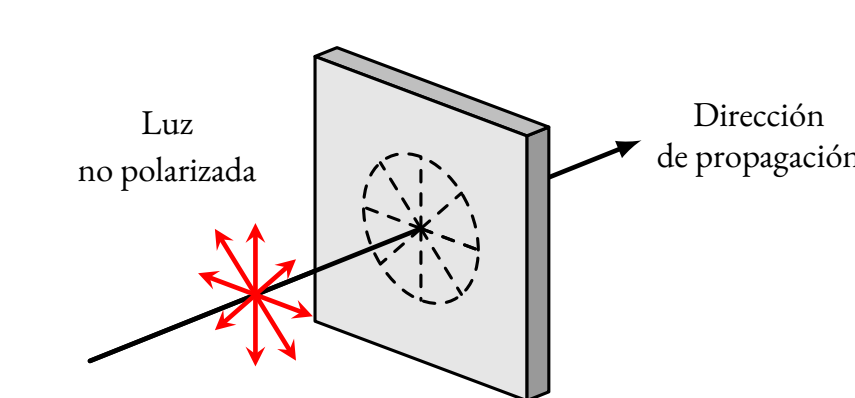
$$f_R = f \cdot \frac{v - v_R}{v + v_F}$$

- Si se acercan, el receptor percibe  $f_R > f$  y por tanto elegimos numerador  $+$  y denominador  $-$ .

$$f_R = f \cdot \frac{v + v_R}{v - v_F}$$

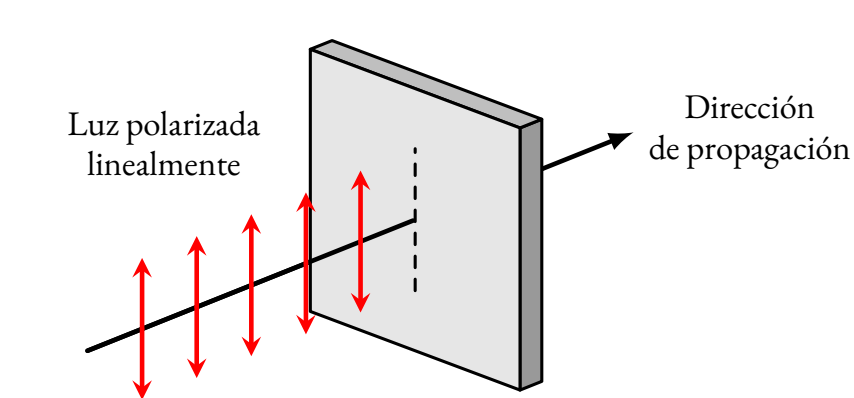
## Polarización

En muchas ondas transversales la oscilación del medio de propagación que se produce es en el plano perpendicular a la propagación y no está limitada a una única dirección, sino que puede tener lugar en cualquiera de las direcciones contenidas en el plano. Este tipo de ondas se denominan **no polarizadas**. Por el contrario, en las **ondas polarizadas** hay restricciones en la dirección de vibración:



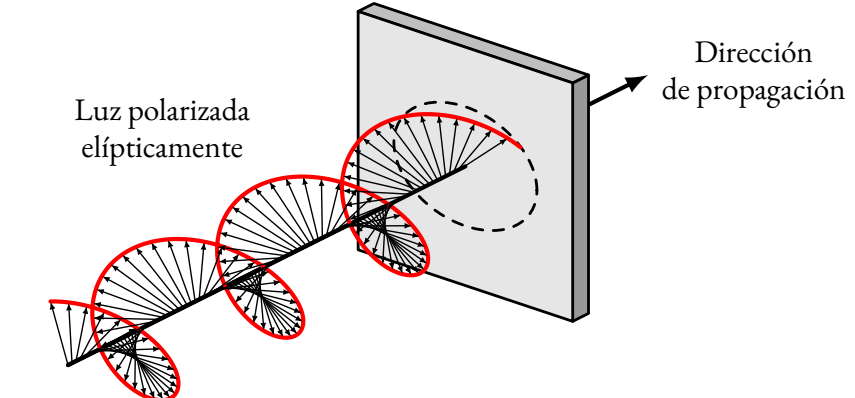
Luz no polarizada.

Adaptada de <https://tikz.net/linearly-polarized/>.



Luz polarizada linealmente.

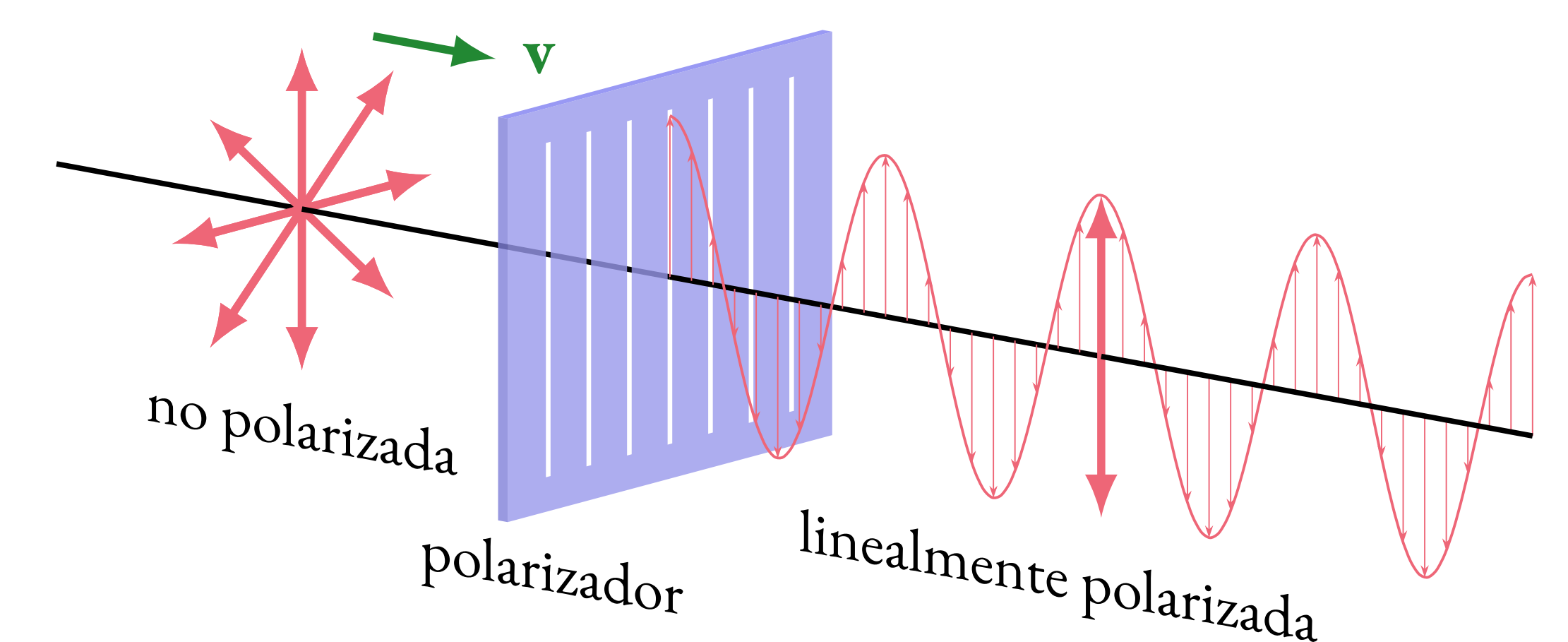
Adaptada de <https://tikz.net/linearly-polarized/>.



Luz polarizada elípticamente.

Adaptada de <https://tikz.net/elliptical-polarization/>.

Un **polarizador** es un instrumento que permite filtrar la luz no polarizada, de forma que solo deja pasar la luz polarizada en una dirección concreta. La luz que sale del polarizador es linealmente polarizada.



Traducida y adaptada de [https://tikz.net/optics\\_polarization/](https://tikz.net/optics_polarization/).