

## Conceptos básicos

### 0. Introducción

Artículo «¿Te suena?» y exposición «Un universo de luz».

MOVIMIENTO	DEFINICIÓN	EJEMPLO
Periódico	Movimiento que se repite a intervalos regulares de tiempo	Planeta
Oscilatorio	Movimiento que se realiza en torno a un punto de equilibrio	Péndulo
Vibratorio	Movimiento oscilatorio que suele tener amplitud pequeña	Móvil
Armónico	Movimiento oscilatorio-vibratorio descrito con una función armónica	Corcho
Ondulatorio	Propagación de una perturbación	Ola

### 1. Movimiento armónico simple (m.a.s.)

El m.a.s. es un movimiento armónico (función seno o coseno) en un solo eje.

Oscilador armónico: el cuerpo que describe este movimiento.

Se considerará ideal (no se atenúa).

$$y(t) = A \sin(\omega t + \phi_0) = A \cos(\omega t + \phi_0 - \pi/2)$$

$$[\cos x = \sin(x + \pi/2)]$$

$y$ : perturbación, estado de la vibración. Normalmente elongación pero también  $\vec{E}, \vec{B}, \Delta P, \dots$

$A$ : amplitud. Es la máxima  $y$ . (unidades de  $y$ )

$\phi = \omega t + \phi_0$ : fase. Unidad SI: rad (radián)

$\phi_0$ : fase inicial o corrección de fase (rad). Es  $\phi$  cuando  $t=0$ .

$\Delta\phi = \phi' - \phi$ : diferencia de fase o desfase (rad)

$\omega$ : frecuencia angular o pulsación (rad/s)

$f$ : frecuencia. Número de oscilaciones por segundo. Unidad SI: Hz = s<sup>-1</sup> (hercio o hertz)

$T$ : periodo (s). Tiempo que tarda una oscilación (misma perturbación y velocidad)

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = T^{-1}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Ejercicio 1: calcula la fase inicial sabiendo que en  $t=0$ ; a)  $y=0$       b)  $y=A$       c)  $y=-A$       d)  $y=1/2$

Solución: a)  $\phi_0=0$       b)  $\phi_0=\pi/2$  rad      c)  $\phi_0=3\pi/2$       d)  $\phi_0=\pi/6$  rad

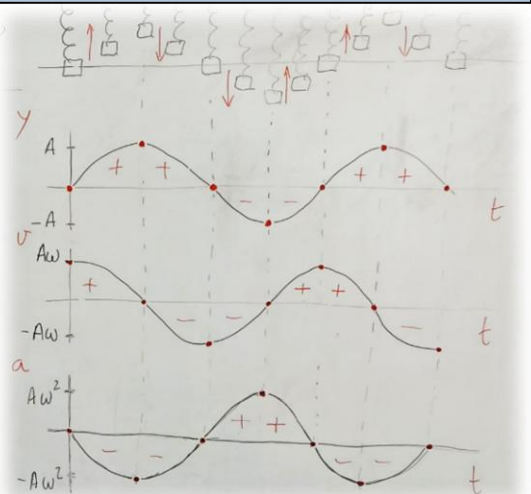
### CINEMÁTICA

$$y(t) = A \sin(\omega t + \phi_0)$$

$$v(t) = \frac{dy(t)}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \phi_0) = \omega \sqrt{A^2 - y^2}$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi_0) = -\omega^2 y$$

Ej. 2: valores, signos y gráficas de la perturbación, la velocidad y la aceleración de un oscilador sujeto a un muelle en la posición de equilibrio, extremos y puntos intermedios.  $\phi_0 = 0$ .



### DINÁMICA

$$F = -ky \text{ (Ley de Hooke)}$$

$$F = ma \text{ (2ª ley de Newton)}$$

$$k = m\omega^2$$

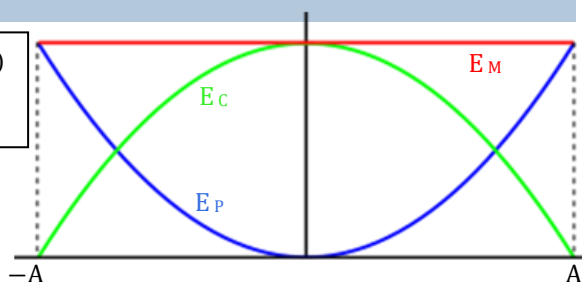
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

### ENERGÍA

$$E_c = \frac{1}{2} k (A^2 - y^2)$$

$$E_p = \frac{1}{2} ky^2$$

$$E_M = \frac{1}{2} kA^2 = \text{cte}$$



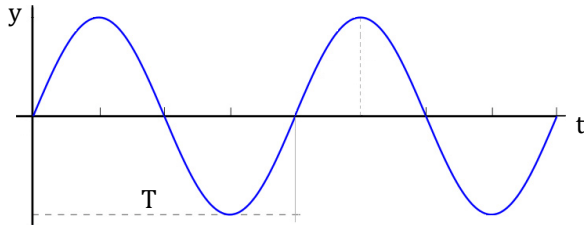
<https://www.geogebra.org/m/e46m2wy>

## 2. Movimiento ondulatorio

Onda { Pulso: se propaga una vez  
Tren de ondas: se repite la propagación

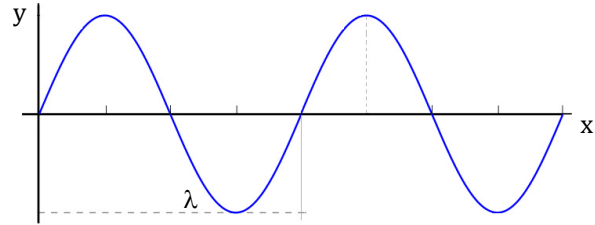
Doble periodicidad:

y en función de t (x fijo): m.a.s.



Periodicidad temporal (T: periodo)

y en función de x (t fijo): foto



Periodicidad espacial ( $\lambda$ : longitud de onda)

Comparación onda/partícula:

	TRANSPORTA			LOCALIZACIÓN ESPACIAL
	m	E	$\vec{p}$	
partícula	√	√	√	√
onda		√	√	

Clasificación de las ondas:

CRITERIO	TIPO	ACLARACIÓN	EJEMPLOS		
			sonido	luz	más
el medio de propagación	materiales	necesitan un medio material	√		
	no materiales	no necesitan un medio material		√	
la energía que transportan	mecánicas	transportan E mecánica	√		ola
	electromagnéticas	transportan E electromagnética		√	radio
la relación entre la dirección de vibración y propagación	longitudinales	direcciones paralelas	√		ondas S
	transversales	direcciones perpendiculares		√	ondas P
las dimensiones en las que se propaga	unidimensionales	propagación en una recta		láser	cuerda
	bidimensionales	propagación en un plano			estanque
	tridimensionales	propagación en el espacio	√	√	

## 3. Ondas armónicas

$$y(x,t) = A \sin(\omega t \mp kx + \phi_0) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} \mp \frac{x}{\lambda} + \frac{\phi_0}{2\pi} \right)$$

$$y(x,t) = A \cos(\omega t \mp kx + \phi_0 - \pi/2) = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} \mp \frac{x}{\lambda} + \frac{\phi_0}{2\pi} - \frac{1}{4} \right)$$

$\mp$ : se propaga en el eje x hacia la derecha/izquierda.

k: número de onda (rad/m)

$\lambda$ : longitud de onda (m)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Velocidad de vibración:  $v_{\text{vib}}(x,t) = d y(x,t) / dt = A\omega \cos(\omega t \mp kx + \phi_0)$

Aceleración de vibración:  $a_{\text{vib}}(x,t) = d v(x,t) / dt = -A\omega^2 \sin(\omega t \mp kx + \phi_0)$

Velocidad de propagación

Como  $v = cte$ , entonces  $v = e / t$

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{También:} \quad v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

Solo depende de las características del medio (densidad, temperatura, tensión...)

#### 4. Desfase

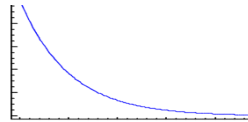
		DIFERENCIA DE		
		FASE	CAMINO	TIEMPO
			igual t	igual x
ondas en...	<b>n</b>	$\Delta\phi$	$\Delta x$	$\Delta t$
<b>fase</b>	par	$n\pi$	$n\frac{\lambda}{2}$	$n\frac{T}{2}$
<b>oposición de fase</b>	impar			

#### 5. Energía e intensidad

$$E = \frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2$$

$$I \equiv P/S = E/St = I_0 e^{-\beta r}$$

$\beta$ : coeficiente de atenuación



Directamente proporcionales a  $f^2$  y  $A^2$  e inversamente a  $r$  (atenuación en una onda real)

$N$  (nivel de intensidad o potencia) =  $10 \log I'/I_0$ . Unidad SI: dB (decibelio o decibel)  
 (Cada 10 dB, la intensidad se multiplica por 10. Cada 3 dB la intensidad se duplica)

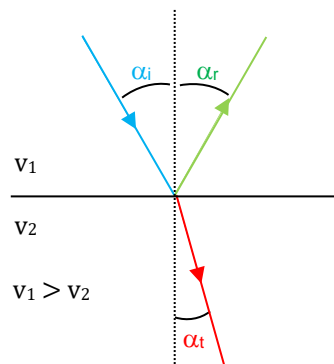
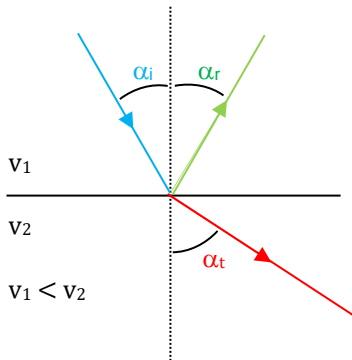
#### 6. Nivel de intensidad del sonido

N (dB)	FUENTE	UMBRAL
0	Silencio	Audición
10	Respiración	Normalidad
20	Susurro	
30	Biblioteca	
40	Conversación	
50	Oficina	
60	Aspiradora	Molestia
70	Tráfico	
80	Tren	
90	Sirena	
100	Moto	
110	Discoteca	Irritación
120	Trueno	
130	F1 V10	Dolor
140	Reactor	
150	Globo	
160	Pirotecnia	Daño
170	Disparo	
180	Volcán	
190	Cohete	Distorsión
200	Bomba atómica	

# Fenómenos ondulatorios

## 1. Reflexión y refracción

Fenómeno que se produce cuando una onda alcanza la separación de dos medios (interfase). Su estudio es más sencillo si se usa el modelo de ondas como rayos.



Leyes:

- Los rayos incidente (i), reflejado (r) y refractado (o transmitido, t) están en el mismo plano (plano de incidencia).
- $f$  no cambia.  $v$  cambia  $\Rightarrow \lambda$  cambia
- Ley de la reflexión:  $\alpha_i = \alpha_r$

Ejemplos: eco, rebote de una bola de billar

- Ley de Snell:

Ejemplo: [Pez arquero](#)

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{v_1}{v_2}$$

Con una onda electromagnética, se usa:  
 $n$  : índice de refracción de un medio

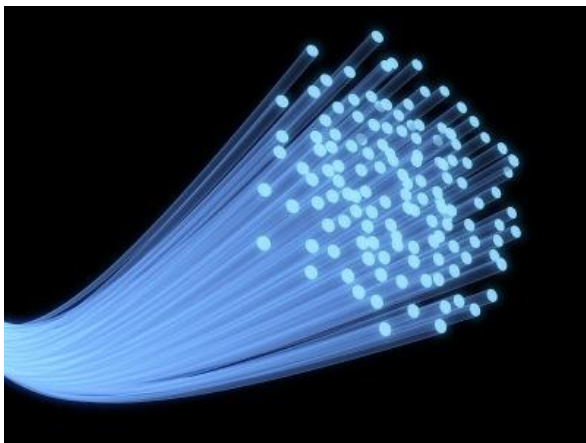
$$n \equiv \frac{c}{v} \geq 1$$

$$\Rightarrow n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_t$$

- $\alpha_i > \alpha_{\text{límite}} \Rightarrow$  Reflexión total.  $\alpha_{\text{límite}} = \arcsen v_1/v_2 = \arcsen n_2/n_1$  ( $v_1 < v_2$  ;  $n_1 > n_2$ )

APLICACIÓN PRÁCTICA

Fibra óptica

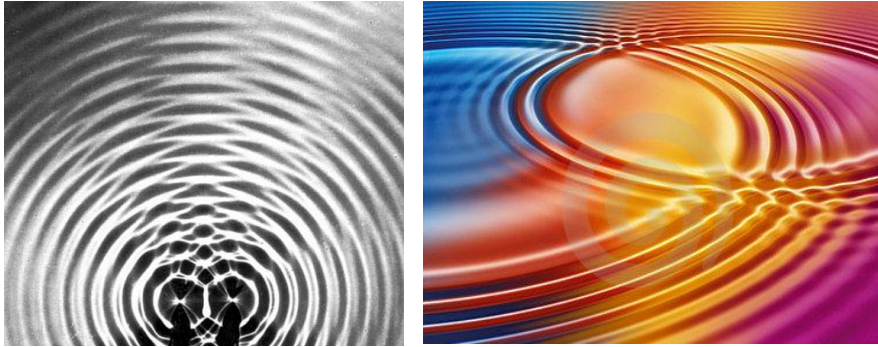
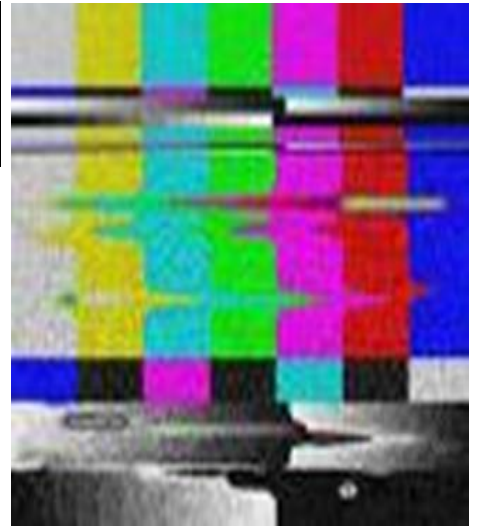


## 2. Interferencia

Encuentro de varias ondas en un punto. La perturbación resultante es la suma (principio de superposición).

Es más observable cuanto más parecidas sean las ondas ( $A$ ,  $\lambda$  o  $f$ ). Para dos ondas coherentes ( $\Delta\phi$  constante):

INTERFERENCIA	AMPLITUD		DESFASE
	$\neq$	$=$	ondas en...
<b>constructiva</b>	$A_1 + A_2$	$2A$	fase
<b>destruktiva</b>	$A_1 - A_2$	$0$	oposición de fase



## 3. Ondas estacionarias

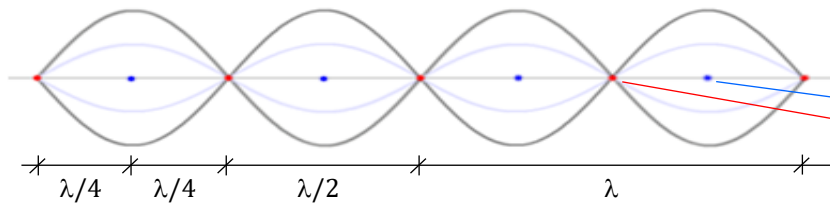
Caso particular de interferencia para ondas iguales en la misma dirección y sentidos opuestos.

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= A \sin(\omega t - kx) \\ y_2 &= A \sin(\omega t + kx) \end{aligned} \right\} y = y_1 + y_2 = \dots \Rightarrow \boxed{y = 2A \cos(kx) \sin(\omega t)}$$

Es un m.a.s. con amplitud variable según la posición:  $A_x = 2A \cos(kx)$

No son ondas en el sentido estricto ya que no hay propagación

$\lambda$  es igual que en las ondas originales  $x_n = n \lambda / 4$



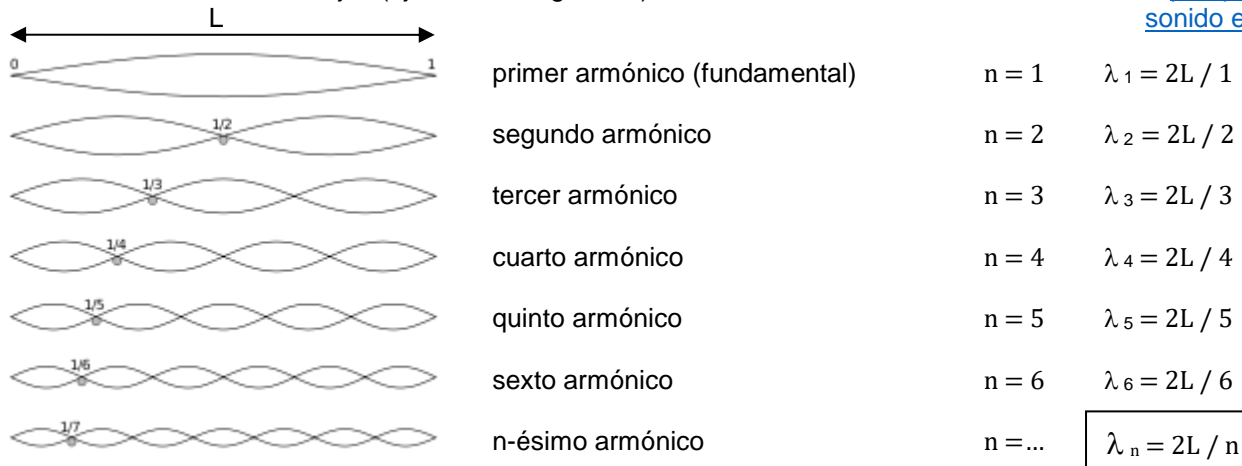
**NODO**  
 $A_x = 0$   $n$  par

**VIENTRE o ANTINODO**  
 $A_x = 2A$   $n$  impar

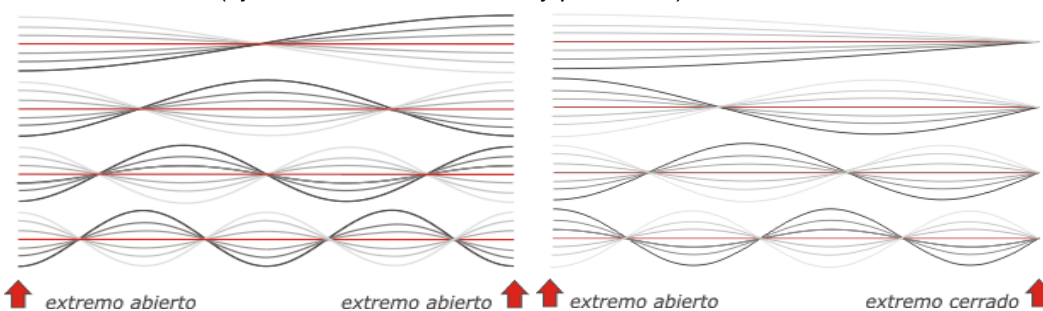
### Armónicos (modos normales de vibración)

En un medio con extremos fijos (ej. cuerda de guitarra):

[cuerda](#)  
[pompa de jabón](#)  
[sonido en el plano](#)



En otros medios (ej. Instrumentos de viento y percusión):

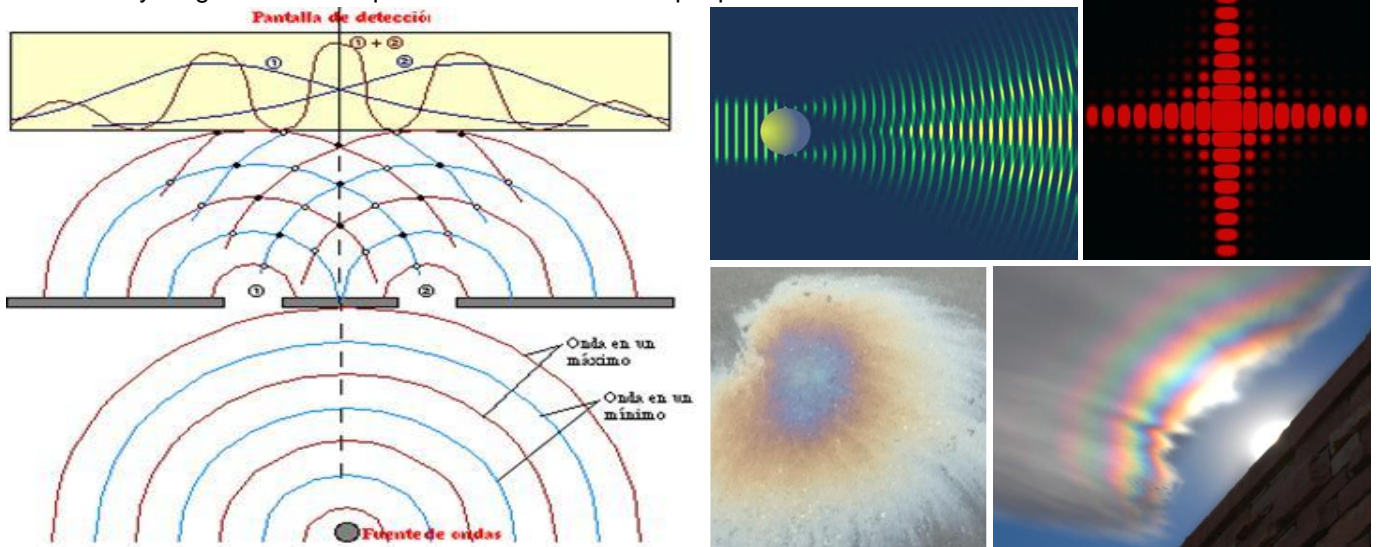


## 4. Difracción

Caso particular de interferencia cuando una onda encuentra un obstáculo (o abertura).

Más observable a medida que el tamaño de estos se parezca a  $\lambda$ .

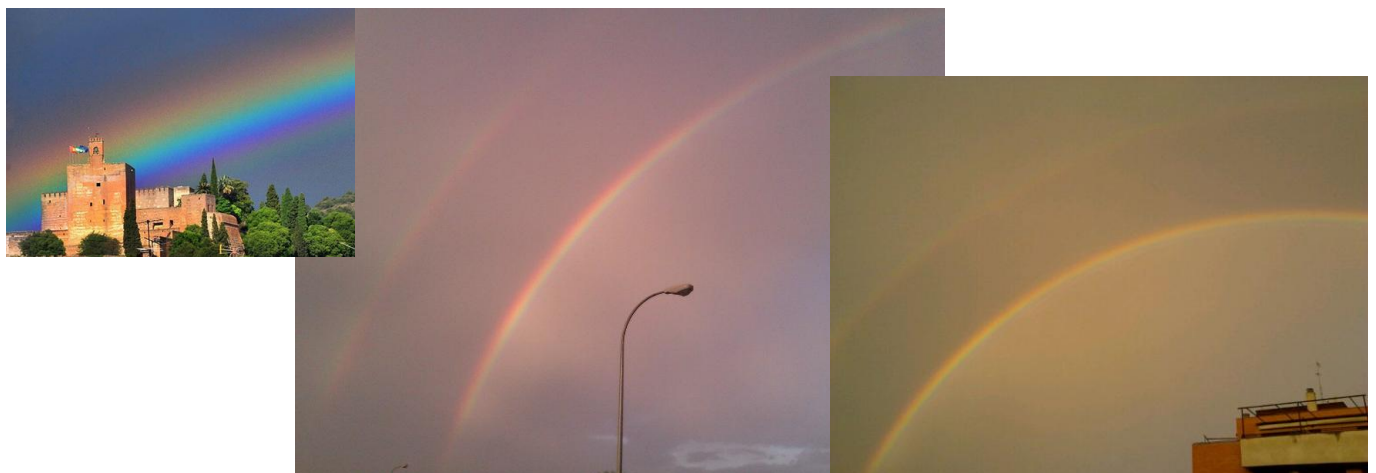
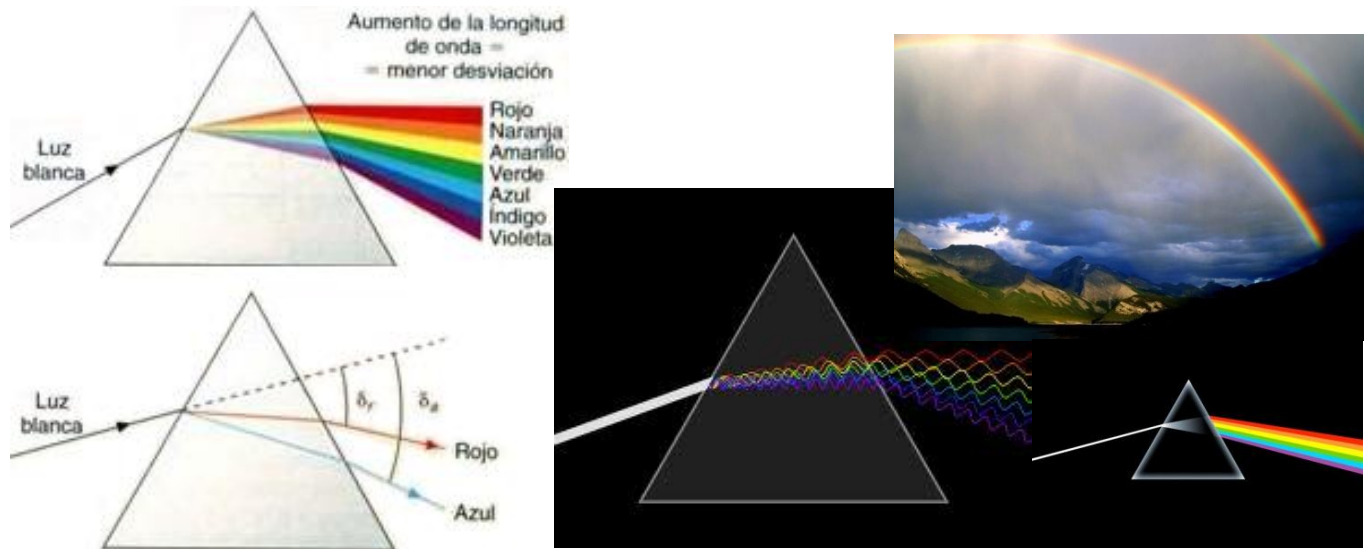
Se explica con el **principio de Huygens-Fresnel**: "todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden".



## 5. Dispersión

Descomposición de la luz en colores al pasar por un prisma.

$n$  depende de  $\lambda$ : las radiaciones monocromáticas de mayor longitud de onda se desvían menos por la refracción



## 6. Polarización

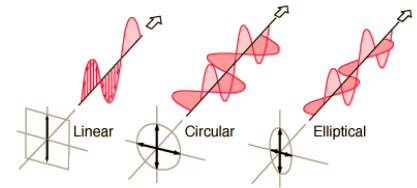
Fenómeno que ocurre cuando la perturbación oscila en un plano determinado (plano de polarización).

Solo se produce con las ondas transversales, en especial la luz.

No existe polarización de ondas longitudinales, por tanto el sonido no puede polarizarse.

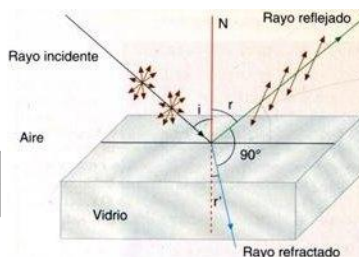
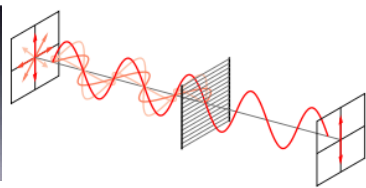
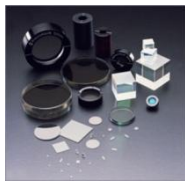
### Tipos:

- Lineal. La vibración ocurre en un mismo eje.
- Circular. La dirección de vibración forma una circunferencia.
- Elíptica. La dirección de vibración forma una elipse.



### Formas de obtención:

- Por absorción: filtros polarizadores o sustancias polaroides.
- Por reflexión: la luz reflejada está polarizada cuando es perpendicular a la refractada.
- Por doble refracción: Ej: espato de Islandia.



### En la Naturaleza:

- Insectos, peces... se orientan, localizan alimento y depredadores. La rodopsina (moléculas alargadas) de las células visuales no está orientada al azar como en los vertebrados.
- Los dos arcoíris están fuertemente polarizados.
- El reflejo del sol en el mar, halos, glorias, ...



### Aplicaciones:

- Análisis de alimentos:  
En los aminoácidos hay polarización circular levógira (gira hacia la izquierda)  
En los azúcares hay polarización circular dextrógira (gira hacia la derecha)
- Análisis de cristales.
- Fotografía y gafas para conductores, marinos, esquiadores: se evitan los reflejos.



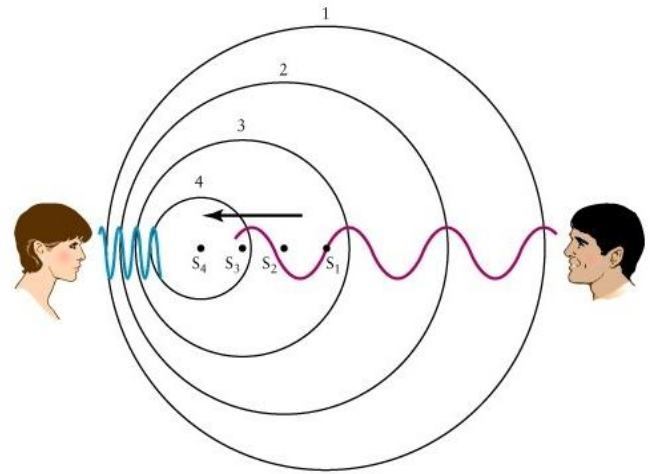
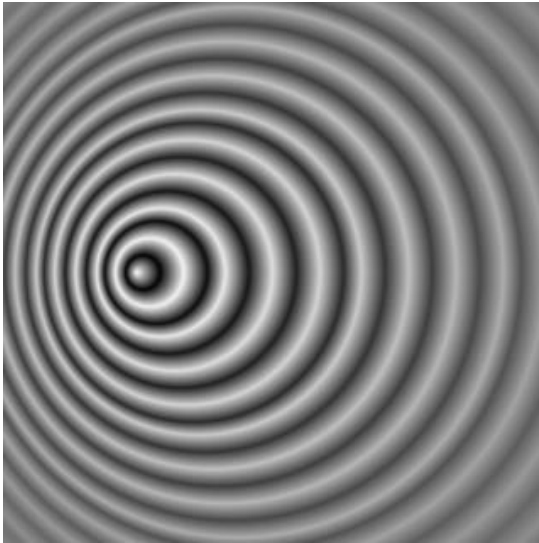
- Visión 3D, estereografía.
- Astronomía: el campo magnético de los cuerpos celestes polariza la luz que emiten.

## 7. Efecto Doppler

Cambio de la longitud de una onda cuando la fuente se mueve.

Ejemplos: vehículo, expansión del Universo.

$$\lambda' = \left(1 \pm \frac{v_{\text{fuente}}}{v_{\text{onda}}}\right) \lambda$$



[Comenta los fenómenos ondulatorios que se pueden apreciar en la imagen]



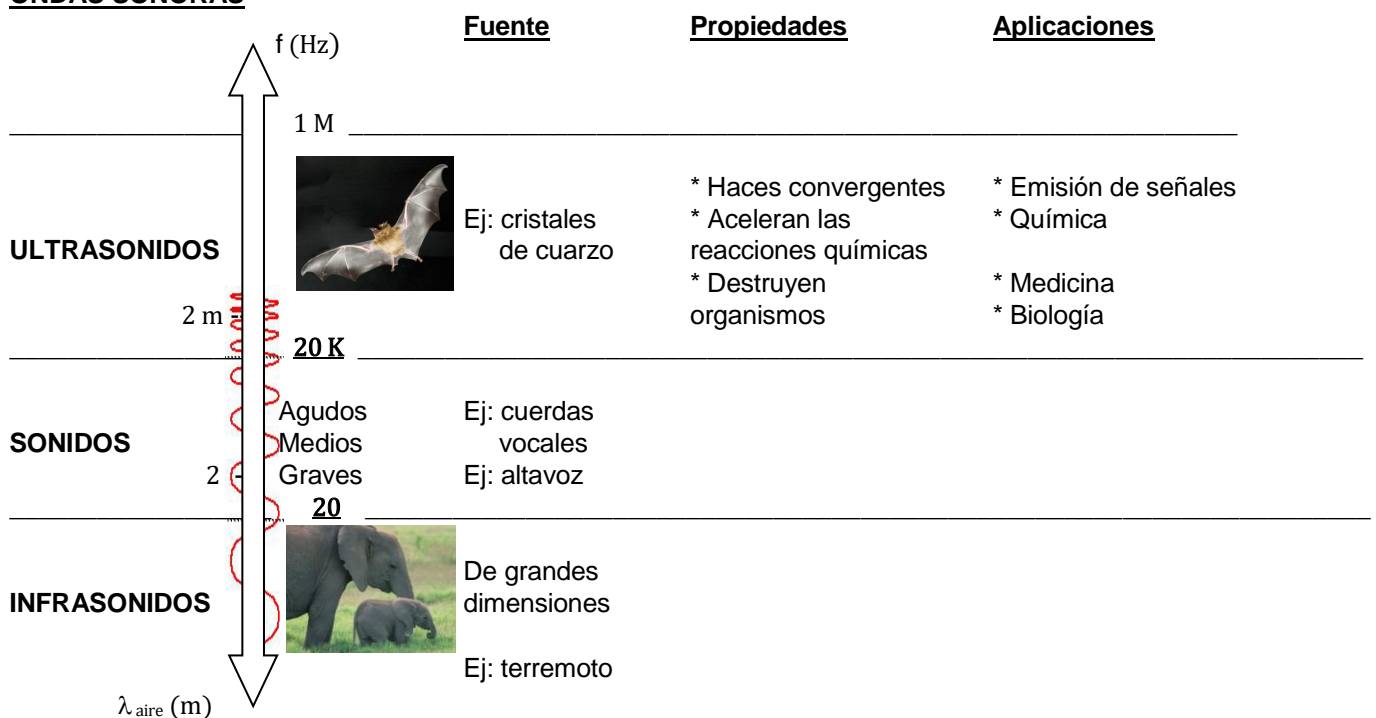
*Cabo de Gata, Almería*

# Ondas sonoras y electromagnéticas

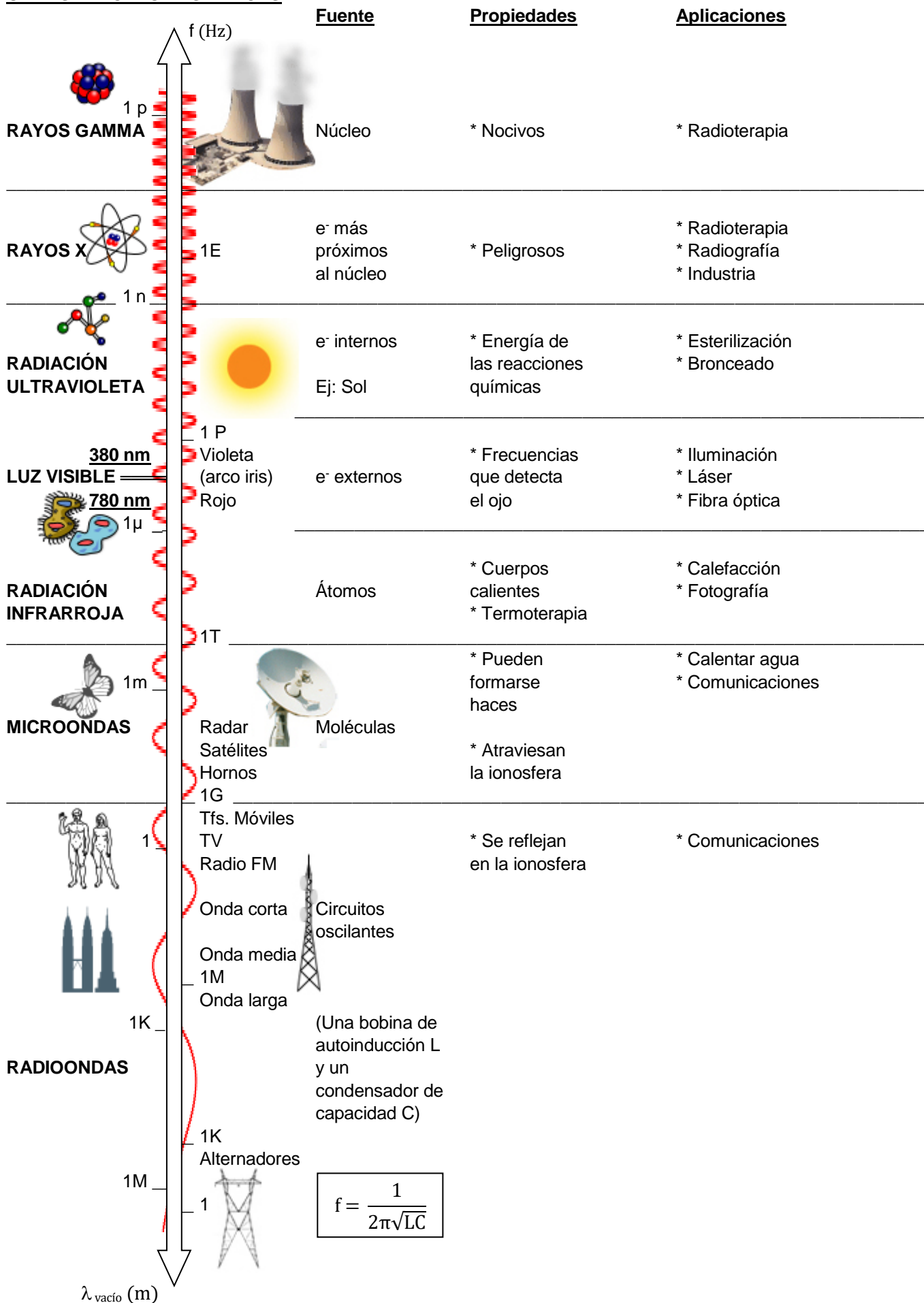
Características	ONDAS SONORAS	ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS
Producidas por	Variaciones de presión en el medio	Oscilaciones de los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$
Foco o centro emisor	Un cuerpo vibrante	Cargas eléctricas aceleradas (emiten energía en forma de radiación e.m.)
Energía propagada	Mecánica (Ondas mecánicas)	Electromagnética (O.e.m.)
Necesitan un medio material para propagarse	Sí (Ondas <u>materiales</u> )	No (Ondas <u>no materiales</u> )
Dirección de vibración y de propagación	Coinciden (Ondas <u>longitudinales</u> )	Perpendiculares (Ondas <u>doblemente transversales</u> )
Velocidad de propagación en un medio Ej.: v (m/s) { Aire Agua	Depende de las propiedades elásticas del medio  340 1500	La de la luz en ese medio  $3 \cdot 10^8$ $2,25 \cdot 10^8$

## 1. Espectro (Conjunto de ondas clasificadas por su frecuencia)

### ONDAS SONORAS



# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



# Óptica geométrica

## 0. Introducción

La **Óptica geométrica** estudia los fenómenos luminosos que pueden explicarse aplicando el concepto de rayo de luz: éstos son los de reflexión y refracción.

No se recurre al carácter electromagnético de la luz que explica otros fenómenos: interferencia.

«Una casa o un árbol proyectando sombra en un día soleado, un espejo o la superficie de un estanque devolviendo nuestra propia imagen, la apariencia quebrada de una varilla parcialmente sumergida en el agua, la ilusión de presencia de agua sobre el asfalto recalentado, el arco iris cruzando el cielo después de una tormenta, son parte de las incontables experiencias visuales que responden a tres simples leyes empíricas.» (B. Rossi)

Para estudiar los fenómenos ópticos de forma sencilla, se acude a algunas simplificaciones útiles:

**La luz se propaga en línea recta.** Los medios de propagación son homogéneos e isótropos, es decir, mantienen sus propiedades idénticas en cualquier punto del mismo. Las fuentes luminosas son puntuales, esto es, como si estuvieran concentradas en un punto, del cual emergen rayos de luz o líneas rectas que representan las direcciones de propagación. Un conjunto de rayos que parten de una misma fuente se denomina haz. Cuando la fuente se encuentra muy alejada del punto de observación, los haces se consideran formados por rayos paralelos. Cuando la fuente está próxima la forma del haz es cónica.

Dado un objeto, cuando tras sucesivas reflexiones y refracciones, los rayos de luz que parten de un punto concurren en otro punto, se dice que éste es **imagen** del primero.

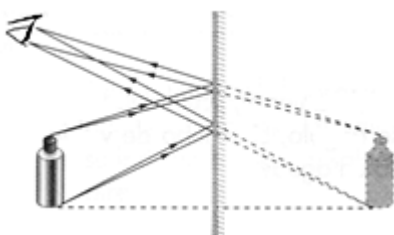
- **Imagen real:** se forma al concurrir en un punto rayos que convergen. Puede recogerse en una pantalla.
- **Imagen virtual:** se forma al concurrir en un punto rayos que divergen. No puede recogerse en una pantalla.

Se utiliza el **convenio de signos** propuesto por las normas *DIN*:

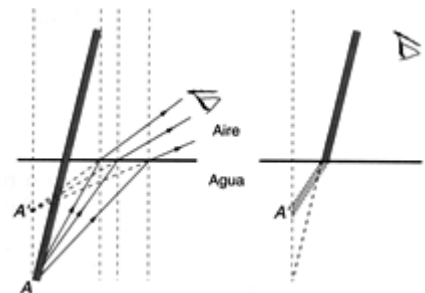
- 1.- Los símbolos que se refieren a una imagen son los mismos que los del objeto, pero con el símbolo "prima".
- 2.- La luz incidente siempre llega por la izquierda y se propaga hacia la derecha.
- 3.- Las distancias se consideran positivas si se miden hacia la derecha o hacia arriba a partir del sistema óptico.
- 4.- El ángulo que forma un rayo y un eje es positivo si al llevar el rayo hacia el eje por el camino más corto se realiza un giro en sentido contrario a las agujas del reloj.

Se estudiará la **formación de imágenes** desde un punto de vista cualitativo (cruce de rayos), y cuantitativo (ángulos y distancias), tal y como se muestra a continuación.

## 1. Superficies planas (Formación de imágenes por reflexión y refracción)



Espejo plano  
Imagen formada:  
**Virtual y simétrica**



Dioptrio plano  
(Superficie que separa dos medios)  
El cerebro interpreta líneas quebradas

## 2. Lentes delgadas (Formación de imágenes por refracción)

Una lente es un material transparente limitado por una superficie esférica y otra esférica o plana.

Se consideran lentes delgadas para simplificar los diagramas suponiendo que toda la desviación de los rayos tiene lugar en el plano central. Hay que distinguir los siguientes puntos:

**O** : **Centro** de la lente. Punto por el que pasan los rayos que no se desvían.

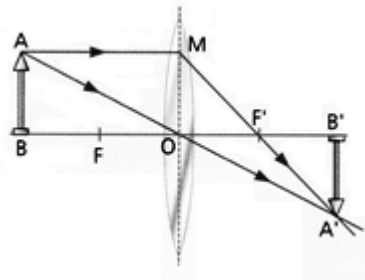
**F** : **Foco**. Punto por el que pasan los rayos paralelos al eje. La distancia al centro se llama **distancia focal**.

La **potencia** de una lente es la inversa de la distancia focal. Unidad SI:  $D$  (dioptría) =  $m^{-1}$   
Una dioptría es la potencia de una lente con distancia focal de un metro.

$$P = \frac{1}{f'}$$

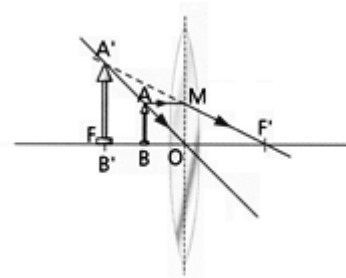
### Lentes convergentes

Los rayos paralelos al eje óptico se refractan acercándose a éste.  
Es más gruesa por el centro que por su borde.



Objeto lejano  
Imagen formada:

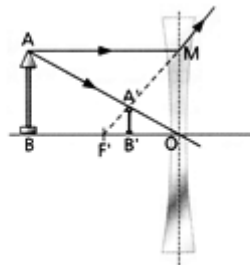
**Real, invertida y su tamaño depende de la distancia del objeto a la lente**



Objeto entre el foco y la lente  
Imagen formada:  
**Virtual, derecha y más grande**

### Lentes divergentes

Los rayos paralelos al eje óptico se refractan alejándose de éste.  
Es más gruesa por el borde que por su centro.



En cualquier posición del objeto  
Imagen formada:  
**Virtual, derecha y más pequeña**

### Ecuación de una lente delgada

Fórmula gaussiana de las lentes delgadas:

$$\frac{1}{s} - \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$s, s'$  : distancias del objeto y de la imagen respectivamente al origen O, situado en el centro de la lente.

$f, f'$  : distancias focales.

$$f = -f'$$

Aumento transversal o lateral de la imagen:

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

$y, y'$  : altura del propio objeto y la imagen respectivamente.

Según el criterio *DIN* de signos:

$s, s', f, f'$  son negativas cuando están delante de la lente y positivas cuando están detrás.

$y, y'$  son negativas cuando están debajo del eje y positivas cuando están encima.

### 3. Espejos esféricos (Formación de imágenes por reflexión)

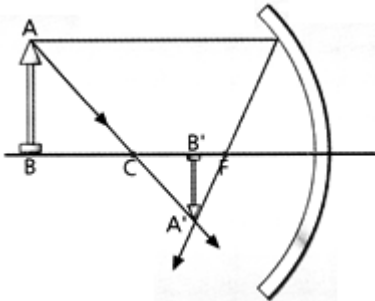
La superficie reflectora es un casquete esférico. Hay que distinguir los siguientes puntos:

**C** : **Centro** de curvatura de la esfera. Punto por el que pasan los rayos perpendiculares al espejo.

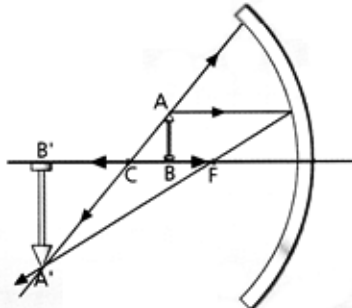
**F** : **Foco**. Punto por el que pasan los rayos paralelos al eje. Está a mitad de distancia entre C y el espejo.

#### Espejos cóncavos

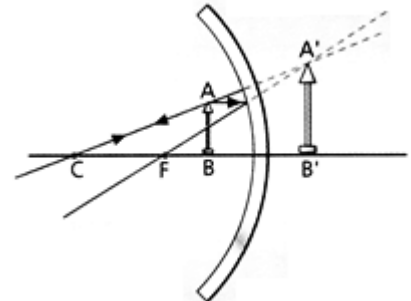
La reflexión ocurre en la superficie interior.



Objeto lejano  
Imagen formada:  
**Real, invertida y más pequeña**



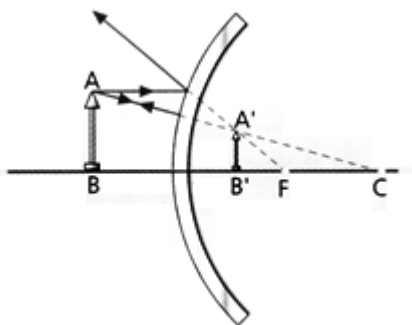
Objeto entre el centro y el foco  
Imagen formada:  
**Real, invertida y más grande**



Objeto entre el foco y el espejo  
Imagen formada:  
**Virtual, derecha y más grande**

#### Espejos convexos

La reflexión ocurre en la superficie exterior.



En cualquier posición del objeto  
Imagen formada:  
**Virtual, derecha y más pequeña**

### 4. El ojo y otros instrumentos ópticos

[Trabajo: en una hoja, a mano]

Dibujo de la fisiología y **partes del ojo**

Tabla con: **defectos del ojo y corrección**

Pág. 1

Lentes, diagrama de rayos e imagen formada en:

1. **Prisma**
2. **Lupa**
3. **Microscopio**
4. **Telescopio**
5. **Proyector**

Dibujo de una **cámara fotográfica** y **comparación** de sus elementos con las distintas partes del ojo

Pág. 2

# Teorías acerca de la luz

CORPUSCULAR [PARTÍCULAS]	ONDULATORIA			ONDA-PARTÍCULA DUAL [FOTÓN]
	MECÁNICA		ELECTROMAGNÉTICA	
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL		
<b>P</b>	<b>OML</b>	<b>OMT</b>	<b>OEM</b>	<b>F</b>

<i>Isaac Newton</i>	<i>Christiaan Huygens</i>	<i>Augustin-Jean Fresnel</i>	<i>James Clerk Maxwell</i>	<i>Albert Einstein</i>
s. XVII	s. XVII	s. XVIII	s. XIX	s. XX

## FENÓMENOS QUE EXPLICA

Reflexión				
✓	✓	✓	✓	✓

Refracción				
✓	✓	✓	✓	✓

Propagación rectilínea				
✓	✓	✓	✓	✓

Propagación en el vacío				
✓	X	X	✓	✓

Interferencia				
X	✓	✓	✓	✓

Polarización				
X	X	✓	✓	✓

Efecto fotoeléctrico				
X	X	X	X	✓