

14 . Propagación

Electromagnetismo y optica

Qué es la luz?

En principio no sé, pero...

1. Se produce en algún lugar

2. Viaja

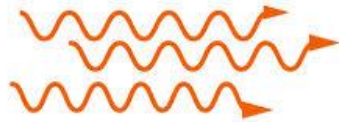
- viaja en el vacío
- atraviesa materiales (gases, líquidos, sólidos)
- se refleja / refracta en interfases
- puede presentar fenómenos de difracción e interferencia

3. Puede ser detectada (transporta energía, interactúa con la materia)

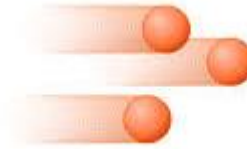
Por qué debería interesarles?
Muy posiblemente a lo largo de sus carreras deban lidiar con algunos de estos aspectos. Cada uno de estos puntos involucra a un sistema físico que es posible interrogar conociendo los mecanismos y propiedades físicas involucradas.

Huygens vs Newton

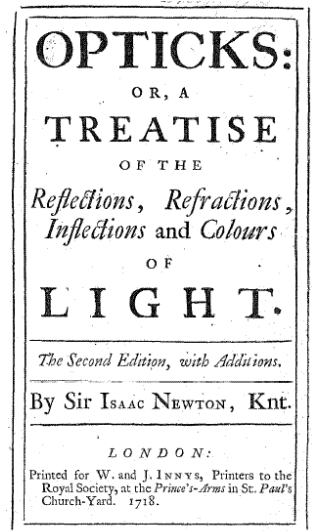
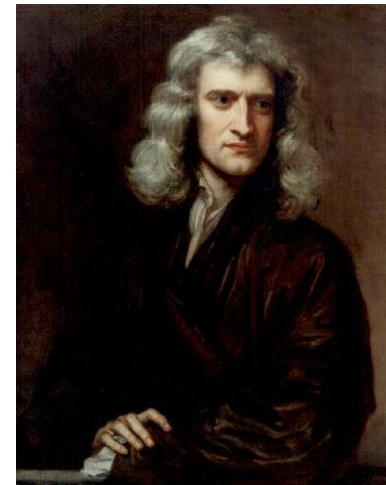
La luz es una onda!



VS



La luz está compuesta por corpúsculos!



1678

1709

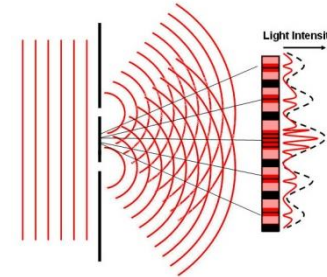
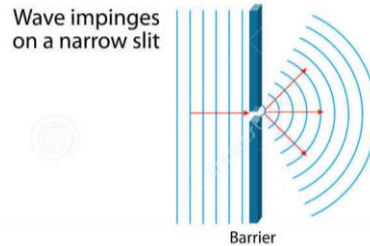
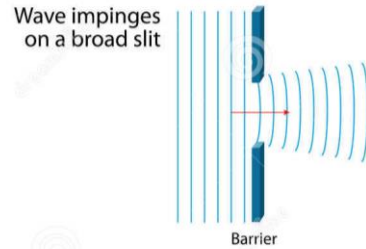


Dualidad onda-particula

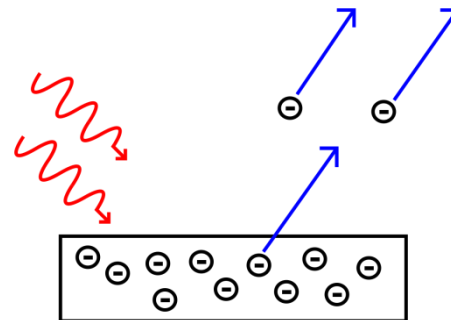
LUZ



onda



particula



Adoptando el concepto ondulatorio no se podía explicar porqué luz de **baja frecuencia**, sin importar su **intensidad**, no arrancaba electrones, mientras que luz de **alta frecuencia** sí lo hacía.

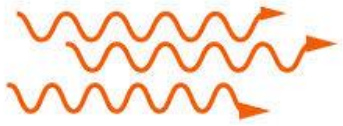
En 1905 Einstein introdujo la idea de **foton**: partícula, sin masa en reposo, que lleva cantidad de movimiento y una energía $E=h\nu$



Dualidad onda-partícula



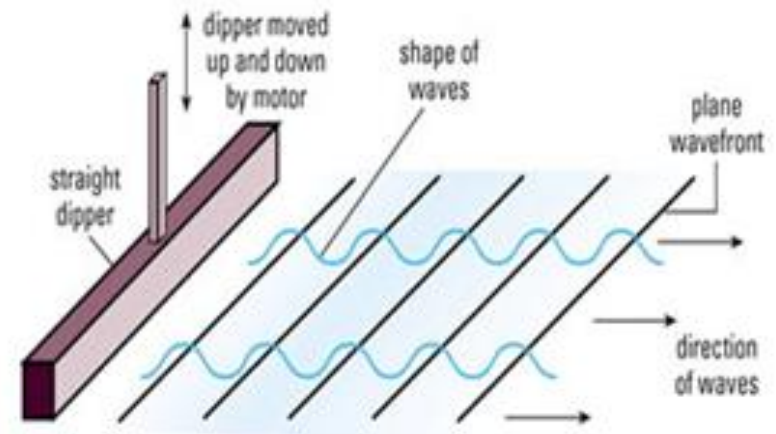
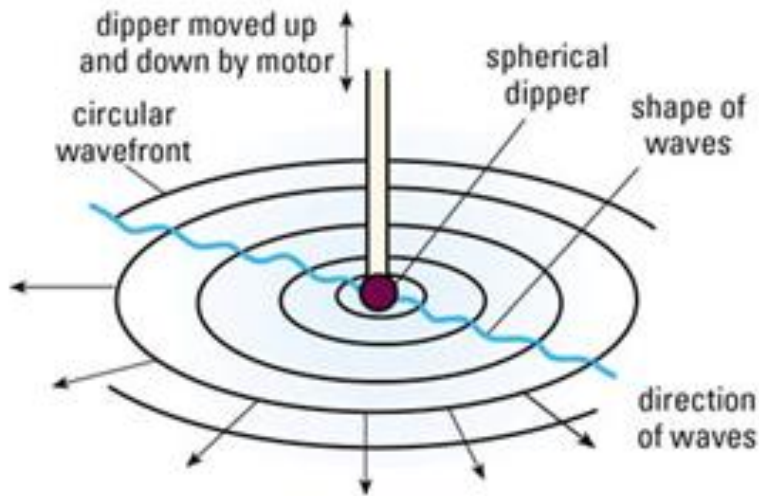
- I. La realidad es que la naturaleza de la luz **no encaja** precisamente en el concepto de onda ni en el de partícula.
- II. La luz es otra cosa.
- III. Sin embargo, como nos sentimos cómodos con dichos conceptos (son los que el lenguaje de la física viene usando con éxito desde siempre) podemos utilizar uno u otro enfoque, cuando sea apropiado, para describir ciertos aspectos de interés relacionados con fenómenos lumínicos.
- IV. Lo mismo sucede en realidad con la descripción cuántica de partículas...



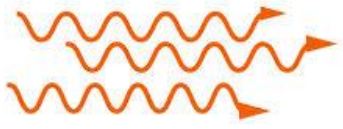
Teoría ondulatoria



Para Huygens la luz es una onda



- La forma de la onda describe la perturbación instantánea a instantánea.
- 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.

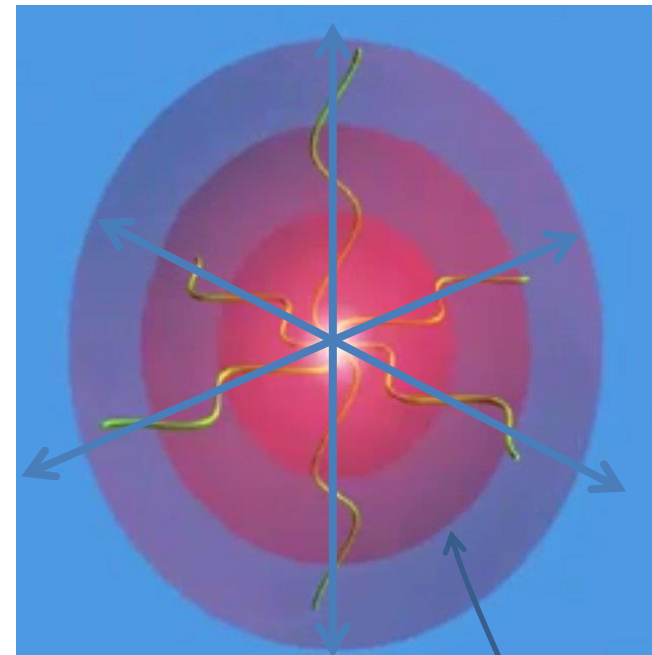
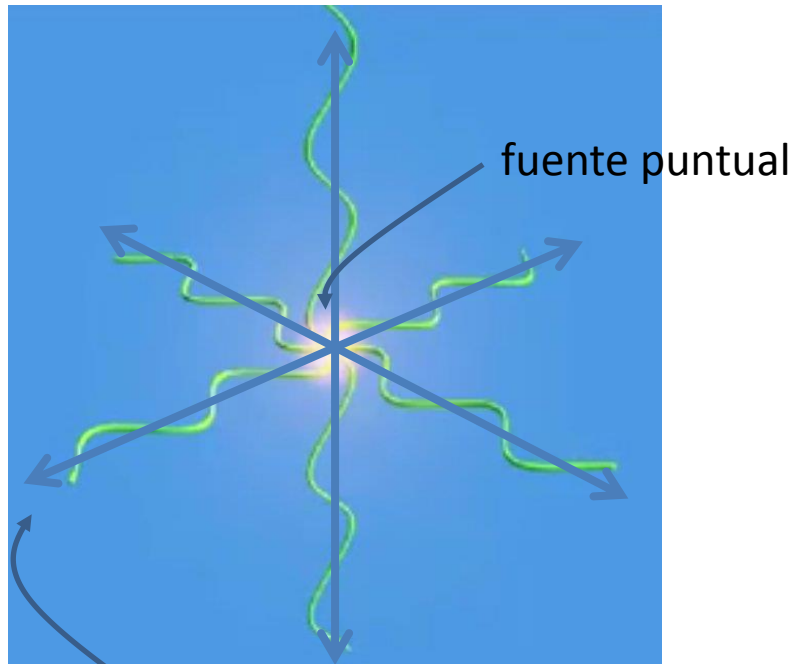


Teoría ondulatoria



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?)

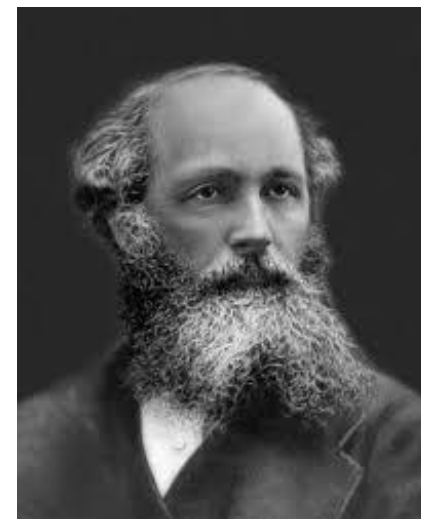


dirección de propagación (rayo)

frente de onda

En serio...qué es la luz?

- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.

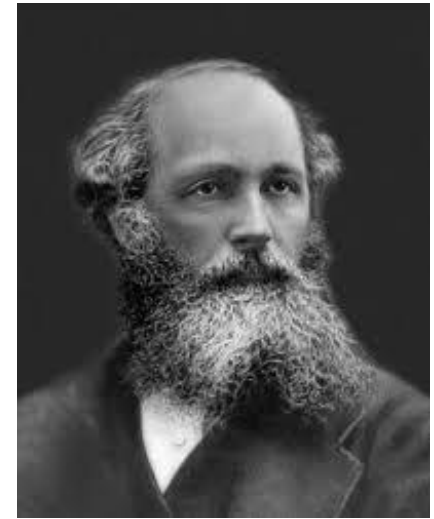


James Maxwell

		Fuente de divergencia
divergencia	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	
	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	Fuentes de rotor
rotor	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	
	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	

En serio...qué es la luz?

- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.



James Maxwell

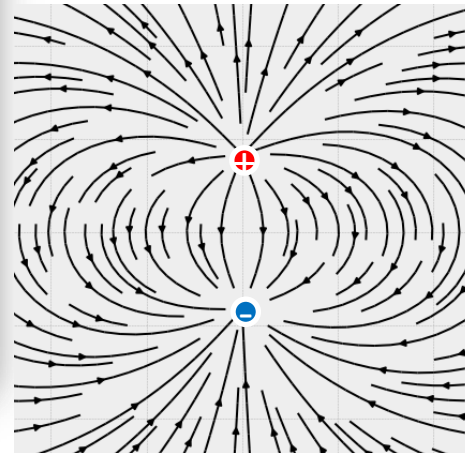
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

El campo **E** **diverge** en los lugares donde hay densidad de carga electrica

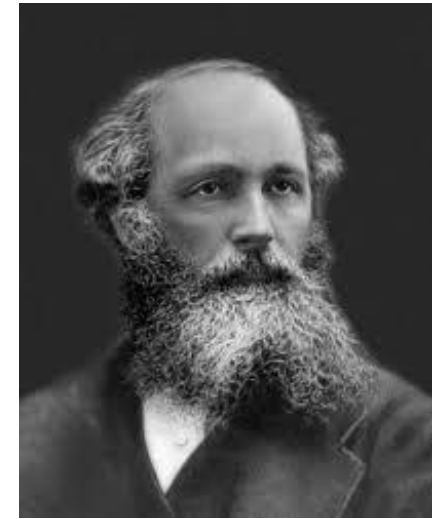


Muy relacionado con Gauss:

$$\begin{aligned} \phi_S &= \oiint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS \\ &= 4\pi k Q_{encerrada} \end{aligned}$$

En serio...qué es la luz?

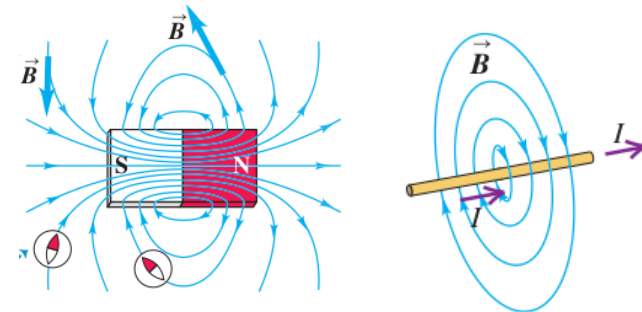
- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.



James Maxwell

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

El campo **B** **NO-diverge** en NINGUN punto del espacio

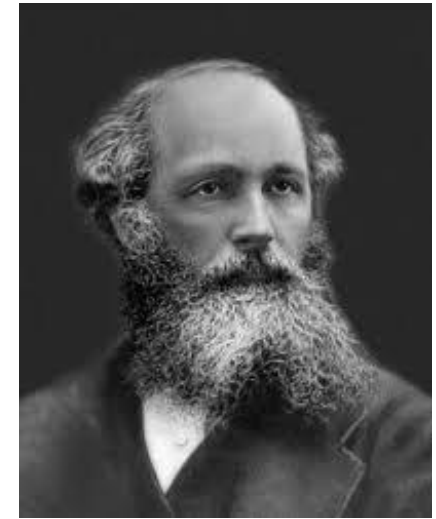


$$\phi_S = \oiint_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0$$

No hay monopolos magneticos

En serio...qué es la luz?

- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.



James Maxwell

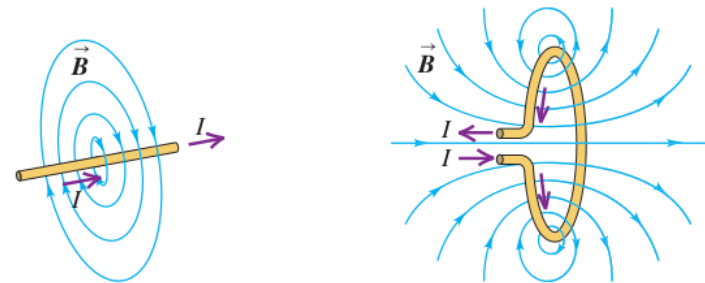
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

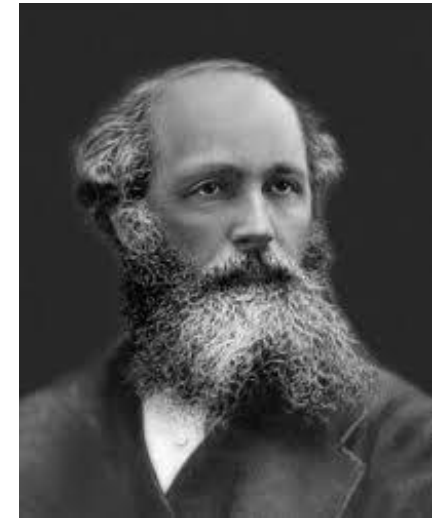
Hay **rotor** de **B** en los puntos donde haya corrientes y donde haya un campo magnético **E** que varía en el tiempo.



B se *enrolla* alrededor de corrientes y de líneas de **E** que varíen en el tiempo

En serio...qué es la luz?

- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.



James Maxwell

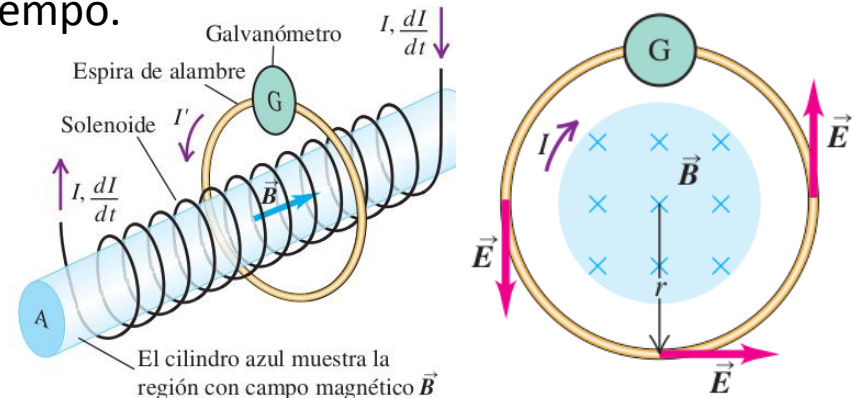
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Faraday: Hay **rotor** de \mathbf{E} en los puntos donde haya un campo magnético \mathbf{B} que varía en el tiempo.



\mathbf{E} se *enrolla* alrededor de líneas de \mathbf{B} que varíen en el tiempo

En serio...qué es la luz?

- Maxwell unificó las teorías que reinaban sobre la electricidad con las del magnetismo en la forma de 4 ecuaciones que describían correctamente experimentos acumulados a lo largo de años.
- Sus ecuaciones predecían que los campos eléctricos y magnéticos podían propagarse como ondas viajeras...aun por vacío.
- La teoría predecía que la velocidad de propagación de dichas ondas resultaba:
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$
- Utilizando los valores experimentales para ϵ_0 y μ_0 Maxwell se dio cuenta que:

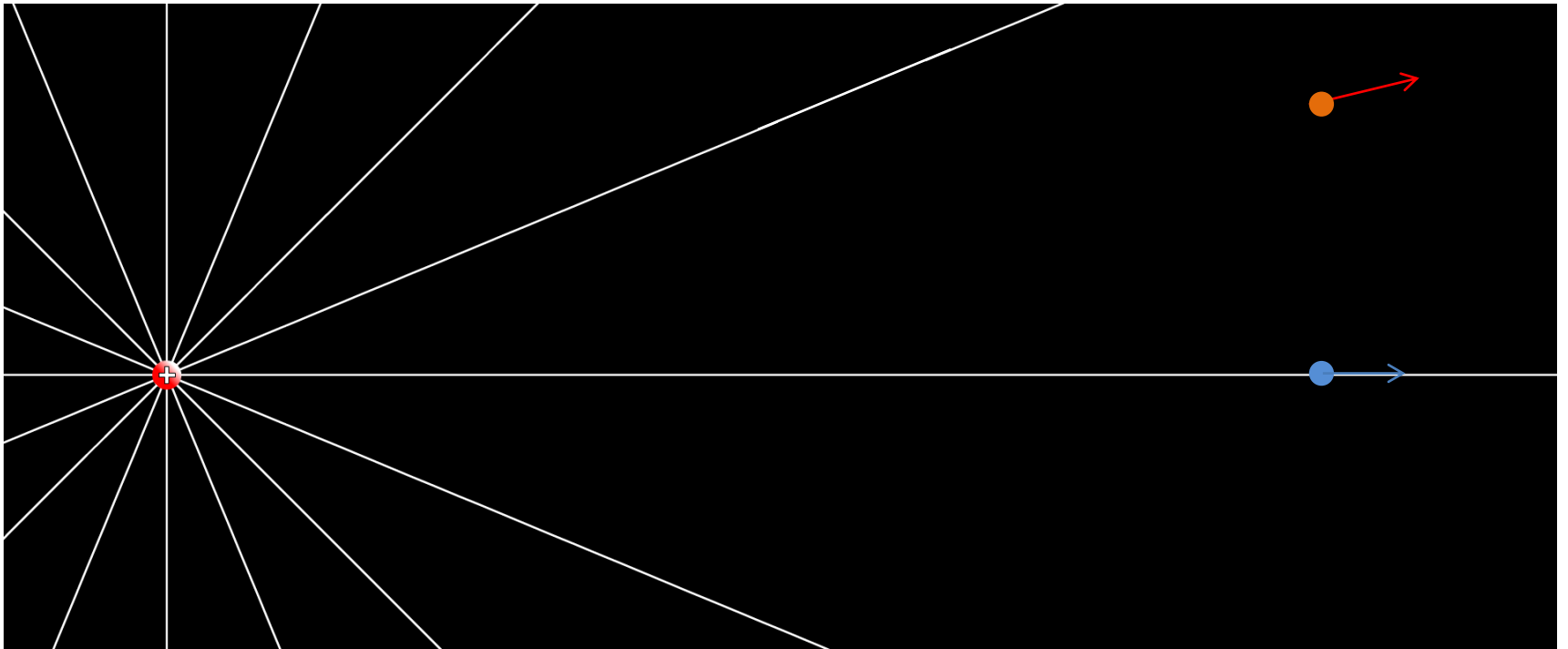
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

“...Esta velocidad es tan cercana a la de la luz* que tenemos razones para concluir que **la luz** en sí misma es una **perturbación electromagnética** que tiene la forma de una onda que se propaga a través del espacio siguiendo las leyes del electromagnetismo...”

* $c = 300000 \text{ km/s}$

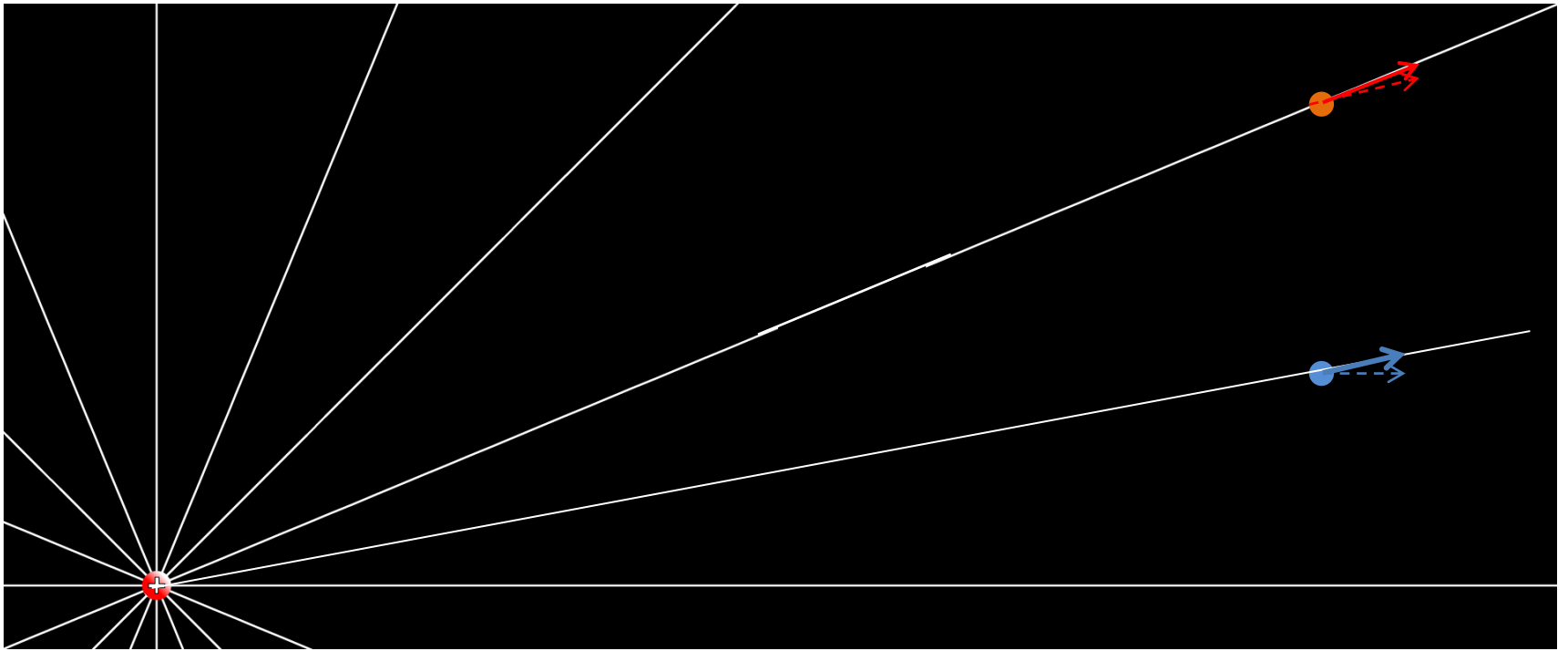
Origen de ondas EM

t=0

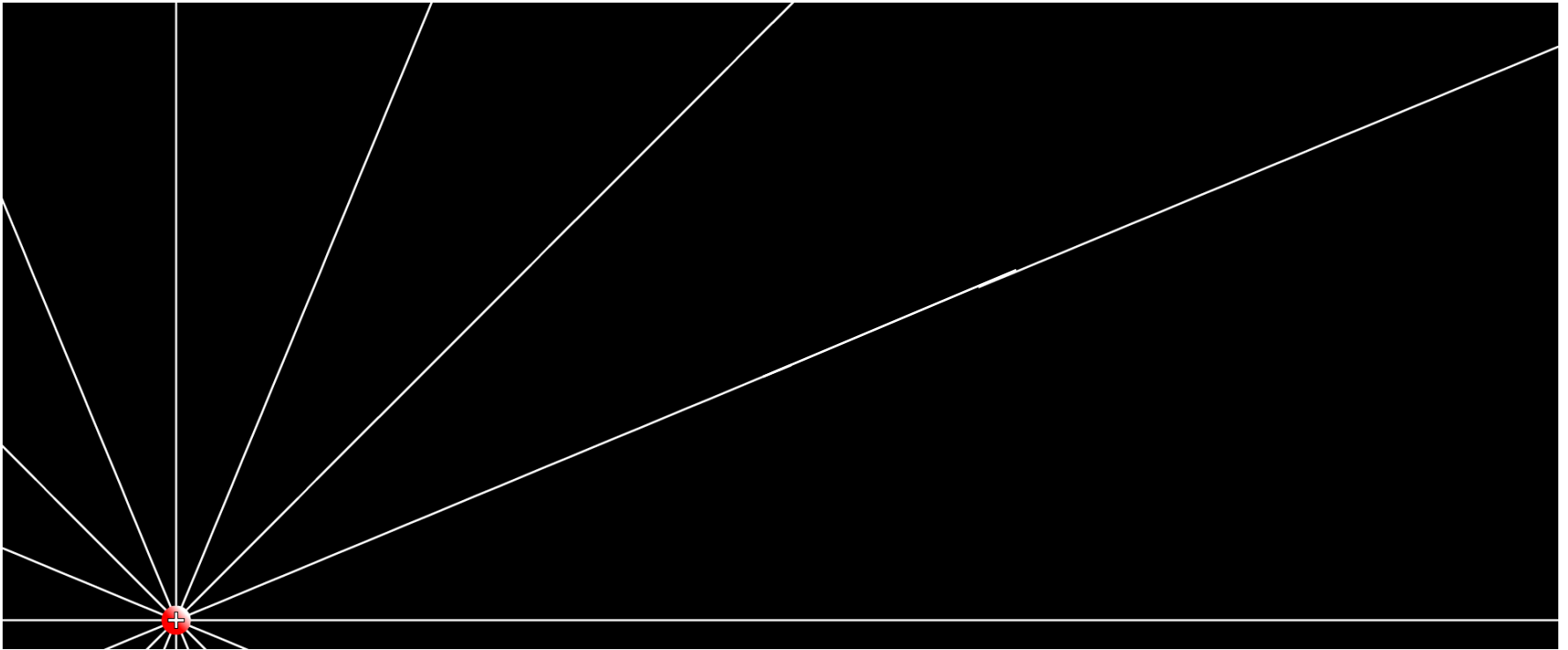


Origen de ondas EM

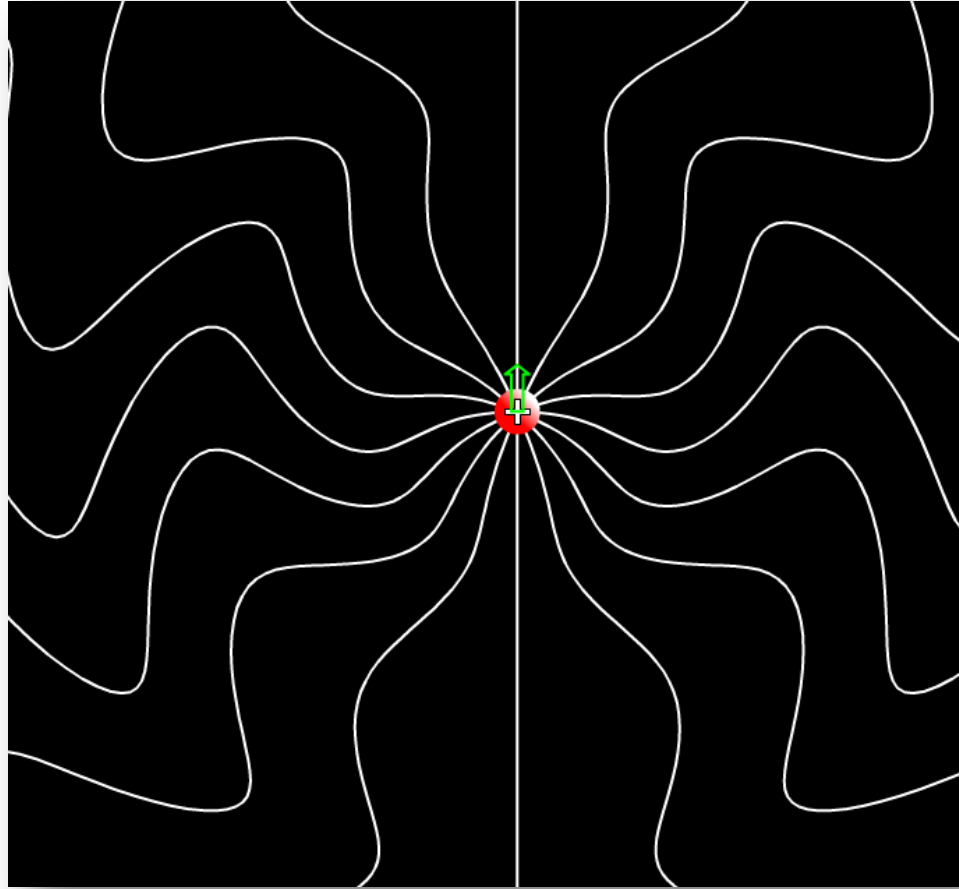
$t_1 > 0$



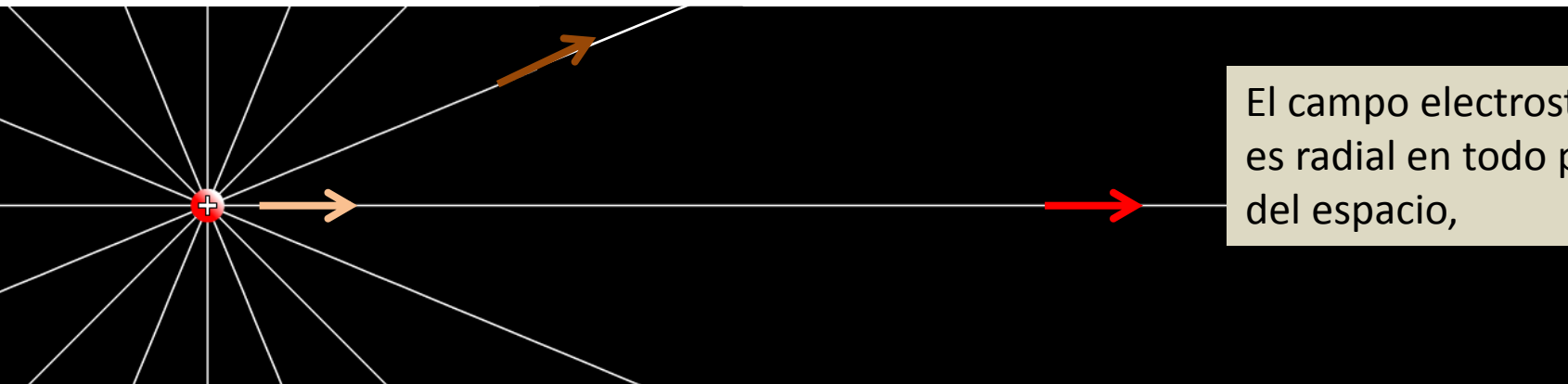
Origen de ondas EM



Lets move it...

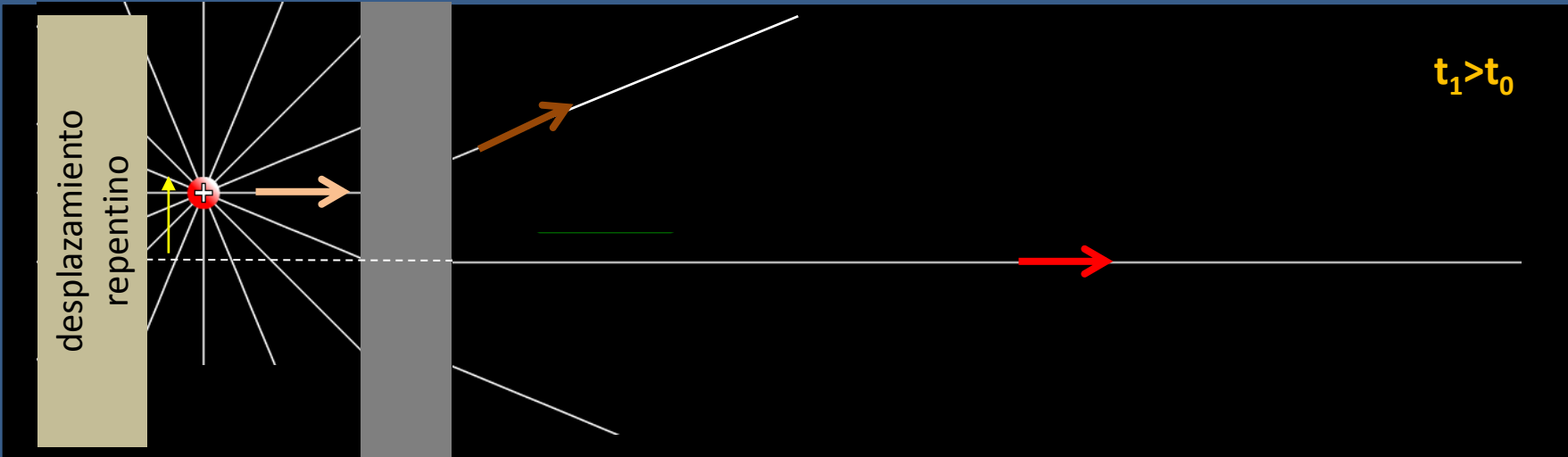


https://phet.colorado.edu/sims/radiating-charge/radiating-charge_en.html



El campo electrostático es radial en todo punto del espacio,

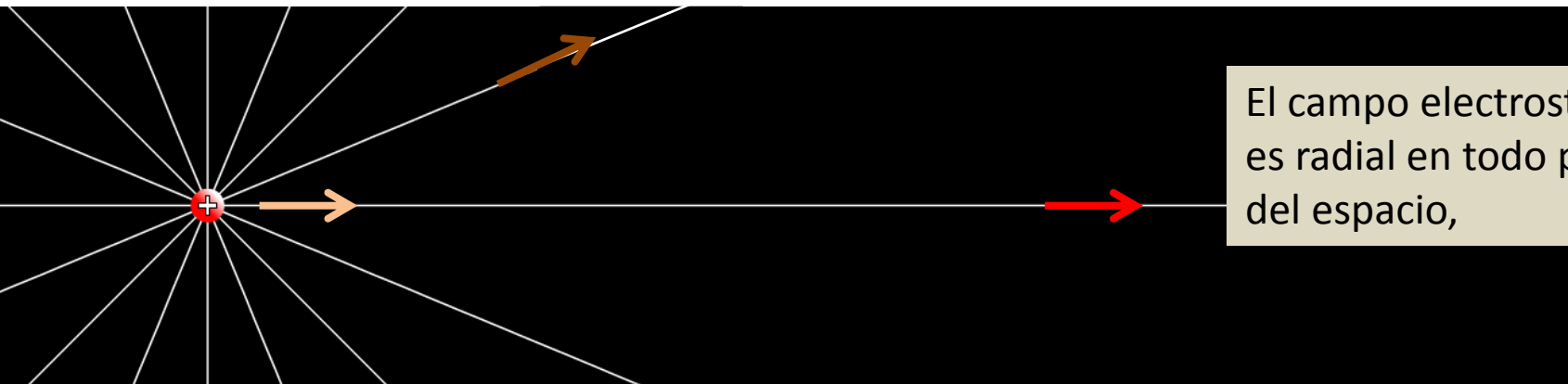
Desplazamiento repentino a tiempo t_0



Region cercana

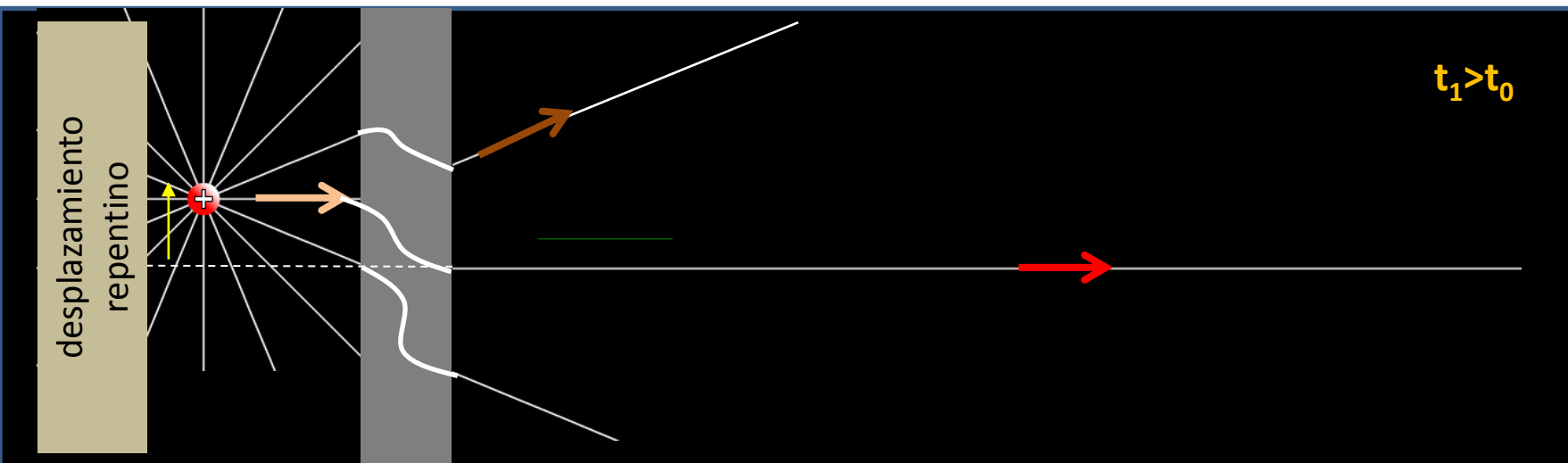
Region 'lejana'

Hay un *quiebre* entre regiones **cercanas** y **lejanas** porque toda información necesita un tiempo para propagarse (nada se propaga más rápido que la luz)



El campo electrostático es radial en todo punto del espacio,

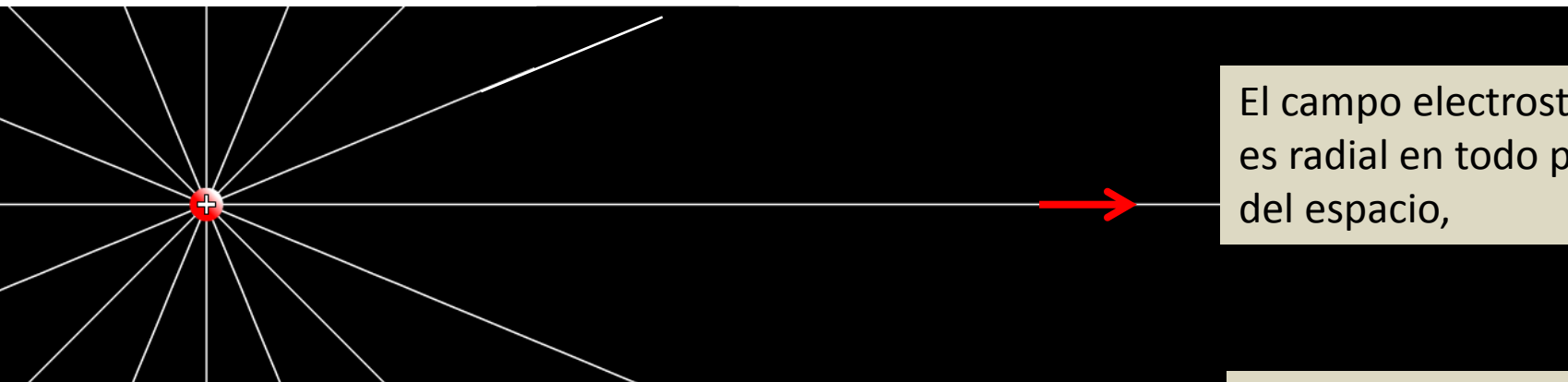
Desplazamiento repentino a tiempo t_0



Region cercana

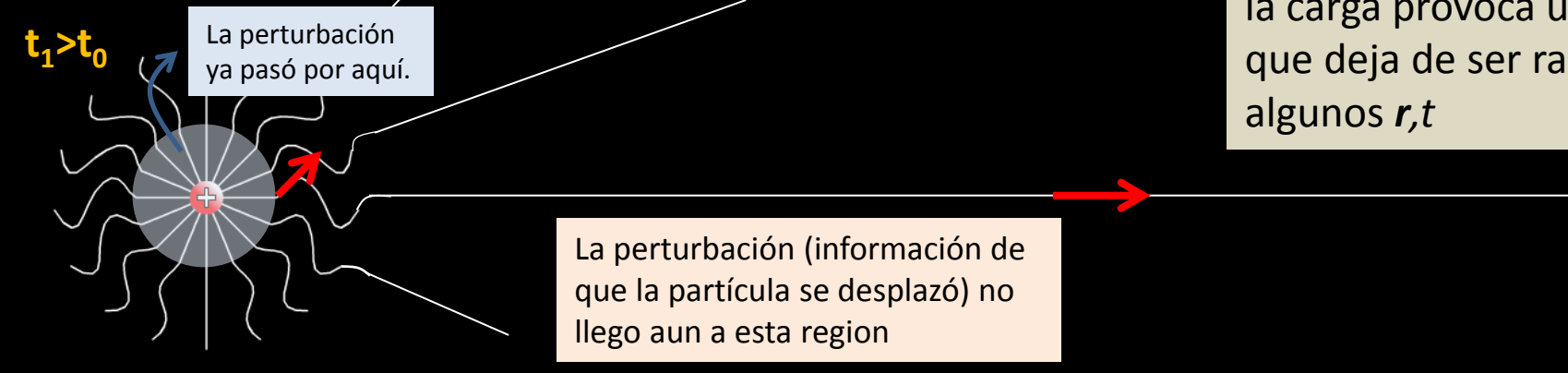
Region 'lejana'

Region Intermedia que va 'viajando'



El campo electrostático es radial en todo punto del espacio,

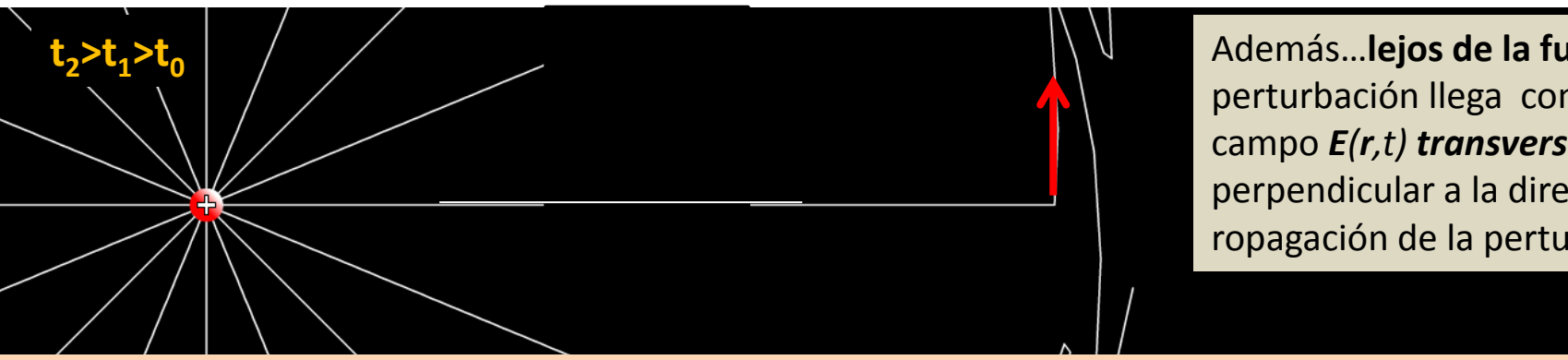
Sacudon (subida y bajada) a tiempo t_0



$t_1 > t_0$
La perturbación ya pasó por aquí.

El repentino sacudón de la carga provoca un $E(r,t)$ que deja de ser radial en algunos r,t

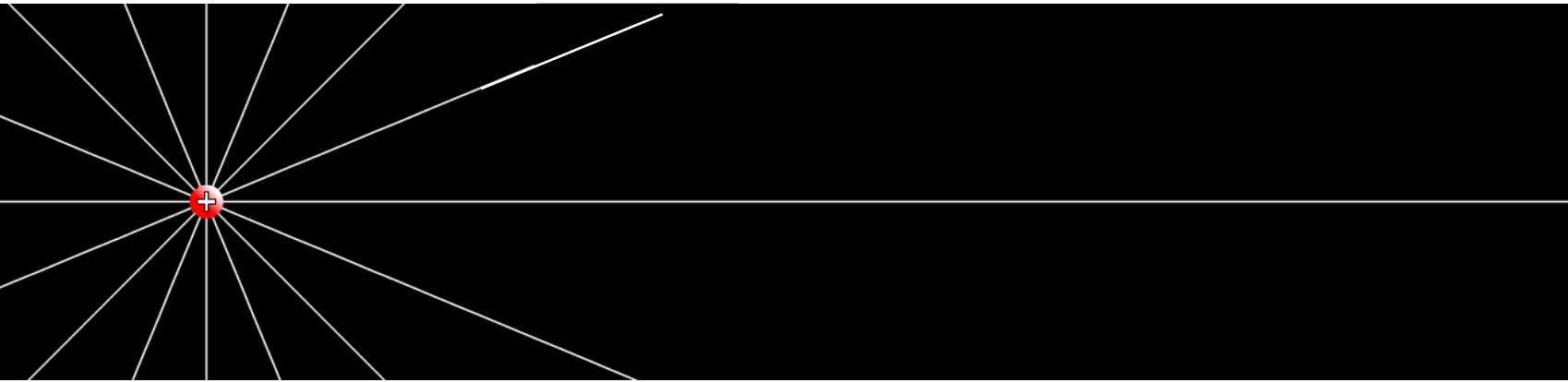
La perturbación (información de que la partícula se desplazó) no llega aun a esta region



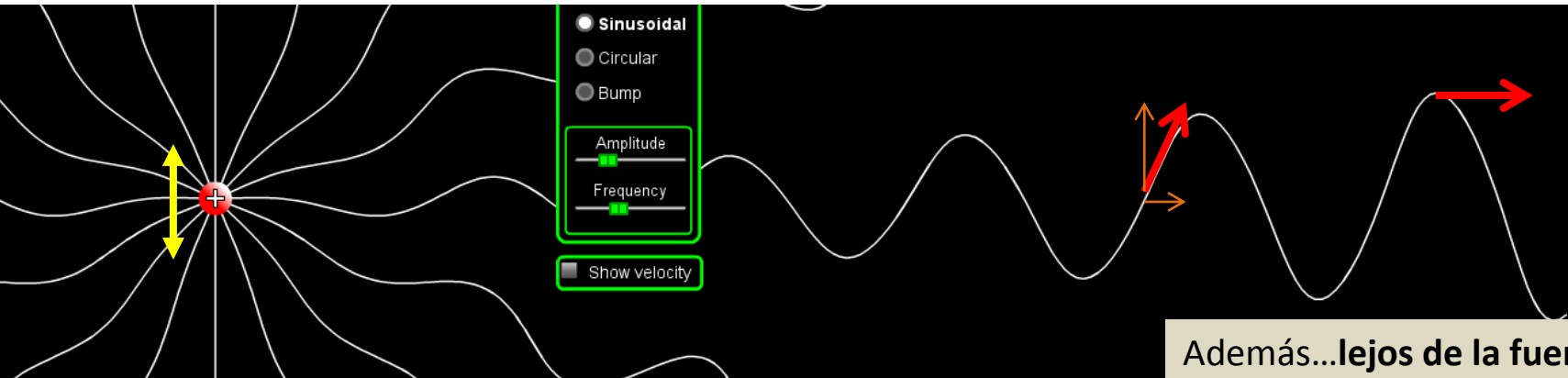
$t_2 > t_1 > t_0$

Además...lejos de la fuente la perturbación llega como campo $E(r,t)$ **transversal** (i.e perpendicular a la dirección de ropagación de la perturbación)

El campo de radiación (el que viaja y llega lejos) es **perpendicular** a la **dirección de propagación**



Movimiento
oscilatorio armónico



Además...**lejos de la fuente** la perturbación llega como campo $E(r,t)$ **transversal** (i.e perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación)

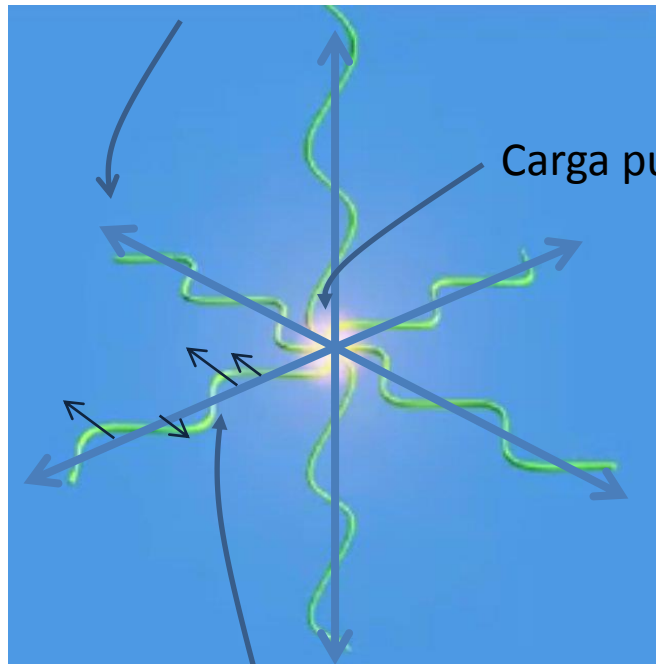
El campo de radiación (el que viaja y llega lejos) es **perpendicular** a la **dirección de propagación**

En serio...qué es la luz?

Descripción del campo perpendicular

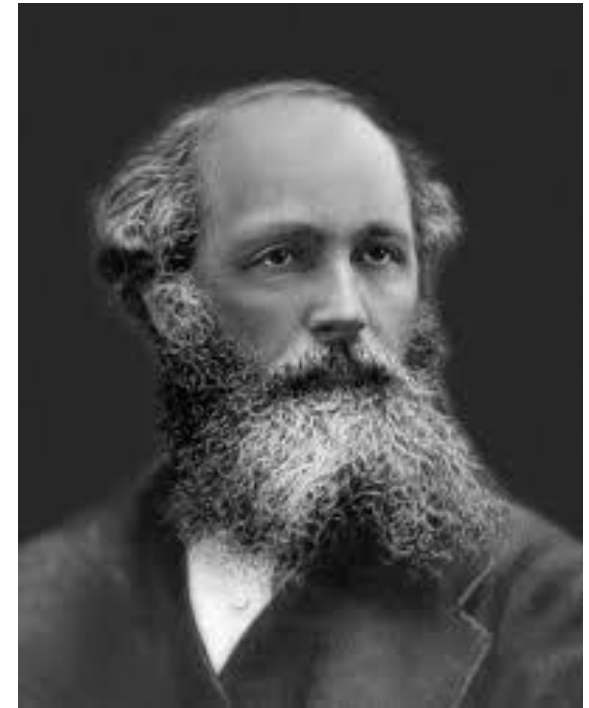
$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$

dirección de propagación (rayo)



dirección de \vec{E}_0 perpendicular

radiating-charge applet



James Maxwell

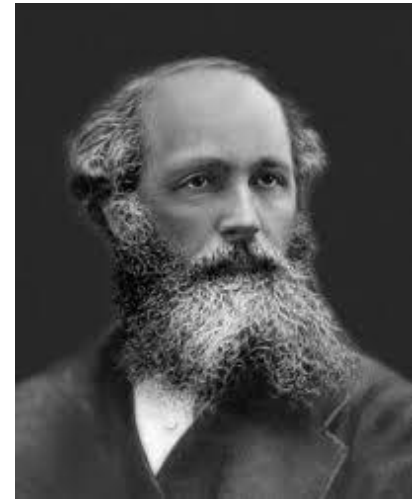
“...Esta velocidad es tan cercana a la de la luz* que tenemos razones para concluir que **la luz** en sí misma es una **perturbación electromagnética** que tiene la forma de una onda que se propaga a través del espacio siguiendo las leyes del electromagnetismo...”

* $c = 300000 \text{ km/s}$

Espectro electromagnético

Descripción matemática de la onda que se propaga
(la vamos a ver en detalle más adelante)

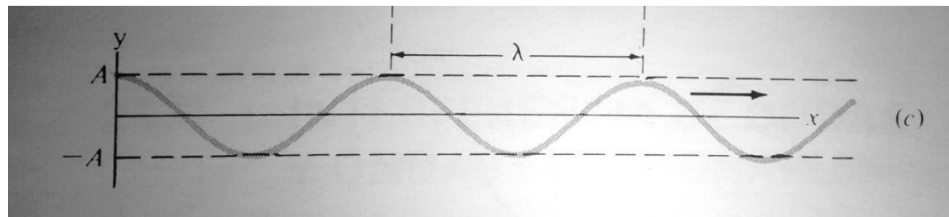
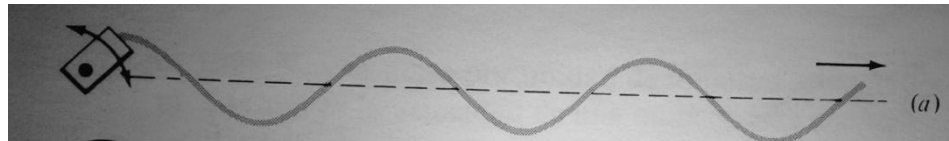
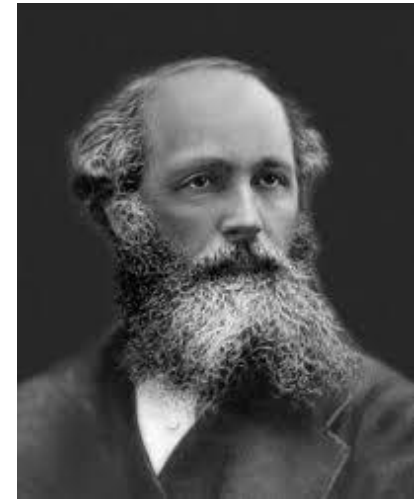
$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



Espectro electromagnético

Descripción matemática de la onda que se propaga
(la vamos a ver en detalle más adelante)

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



Conexión dominio temporal y espacial

$$v = \lambda f$$
$$f = v/\lambda$$

(pip, pip, pip,..)

Periodicidad espacial

Periodicidad Temporal

Fase inicial

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

$$\varphi_0$$

Long de onda
(periodo espacial)

Nro de onda

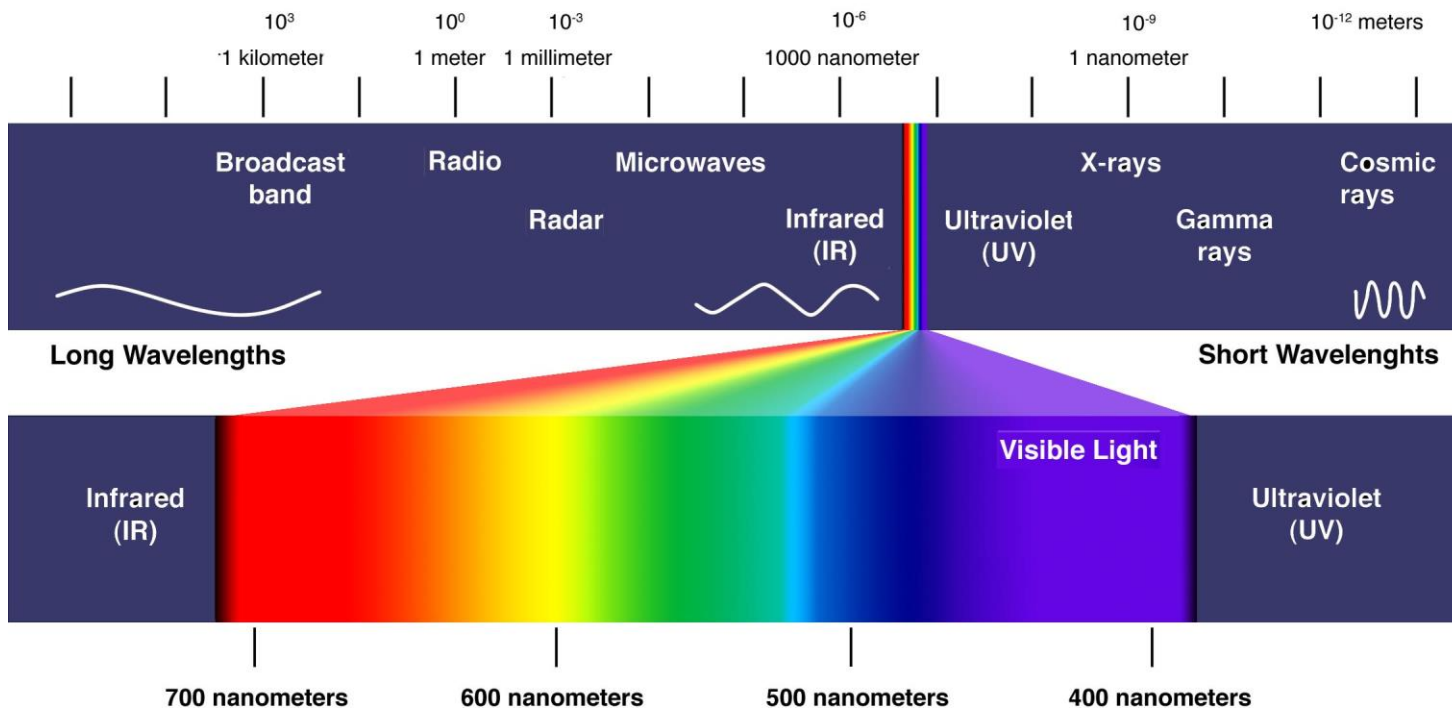
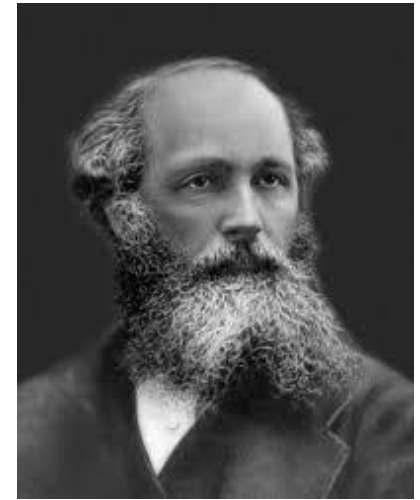
Periodo temporal

Frecuencia

Espectro electromagnético

Descripción matemática de la onda que se propaga
(la vamos a ver en detalle más adelante)

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$

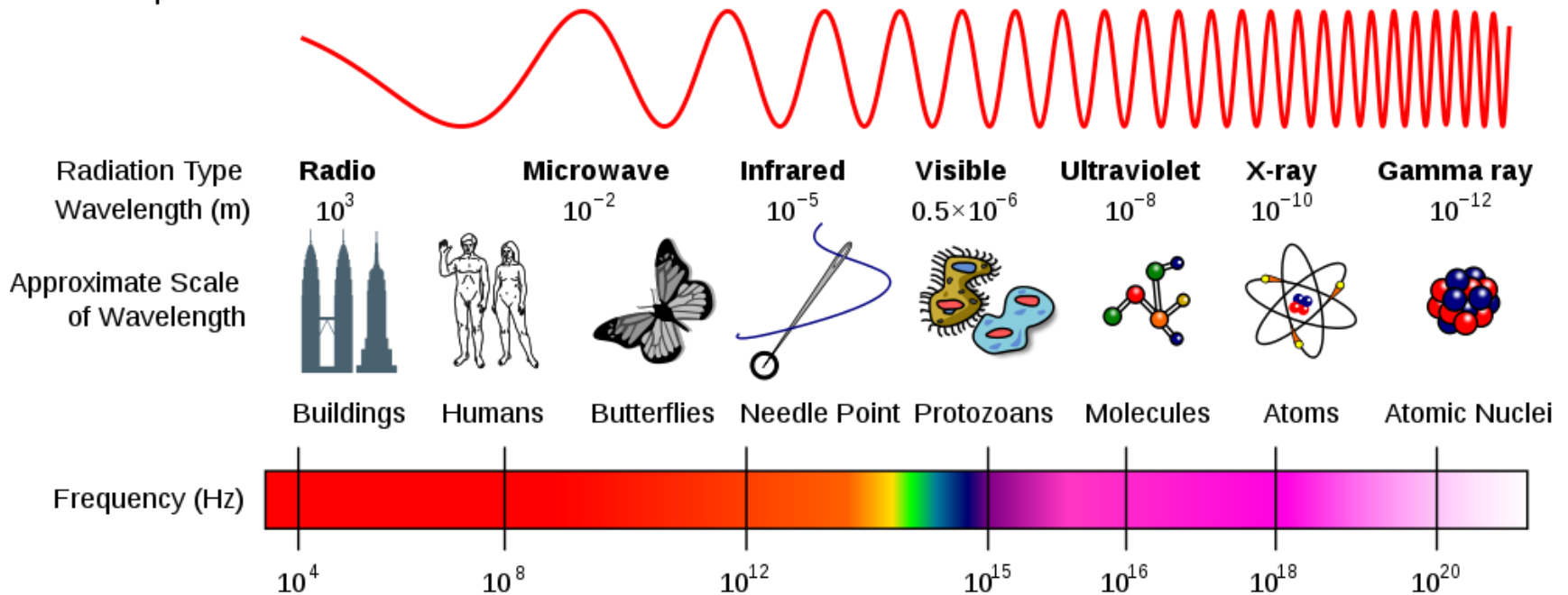
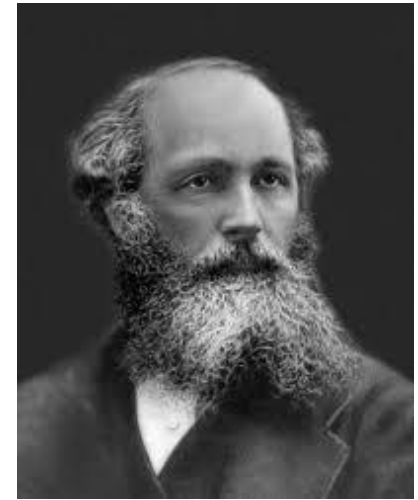


$$c = \lambda f$$

Espectro electromagnético

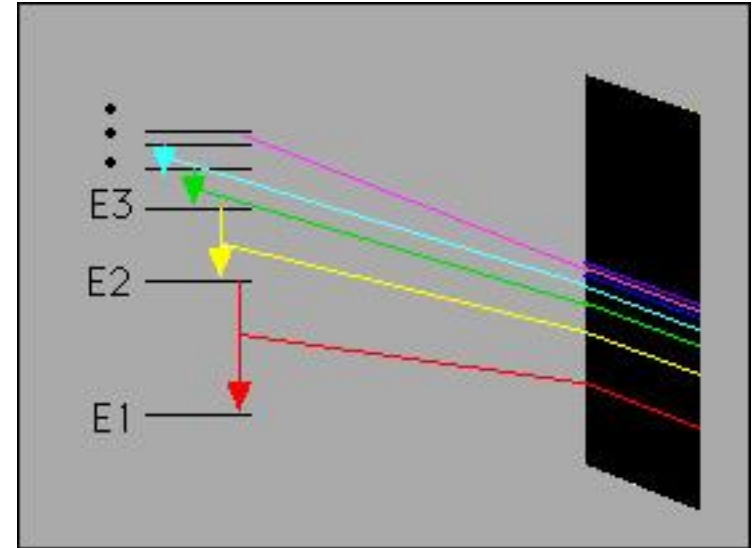
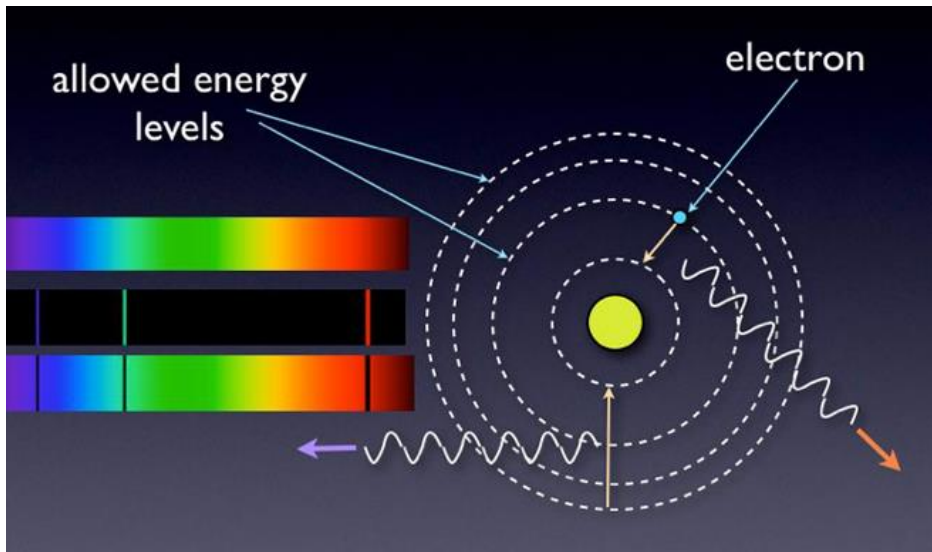
Descripción matemática de la onda que se propaga
(la vamos a ver en detalle más adelante)

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_0)$$



$$c = \lambda f$$

Átomos y luz



- Los electrones ligados al átomo sólo pueden tener ciertas energías
- A baja temperatura se encuentran en los niveles más bajos, pero los electrones más externos pueden ser excitados (es decir, aparecer en estados de alta energía) por colisiones o por interacción con radiación EM
- Los electrones solo pueden emitir o absorber energía *de a paquetes* (cuantos):

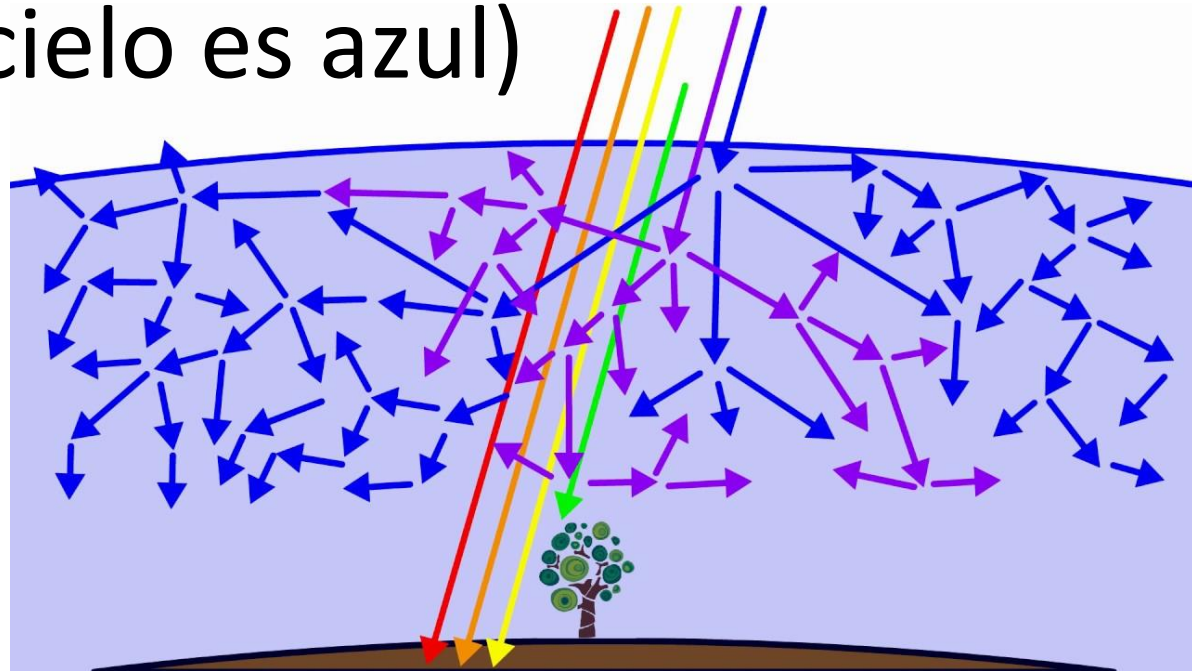
$$\Delta E = hf$$

Scattering de Rayleigh (o por qué el cielo es azul)



Scattering de Rayleigh (o por qué el cielo es azul)

- Electrones de las moléculas de la atmósfera (oxígeno, nitrógeno, etc) pueden absorber y reemitir luz de frecuencias UV-azul.
- No interactúan con radiación de otras longitudes de onda.



Emisión resonante:

