

# 14 . Propagación

Electromagnetismo y optica

# Qué es la luz?

En principio no sé, pero...

1. Se produce en algún lugar

2. Viaja

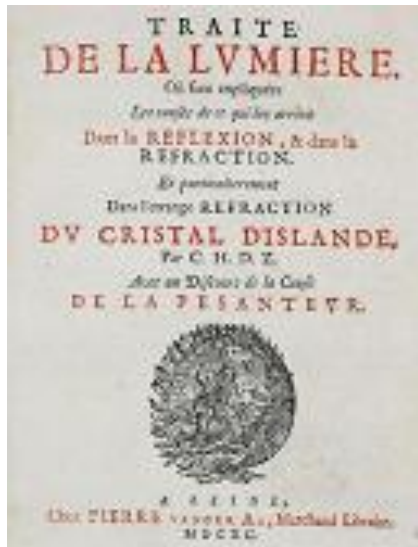
- viaja en el vacío
- atraviesa materiales (gases, líquidos, sólidos)
- se refleja / refracta en interfases
- puede presentar fenómenos de difracción e interferencia

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

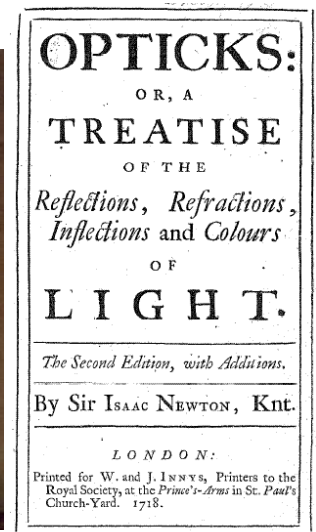
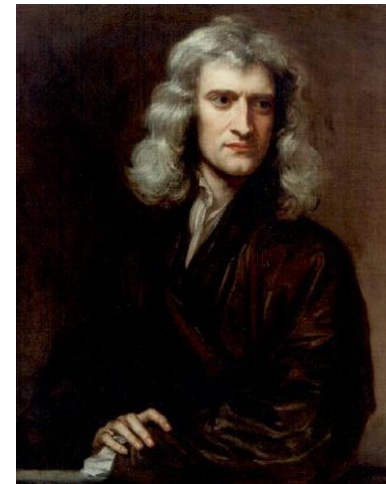
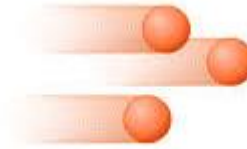
La luz es una onda!



1678

VS

La luz está compuesta por corpúsculos!



1709

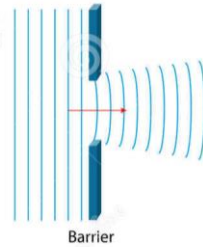


# Dualidad onda-partícula

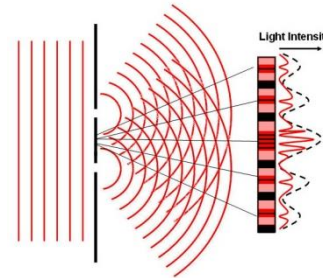
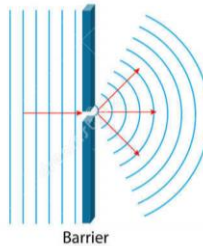
# LUZ

onda

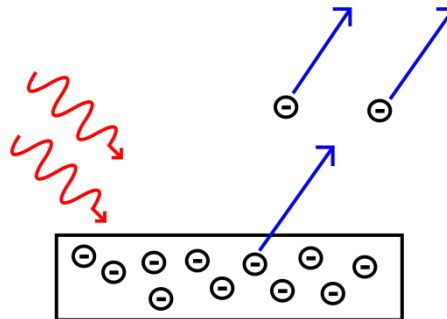
Wave impinges on a broad slit



Wave impinges on a narrow slit



partícula



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.

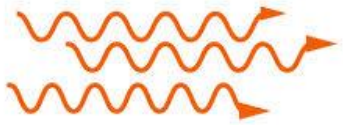
En 1905 Einstein introdujo la idea de **foton**: partícula, sin masa en reposo, que lleva cantidad de movimiento y una energía  $E=h\nu$



# Dualidad onda-partícula



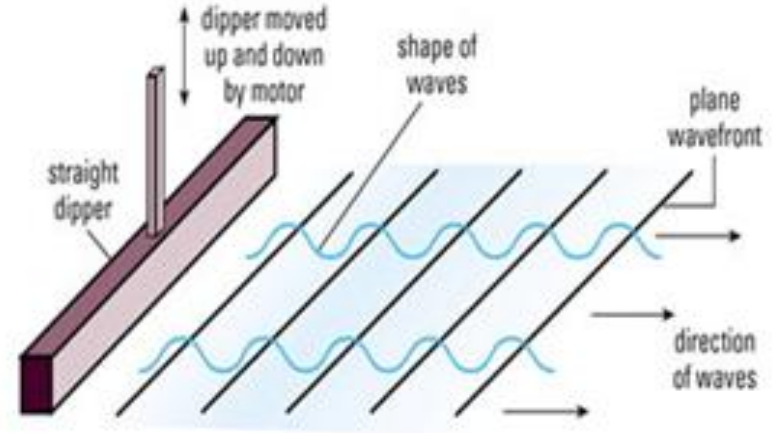
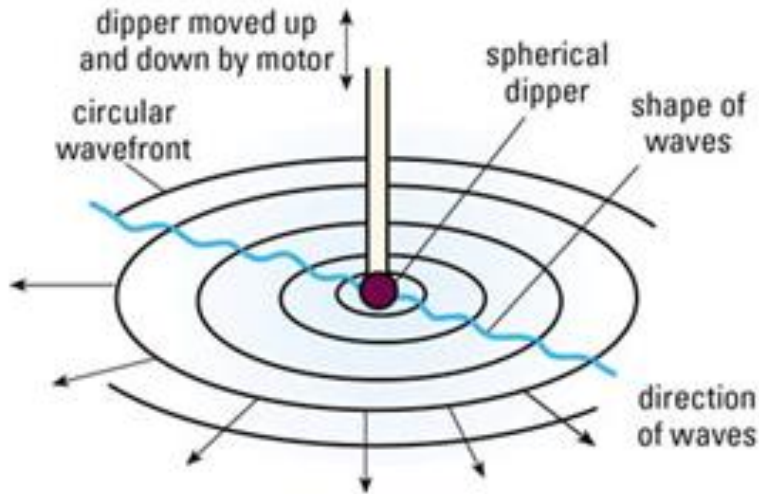
- I. La realidad es que la naturaleza de la luz **no encaja** precisamente en el concepto de onda ni en el de partícula.
- II. La luz es otra cosa.
- III. Sin embargo, como nos sentimos cómodos con dichos conceptos (son los que el lenguaje de la física viene usando con éxito desde siempre) podemos utilizar 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...



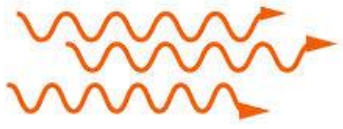
# Teoría ondulatoria



Para Huygens la luz es una onda



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

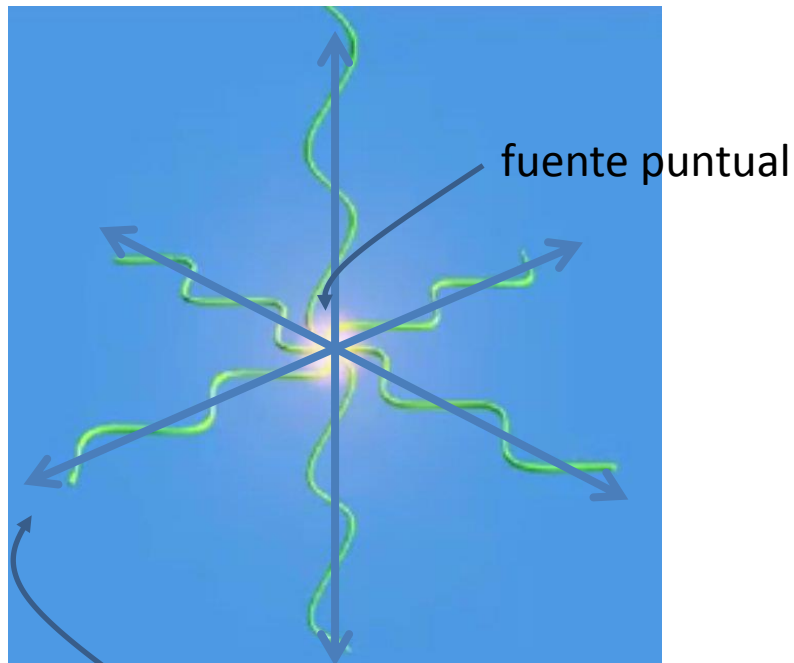


# Teoría ondulatoria

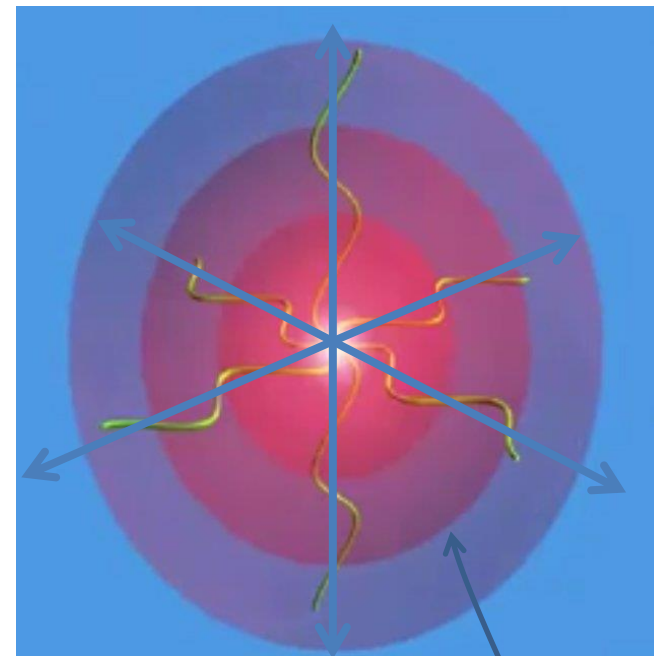


Onda esférica en 3 dimensiones:

Perfil de perturbaciones que se propaga en el espacio (qué es lo que se propaga en el caso de la luz?)



direccion de propagación (rayo)

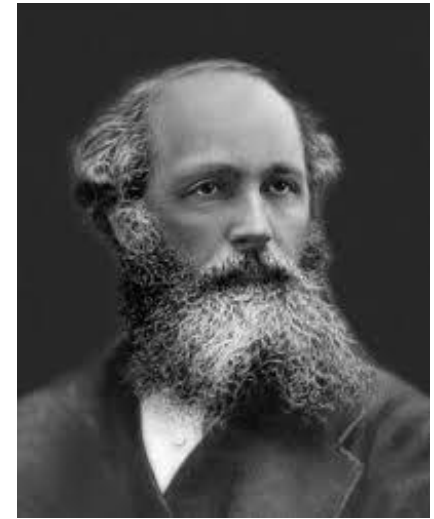


frente de onda



# 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

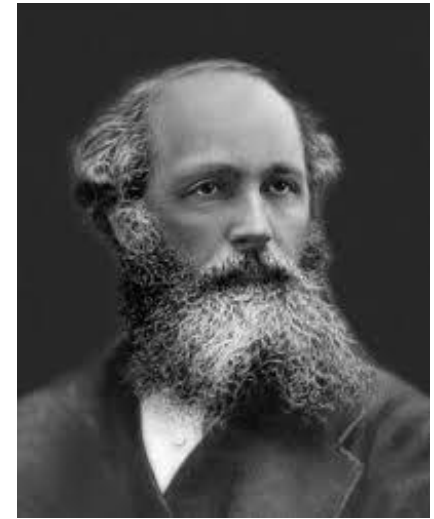
|             |                                                                                                      |                       |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|             |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

Hay un teorema matemático (teorema fundamental del calculo vectorial, o teorema de Helmholtz) que dice que el rotor y la divergencia de un campo lo determinan unívocamente.



# 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

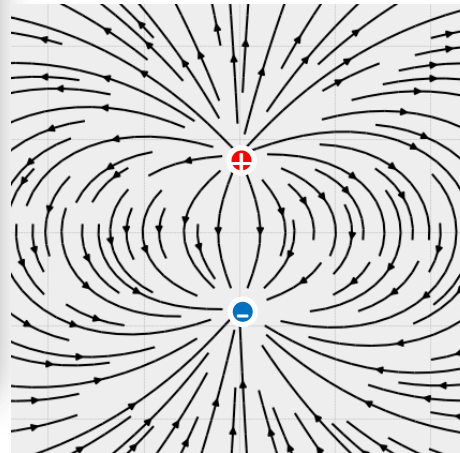
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

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

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

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

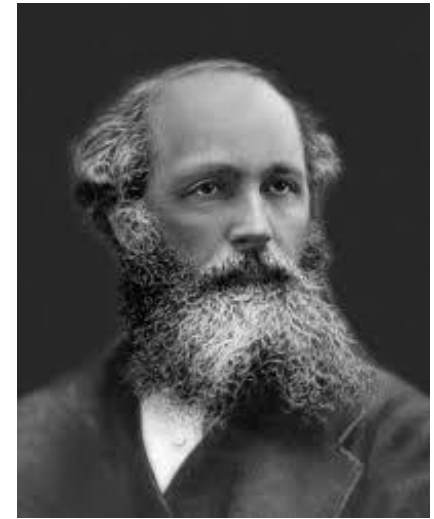


Muy relacionado con Gauss:

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

# 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

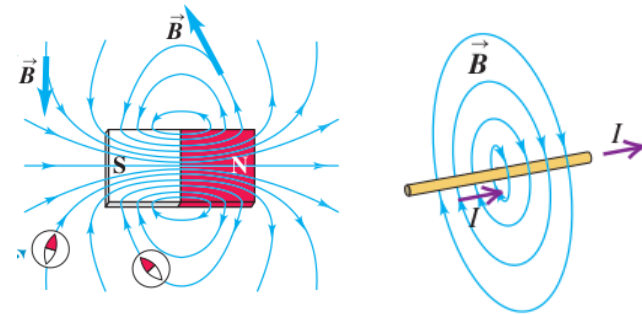
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

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

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

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

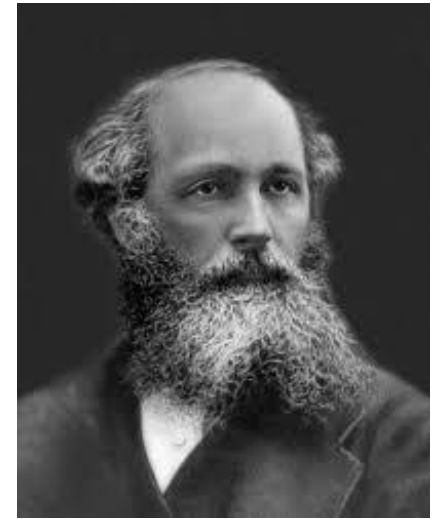


$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0$$

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

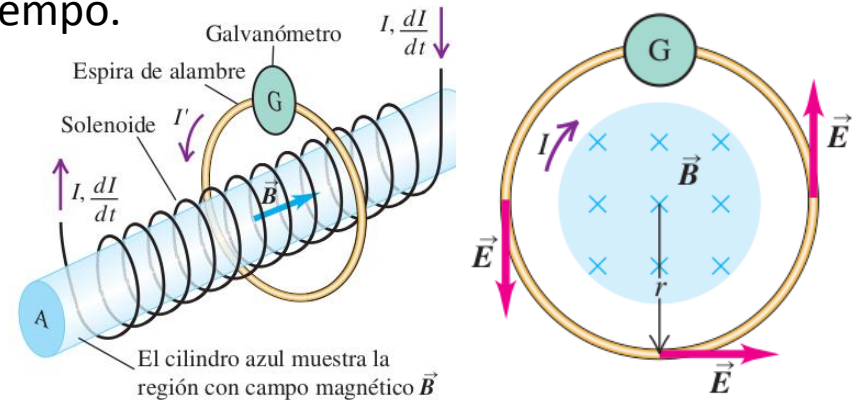
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

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

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

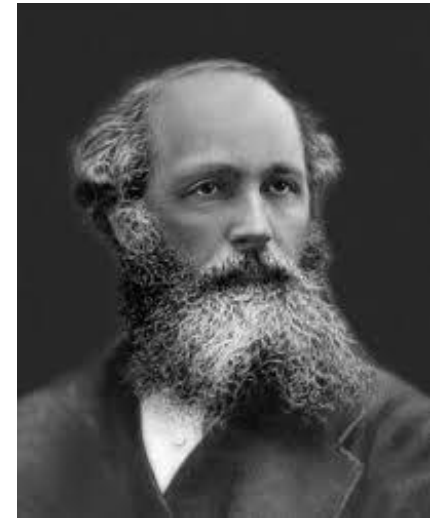
Faraday: Hay **rotor** de  $\mathbf{E}$  en los puntos donde haya un campo magnético  $\mathbf{B}$  que varía en el tiempo.



$\mathbf{E}$  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.



James Maxwell

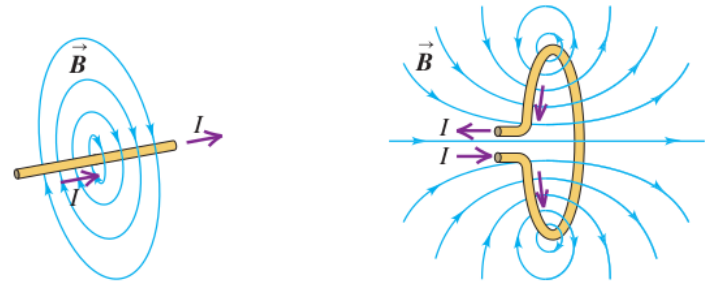
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

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

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

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.
- Para el caso estático las ecuaciones para E y B quedaban desacopladas. La electrostática resultaba un fenómeno independiente de la magnetostática y podían estudiarse por separado.

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

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

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

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

# 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.
- Para campos dependientes del tiempo, 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  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$  Maxwell se dio cuenta que:

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

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

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

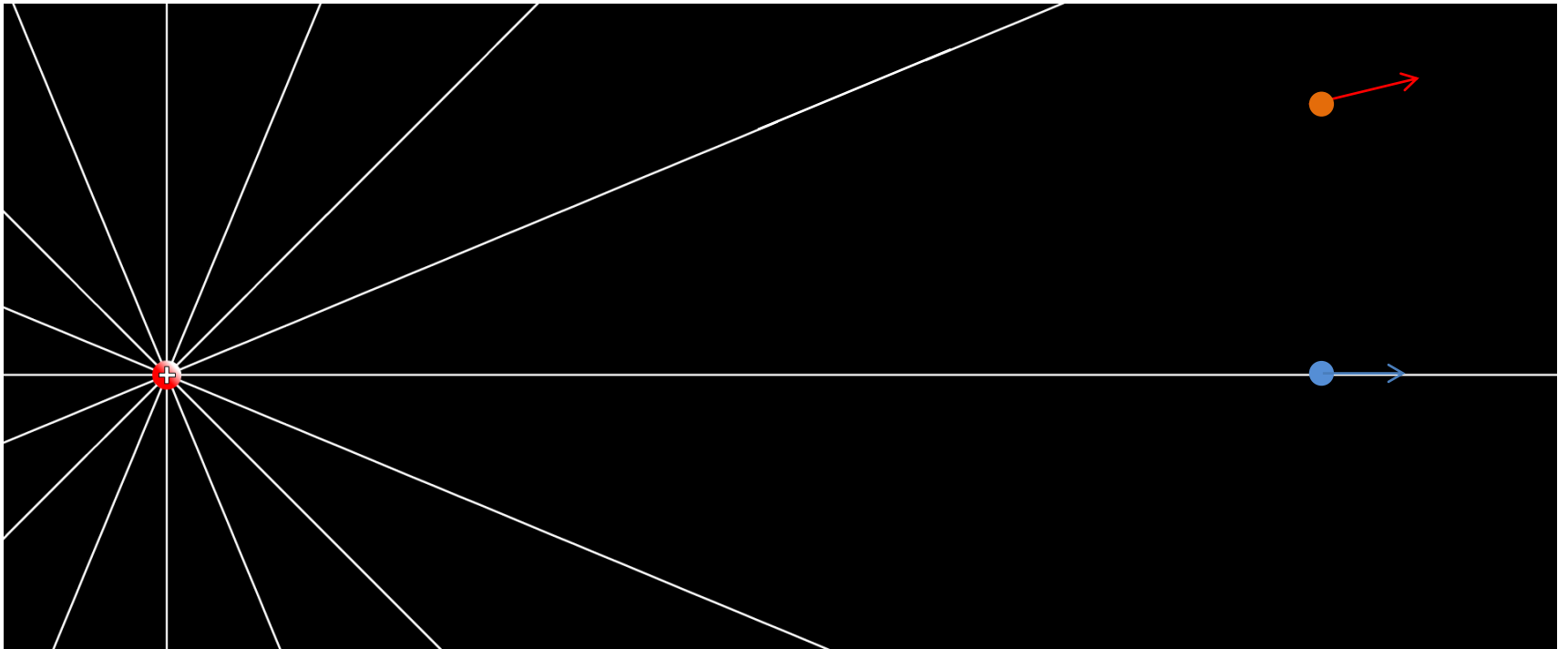
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

“...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

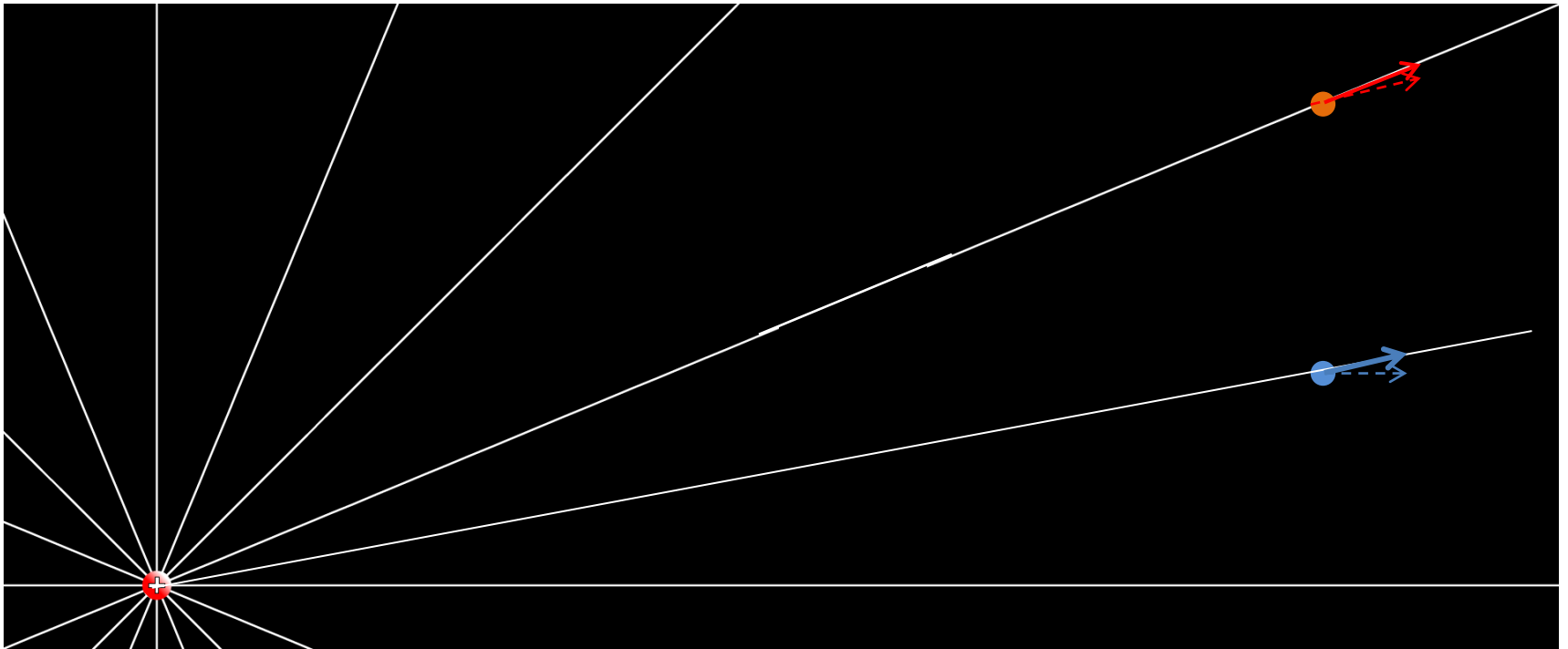
$t=0$



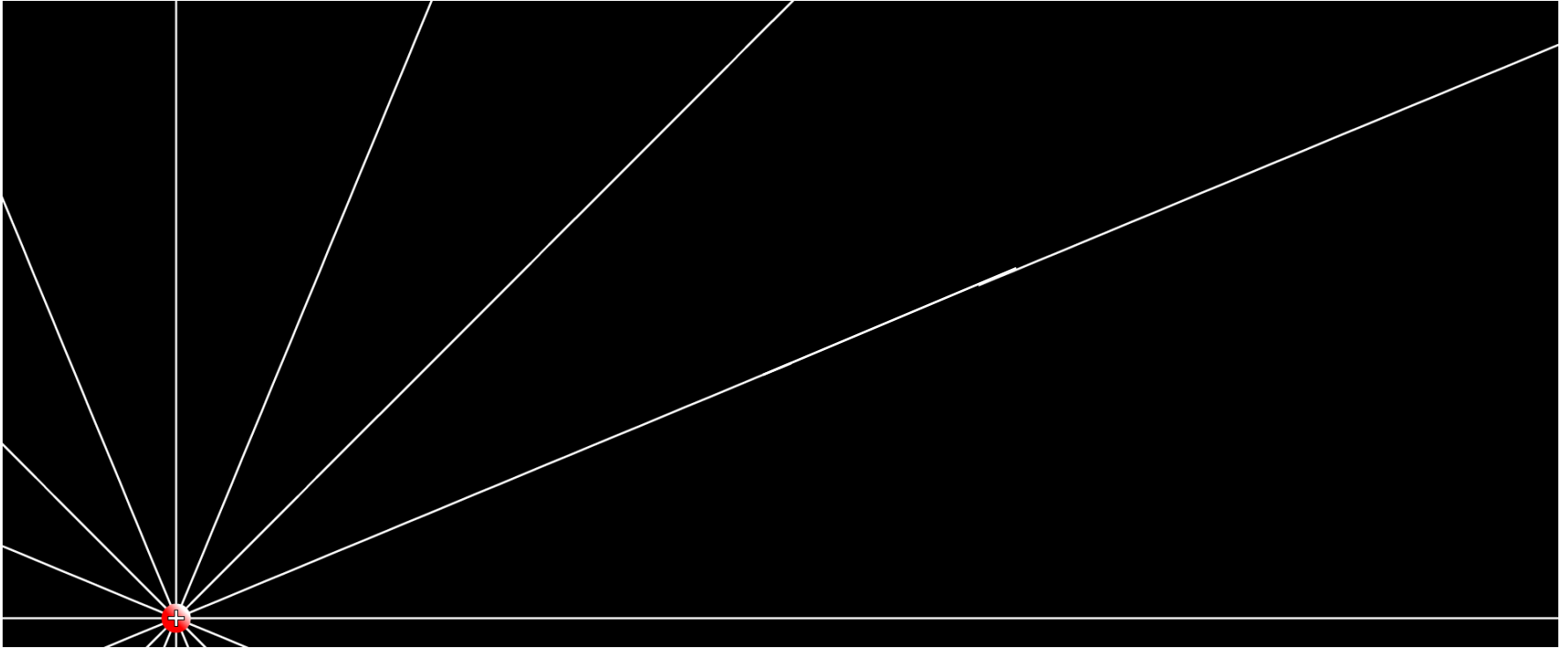


# Origen de ondas EM

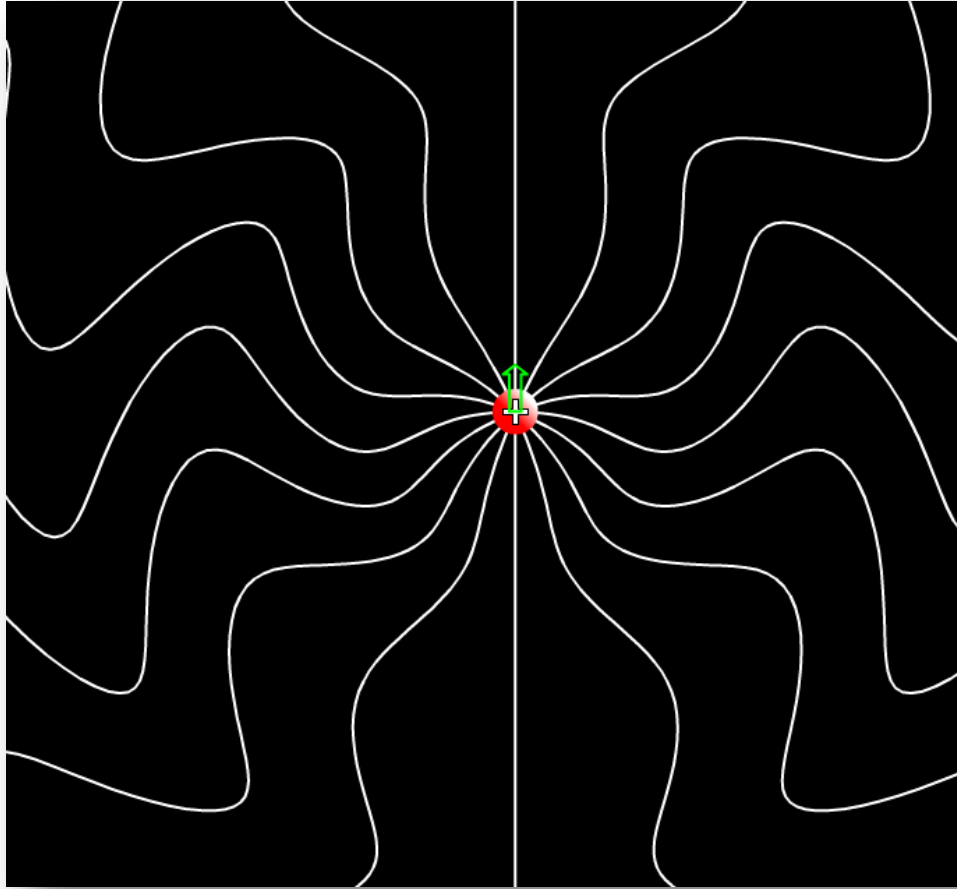
$t_1 > 0$



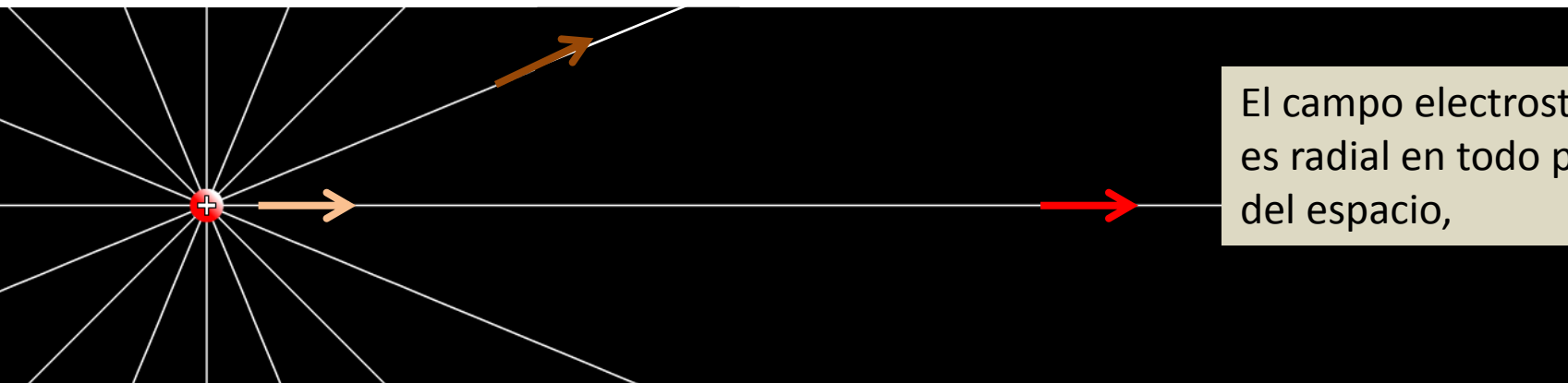
# Origen de ondas EM



# Lets move it...

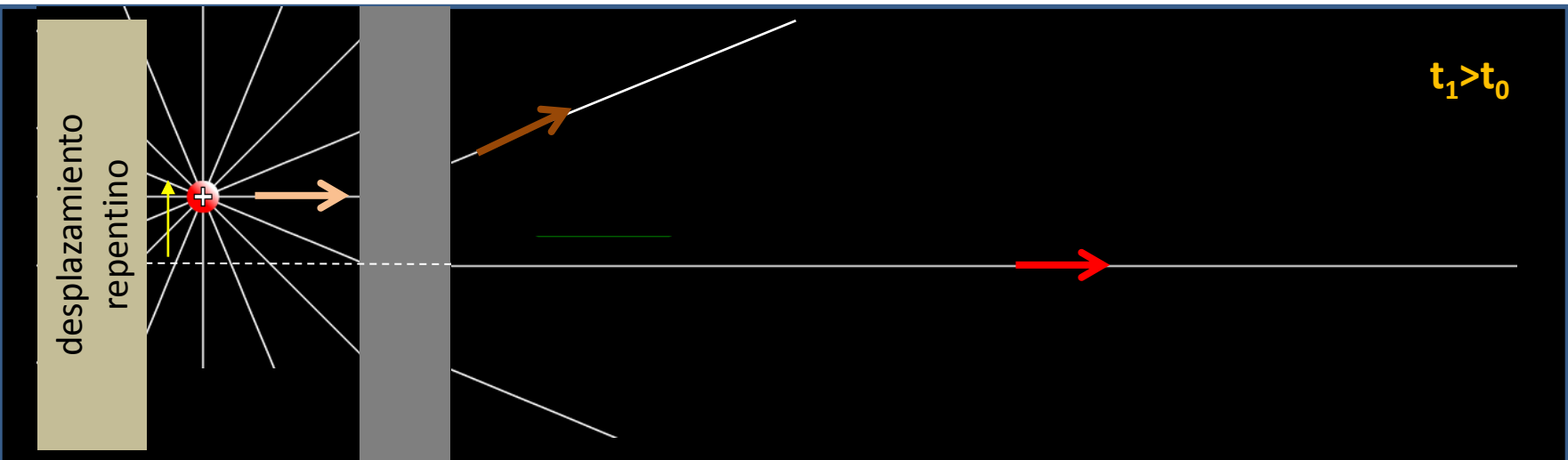


[https://phet.colorado.edu/sims/radiating-charge/radiating-charge\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/radiating-charge/radiating-charge_en.html)



El campo electrostático es radial en todo punto del espacio,

Desplazamiento repentino a tiempo  $t_0$

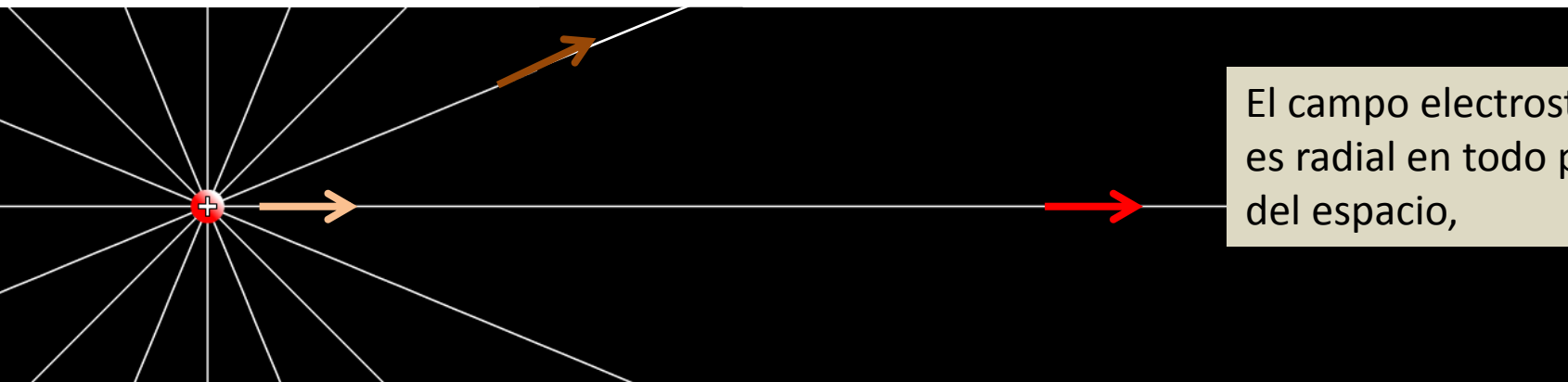


$t_1 > t_0$

Region cercana

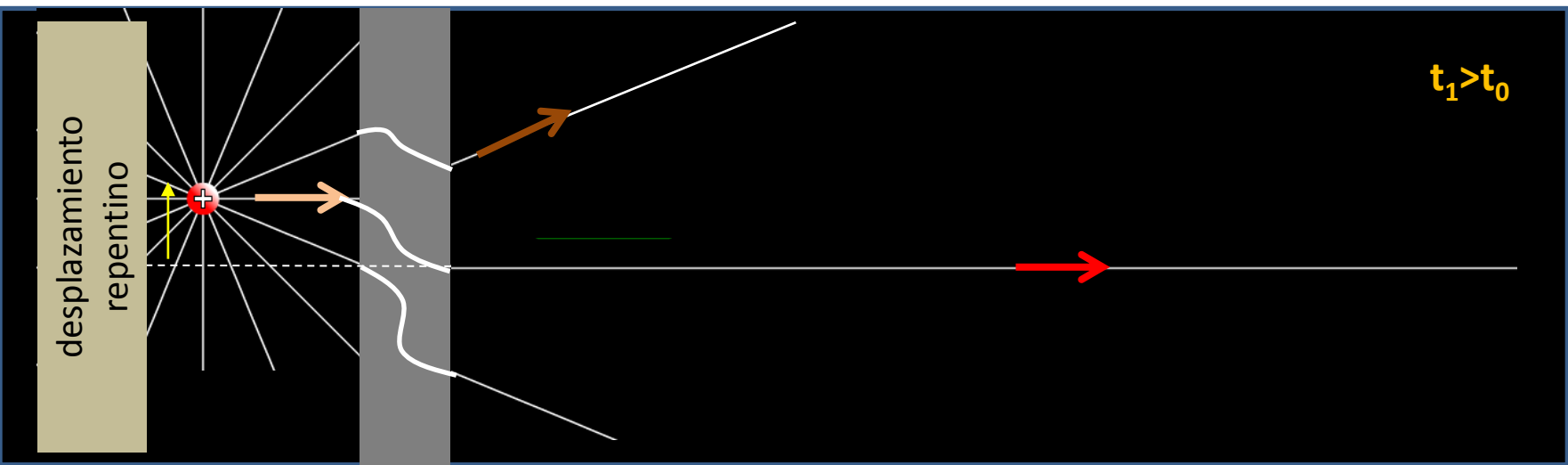
Region 'lejana'

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  $t_0$

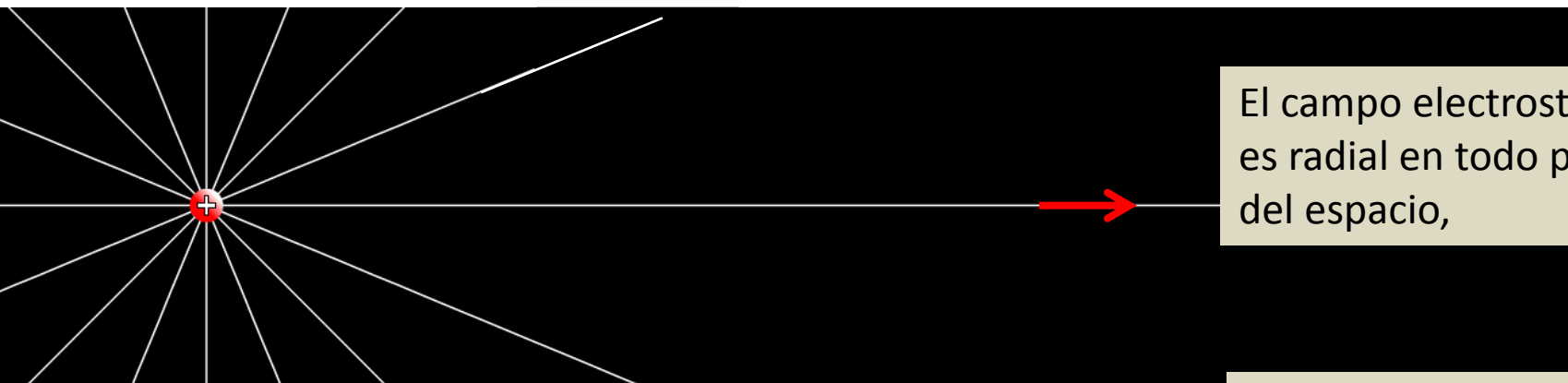


Region cercana



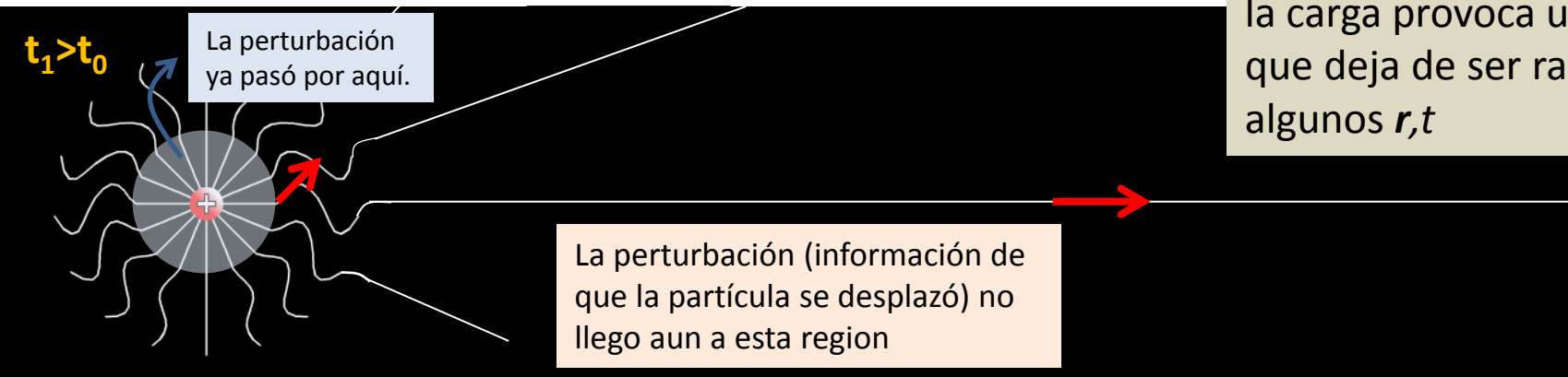
Region 'lejana'

Region Intermedia que va 'viajando'

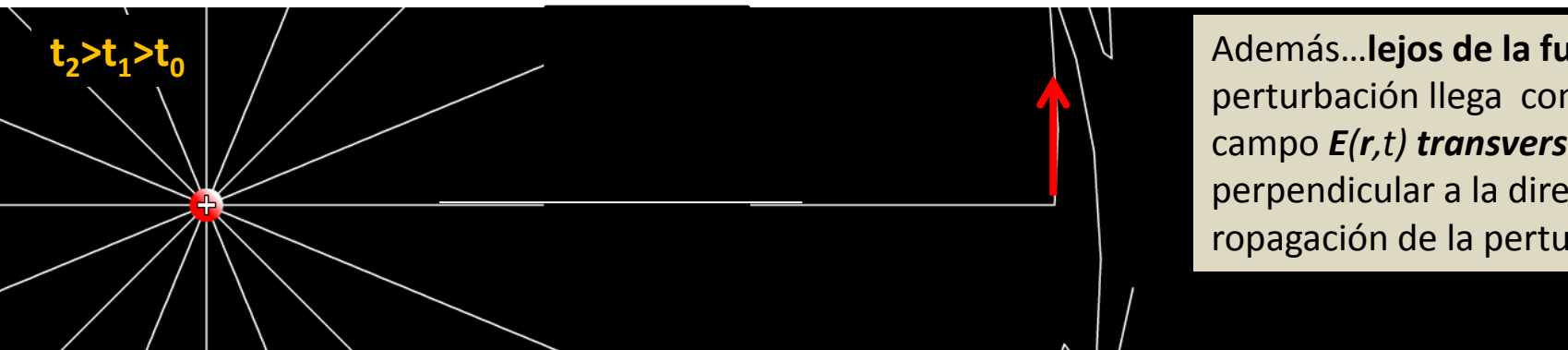


El campo electrostático es radial en todo punto del espacio,

**Sacudon (subida y bajada) a tiempo  $t_0$**

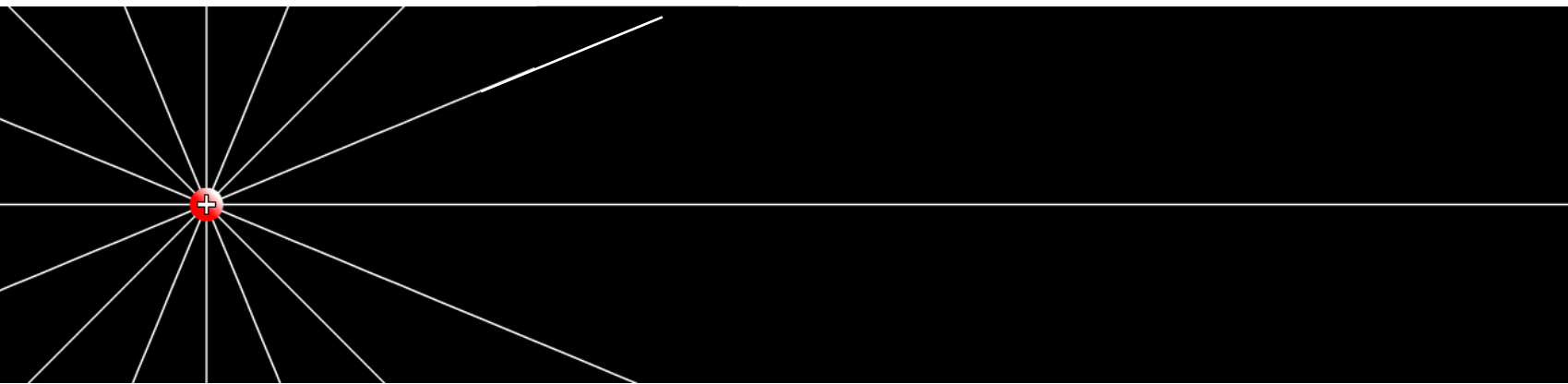


El repentino sacudón de la carga provoca un  $E(r,t)$  que deja de ser radial en algunos  $r,t$

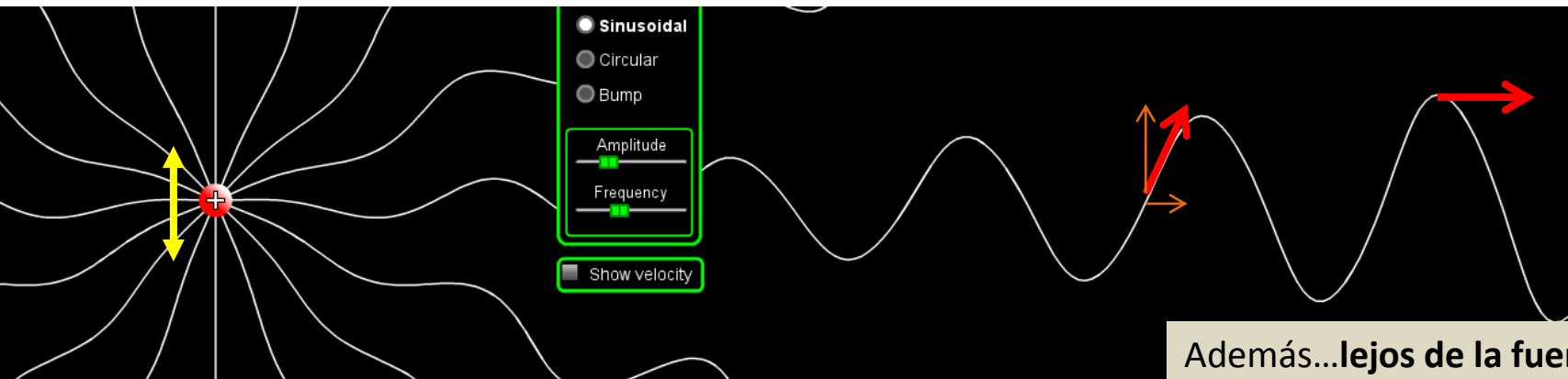


Además...**lejos de la fuente** la perturbación llega como campo  $E(r,t)$  **transversal** (i.e perpendicular a la dirección de ropagación de la perturbación)

**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)

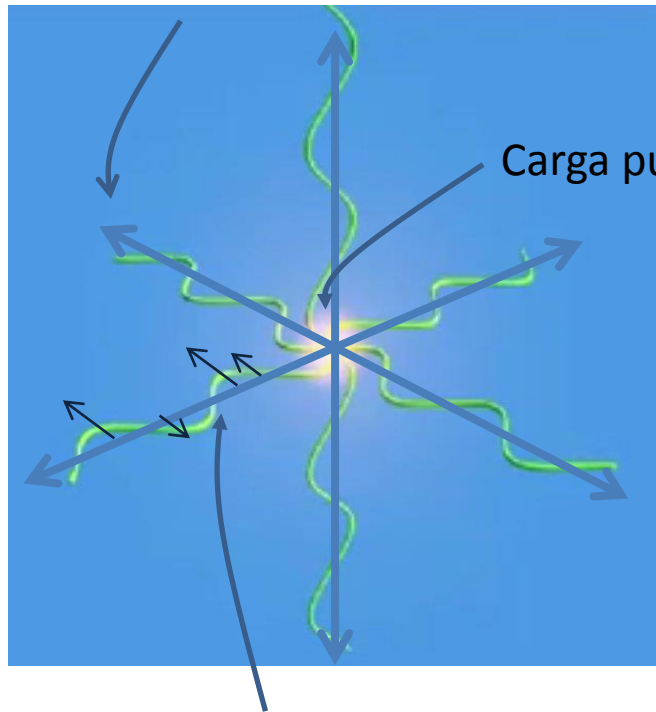
El **campo de radiación** (el que viaja y llega lejos) es **perpendicular** a la **dirección de propagación**

# En serio...qué es la luz?

Descripción del campo perpendicular

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

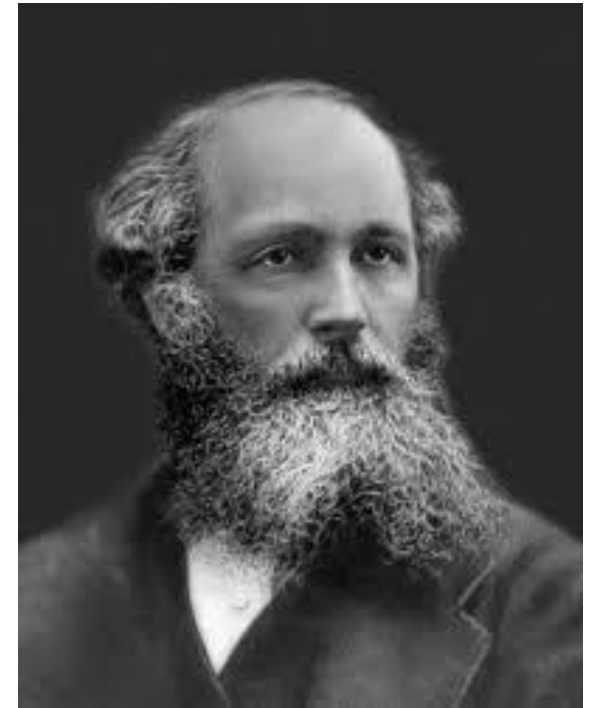
direccion de propagación (rayo)



Carga puntual **acelerada**

direccion 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...”

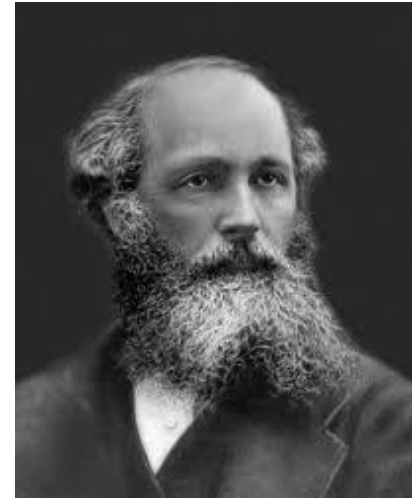
\*  $c = 300000 \text{ km/s}$



# Espectro electromagnético

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

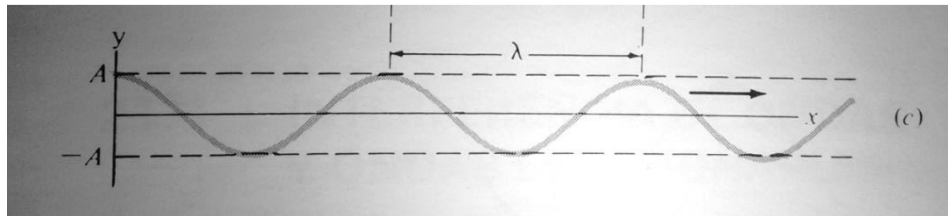
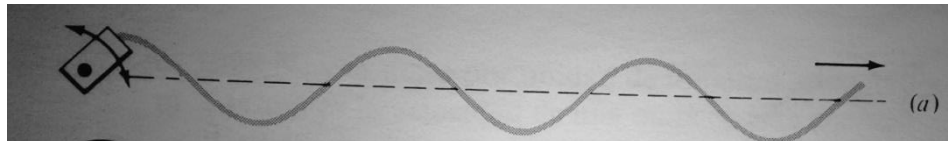
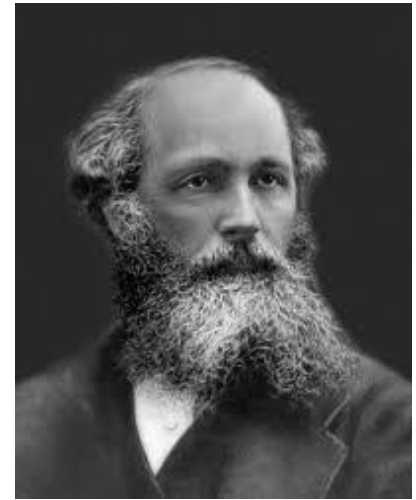
$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx - w t + \varphi_0)$$



# Espectro electromagnético

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

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



$$\cos(kx) = \cos(k(x + \lambda))$$

Periodicidad espacial

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

Long de onda  
(periodo espacial)

Nro de onda

Periodicidad Temporal

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

Periodo temporal

Frecuencia

Conexión dominio  
temporal y espacial

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

(pip, pip, pip,...)

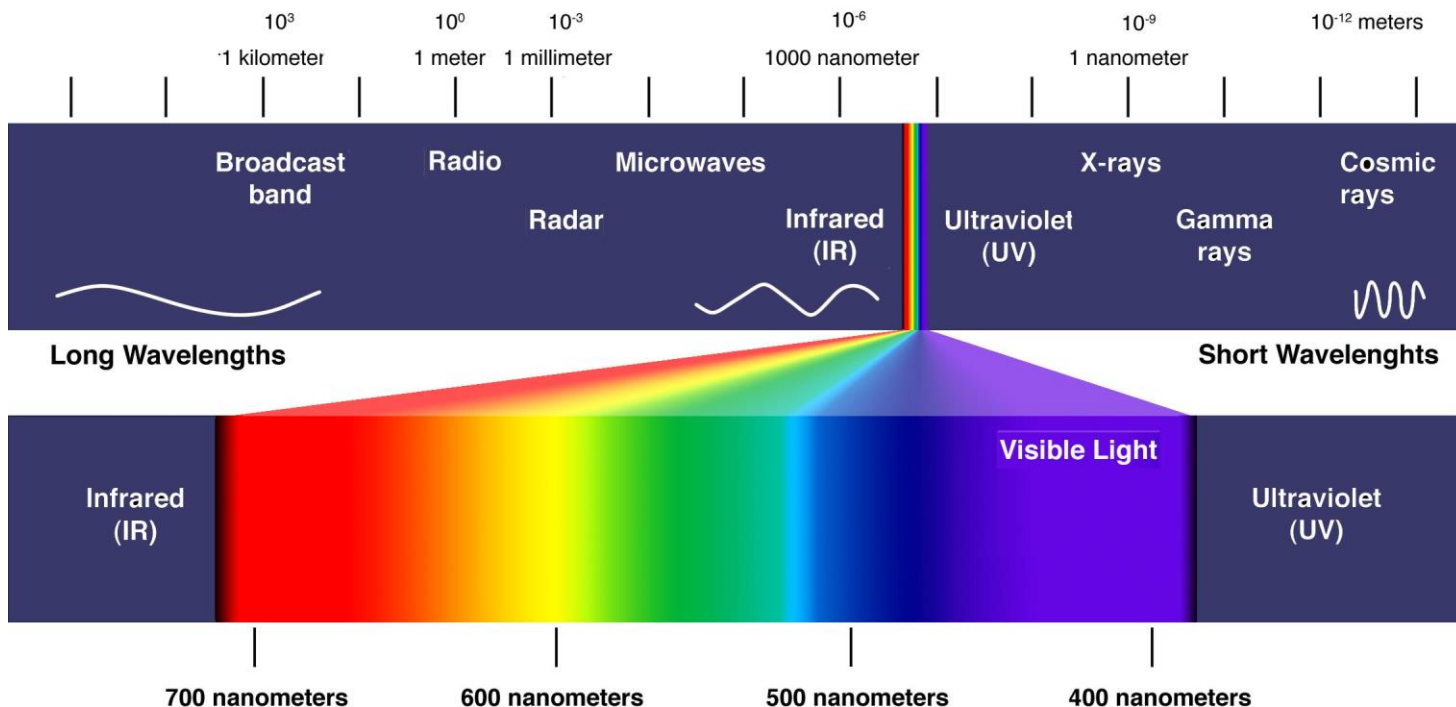
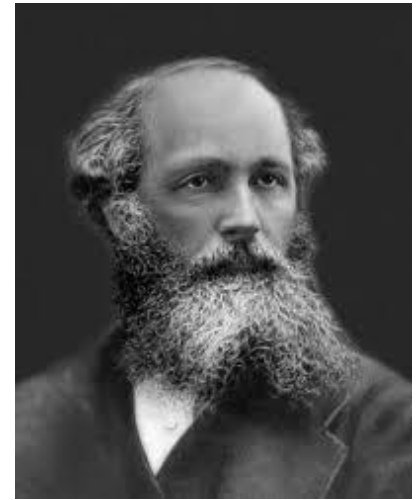
Fase inicial

$$\varphi_0$$

# Espectro electromagnético

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

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

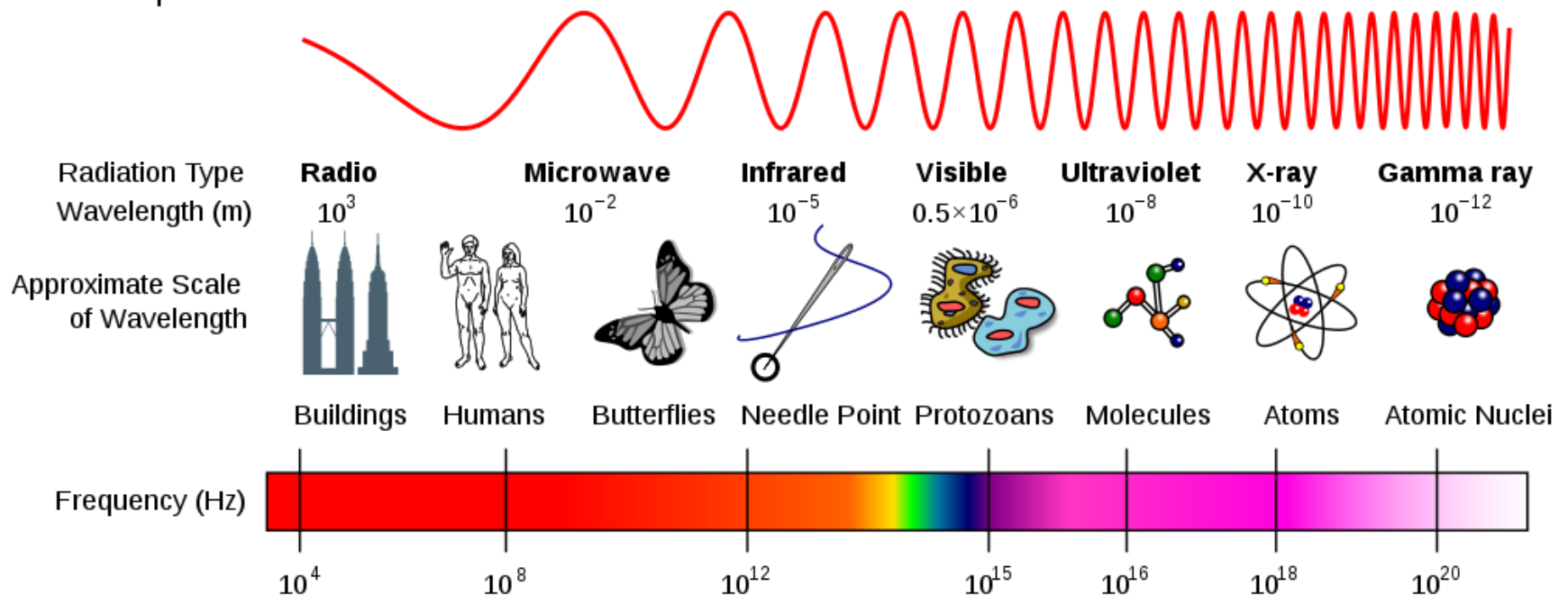
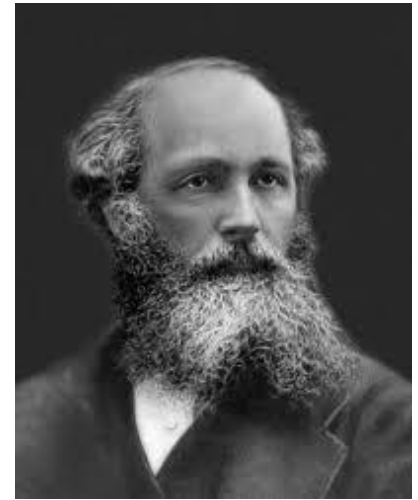


$$c = \lambda f$$

# Espectro electromagnético

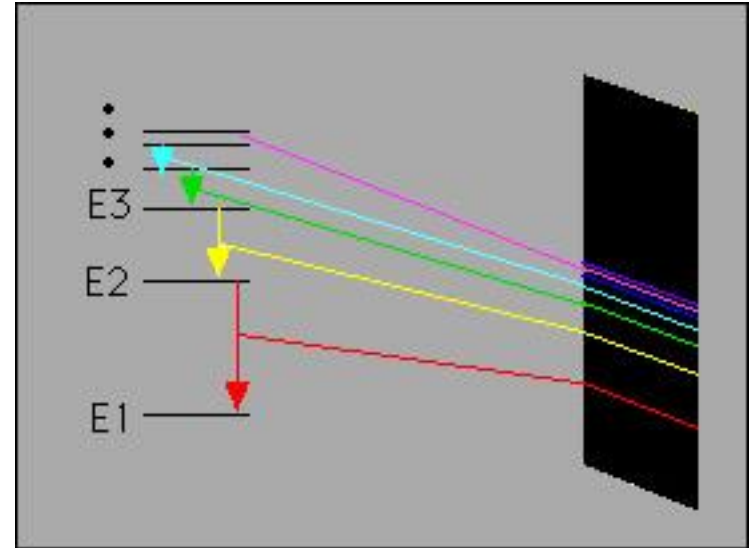
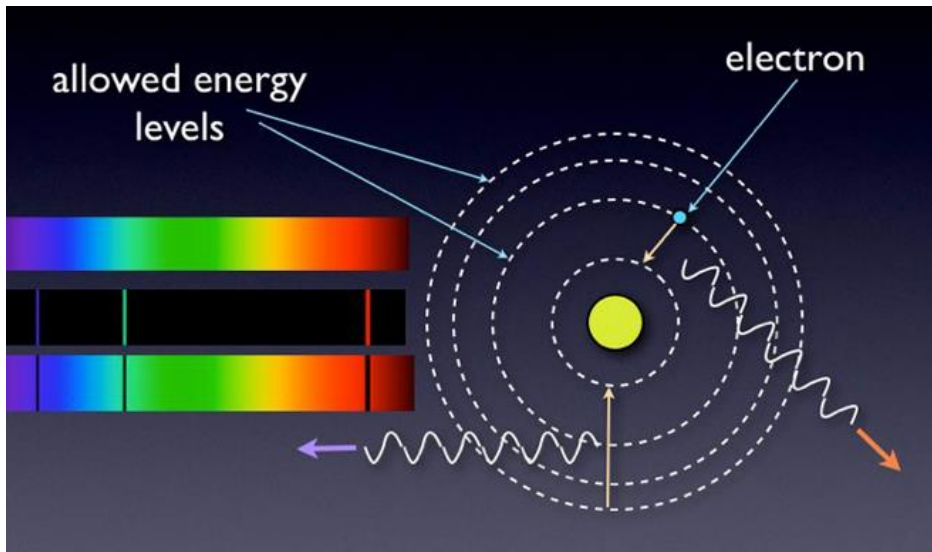
Descripción matemática de la onda que se propaga  
(la vamos a ver en detalle más adelante)

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



$$c = \lambda f$$

# 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):

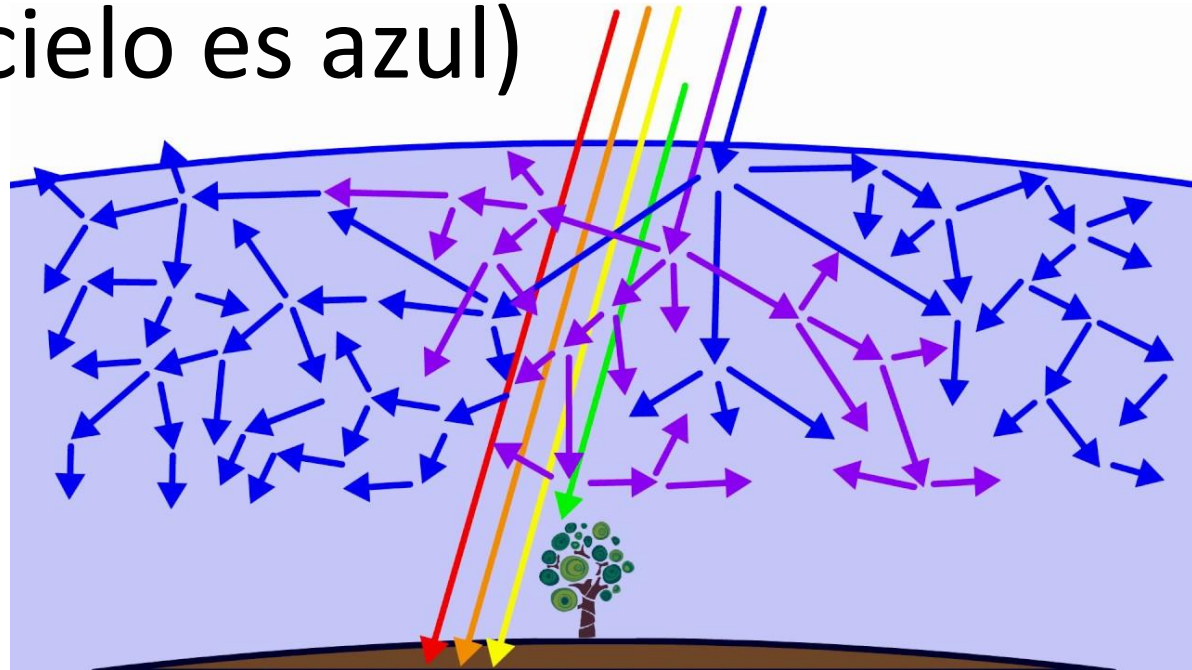
$$\Delta E = hf$$

# 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:

