

Ondas EM Planas



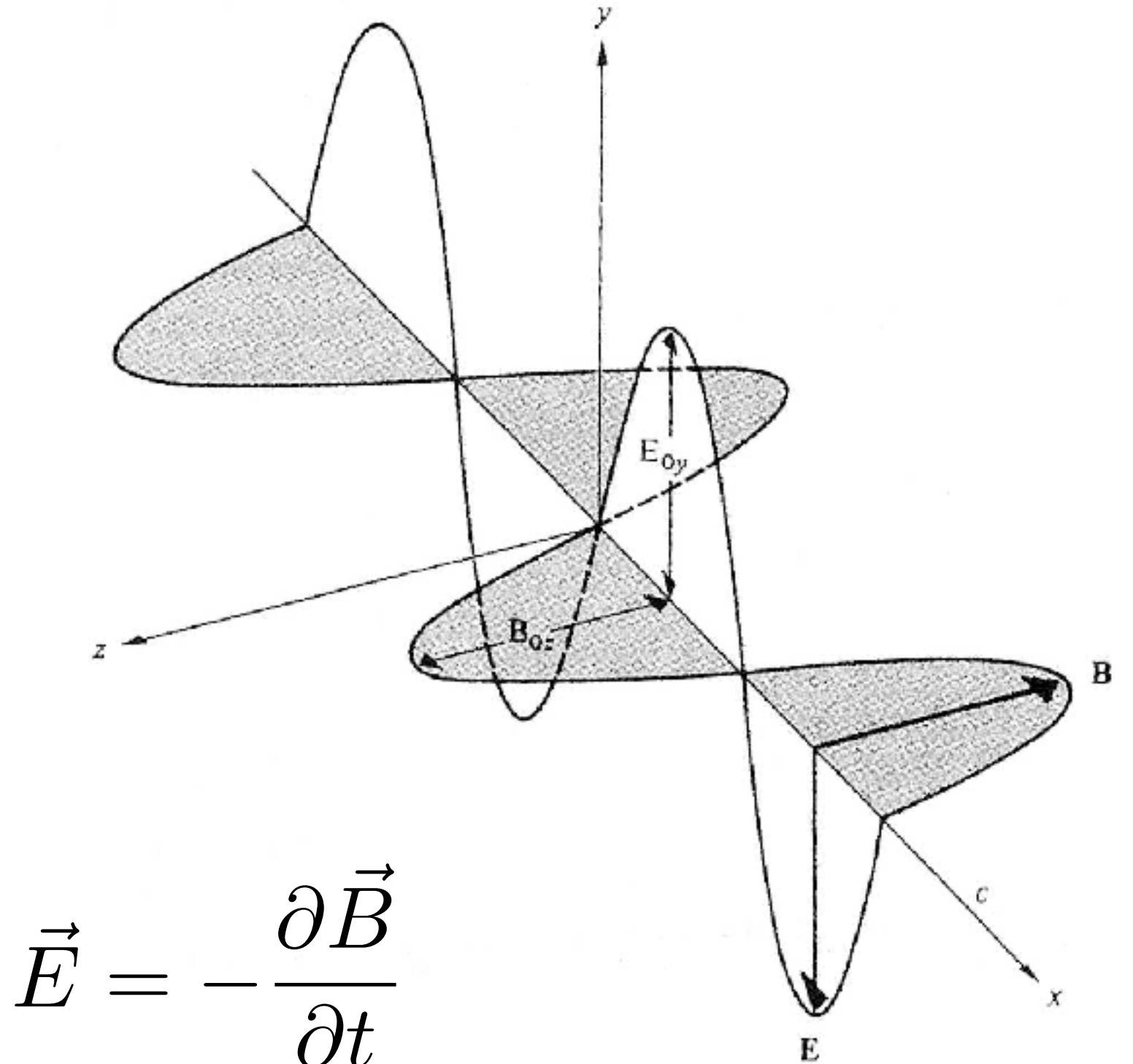
Solución de ondas planas,
Triedro E,B y k

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

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

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

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



Física General IV

Maximiliano A. Rivera Urrejola
Departamento de Física UTFSM

Ondas Electromagnéticas (OEM) en el vacío

Una **consecuencia** profunda, producto de la existencia de la **corriente de desplazamiento** es que, tanto campo Eléctrico como Magnético se pueden propagar como Onda

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

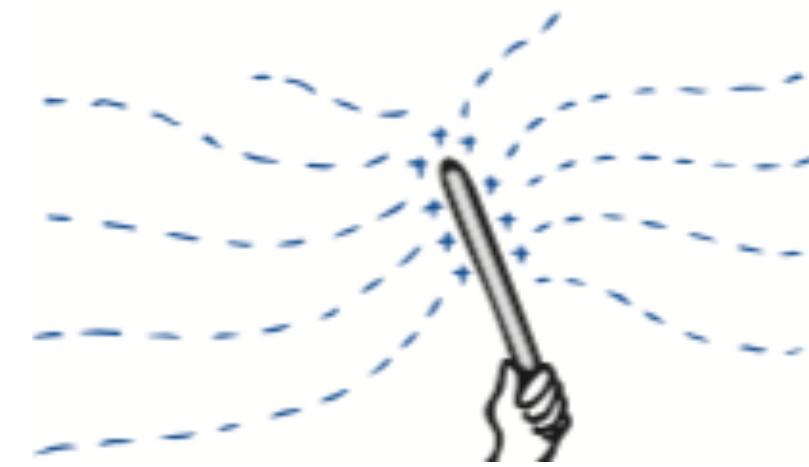
Maxwell notó que la permeabilidad y permitividad se **relacionan** con la **velocidad de propagación de una onda EM**.



James C. Maxwell (1831-1879)

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$$

Al mover una carga en el espacio, generamos corriente



Debido a la inducción EM y la conservación de la Energía, **las OEM mantienen una rapidez constante**.

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

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

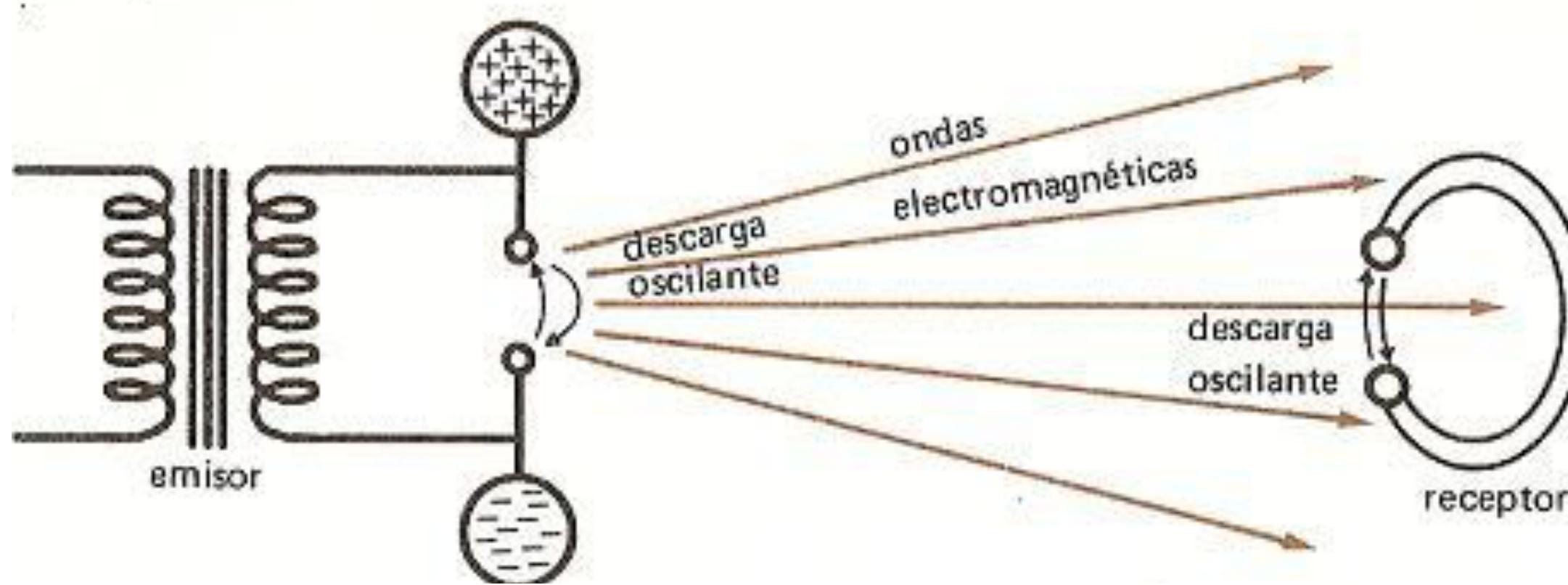
Solo con esta rapidez, el campo E y el B mantienen un equilibrio, reforzando el uno al otro mientras portan energía por el espacio

Ondas Electromagnéticas (OEM) en el vacío

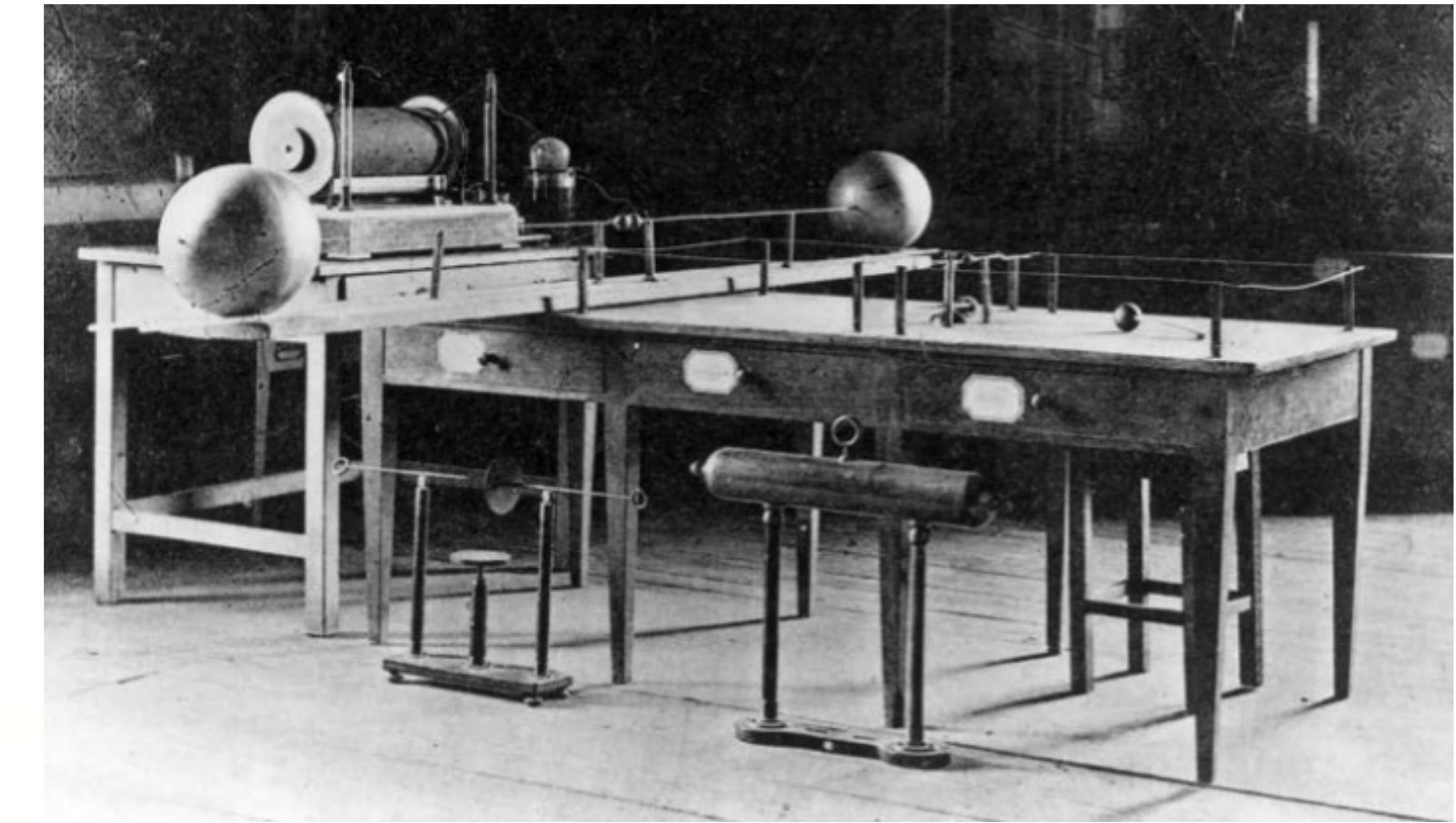


Demostración experimental de la existencia de OEM, por H. Hertz en 1888

Heinrich R. Hertz (1857-1894)



Esquema del experimento de Hertz



Arreglo de la época, en que H. Hertz realizó la medición

Ondas Electromagnéticas (OEM) en el vacío

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Matemáticamente

$$u(\vec{x}, t) = a e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$$

Campos E y B

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$$

Reemplazando en las ecuaciones de Maxwell

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

$$\vec{k} \cdot \vec{E}_0 = 0$$

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

$$\vec{k} \cdot \vec{B}_0 = 0$$

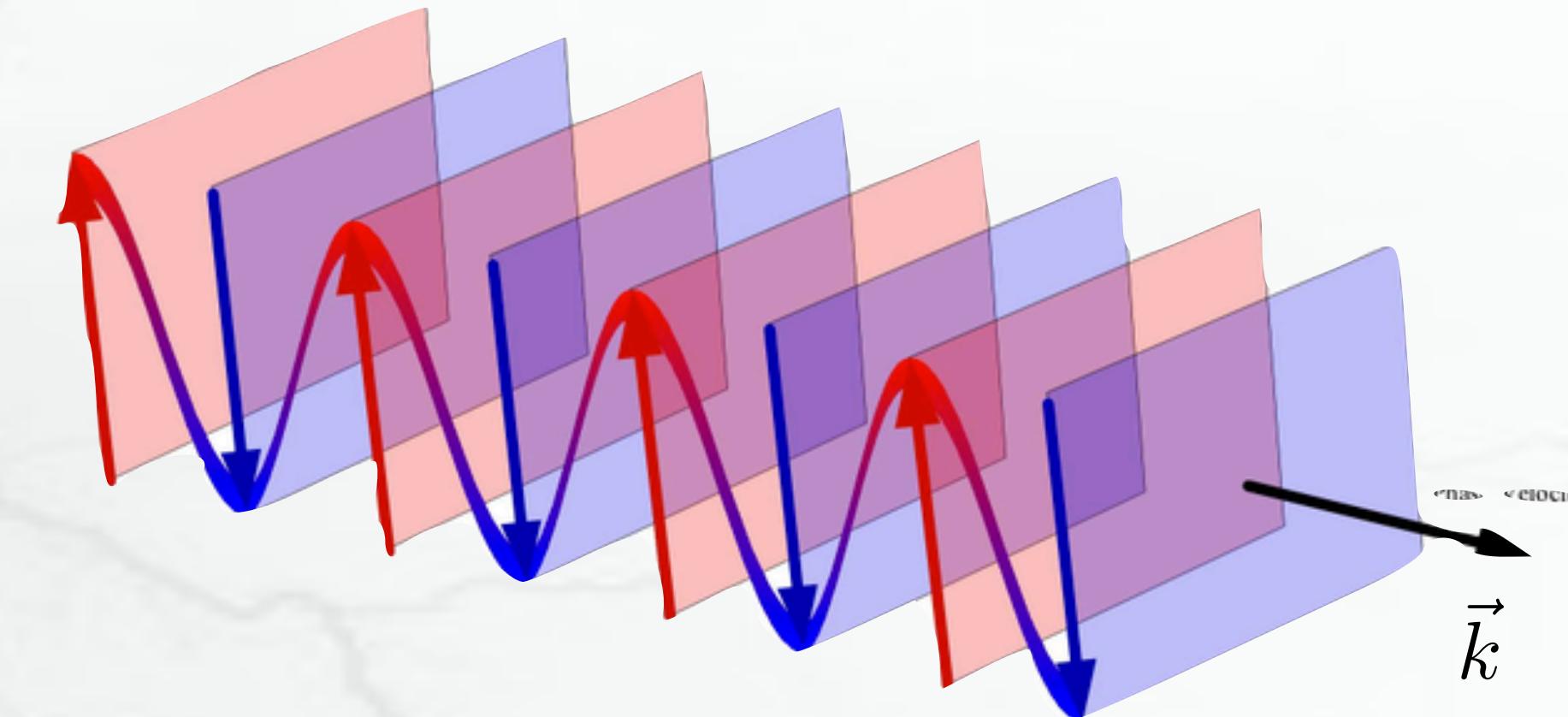
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{k} \times \vec{E}_0 - \omega \vec{B}_0 = \vec{0}$$

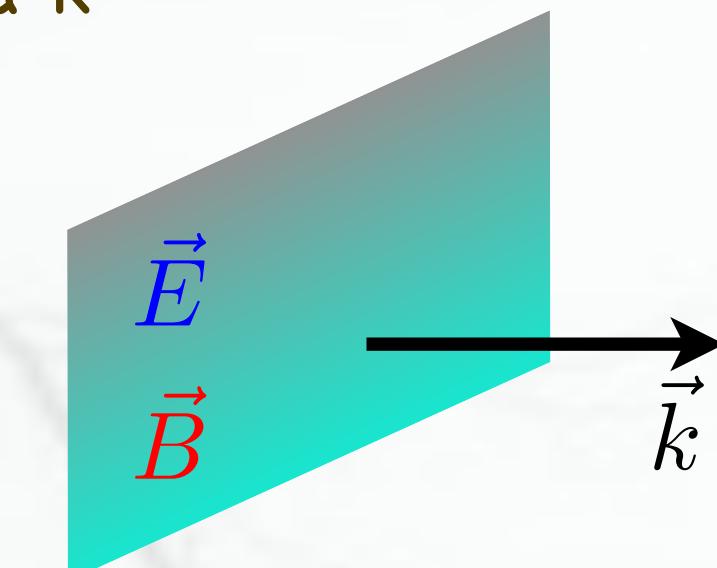
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{k} \times \vec{B}_0 + \omega \mu_0 \epsilon_0 \vec{E}_0 = \vec{0}$$

La solución de ondas planas



E y B son perpendiculares a k



Ondas Electromagnéticas (OEM) en el vacío

Ecuaciones de Maxwell

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

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

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

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

$$\vec{k} \cdot \vec{E}_0 = 0$$

$$\vec{k} \cdot \vec{B}_0 = 0$$

$$\vec{k} \times \vec{E}_0 - \omega \vec{B}_0 = \vec{0}$$

$$\vec{k} \times \vec{B}_0 + \omega \mu_0 \epsilon_0 \vec{E}_0 = \vec{0}$$

$$\vec{k} \perp \vec{E}$$

$$\vec{k} \perp \vec{B}$$

$$\vec{B}_0 = \frac{1}{\omega} \vec{k} \times \vec{E}_0$$

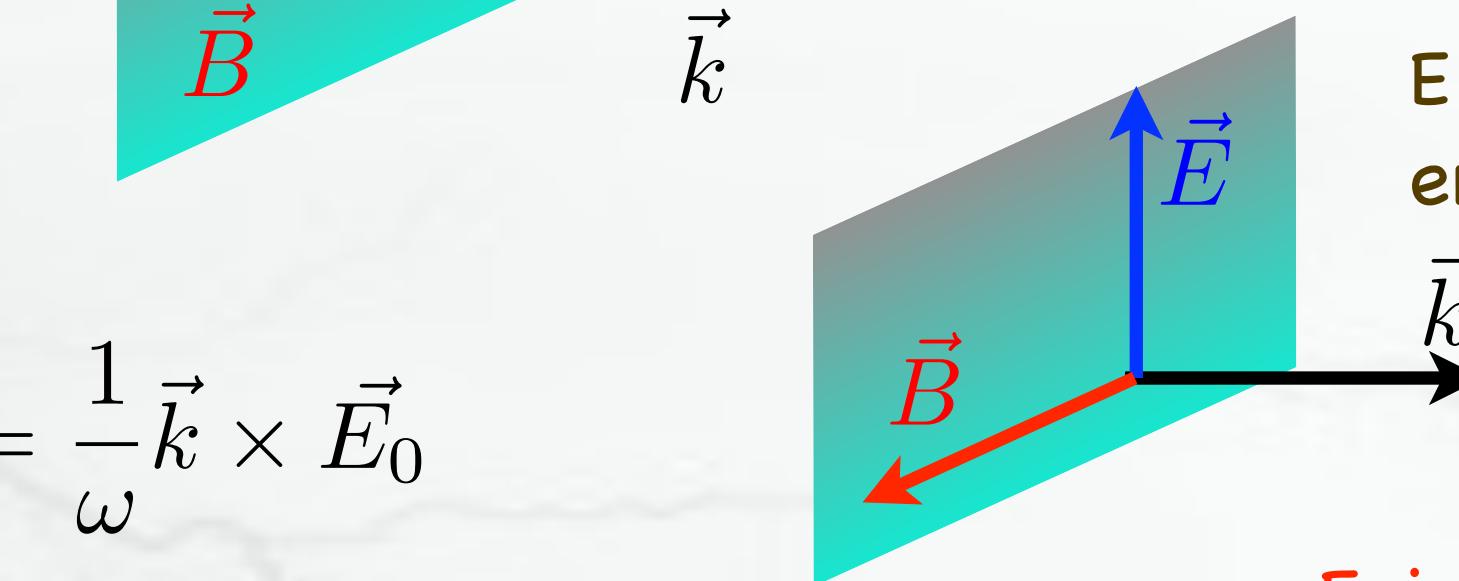
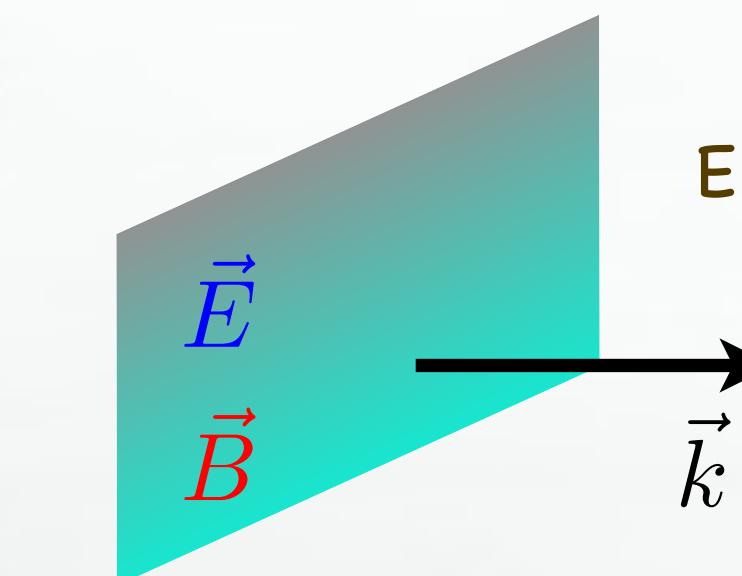
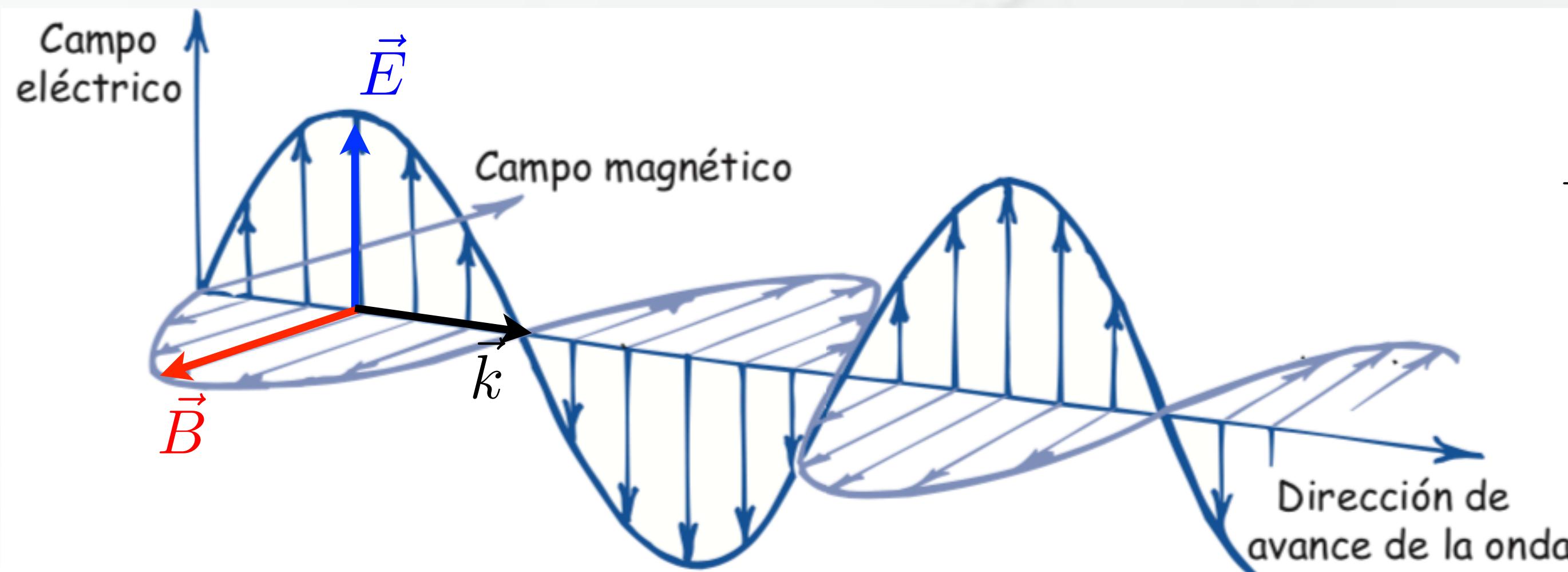
$$\vec{k} \times \left(\frac{1}{\omega} \vec{k} \times \vec{E}_0 \right) + \omega \mu_0 \epsilon_0 \vec{E}_0 = \vec{0}$$

\vec{E} y \vec{B} son perpendiculares a \vec{k}

\vec{E} y \vec{B} perpendicular entre si

Existe un grado de libertad para fijar el par \vec{E} y \vec{B} :

¡Polarización!



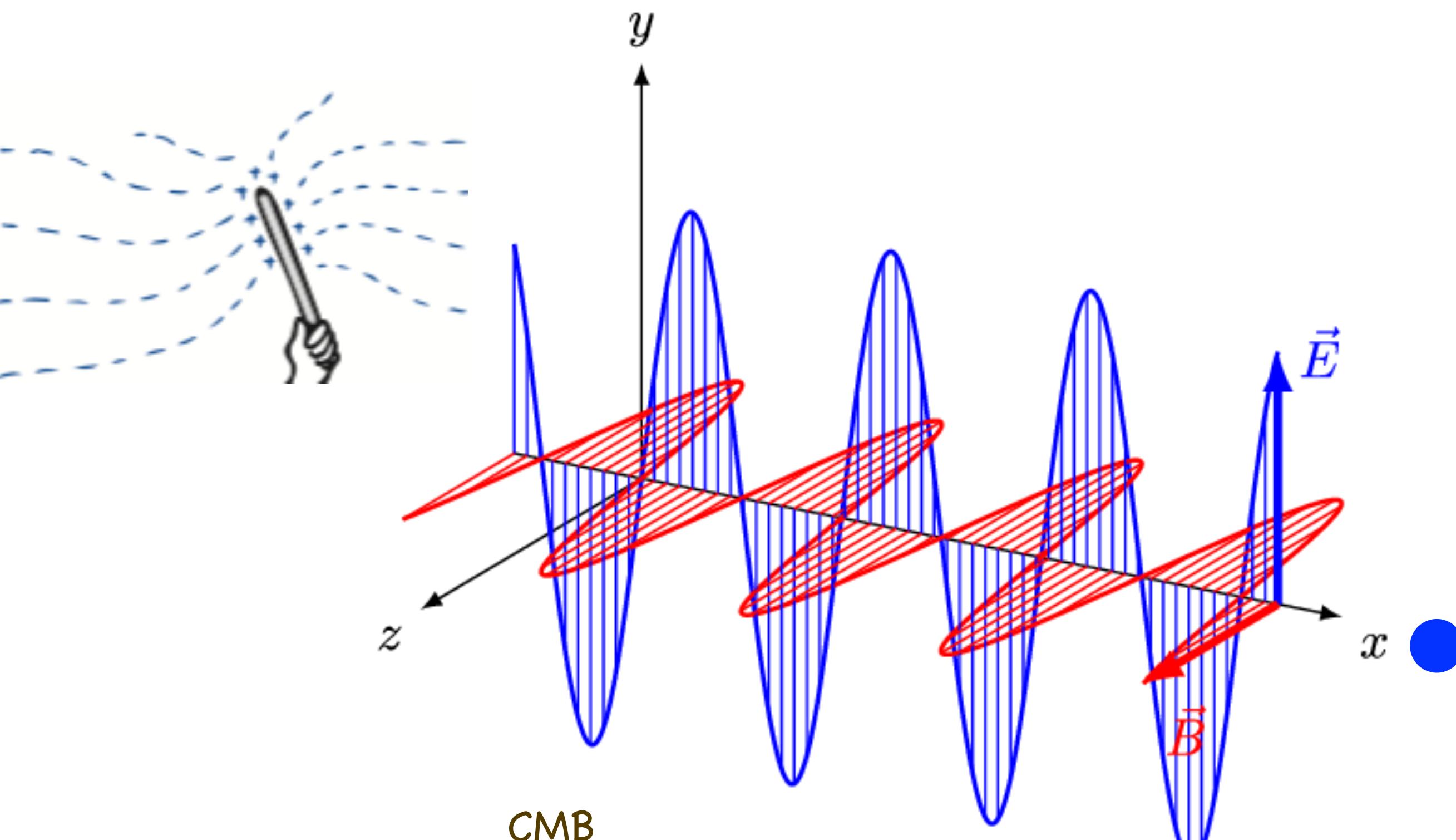
$$-\frac{\vec{k}^2}{\omega} \vec{E}_0 + \omega \mu_0 \epsilon_0 \vec{E}_0 = \vec{0}$$

$$\frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\frac{\omega}{k} = c$$

Velocidad de propagación de una OEM

¡OEM plana sobre una carga!



Proyecto OEM

Fuerza de Lorentz

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q(\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B}) = m \ddot{\vec{r}}_q$$

Newton

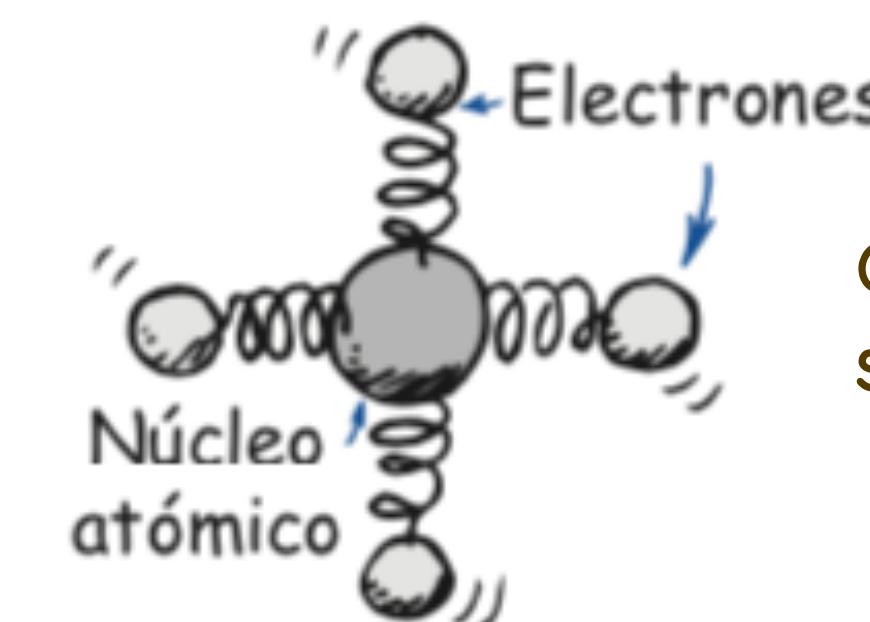
$$\frac{\omega}{k} = c$$

Relación entre E, k y B

$$\vec{B}_0 = \frac{1}{\omega} \vec{k} \times \vec{E}_0$$

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{E}|}{c}$$

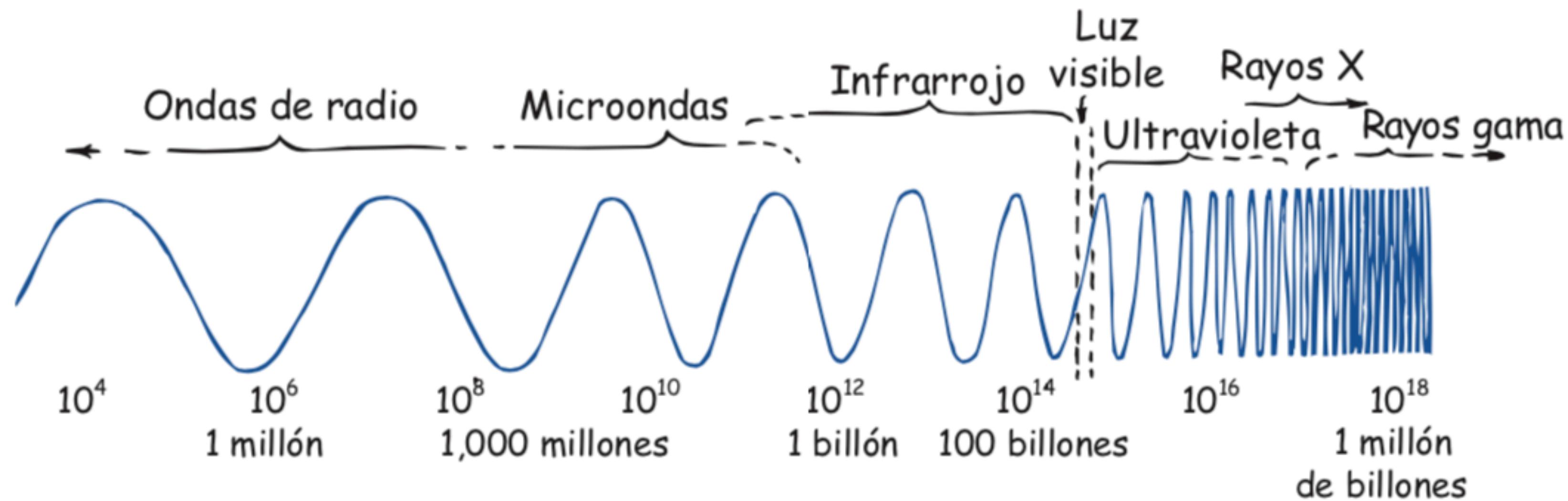
$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} \sim q \vec{E} \left(1 + \frac{|\vec{v}_q|}{c} \right)$$



Cargas vibrando en la superficie un átomo

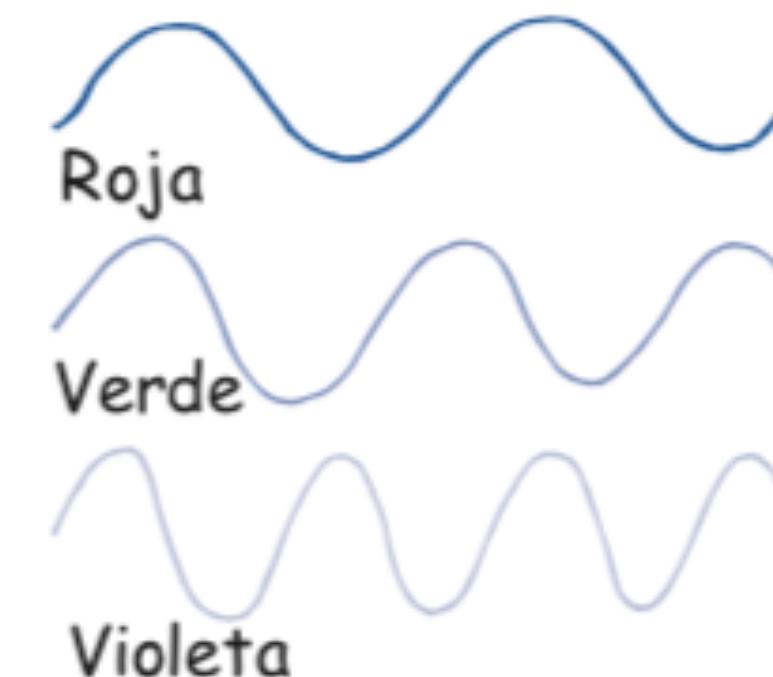
Espectro EM

La radiación EM recibe distintos nombres, dependiendo de su longitud de onda (i.e. frecuencia)



Ondas de Radio de muy baja frecuencia hasta Rayos Gamma de muy alta frecuencia.

El espectro visible corresponde a una pequeña región del espectro EM.



Ondas EM Planas



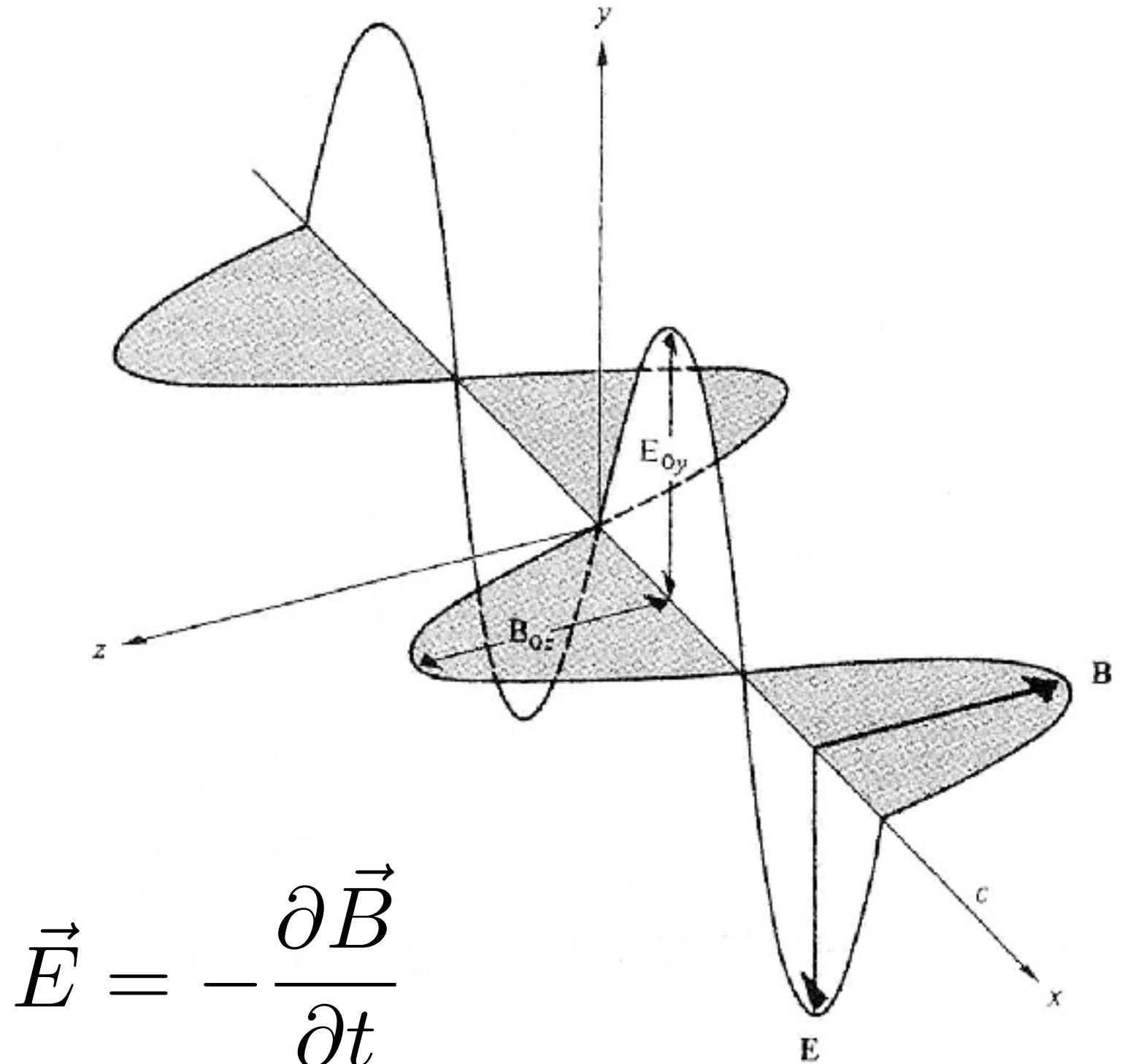
Solución de ondas planas,
Triedro E,B y k

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

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

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

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



Física General IV

Maximiliano A. Rivera Urrejola
Departamento de Física UTFSM