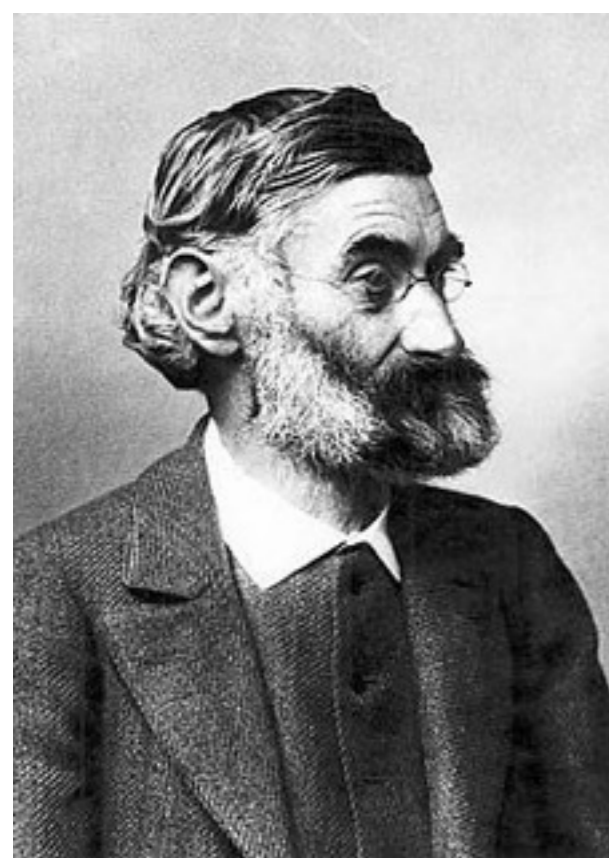


# **Introducción**

## **Breve historia de la luz**



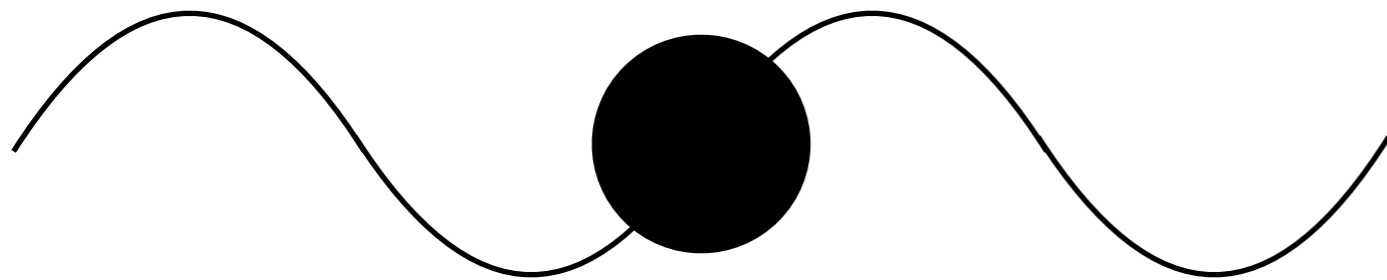


- Físico y óptico.
- Reformista social y creador de la Fundación Carl Zeiss.
- Estableció las bases de la óptica moderna y realizó contribuciones fundamentales al campo de la **microscopía**.

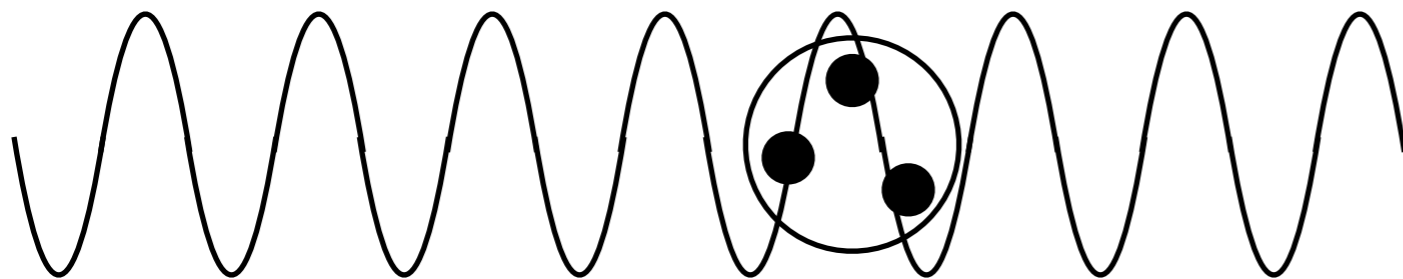


## Abbe (1840)

- Estudió la formación de imágenes en el microscopio y los límites de la **resolución microscópica**.



Si la longitud de onda de la luz es mucho mayor que un objeto no tendremos resolución suficiente para observar su estructura

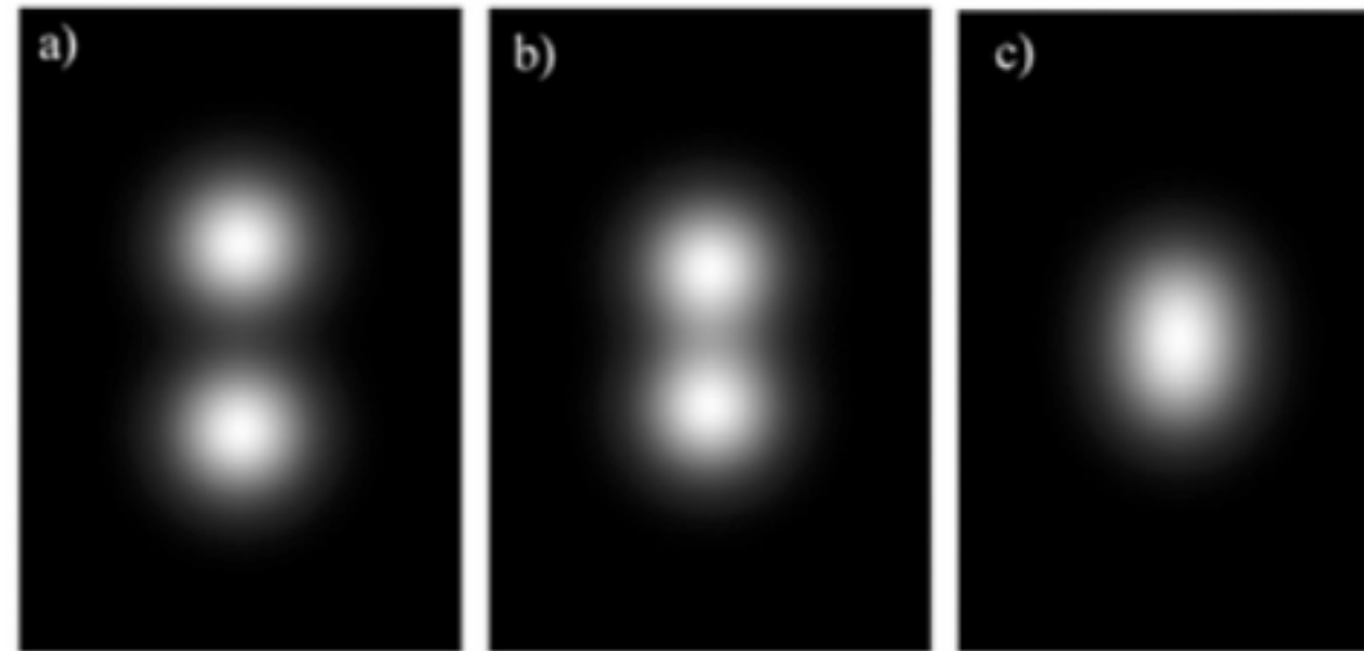
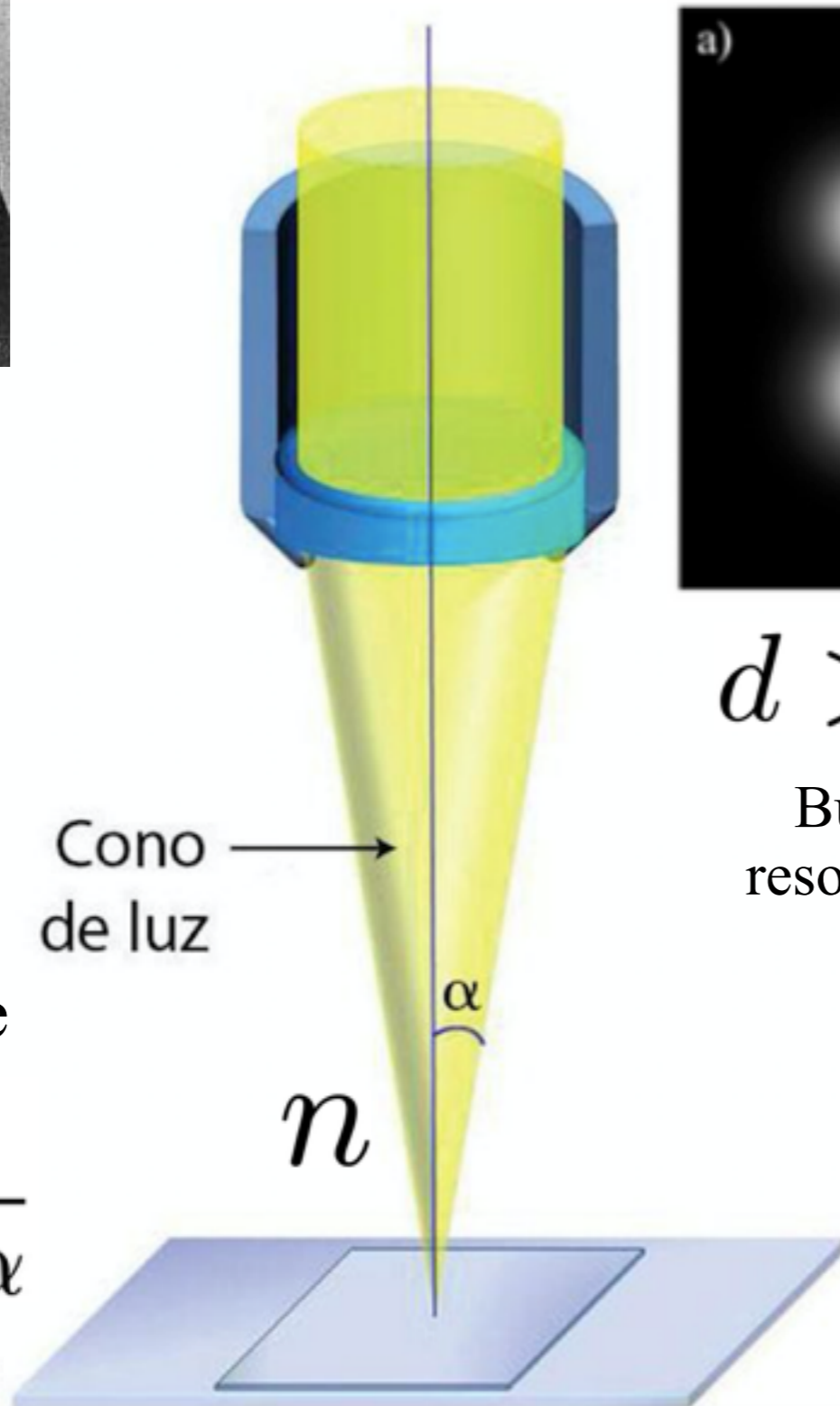


Para poder observar la estructura interna de un objeto necesitamos luz con una longitud de onda más pequeña que su tamaño



**Abbe (1840)**

- **Límite de Abbe:** La distancia mínima a la que dos puntos cercanos son distinguibles como independientes es tan grande como la mitad de la longitud de onda de la luz utilizada para observar la muestra.



$$d > \lambda$$

Buena  
resolución

$$d \sim \lambda$$

Límite  
resolución

$$d < \lambda$$

Mala  
resolución

Fórmula de Abbe

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$

Para superar el límite de Abbe se tuvieron que inventar nuevas técnicas de microscopía: microscopio de fluorescencia, microscopio confocal, microscopio electrónico, microscopio de efecto túnel

- Físico e ingeniero.
- **Premio Nobel de Física en 1901:** Primer Premio Nobel de Física de la historia “en reconocimiento de los extraordinarios servicios que ha brindado con el descubrimiento de los notables rayos que llevan su nombre”.



**Röntgen (1845)**

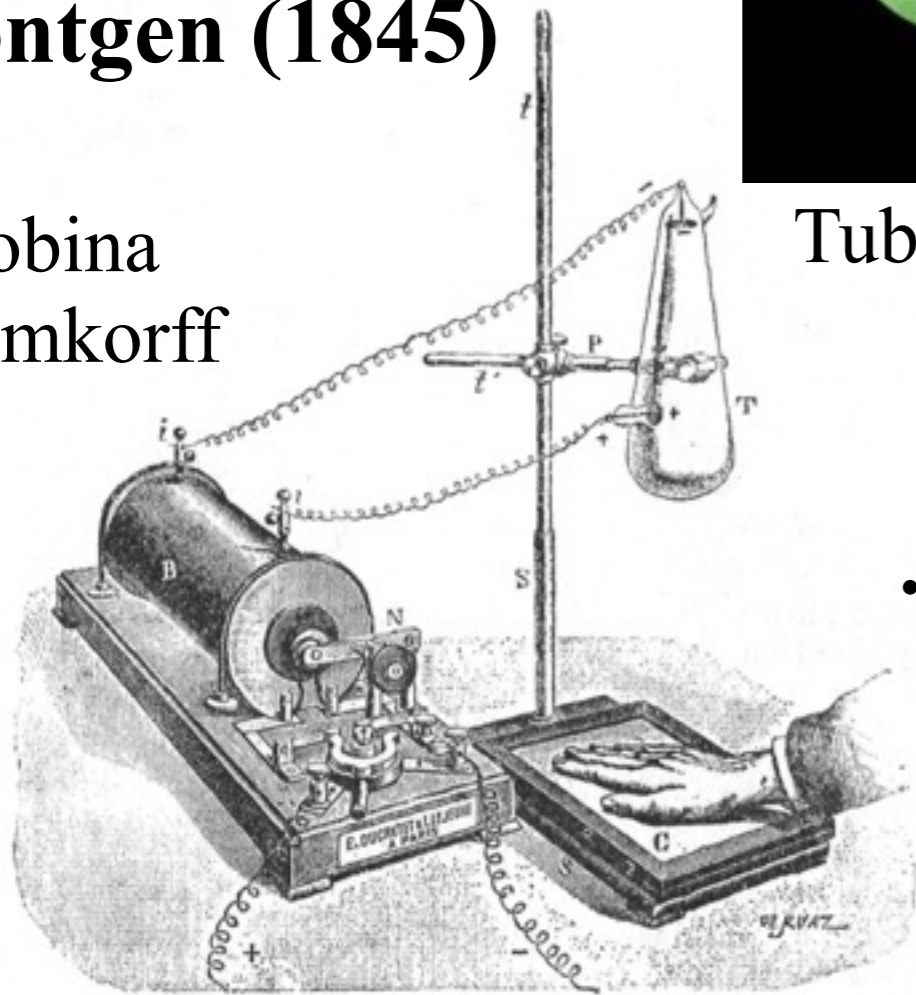


Tubo de Crookes

Primera radiografía



Bobina Ruhmkorff



Experimento de Röntgen

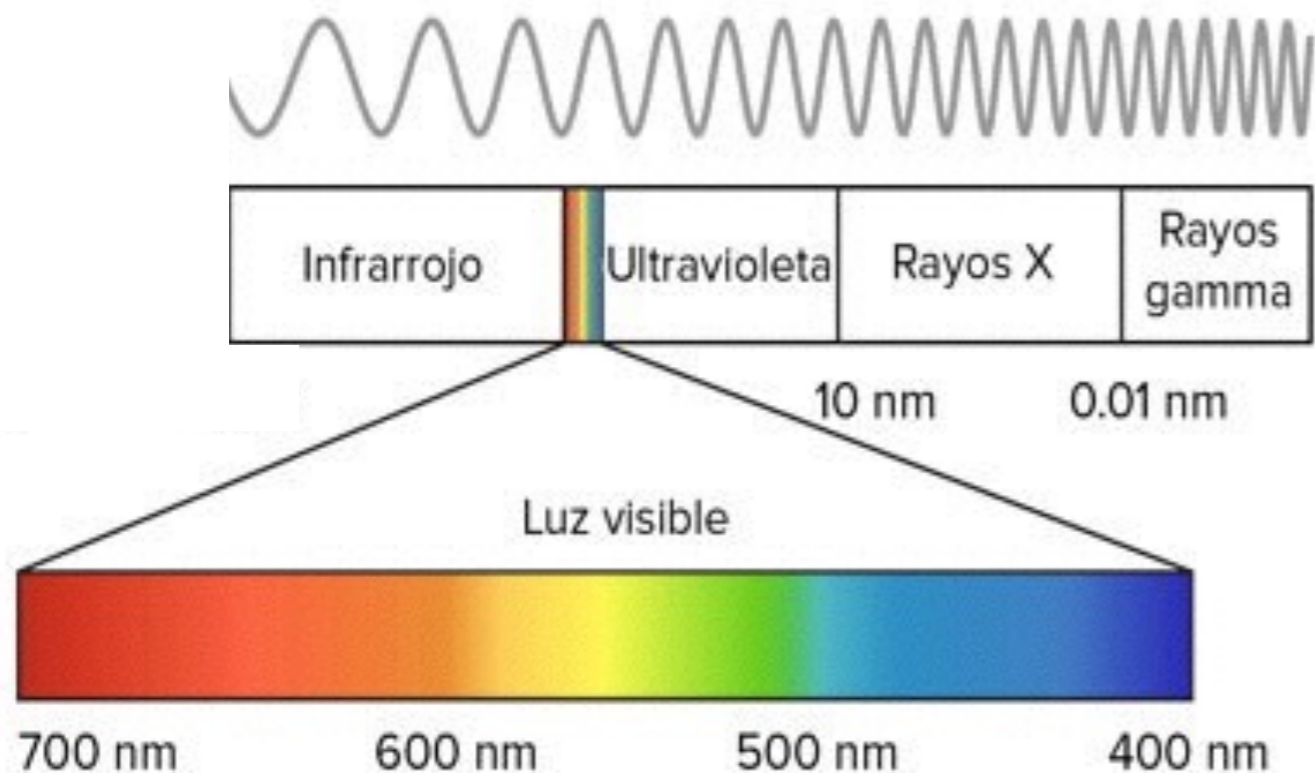
- En el tubo de Crookes se estaba generando un nuevo tipo de radiación muy penetrante: los **Rayos X**.



- Físico y químico.
- Descubrió un nuevo tipo de radiación emitida en las sales de radio: **Rayos Gamma**.
- Pionero en el desarrollo de métodos seguros y técnicas para la **dosimetría** de la radiación.



**Villard (1860)**



El **Radio** es un elemento químico altamente radiactivo

# Divergencia y Rotacional (Grifos y Desagües)

**Divergencia**: Operación matemática que mide la rapidez y la cantidad de campo que atraviesa una superficie.

Símbolo de la divergencia:  $\nabla \cdot$

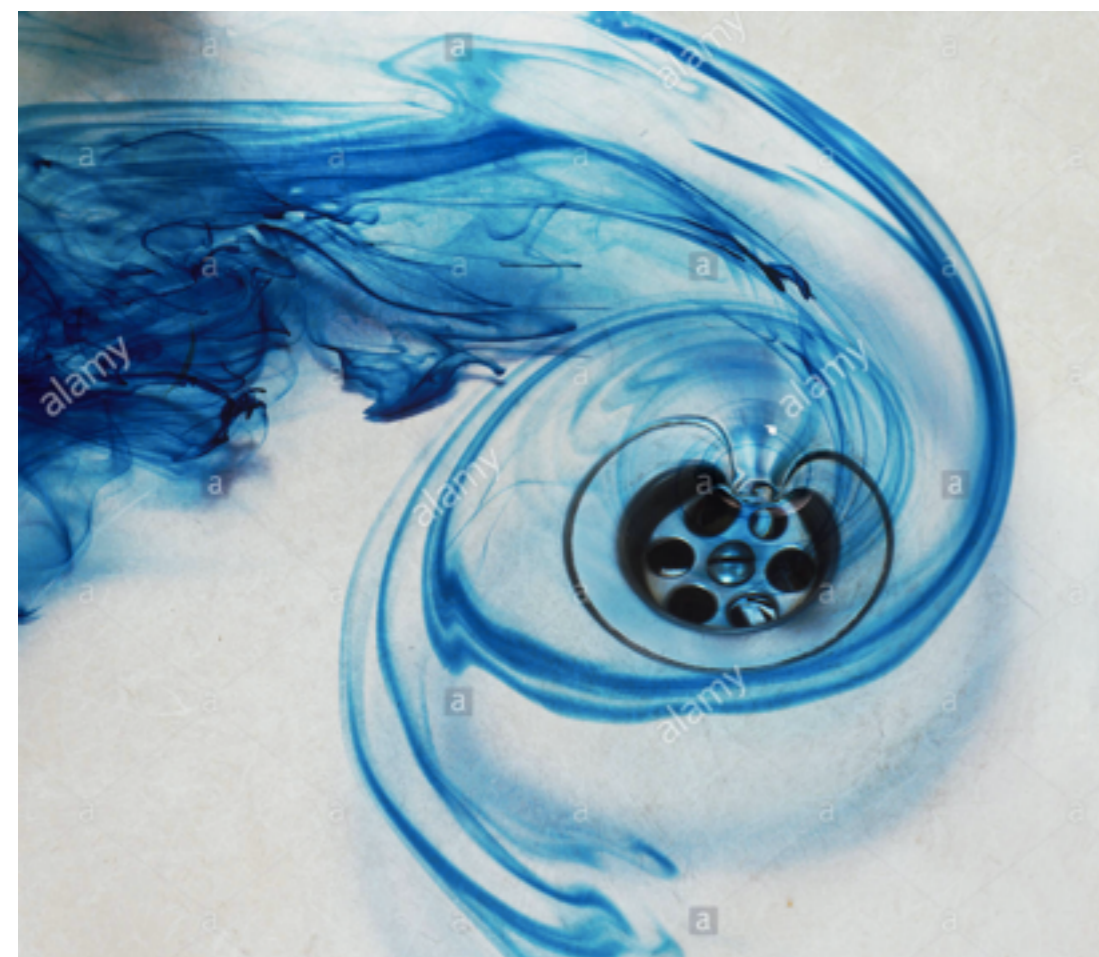
$\nabla \cdot$  **Agua** = Cuán abierto está el grifo



**Rotacional**: Operación matemática que mide la tendencia de un campo a inducir rotación alrededor de un punto.

Símbolo del rotacional:  $\nabla \wedge$

$\nabla \wedge$  **Agua** = Cómo de grande es el desagüe



# Divergencia y Rotacional (Grifos y Desagües)

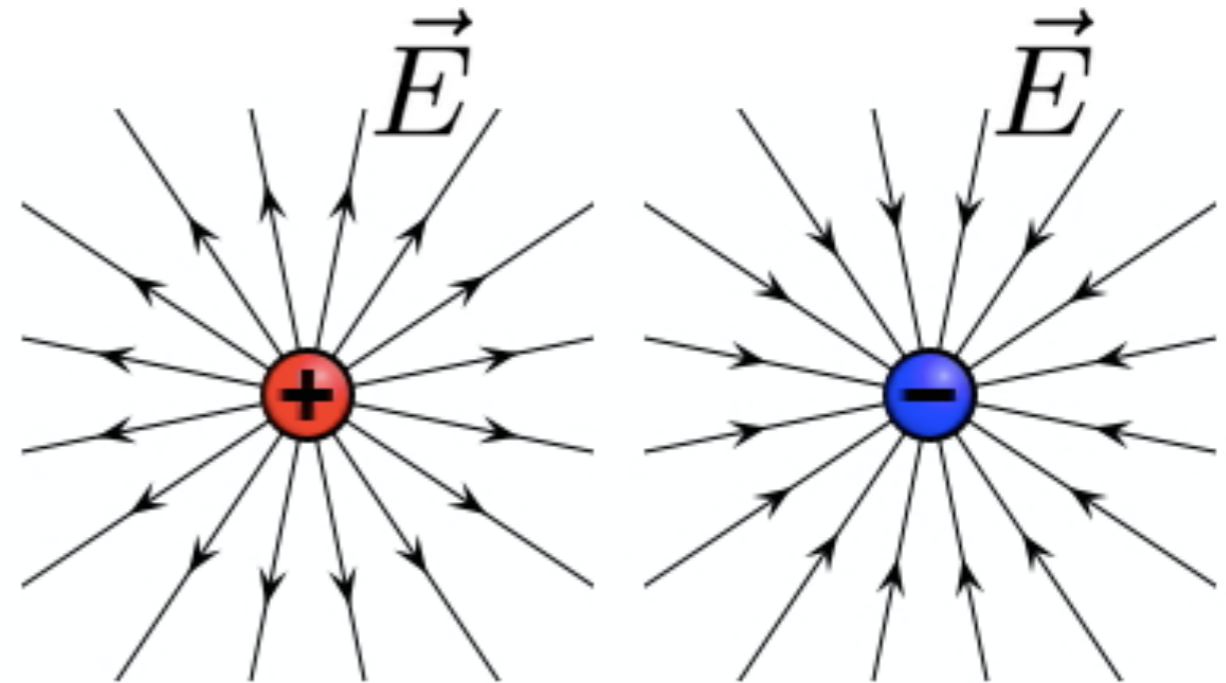
- A mediados del siglo XIX las leyes que describían los fenómenos eléctricos y magnéticos se habían formulado en términos de las divergencias y rotacionales de los campos eléctrico y magnético.



**Gauss (1777)**

- **Ley de Gauss para el campo eléctrico:** Las fuentes de divergencia del campo eléctrico son las densidades de carga eléctrica (el campo eléctrico “sale” o “entra” en las cargas eléctricas):

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



- Cuanto mayor/menor es la densidad de carga eléctrica en una región mayor/menor es la divergencia del campo eléctrico.

# Divergencia y Rotacional (Grifos y Desagües)

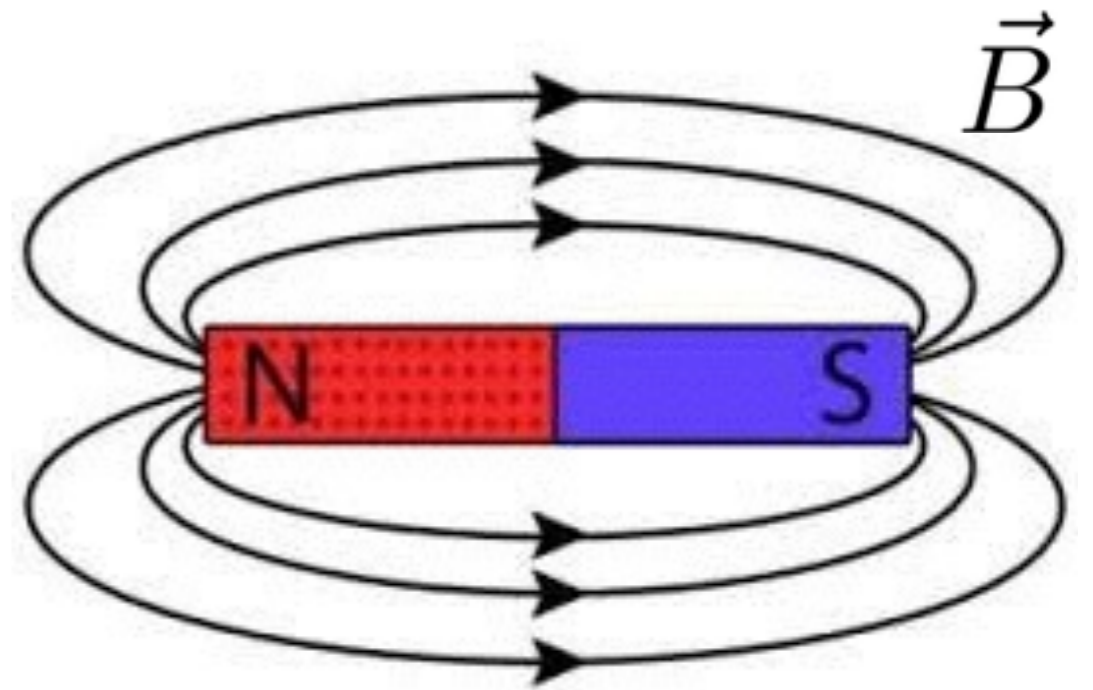
- A mediados del siglo XIX las leyes que describían los fenómenos eléctricos y magnéticos se habían formulado en términos de las divergencias y rotacionales de los campos eléctrico y magnético.



**Gauss (1777)**

- **Ley de Gauss para el campo magnético:** No existen fuentes de divergencia del campo magnético (las líneas de campo magnético son siempre “cerradas”):

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

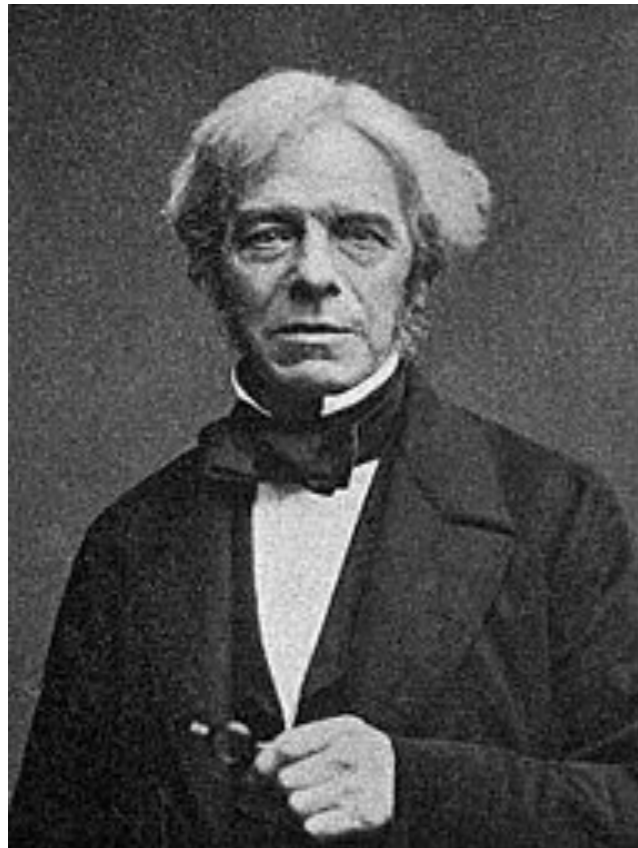


- No existen **monopolos** magnéticos. Cuando partimos un imán siempre se genera un nuevo imán, pero nunca es posible separar los polos de los imanes.



# Divergencia y Rotacional (Grifos y Desagües)

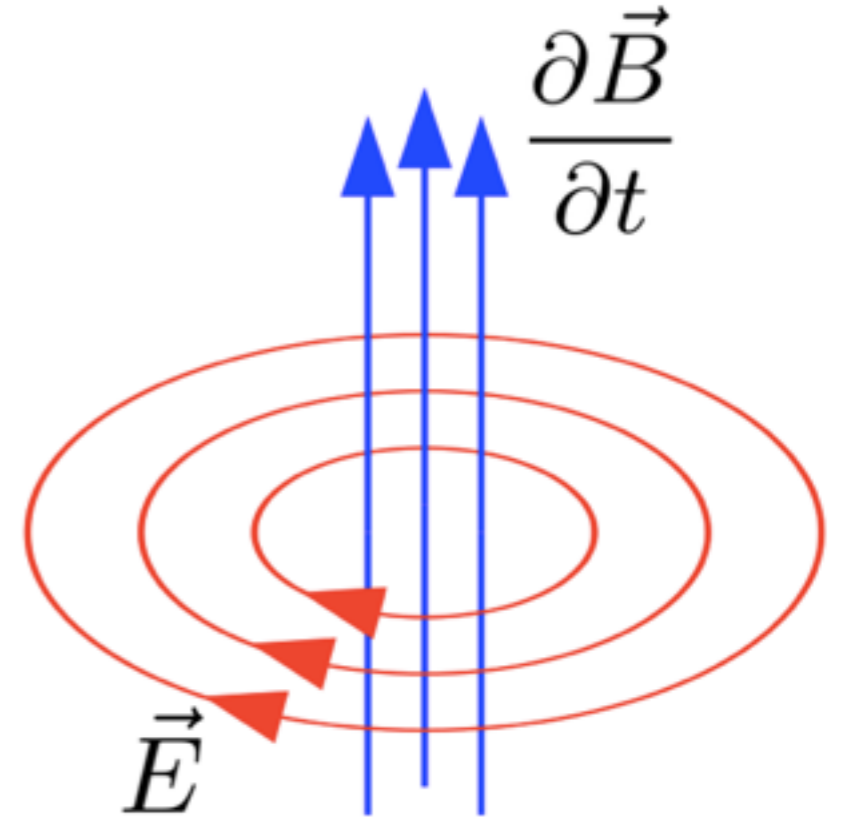
- A mediados del siglo XIX las leyes que describían los fenómenos eléctricos y magnéticos se habían formulado en términos de las divergencias y rotacionales de los campos eléctrico y magnético.



**Faraday (1791)**

- **Ley de Faraday-Lenz:** Un campo magnético variable con el tiempo genera una rotación del campo eléctrico:

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



- A este fenómeno se le denomina **inducción electromagnética** y es el principio físico que permite construir **generadores eléctricos** para transformar energía mecánica en energía eléctrica.

# Divergencia y Rotacional (Grifos y Desagües)

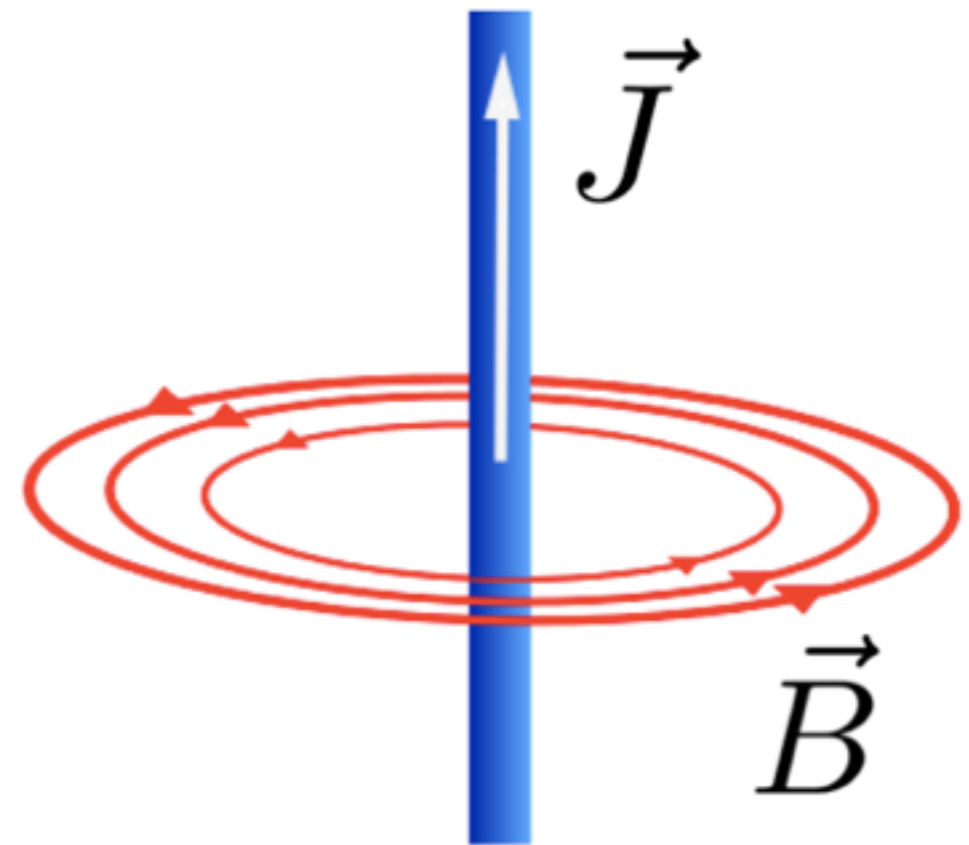
- A mediados del siglo XIX las leyes que describían los fenómenos eléctricos y magnéticos se habían formulado en términos de las divergencias y rotacionales de los campos eléctrico y magnético.



**Ampère (1775)**

- **Ley de Ampère:** Las fuentes de rotación del campo magnético son las densidades de corriente eléctrica:

$$\nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

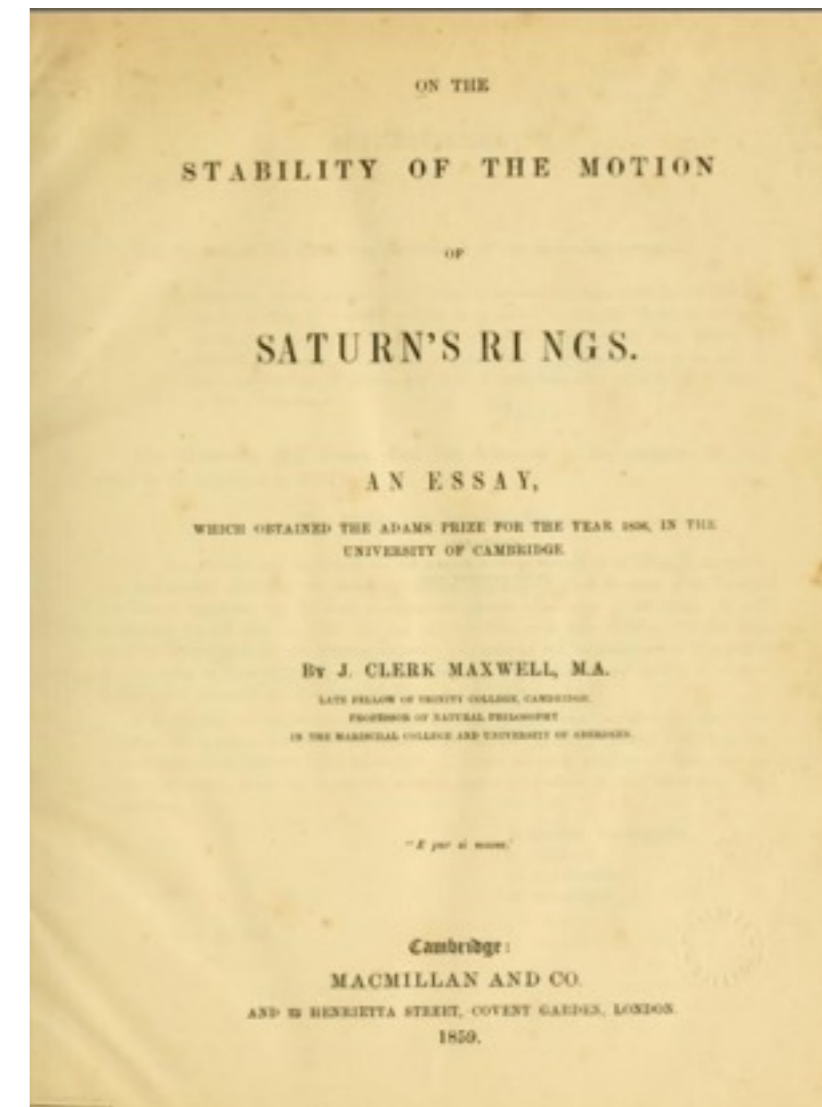
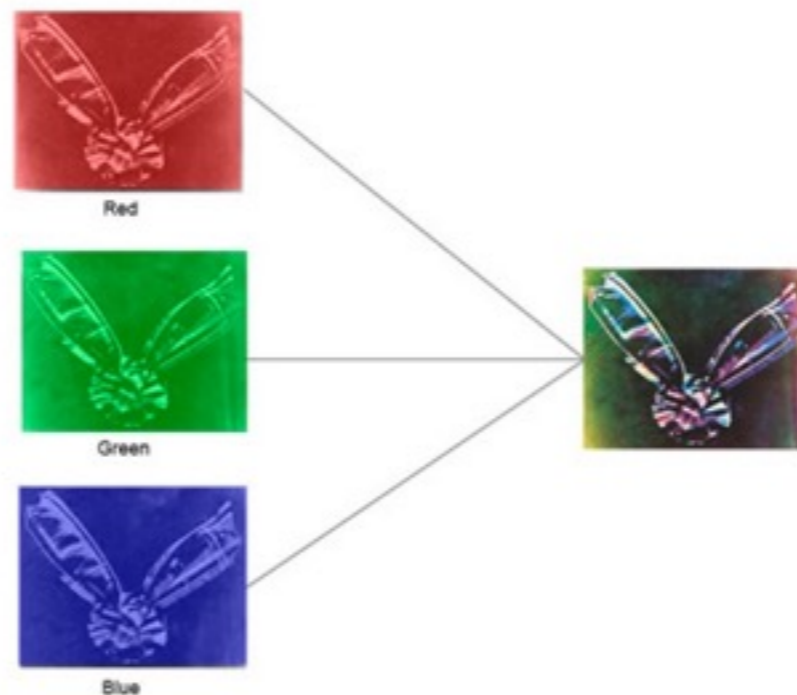
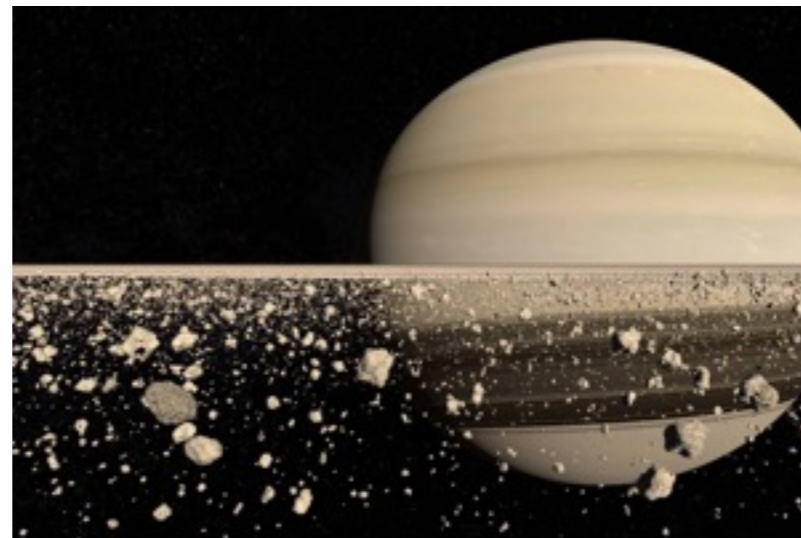


- Por ejemplo, cuando una densidad de corriente eléctrica atraviesa un cable se genera una rotación de campo magnético alrededor del cable.



**Maxwell (1831)**

- Físico.
- Realizó importantes contribuciones a la mecánica estadística y a la teoría cinética de los gases.
- Demostró que los anillos de Saturno no podían ser sólidos o líquidos, sino que estaban formados por pequeñas partículas en suspensión y estudió su movimiento.



- Diseñó el primer dispositivo que combinaba filtros de distintos colores para realizar fotografías en color.



**Maxwell (1831)**

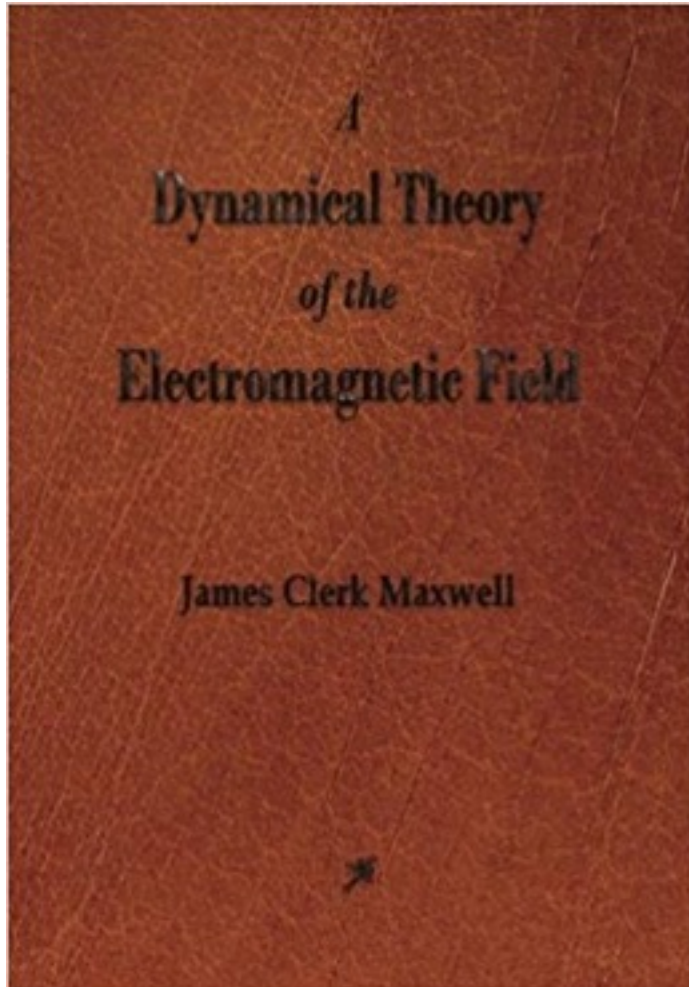
- En 1865 Maxwell publica “**Una teoría dinámica del campo electromagnético**”.
- Este trabajo recoge todas las investigaciones que se habían realizado hasta el momento acerca de la electricidad y el magnetismo en las llamadas **ecuaciones de Maxwell**:

(1) Primera ecuación de Maxwell (ley de Gauss para el campo eléctrico):

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

(2) Segunda ecuación de Maxwell (ley de Gauss para el campo magnético):

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





**Maxwell (1831)**

(3) Tercera ecuación de Maxwell (ley de Faraday-Lenz para de la inducción electromagnética):

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

(4) Cuarta ecuación de Maxwell (extensión de la ley de Ampère):

$$\nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}_{\text{Corriente de desplazamiento de Maxwell}}$$

Corriente de desplazamiento de Maxwell

- Maxwell añade un nuevo término a la ley de Ampère llamado **corriente de desplazamiento de Maxwell**.
- Es precisamente este nuevo término el que permite **unificar** electricidad y magnetismo incorporando **campos eléctricos variables con el tiempo** como fuentes de **rotación del campo magnético**.
- **Nota:** Originalmente Maxwell planteó 20 ecuaciones. La formulación moderna en 4 ecuaciones se la debemos a Hertz y Heaviside.



**Maxwell (1831)**

(3) Tercera ecuación de Maxwell (ley de Faraday-Lenz para de la inducción electromagnética):

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

(4) Cuarta ecuación de Maxwell (extensión de la ley de Ampère):

$$\nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \underbrace{\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}_{\text{Corriente de desplazamiento de Maxwell}}$$

Corriente de desplazamiento de Maxwell

- Maxwell añade un nuevo término a la ley de Ampère llamado **corriente de desplazamiento de Maxwell**.
- Es precisamente este nuevo término el que permite **unificar** electricidad y magnetismo incorporando **campos eléctricos variables con el tiempo** como fuentes de **rotación del campo magnético**.
- **Nota:** Originalmente Maxwell planteó 20 ecuaciones. La formulación moderna en 4 ecuaciones se la debemos a Hertz y Heaviside.



- Las ecuaciones de Maxwell en el **vacío**, es decir, en una región donde no existen cargas eléctricas ni corrientes eléctricas:

$$\rho = 0 \quad ; \quad \vec{J} = 0$$

se reducen a:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \wedge \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

**Maxwell (1831)**

- Maxwell descubrió que, aún en el vacío, combinando la tercera y cuarta ecuación obtenía las siguientes ecuaciones para el campo eléctrico y el campo magnético:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$



**Maxwell (1831)**

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

- La forma de esta clase de ecuaciones era muy bien conocida, correspondían a ecuaciones que describen la propagación de una onda.
- Maxwell había demostrado que los campos eléctricos y los campos magnéticos **variables con el tiempo** se propagaban en forma de **ondas electromagnéticas**, cuya velocidad era...

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sim 300.000 \text{ km/s}$$

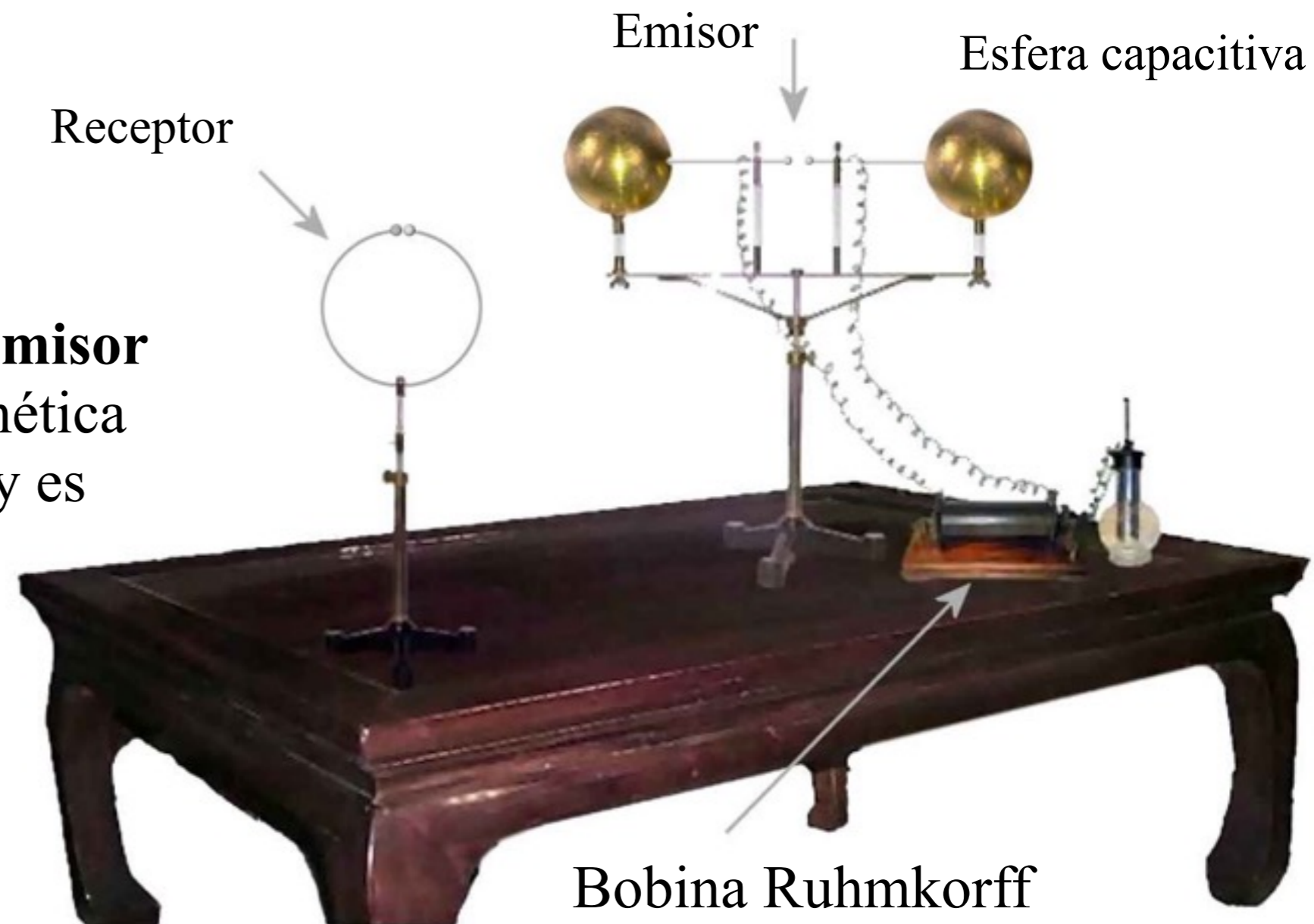
... la de la luz!! La luz era una onda electromagnética!!





**Hertz (1857)**

- Físico.
- Descubrió el efecto fotoeléctrico, estudió la propagación de las ondas electromagnéticas y la manera de producirlas y detectarlas.
- Sus estudios confirmaron experimentalmente la teoría de Maxwell del campo electromagnético.

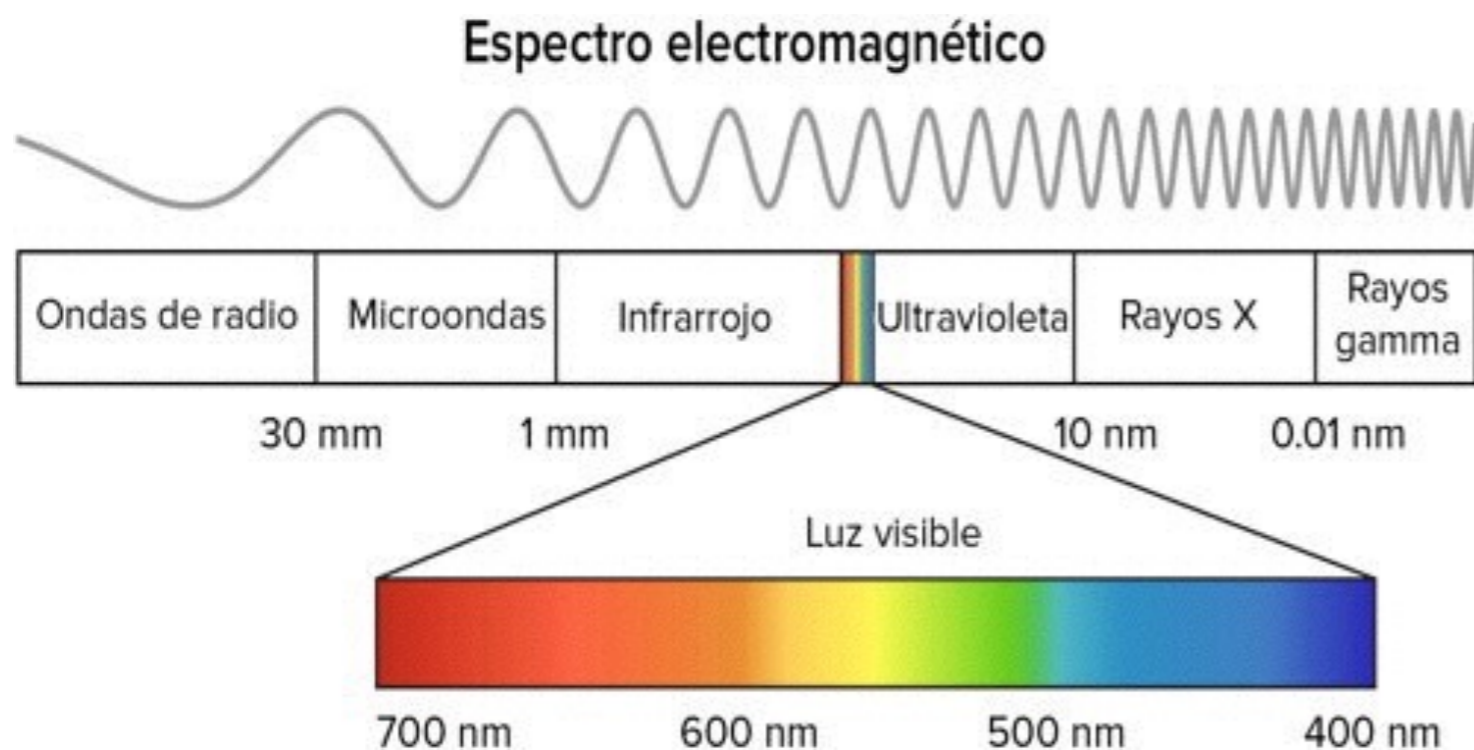


**Experimento de Hertz: El Emisor** genera una onda electromagnética que se propaga en el espacio y es detectada por el **Receptor**.



**Hertz (1857)**

- Estudiando las ondas electromagnéticas en su dispositivo experimental determinó que:
  - (1) Sufren reflexión y refracción.
  - (2) Son oscilaciones transversales de un campo eléctrico y un campo magnético.
  - (3) Tienen polarización.
  - (4) Variando la longitud de onda y la frecuencia del emisor generaba todas las clases de “luz” del espectro electromagnético. Observó las ondas de radio.

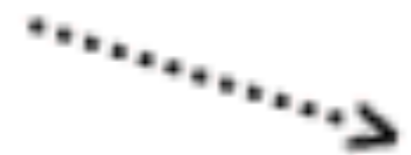
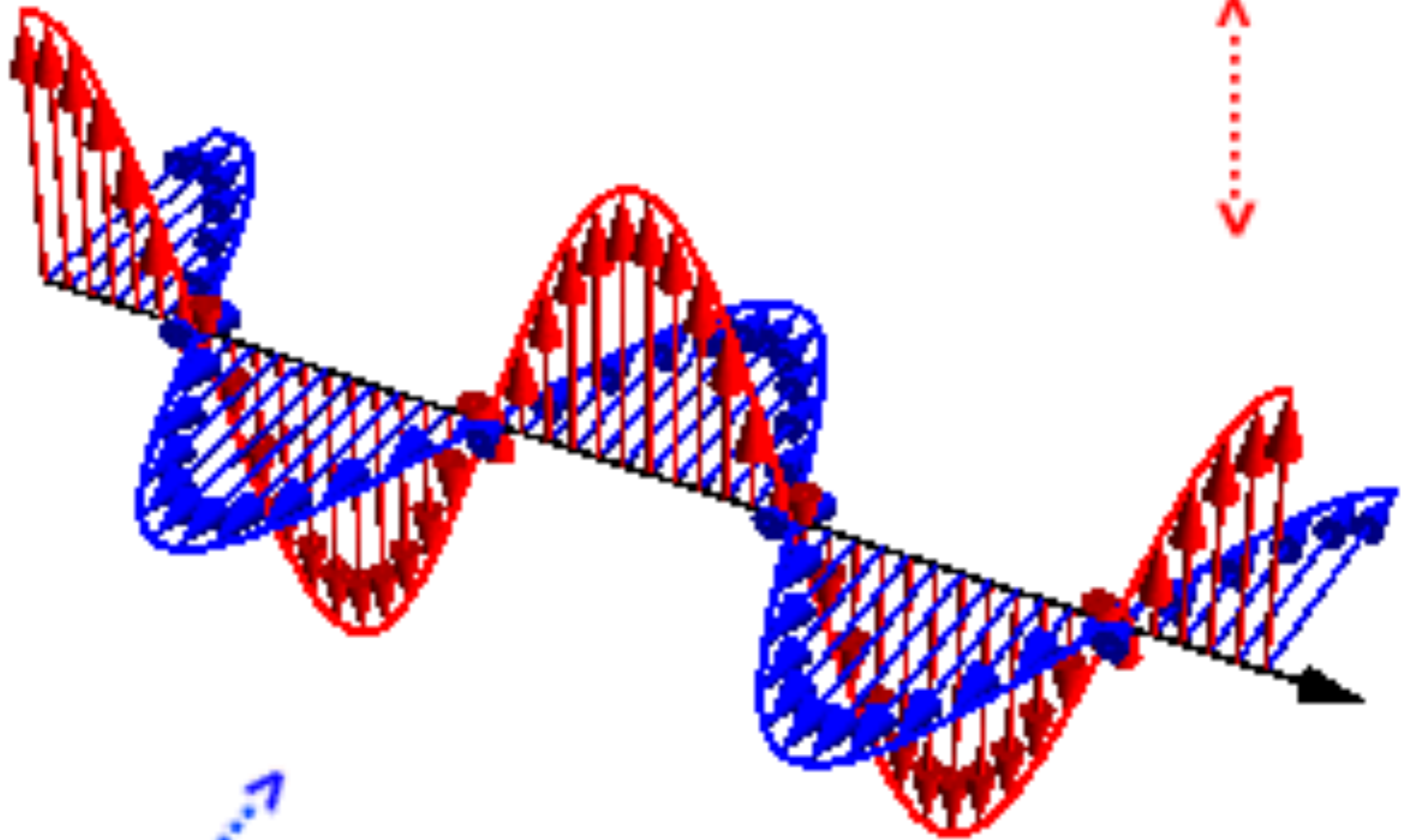


(5) Sufren difracción y generan interferencias.

(6) Se propagan a una velocidad de 300.000 km/s.

La luz es una onda electromagnética!

**Campo Eléctrico**



**Campo Magnético**

**Dirección de Propagación**