



Ideas que dan forma a la física
Relacionar y unificar.
El campo electromagnético.

Prof. J Güémez
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cantabria

Santander, enero 2019

Relacionar y unificar. El campo electromagnético.

Durante mucho tiempo se conocieron las semejanzas (**Aristóteles**) y las diferencias (**Gilbert**) entre el campo eléctrico y el campo magnético: hay dos tipos de cargas eléctricas y pueden separarse y hay dos tipos de polos magnéticos, pero estos no pueden separarse. La consideración de ciertas simetrías para las ecuaciones que describían en campo eléctrico y el campo magnético, llevaron a **Maxwell** a introducir el concepto de corriente de desplazamiento. Este término adicional de la ecuación de **Ampère** permitió a Maxwell demostrar que ambos campos se propagan en el vacío como una onda transversal que se desplaza a la velocidad de la luz. Al relacionar y unificar conceptos y ecuaciones previamente separados, se avanza en el conocimiento, lo que implica que se aumenta la capacidad de hacer predicciones contrastables y correctas.

Unificar y predecir. El campo electromagnético.

Las exigencias de la teoría especial de la relatividad llevaron posteriormente a la unificación (**Einstein**) de los conceptos de campo eléctrico y de campo magnético en un sólo campo electromagnético, que presenta uno u otro aspecto dependiendo del observador.

Aristóteles y Thales de Mileto

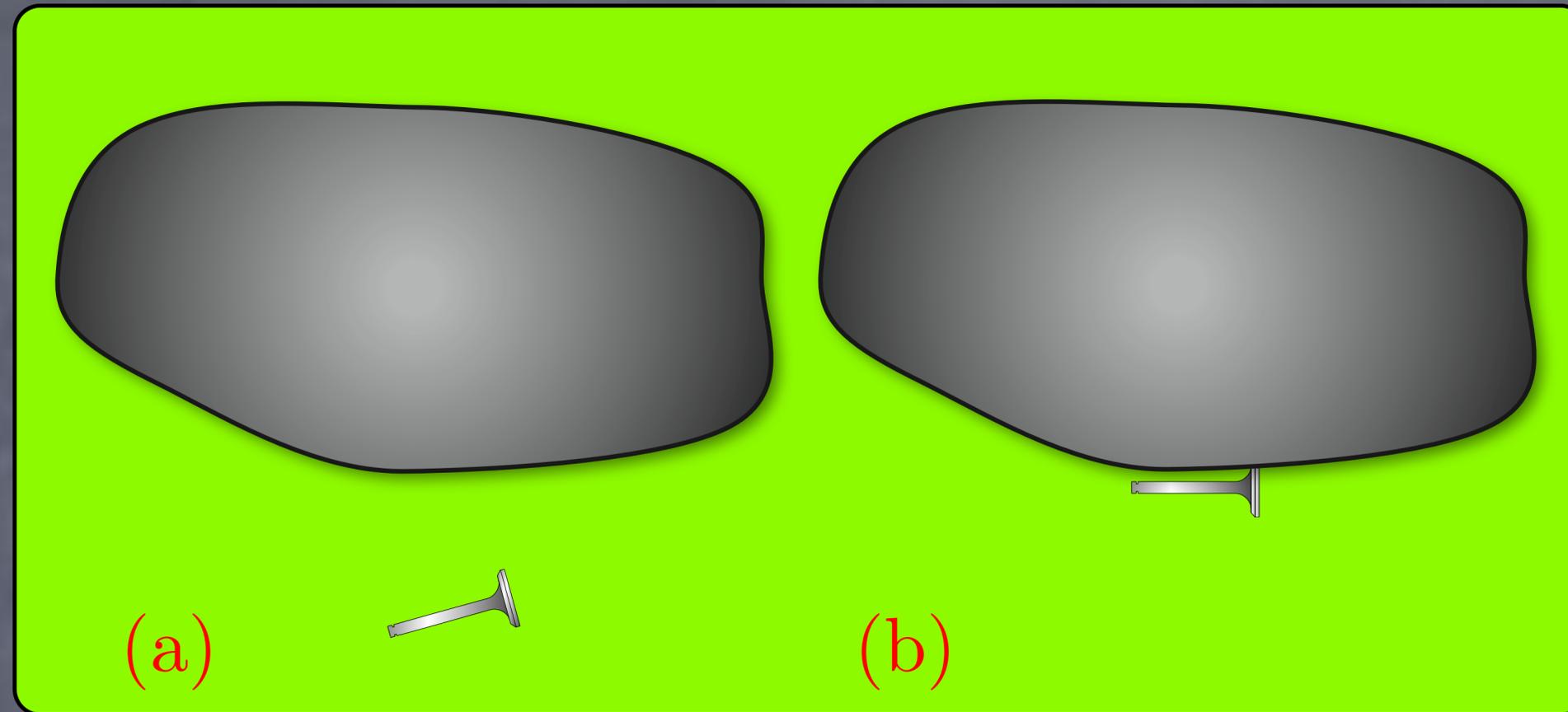


Electricidad

Una barra de ámbar (**electros** en griego) frotada previamente con lana, es capaz de atraer cuerpos ligeros como, por ejemplo, una semilla de diente de león, moviéndola contra su tendencia natural que es caer a tierra.

Una vez la semilla toca la barra, en general, es repelida y se aleja de la barra.

Aristóteles y Magnesia

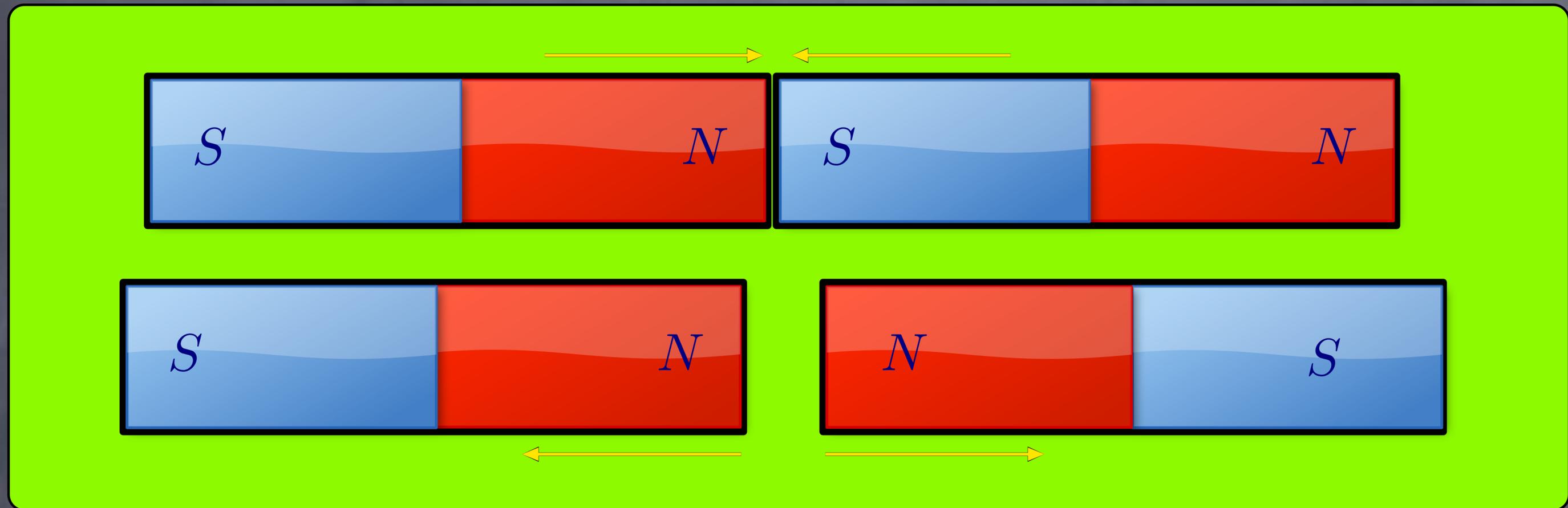


Magnetismo.

Una piedra de mineral de hierro de las minas de Magnesia es capaz de atraer un pequeño clavo de hierro y elevarlo del suelo, desplazándolo en contra de su movimiento natural que es hacia la tierra.

Para **Aristóteles** esta transformación del clavo sería como una transmutación, cambiando la esencia del mismo.

William Gilbert

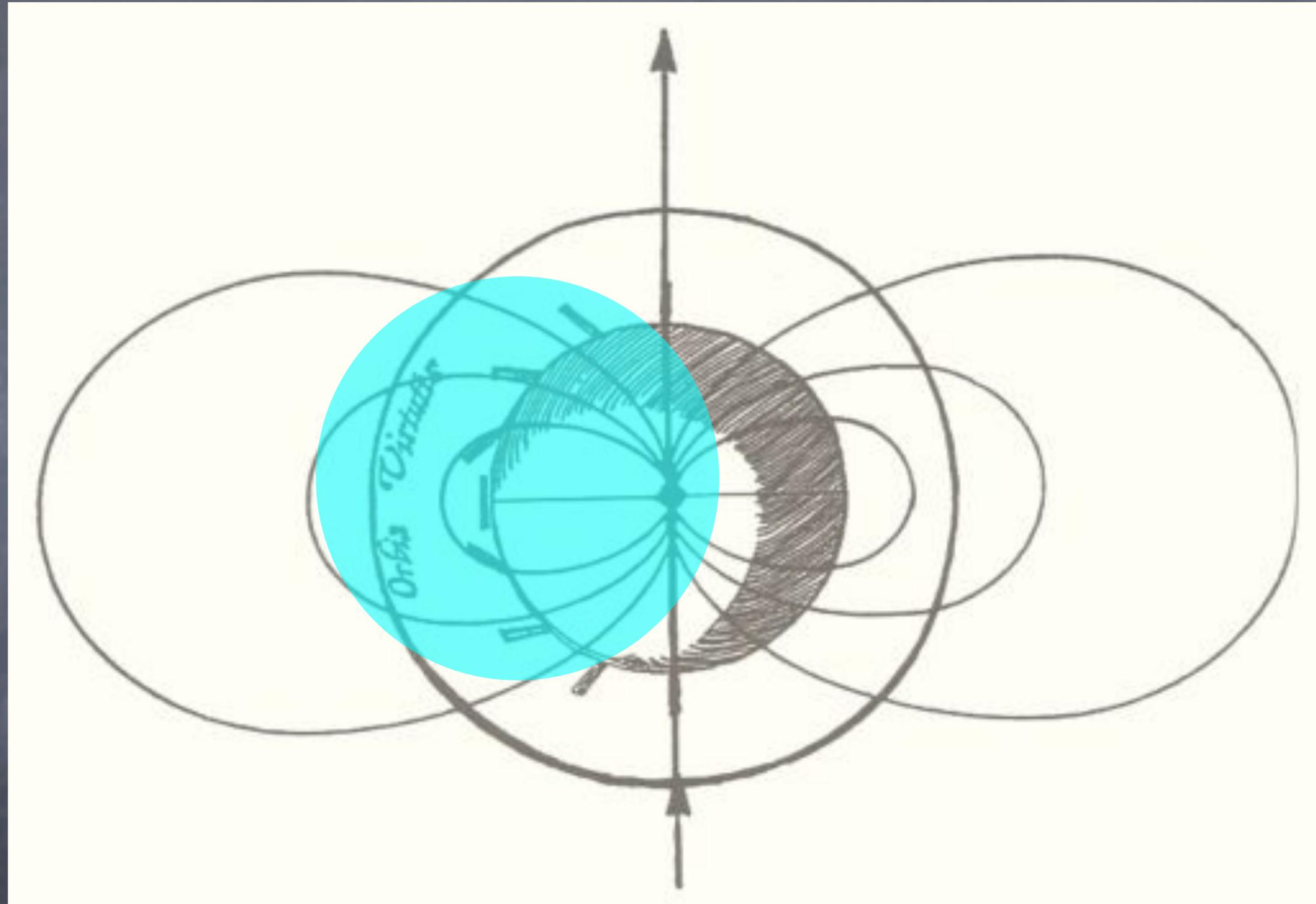


Atracción y repulsión entre polos de imanes.
Gracias a la fabricación de buenos imanes, **Gilbert** pudo mostrar que los imanes tienen dos extremos activos. Extremos del mismo tipo se repelen. Extremos de distinto tipo se atraen.

William Gilbert

El campo magnético de la Tierra.

El campo magnético de la Tierra, además de producir las auroras boreales, nos protege de muchas radiaciones ionizantes, particularmente, las procedentes del Sol. Sin este campo magnético, la vida sobre la Tierra no sería posible (al menos, tal y como la conocemos)



Inducción magnética.

Aunque las monedas no están magnetizadas (son de hierro con una capa externa de cobre), al acercarlas al imán se orientan sus dipolos magnéticos microscópicos y se induce la aparición de una imantación, capaz de atraer a las otras monedas.



Atracción y repulsión de barras frotadas y cargadas.

Barras del mismo tipo frotadas con el mismo tejido se cargan con el mismo tipo de electricidad. Cuando se aproximan una a otra, se repelen.

Cargas del mismo tipo (ámbar-ámbar, como en la imagen, o vidrio-vidrio, se repelen)



Inducción electrostática.

Aunque la barrita de madera no está eléctricamente cargada, es atraída por el peine, que sí está cargado eléctricamente.

Las cargas sobre el peine inducen una separación de cargas sobre la madera que hace que cargas de distinto signo, en peine y en madera, se atraigan.

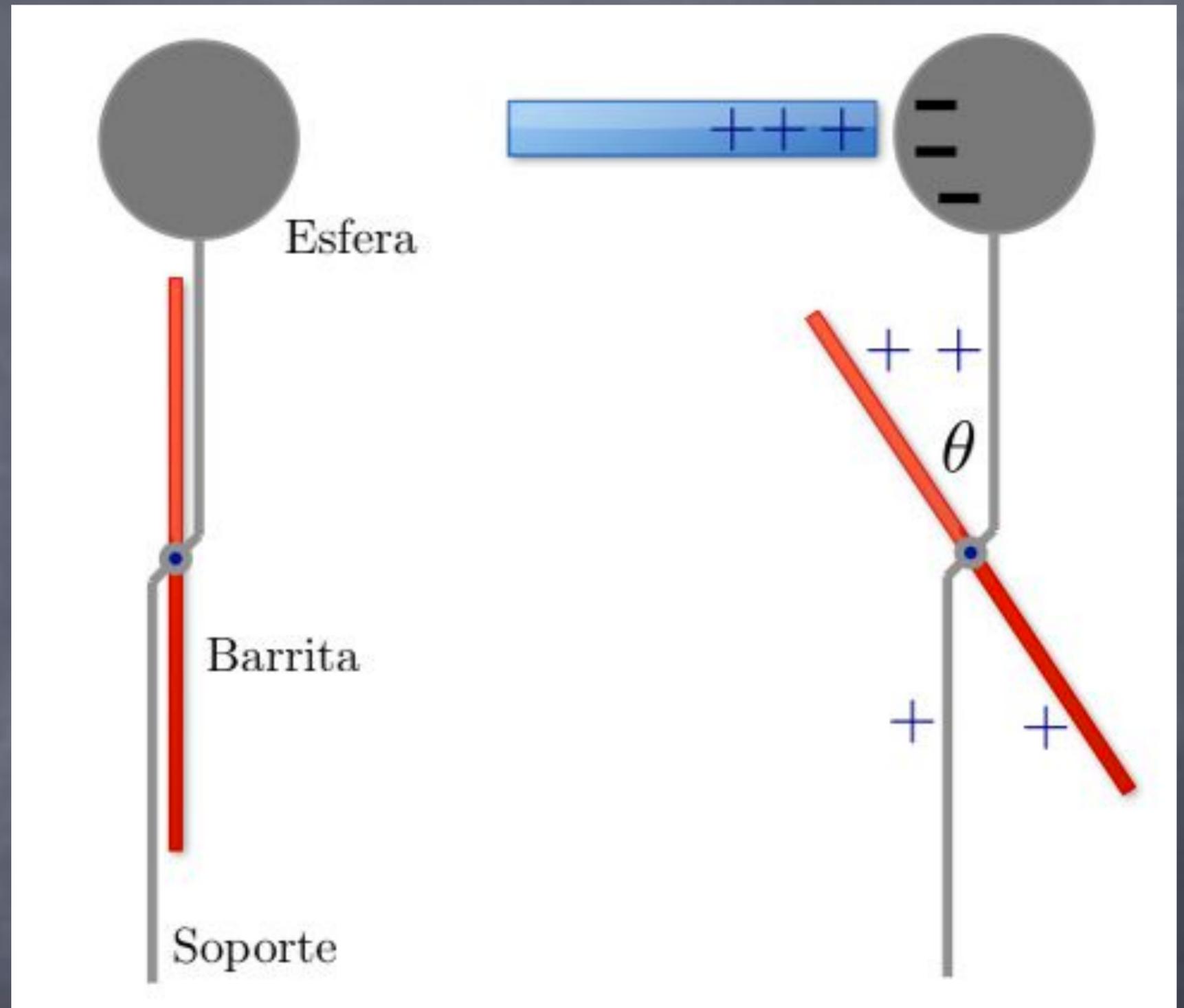
La inducción electrostática explica la atracción de semillas por barras frotadas

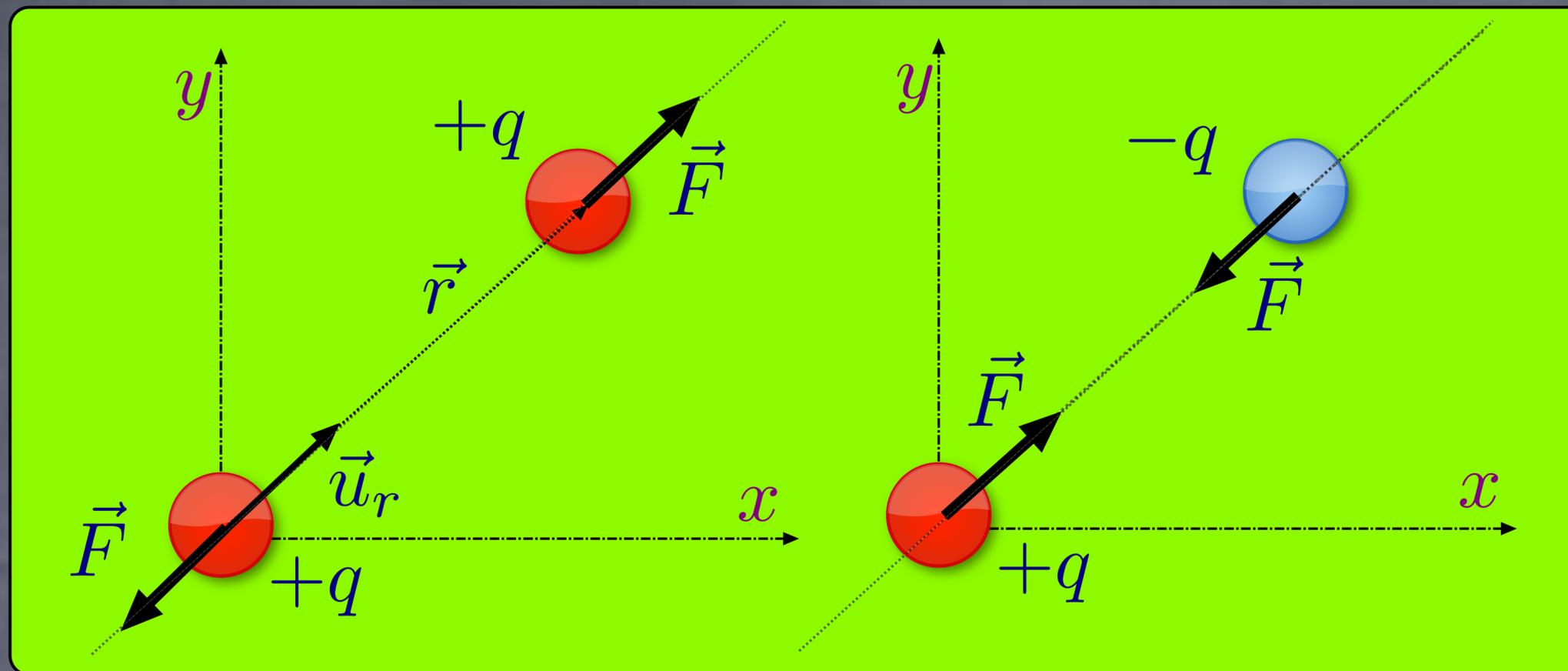


La inducción electrostática explica la atracción de semillas por barras frotadas.

Inducción electrostática. Electroscopio

Una esfera metálica se encuentra unida a un soporte de metal que permite oscilar a una varilla metálica. Cuando se acerca una barra eléctricamente cargada a la esfera, la inducción eléctrica hace que se separen cargas. Como soporte y varilla tienen las mismas cargas, la varilla gira y se separa del soporte. A más carga inducida, mayor ángulo de separación.





$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$

Ley de Coulomb.

La fuerza entre dos cargas sigue la línea que las une y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Pila de Volta.

Formada por capas sucesivas de anillos de cobre y zinc, separados por cartón empapado en ácido sulfúrico diluido.

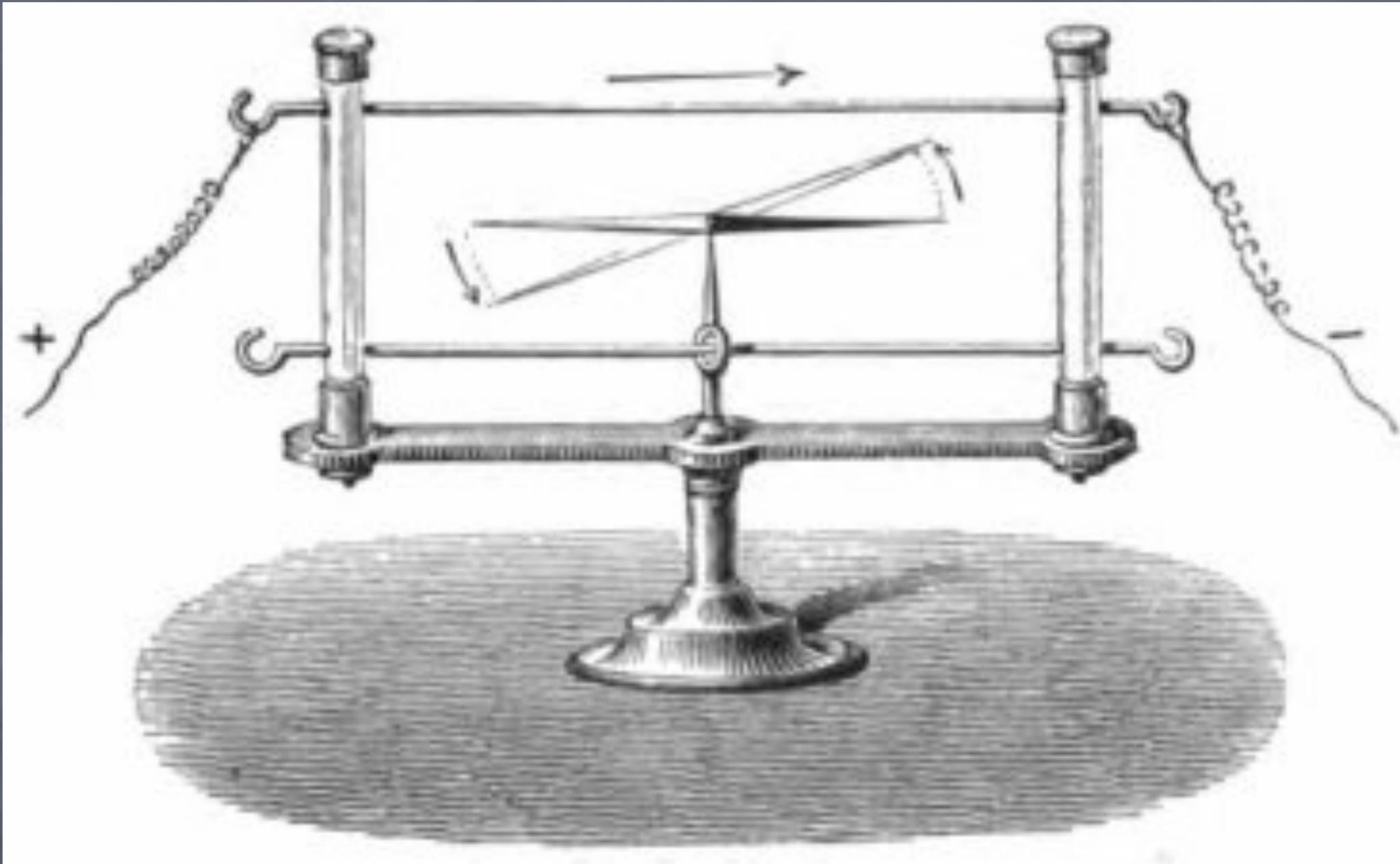
Se utiliza para producir corriente eléctrica continua.

Cada par cobre-zinc produce una diferencia de potencial de 1 voltio



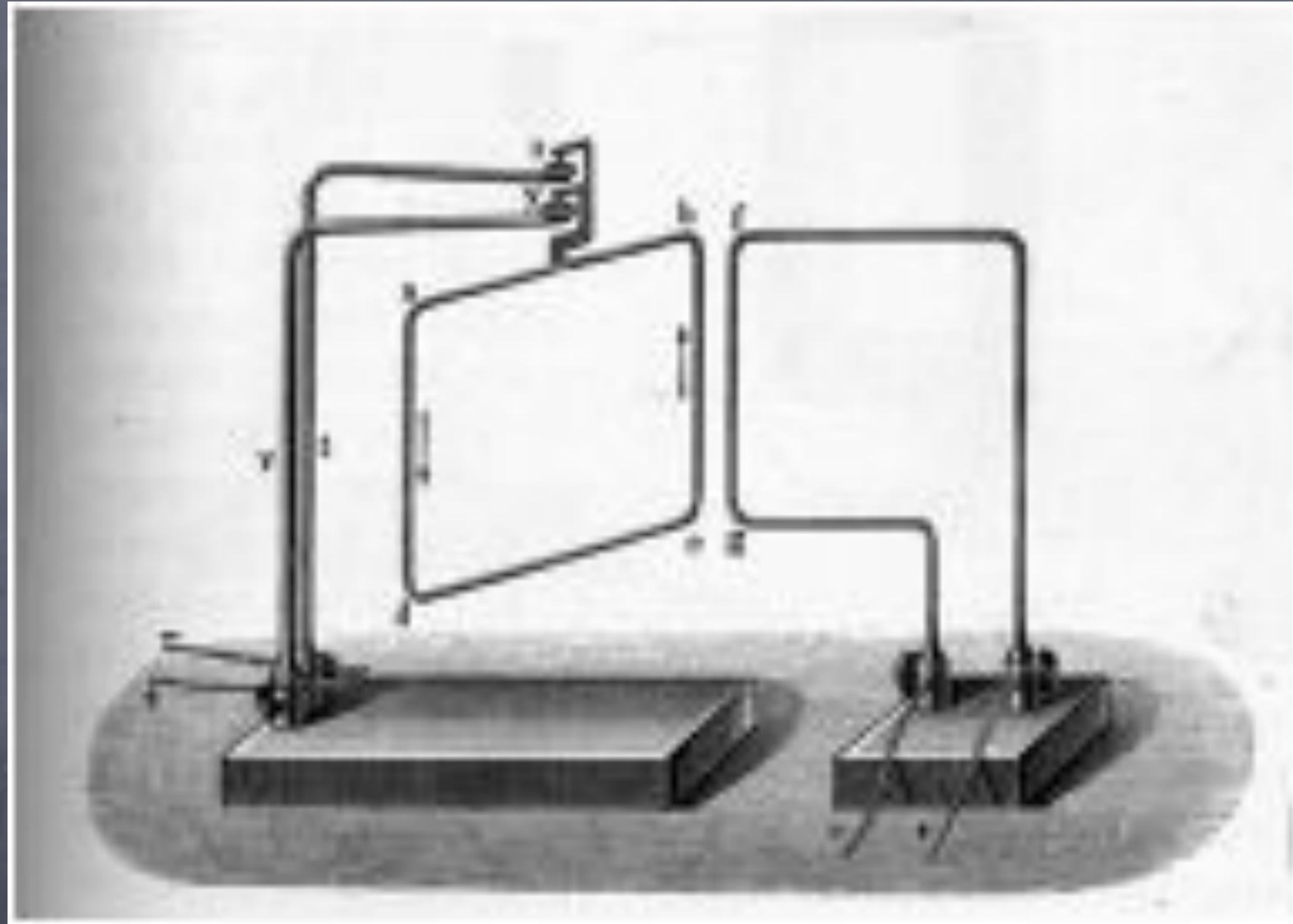
Experiencia de Oersted.

La corriente que circula por un cable paralelo a una brújula es capaz de moverla y hacerla ponerse casi perpendicular al cable. Esta experiencia, y otras semejantes de Oersted, dieron la clave sobre la relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Está considerada una de las experiencias más importantes de la historia de la física.



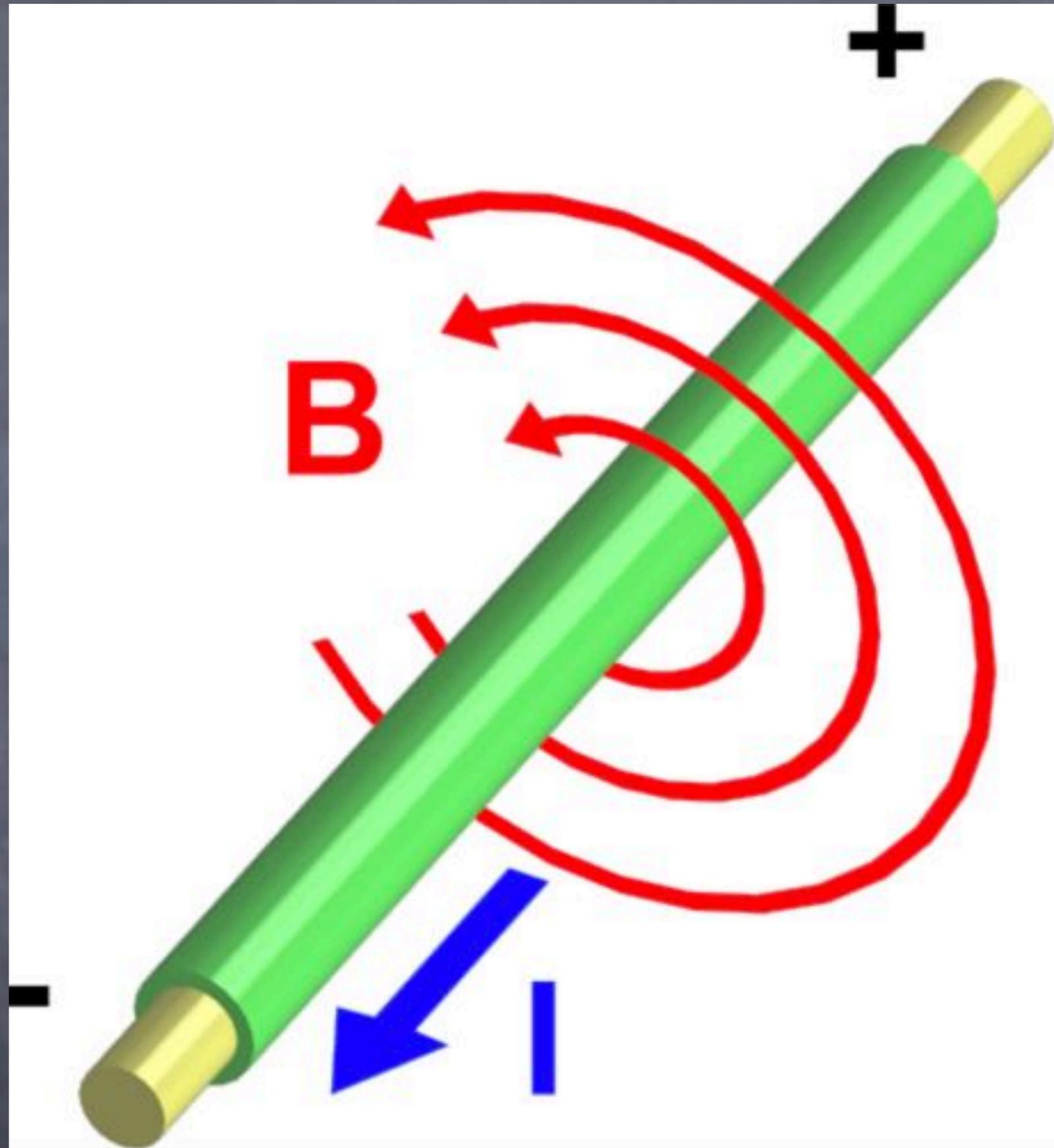
Experiencia de Ampère.

Cuando la corriente que circula por dos cables paralelos es del mismo sentido, los cables se atraen. Cuando las corrientes que circulan son de diferentes sentido, como en la imagen, los cables se repelen.



Ley de Biot y Savart.

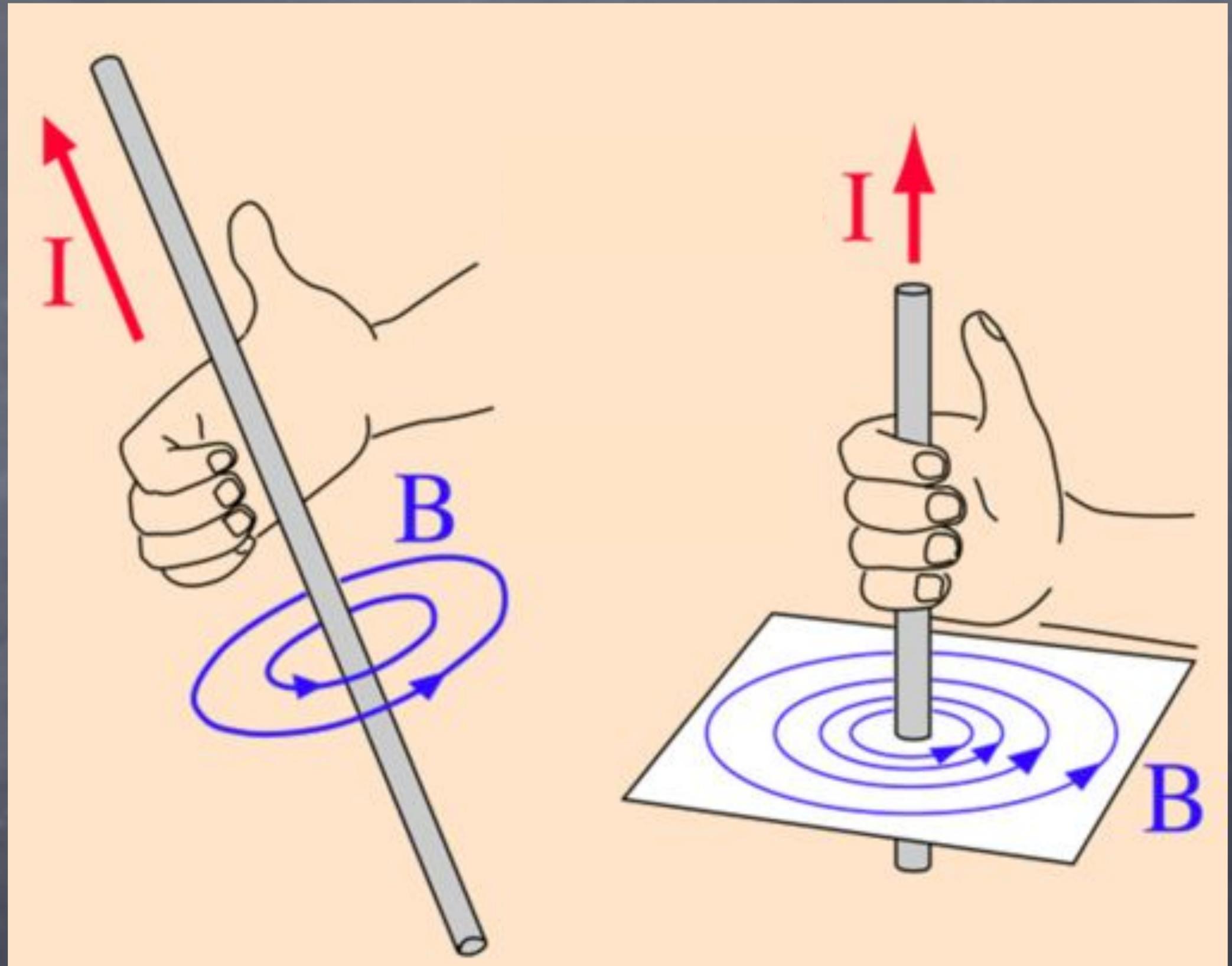
Una corriente eléctrica crea un campo magnético que interacciona con las cargas eléctricas en movimiento. El sentido del campo se obtiene mediante la regla de la mano derecha: si el pulgar indica el sentido de la corriente, los demás dedos indican el sentido del campo magnético producido.



Ley de Ampere, Biot y Savart.

La intensidad del campo magnético creado por la corriente disminuye como el inverso de la distancia.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

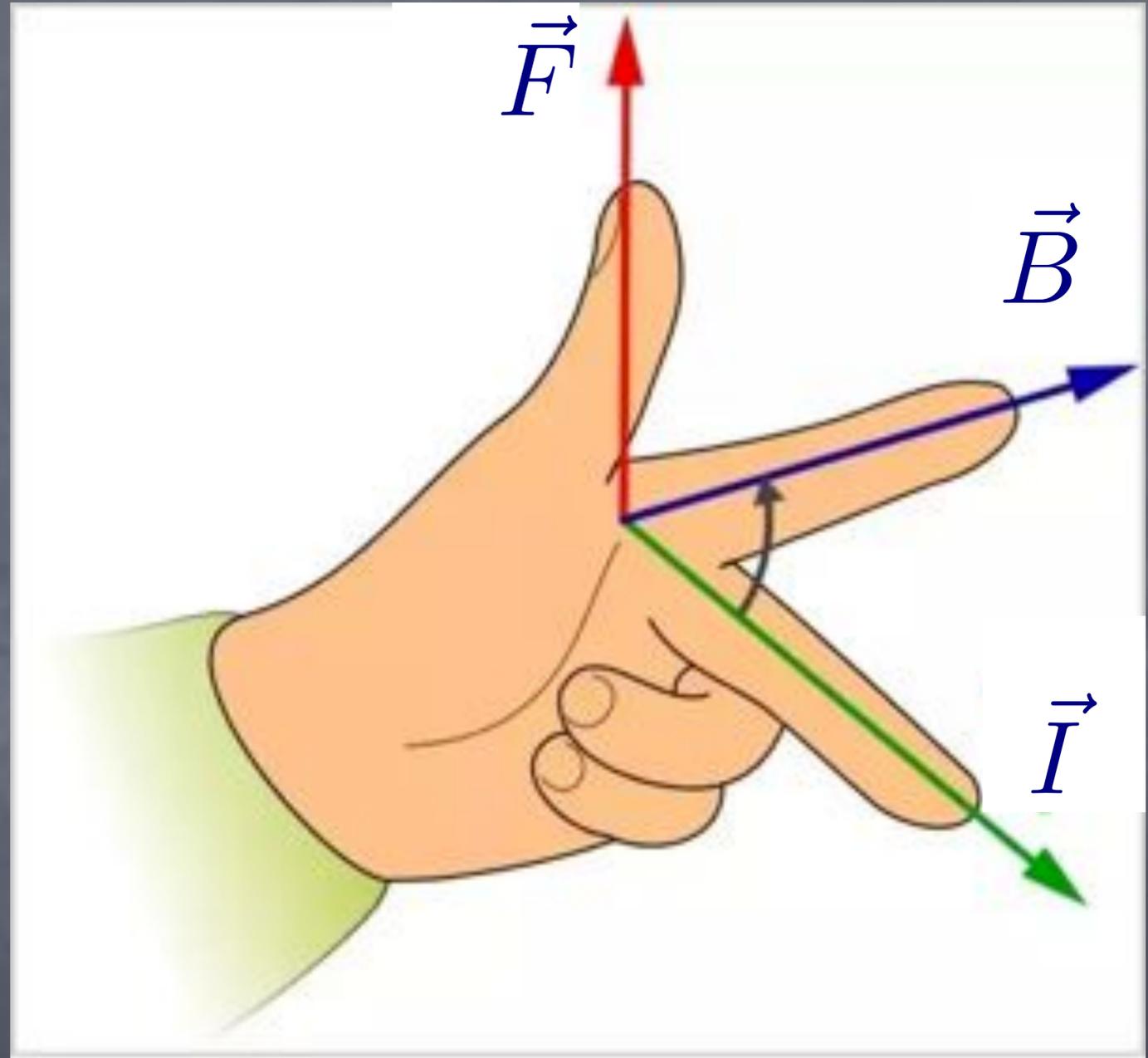


$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Fuerza de Lorentz

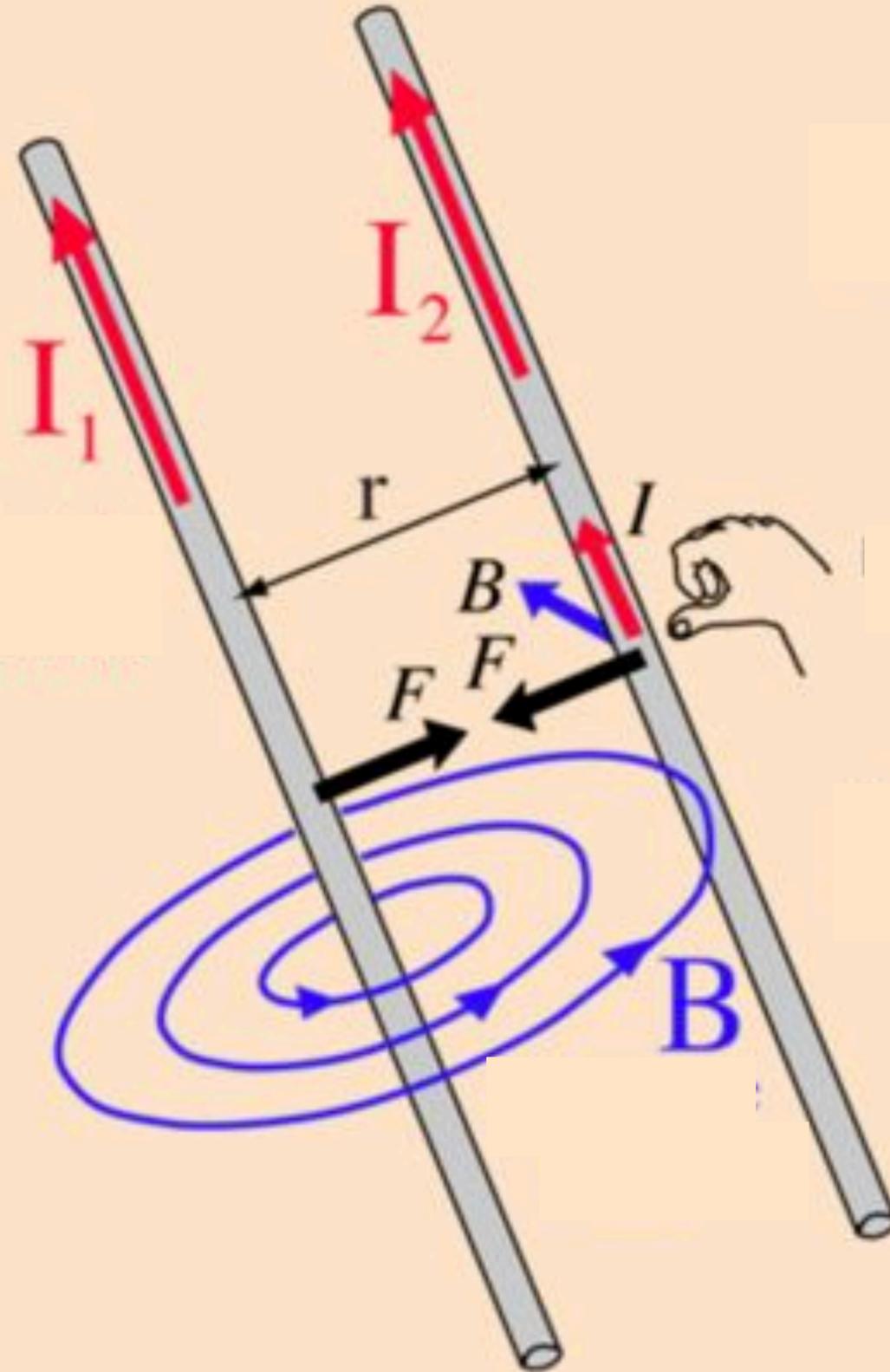
Un campo eléctrico ejerce una fuerza, que realiza trabajo, sobre una carga, en reposo o en movimiento.

Un campo magnético ejerce una fuerza, que no realiza trabajo, sobre una carga eléctrica en movimiento.



Fuerzas entre corrientes.

La ley de Biot y Savart y la fuerza de Lorentz permite explicar la fuerza de Ampère entre corrientes: corrientes en el mismo sentido se atraen y corrientes en sentidos diferentes, se repelen.



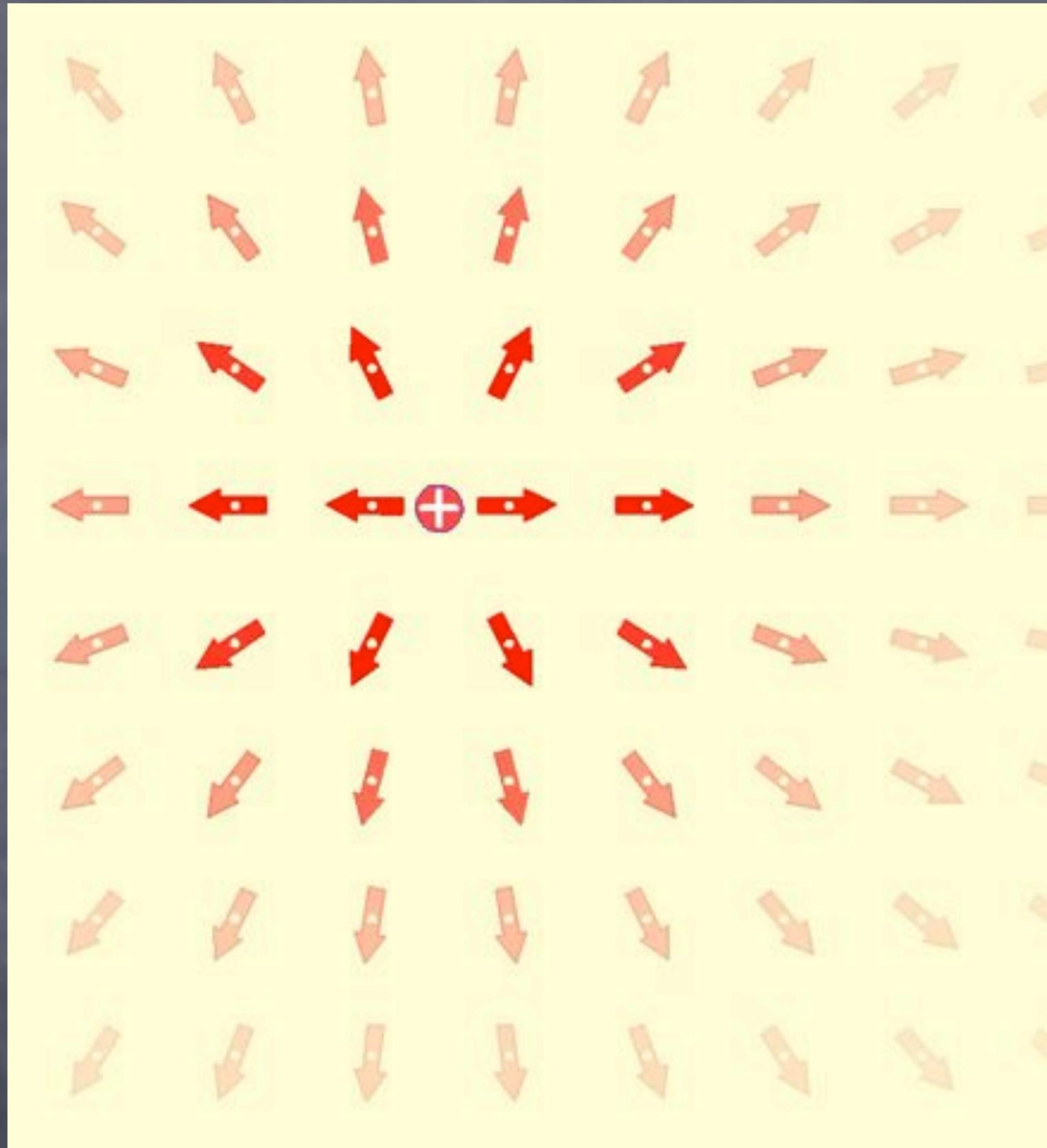
$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

$$F = I_2 \Delta L B$$

$$\frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

Campo eléctrico y campo magnético.

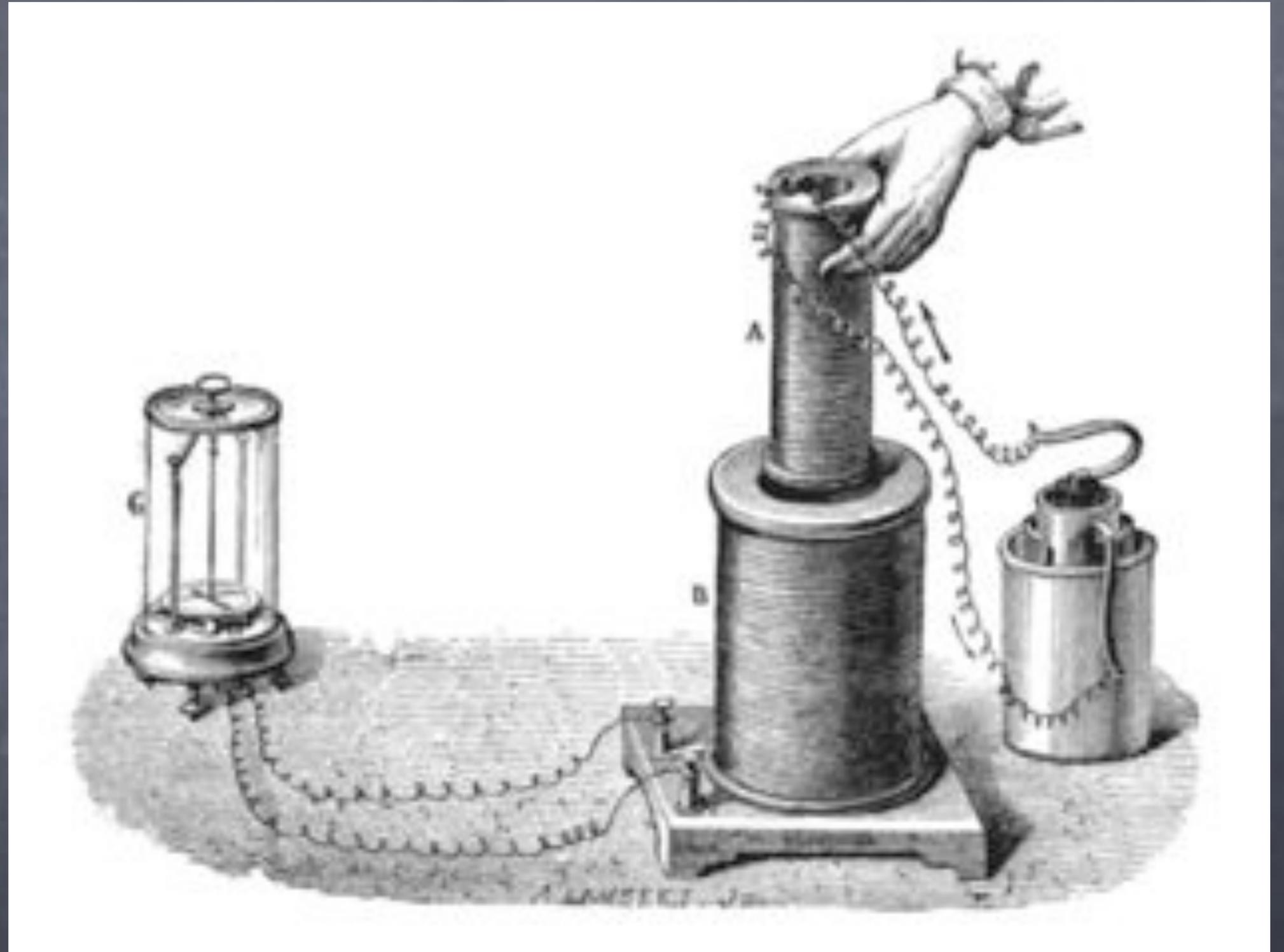
Faraday introdujo los conceptos de campo eléctrico y campo magnético.



Transformador de Faraday.

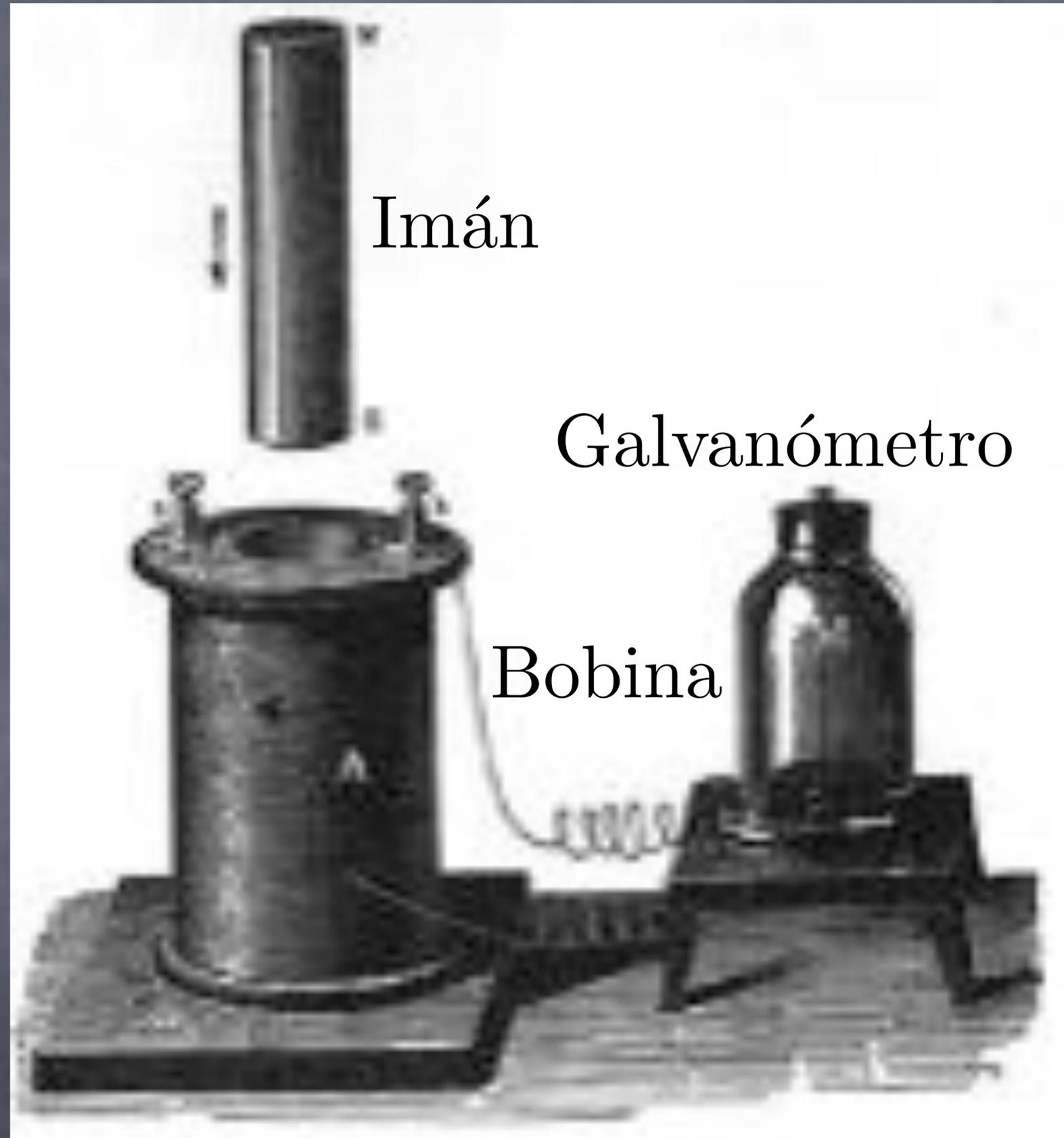
Cuando circula corriente cambiante por una de las bobinas, se induce corriente en la otra bobina.

Si la corriente en la primera bobina no cambia a lo largo del tiempo, no se induce corriente en la segunda bobina.

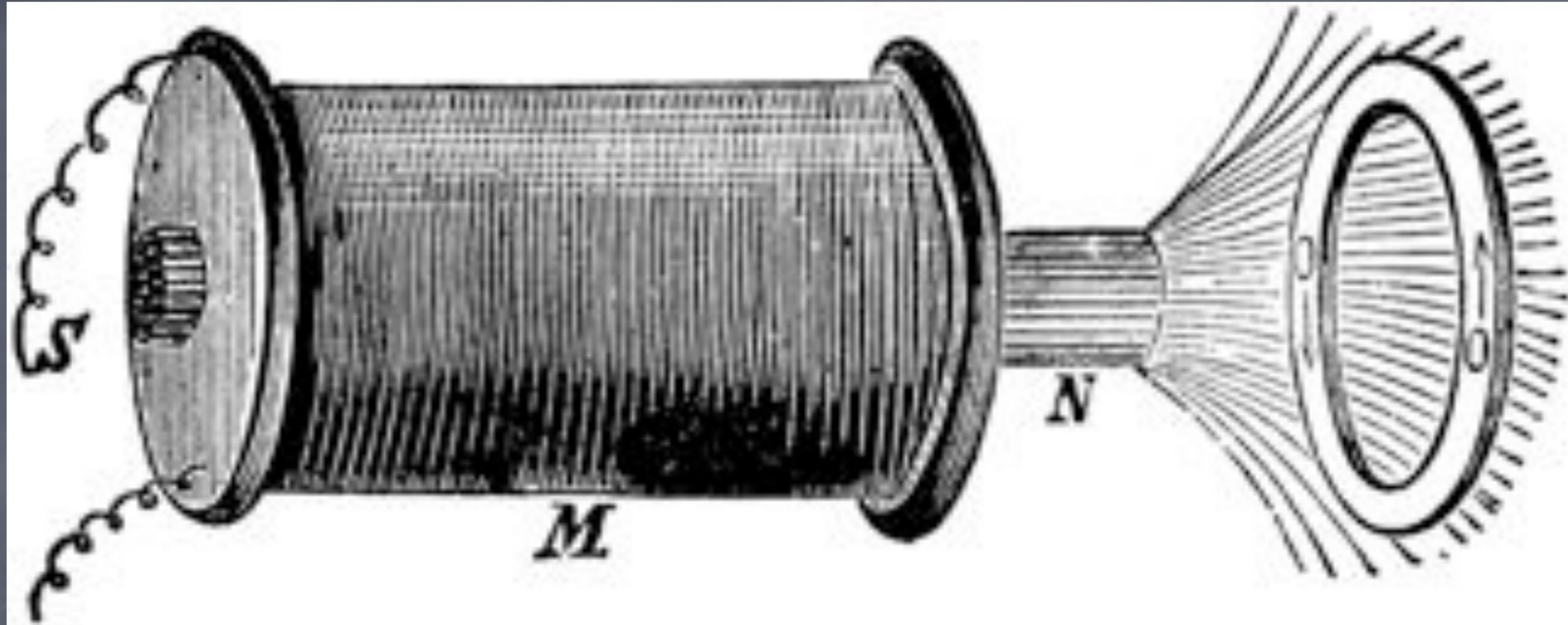


Principio de inducción de Faraday-Henry.

Convierte el movimiento de un imán en corriente eléctrica. Cuando cesa el movimiento del imán, cesa la producción de corriente (en este caso, corriente alterna si el imán está entrando y saliendo de la bobina). El movimiento de la aguja del galvanómetro permite comprobar que circula corriente.



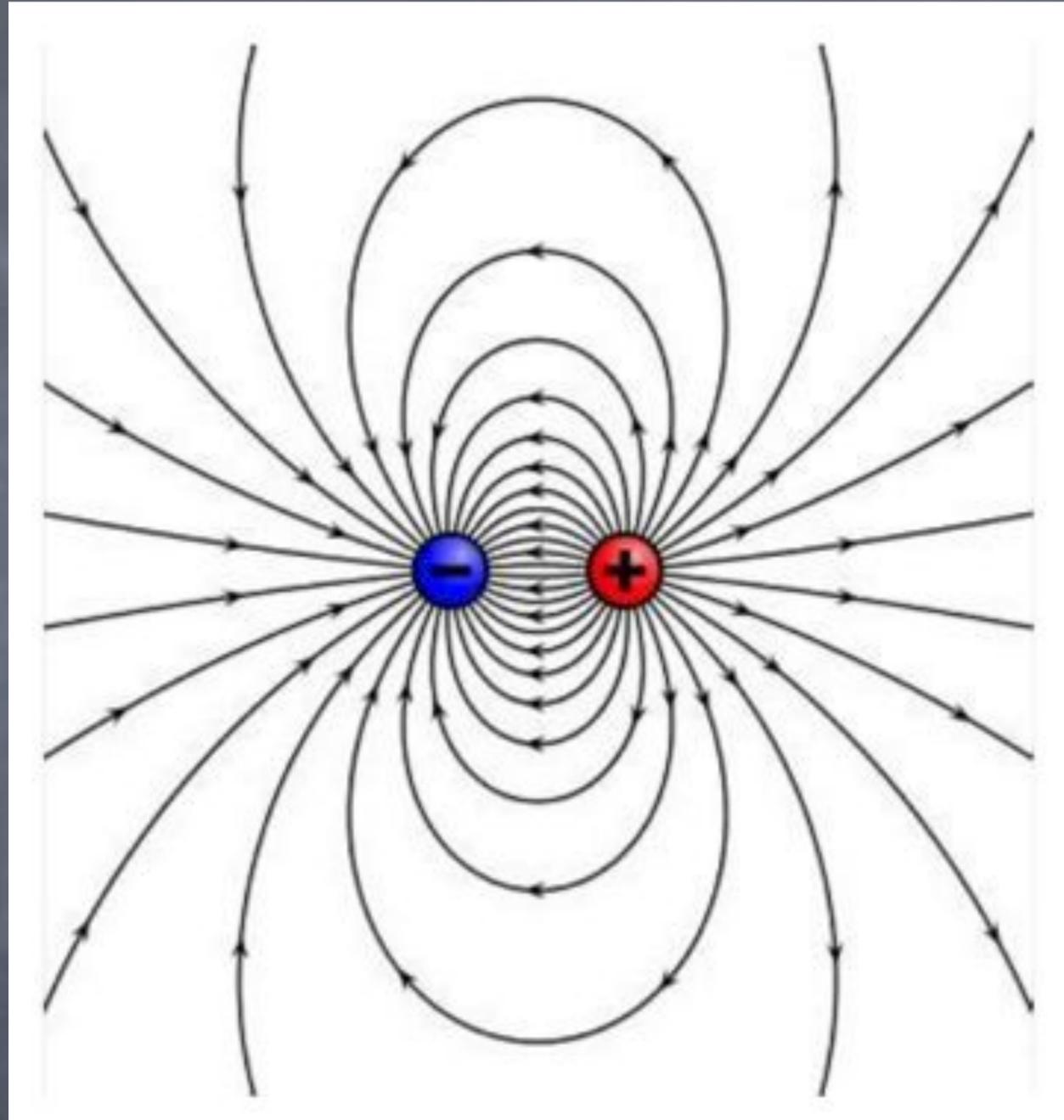
Ley de Lenz



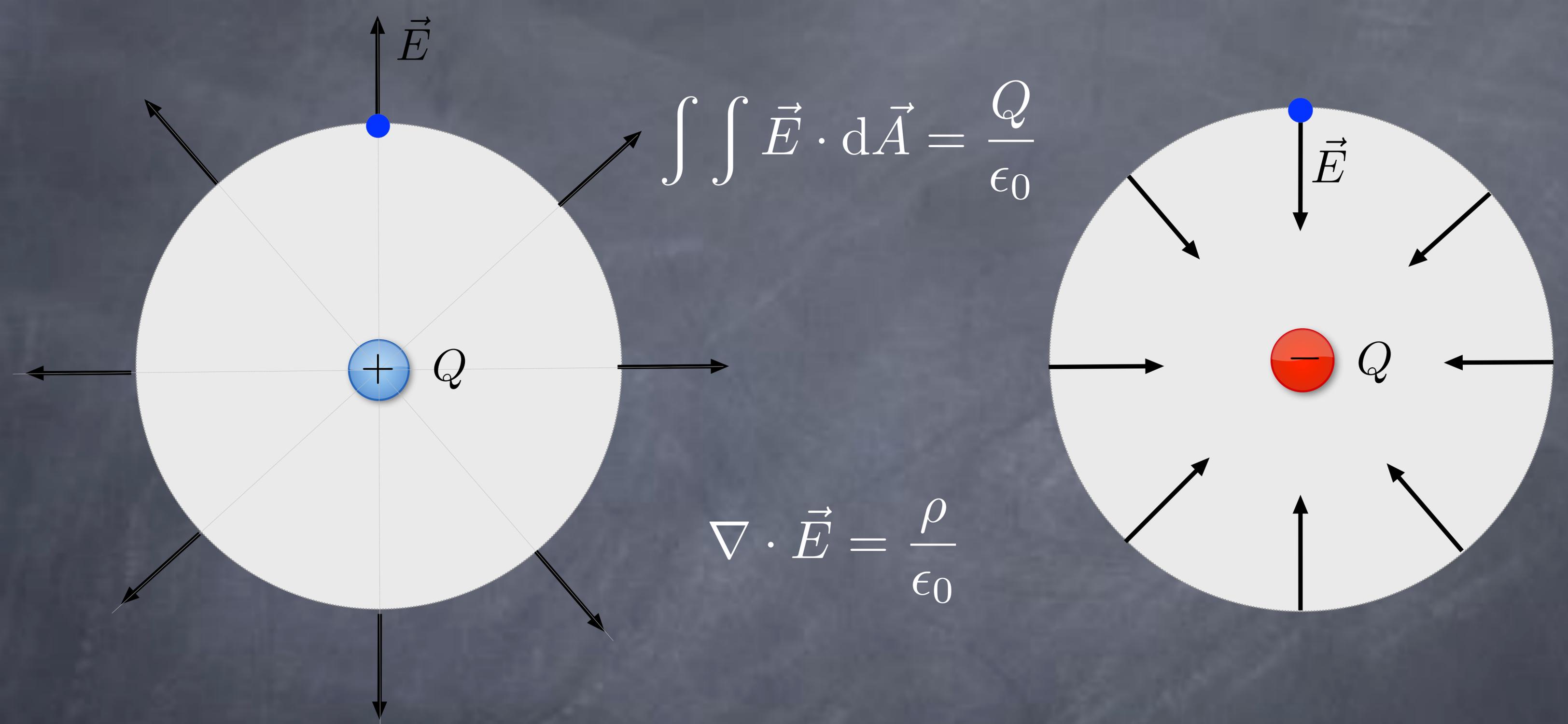
$$\epsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

El signo menos indica que la corriente inducida siempre se opone al efecto que la produce.

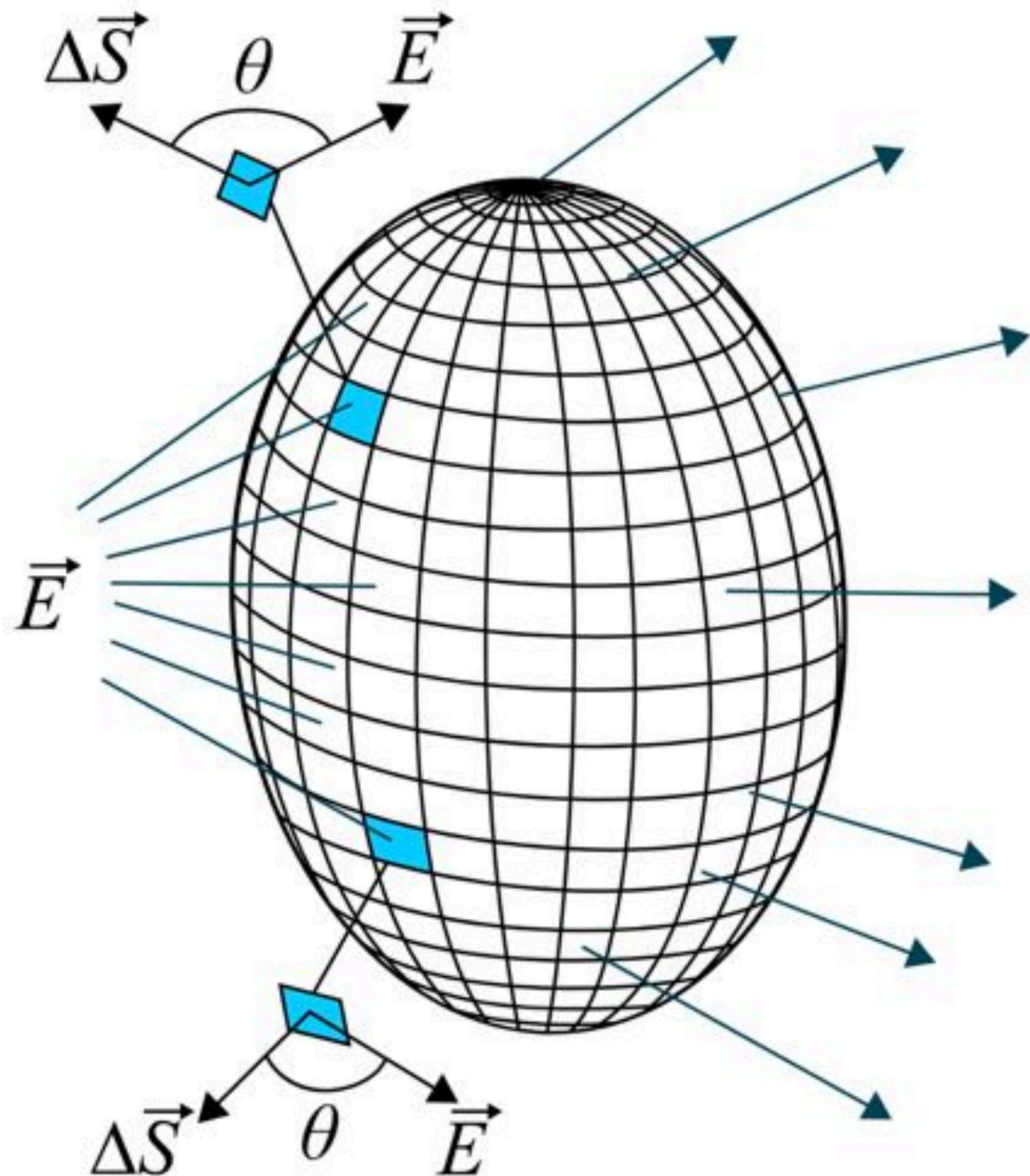
Campo eléctrico



Las cargas eléctricas, que existen por separado, son las fuentes (las positivas) y los sumideros (las negativas) del campo eléctrico.



Ley de Coulomb.
Ley de Gauss de la electrostática.
Las fuentes del campo eléctrico son las cargas eléctricas.

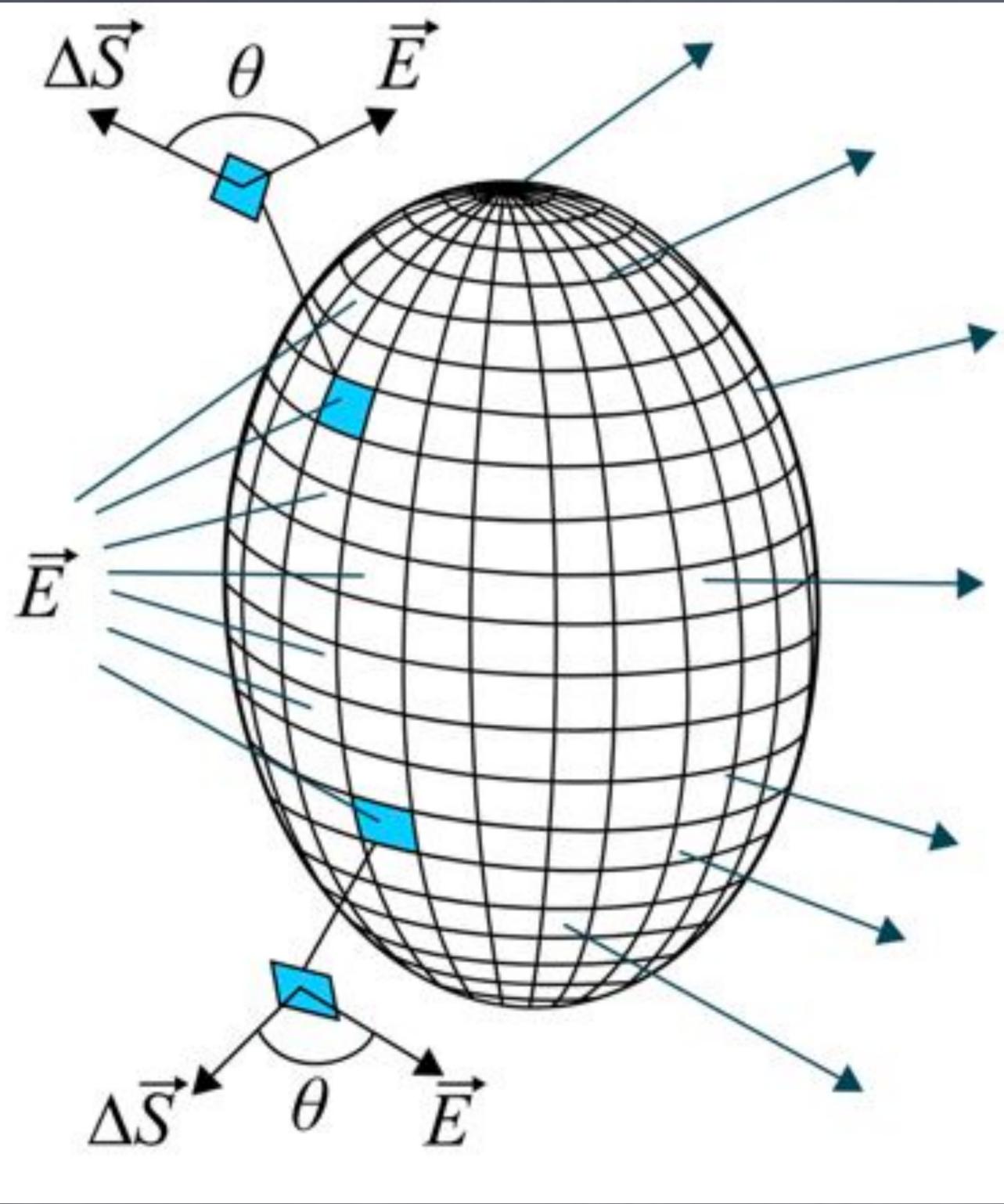


Teorema de Gauss

La integral de superficie de una fuerza es igual a la integral de volumen del gradiente de la fuerza.

$$\oint \vec{F} \cdot d\vec{A} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{F} dV$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{E} dV$$



Ley de Coulomb

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

$$\int_V \nabla \cdot \vec{E} \cdot dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

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

Ecuaciones de Maxwell

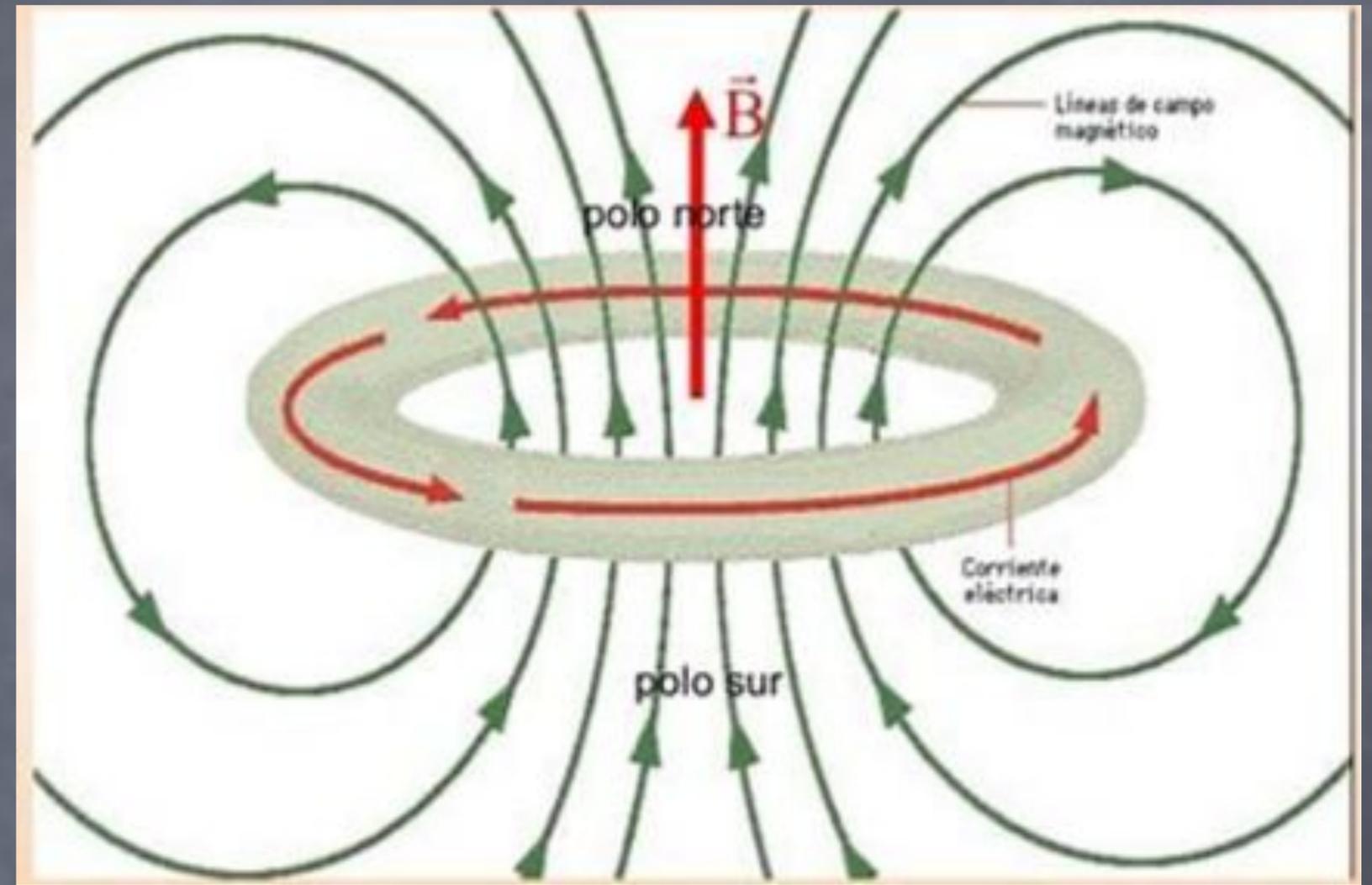
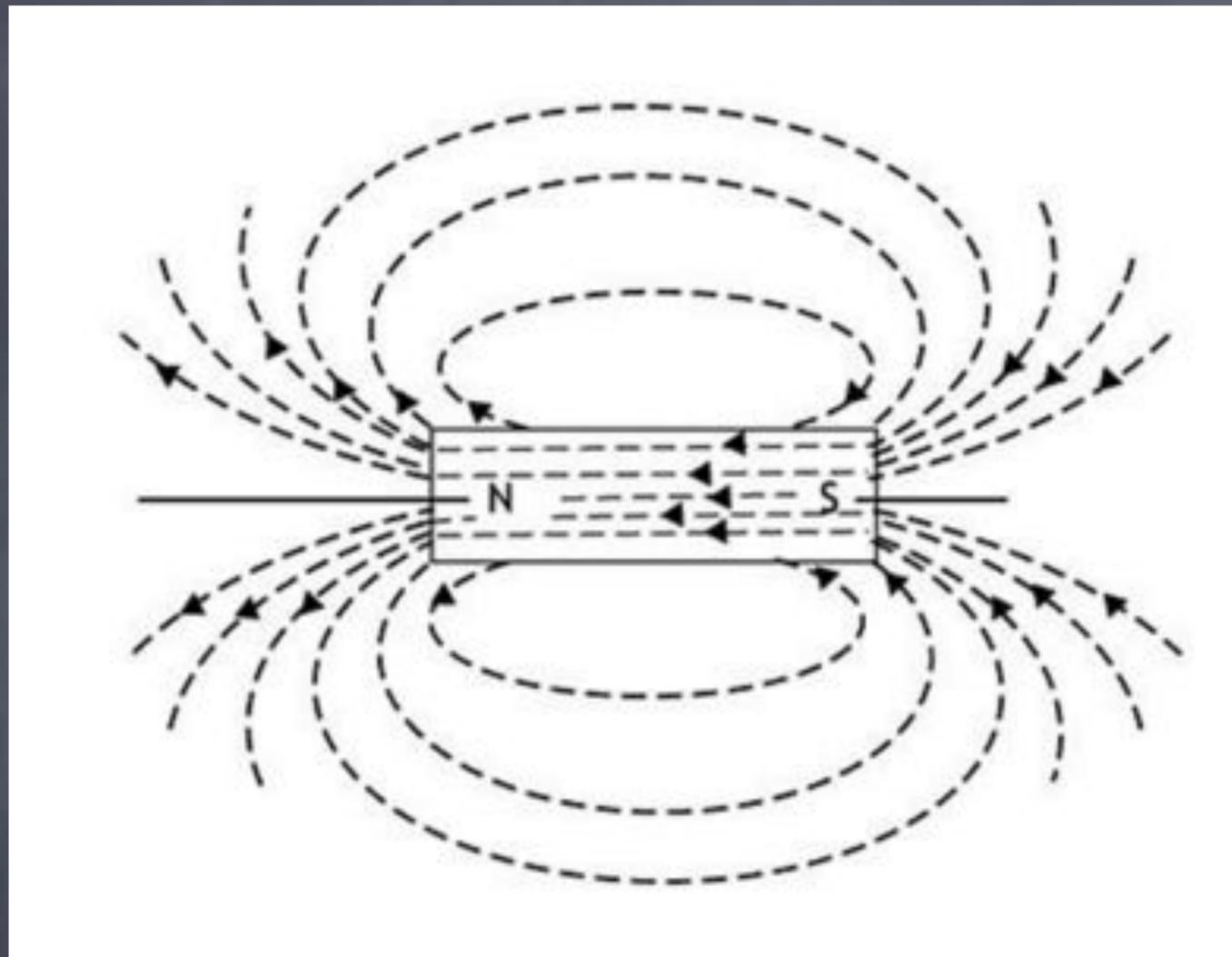
$$\iint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

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

Ley de Coulomb.

Ley de Gauss de la electrostática.

Las fuentes del campo eléctrico son las cargas eléctricas. La integral de superficie, de un volumen cerrado, del campo eléctrico da la cantidad de cargas en su interior.

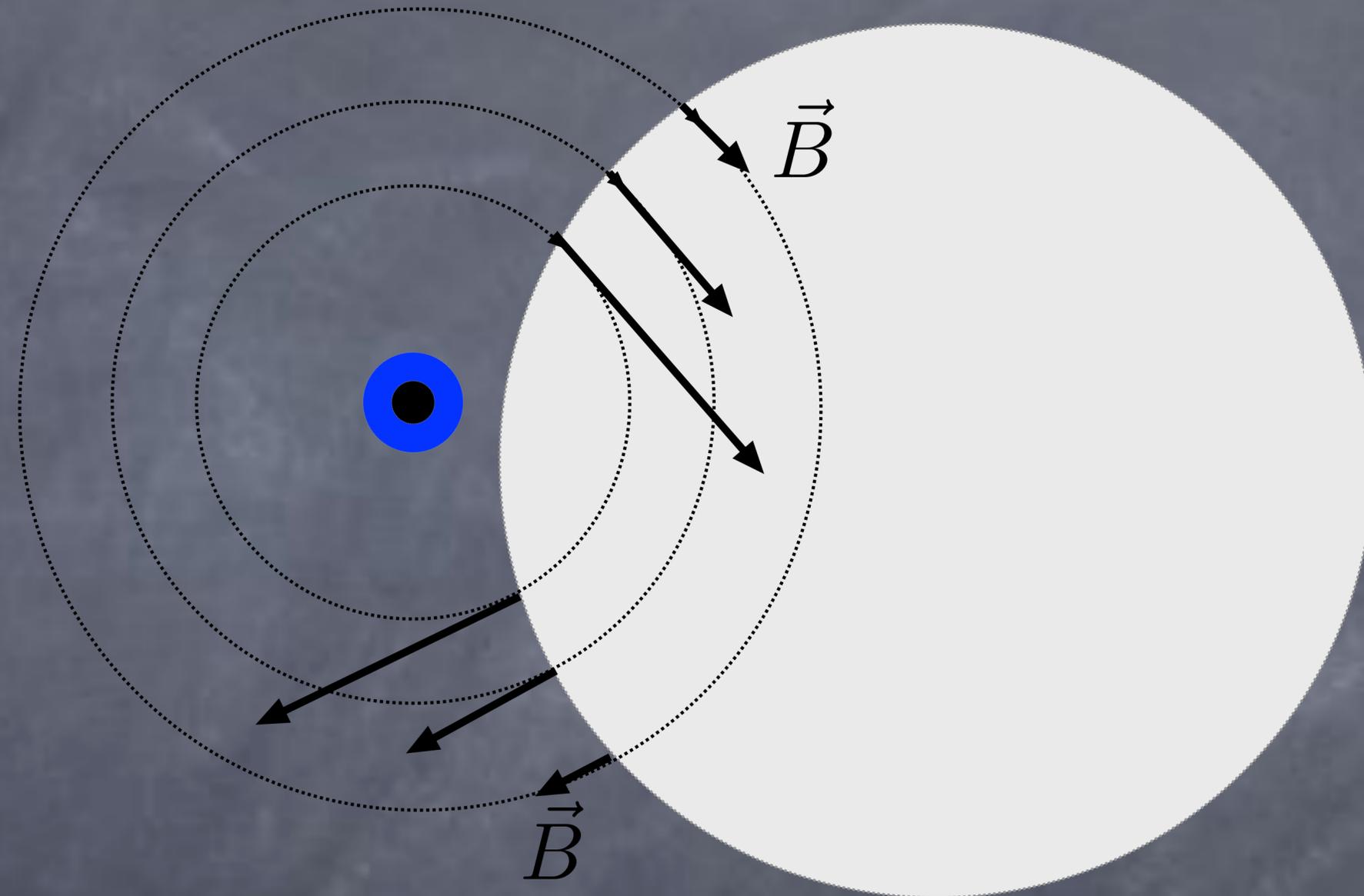


Ley de Gilbert.

Ley de Gauss del magnetismo.

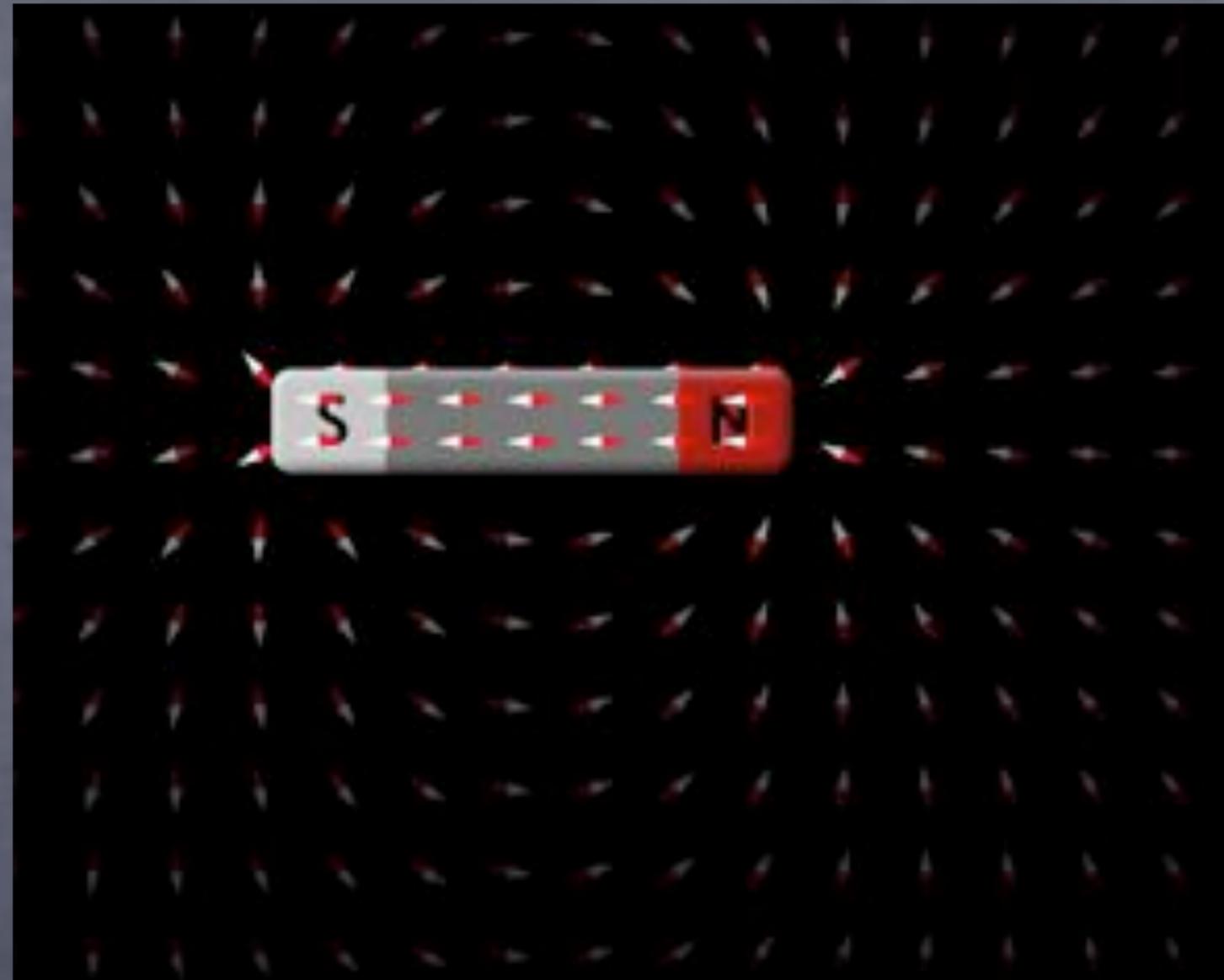
No existen los monopolos magnéticos. No hay fuentes ni sumideros de campo magnético.

$$\iint \vec{H} \cdot d\vec{A} = 0$$



Ley de Gilbert.
Ley de Gauss del magnetismo.
No existen los monopolos magnéticos. No hay fuentes de campo magnético.

$$\int \int \vec{H} \cdot d\vec{A} = 0$$



Ley de Gilbert.

Ley de Gauss del magnetismo.

Las líneas de campo magnético son cerradas.

Ecuaciones de Maxwell

$$\iint \vec{H} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

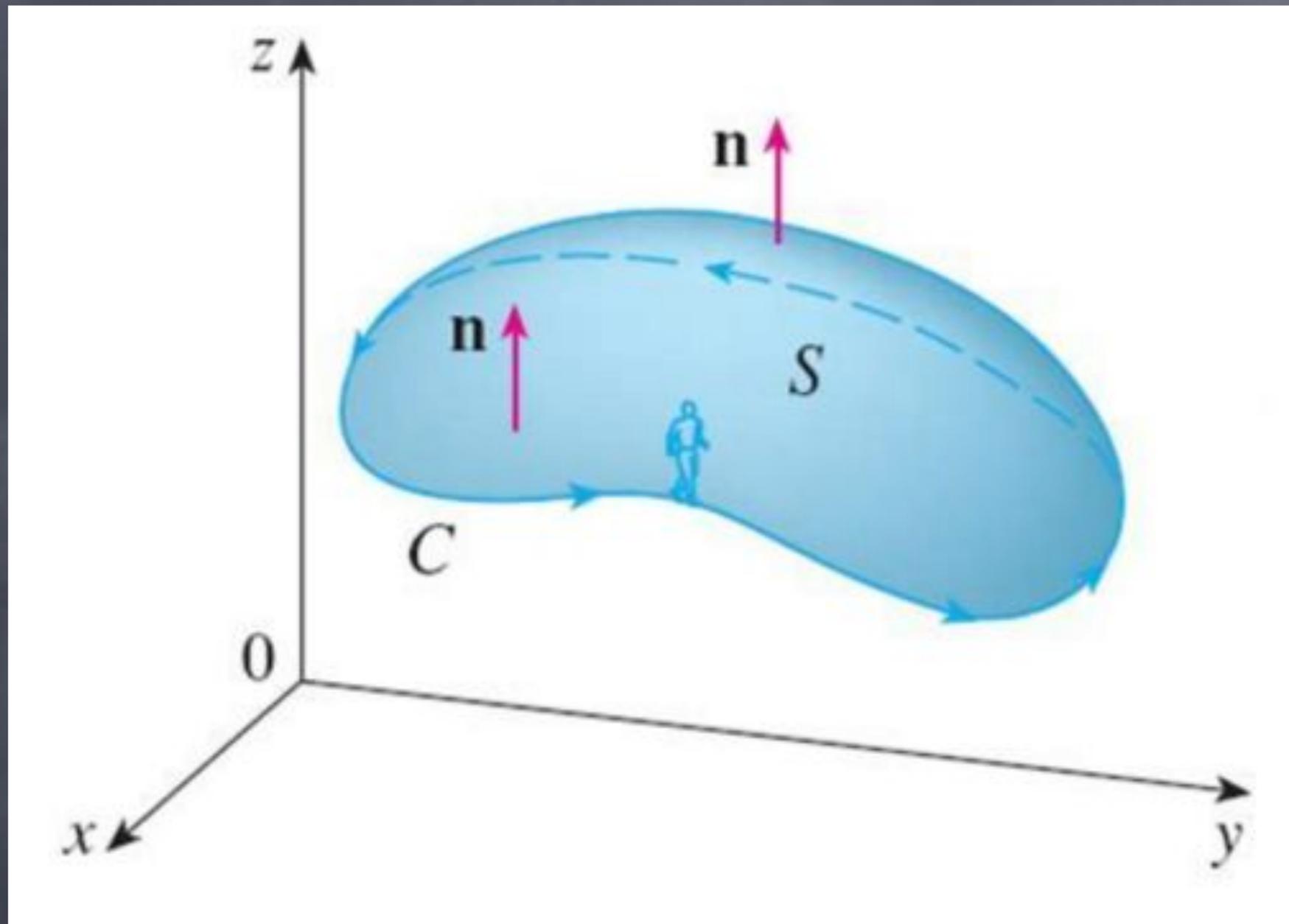
Ley de Gilbert.

Ley de Gauss del magnetismo.

No existen los monopolos magnéticos. No hay fuentes ni sumideros de campo magnético.

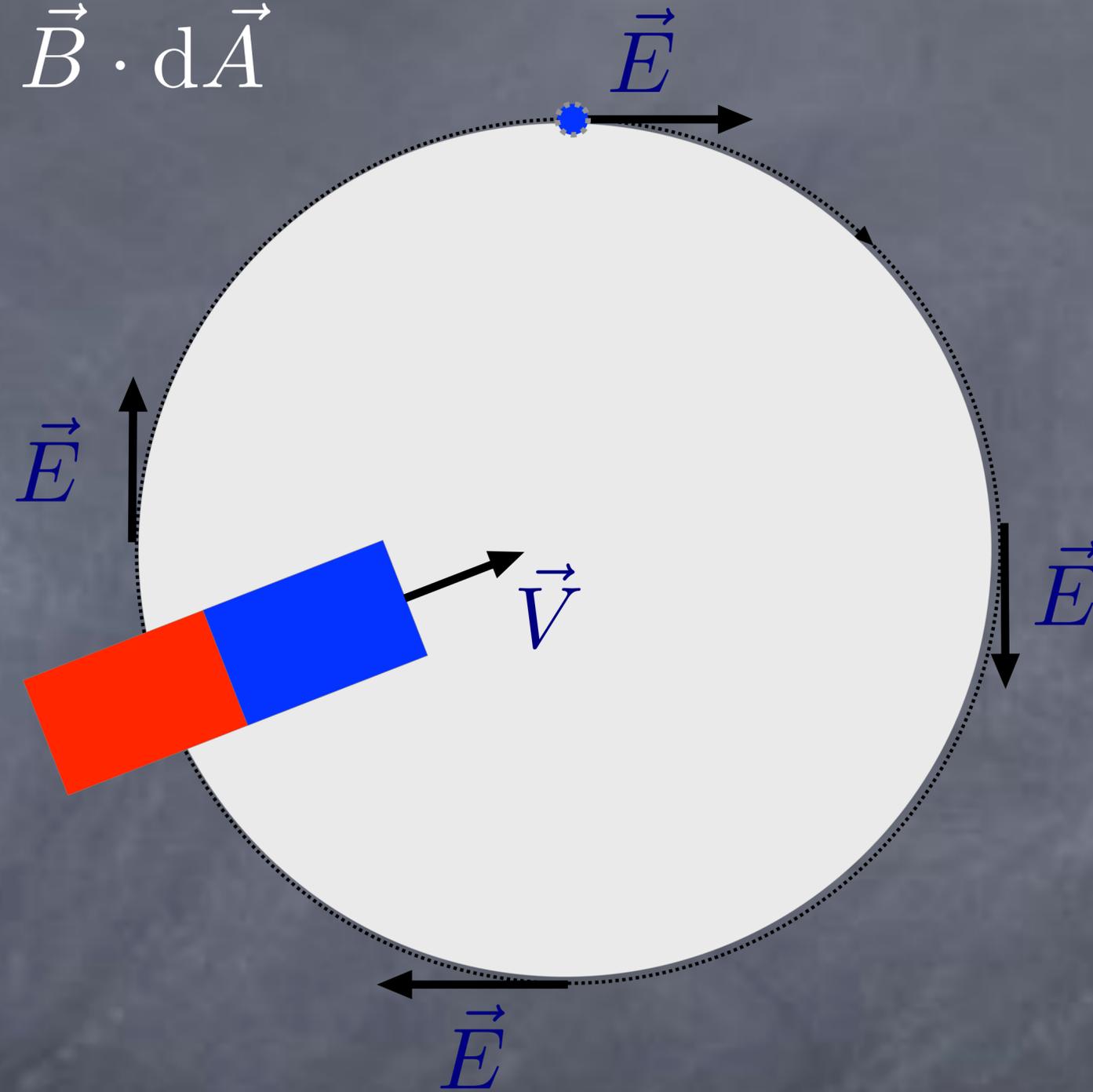
Teorema de Stokes

La integral de línea de una fuerza es igual a la integral de superficie de su rotacional.



$$\oint \vec{F} \cdot d\vec{L} = \int \int_A \nabla \times \vec{F} dS$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$



Principio de inducción de Faraday.

Para producir corriente eléctrica debe variar en el tiempo el flujo magnético (el imán debe estar moviéndose)

Ecuaciones de Maxwell

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint_S \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

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

Principio de inducción de Faraday.

Para producir corriente eléctrica debe variar en el tiempo el flujo magnético (el imán debe estar moviéndose)

Ecuaciones de Ampere-Maxwell

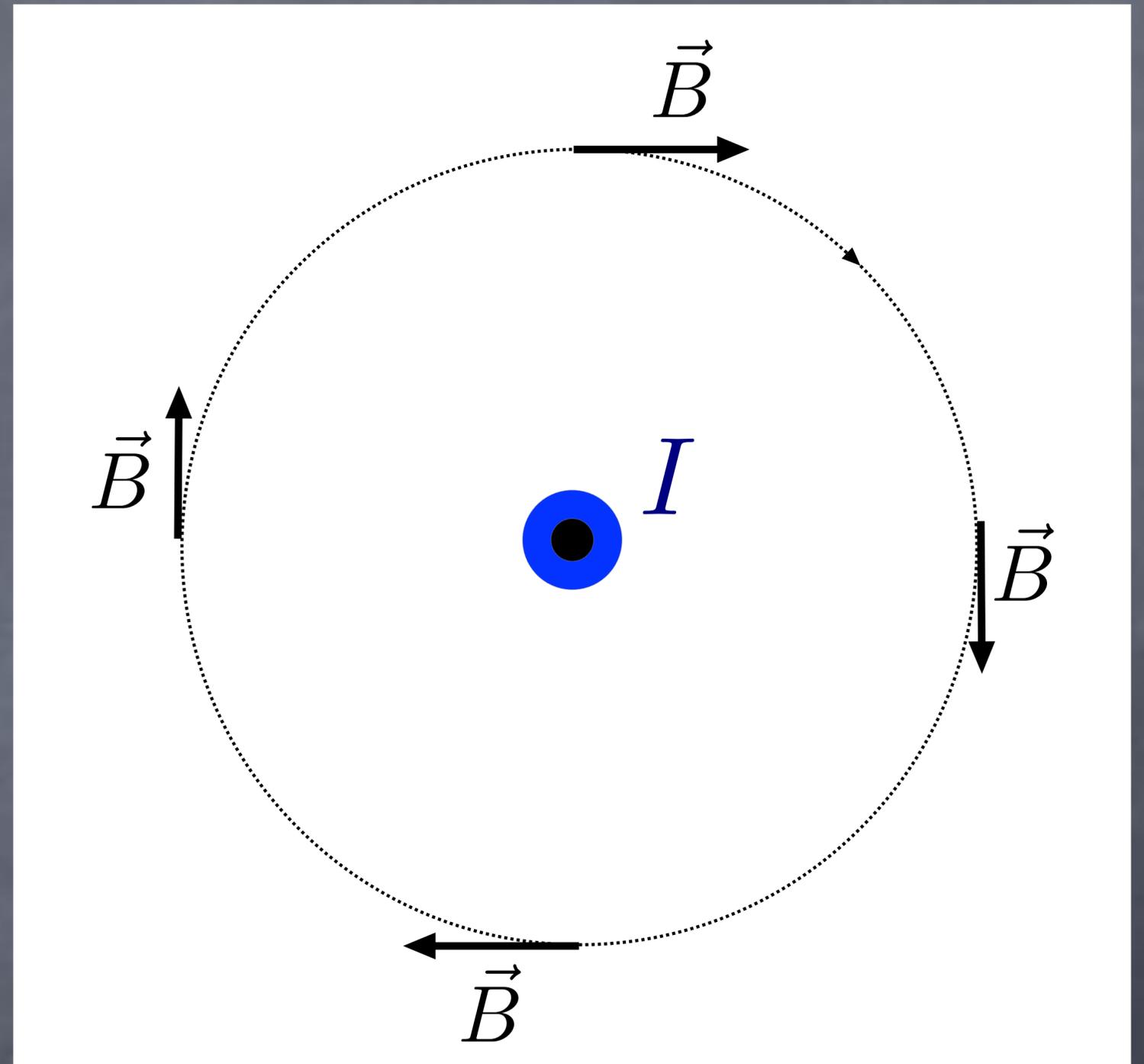
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

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

Ley de Ampere y corriente de desplazamiento de Maxwell.
Se puede producir un campo magnético mediante una corriente eléctrica o un campo eléctrico variable en el tiempo.

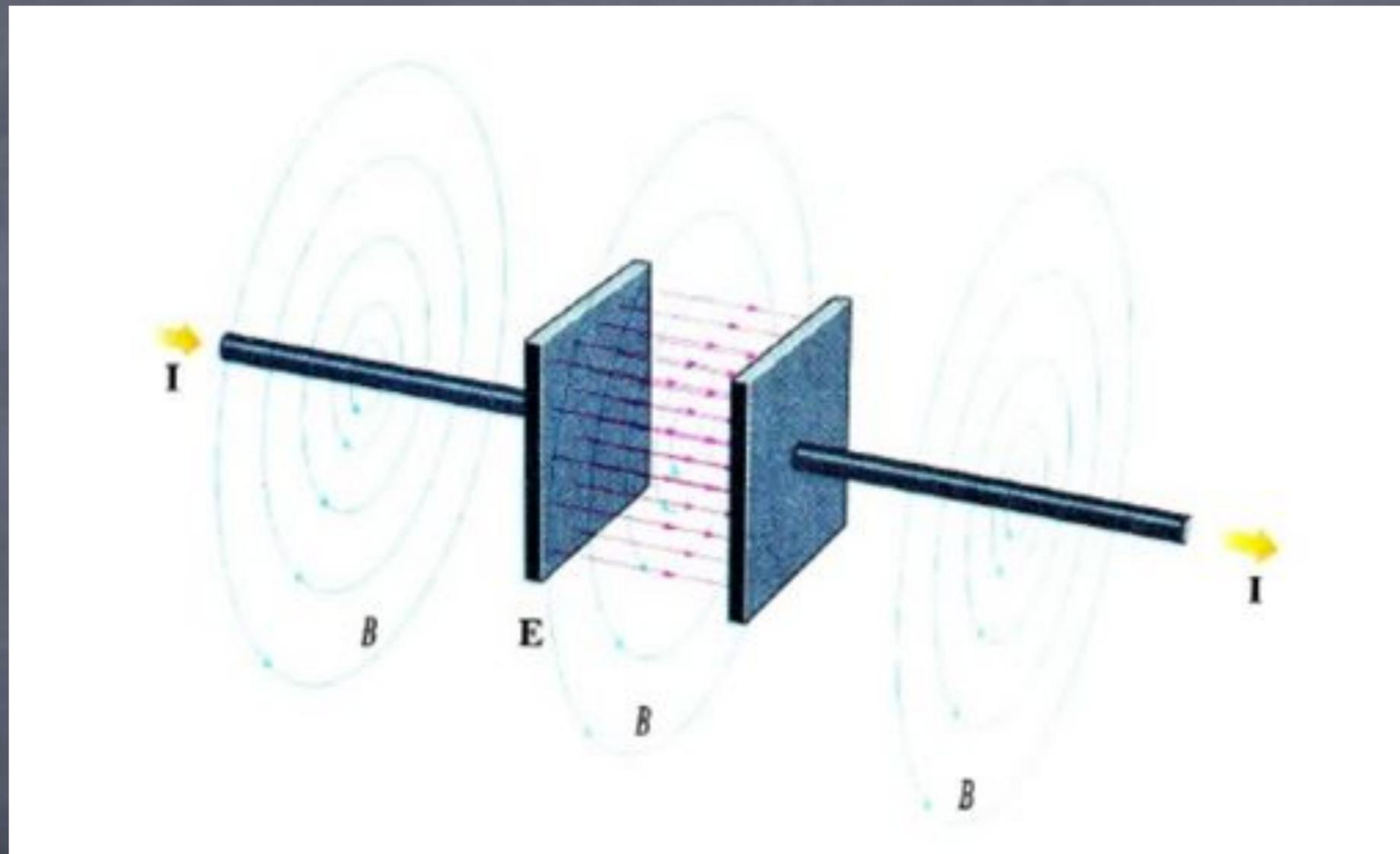
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I$$



Ley de Ampère.

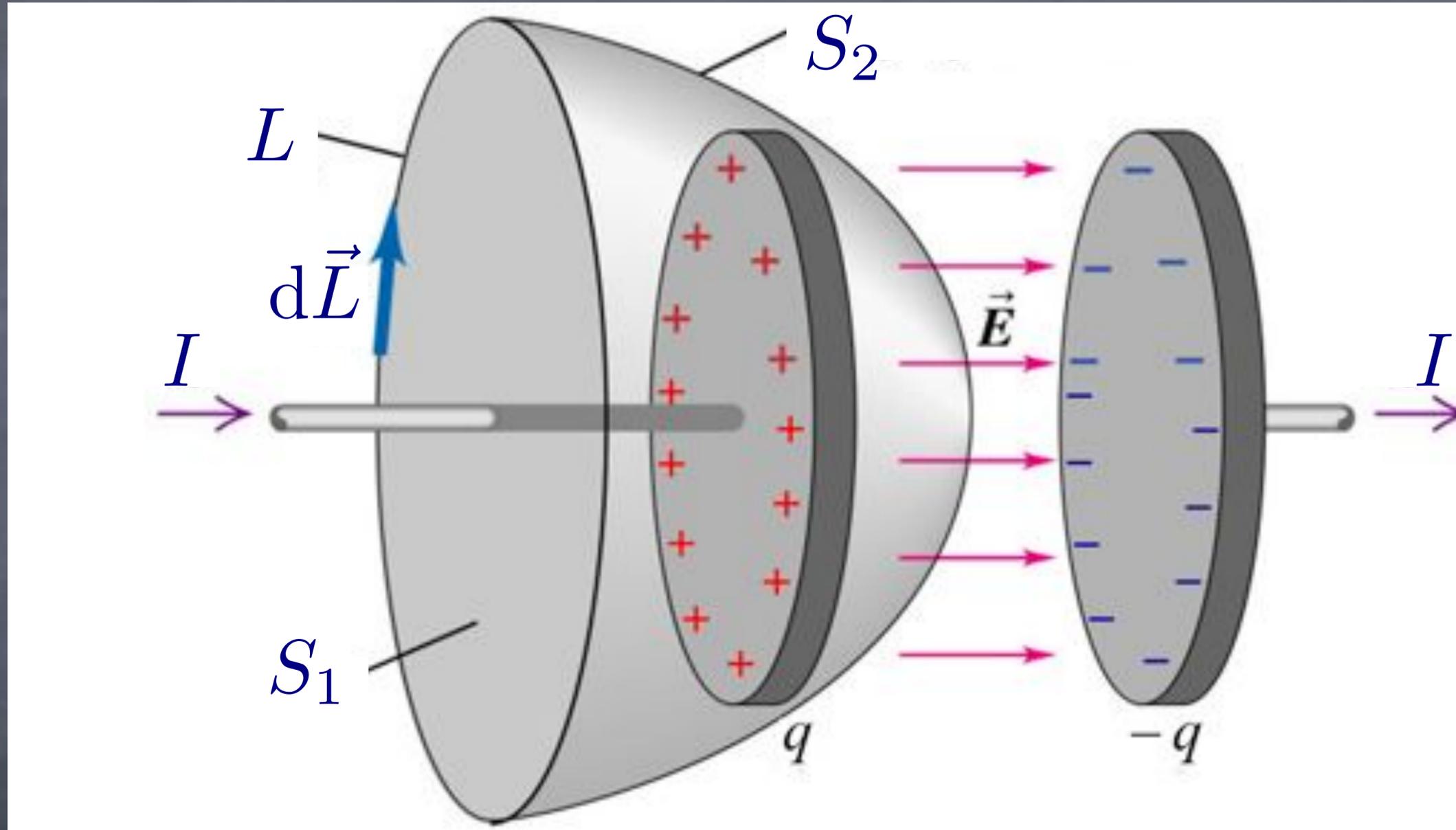
Se puede producir un campo magnético mediante una corriente eléctrica o un campo eléctrico variable en el tiempo.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$



Corriente de desplazamiento de Maxwell.
Se puede producir un campo magnético mediante una corriente eléctrica o un campo eléctrico variable en el tiempo.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$



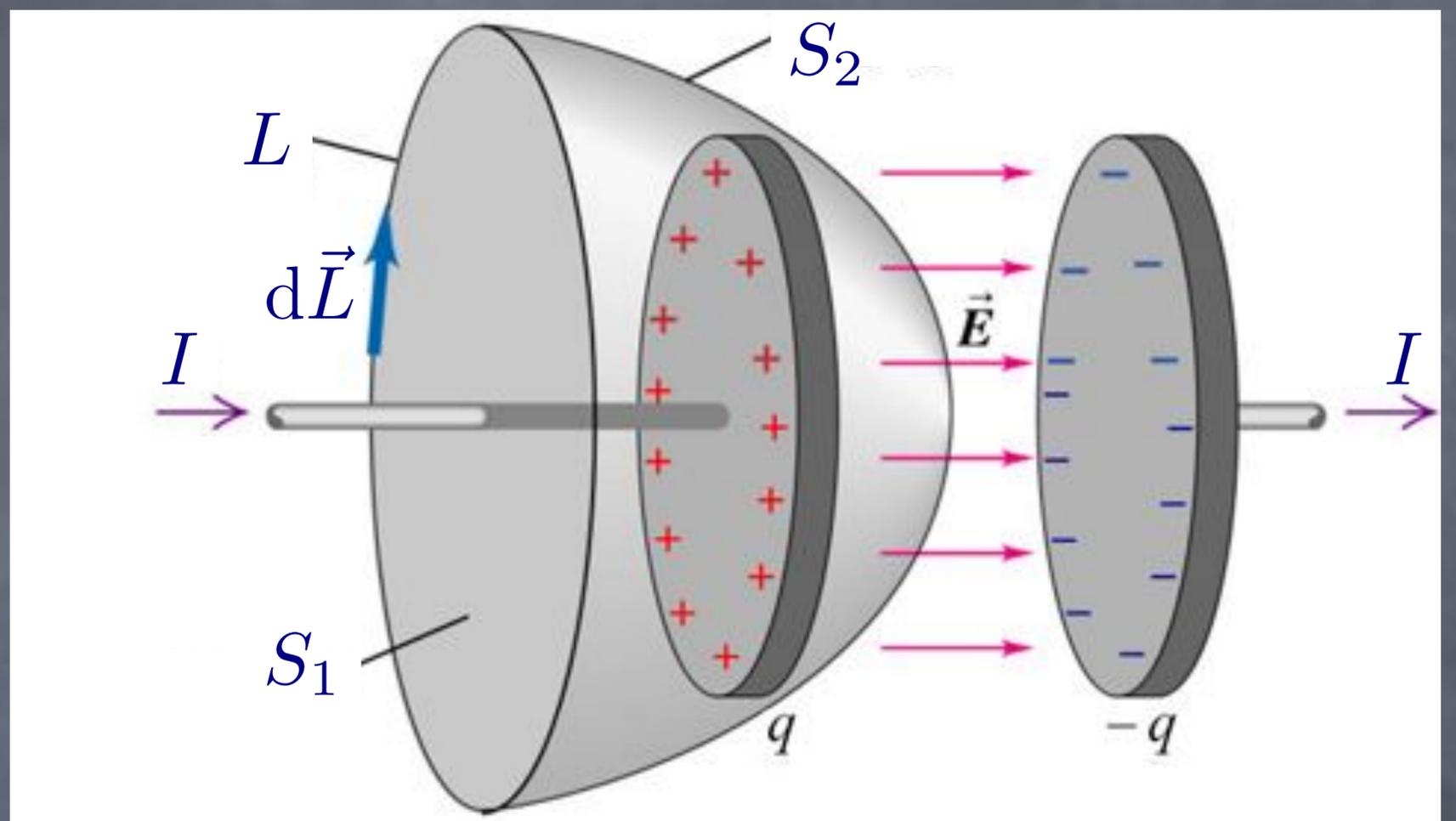
Corriente de desplazamiento de Maxwell.
Se puede producir un campo magnético mediante una corriente eléctrica o un campo eléctrico variable en el tiempo.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

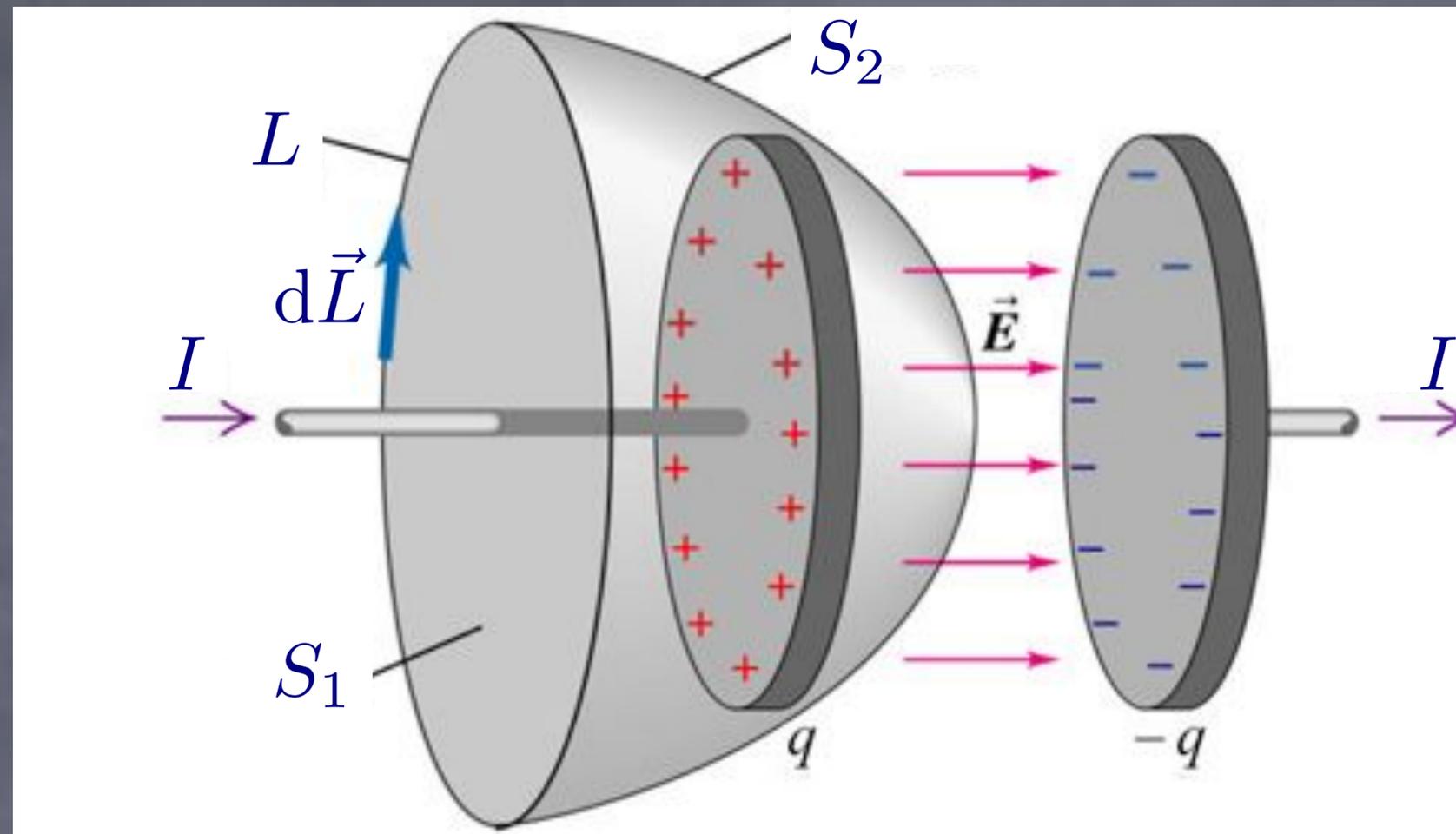
$$\int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_A \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\frac{d}{dt} \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{I}{\epsilon_0}$$



$$\epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = I$$

Corriente de desplazamiento de Maxwell.



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

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

Corriente de desplazamiento de Maxwell.

Ecuaciones de Maxwell-Heaviside

Coulomb

$$\iint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

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

No monopolos magnéticos

$$\iint \vec{H} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

Principio de inducción de Faraday

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

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

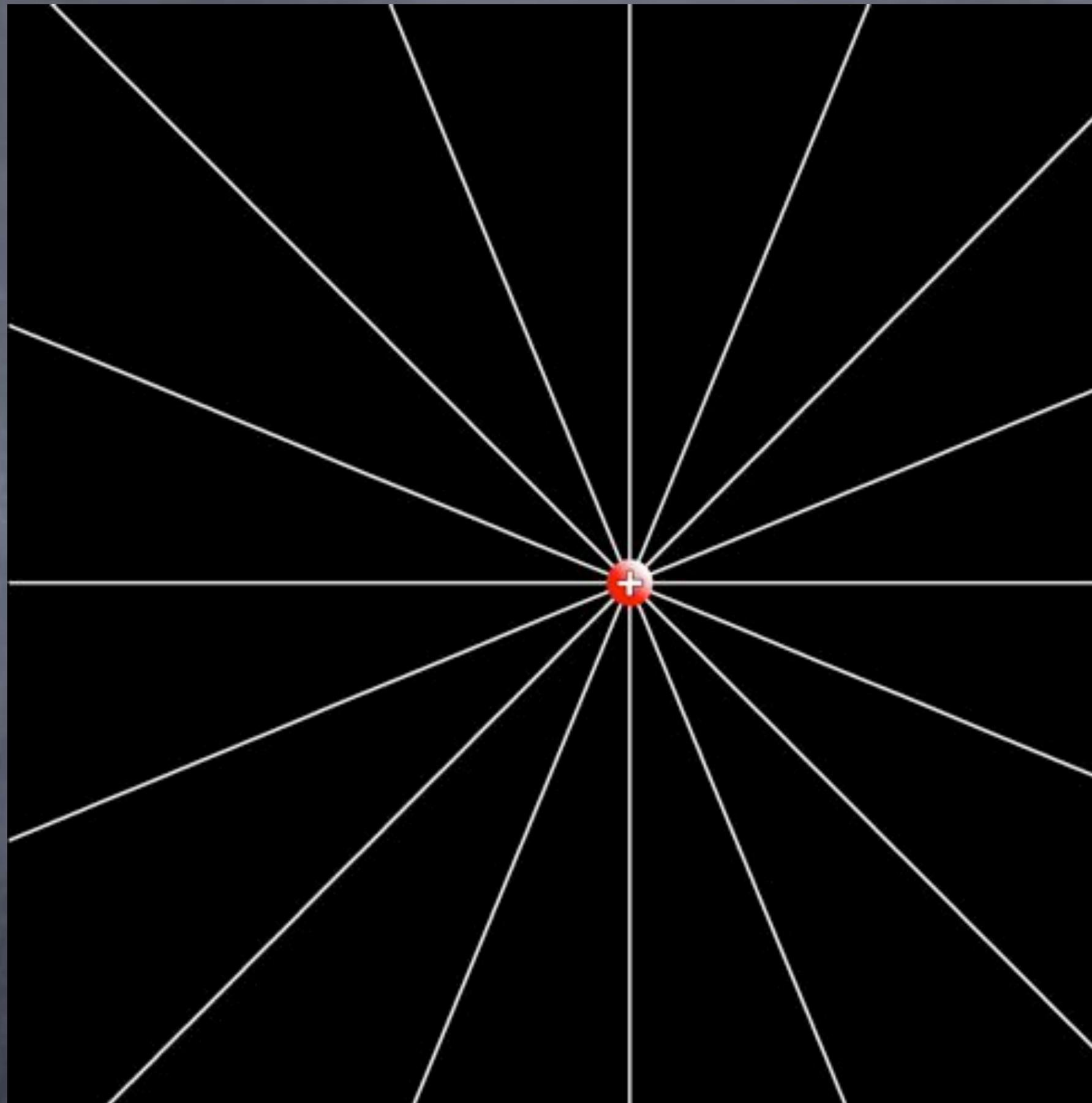
Ecuación Ampère-Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

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

Ondas electromagnéticas

Cuando una carga eléctrica oscila se produce una perturbación del campo electromagnético que se propaga a la velocidad de la luz.



Ondas electromagnéticas

•
Cuando una carga
eléctrica acelera
se produce una
perturbación del
campo
electromagnético
que se propaga a
la velocidad de la
luz.

Una carga
acelerada emite
energía en forma
de radiación em.



Ondas electromagnéticas.

Cuando una carga oscila se produce una perturbación del campo electromagnético que se propaga a la velocidad de la luz.

Ausencia de cargas y de corrientes.

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

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

Ausencia de cargas y de corrientes.

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

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

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

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

Ecuación de una onda electromagnética.

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

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

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

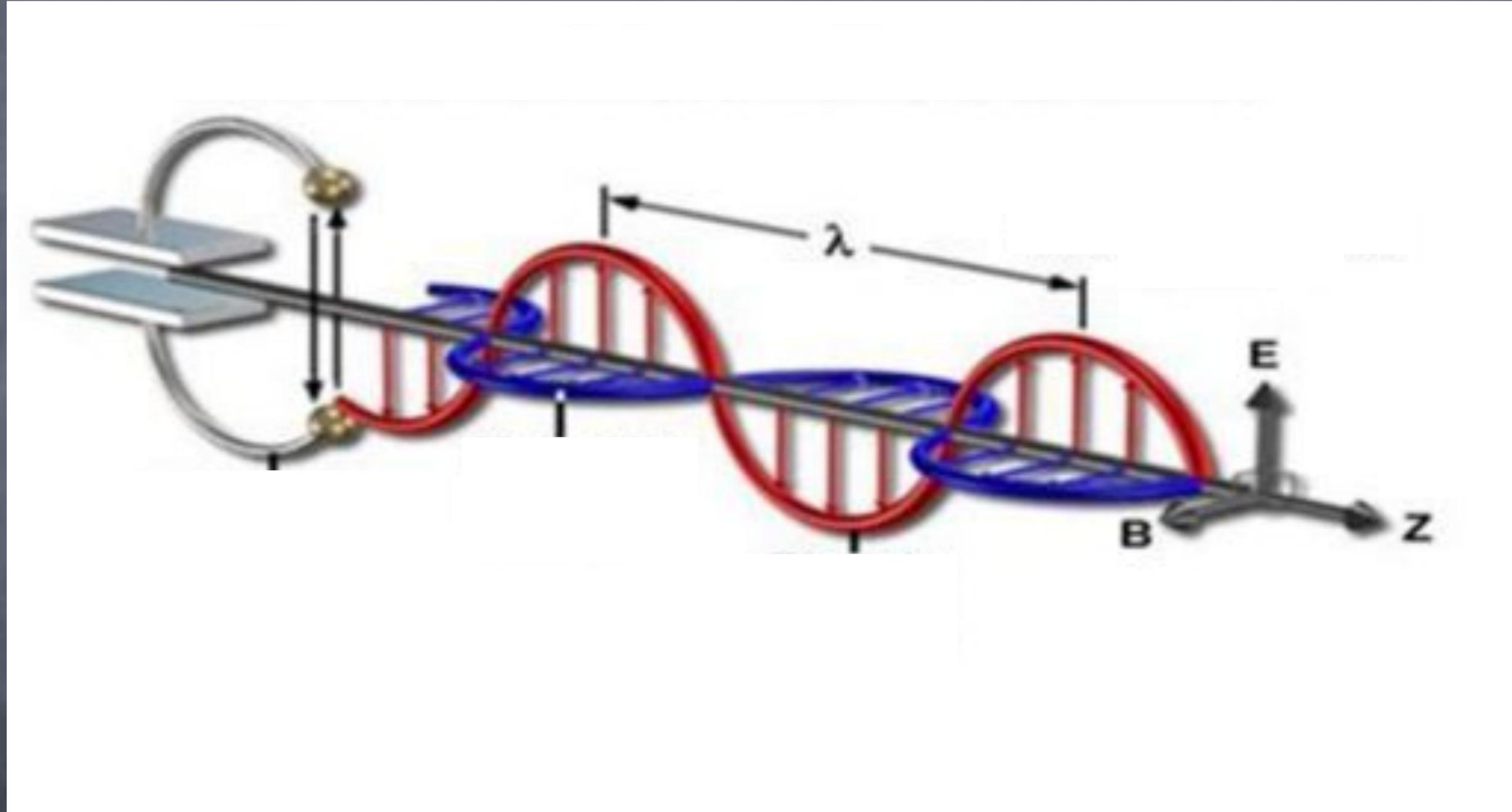
$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\begin{aligned} c &= (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2} = [(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m kg C}^{-2})(8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^{-2} \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3})]^{-1/2} = \\ &= 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

Huygens y Maxwell

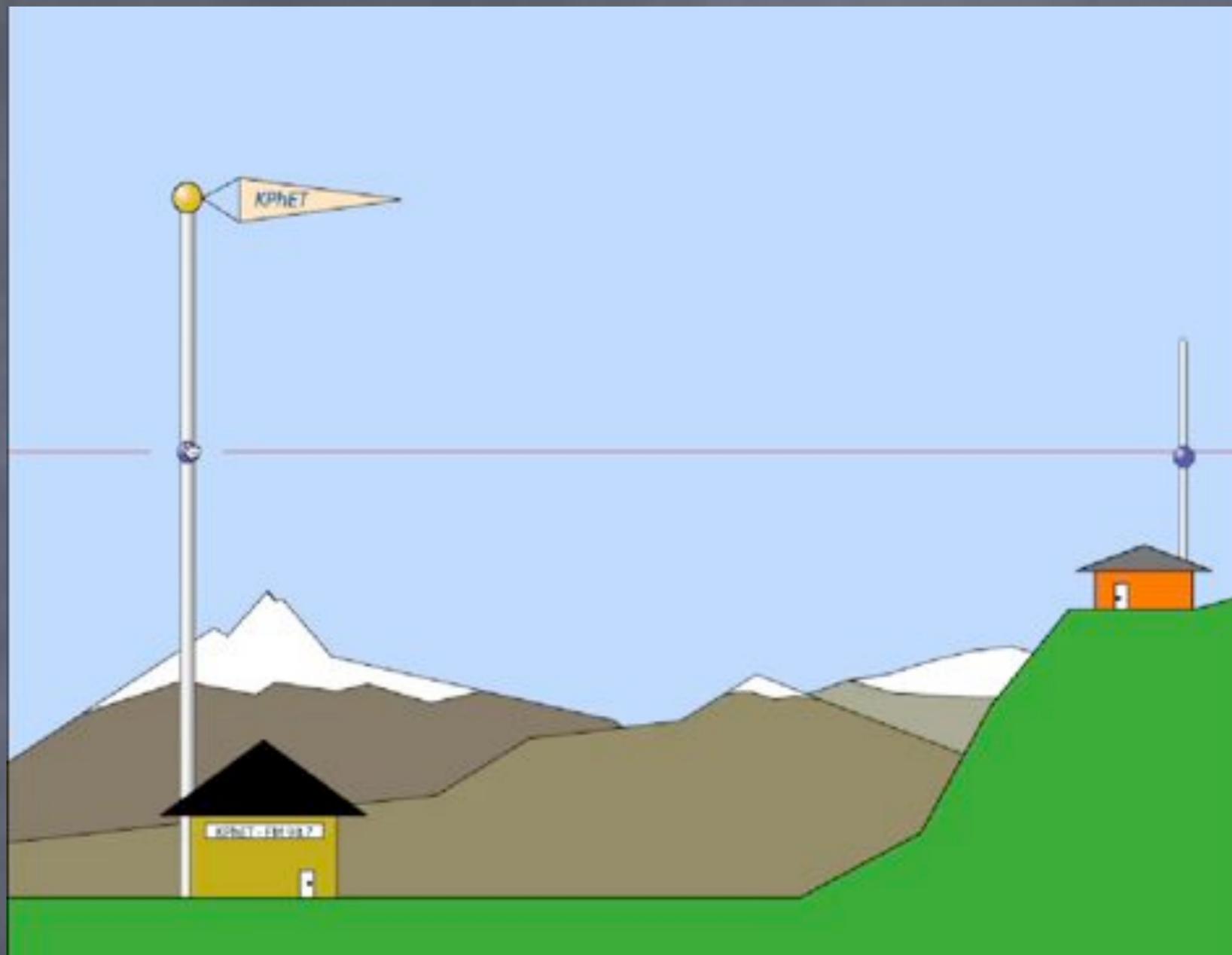
La luz como onda electromagnética transversal.

El campo eléctrico y el campo magnético oscilan en planos perpendiculares





Experiencia de Hertz para producir y detectar ondas de Maxwell.



Ondas de radio.

Cuando una carga es frenada se produce una perturbación del campo electromagnético que se propaga a la velocidad de la luz.