

# Radiación Electromagnética

La traza luminosa del  
Universo

Carlos Román Zúñiga



**Luz.** ¿qué es  
y de dónde  
proviene?





# Luz. ¿qué es y de dónde proviene?



- ❖ Es magia: la luz es un fenómeno inexplicable
- ❖ Es un fenómeno asociado con la ausencia de oscuridad en ciertas regiones del Universo y cómo se compensa con zonas que emiten luz para llegar a un equilibrio.
- ❖ Es un fenómeno asociado con los átomos. Es radiación emitida por los núcleos que viaja a través del espacio. No nos hace daño porque su potencia disminuye como el cuadrado de la distancia.
- ❖ Es un fenómeno asociado con los campos electromagnéticos y también es un fenómeno asociado con procesos a nivel atómico.



# Luz. ¿qué es y de dónde proviene?



- ❖ Es un fenómeno asociado con la ausencia de oscuridad en ciertas regiones del Universo y cómo se compensa con zonas que emiten luz para llegar a un equilibrio.
- ❖ Es un fenómeno asociado con los átomos. Es radiación emitida por los núcleos que viaja a través del espacio. No nos hace daño porque su potencia disminuye como el cuadrado de la distancia.
- ❖ Es un fenómeno asociado con los campos electromagnéticos y también es un fenómeno asociado con procesos a nivel atómico.



# Luz. ¿qué es y de dónde proviene?



- ❖ Es un fenómeno asociado con los átomos. Es radiación emitida por los núcleos que viaja a través del espacio. No nos hace daño porque su potencia disminuye como el cuadrado de la distancia.
- ❖ Es un fenómeno asociado con los campos electromagnéticos y también es un fenómeno asociado con procesos a nivel atómico.

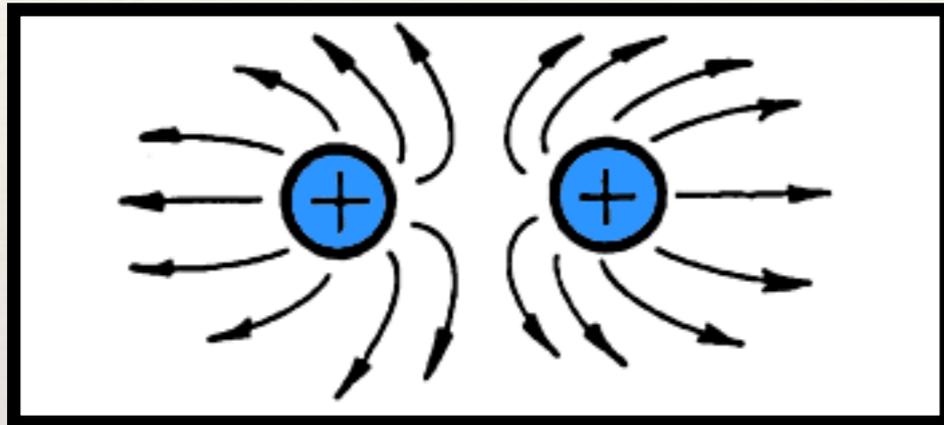
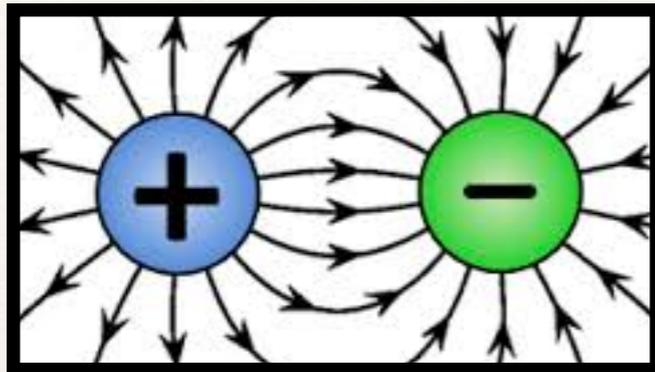


# Luz. ¿qué es y de dónde proviene?

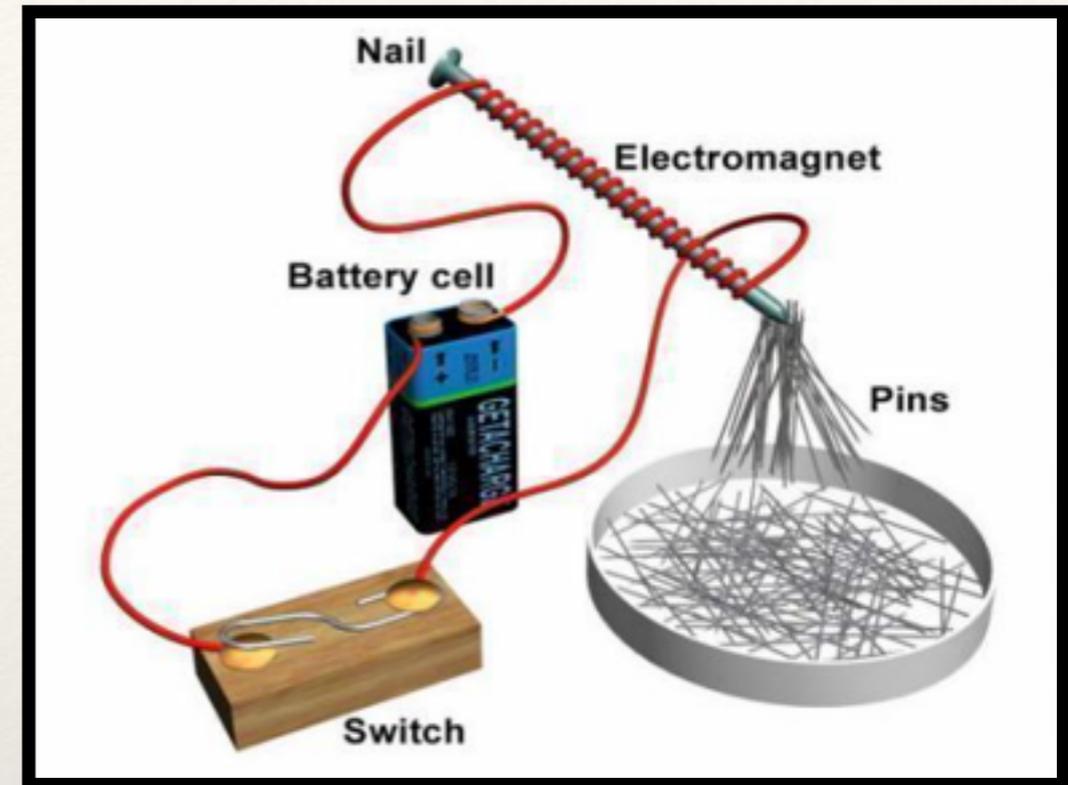


- ❖ Es un fenómeno asociado con los campos electromagnéticos y también es un fenómeno asociado con procesos a nivel atómico.

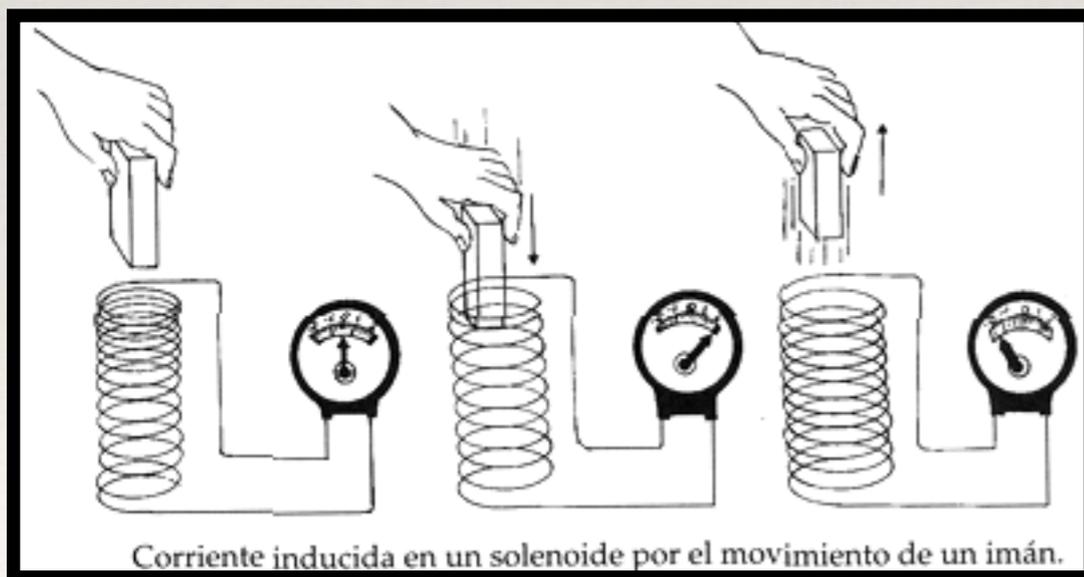
# ABC del Electromagnetismo



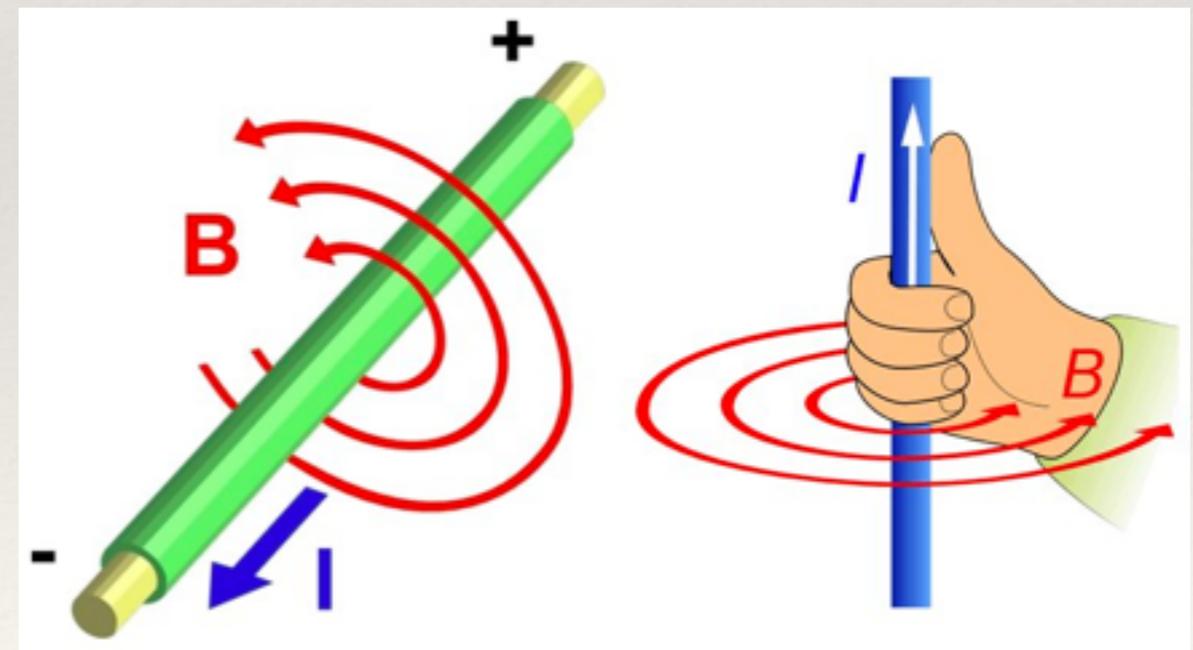
Carga Eléctrica



imán simple

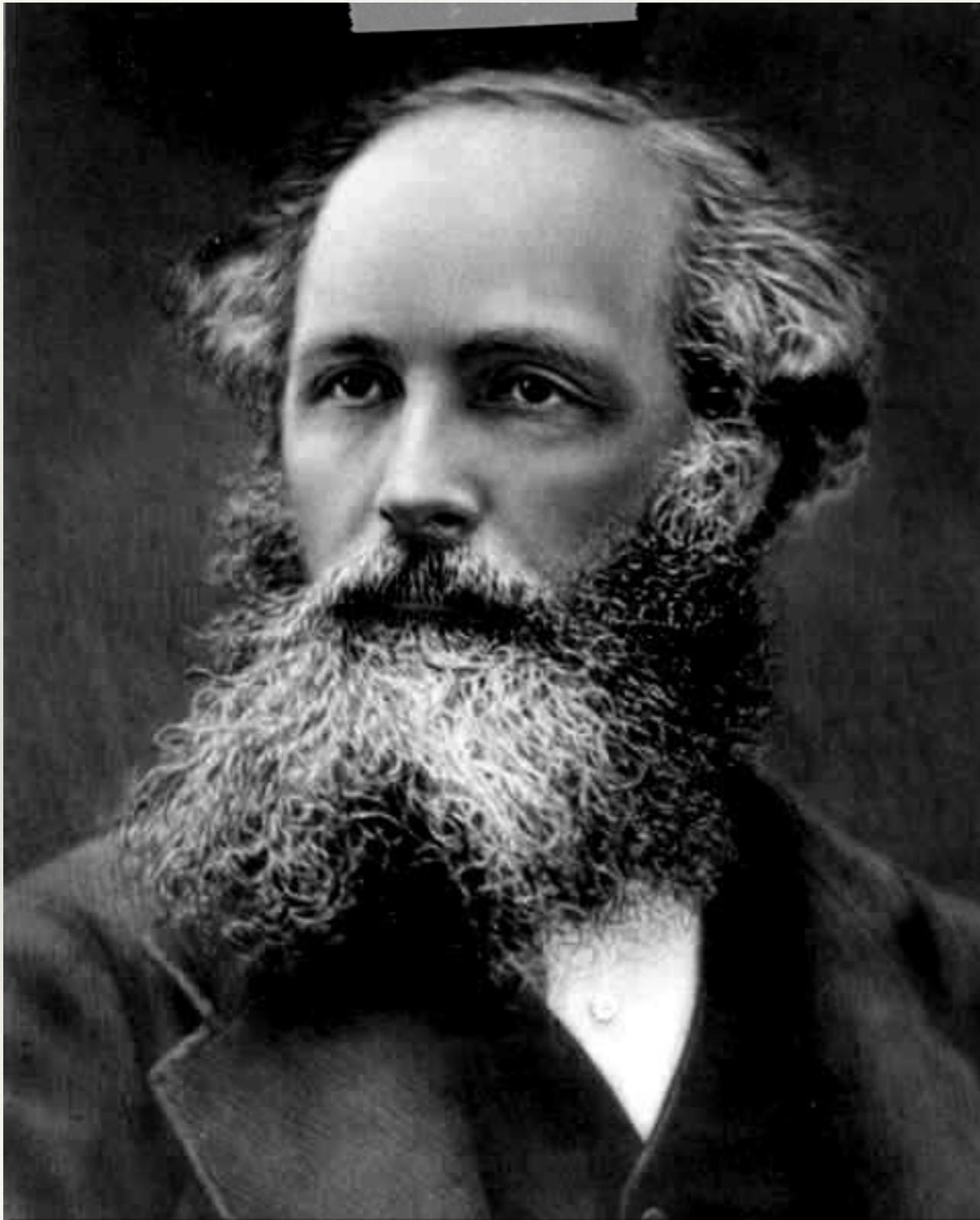


corriente inducida. Ley de Lenz-Faraday



Ley de Ampere o del pulgar

# James Clerk Maxwell



- ❖ Escocés. 1831-1879
- ❖ Uno de los grandes de la ciencia. Se le conoce como el padre de la física moderna. Esto gracias a que formuló la teoría del electromagnetismo. Este hito se considera el mayor avance de la física en el siglo XIX.
- ❖ 1864 en su discurso “Teoría Dinámica del Campo Electromagnético” ante la Royal Society: “Tenemos fuertes razones para concluir que la luz misma -incluyendo el calor radiante y cualquier otro tipo de radiación, es una perturbación en la forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético, de acuerdo a las leyes del electromagnetismo”.
- ❖ Publicó su primer artículo sobre geometría a los 16 y ese mismo año se inscribió a la universidad. A los 26 años ya era profesor.
- ❖ Su estudio del electromagnetismo parte del estudio de la luz y del color. No en balde termina siendo una teoría de la radiación.
- ❖ Otra teoría correcta de Maxwell: los anillos de Saturno están hechas de pequeñas partículas. Esto se confirmó con los viajes espaciales del siglo XX. Recibió el premio Adam.
- ❖ Otras contribuciones: la primera fotografía a color, cálculos estructurales para mantenimiento de puentes. También hizo estudios importantes sobre la teoría del calor y sobre materia y movimiento.
- ❖ De haber sido longevo (muere a los 48) posiblemente se hubiera acercado mucho a las bases de la teoría de la relatividad.

# Los otros protagonistas



Carl F. Gauss  
1777-1855



Michael Faraday  
1791-1867



André M. Ampere  
1775-1836



George Ohm  
1789-1854

- ❖ Gauss: como funcionan los imanes y las cargas eléctricas. Teoría del magnetismo terrestre.
- ❖ Faraday: la inducción magnética, el diamagnetismo y la electrólisis. El principio del motor eléctrico.
- ❖ Ampere: la noción de corriente eléctrica y como se transmite por un cable. Fundador de la teoría electrodinámica. La noción de electrón.
- ❖ George Ohm: como funciona un circuito eléctrico: Victoria es Reina de Inglaterra.

# Leyes de Maxwell

$$1. \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

Ley de Gauss para el campo eléctrico

$$2. \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Ley de Gauss para el magnetismo

$$3. \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

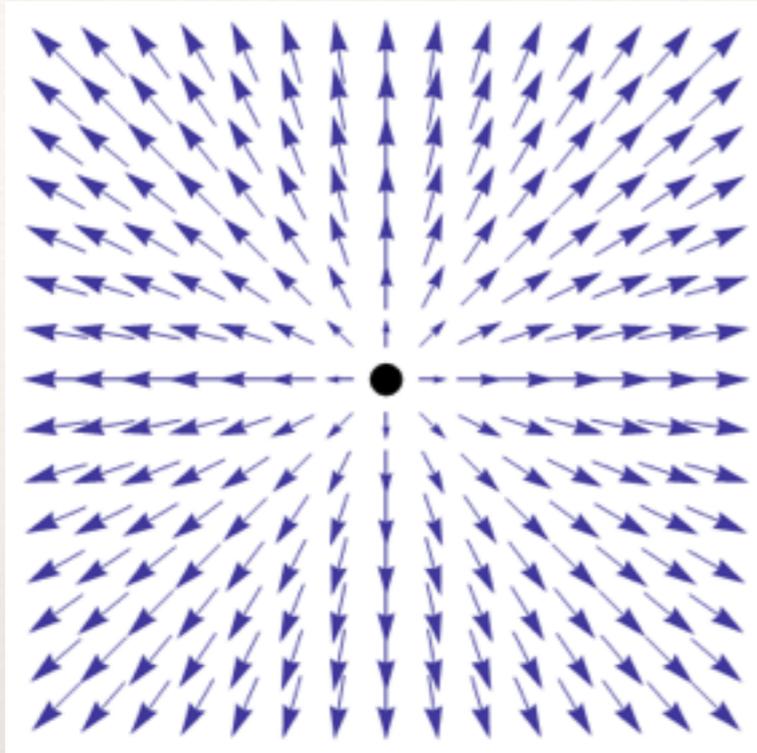
Ley de Faraday o de la inducción

$$4. \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

Ley de Ampere-Maxwell o  
de la generación de la corriente  
eléctrica

Estas ecuaciones describen las leyes que gobiernan la electricidad y el magnetismo en la naturaleza. Nos dicen cómo los campos magnéticos y eléctricos se distribuyen, cual es la geometría que pueden tener, y nos pueden ayudar a entender con precisión, cuantitativa y cualitativamente cuales fenómenos físicos dan lugar a la generación de campos magnéticos y eléctricos.

# Simbolitos raros.

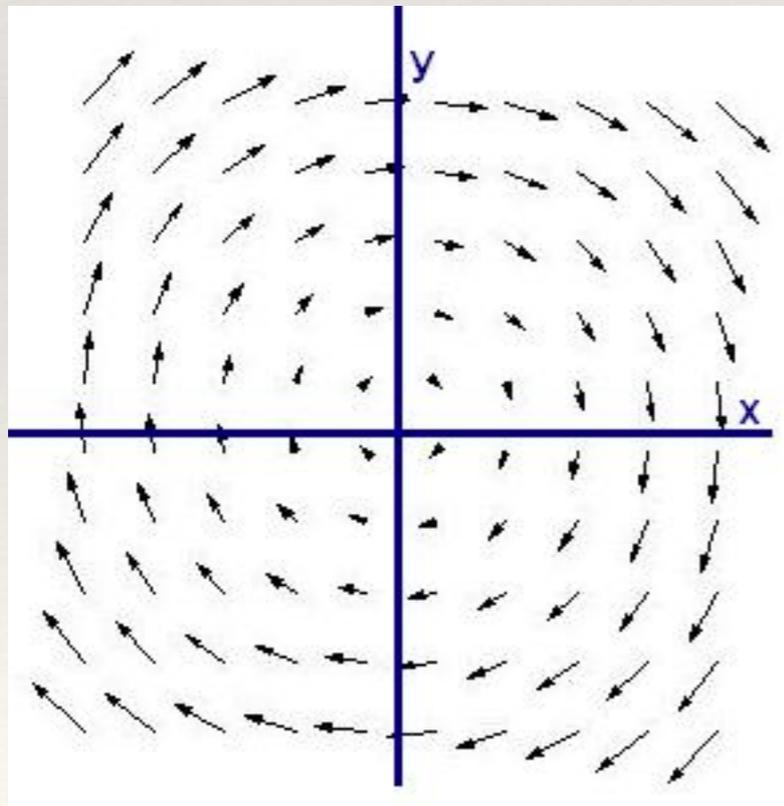


## Divergencia

Nos puede ayudar a medir que tanto un flujo de un campo se aleja o acerca a un punto en el espacio

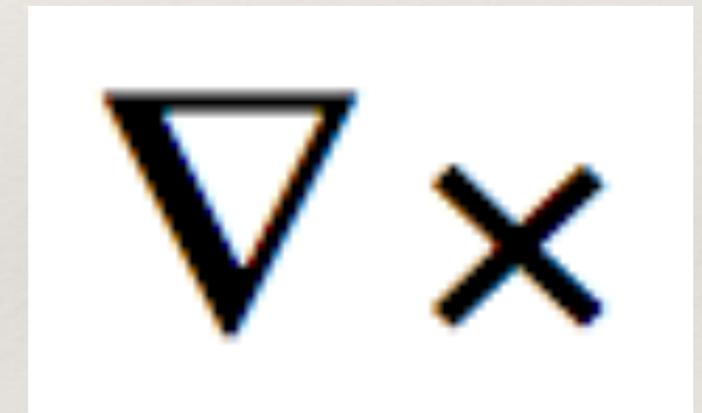


$$\operatorname{div} \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \nabla \cdot \vec{v}$$



## Rotacional

Nos puede ayudar a medir que tanto un flujo de un campo se tuerce alrededor de un punto, ¡y en qué dirección!



$$\operatorname{curl} \mathbf{F} = \nabla \times \mathbf{F}$$

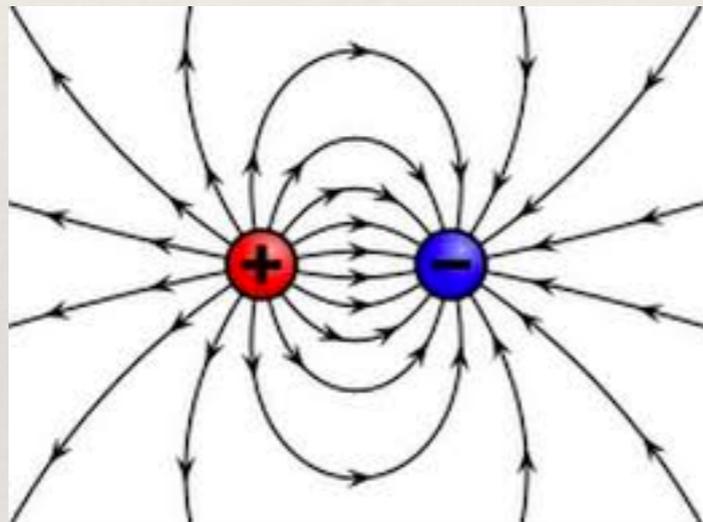
$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F & G & H \end{vmatrix}$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \left( \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial G}{\partial z}, \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial G}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y} \right)$$

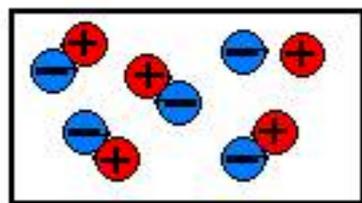
# Sí podemos entender el significado de las ecuaciones de Maxwell aún sin saber todas las tripas matemáticas....

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

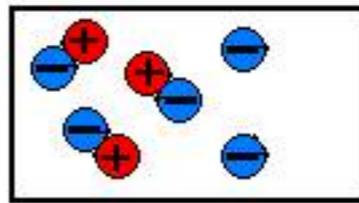
$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$



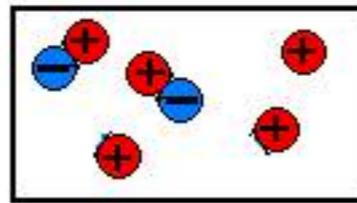
- ❖ La primera ecuación o ley de Gauss para el campo eléctrico.
- ❖ Esta ley parte de la vieja noción de que cargas opuestas se atraen y cargas iguales se repelen.
- ❖ La densidad de carga eléctrica que medimos en un volumen, y su signo (+,-), depende de si el campo emana o converge hacia un punto
- ❖ Y nos dice además que si la divergencia es cero, no hay carga. O viceversa. No puede haber un campo eléctrico sin una carga presente!



Neutral



Negatively charged(-2)

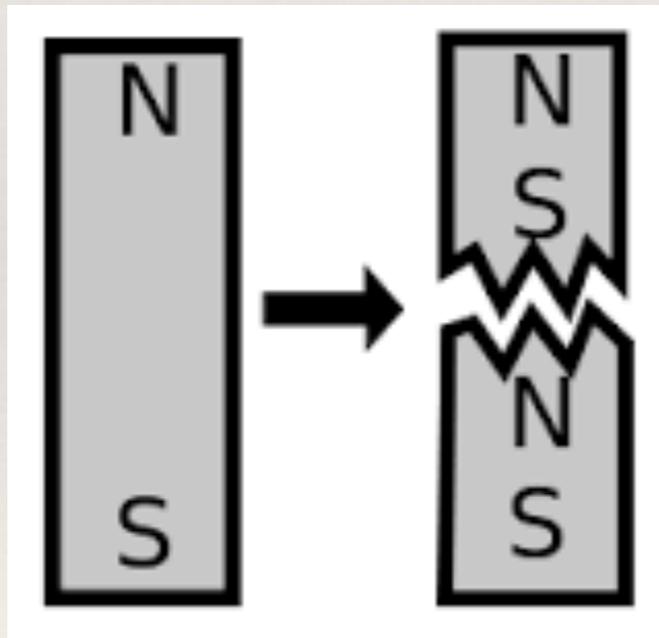


Positively charged(+3)

# Sí podemos entender el significado de las ecuaciones de Maxwell aún sin saber todas las tripas matemáticas....

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

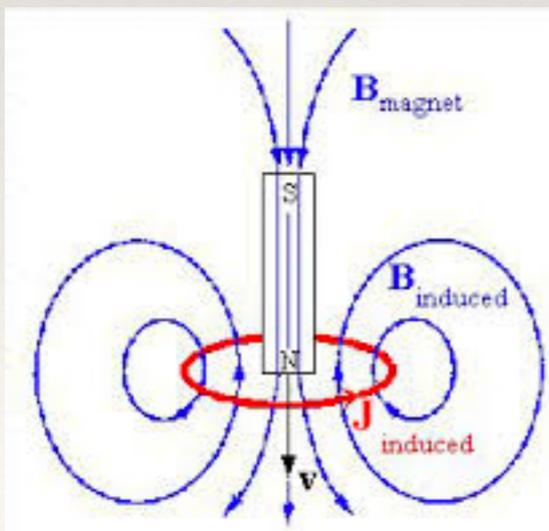
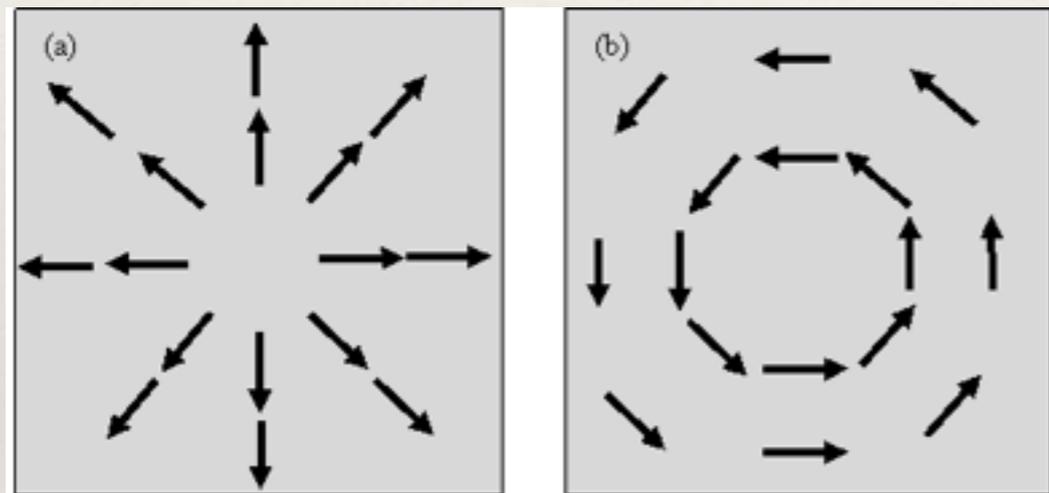
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$



- ❖ La segunda ecuación expresa la divergencia pero ahora para un campo magnético. Notemos que dice que SIEMPRE es cero. En el caso de los campos eléctricos, solo es cero en ausencia de la carga.
- ❖ No existen monopolos magnéticos en el sentido que hay cargas positivas o negativas. Si partimos un imán por la mitad, no podremos separar su parte norte y sur, sino que ambas mitades tendrán norte y sur.
- ❖ Esta tal vez sea la mas sencilla o intuitiva de las ecuaciones, pero no por ello es menos importante.
- ❖ Cuidado: en ciertas teorías si se permite la existencia de monopolos magnéticos. Sin embargo hasta el momento los experimentos que se han realizado muestran resultados nulos.

# Sí podemos entender el significado de las ecuaciones de Maxwell aún sin saber todas las tripas matemáticas....

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

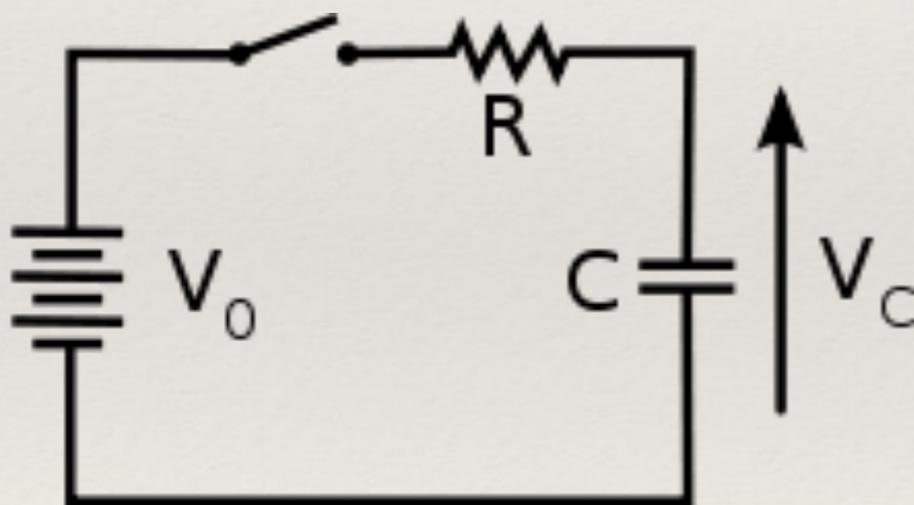


- ❖ Si la divergencia mide que tanto un campo fluye hacia o desde un punto, el rotacional mide qué tanto el campo se enrolla alrededor de un punto.
- ❖ La ley de Faraday nos indica que al tener un campo que se enrolla alrededor de un punto, se genera un campo magnético que cambia con el tiempo a medida que el campo eléctrico se enrolla.
- ❖ De manera equivalente, si tenemos un campo magnético, y lo alteramos, generaremos un campo eléctrico que se enrollará en ese campo.
- ❖ Noten el signo menos: ese proviene desde la Ley de Lenz, que nos indica que el campo inducido tiene dirección opuesta al campo inductor.

# Sí podemos entender el significado de las ecuaciones de Maxwell aún sin saber todas las tripas matemáticas....

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

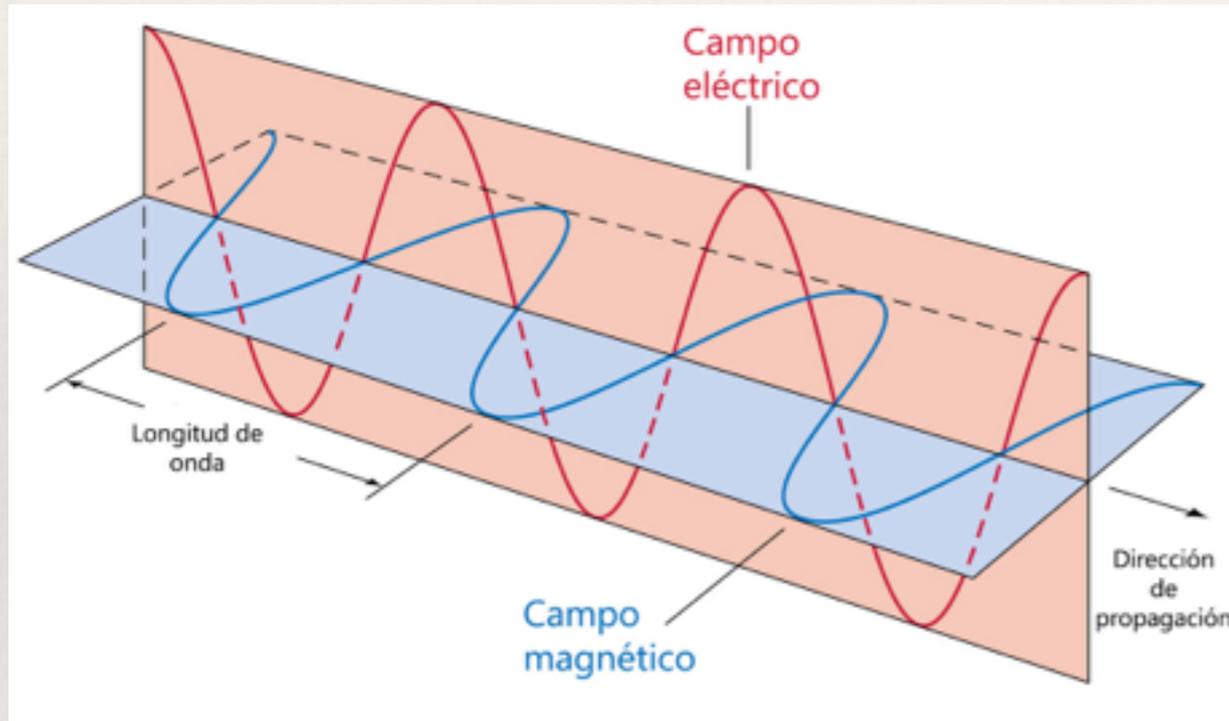
$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$



$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \vec{\nabla} V$$

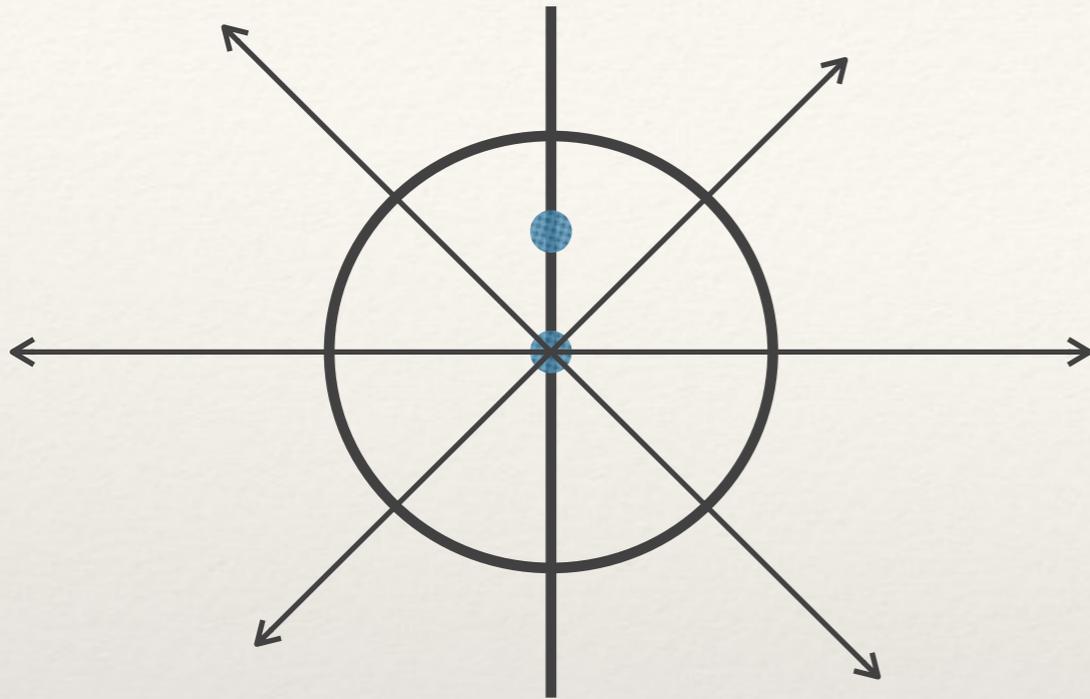
- ❖ La ley de Ampere nos habla ahora de enrollar un campo magnético, lo cual genera un campo eléctrico que cambia con el tiempo.
- ❖ A diferencia de la ley de Faraday, aquí hay un término adicional que es la densidad de carga.
- ❖ Si pensamos en una corriente eléctrica que corre por un cable, entonces el campo magnético se enrolla alrededor del cable siguiendo la ley del pulgar.
- ❖ El término que cambia con el tiempo se le llama *corriente de desplazamiento* y es la gran contribución de Maxwell.
- ❖ Nos explica en términos simples, como es que podemos hacer pasar carga de una placa a otra de un capacitor. En principio el aire (o mejor, un vacío) entre las placas no es un conductor, como el cable, pero el circuito de la figura sin embargo, al conectarse, generará una corriente neta.
- ❖ Notemos que  $J$  como densidad de corriente solamente expresa de un modo distinto el campo eléctrico, generado por una diferencia de potencial (voltaje en este caso). El símbolo sigma mide que tan buen conductor es el material del cable.

# ¿Cómo llegamos de aquí a la teoría de la radiación?

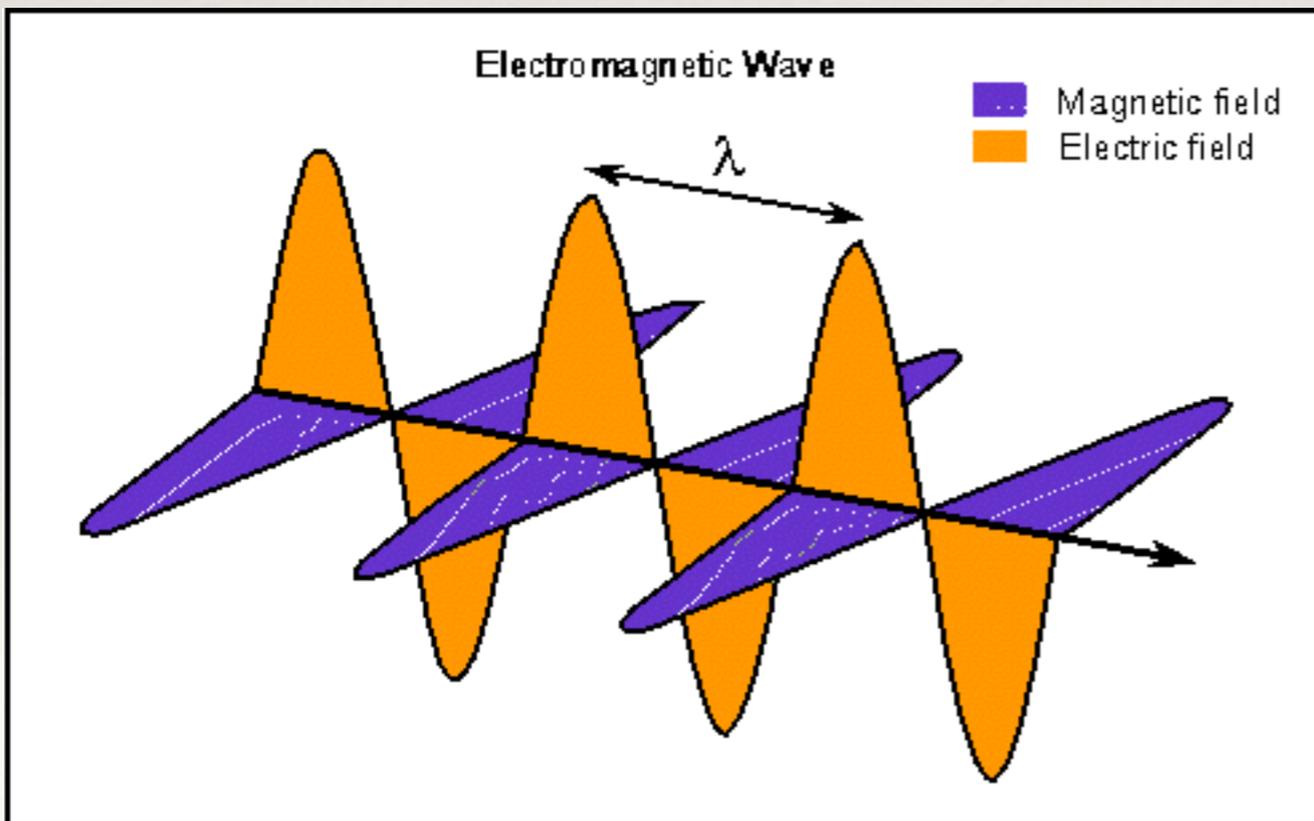


- ❖ La receta, lamentablemente es puramente matemática y no tenemos tiempo ni es nuestro objetivo de hacer la deducción completa (nos faltan herramientas de cálculo).
- ❖ Pero básicamente, manipulando las ecuaciones se llega a una nueva ecuación diferencial que en matemáticas se conoce como ecuación de onda. La solución a la ecuación de onda siempre es una función periódica que cambia con el tiempo y de ahí su nombre.
- ❖ Las funciones seno y coseno funcionan particularmente bien, de ahí la forma de la onda...
- ❖ La solución particular a la ecuación de onda que se deriva de las ecuaciones de Maxwell combina un campo magnético y un campo eléctrico oscilantes que son perpendiculares entre sí y se propagan en una dirección perpendicular a ambos.
- ❖ Se puede además determinar bajo una serie de condiciones, que la velocidad de propagación de estos campos perpendiculares es en ambos casos la velocidad de 300,000 km/s que es la velocidad de la luz

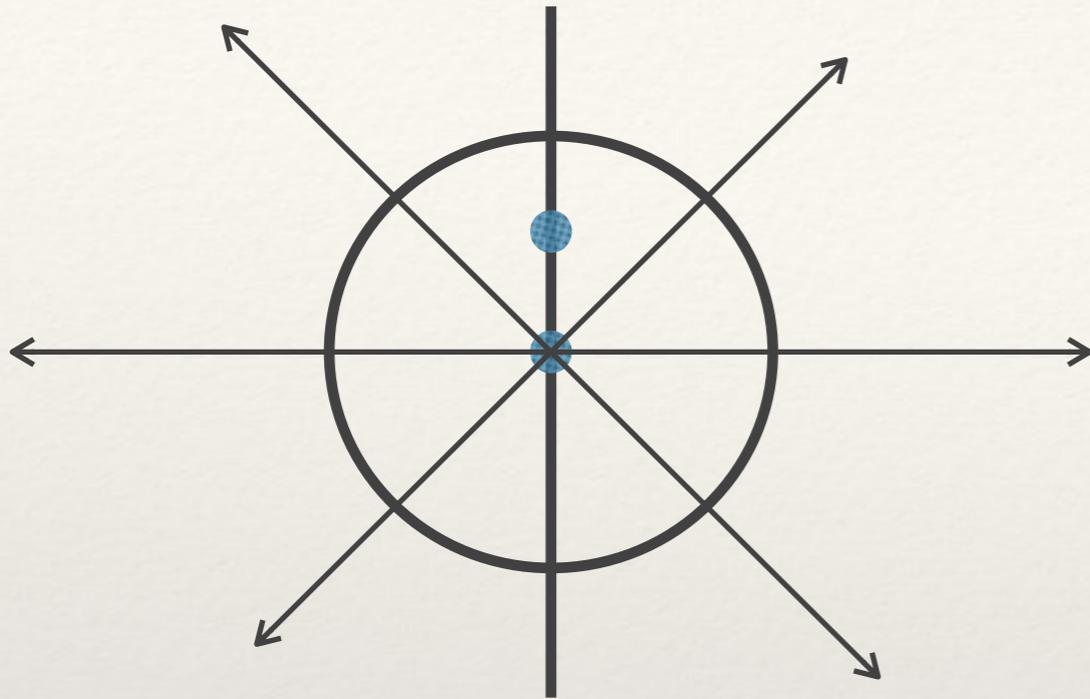
# ¿Cómo llegamos de aquí a la teoría de la radiación?



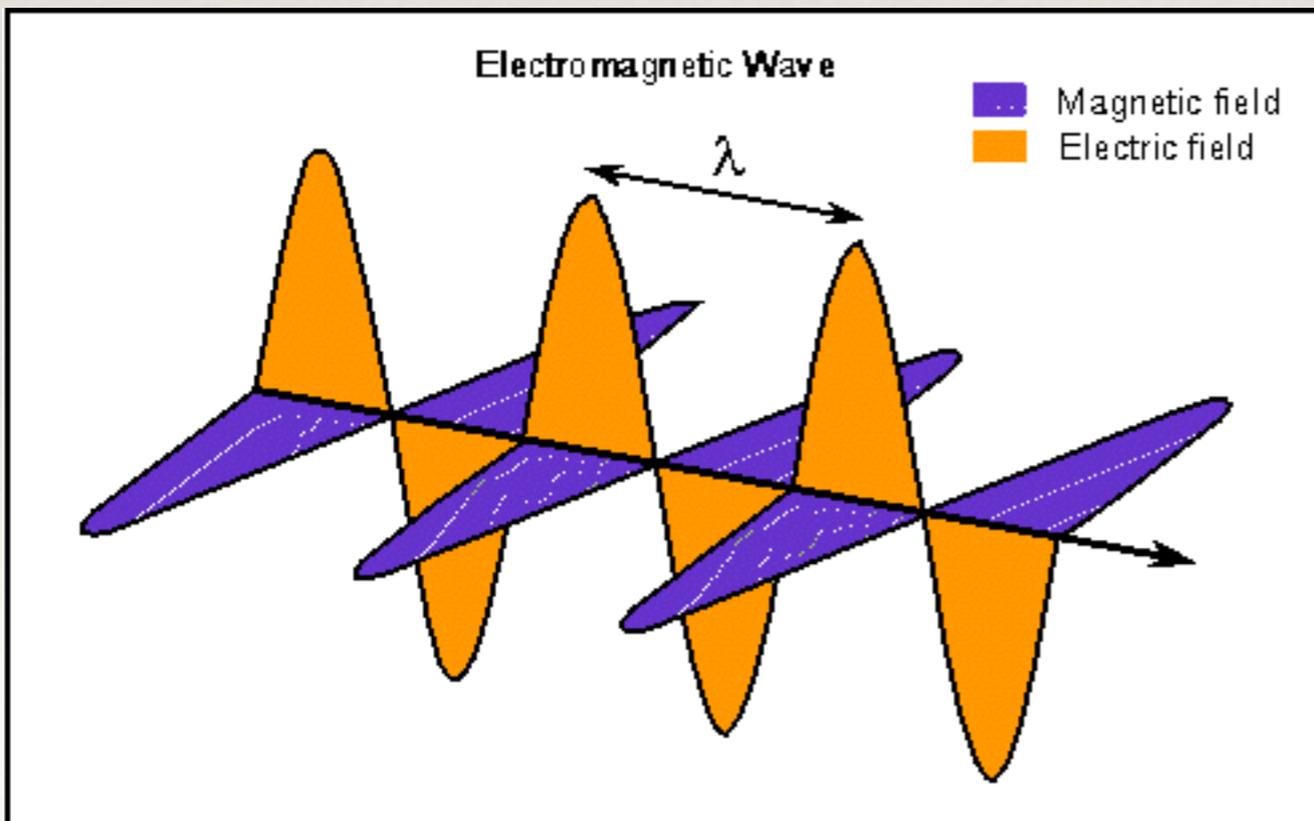
- ❖ La receta, lamentablemente es puramente matemática y no tenemos tiempo ni es nuestro objetivo de hacer la deducción completa (nos faltan herramientas de cálculo).
- ❖ Pero básicamente, manipulando las ecuaciones se llega a una nueva ecuación diferencial que en matemáticas se conoce como ecuación de onda. La solución a la ecuación de onda siempre es una función periódica que cambia con el tiempo y de ahí su nombre.
- ❖ Las funciones seno y coseno funcionan particularmente bien, de ahí la forma de la onda...
- ❖ La solución particular a la ecuación de onda que se deriva de las ecuaciones de Maxwell combina un campo magnético y un campo eléctrico oscilantes que son perpendiculares entre sí y se propagan en una dirección perpendicular a ambos.
- ❖ Se puede además determinar bajo una serie de condiciones, que la velocidad de propagación de estos campos perpendiculares es en ambos casos la velocidad de 300,000 km/s que es la velocidad de la luz



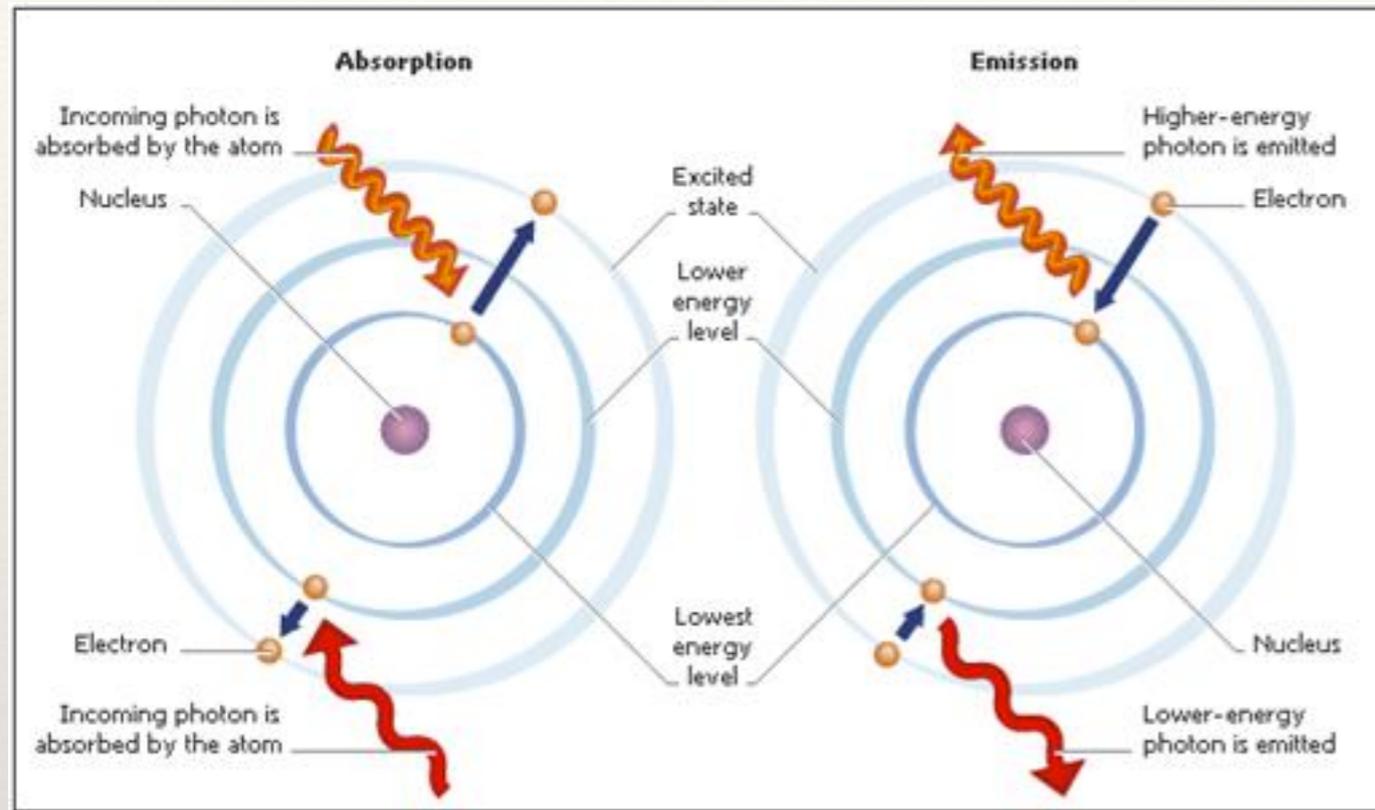
# ¿Cómo llegamos de aquí a la teoría de la radiación?



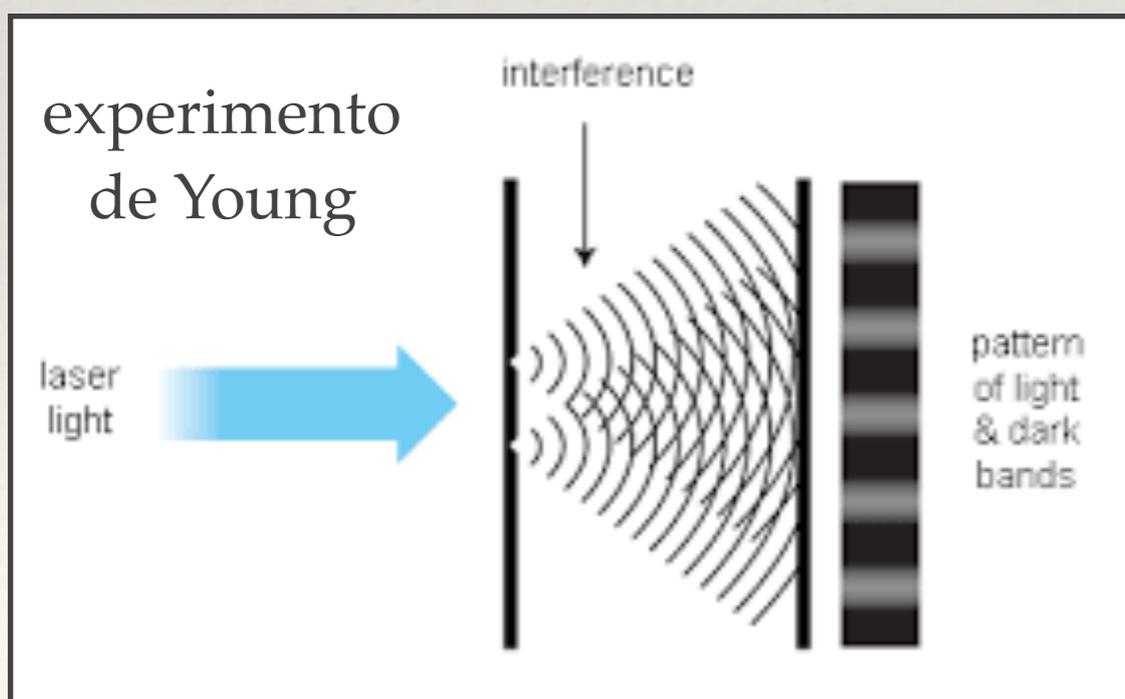
- ❖ La receta, lamentablemente es puramente matemática y no tenemos tiempo ni es nuestro objetivo de hacer la deducción completa (nos faltan herramientas de cálculo).
- ❖ Pero básicamente, manipulando las ecuaciones se llega a una nueva ecuación diferencial que en matemáticas se conoce como ecuación de onda. La solución a la ecuación de onda siempre es una función periódica que cambia con el tiempo y de ahí su nombre.
- ❖ Las funciones seno y coseno funcionan particularmente bien, de ahí la forma de la onda...
- ❖ La solución particular a la ecuación de onda que se deriva de las ecuaciones de Maxwell combina un campo magnético y un campo eléctrico oscilantes que son perpendiculares entre sí y se propagan en una dirección perpendicular a ambos.
- ❖ Se puede además determinar bajo una serie de condiciones, que la velocidad de propagación de estos campos perpendiculares es en ambos casos la velocidad de 300,000 km/s que es la velocidad de la luz



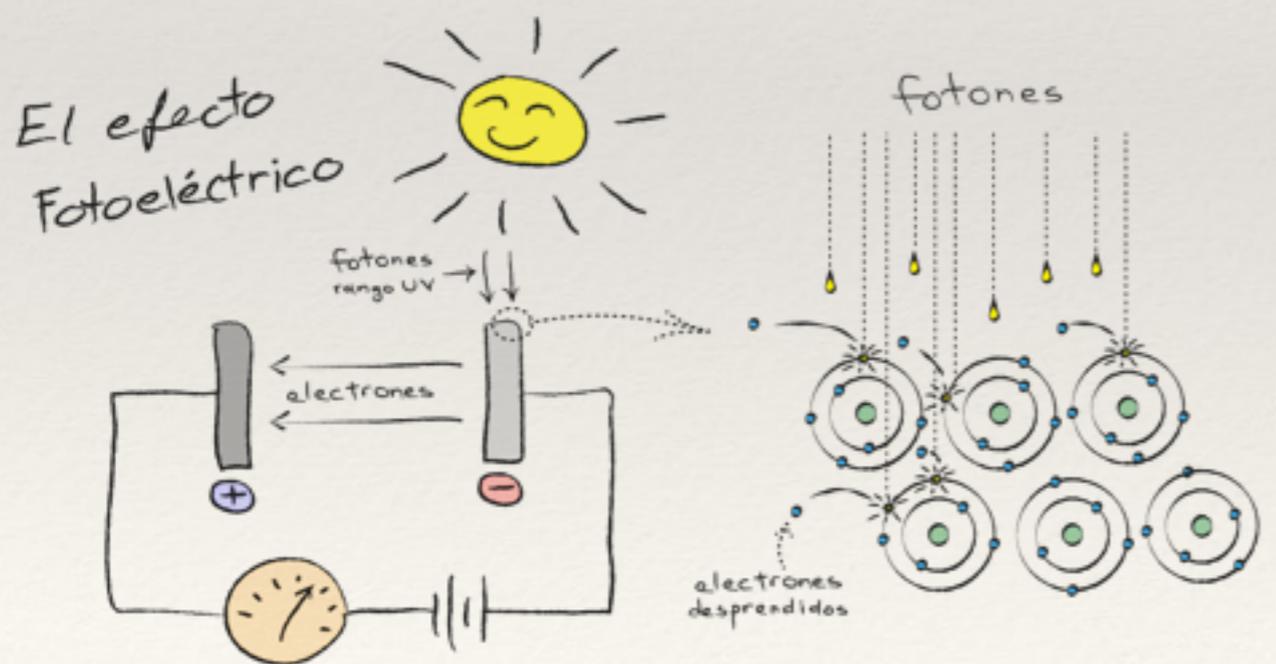
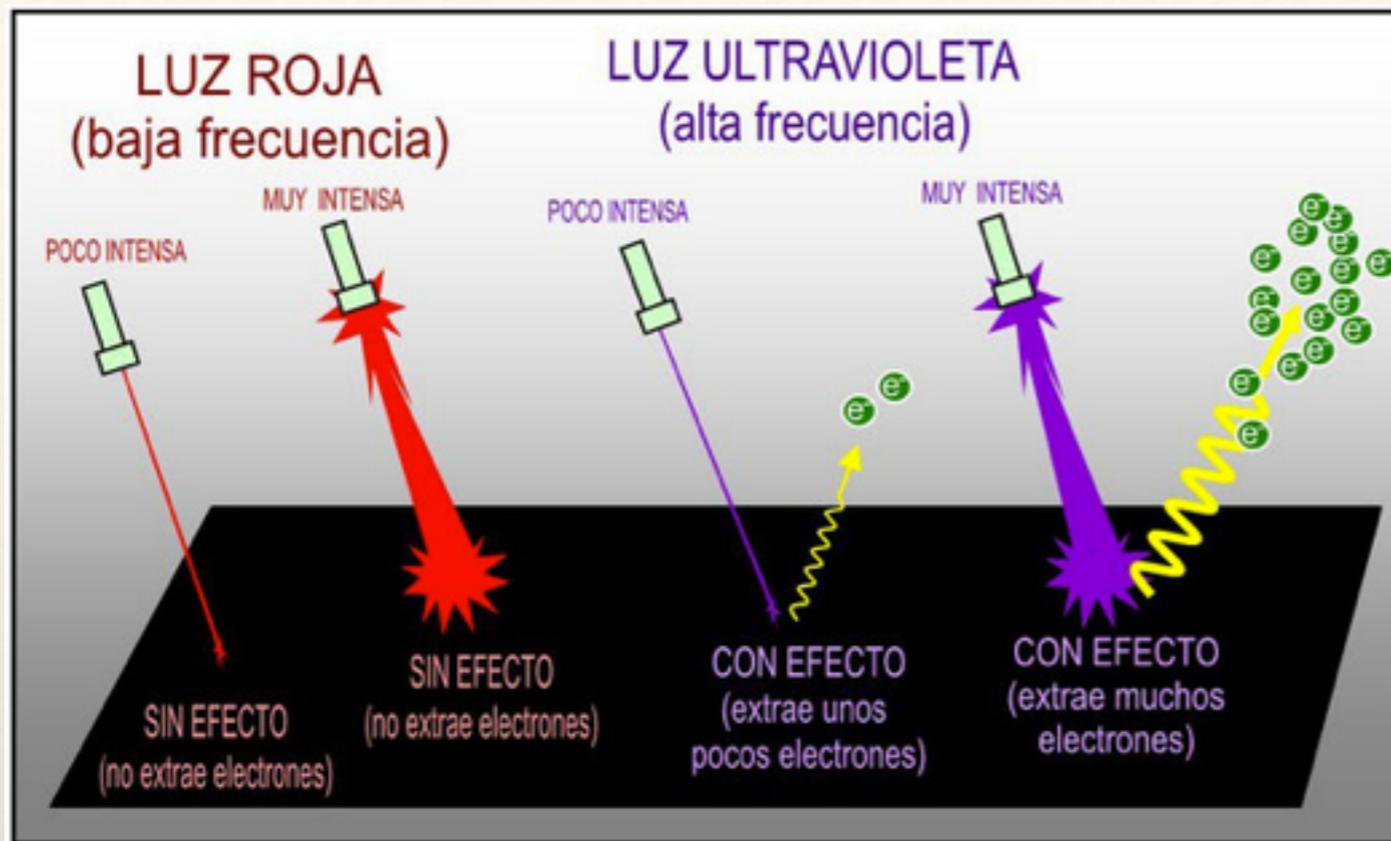
# ¿y cómo sale de los átomos?



- ❖ Las ecuaciones de Maxwell fácilmente explican emisiones en algunas longitudes de onda largas como las de radio, pues las distribuciones de carga que se necesitan pueden visualizarse más fácilmente a nivel macroscópico.
- ❖ Pero la mayoría de la luz es generada a nivel atómico. Los electrones, al cambiar de nivel de energía pueden emitir o absorber un fotón que es un cuanto individual de luz.
- ❖ Aquí es donde la física debe de aceptar la naturaleza dual de la luz, que se comporta como onda (como ya esbozamos) o como partícula.
- ❖ De hecho, el comportamiento de la luz como partículas puede demostrarse de forma experimental. Albert Einstein recibió el premio Nobel por este descubrimiento, llamado Efecto Fotoeléctrico (y curiosamente no por su trabajo mas conocido que es el de la Relatividad General). LA LUZ TIENE MOMENTO. Aquí, es donde la teoría clásica del electromagnetismo y la teoría de la mecánica cuántica se encuentran.
- ❖ Ecuación de Schrödinger.



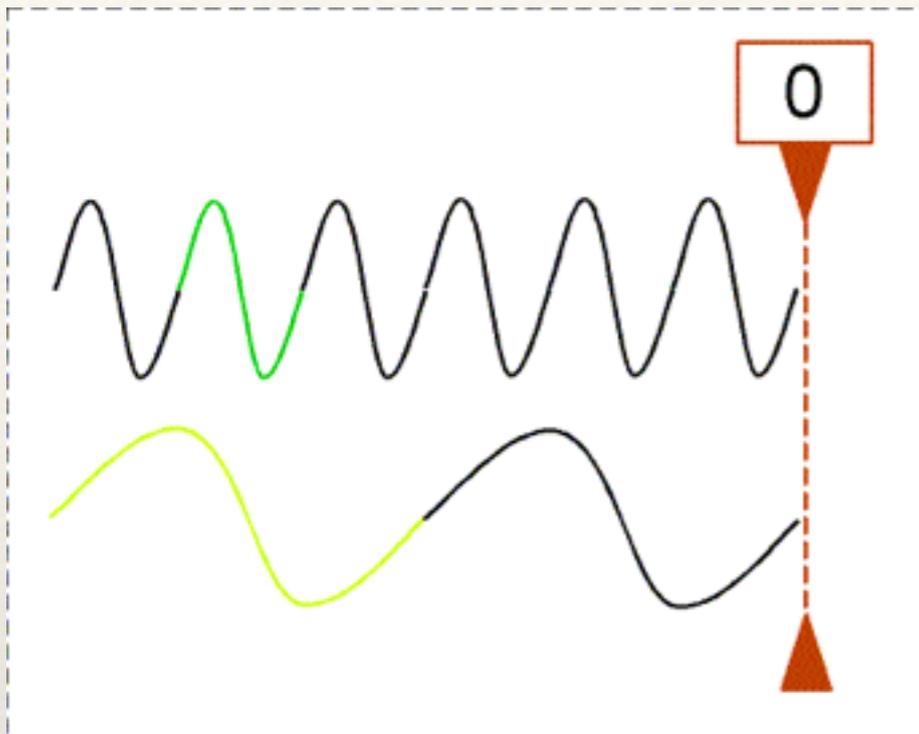
# ¿y cómo sale de los átomos?



www.ilustracionmedica.es

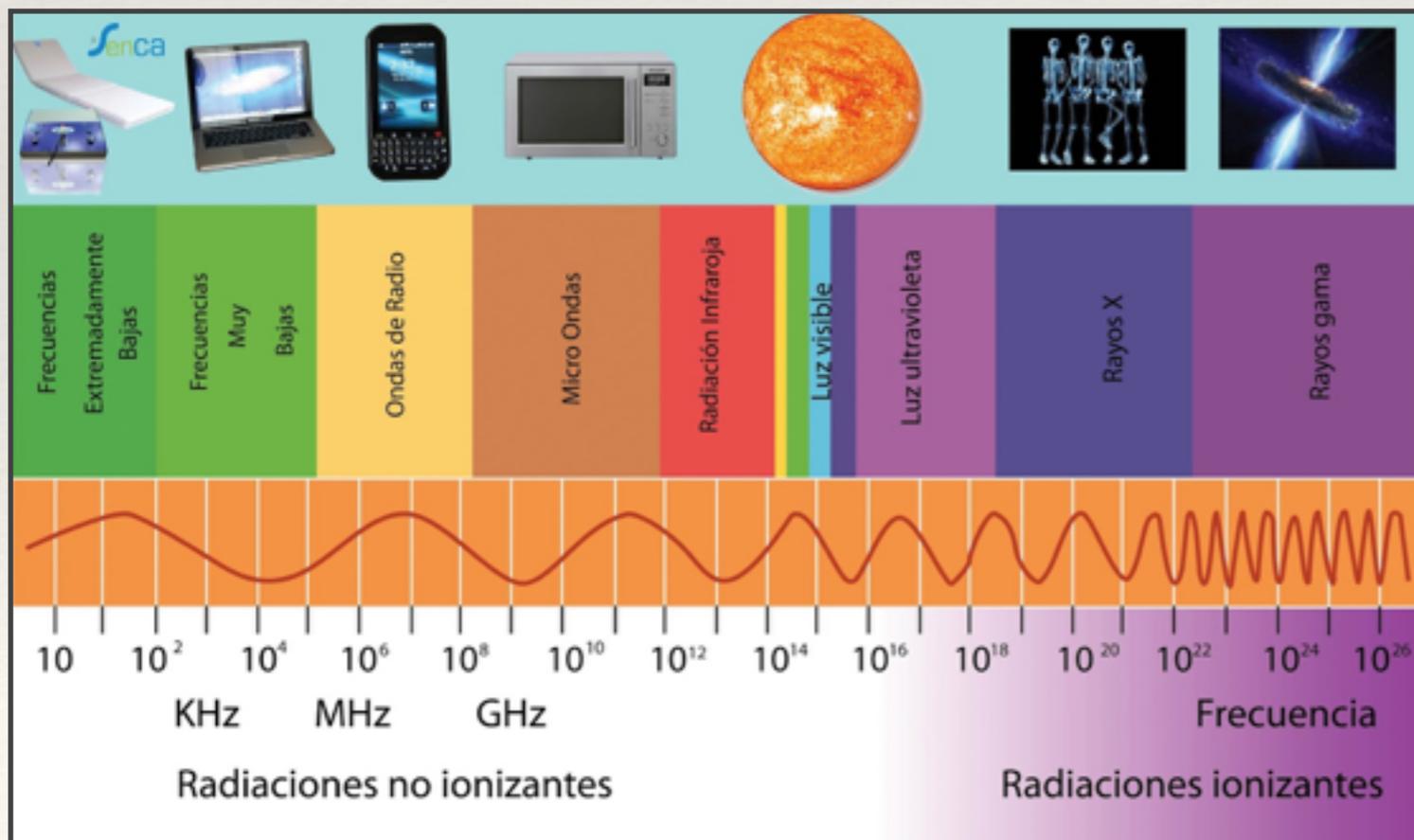
- ❖ Las ecuaciones de Maxwell fácilmente explican emisiones en algunas longitudes de onda largas como las de radio, pues las distribuciones de carga que se necesitan pueden visualizarse más fácilmente a nivel macroscópico.
- ❖ Pero la mayoría de la luz es generada a nivel atómico. Los electrones, al cambiar de nivel de energía pueden emitir o absorber un fotón que es un cuanto individual de luz.
- ❖ Aquí es donde la física debe de aceptar la naturaleza dual de la luz, que se comporta como onda (como ya esbozamos) o como partícula.
- ❖ De hecho, el comportamiento de la luz como partículas puede demostrarse de forma experimental. Albert Einstein recibió el premio Nobel por este descubrimiento, llamado Efecto Fotoeléctrico (y curiosamente no por su trabajo mas conocido que es el de la Relatividad General). LA LUZ TIENE MOMENTO. Aquí, es donde la teoría clásica del electromagnetismo y la teoría de la mecánica cuántica se encuentran.
- ❖ Ecuación de Schrödinger. Matemáticamente, los cálculos de equilibrio de energía en los átomos se solucionan nuevamente con una ecuación de onda, esta vez resultante de pensar en el núcleo como un potencial y en el electrón como una partícula que cae o sale de ese potencial.

# radiación electromagnética

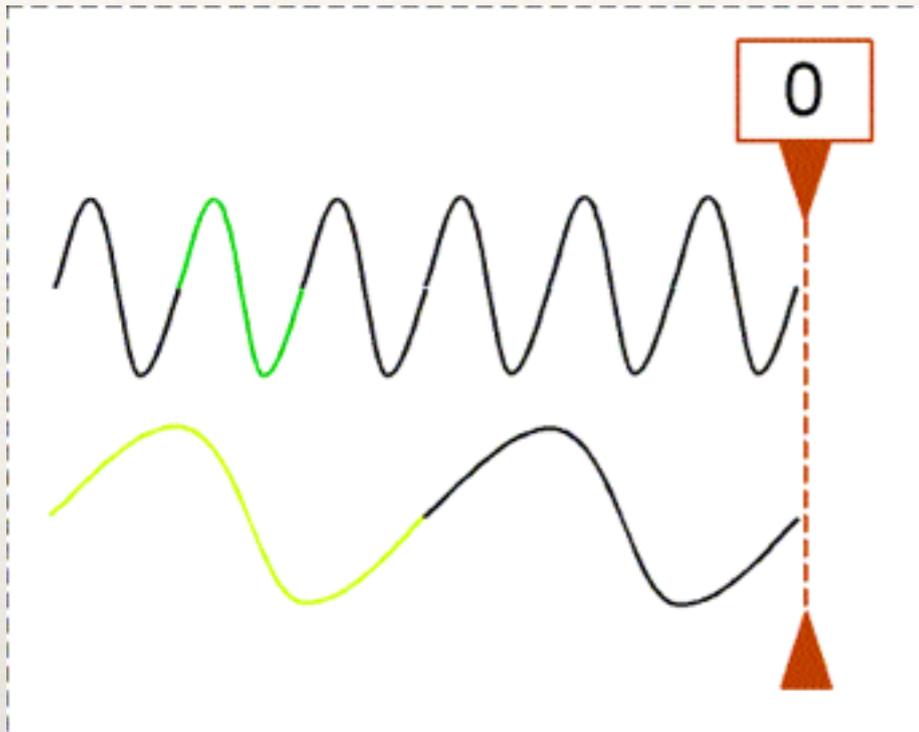


$$\nu = c / \lambda$$

- ❖ Longitud de onda vs frecuencia.
- ❖ entre mayor la frecuencia o más chica la longitud de onda, es mayor la energía del fotón.
- ❖ la luz visible tiene longitudes de onda entre 400 y 800 nm aproximadamente. Eso es del orden de 750-420 THz (cientos de billones de ciclos por segundo).
- ❖ ¿cuál es la menor frecuencia que puedes imaginar? ¿cuál es la mayor? ¿A qué fenómenos corresponden?
- ❖ Todos los cuerpos radiantes como las estrellas emiten luz en todas las longitudes de onda, aunque ciertas frecuencias dominan en distintas partes de esos cuerpos. Ahi entra en juego la temperatura.

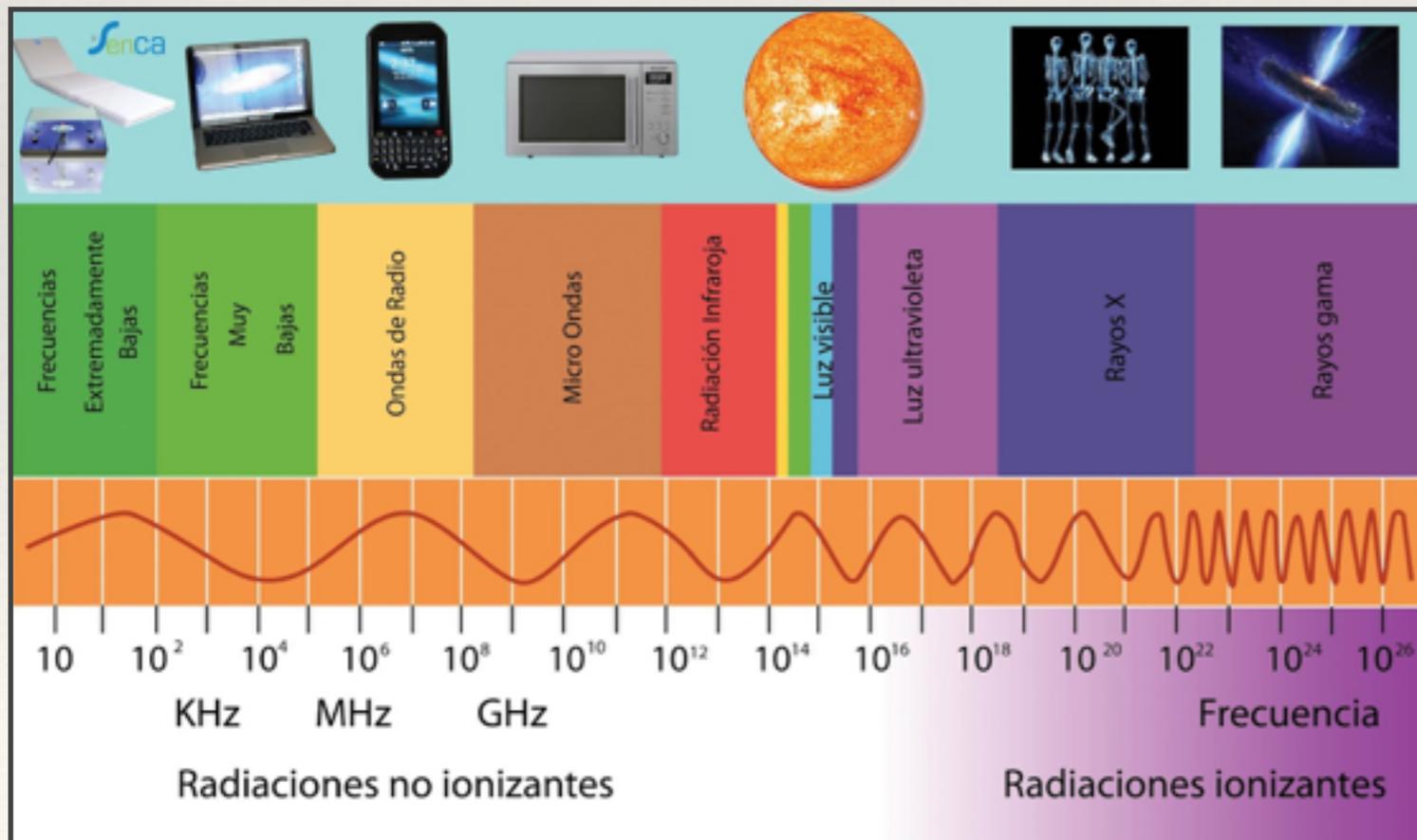


# radiación electromagnética



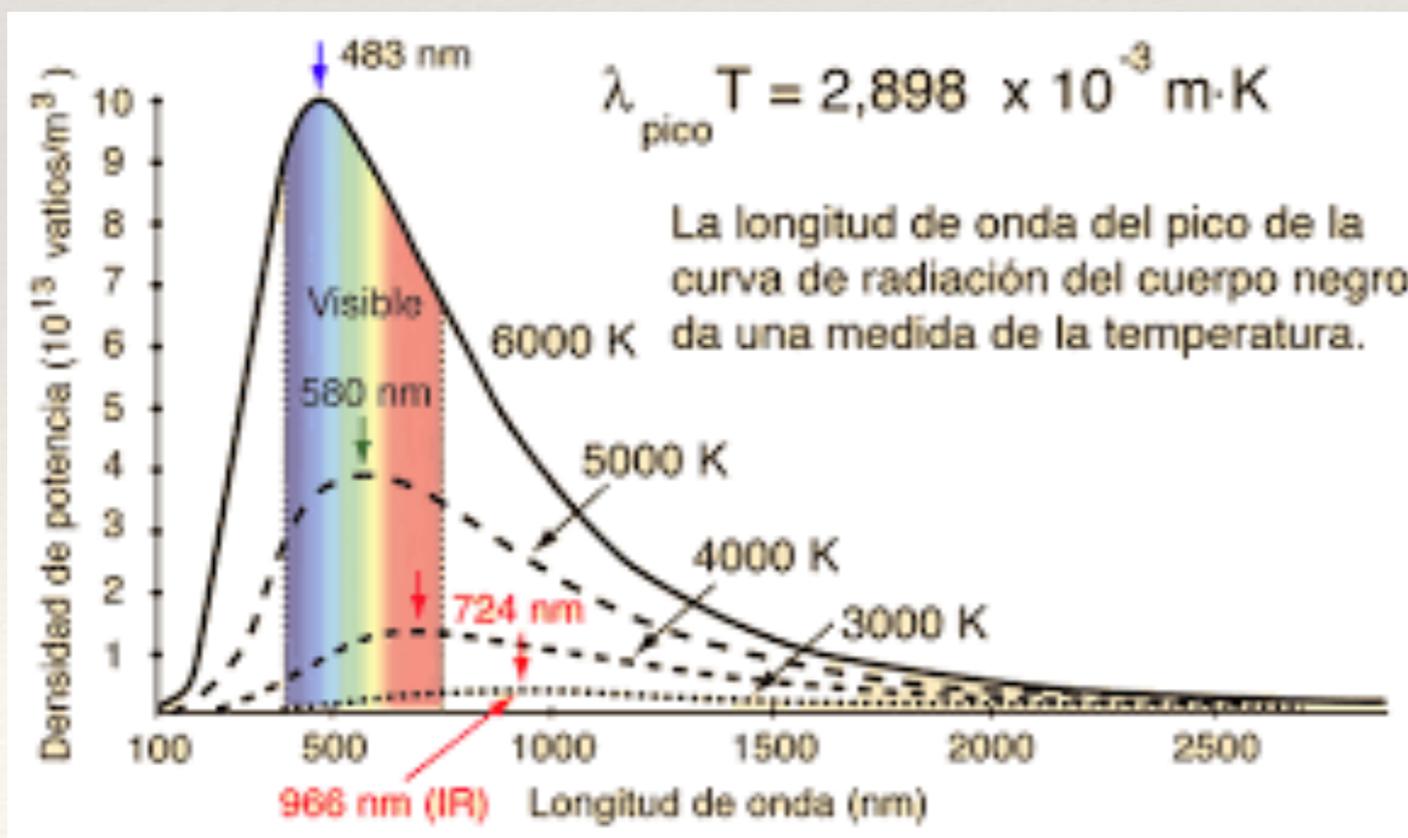
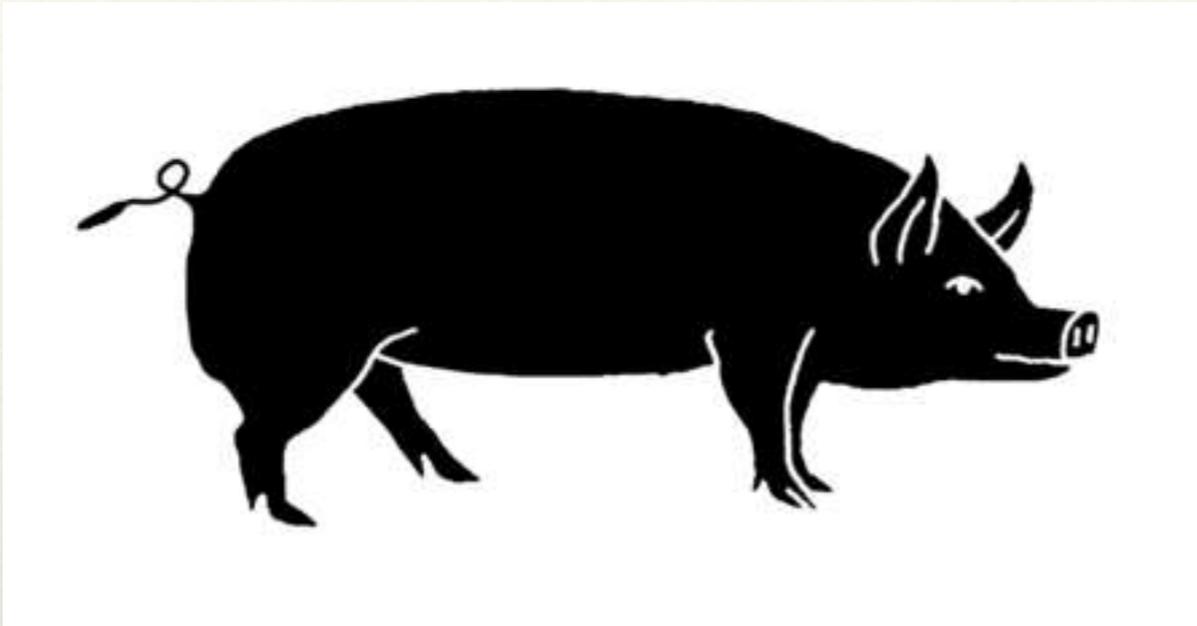
$$v = c / \lambda$$

- ❖ Longitud de onda vs frecuencia.
- ❖ entre mayor la frecuencia o más chica la longitud de onda, es mayor la energía del fotón.
- ❖ la luz visible tiene longitudes de onda entre 400 y 800 nm aproximadamente. Eso es del orden de 750-420 THz (cientos de billones de ciclos por segundo).
- ❖ ¿cuál es la menor frecuencia que puedes imaginar? ¿cuál es la mayor? ¿A qué fenómenos corresponden?
- ❖ Todos los cuerpos radiantes como las estrellas emiten luz en todas las longitudes de onda, aunque ciertas frecuencias dominan en distintas partes de esos cuerpos. Ahi entra en juego la temperatura.

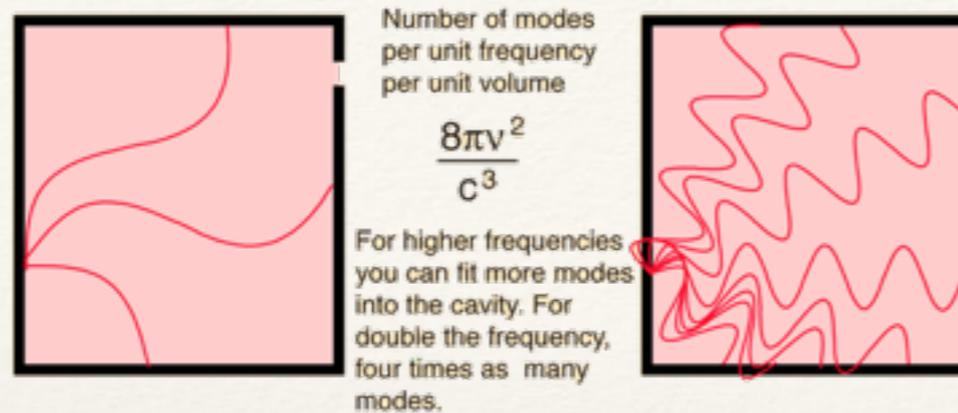


# Radiación del Cuerpo Negro

- ❖ ¿qué tiene que ver un puerco negro con todo esto?
- ❖ Ya en serio, Max Planck obtuvo su propio premio Nobel al crear la teoría completa sobre la radiación y terminar de entender la relación entre las ondas electromagnéticas y los átomos.
- ❖ Lo del cuerpo “negro” se refiere a una cavidad, en la que entra radiación y es absorbida completamente, y luego re-irradia energía solamente a una frecuencia característica de dicha cavidad, sin que tenga que depender de la radiación incidente. La energía irradiada puede considerarse como una onda estática o un modo fijo de resonancia de la cavidad.
- ❖ La cantidad de energía emitida a una frecuencia dada debería de ser proporcional al número de modos (o maneras de mantener un campo eléctrico cero en las paredes de la cavidad) de esa frecuencia. El modelo clásico decía que cualquier modo era posible y que el número de modos crece con el cuadrado de la frecuencia. Si esto es así, entonces la radiación ultravioleta sería infinita y a eso se le llamaba “catástrofe ultravioleta”
- ❖ La genialidad de Planck fue demostrar que los modos están cuantizados, es decir solo ciertos modos se permiten por ser más probables.



# Radiación del Cuerpo Negro



Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory



	#Modes per unit frequency per unit volume	Probability of occupying modes	Average energy per mode
CLASSICAL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Equal for all modes	kT
QUANTUM	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Quantized modes: require hν energy to excite upper modes, less probable	$\frac{h\nu}{e^{kT} - 1}$

- ❖ ¿qué tiene que ver un cuerpo negro con todo esto?
- ❖ Ya en serio, Max Planck obtuvo su propio premio Nobel al crear la teoría completa sobre la radiación y terminar de entender la relación entre las ondas electromagnéticas y los átomos.
- ❖ Lo del cuerpo “negro” se refiere a una cavidad, en la que entra radiación y es absorbida completamente, y luego re-irradia energía solamente a una frecuencia característica de dicha cavidad, sin que tenga que depender de la radiación incidente. La energía irradiada puede considerarse como una onda estática o un modo fijo de resonancia de la cavidad.
- ❖ La cantidad de energía emitida a una frecuencia dada debería de ser proporcional al número de modos (o maneras de mantener un campo eléctrico cero en las paredes de la cavidad) de esa frecuencia. El modelo clásico decía que cualquier modo era posible y que el número de modos crece con el cuadrado de la frecuencia. Si esto es así, entonces la radiación ultravioleta sería infinita y a eso se le llamaba “catástrofe ultravioleta”
- ❖ La genialidad de Planck fue demostrar que los modos están cuantizados, es decir solo ciertos modos se permiten por ser más probables.

