

La Cosmología de Newton

El entendimiento del Universo mas allá del Sistema Solar preocupó desde un principio a Newton.



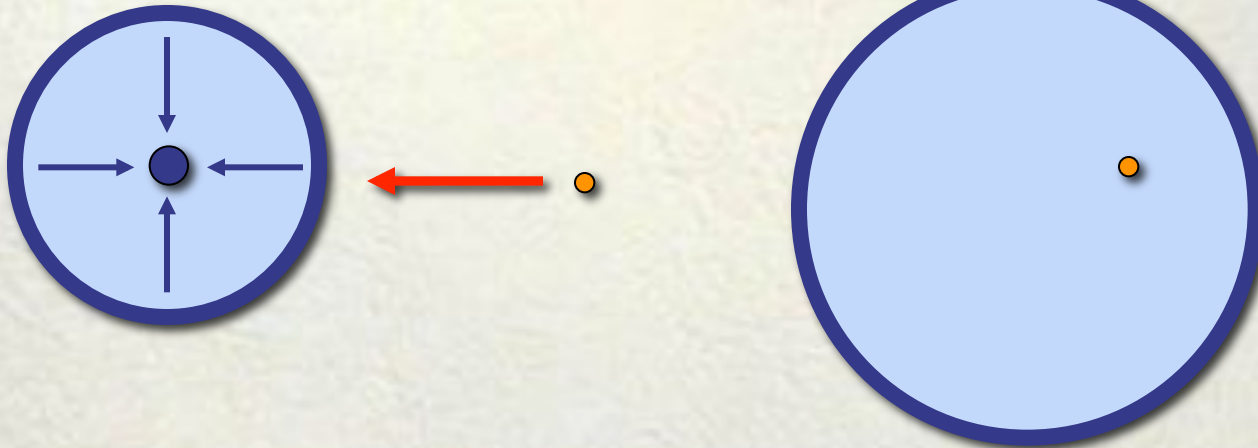
Noche estrellada sobre el Ródano
V, van Gogh (1888)

La idea de un Universo eterno y estacionario era muy poderosa. Newton creía en un Universo así.

Sin embargo, se dio cuenta de que para lograr un estado estacionario en un Universo dominado por una fuerza que es siempre atractiva requiere de circunstancias muy especiales.

La Teoremas de Newton

El razonamiento de Newton sobre la posibilidad de un Universo estacionario se basa en dos teoremas que el mismo demostró.



Teorema I:

Un cascarón esférico de densidad de masa uniforme ejerce una fuerza gravitacional sobre un punto externo, igual a la producida por un punto de igual masa a la del cascarón y situado en su centro.

Teorema II:

Un cascarón esférico de densidad de masa uniforme no ejerce fuerza gravitacional sobre un punto interno.

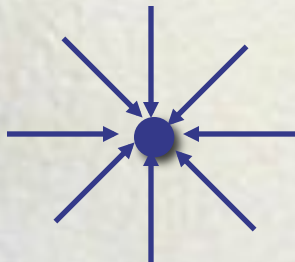
La Teoremas de Newton

El primer Teorema es fácil de entender, sin embargo, no es fácil de probar.



p

Dividiendo cualquier cuerpo o región de forma esférica, en cascarones esféricos concéntricos podemos probar, usando el primer teorema de Newton, que la atracción gravitacional del cuerpo o región, es igual al de una masa puntual situada en el centro del cuerpo o región y cuya masa es igual a la de éste.

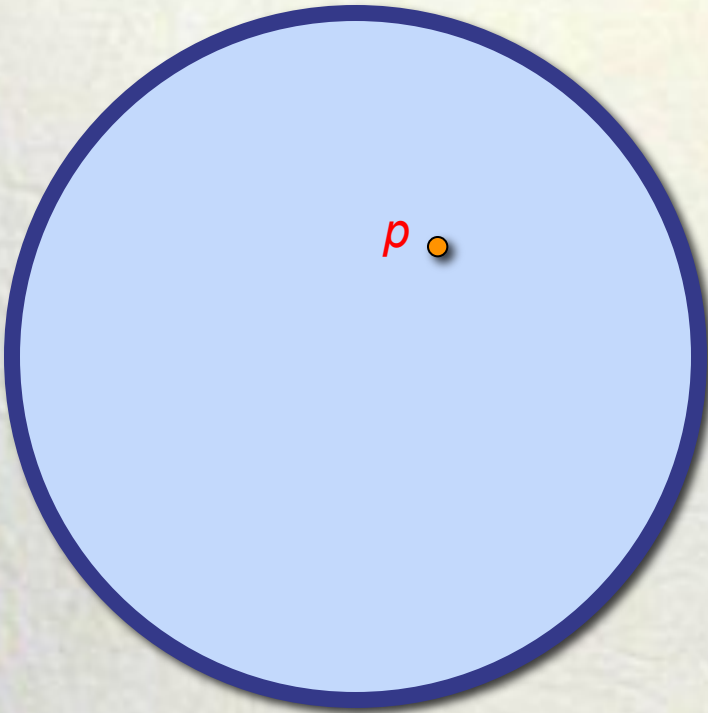


p

La Teoremas de Newton

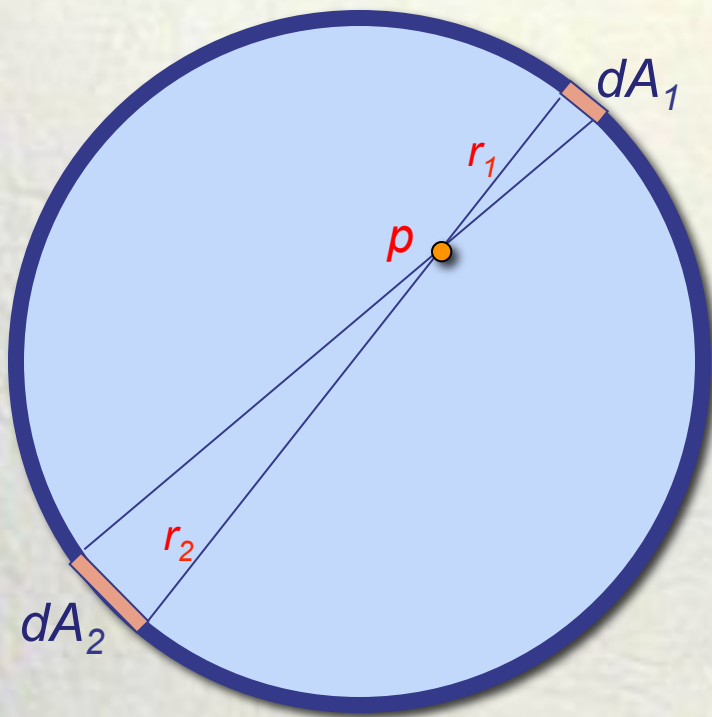
El segundo Teorema resulta un tanto desconcertante, sin embargo, es el más fácil de probar.

- Sea un punto arbitrario p en el interior del cascarón.



La Teoremas de Newton

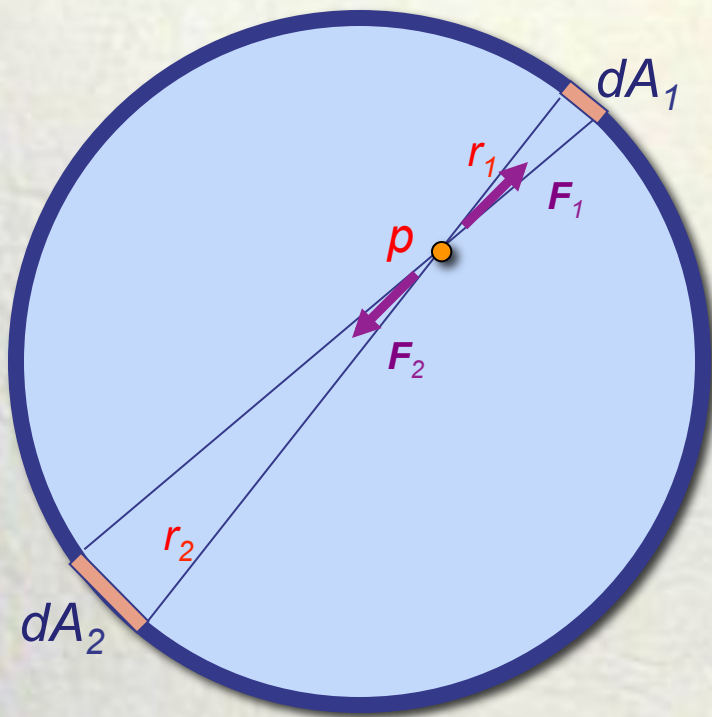
El segundo Teorema resulta un tanto desconcertante, sin embargo, es el más fácil de probar.



- Sea un punto arbitrario p en el interior del cascarón.
- Consideremos ahora una dirección arbitraria y sean r_1 y r_2 las distancias del punto p a los segmentos dA_1 y dA_2 del cascarón diametralmente opuestos a lo largo de esta dirección.

La Teoremas de Newton

El segundo Teorema resulta un tanto desconcertante, sin embargo, es el más fácil de probar.

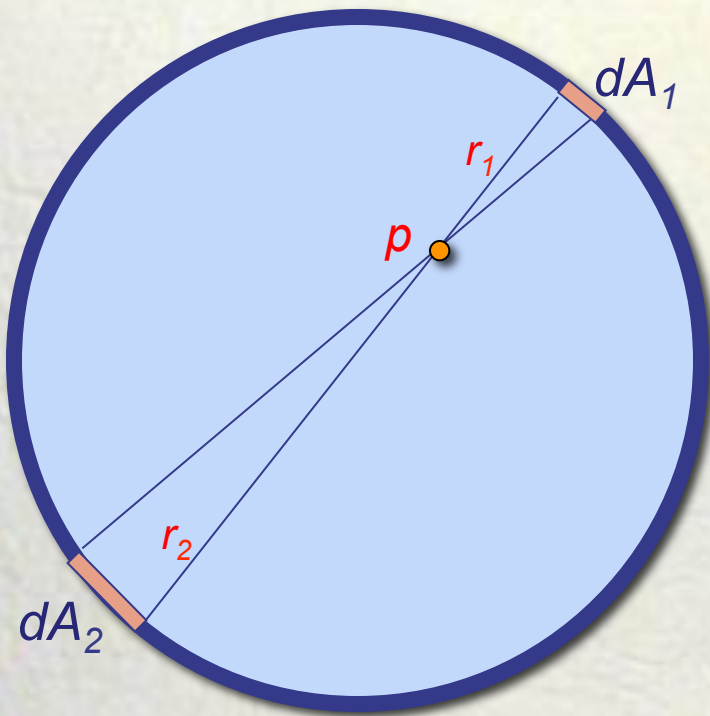


- Sea un punto arbitrario p en el interior del cascarón.
- Consideremos ahora una dirección arbitraria y sean r_1 y r_2 las distancias del punto p a los segmentos dA_1 y dA_2 del cascarón diametralmente opuestos a lo largo de esta dirección.
- Las fuerzas F_1 y F_2 con que los segmentos dA_1 y dA_2 atraen al punto p son diametralmente opuestas y sus magnitudes son proporcionales a:

$$F_1 \propto \frac{dA_1}{r_1^2}, \quad F_2 \propto \frac{dA_2}{r_2^2}$$

La Teoremas de Newton

El segundo Teorema resulta un tanto desconcertante, sin embargo, es el más fácil de probar.



- Sea un punto arbitrario p en el interior del cascarón.
- Consideremos ahora una dirección arbitraria y sean r_1 y r_2 las distancias del punto p a los segmentos dA_1 y dA_2 del cascarón diametralmente opuestos a lo largo de esta dirección.
- Las fuerzas F_1 y F_2 con que los segmentos dA_1 y dA_2 atraen al punto p son diametralmente opuestas y sus magnitudes son proporcionales a:

$$F_1 \propto \frac{dA_1}{r_1^2}, \quad F_2 \propto \frac{dA_2}{r_2^2}$$

- Pero la cantidad de masa en cada segmento es proporcional a la distancia a al punto p al cuadrado:

$$dA_1 \propto r_1^2, \quad dA_2 \propto r_2^2$$

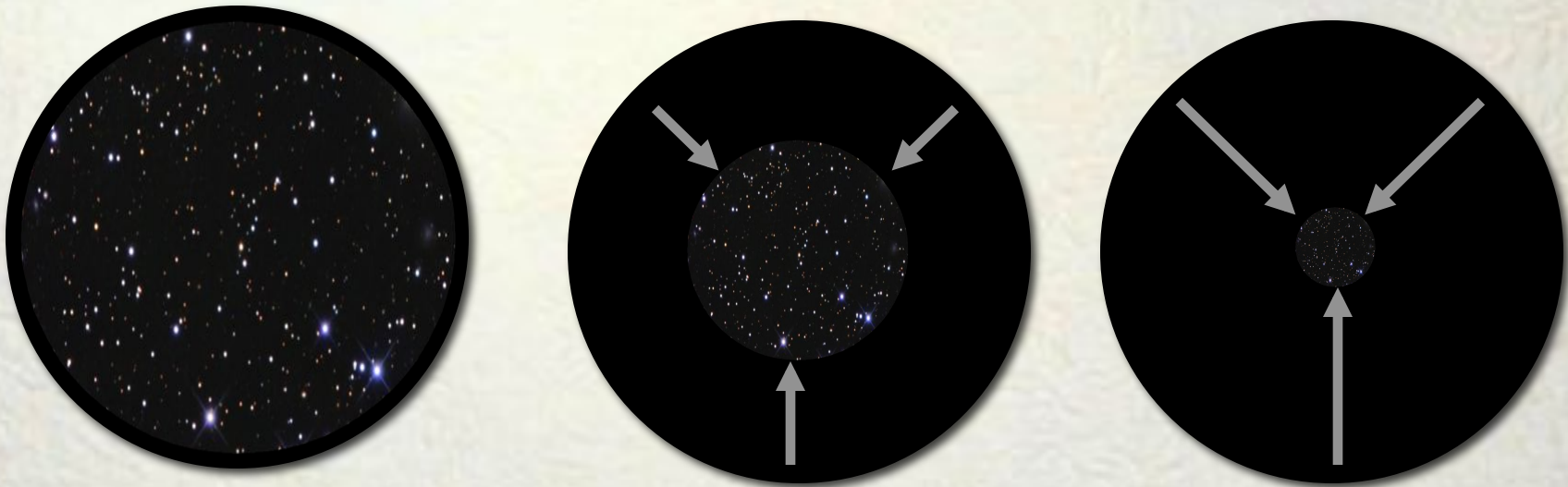
- Esto implica que las fuerzas son iguales en magnitud.

El Universo de Newton



Newton era una persona religiosa y creía que el Universo, al ser una creación divina, debía ser eterno, infinito e inmutable.

El Universo de Newton



Sin embargo, Newton se dio cuenta de que si el espacio fuera infinito, pero las estrellas ocuparan un espacio finito, todas las estrellas se “caerían” hacia el centro debido a la atracción gravitacional.

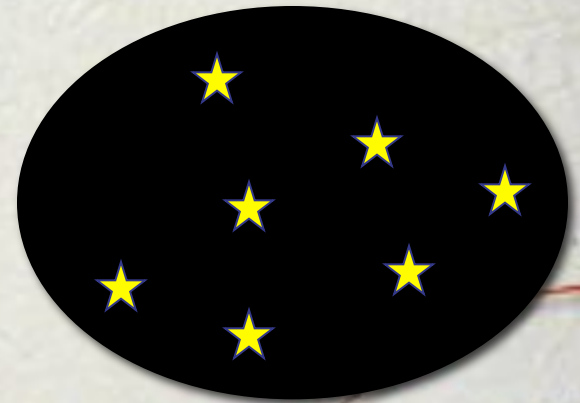
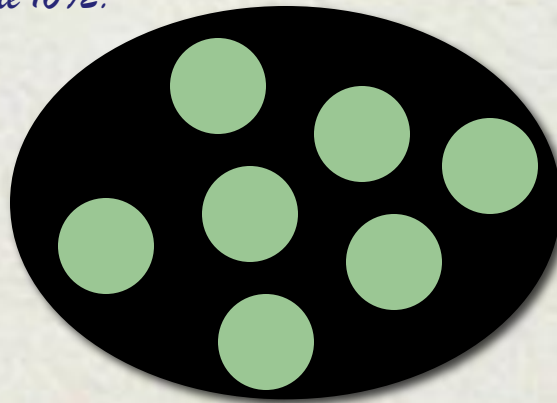
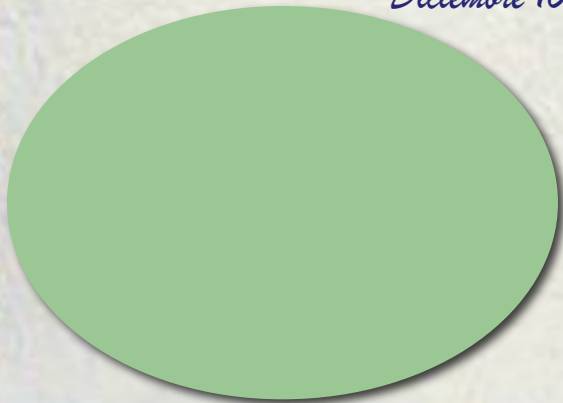
Aplicando los teoremas de Newton, es fácil ver que toda porción finita de masa atraería a todas sus partes hacia su centro, produciendo así un Universo en contracción.

El Universo de Newton

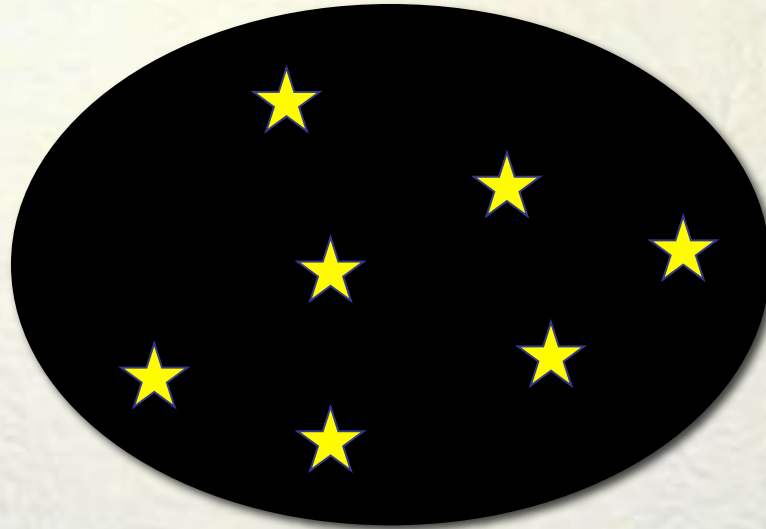
En una carta a Richard Bentley, Newton describió la solución a este dilema:

“...: pero si la materia estuviese distribuida de manera uniforme por todo el espacio infinito, no podría concentrarse en una masa. Parte de ella se concentraría en una masa y otra parte en una masa diferente; de manera tal que tendríamos un infinito de grandes masas, dispersas a gran distancia unas de otras por todo el espacio infinito. De esta manera podría ser que el Sol y las estrellas fijas se hayan formado, suponiendo que la materia fuese de naturaleza lucifera.”

*Isaac Newton
Diciembre 10 de 1692.*



El Universo de Newton



Newton concluyó que sólo un Universo infinito, donde las estrellas y demás objetos materiales ocupan también un volumen infinito era el único Universo que permitiría un estado estacionario: Al no haber un centro definido, la materia se colapsaría en dirección de múltiples centros, mas no como un todo. Newton asoció estos centros de atracción con las estrellas.

El Universo de Newton

En retrospectiva, esta visión de Newton de un Universo dominado por la fuerza de gravedad y que se mantiene estático, no es posible, aún en el caso de una extensión sin frontera y limitándonos a las leyes de la Mecánica de Newton.



El Universo de Newton

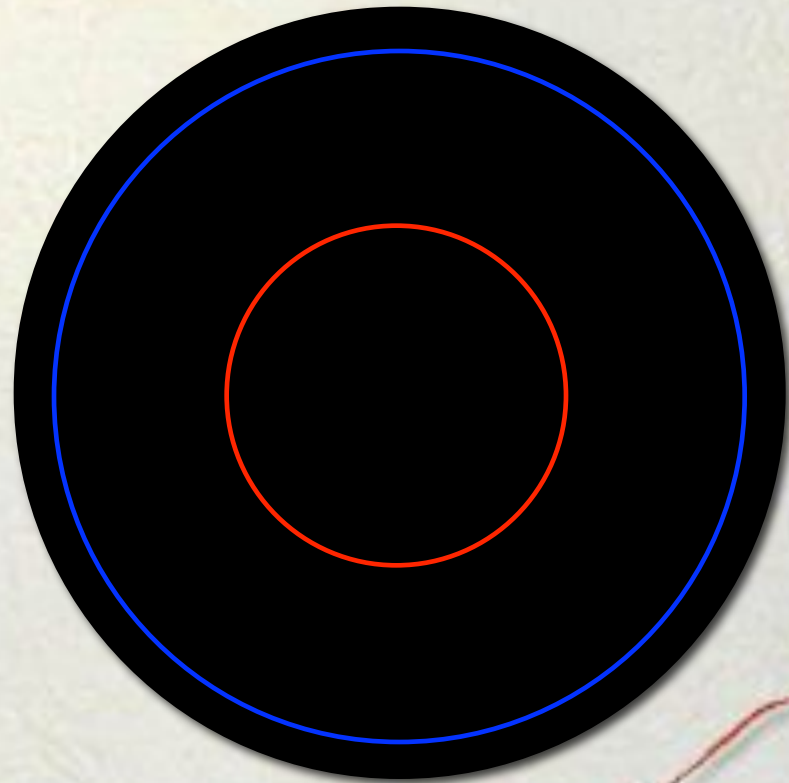
En retrospectiva, esta visión de Newton de un Universo dominado por la fuerza de gravedad y que se mantiene estático, no es posible, aún en el caso de una extensión sin frontera y limitándonos a las leyes de la Mecánica de Newton.

Para ver por qué esto así, imaginemos que dividimos el Universo de Newton en cascarones esféricos concéntricos alrededor de un punto arbitrario.



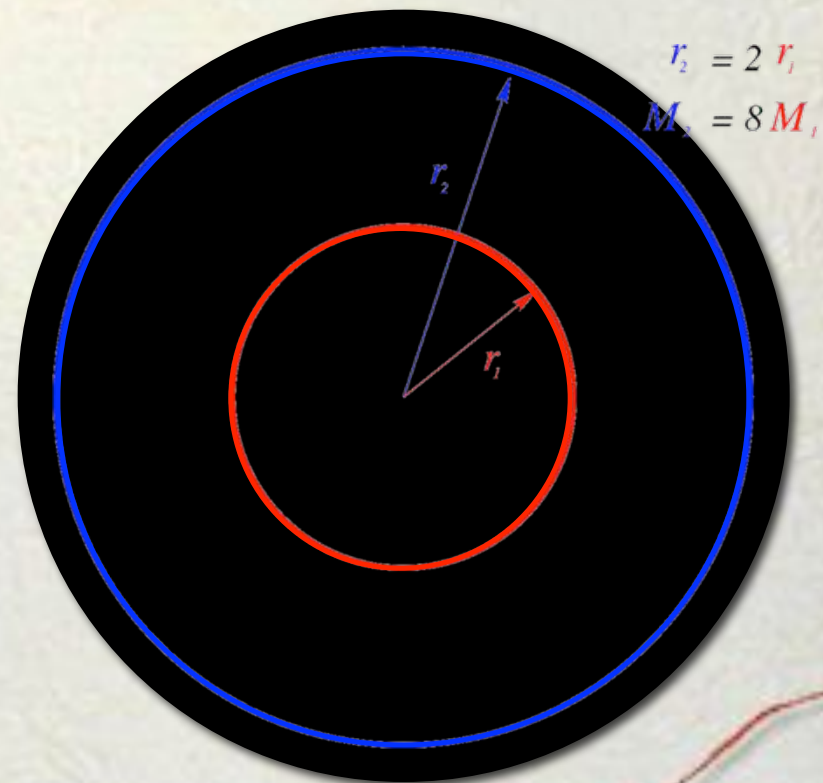
El Universo de Newton

Centremos nuestra atención en dos de los cascarones esféricos, uno de radio r_1 y otro del doble de radio $r_2 = 2r_1$.



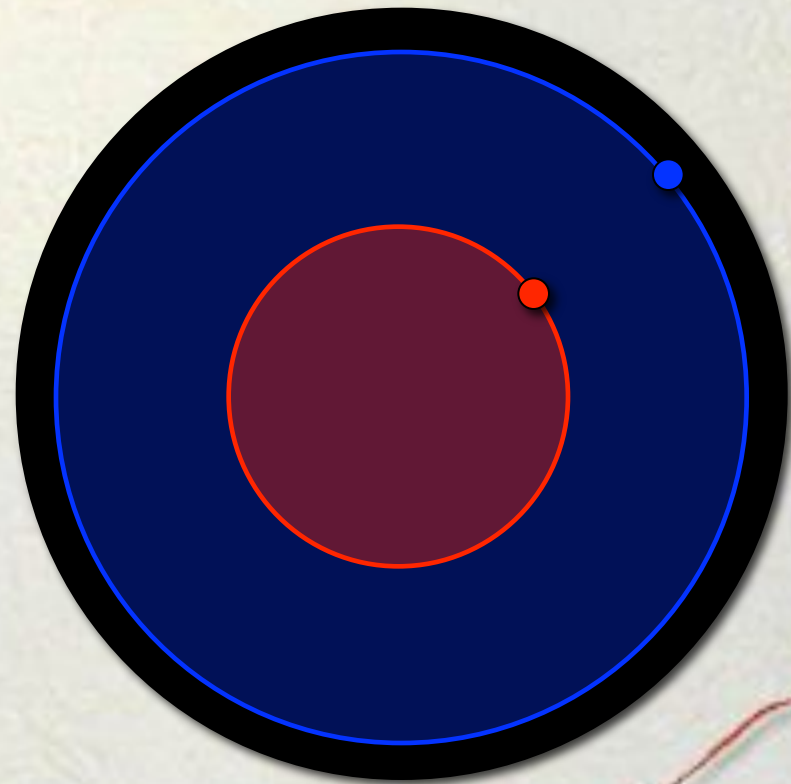
El Universo de Newton

Dado que el segundo cascarón tiene el doble de tamaño, su volumen es 8 veces mayor ($Volumen \propto r^3$). Dado que el Universo de Newton es homogéneo, la segunda esfera contendrá 8 veces más masa que la primera: $M_2 = 8 M_1$.



El Universo de Newton

Usando los teoremas de Newton, vemos que puntos situados en el borde de estas esferas no son afectados por la masa externa a ellas, y solo importa la fuerza ejercida por la masa interior a estas regiones, pudiendo considerar esta fuerza igual a la que ejerce un punto masa igual a toda la masa contenida en la región y situada en el centro.



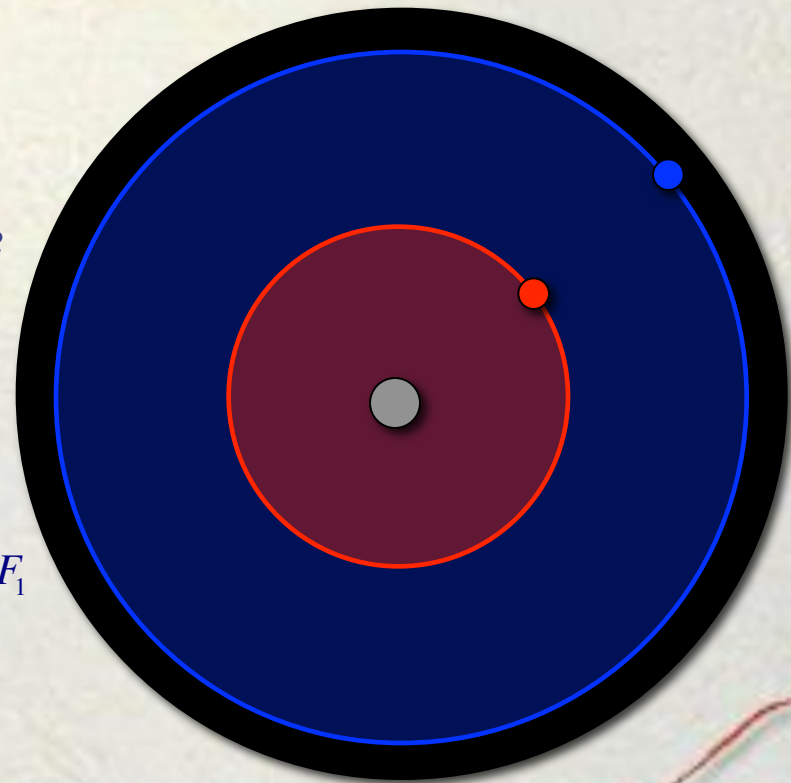
El Universo de Newton

Como la fuerza de gravedad ejercida por un punto masa depende de la magnitud de la masa y el inverso cuadrado de la distancia al mismo,

$$F \propto M / r^2,$$

y tomando en cuenta el hecho de que r_2 es 2 veces mayor que r_1 mientras que M_2 es 8 veces mayor que M_1 , concluimos que la fuerza ejercida sobre la partícula azul es 2 veces mayor que la ejercida sobre la roja:

$$F_1 \propto M_1 / r_1^2, \quad F_2 \propto M_2 / r_2^2 = (8M_1) / (2r_1)^2 = 2F_1$$

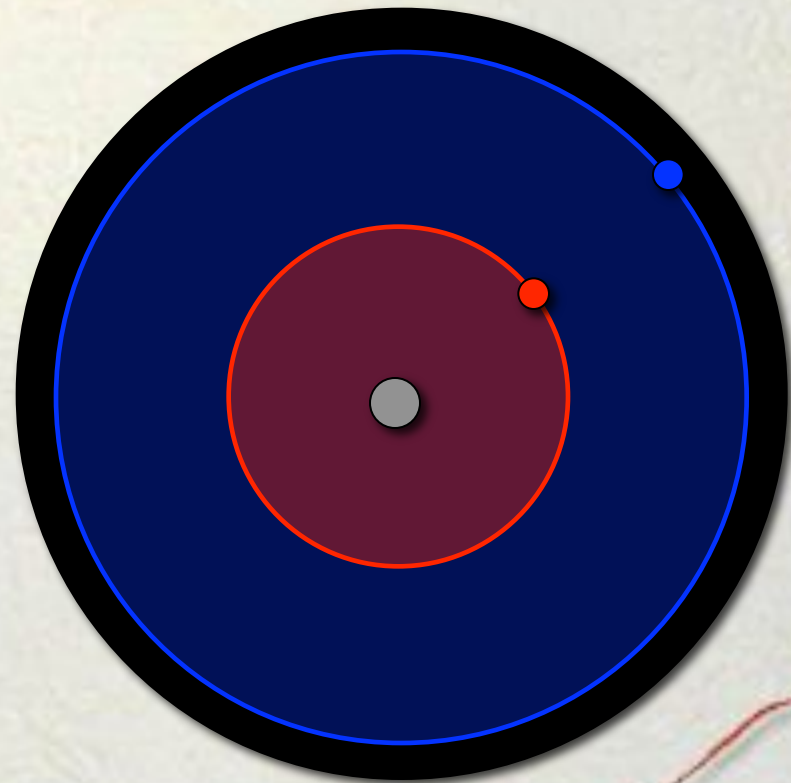


El Universo de Newton

Dado que la distancia que la partícula azul debe viajar hasta el centro de atracción es el doble de lo que debe viajar la partícula roja, llegamos a la conclusión de que ambos puntos llegarán al centro común al mismo tiempo.

Repitiendo este argumento para cualquier región esférica es claro que el Universo entero de Newton se colapsará sobre sí mismo, todo al mismo tiempo y en un tiempo finito.

Lo que es un poco difícil de entender es que este colapso se pueda efectuar sin que exista un centro de colapso definido, **siendo cada punto un centro de atracción.**



El Universo de Newton

Existe otro argumento poderoso en contra del Universo estático, eterno e infinito de Newton y que todo mundo puede ver con sus propios ojos: **la paradoja de Olbers**.



Todo mundo sabe que el cielo nocturno es negro y las estrellas aparecen como puntos aislados de luz.

¿Se han preguntado alguna vez por que es la noche oscura?

El Universo de Newton

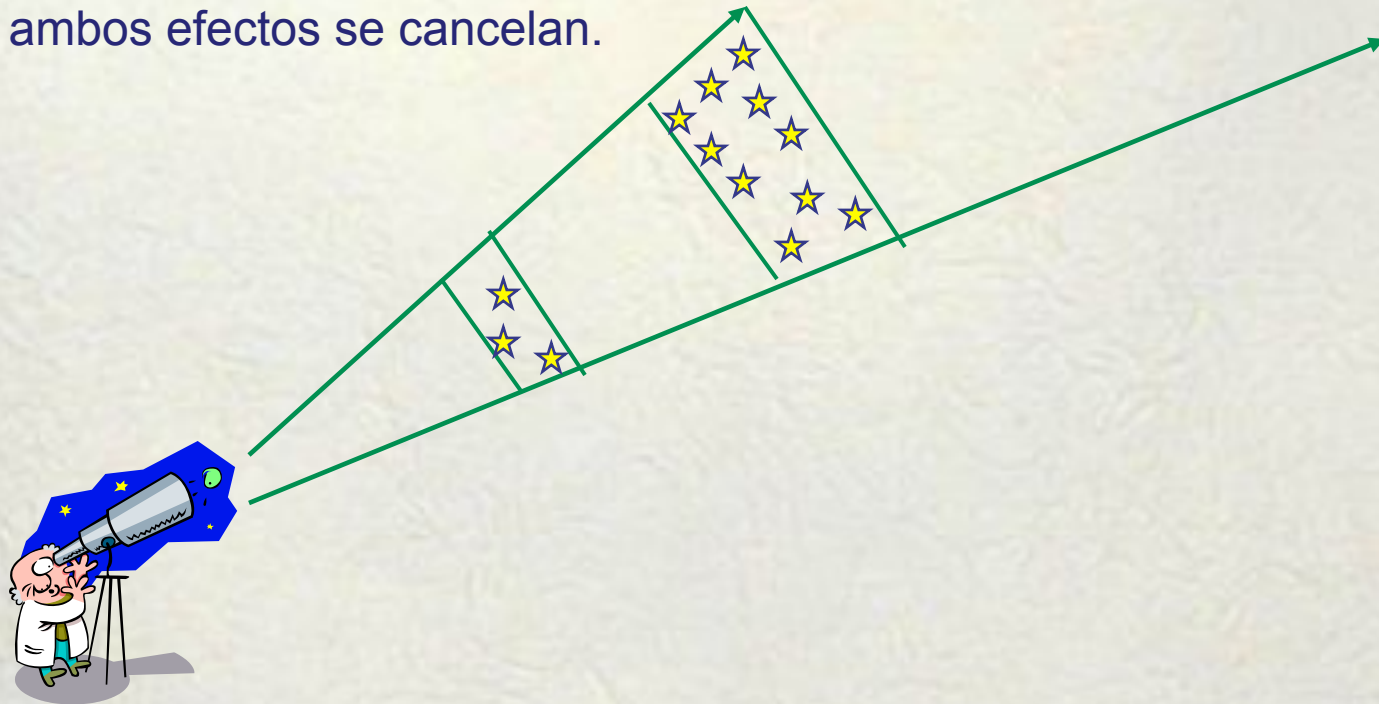
Fíjense que si el Universo fuese infinito, para donde quiera que miráramos en la noche, debíamos encontrarnos con una estrella.



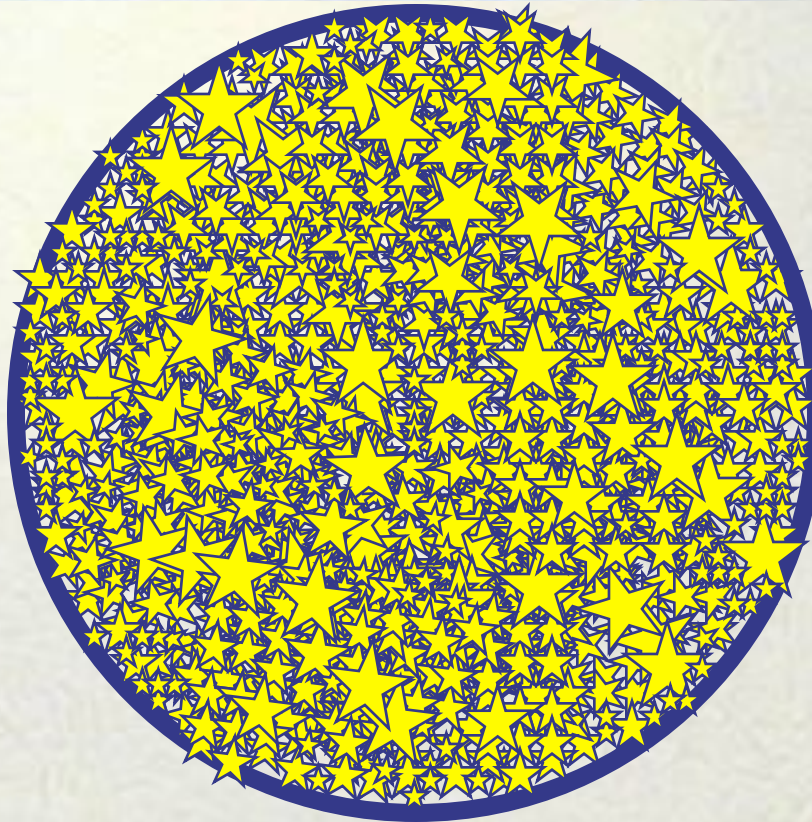
Si además el Universo fuese eterno, la luz de todas las estrellas ya habría tenido tiempo de llegar a nosotros.

El Universo de Newton

Podría pensarse que entre más lejanas, más débiles aparecen las estrellas, lo cuales es cierto. Sin embargo, hay también más estrellas, y ambos efectos se cancelan.



El Universo de Newton



Luego entonces el cielo nocturno no debía ser negro,
¡sino estar todo iluminado!

El Universo de Newton



El hecho de que el cielo nocturno sea oscuro nos dice que, ¡el Universo no puede ser infinito y eterno!

El Universo de Newton

Así pues, bajo las leyes de la mecánica de Newton, un Universo estático y eterno no es posible, contrariamente a lo que Newton y todo mundo pensaba.

El Universo de Newton es producto de las leyes de la Mecánica Clásica; al terminar el siglo XIX, este mundo clásico se encontraba asediado por un número cada vez mayor de fenómenos que no podía explicar.

El tiempo de hacer una revisión mayor de éste mundo de la Física Clásica había llegado.



Fin de la segunda parte

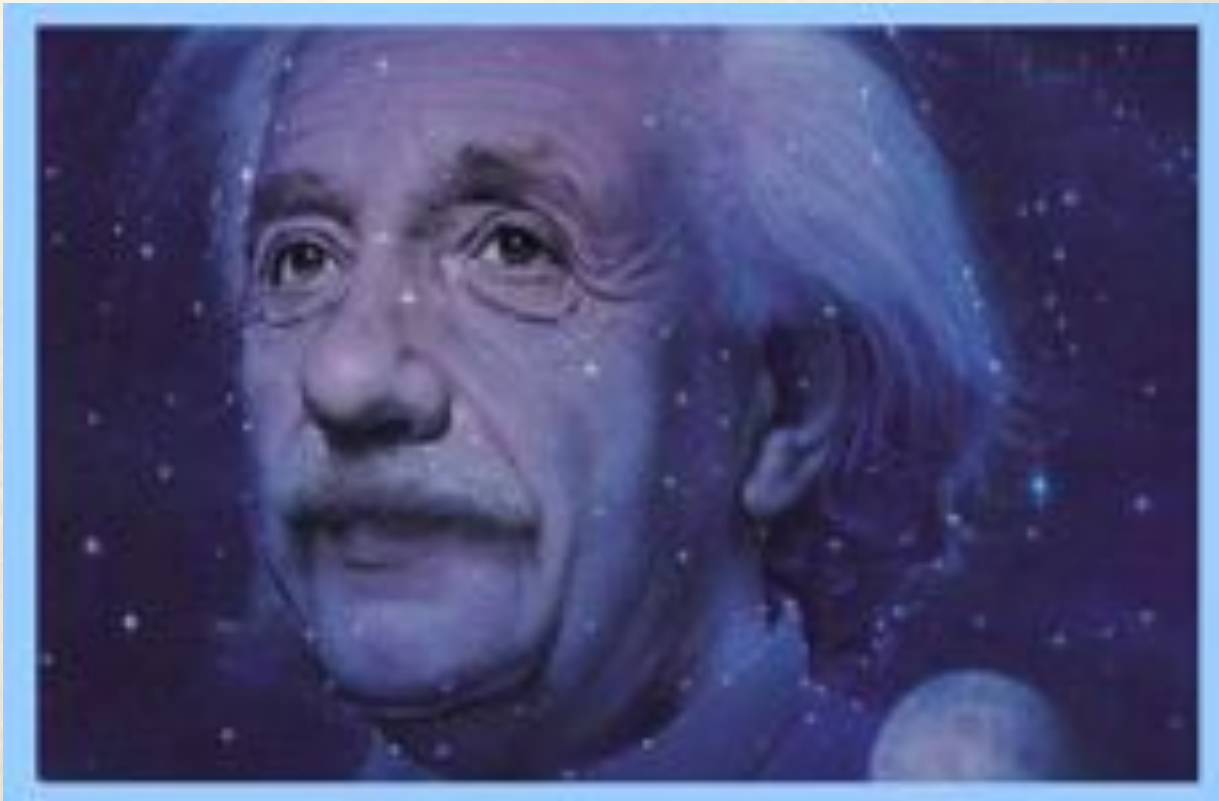
Discusión de la segunda parte

- 1) ¿Por qué es tan importante la contribución de Newton?
 - a) Modelo físico, capaz de hacer predicciones
 - b) Incorpora todo el conocimiento empírico acumulado hasta ese entonces.
 - c) Rompe con la dicotomía cielo/Tierra.

- 2) ¿Por qué Newton no pudo romper del todo con los prejuicios de su época?
 - a) Insistencia en un Universo eterno e inmutable.
 - b) Todo científico es necesariamente producto de su época y sociedad
 - c) Complejidad de la mente humana, que puede incorporar puntos de vista contradictorios.

- 3) La ciencia antes y después de Newton
 - a) Fin del empiricismo y maduración del método científico.
 - b) Importancia del Cálculo Diferencial e Integral para describir movimiento.
 - c) Establecimiento de la idea del Universo como un todo ordenado y regido por la causalidad.

El Universo de Einstein



El Universo de Einstein

“ Cuando has eliminado todo lo imposible, lo que queda, sin importar lo improbable que parezca, debe ser la verdad. ”



*Arthur Conan Doyle,
Las Aventuras de Sherlock Holmes (1884)*

El Universo de Einstein

Antes de iniciar nuestro siguiente capítulo en esta historia, es necesario hacer un paréntesis para hablar de algo que seguramente les es familiar a todos:

“el sentido común”.

¿Qué es el sentido común?

El sentido común es un modelo que tenemos en la mente sobre como funciona el mundo a nuestro alrededor.



Así, por ejemplo, sabemos que las manzanas son rojas, y como casi todos los cuerpos, caen al suelo cuando las soltamos.

¿Qué es el sentido común?

El sentido común es un modelo que tenemos en la mente sobre como funciona el mundo a nuestro alrededor.



Sabemos reconocer la cara de una persona, ...

¿Qué es el sentido común?

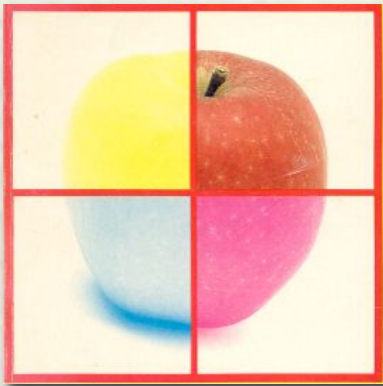
El sentido común es un modelo que tenemos en la mente sobre como funciona el mundo a nuestro alrededor.



... y sabemos que la lluvia cae de arriba para abajo.

Todo esto puede parecer tan obvio, que hasta resulta tonto decirlo.

¿Qué es el sentido común?



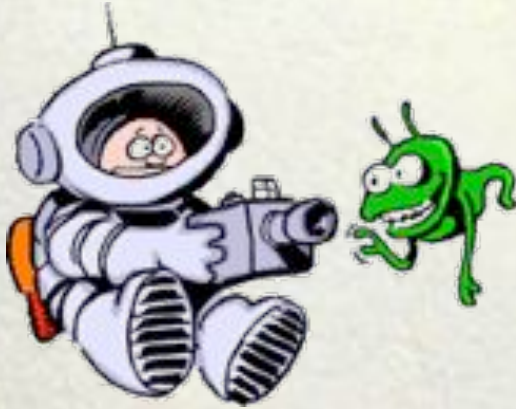
Sin embargo, el color de una manzana depende del color de la luz con que la iluminamos en la oscuridad.

¿Qué es el sentido común?



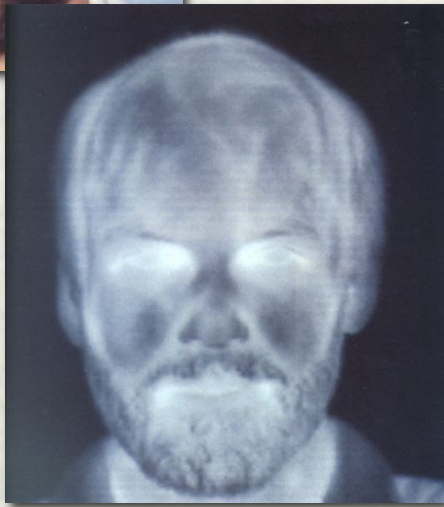
Lo que hace que las cosas caigan es la gravedad, y si esta no existiese, no caeríamos.

¿Qué es el sentido común?



De hecho, los astronautas en el espacio flotan dentro de sus naves, aunque en este caso no es por falta de gravedad.

¿Qué es el sentido común?



El rostro de una persona se ve muy diferente en luz infrarroja.

¿Qué es el sentido común?



y la lluvia no necesariamente cae de arriba para abajo, como cualquier pez en el mar bien sabe, ya que para ellos, el equivalente a las gotas de lluvia son las burbujas de aire, ¡las cuales suben!



¿Qué es el sentido común?

En realidad, el sentido común *no explica nada*, simplemente nos permite predecir el comportamiento de nuestro entorno en base a la experiencia diaria que vamos acumulando durante toda nuestra vida.



Así por ejemplo, una persona que se sube por vez primera a una montaña rusa tiene una experiencia para la cual el sentido común no la ha preparado.

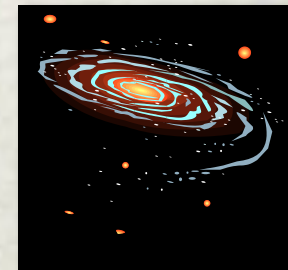
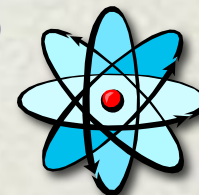
Sin embargo, después de varias experiencias similares, incorporará estas nuevas sensaciones a su sentido común.

¿Qué tiene esto que ver con nuestro tema?

Mientras la Física estaba restringida a modelar los eventos del entorno que nos rodea, el sentido común nos servía como una guía confiable sobre qué esperar.



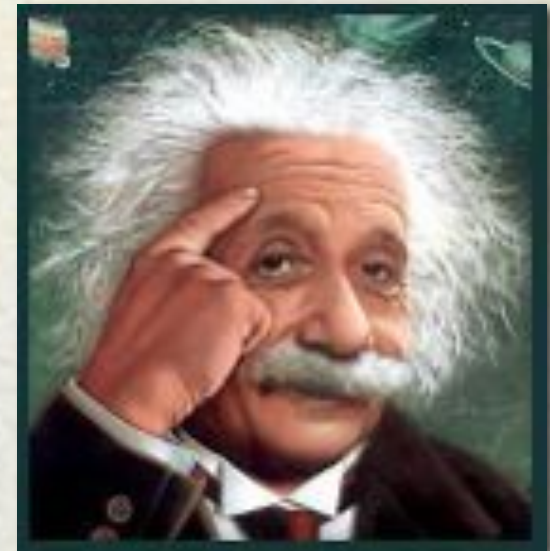
Sin embargo, al abandonar la Física el entorno familiar y extenderse para abarcar mundos ajenos a nuestra experiencia cotidiana, como el mundo de los átomos, o el de las galaxias, no podemos esperar que el sentido común continúe siendo una guía infalible



¿Qué tiene esto que ver con nuestro tema?

Y por esto es que la cita de Conan Doyle es tan apropiada al introducirnos en el mundo de la Física moderna, ya que debemos dejar atrás nuestro sentido común, que de hecho, lejos de ayudarnos, se convierte en un obstáculo.

Debemos renunciar al sentido común y adoptar a las Matemáticas y los resultados experimentales como nuestras únicas guías al trascender nuestro entorno inmediato.



El Universo de Einstein

Las grandes revoluciones de la ciencia parten muchas veces de llevar a sus últimas consecuencias investigaciones que parten de preguntas aparentemente triviales. Tal fue el caso de la revolución iniciada por Albert Einstein.

En 1905 él publicó un artículo titulado: *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*, en el que introduce la llamada *Teoría Especial de Relatividad*. Diez años más tarde, publica en varios artículos el trabajo en el que introduce la *Teoría General de la Relatividad*.

En el primer trabajo desaparece la noción de tiempo absoluto, en el segundo, interpreta a la fuerza de gravedad como una curvatura del espacio y el tiempo. Estos dos trabajos rompen con el mundo clásico de Newton y nos llevan a un sistema de ecuaciones con el que es posible describir por vez primera, la evolución del Universo entero.



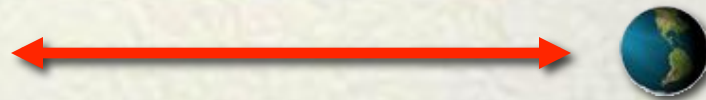
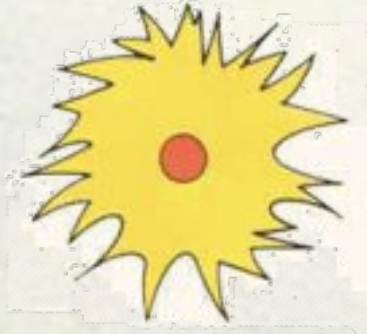
Albert Einstein (1879-1955)

El Mundo de la Relatividad Especial



El Mundo de la Relatividad Especial

En el Universo de Newton, la fuerza de gravedad ejerce su influencia de manera instantánea y a grandes distancias, sin que haya un medio físico a través del cual se pueda transmitir su influencia.



El Mundo de la Relatividad Especial

La acción a distancia, en particular, preocupó mucho a Newton. De hecho, al publicar su trabajo, él fue cuidadoso al escribir:

“Hasta ahora no he podido descubrir la causa de las propiedades de la gravedad a partir de fenómenos observados o experimentos, y no propongo hipótesis alguna ...

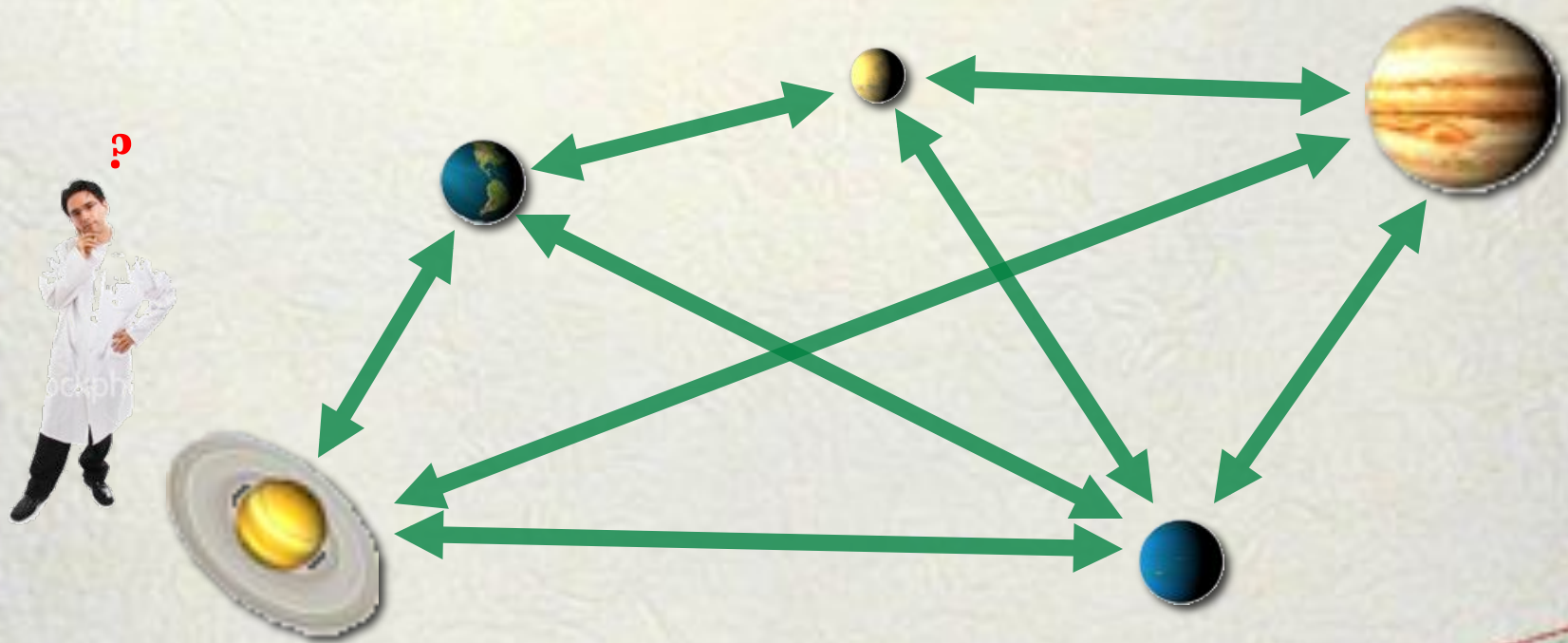
Para nosotros es suficiente que la gravedad existe, y actúa de acuerdo a las leyes que hemos mostrado, y que describe ampliamente los movimientos de todos los cuerpos celestes y de nuestro océano.”

Isaac Newton,
Libro III
Philosophiae Naturalis Principia Mathematica

Es claro que Newton pensaba que su trabajo nos da una descripción, mas no una explicación, sobre la manera de actuar de la gravedad.

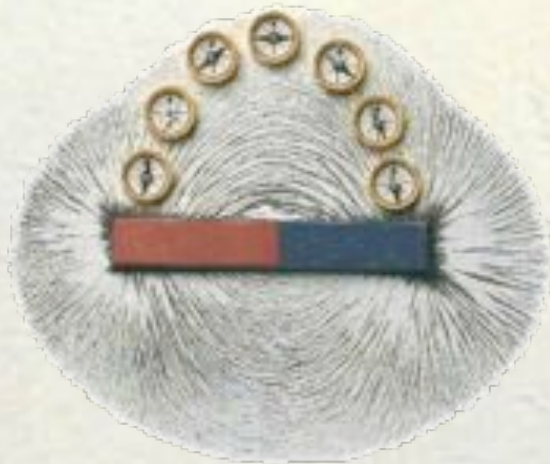
El Mundo de la Relatividad Especial

Durante los siguientes dos siglos existió un gran debate entre los físicos sobre la manera en que podría explicarse esta “acción a distancia”.



El Mundo de la Relatividad Especial

A principios del siglo XIX, el físico inglés, *Michael Faraday* introdujo el concepto de “*líneas de fuerza*” para describir el efecto a distancia del campo magnético.



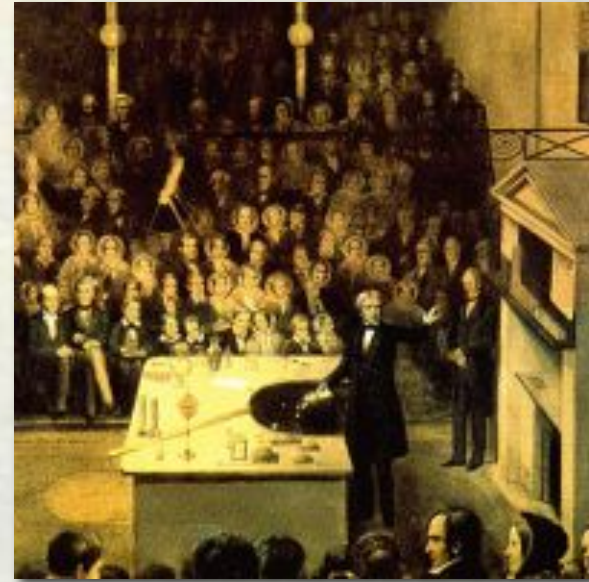
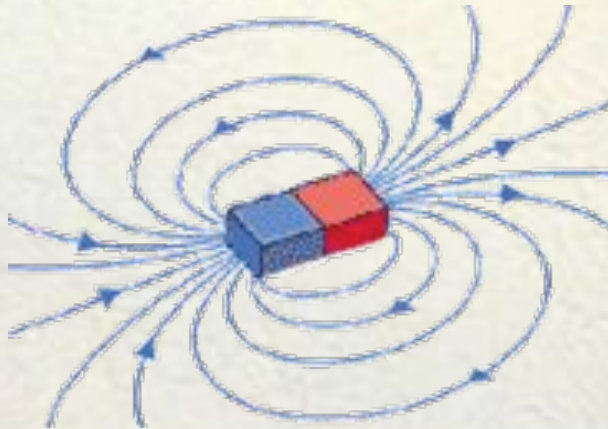
Líneas de campo magnético de un imán de barra



Michael Faraday (1791-1867)

El Mundo de la Relatividad Especial

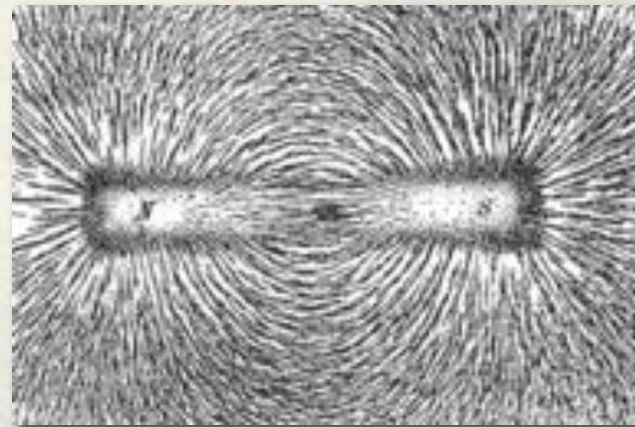
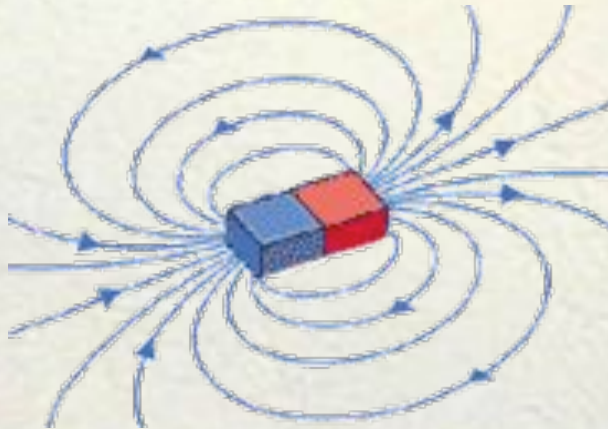
Según Faraday, el espacio aún vacío, esta lleno de líneas de fuerza producidas por un imán y que transmiten de algún modo el efecto magnético del imán.



Este concepto fue pronto generalizado a la fuerza eléctrica y descrito como un *campo de fuerza*.

El Mundo de la Relatividad Especial

Para Faraday, estas líneas de fuerza eran reales y como ejemplo mostraba lo que sucede cuando acercamos un imán a una superficie en la que se ha esparcido limadura de hierro.



Sin embargo, para la mayor parte de sus contemporáneos, el concepto de campo de fuerzas era un mero truco que facilitaba el cálculo de los efectos a distancia de las fuerzas eléctrica y magnética.

El Mundo de la Relatividad Especial



James Clerk Maxwell (1831-1879)

En 1864, el físico escocés, J. Maxwell presentó un sistema de ecuaciones que lleva su nombre y que describen a los fenómenos eléctricos y magnéticos como manifestaciones de una misma fuerza electromagnética.

**Maxwell-Gleichungen
(in differentieller Form)**

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

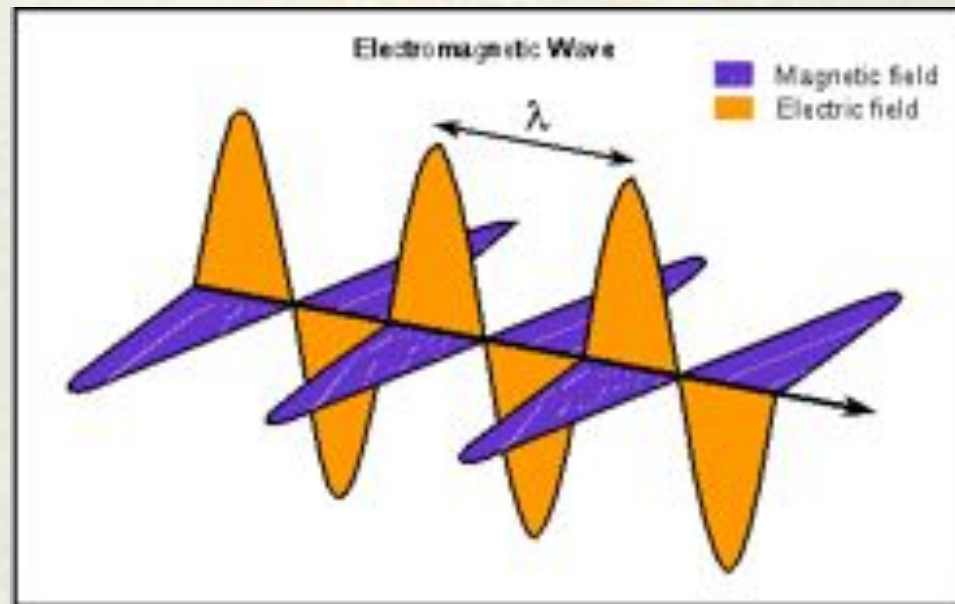
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

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

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

El Mundo de la Relatividad Especial

Un punto crucial de estas ecuaciones es que, en el vacío, éstas pueden escribirse como una ecuación de onda en el que la transmisión de las llamadas “*ondas electromagnéticas*” ocurre a una velocidad constante y universal que coincide con la velocidad de la luz.



El Mundo de la Relatividad Especial

Esto dio lugar a una gran controversia al final del siglo XIX:

**¿Qué exactamente son estas ondas electromagnéticas?
¿en qué medio se transmiten?**

y más importante para nosotros aquí,

¿por qué siempre se transmiten a una velocidad constante que no depende del movimiento del observador?

El Mundo de la Relatividad Especial

¿Qué exactamente son estas ondas electromagnéticas?

La respuesta a la primera pregunta la dio el físico alemán *H. Hertz*, quien fue el primero en generar y detectar lo que ahora llamamos ondas de radio.



Heinrich Hertz (1857-1894)



Transmisor de Hertz

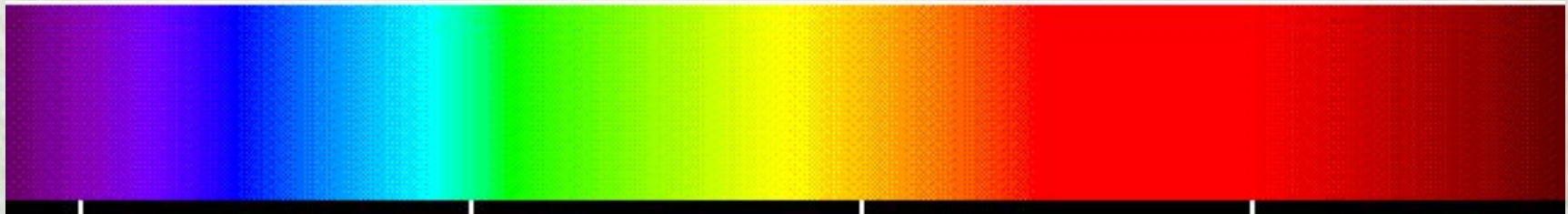


Receptor de Hertz

El Mundo de la Relatividad Especial

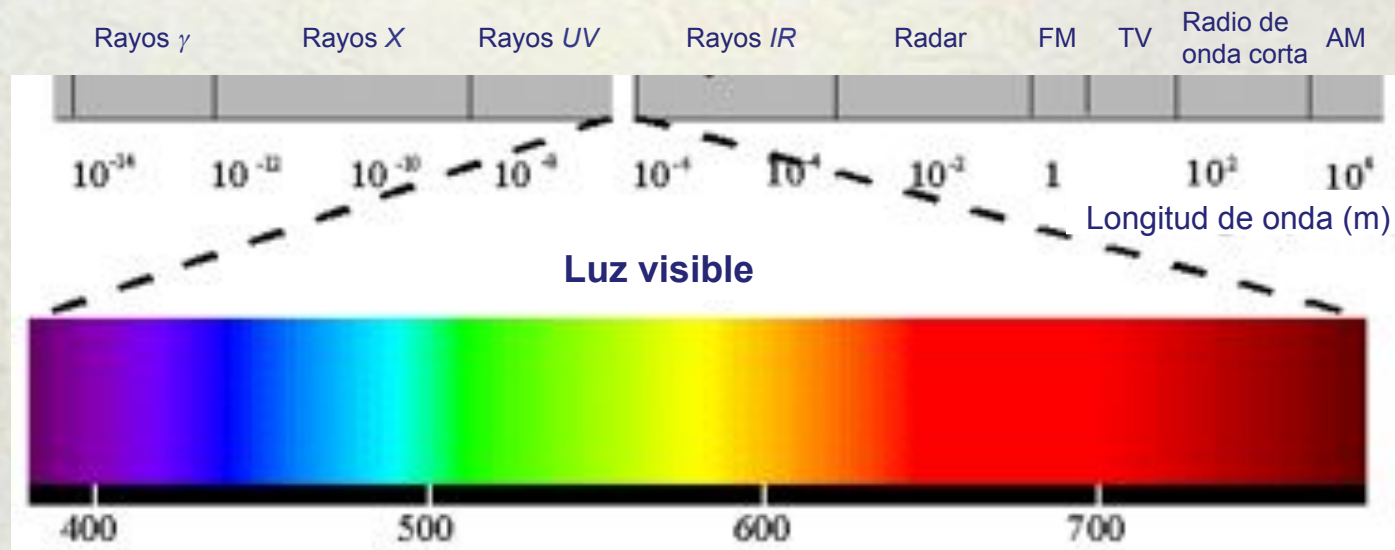
Muy pronto los físicos reconocieron que la luz visible es también una onda electromagnética donde la longitud de onda es percibida como el color de la luz.

Espectro electromagnético



El Mundo de la Relatividad Especial

Hoy en día sabemos que tanto los rayos γ producidos por sustancias radioactivas, como los rayos x empleados en la medicina, los rayos ultravioleta, responsables de las quemaduras cuando nos exponemos mucho al Sol, así como la luz infrarroja y las microondas, son también ondas electromagnéticas.



El Mundo de la Relatividad Especial

¿En qué medio se transmiten?

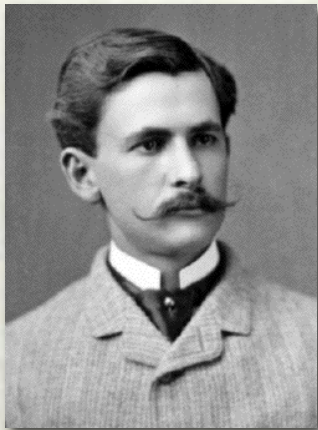
La cuestión del medio de propagación de las ondas electromagnéticas dio lugar a la aparición de la teoría del éter. Se pensaba que el éter era una sustancia que permeaba todo el Universo y cuya presencia no podía detectarse de forma directa.

El éter sería el medio que oscilaba al pasar una onda electromagnética.



El Mundo de la Relatividad Especial

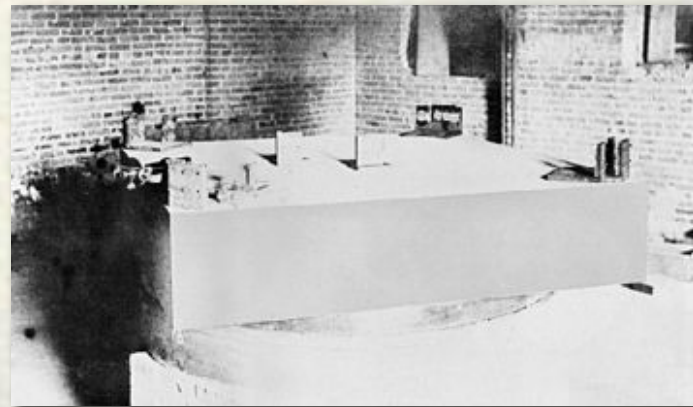
Se diseñaron muchos experimentos para detectar la presencia del éter.



Albert Michelson
(1852-1931)



Edward Morley
(1838-1923)

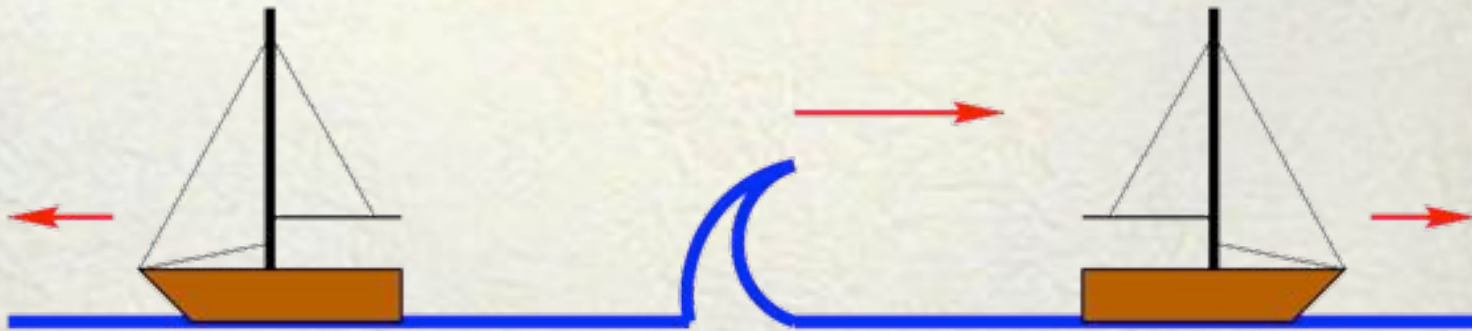


Aparato de Michelson y Morley

Uno de estos experimentos, el de los norteamericanos A. Michelson y E. Morley merece atención especial.

El Mundo de la Relatividad Especial

Michelson y Morley partieron del hecho trivial de que la velocidad de propagación de una onda depende de la velocidad de nosotros con respecto al medio en el que se propaga la onda.



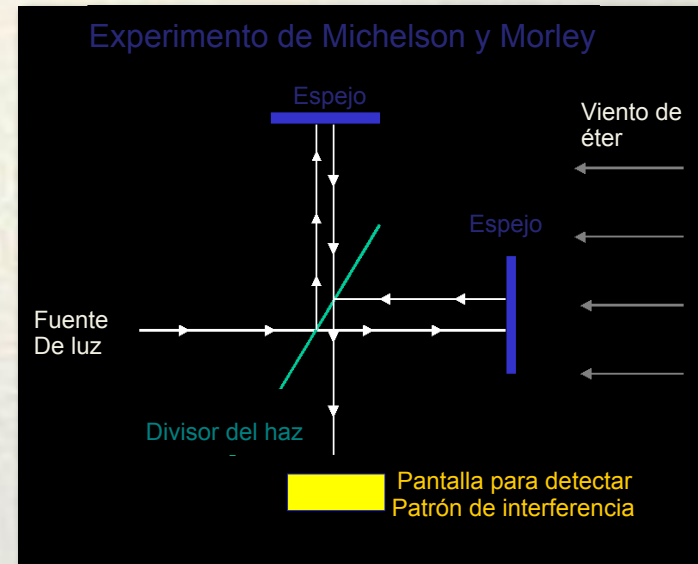
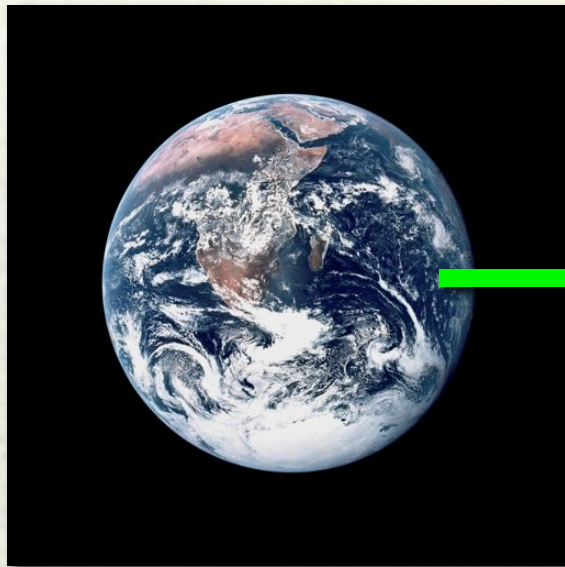
Por ejemplo, la velocidad de propagación de una ola en el mar depende de la velocidad con que nos movemos nosotros con respecto al mar.

Un marinero en el barco de la derecha medirá una velocidad de la ola menor que el que mida un marinero en el otro barco.

De hecho, si el barco de la derecha se mueve a la misma velocidad que la ola, la ola no se moverá con respecto al barco.

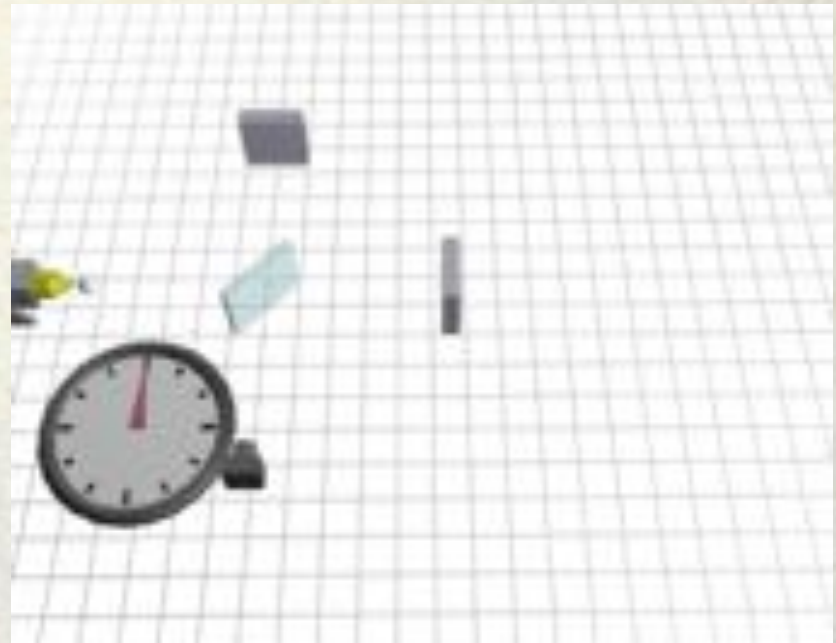
El Mundo de la Relatividad Especial

Michelson y Morley compararon la velocidad de la luz al moverse en dos direcciones distintas.



La idea del experimento es que la velocidad de la luz que se mueve ortogonal a la dirección del movimiento de la Tierra con respecto al éter no sería afectada, mientras que la de la luz que se mueve en la misma dirección si cambiaría.

El Mundo de la Relatividad Especial



El Mundo de la Relatividad Especial

Sin embargo, todos los experimentos que fueron diseñados para detectar la presencia del éter dieron resultados negativos.

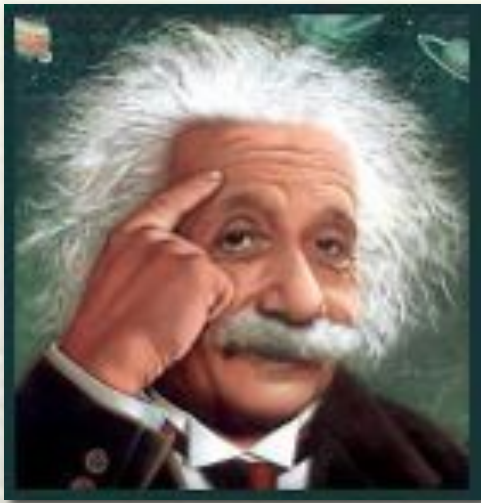
La conclusión inescapable es que las ondas electromagnéticas se propagan siempre con una velocidad constante ($c = 2.997294 \times 10^8 \text{ m/s}$),
¡independientemente del movimiento del observador!

En el ejemplo de los barcos es como si los marineros de ambos barcos midieran la misma velocidad de la ola. Esto en contradicción de lo que nos dice el sentido común, pero de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell que nos dicen que la velocidad de la luz es una constante universal.



$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)\end{aligned}$$

El Mundo de la Relatividad Especial

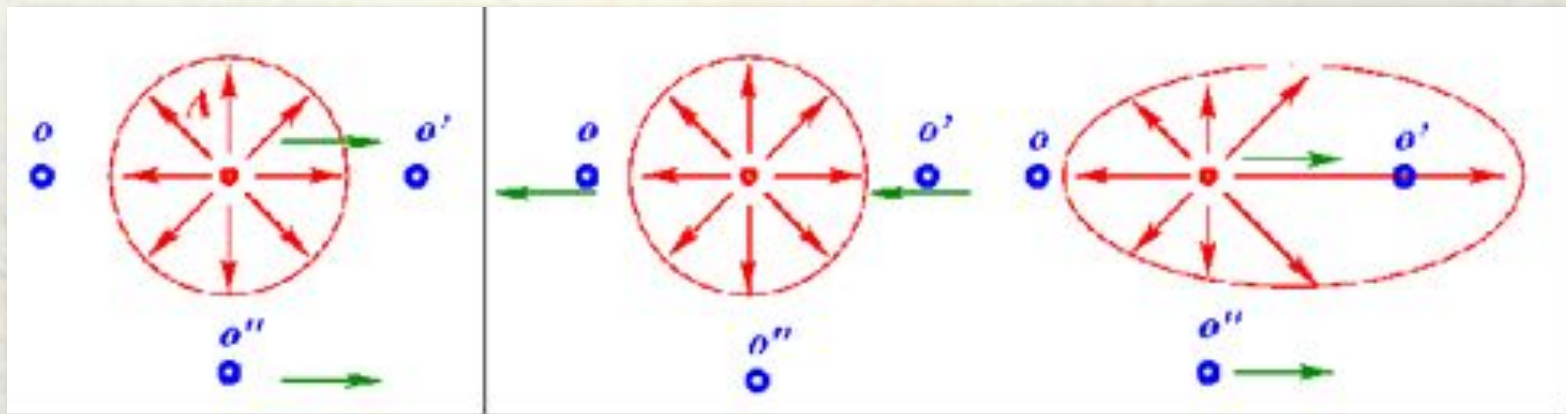


Einstein reflexionó sobre el significado de este hecho y pensó que si la influencia electromagnética no es instantánea, tampoco lo debía ser el de cualquier otra fuerza, incluida la gravedad.

Sin embargo, Einstein se dio cuenta de que si las fuerzas no se propagan de forma instantánea, y la velocidad de propagación de las fuerzas dependiera de la velocidad del observador, **la forma de las fuerzas no sería la misma para observadores distintos.**

El Mundo de la Relatividad Especial

Para ilustrar la conclusión de Einstein, analizemos una analogía con la propagación del sonido, cuya velocidad de propagación es finita y depende de la velocidad del que escucha.



Supongamos que una explosión ocurre en un punto A y es escuchada poco después por tres personas. Las personas O y O' se encuentran en reposo mientras que O'' se mueve junto con A hacia la derecha (cuadro izquierdo).

En el cuadro de en medio se se ilustra la situación que percibe O'' : el sonido de la explosión se expande de forma simétrica con respecto a A .

El cuadro derecho representa la descripción de los observadores O y O' : para ellos el sonido de la explosión se propaga de forma elipsoidal.

El Mundo de la Relatividad Especial

Einstein introdujo un principio que consideraba muy razonable: **las leyes de la Física deben ser las mismas para todos en el Universo**. Este llamado ***Principio de Relatividad*** es la opción más sencilla para un Universo sujeto a leyes físicas: Si éstas leyes dependieran del observador, no sería posible encontrar leyes universales, sino que habría leyes diferentes para cada observador.



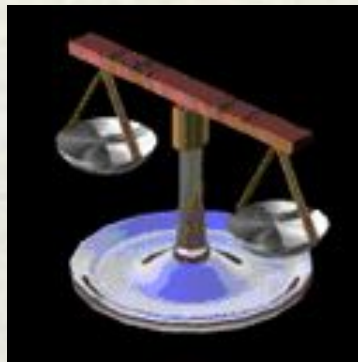
El Mundo de la Relatividad Especial

Einstein se enfrentó entonces al siguiente dilema:

- a) La velocidad de propagación de las fuerzas depende del observador, o
- b) La velocidad de propagación de las fuerzas es la misma para cualquier observador.

(a)

Ventajas	Desventajas
Corresponde a sentido común	No hay leyes universales de Física



(b)

Ventajas	Desventajas
La Física es la misma para todos	No corresponde al sentido común