

## La Teoría de la Relatividad

experimentos mentales sorprendentes



Santiago Heredia Avalos  
Departamento de Física  
Universidad de Murcia

## El movimiento según Galileo



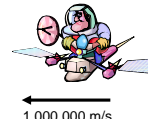
Galileo  
(1564-1642)

### EL MOVIMIENTO ES RELATIVO

Para describir el movimiento de un objeto hay que establecer con respecto a qué se está moviendo



"en reposo"



1.000.000 m/s

- ¿Cuál es la velocidad del astronauta de la nave con respecto al de la tierra?
- 1.000.000 m/s

## El movimiento según de Galileo

- ¿Cuál es la velocidad del astronauta de la nave con respecto al de la tierra?

- 500.000 m/s



500.000 m/s



1.000.000 m/s



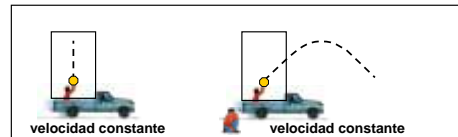
1.000.000 m/s



1.000.000 m/s

- ¿Cuál es la velocidad del astronauta de la nave con respecto al de la tierra?
- 2.000.000 m/s.

## Principio de Relatividad de Galileo



velocidad constante

velocidad constante



Newton  
(1642-1727)

Las leyes de la mecánica de Newton son iguales si permanecemos en reposo o nos movemos con velocidad constante:

### PRINCIPIO DE RELATIVIDAD DE GALILEO

## Principio de Relatividad de Galileo

Entonces, usando las leyes de la mecánica de Newton...



¿Podemos saber si nos estamos moviendo a velocidad constante o si estamos en reposo?



¡NO HAY FORMA DE AVERIGUARLO!

## La electricidad y el magnetismo



Coulomb  
(1736-1806)



Ampère  
(1775-1836)



Gauss  
(1777-1855)



Faraday  
(1791-1867)

...y otros, describieron los fenómenos de la electricidad y el magnetismo

## Nacimiento del electromagnetismo



Maxwell (1831-1879)

- En 1865 Maxwell unificó la electricidad, el magnetismo y la óptica: **electromagnetismo**
- ¡Su formulación original contenía 20 ecuaciones con 20 variables!  
→ 4 ecuaciones vectoriales
- Predecía que la luz era una onda electromagnética que viajaba a 300.000.000 m/s.  
Pero, ¿con respecto a qué?

## Electromagnetismo y movimiento

Usando las ideas de Galileo sobre movimiento relativo...



¡Las leyes de Maxwell sobre el electromagnetismo **NO** son iguales si permanecemos en reposo o si nos movemos con velocidad constante!



¿Están mal las leyes de Maxwell?

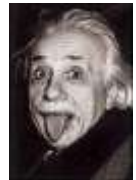
## Un experimento sorprendente



- Ambos astronautas miden la velocidad de la luz
- ¿Cuál es la velocidad de la luz con respecto a cada astronauta?

## Un experimento sorprendente

- El astronauta en reposo medirá:  
– 300.000.000 m/s
- El astronauta a 1.000.000 m/s medirá:  
– ¿301.000.000 m/s?  
– ¡FALSO!
- La velocidad de la luz es **la misma** para los dos



¡En 1887 Michelson y Morley lo comprobaron experimentalmente!

## Un experimento sorprendente

¿A qué velocidad viaja la luz con respecto a Superman?



¡A 300.000.000 m/s!

## Relatividad Especial de Einstein

Einstein propuso que las ideas de Galileo sobre el movimiento relativo eran erróneas y enunció unas nuevas para que...



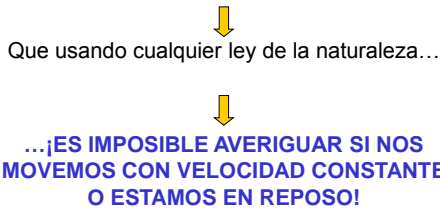
Einstein (1879-1955)

¡TODAS las leyes de la naturaleza son iguales si permanecemos en reposo o si nos movemos con una velocidad constante!

**PRINCIPIO DE RELATIVIDAD ESPECIAL DE EINSTEIN**

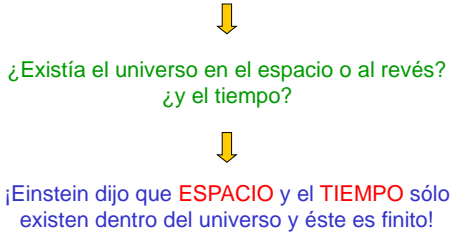
# Relatividad Especial de Einstein

¿Qué significa el principio de Relatividad de Einstein?

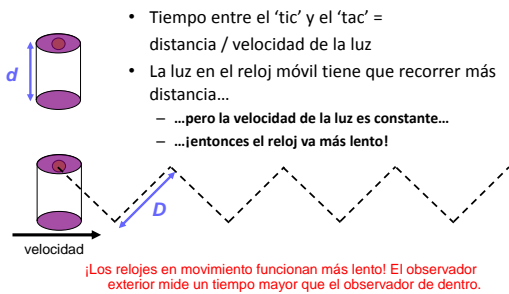


# El espacio-tiempo de Einstein

Newton pensaba que el espacio era infinito...

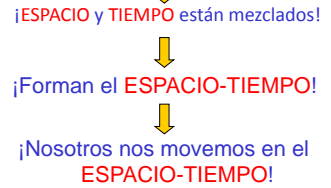


# Cómo funciona un reloj de luz



# El espacio-tiempo de Einstein

¿Qué pasa si la velocidad de la luz es siempre igual?

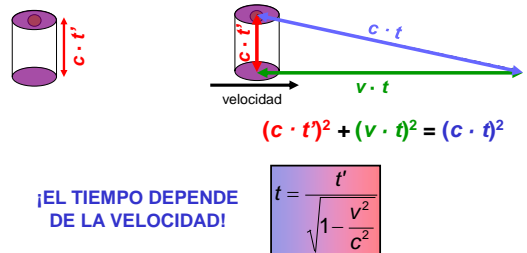


# ¿Cómo nos movemos en el espacio-tiempo?



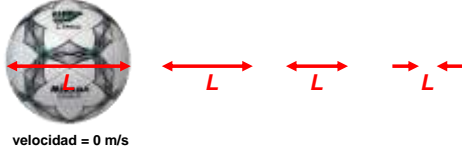
# Dilatación del tiempo

¿Cuánto más lento funciona un reloj en movimiento?



## Contracción de la longitud

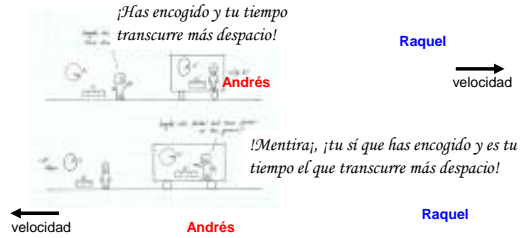
Medir una longitud supone medir dos puntos simultáneamente



¡EL ESPACIO SE CONTRAE EN LA DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO!

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

## ¿Por qué es "...de la Relatividad"?



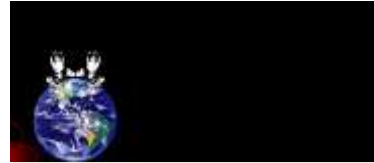
## La paradoja de los gemelos

Como los relojes en movimiento funcionan más lento...



## La paradoja de los gemelos

Dos gemelos acuerdan hacer un experimento...



El gemelo explorador dice que es él quien se mueve  
El gemelo de la tierra dice que es él quien se mueve

¿Quién tiene razón?

¡El gemelo explorador!

## Viajes en el espacio y el tiempo

¿Podríamos hacer viajes a galaxias muy lejanas?



¡Un astronauta viajando al 99.9% de la velocidad de la luz podría recorrer 70 años luz en un año de su vida!

~~¿y si fuera a la velocidad de la luz?~~



¡Su tiempo se pararía y el viaje sería instantáneo!

## La equivalencia masa-energía

~~$$E = mv^2$$~~

~~$$E = mb^2$$~~

$$E = mc^2$$

¡EQUIVALENCIA ENTRE LA MASA Y LA ENERGÍA!

- Un cuerpo tiene energía por tener masa: "energía de existencia" → **energía en reposo**
- Una pequeña cantidad de masa representa una gran cantidad de energía → **la masa es energía concentrada**
- ¡1 kg de masa = 100.000.000.000.000 J de energía!

## La equivalencia masa-energía

Einstein explicando su teoría...



$$E = mc^2$$

"It followed from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing - a somewhat unfamiliar conception for the average mind. Furthermore, the equation  $E = mc^2$ , in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before. This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally."

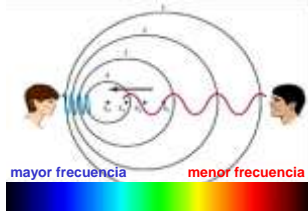
## El efecto Doppler

- ¿Cómo es el pitido de un tren en movimiento?
  - Más agudo cuando se acerca → **mayor frecuencia**
  - Más grave cuando se aleja → **menor frecuencia**



## El efecto Doppler en la luz

- ¡A la luz le ocurre lo mismo!
  - Se acerca → **mayor frecuencia** → **corrimiento azul**
  - Se aleja → **menor frecuencia** → **corrimiento rojo**



## El efecto de focalización



- El haz de luz se focaliza
- La misma cantidad de luz se concentra en un área menor
- ¡La linterna se vuelve más brillante!

## Relatividad Especial vs General



Relatividad Especial: ¿en reposo o en movimiento uniforme?

Relatividad General: ¿acelerando o en un campo gravitatorio?

## En resumen...

- Todas las leyes de la naturaleza son iguales si estamos en reposo o si nos movemos con velocidad constante
- No hay forma de saber si estamos en reposo o nos movemos con velocidad constante
- La velocidad de la luz es la misma si estamos en reposo o si nos movemos con velocidad constante
- Nada viaja más rápido que la luz
- El tiempo transcurre más lentamente cuando nos movemos
- El espacio se contrae en la dirección del movimiento
- Existe una equivalencia entre masa y energía