



# Primera parte



## Teoría de Gravitación de Einstein

versus

observaciones y experimentos

14 de Abril de 2005

J.-F. Pascual-Sánchez  
Universidad de Valladolid



Aristotle



Galileo



Newton



Einstein



# RESUMEN

- Brevísimos apuntes sobre la Teoría Especial de la Relatividad o teoría del movimiento



- Breve introducción a la Teoría General de la Relatividad = Teoría de gravitación
- Experimentos y observaciones que confirman a ésta.

SE  RE

# La Ciencia debe ser realizada sin suposiciones o principios no verificados por la observación

- **La Tierra es plana ...**
- **La Tierra está en el centro del sistema solar...**
- **La superficie de la Tierra es el marco de referencia "natural"...**
- **El Universo es homogéneo ...**
- **El Universo es estático ...**
- **El Universo es plano ...**
- **El tiempo y el espacio son conceptos independientes...**

Estas suposiciones han tenido ó tienen un impacto dramático sobre nuestra comprensión de la Naturaleza y del Universo, forzando a elaborar teorías menos aproximadas de la realidad física, hasta que alguien parte, en contra del llamado sentido común, de otra hipótesis o de la hipótesis contraria.

# Relatividad Especial

- Creada en 1905: Extensión de la relatividad de **Galileo** a velocidades “altas”.  $M^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$

$M$  en reposo  $p = 0 \quad \blacktriangleright \quad M c^2 = E$

**Introduce a la luz** como una partícula de energía **sin masa** y con una velocidad **UNIVERSAL**,  $c$ , independiente del estado de movimiento a velocidad lineal constante, del observador o de la fuente.

**para la luz:**  $M = 0 \quad \blacktriangleright \quad E = p c$

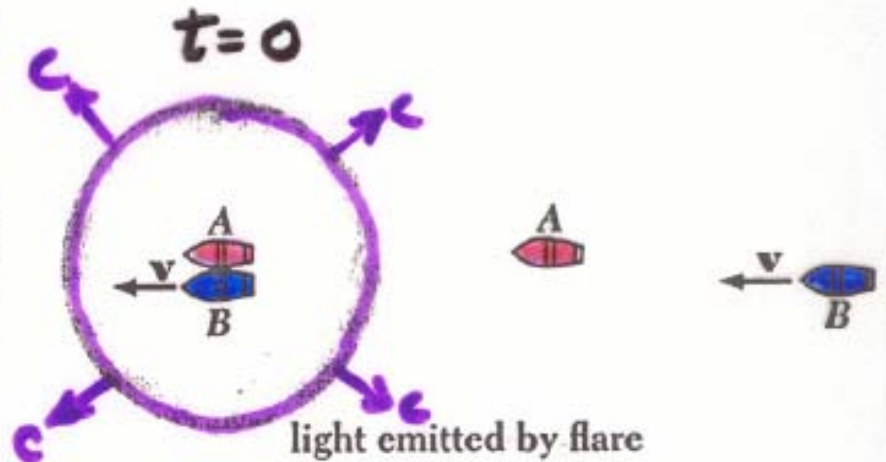
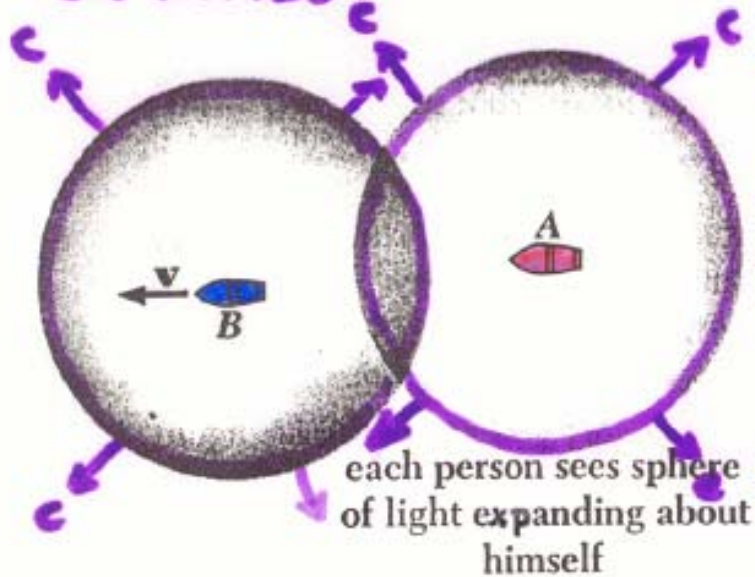
- La velocidad **UNIVERSAL** de la **luz en el vacío** implica una teoría **geométrica** de la cinemática
- Unión del espacio y el tiempo: geometría plana de Minkowski 1+3 dim. No Euclides 4 dimensional
- El tiempo depende del espacio (o de la trayectoria)
- La simultaneidad **NO** es absoluta

# Velocidad de la luz “c” en el vacío

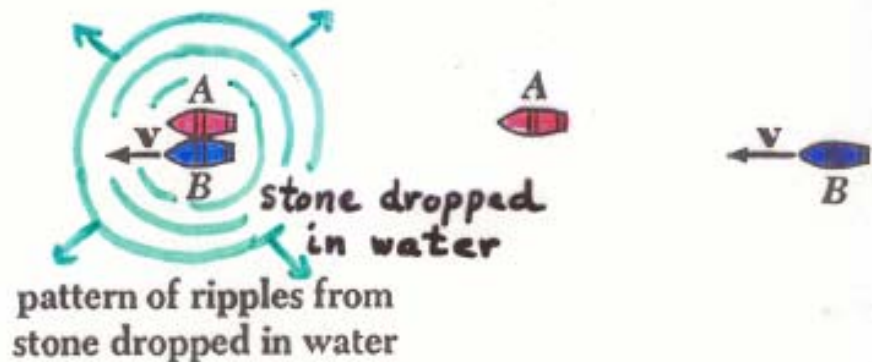
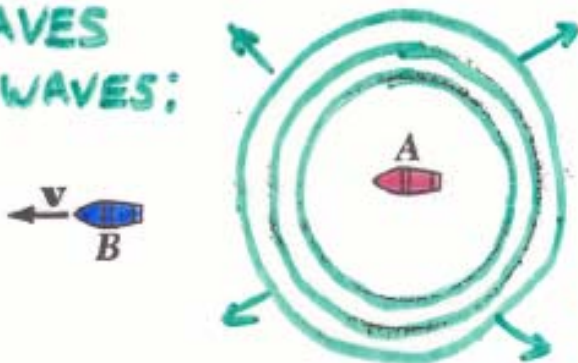
- La velocidad de la luz depende del medio en el que se propaga
- La velocidad de la luz sólo puede variar moviendo un medio o cambiándolo. Fizeau (1851)
- Si existe un medio ubicuo y omnipresente, este no podría ser movido ni cambiado.
- La luz que se propaga en ese medio, tiene una velocidad universal constante en relación con cualquier observador.
- **Ese medio es el vacío y la luz se propaga en él con una Velocidad constante invariante y máxima “c”.**
- Toda la energía de la luz es cinética y su masa en reposo es cero. Debe su existencia a que está en movimiento.
- Una partícula con masa cero como la luz no puede estar en reposo en relación a ningún observador.

# LAS ONDAS DE LUZ NO SON ONDAS DE MATERIA

LIGHT WAVES  
≠ MATTER WAVES:



WATER WAVES  
= MATTER WAVES:



# Relatividad Especial: se **MIDE** atraso del tiempo y contracción de distancias



Un reloj se mueve velocidad constante (mejor mayor que  $0.7 c$ ) a lo largo de una línea recta.

**Medido** en la referencia de los **relojes en reposo**:

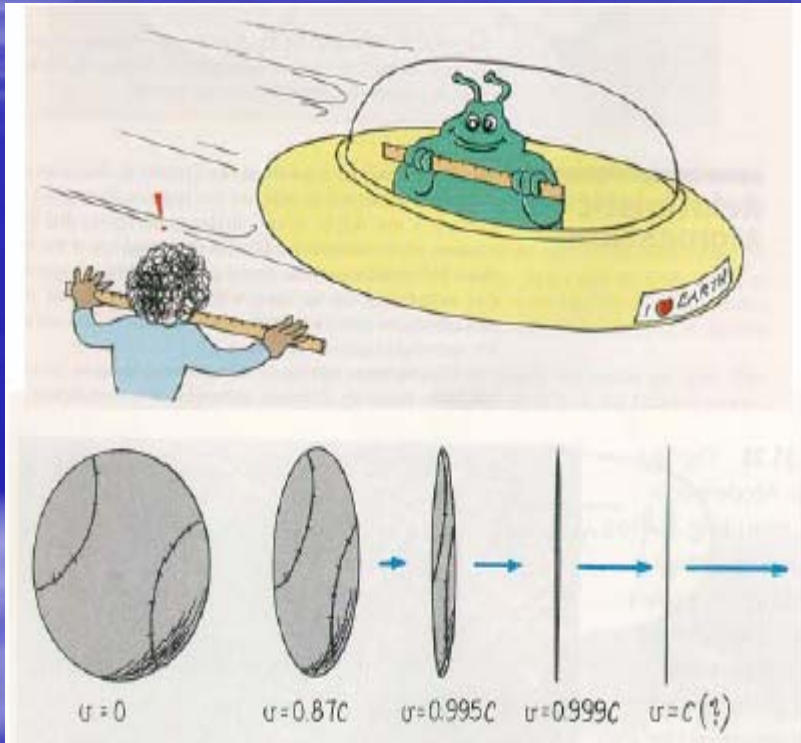
el reloj **móvil se atrasa** y tiene un **diámetro menor** en la dirección del movimiento. El efecto es simétrico

# Relatividad Especial

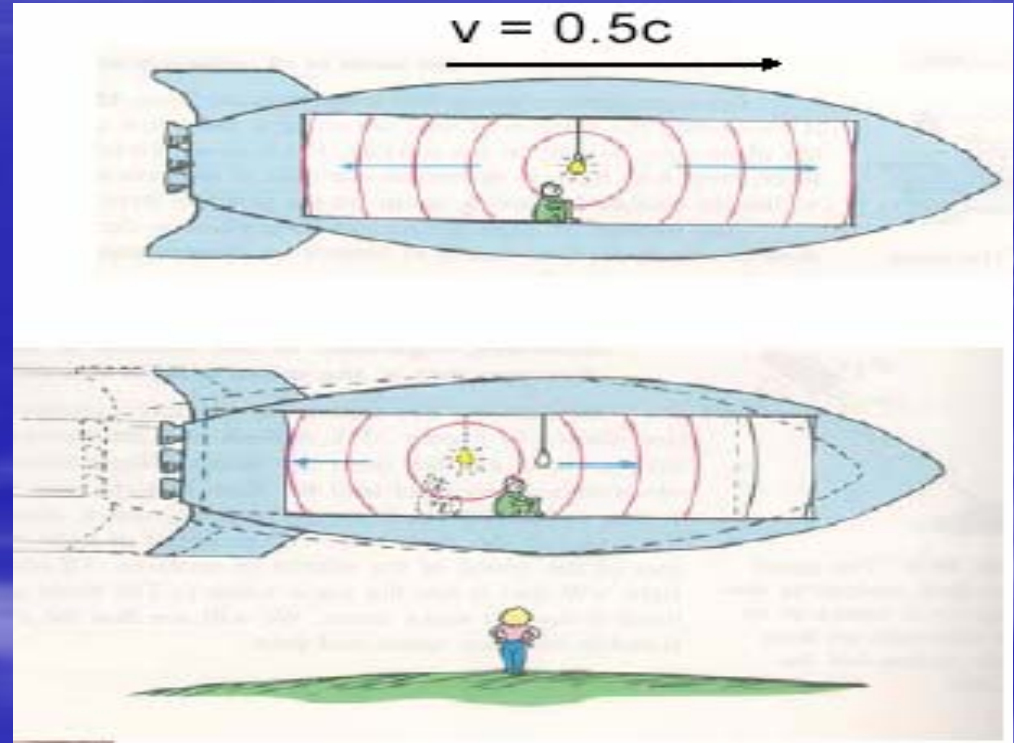
## Simultaneidad relativa

Para el Observador dentro del cohete son simultáneos

## Contracción de longitudes



Los efectos son simétricos



Observador sobre la tierra

la luz choca detrás antes que adelante

# Optica relativista: Como se **ve** (no como se mide) a alta velocidad

$$\sqrt{1-v^2/c^2} = \gamma$$

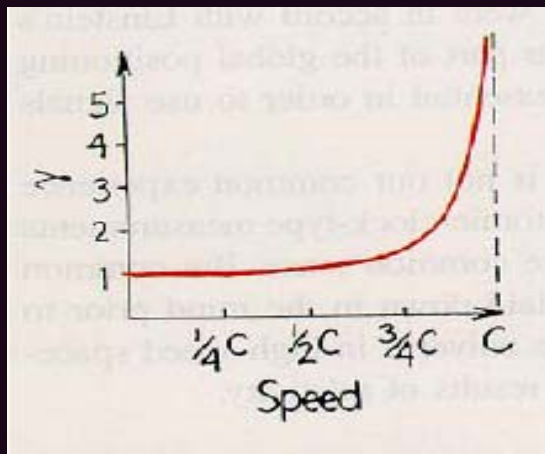
## Imagen newtoniana



## Con aberración



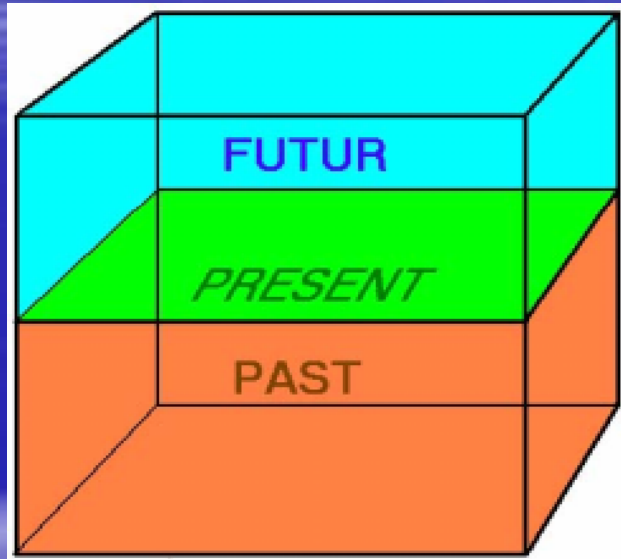
## Con aberración y Doppler



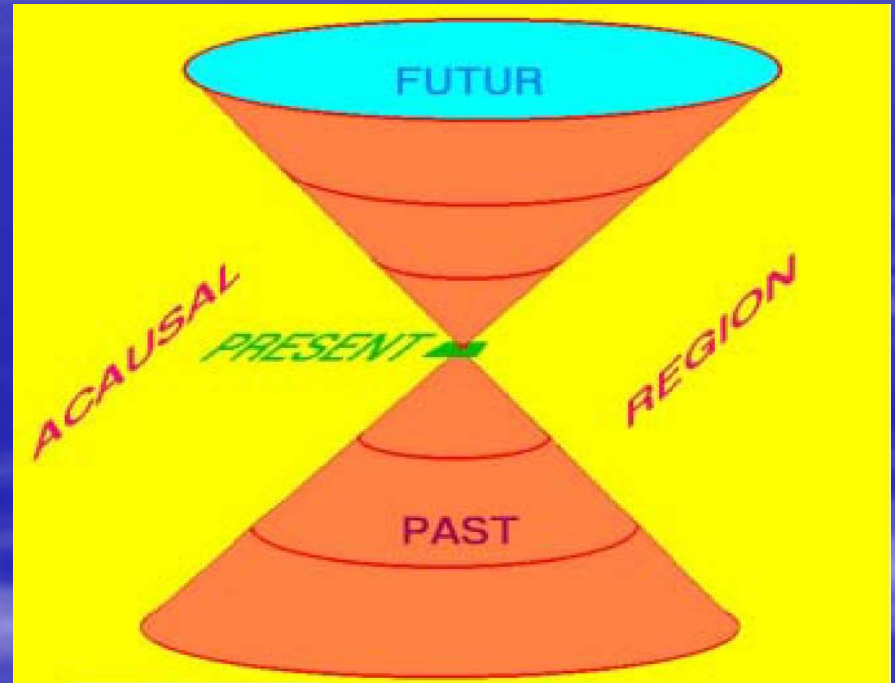
# TIPOS de ESPACIOS-TIEMPOS (ET)

Relativista Especial

Newtoniano



**SIN** gravedad: Minkowski



# Relatividad General

- Completada en 1915
  - Teoría **geométrica** de la gravedad: incluye a la teoría de Newton
  - No es independiente de la Especial: incluye a la Relatividad Especial
- 
- **La teoría General de la Relatividad es la teoría de Einstein de gravitación**

# Pioneros de la gravedad: Galilei y Newton

## Ley experimental de **GALILEO** de gravedad (c 1610):

Los cuerpos pesados caen tan rápido (CON LA MISMA ACELERACIÓN)  
como los cuerpos ligeros

$$a = F / m_i = m_g \cdot g / m_i = g$$

**masa inercial = masa gravitatoria**

$$m_i = m_g$$

Independientemente de la magnitud de la masa o de la composición

**UNIVERSAL**

La masa es la resistencia a ser acelerado (masa = inercia)

El peso es la fuerza ejercida por la gravedad

La fuerza gravitacional debe ser proporcional a la masa



## (I) Ley matemática de NEWTON de gravitación (1679):

$$F = GM_1M_2/r^2$$

- Todo cuerpo **atrae** a otro cuerpo, en virtud de su masa M
- **UNIVERSAL:** La luna cae alrededor de la Tierra como una manzana cae en la Tierra.
- Es **lineal:** Un cuerpo con el doble de masa atrae a otros cuerpos con una fuerza doble.
- **Depende sólo de la distancia:** Un cuerpo dos veces mas alejado atraerá a otros cuerpos con la cuarta parte de la fuerza independientemente del estado de movimiento.

## (II) Ley matemática de NEWTON

$$F = GM_1M_2/r^2$$

- La fuerza de gravedad actúa **instantáneamente** o a **velocidad infinita** (la debida al Sol en la Tierra, está dirigida hacia el Sol instantáneo que no vemos, desplazado 8 minutos y medio hacia el oeste)
- **El movimiento “natural” es a velocidad constante.** Cualquier desviación debe ser explicada debida a una fuerza. Ésta conserva la energía y se obtiene a partir de **un** potencial gravitatorio generado por una masa M
- Se deducen las **leyes de Kepler** de los planetas, explica las **mareas** y la **precesión de los equinoccios**

Durante la vida de Newton ya se había observado que la velocidad de la luz era finita

**Römer en 1676, midió por primera vez la velocidad de la luz  $c$ , en base a los eclipses de lo por Júpiter.**

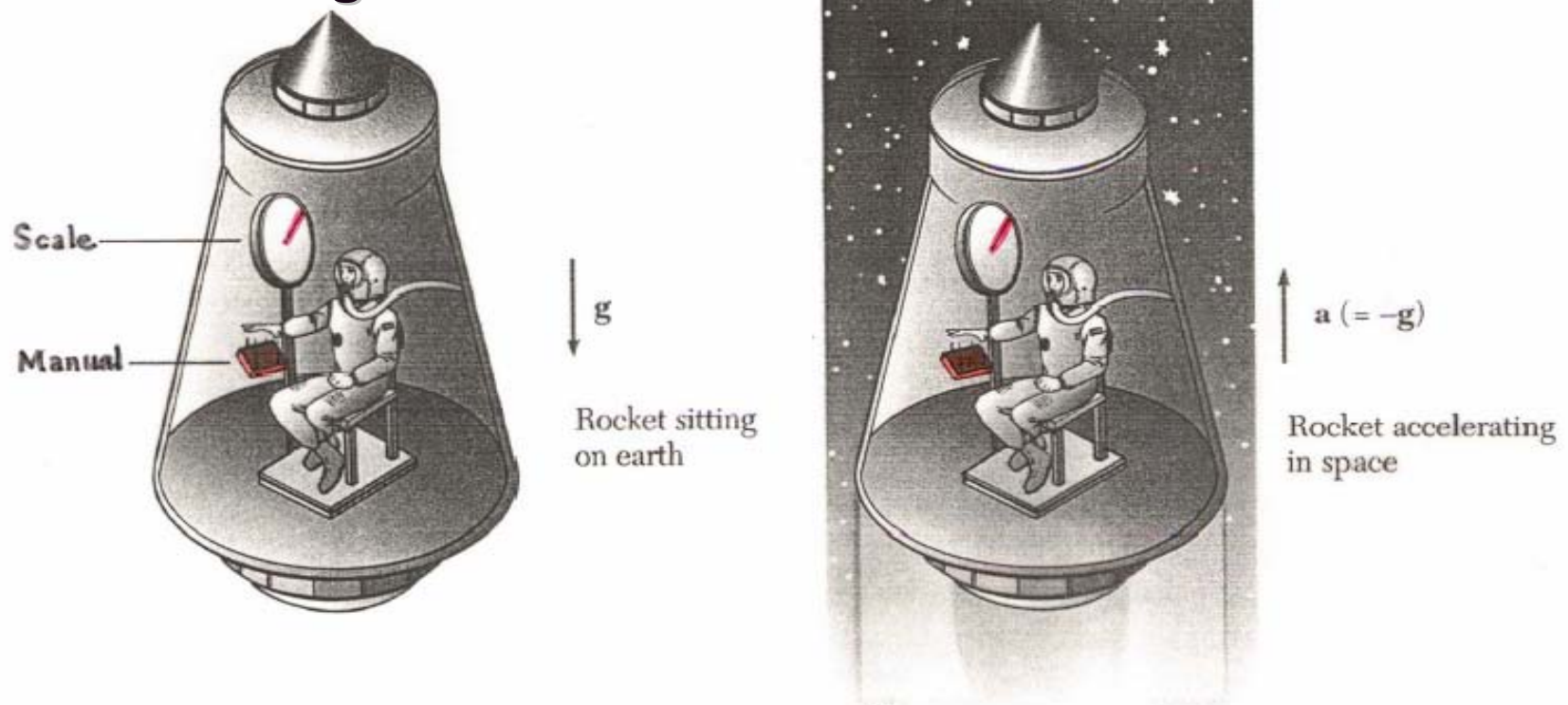
**Bradley en 1728, mejoró el valor de  $c$  al descubrir la aberración de la luz de las estrellas, proporción  $v/c$  de la  $v$  de velocidad orbital de la Tierra a la velocidad de luz  $c$ ,  $v/c = 0.0001$ ,  $v = 30$  Km/seg.**

# Principio de equivalencia **local** de fuerza de gravedad y de aceleración (Einstein, 1908)

**Masa gravitatoria = Masa inercial**

La fuerza uniforme “g” actúa en esta situación:

**Fuerza gravitatoria = Fuerza inercial**



Además: la fuerza de gravedad “g” se **anula** localmente **en caída libre**

$$g = -a = 0$$

**ingravedad, se aplica REspecial**

# Características de la gravedad

La gravedad es la de las cuatro “fuerzas” de la Naturaleza, la única que no se puede apantallar o eliminar globalmente, es **UNIVERSAL**

Al ser **UNIVERSAL**, necesita a la **GEOMETRÍA** y actúa a **distancia infinita** sobre todas las partículas incluyendo a la **luz**, i.e. **actúa sobre todo tipo de ENERGÍA**

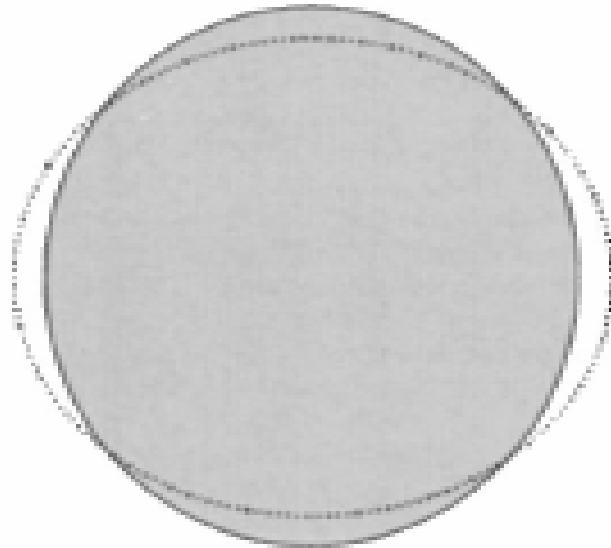
**CONTRADICCIÓN:** La **luz** debe sentir una fuerza pero su velocidad no puede cambiar, debe ser libre.

Es una fuerza cuadrática en la velocidad que se puede eliminar localmente en caída libre, pero NO globalmente.

No puede ser centrípeta ni Coriolis (inerciales)

Su variación es una **fuerza de MAREA** (aceleración relativa entre dos o más partículas) que nunca se anula.

Las **fuerzas de MAREA** describen a la gravedad en el **vacío exterior** a una masa-energía



# Y con Einstein se hizo la luz (1915)

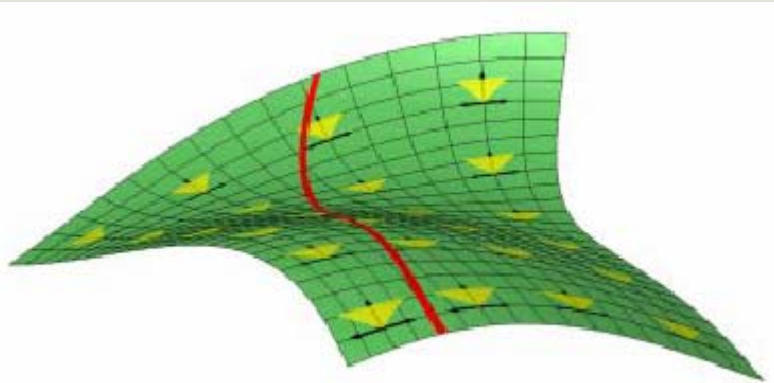
**Sólo son globales las fuerzas de Marea**

**No sólo el espacio-tiempo ET es curvo (Newton), también lo es el espacio (Einstein).**

**Las 20 curvaturas del ET contienen toda la dinámica de la gravedad (fuerzas de marea, etc.)**

**Las partículas son libres si sólo interaccionan por gravedad, pero su trayectoria espacial se curva porque el espacio es curvo. El ET es curvo por la presencia de partículas (ENERGÍA)**

**La velocidad de propagación es la MÁXIMA, la de la luz. NO es instantánea como se había supuesto durante tres siglos**



**GEOMETRÍA ET**

$$G = kT$$

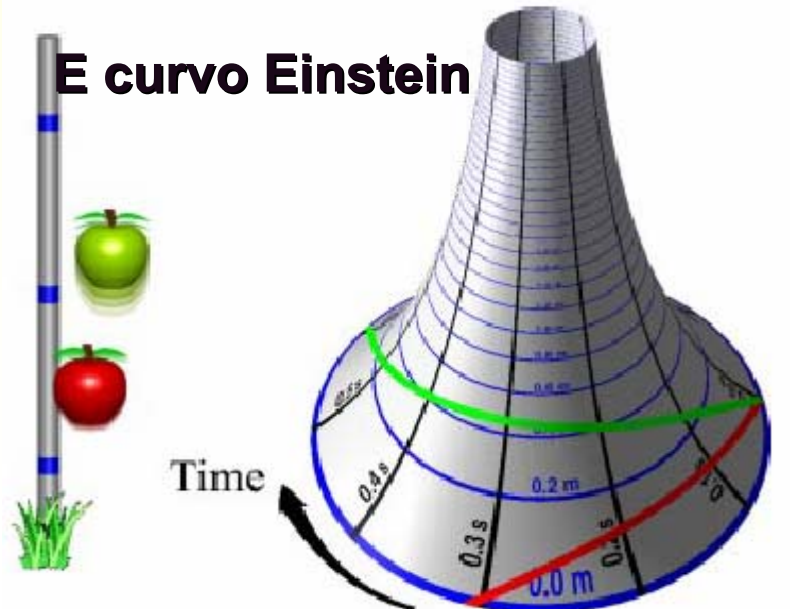
**Energía**

**Diez potenciales (no uno) de la métrica del ET y diez ecuaciones  
NO LINEALES (auto-interacción)**

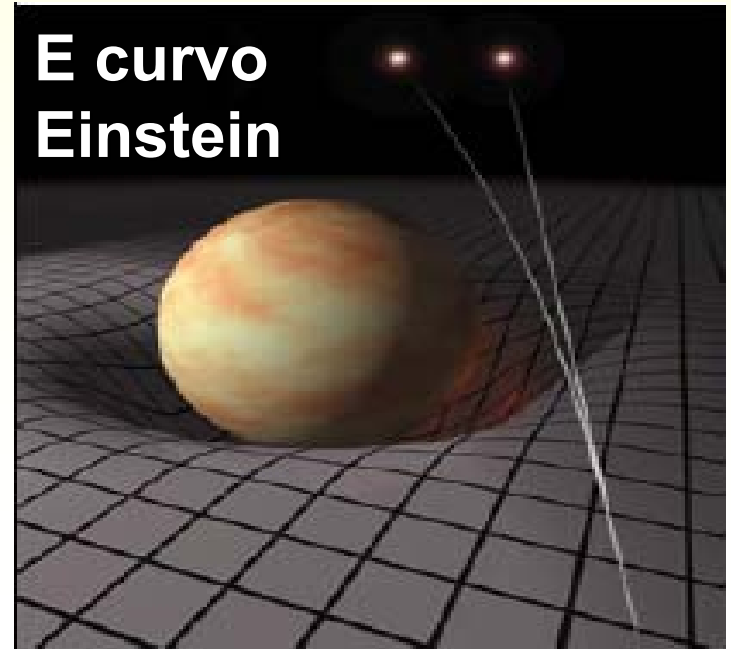
**La gravedad tiene dos clases de fuentes: en T la energía-velocidad-  
presión (activa, atractiva, local y positiva) y en G la energía no lineal  
de la propia gravedad (pasiva, no local y negativa) .**

**Esta última es la curvatura del espacio E.**

**ET curvo**



**ET curvo**



# La gravedad es una propiedad de la geometría del espacio-tiempo

- Los sistemas de referencia "**naturales**" están en **caída libre** (astronautas, satélites, planetas, estrellas, galaxias), son "ingrávidos" y **NO** con **velocidad constante** (Newton)
- La **masa-energía** le dice al **espacio-tiempo** como se debe curvar
- El **espacio-tiempo** le dice a la **masa-energía** como debe moverse

# ¿El espacio está curvado en este Aula?

## Naturalmente que SI !!

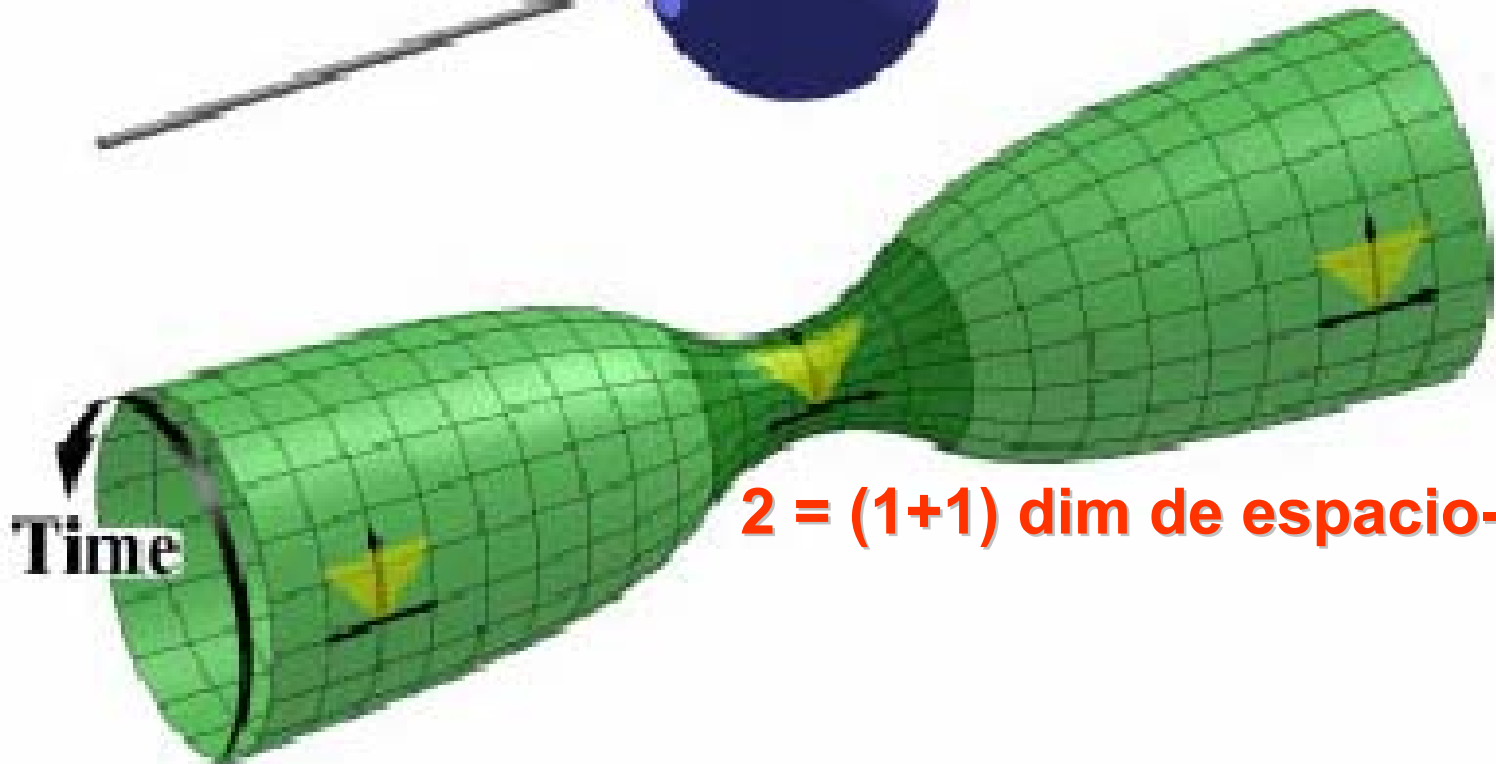
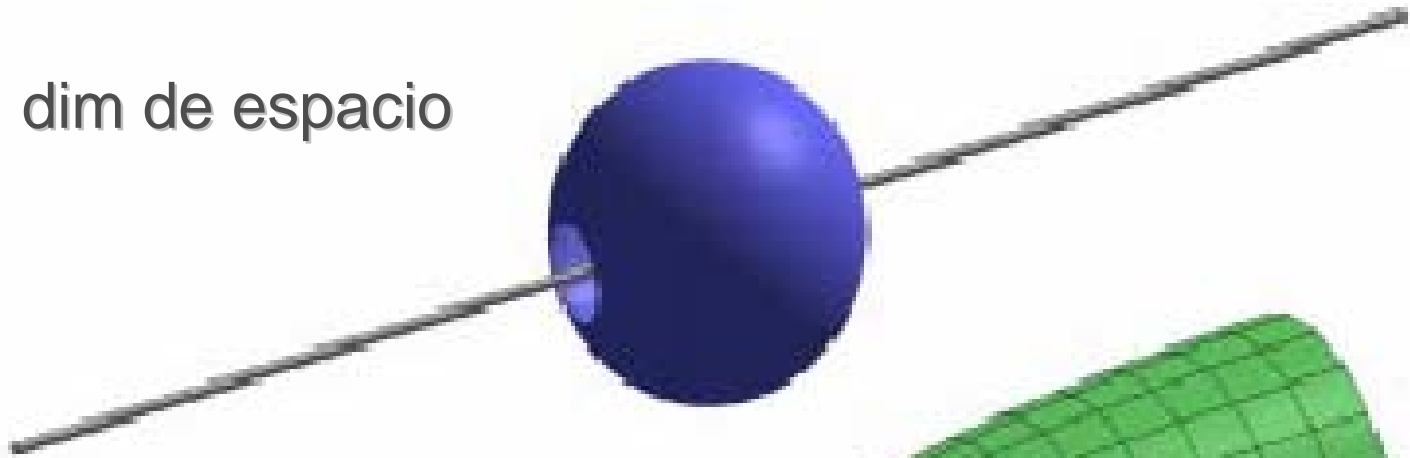
- El espacio (espacio-tiempo en general) nos parece plano
- La curvatura es pequeña, el radio de curvatura enorme
- La intensidad de la gravedad de la Tierra en este Aula es

$$2GM / R c^2 = 1.4 \times 10^{-9}$$

- Cerca del Sol, es  $10^{-6}$
- El radio de curvatura del espacio en la superficie de la Tierra (en este Aula) es aproximadamente un año luz.

Es imposible representar en  $4 = (1 + 3)$  dim

1 dim de espacio



**$2 = (1+1)$  dim de espacio-tiempo**

Soluciones exactas producidas por una masa  
M esférica quieta, Schwarzschild (1916),  
o girando (M, S), Kerr (1963)

$$d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

$r_s = \frac{2GM}{c^2}$	<b>Schwarzschild radius</b>
-------------------------	-----------------------------

- Earth:  $R_{\oplus} \simeq 6400 \text{ km} \gg r_s \simeq 8.9 \text{ mm}$
- Sun:  $R_{\odot} \simeq 6.96 \times 10^5 \text{ km} \gg r_s \simeq 2.95 \text{ km}$
- White Dwarf:  $M \simeq 1M_{\odot}$ ,  $R \simeq 5,000 \text{ km} \gtrsim r_s \simeq 3 \text{ km}$
- Neutron Star:  $M \simeq 2M_{\odot}$ ,  $R \simeq 10 \text{ km} \simeq r_s \simeq 6 \text{ km}$
- Black Hole:  $R \ll r_s$

# La métrica del ET es un **mapa global** y por lo tanto **no observable**

- La métrica de Schwarzschild es una **mapa global** en el que todos los observadores se han puesto de acuerdo
- Los diferentes **observadores** sólo pueden realizar **medidas locales** de distancia y tiempo que **no van a coincidir con "r" y "t"** en general.
- La curvatura del espacio es importante sólo para partículas muy rápidas
- Supongamos dos sucesos en la historia de la Tierra separados  $d t = 1$  seg;  $c d t = 300,000$  Km;  $c^2 d t^2 = 90,000 \times 10^6$  Km<sup>2</sup>  
Pero la Tierra se mueve a 30 Km/seg:  $d r = 30$  Km ;  $d r^2 = 900$  Km<sup>2</sup>.  
El término  $(2G M / r c^2) d r^2$  casi no es relevante en  $d r^2$ .  
La curvatura del espacio es muy pequeña
- Sin embargo, para la **luz** la curvatura del espacio es tan importante como la curvatura del ET



**Fin de la primera parte**

