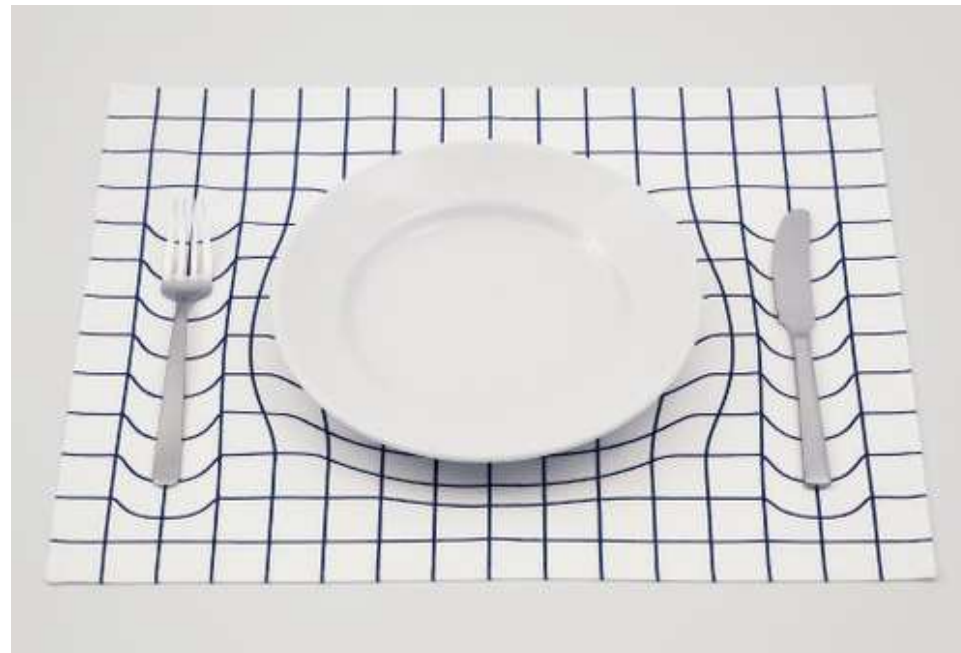




# Las ideas físicas de la Relatividad General

102 años de Relatividad General



**Bert Janssen**

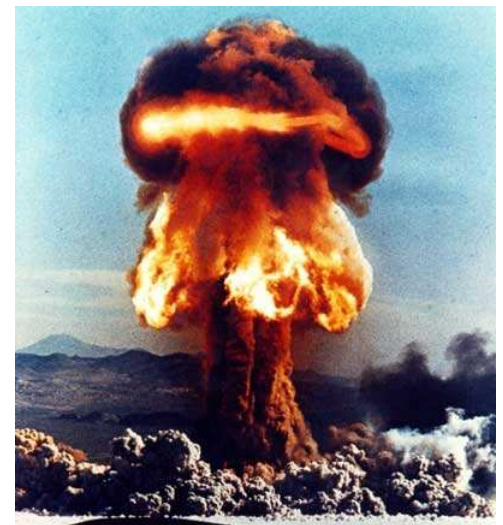
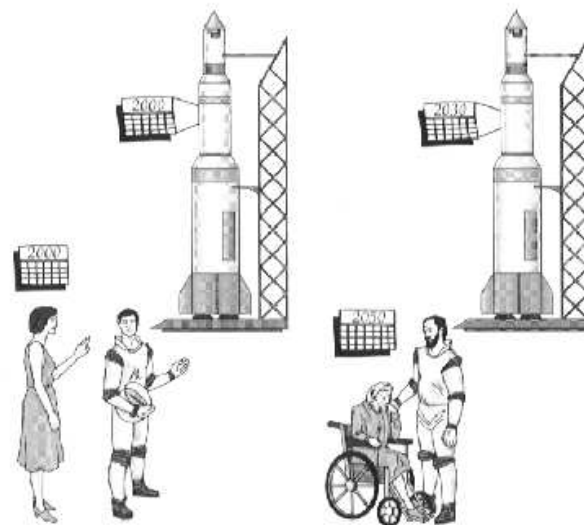
Dpto. de Física Teórica y del Cosmos - UGR

# 0. Aclaración

Existen dos teorías de la Relatividad:

## 1. La Relatividad Especial (o restringida) (Einstein, 1905)

- Movimiento y reposo relativo
- Espacio y tiempo relativo
- $E = mc^2$



→ No es el tema de hoy...

## 2. La Relatividad General (Einstein, 1915)

= teoría moderna de la gravedad

= “gravedad newtoniana + relatividad especial”



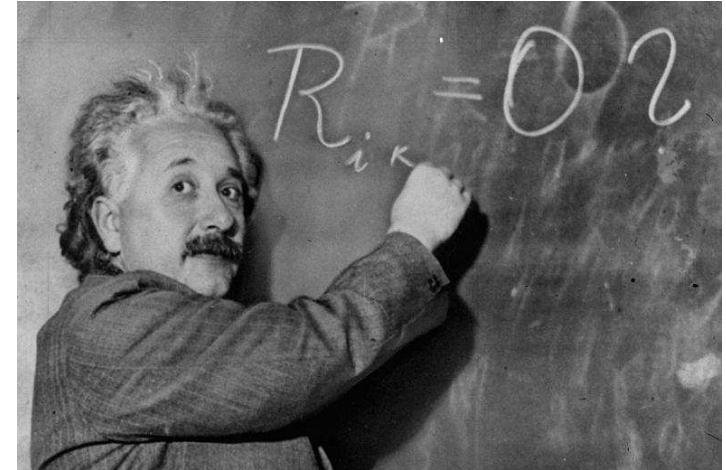
(1687)

+



(1905)

→



(1915)

## 2. La Relatividad General (Einstein, 1915)

= teoría moderna de la gravedad

= “gravedad newtoniana + relatividad especial”



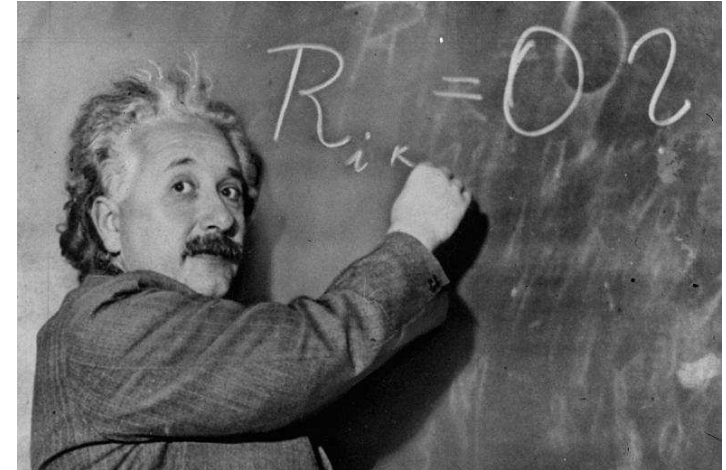
(1687)

+



(1905)

→



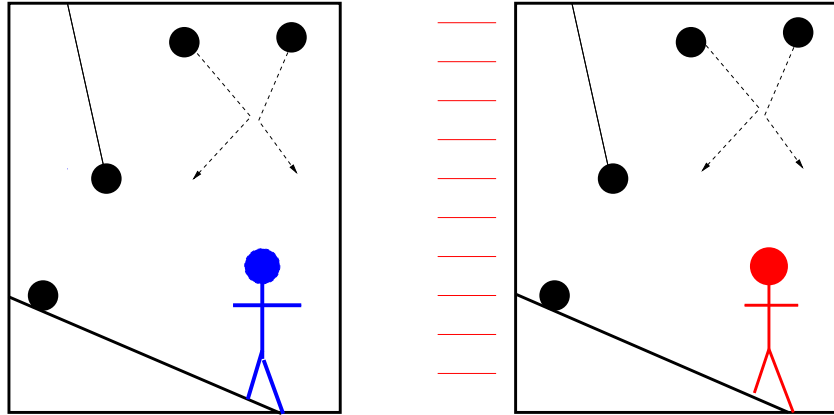
(1915)

- Espaciotiempo curvo
- Agujeros negros
- Ondas gravitatorias
- Cosmología

→ Sí es el tema de hoy...

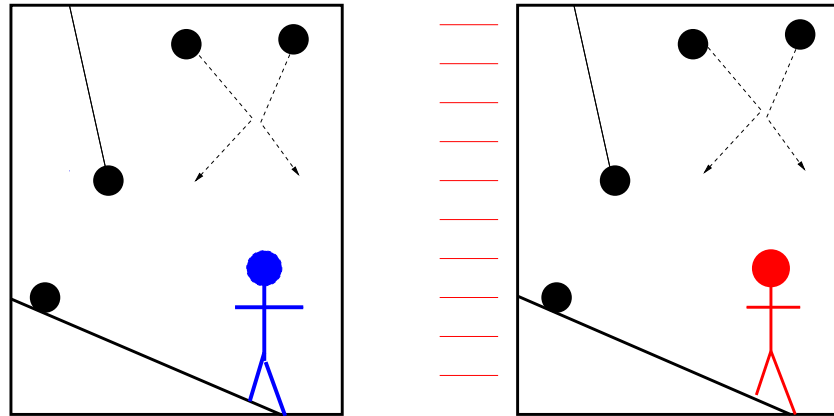
# Plan de la conferencia

## 1. Breve repaso de Relatividad Especial



# Plan de la conferencia

## 1. Breve repaso de Relatividad Especial

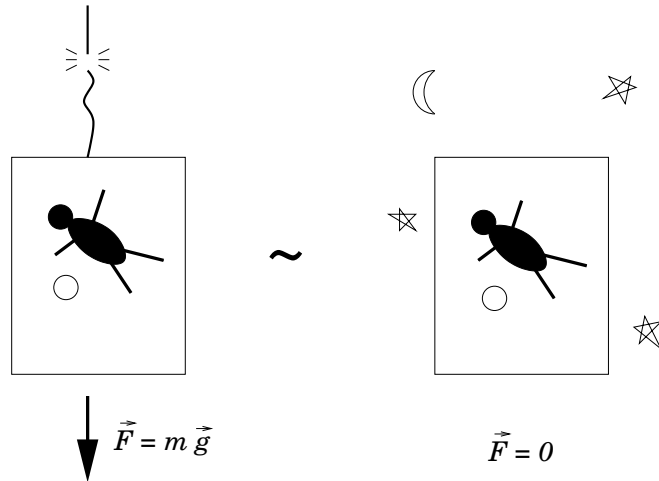


## 2. La gravedad

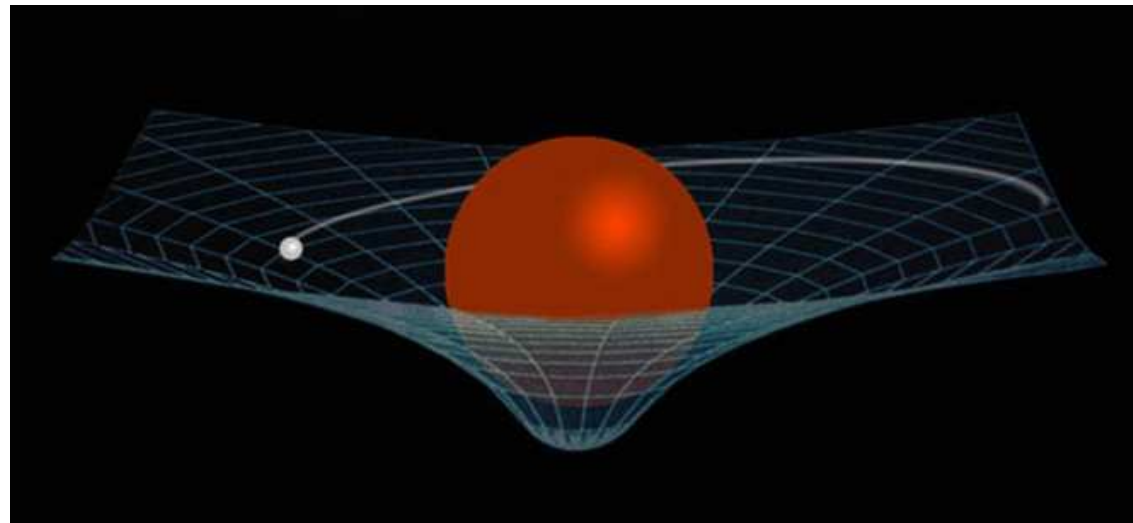


—> **Conflicto!**

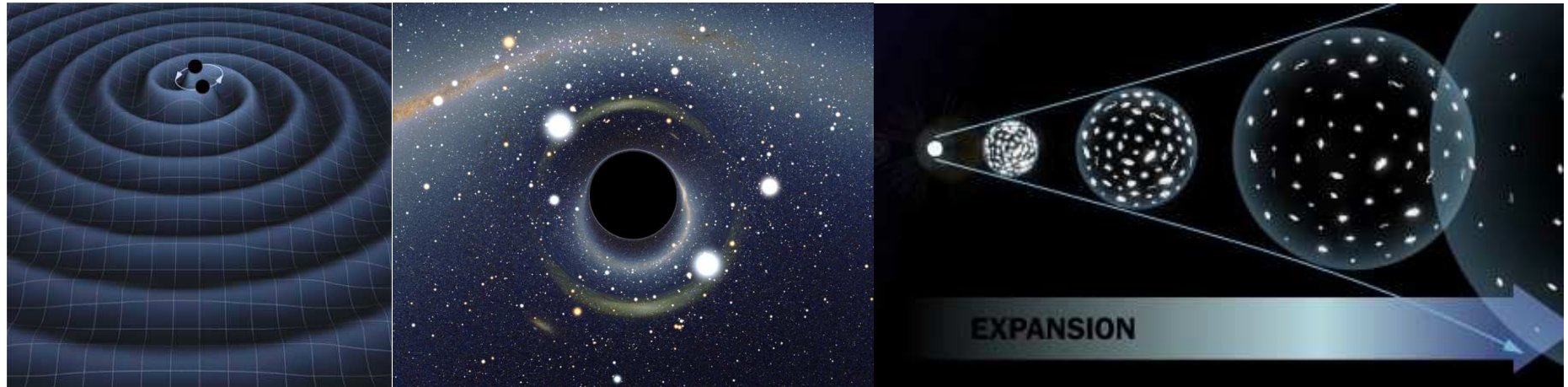
### 3. El Principio de Equivalencia



### 4. Relatividad General



## 5. Consecuencias y aplicaciones



## 6. Resumen y preguntas abiertas





# 1. Repaso de Relatividad Especial

# 1. Repaso de Relatividad Especial

- Reposo y movimiento uniforme rectilíneo **son relativos**

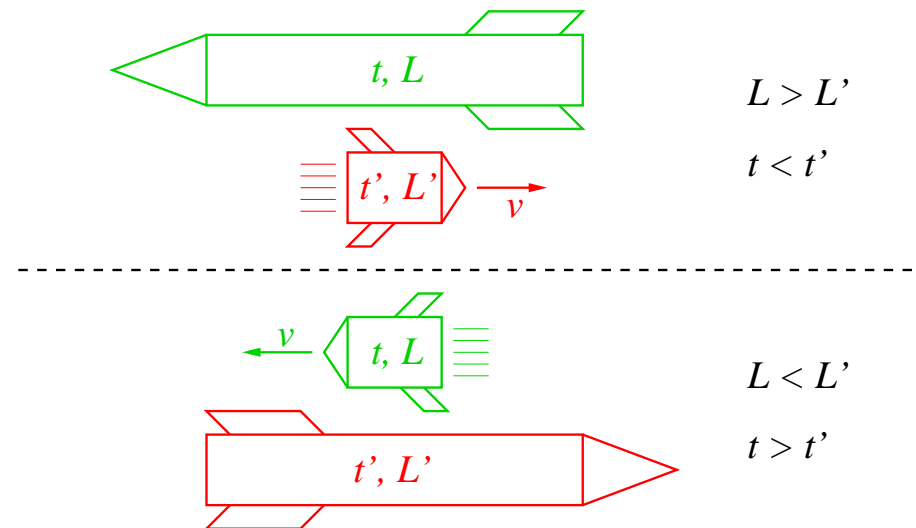


# 1. Repaso de Relatividad Especial

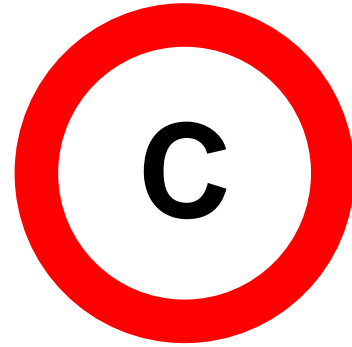
- Reposo y movimiento uniforme rectilíneo **son relativos**



- El **tiempo y las longitudes** también se vuelven **relativos**

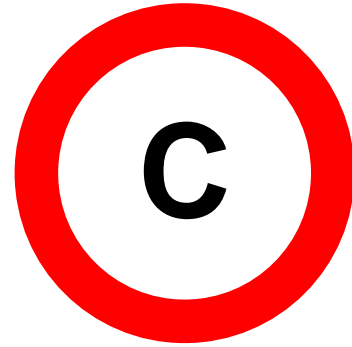


- Velocidad de la luz es la **velocidad máxima permitida**



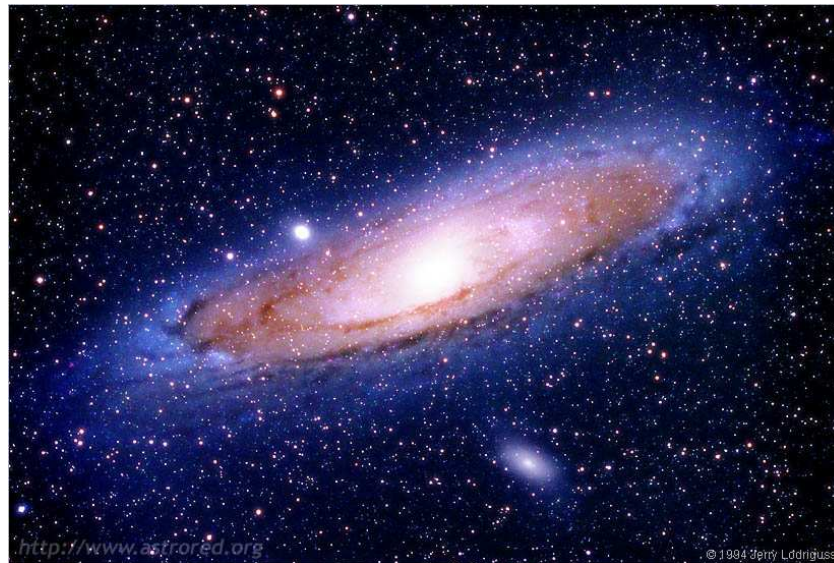
**300 000 km/s**

- Velocidad de la luz es la **velocidad máxima permitida**

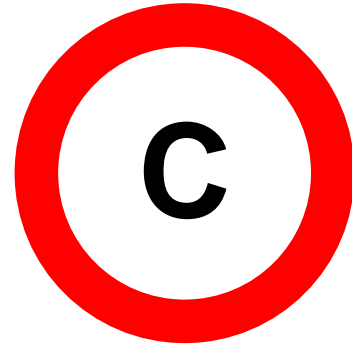


**300 000 km/s**

→ Luz de lejos ha tardado mucho en llegar...

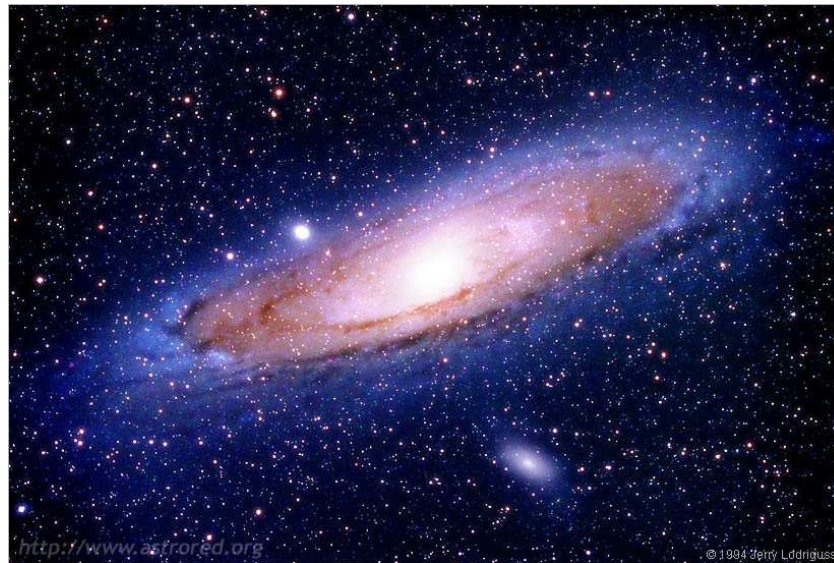


- Velocidad de la luz es la **velocidad máxima permitida**



**300 000 km/s**

—→ Luz de lejos ha tardado mucho en llegar...



—→ Pero **¿cuánto tarde su gravedad?**

## 2. La gravedad

Hace que las cosas se caigan...



## 2. La gravedad

Hace que las cosas se caigan...



Hace que las cosas tengan peso...

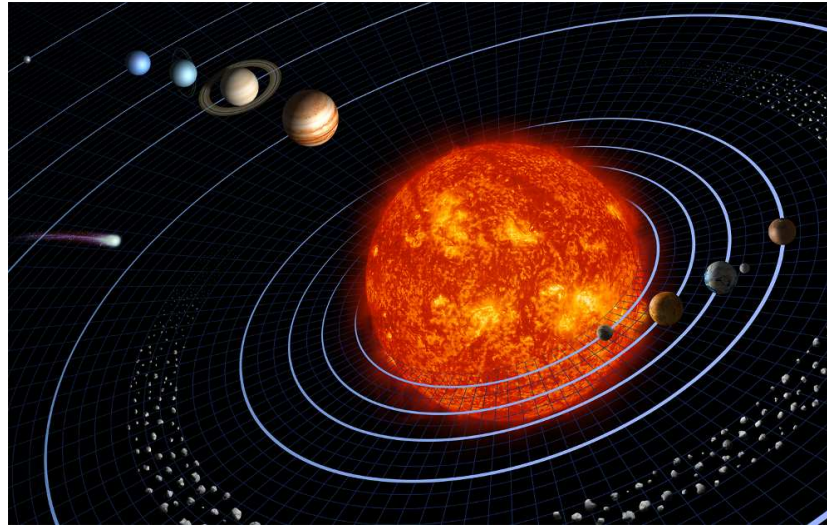




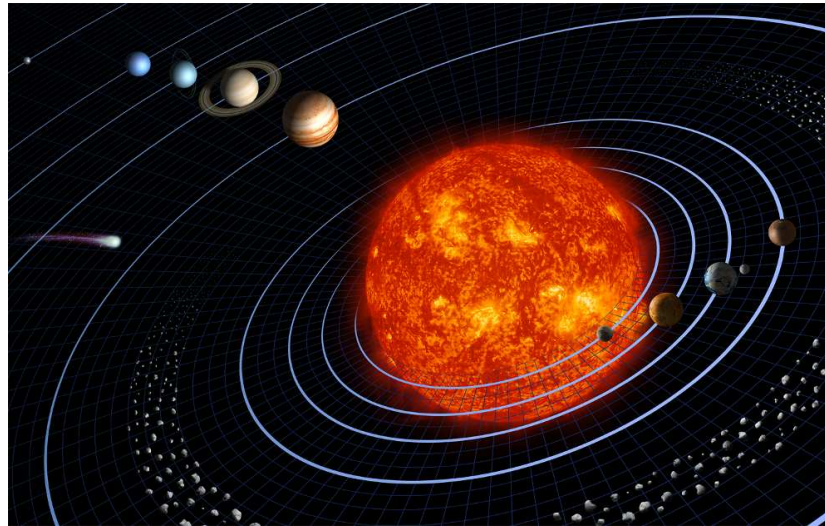
Define lo que llamamos arriba y abajo...



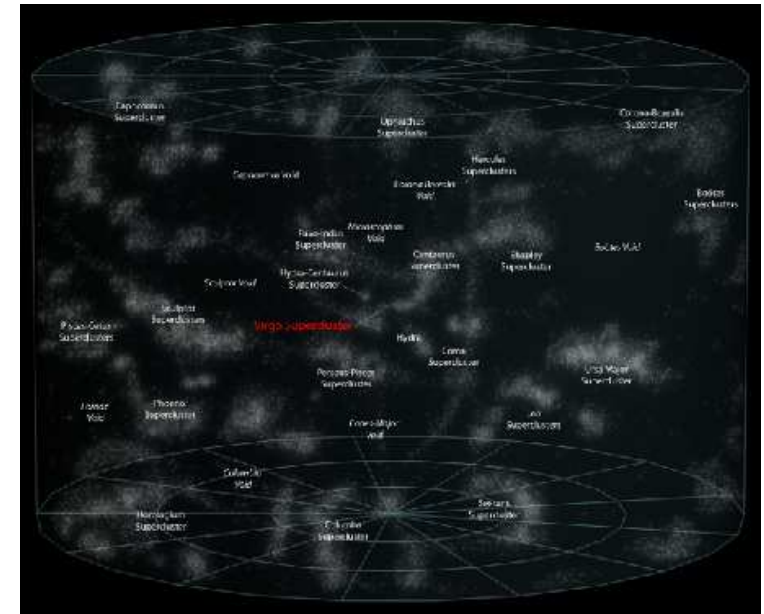
Mantiene la luna y los planetas en órbita...



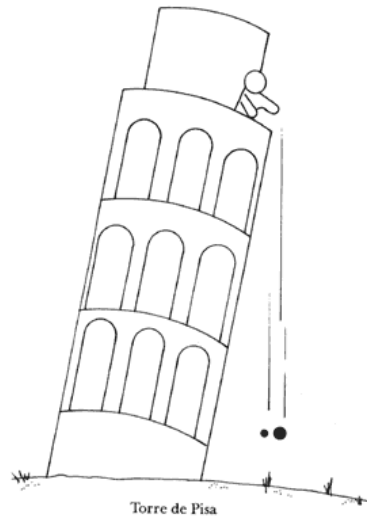
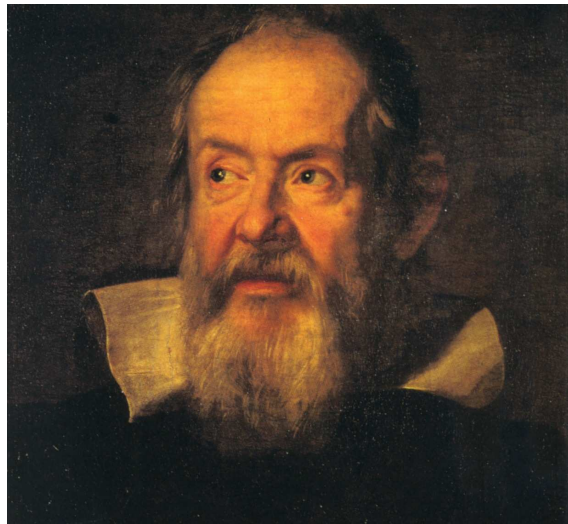
Mantiene la luna y los planetas en órbita...



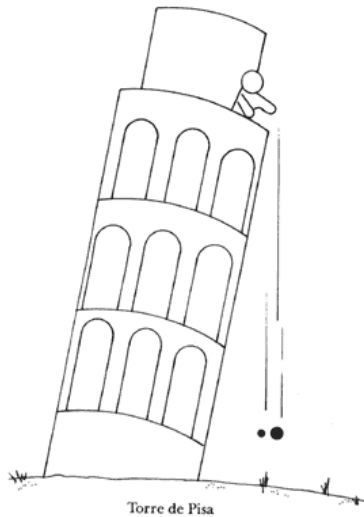
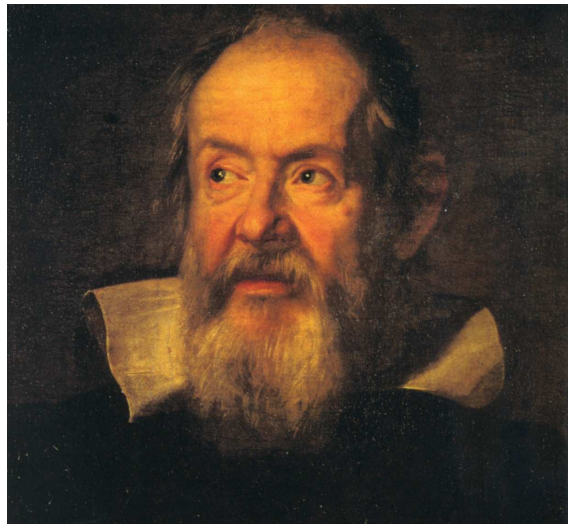
Es la fuerza que domina el universo...



# Investigada por Galilei en la Tierra alrededor de 1600



# Investigada por Galilei en la Tierra alrededor de 1600



→ Todos los objetos caen con la misma velocidad,  
**independientemente de su masa...** en el vacío

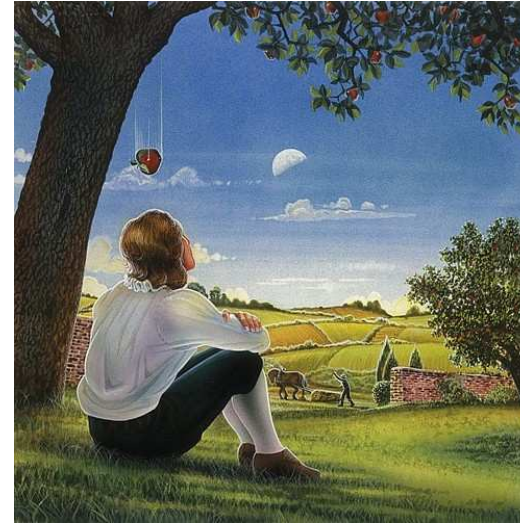
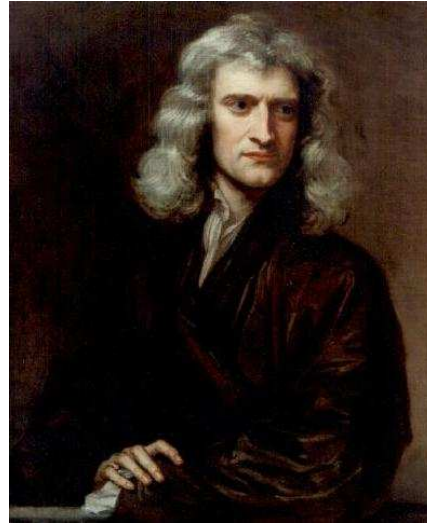


Caída libre:

$$x(t) = x_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

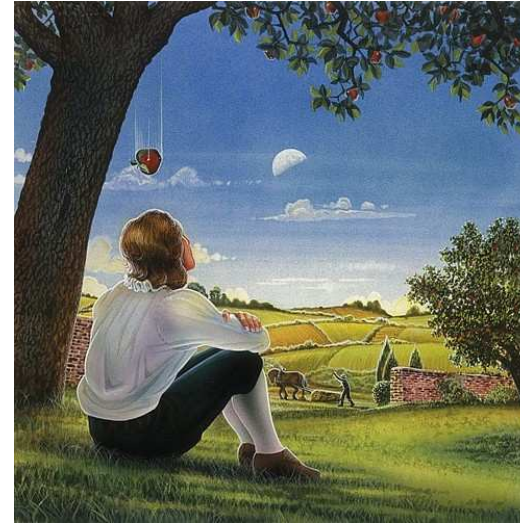
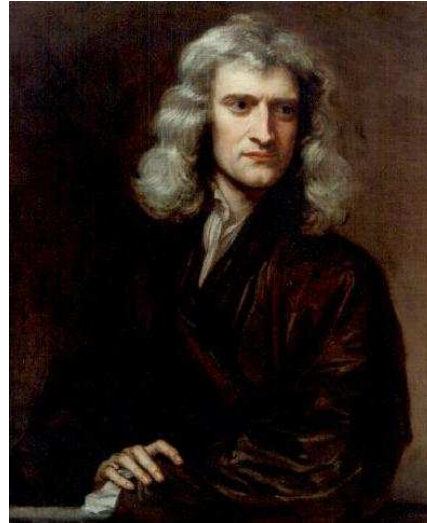
$$v(t) = -g t$$

Mejor entendida por Newton en 1687

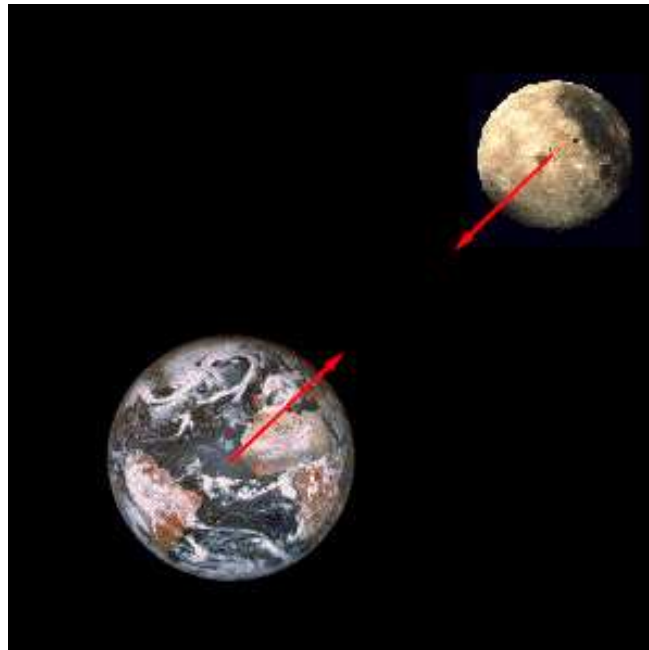


Cualesquiera dos masas en el universo se atraen por una fuerza...

Mejor entendida por Newton en 1687

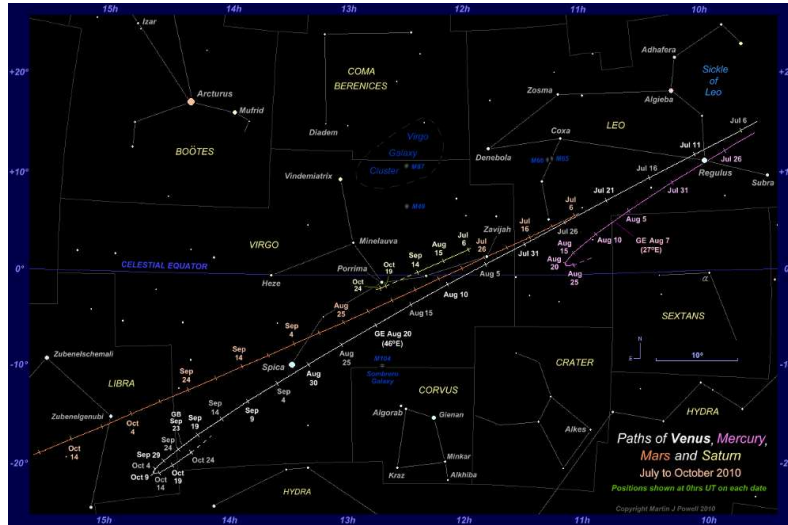


Cualesquiera dos masas en el universo se atraen por una fuerza...



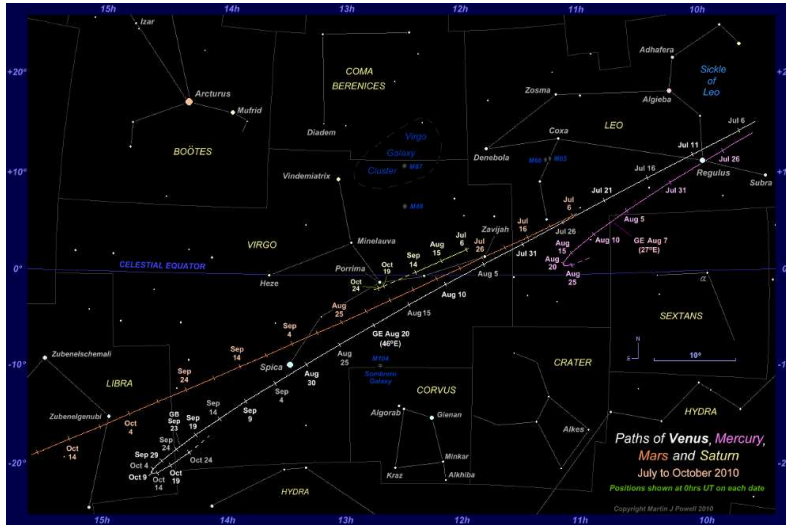
$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

# Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias

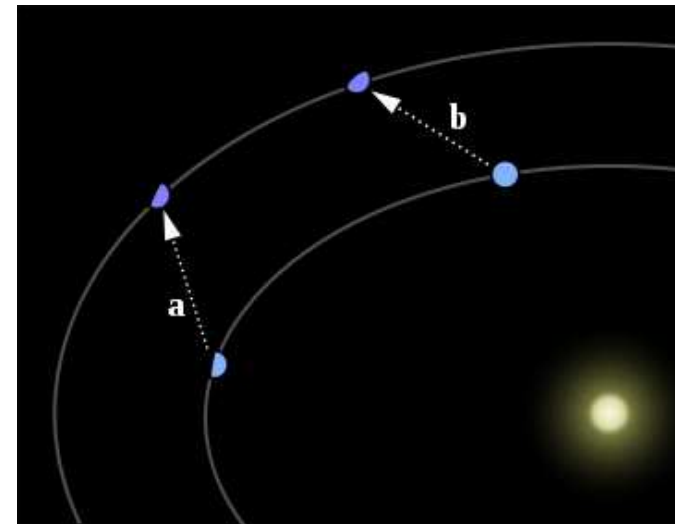
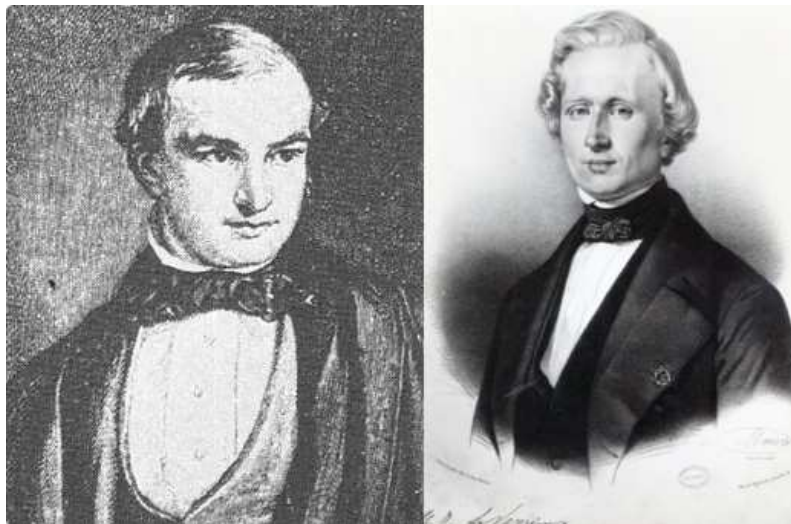




# Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias

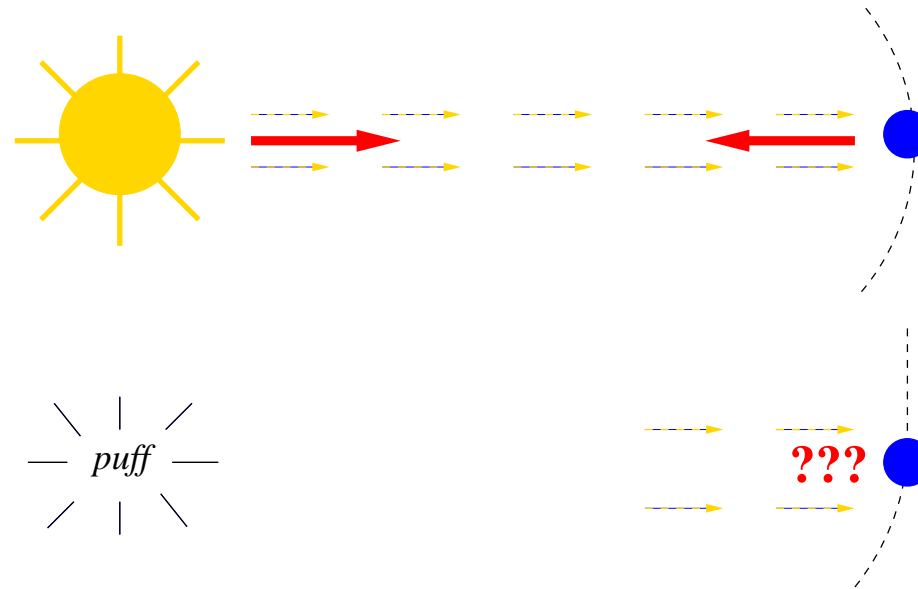


Hasta predijo la **existencia de Neptuno** por perturbaciones en órbita de Urano



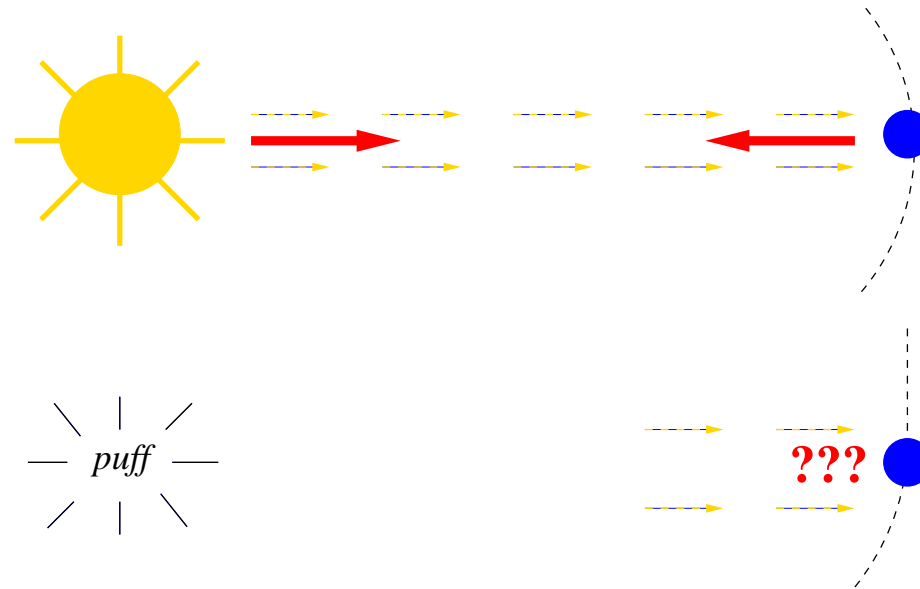
Couch-Adams & Le Verrier, 1845

Pero ¿Cómo se propaga la gravedad? ¿A qué velocidad?



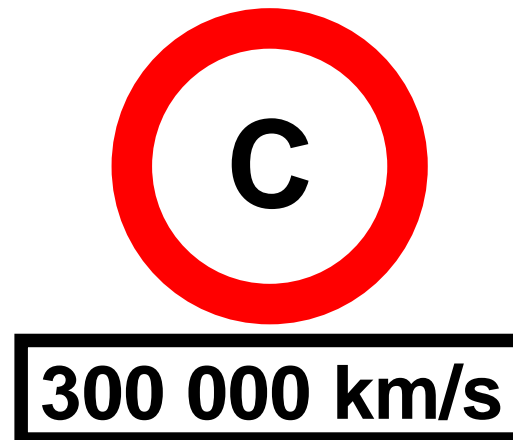
Newton: “Hypotheses non fingo”

Pero ¿Cómo se propaga la gravedad? ¿A qué velocidad?

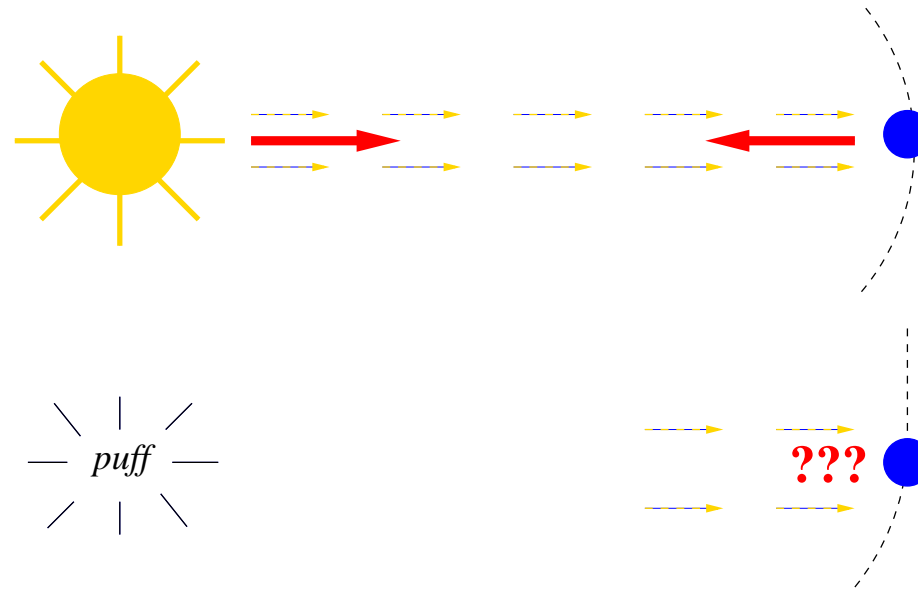


Newton: “Hypotheses non fingo”

Einstein:



Pero ¿Cómo se propaga la gravedad? ¿A qué velocidad?



Newton: “Hypotheses non fingo”

Einstein:

**C**  
**300 000 km/s**

→ **Clara contradicción!!!**

La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

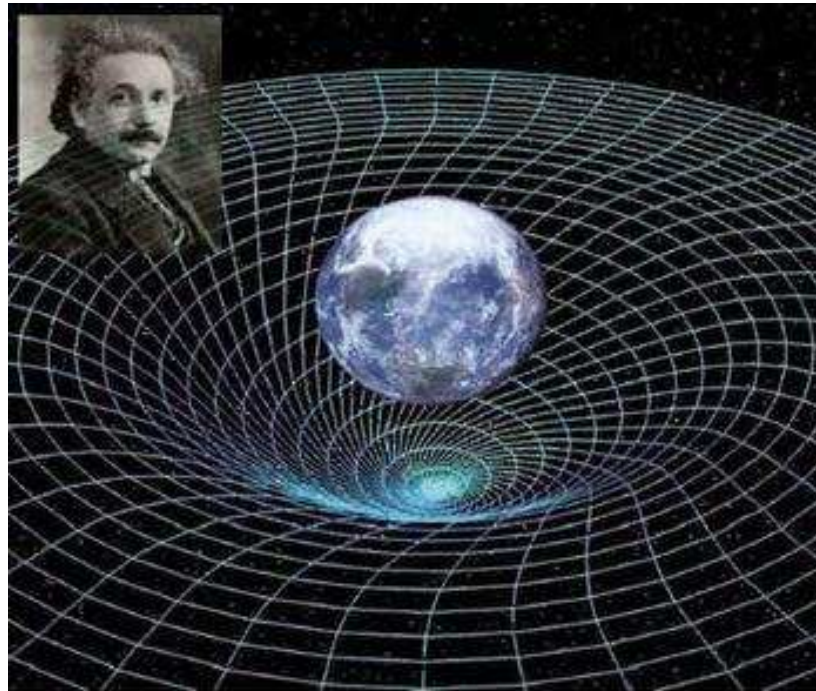
¿Cómo compatibilizarlo?

La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

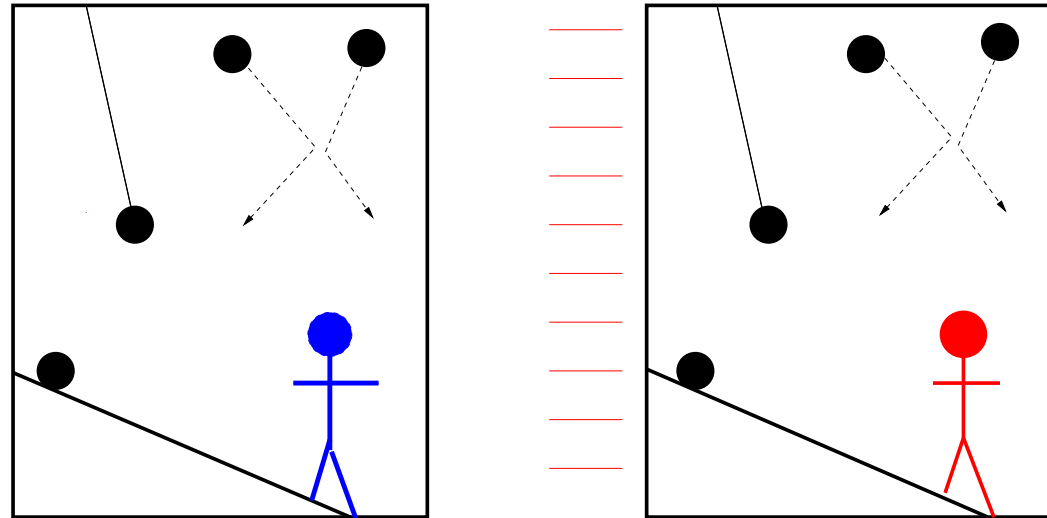
¿Cómo compatibilizarlo?

Con una nueva teoría de la gravedad...

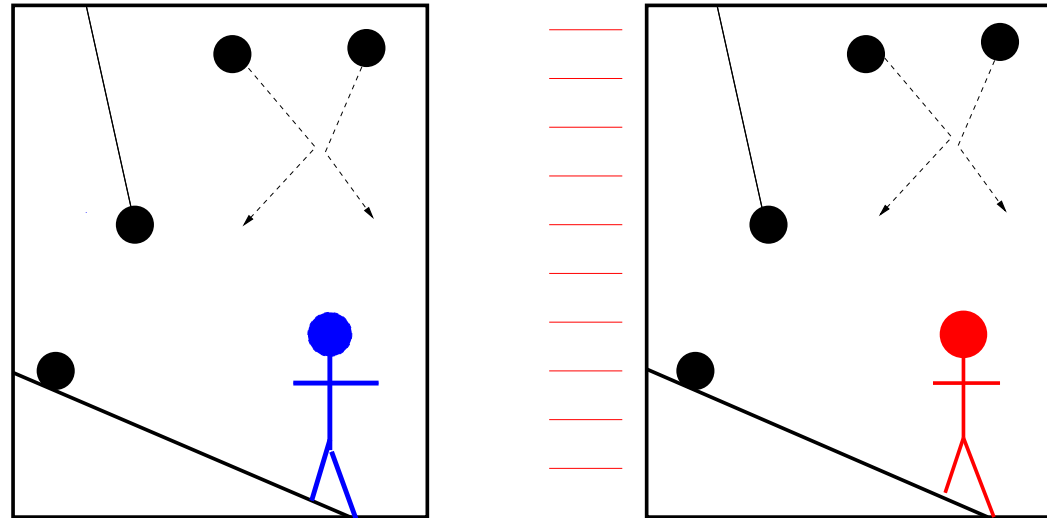


## Relatividad General

Problema: Relatividad especial sólo valida para observadores en M.U.R.



Problema: Relatividad especial sólo valida para **observadores en M.U.R.**



Pero no para observadores acelerados

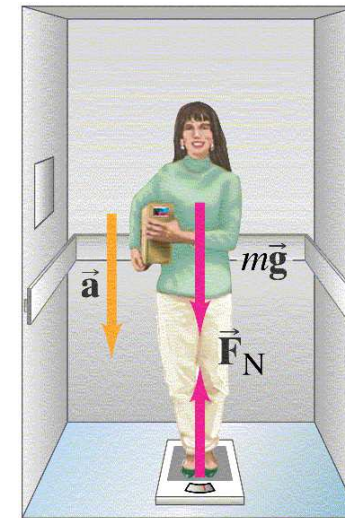


¿Cómo compatibilizar **observadores acelerados** y Relatividad Especial?



# 3. El Principio de Equivalencia

La fuerza gravitatoria se puede aumentar o disminuir con aceleraciones...

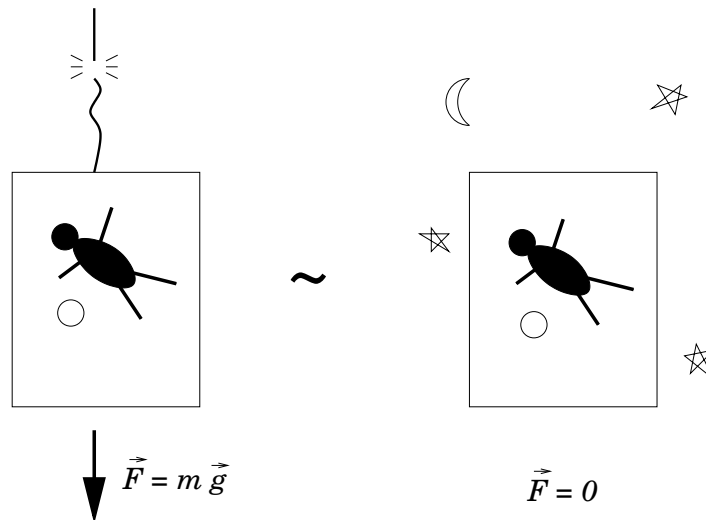


# 3. El Principio de Equivalencia

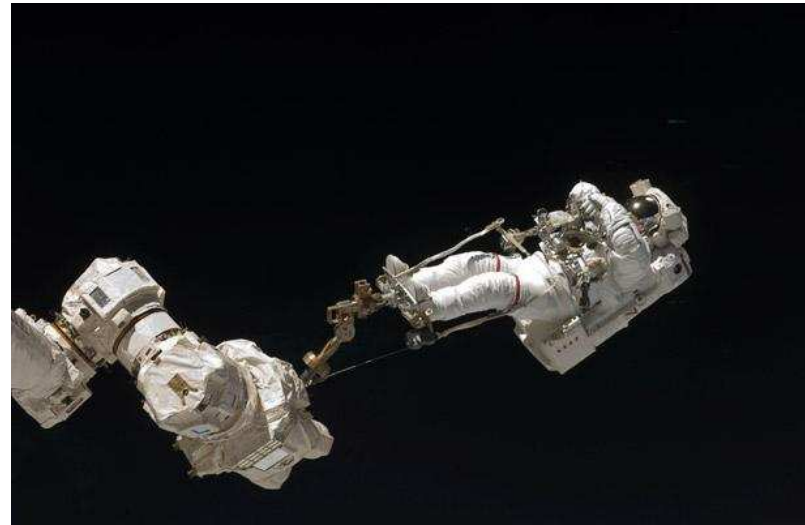
La fuerza gravitatoria se puede aumentar o disminuir con aceleraciones...



hasta tal punto que...

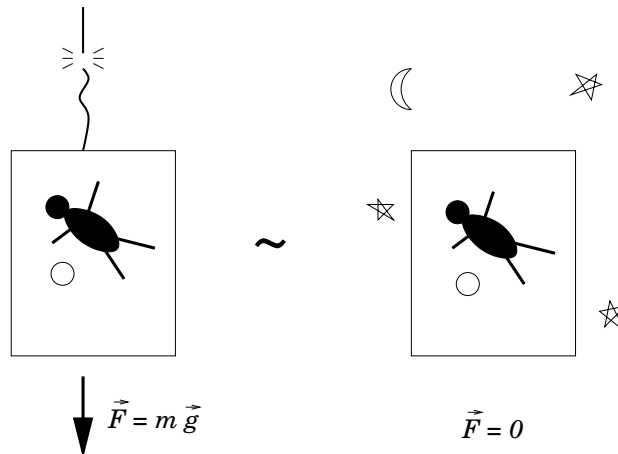


En realidad no hay tanta diferencia entre...

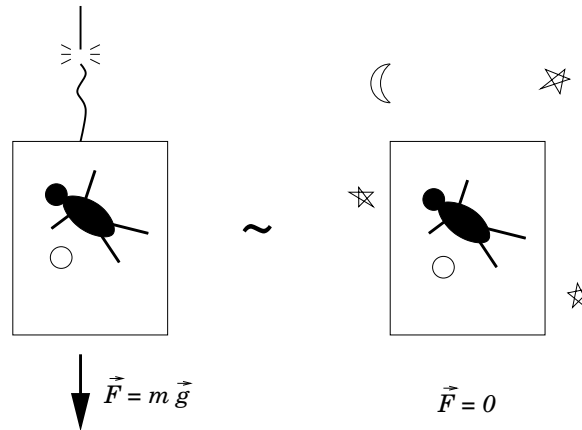


## Principio de Equivalencia:

Un observador en caída libre es *localmente* indistinguible de un observador inercial

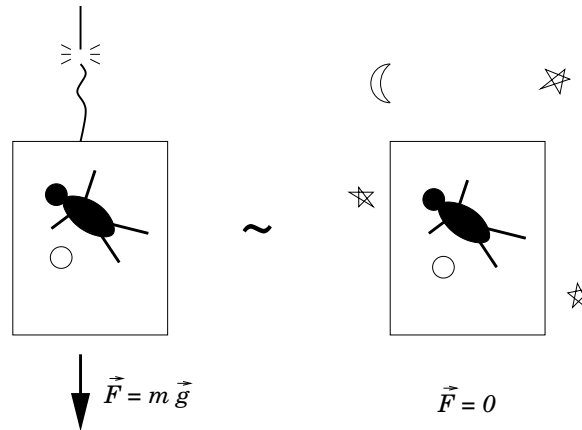


Se puede “apagar” la gravedad...



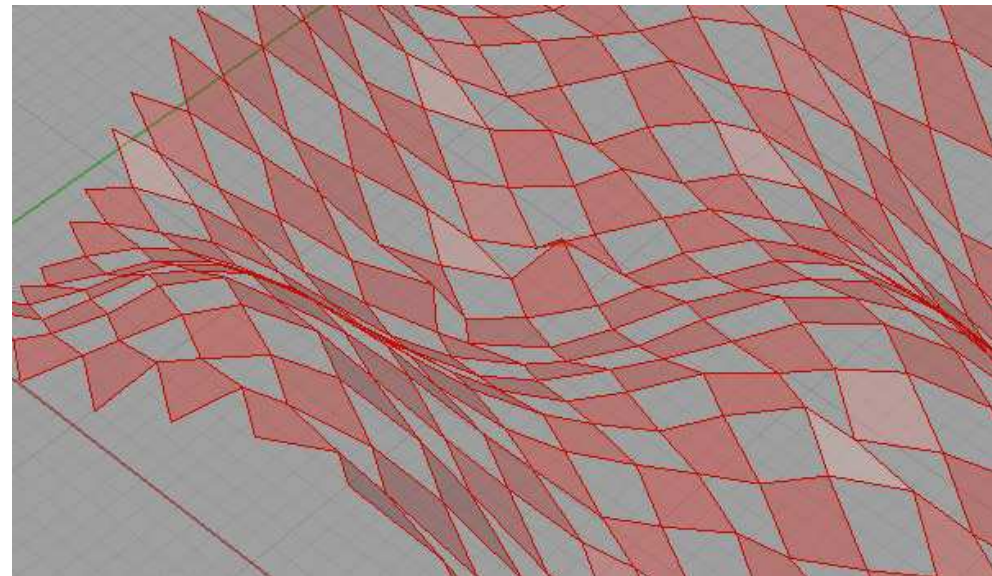
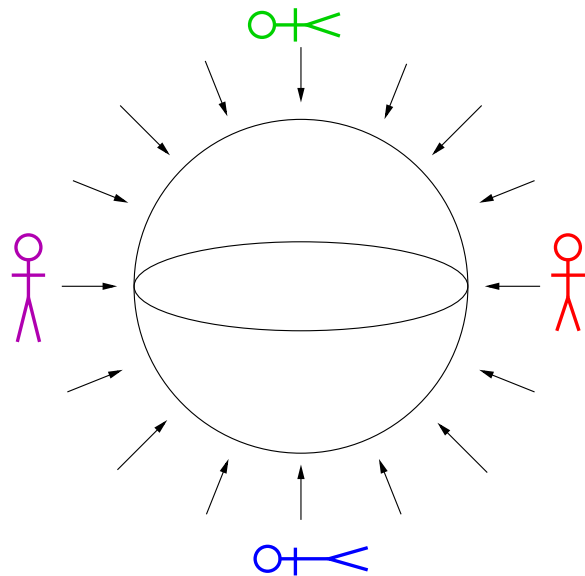
... y considerar observadores acelerados como inerciales

Se puede “apagar” la gravedad...



... y considerar observadores acelerados como inerciales

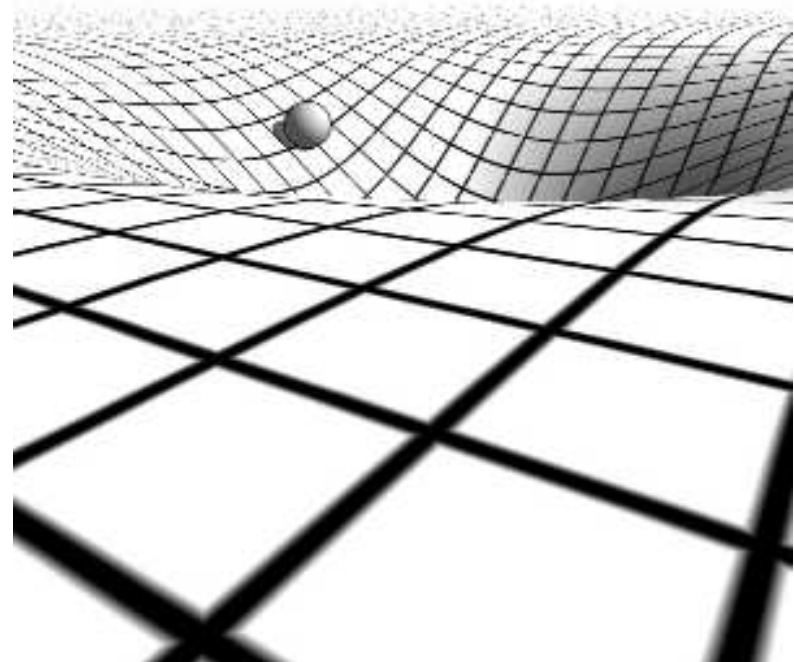
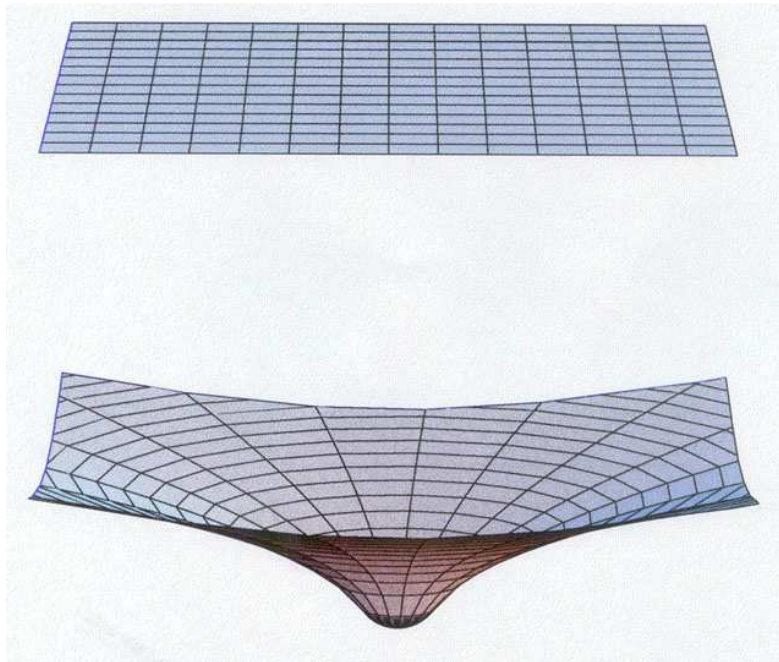
... pero sólo localmente...



→ Espacio localmente plano = espacio curvo!

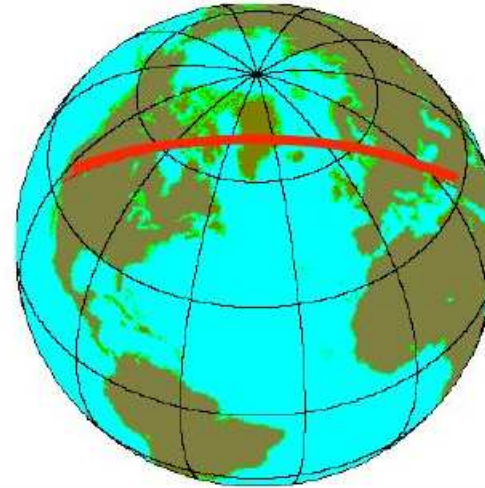
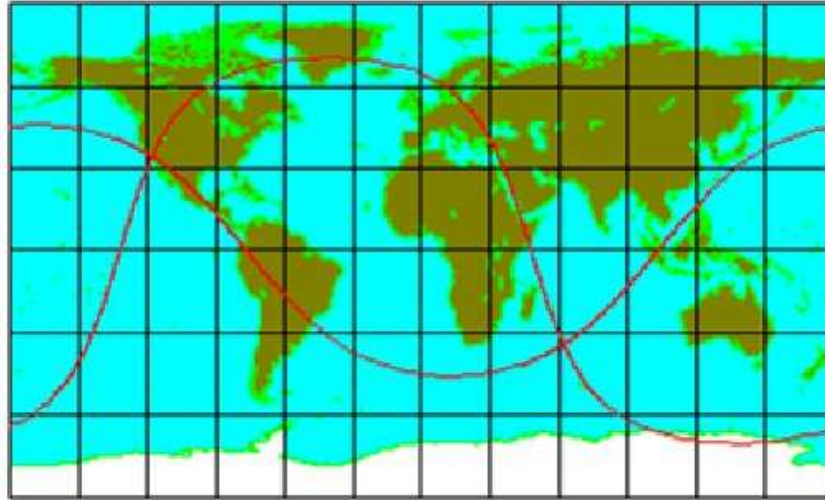
# 4. Relatividad General

Gravedad = espacio curvo

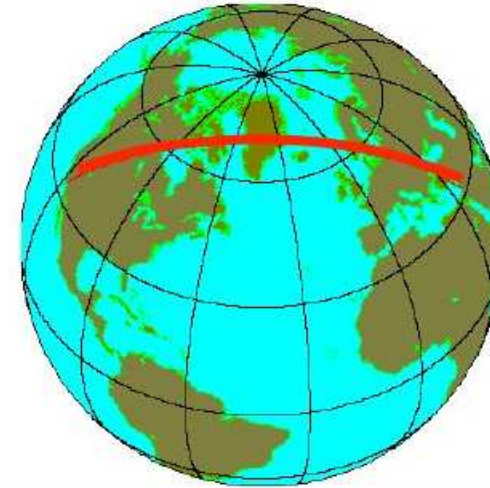
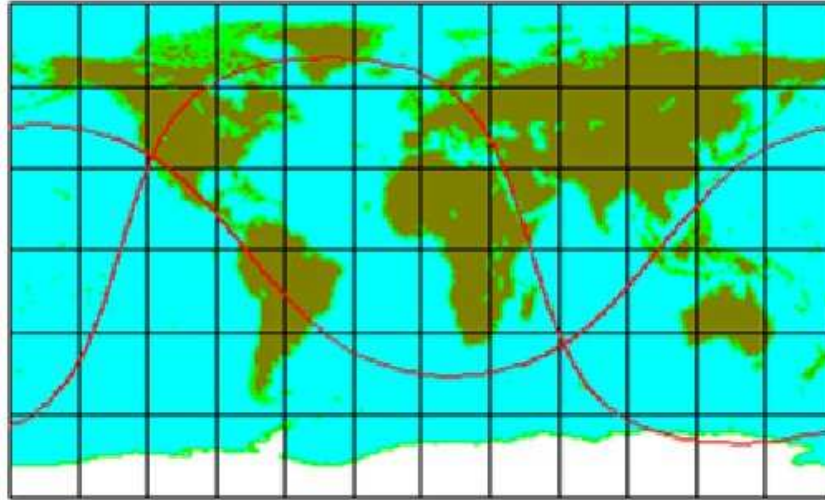


La materia indica cómo se curva el espacio.  
El espacio indica cómo se mueve la materia.

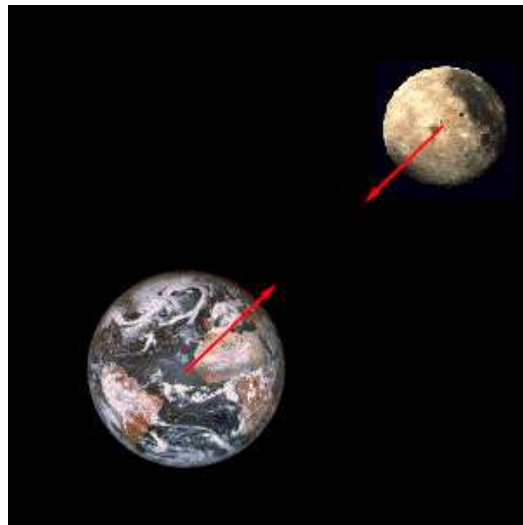
La materia sigue la trayectoria más recta posible



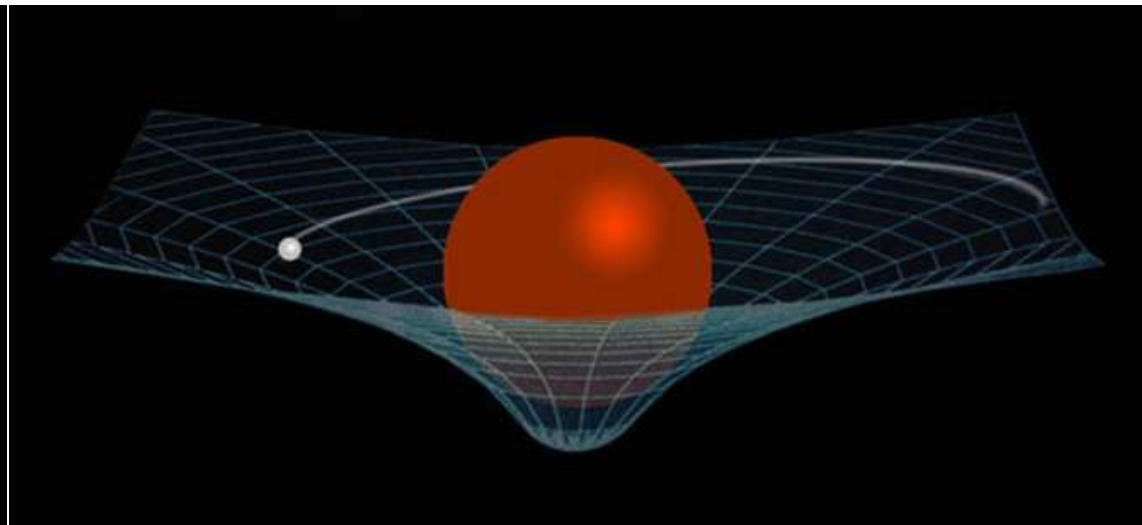
La materia sigue la trayectoria más recta posible



No hay fuerza gravitatoria à la Newton, sino trayectorias en espacio curvo



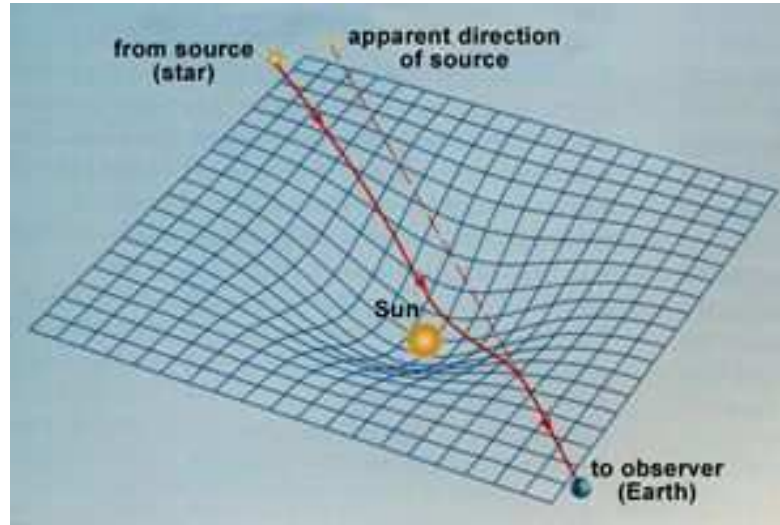
NO



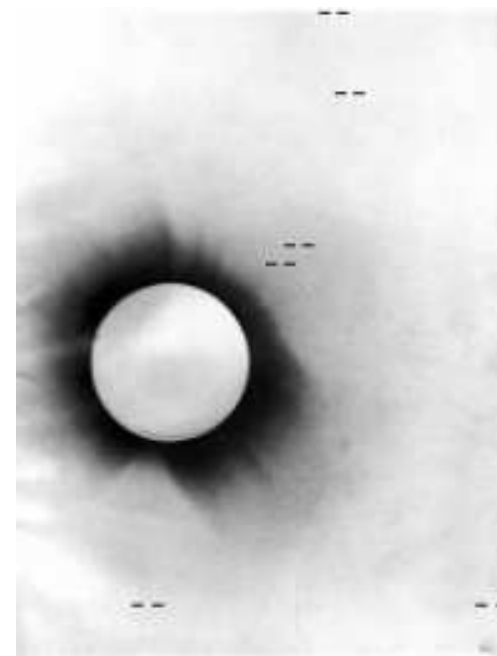
SÍ



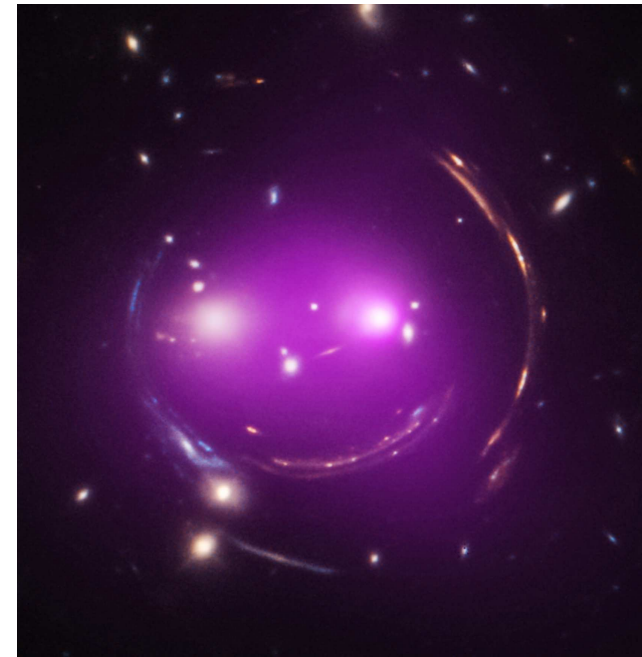
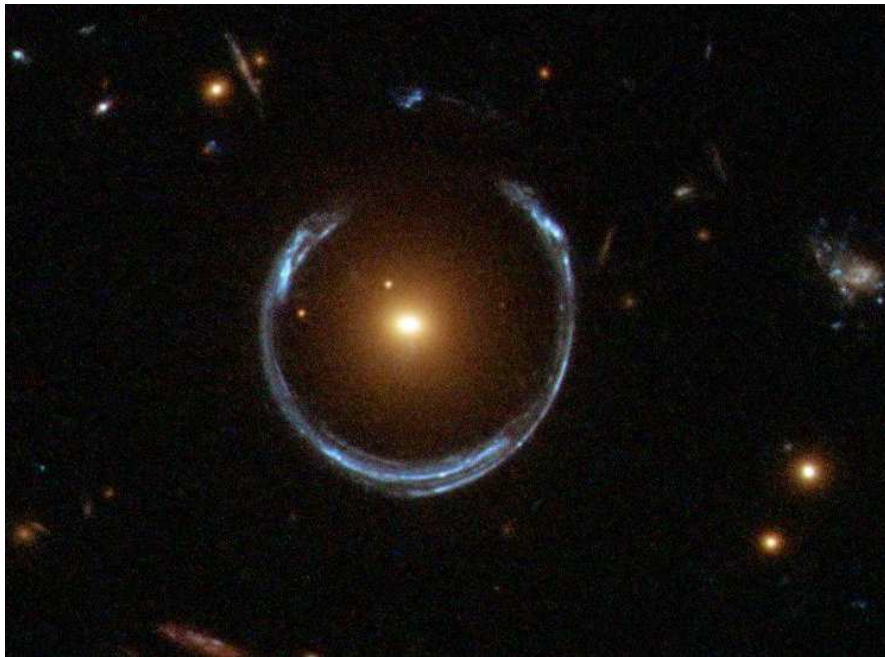
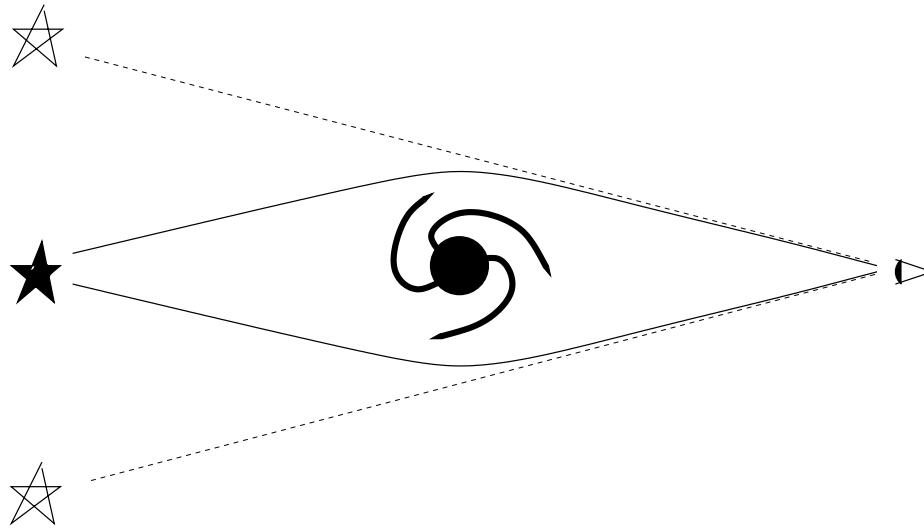
No sólo la materia, sino también la luz



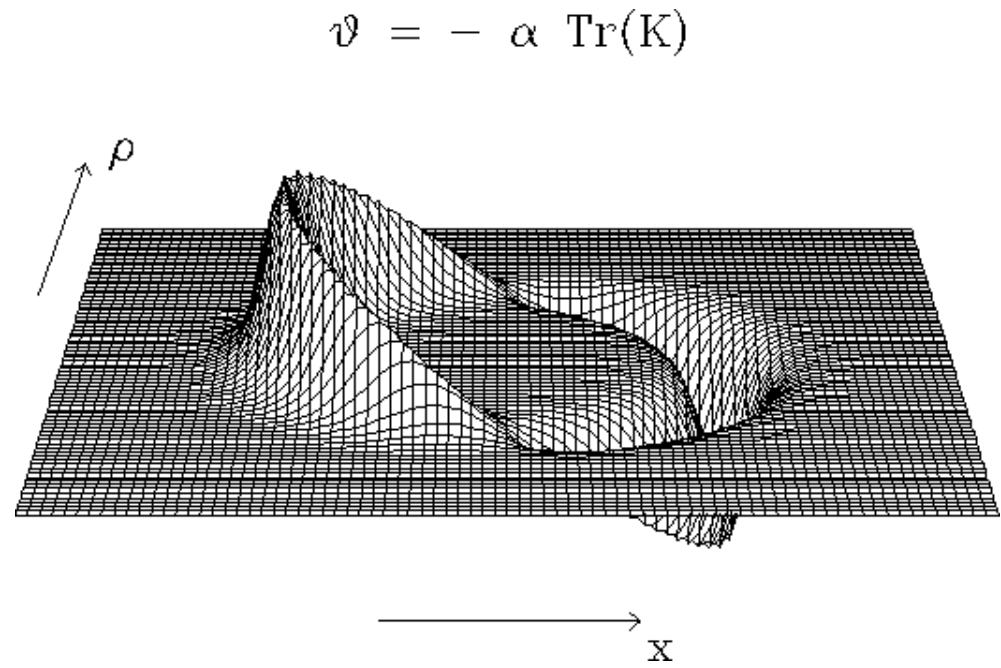
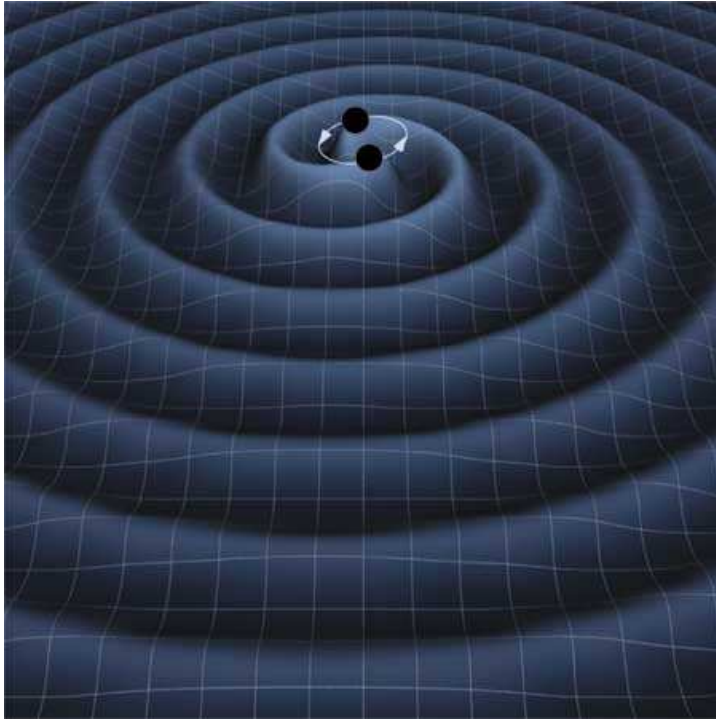
Efecto medido en eclipse solar de 1919 por Eddington & Co



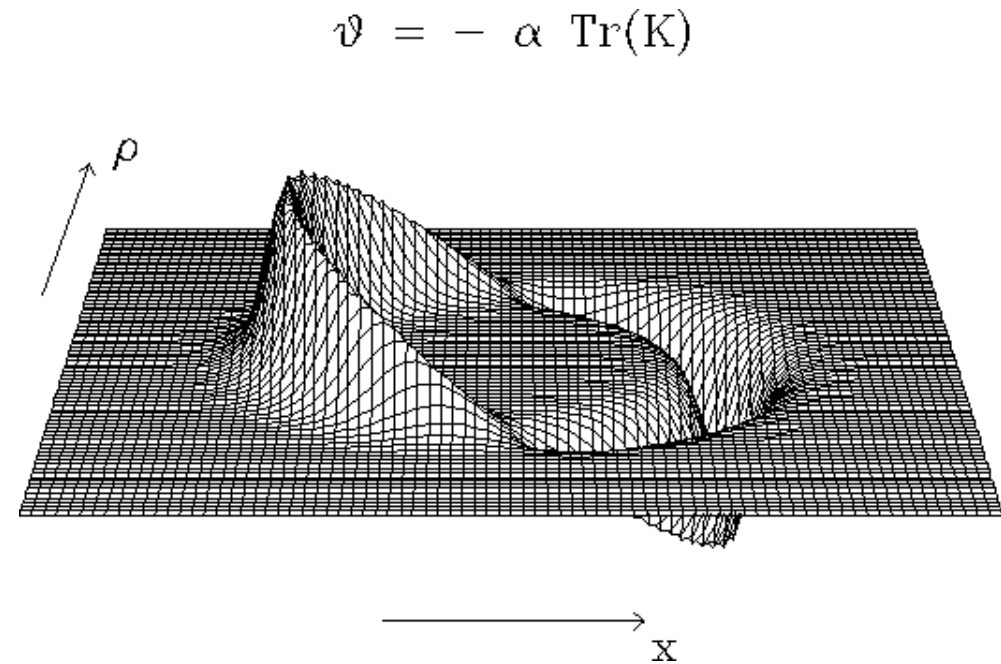
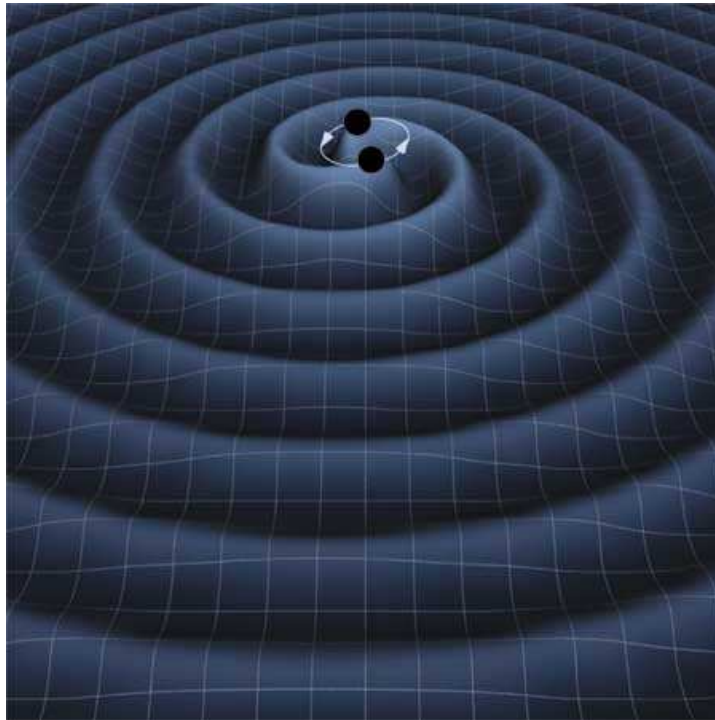
—> Objetos masivos actúan como lentes gravitatorias



En general la curvatura puede llegar a ser **muy, muy complicada**



En general la curvatura puede llegar a ser **muy, muy complicada**



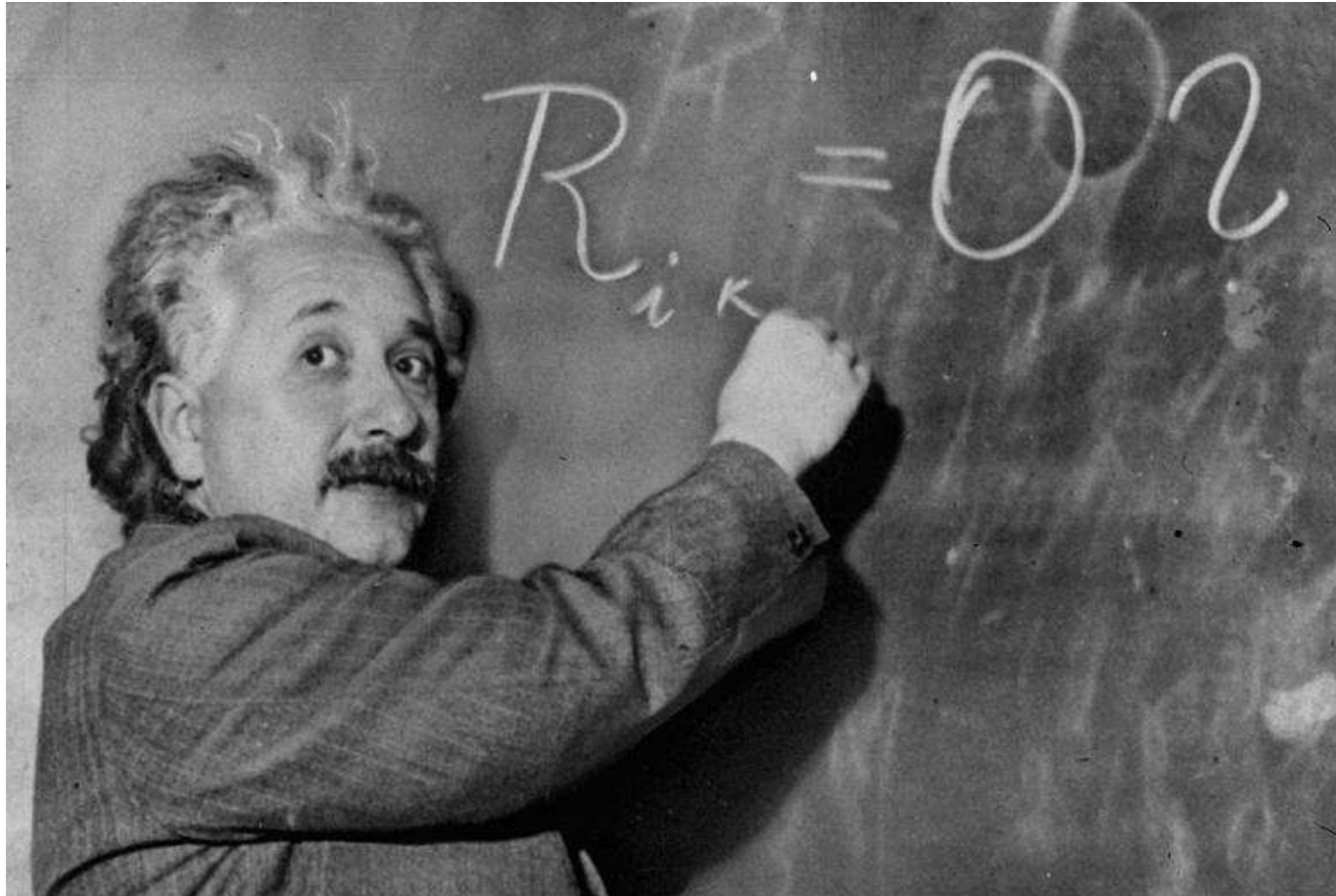
Matemáticas muy complejas: **geometría diferencial**

$$R_{\mu\nu\rho}^{\lambda} = \partial_{\mu}\Gamma_{\nu\rho}^{\lambda} - \partial_{\nu}\Gamma_{\mu\rho}^{\lambda} + \Gamma_{\mu\sigma}^{\lambda}\Gamma_{\nu\rho}^{\sigma} - \Gamma_{\nu\sigma}^{\lambda}\Gamma_{\mu\rho}^{\sigma}$$
$$\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2}g^{\sigma\lambda}\left(\partial_{\mu}g_{\lambda\nu} + \partial_{\nu}g_{\mu\lambda} - \partial_{\lambda}g_{\mu\nu}\right)$$
$$\ddot{x}^{\mu} + \Gamma_{\nu\rho}^{\mu}\dot{x}^{\nu}\dot{x}^{\rho} = 0$$

A Einstein le costó 8 años aprenderlo...

Campo gravitatorio descrito por la *ecuación de Einstein*

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

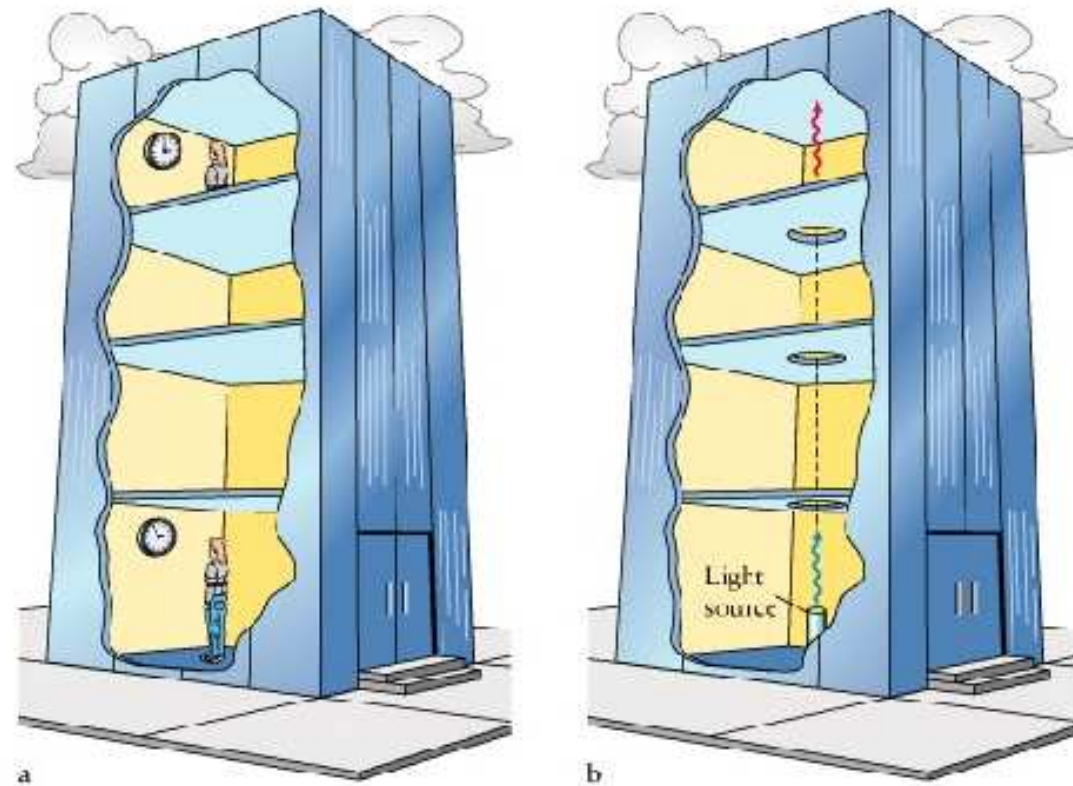


# 5. Consecuencias

## A. Dilatación temporal

La luz **pierde energía** al salir del pozo potencial

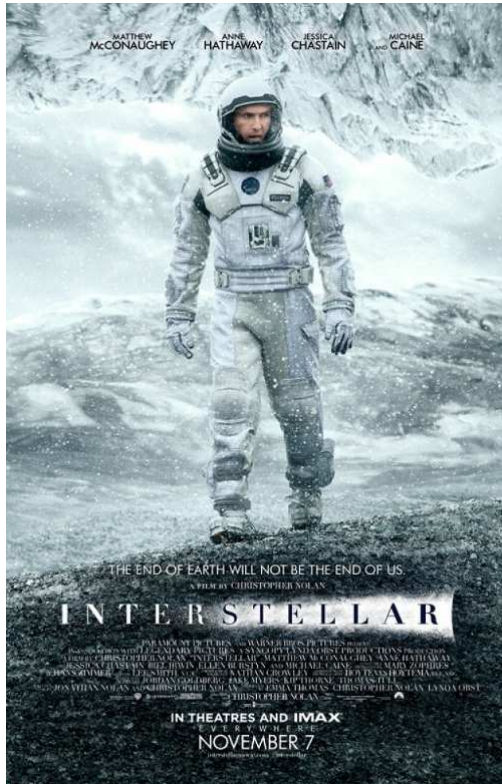
→ Efecto Doppler gravitacional



→ Tiempo corre más lento abajo que arriba!

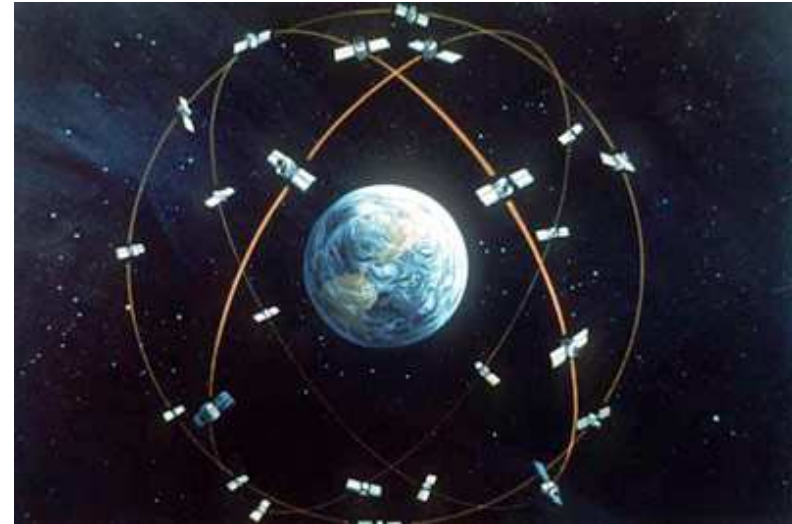
# Dilatación temporal gravitatorio:

Abajo en un pozo gravitatorio el tiempo corre más lento!



- 1 hora en planeta de agua cerca de Gargantúa equivale a 7 años en la Tierra
- En la vida real: efecto importante en GPS

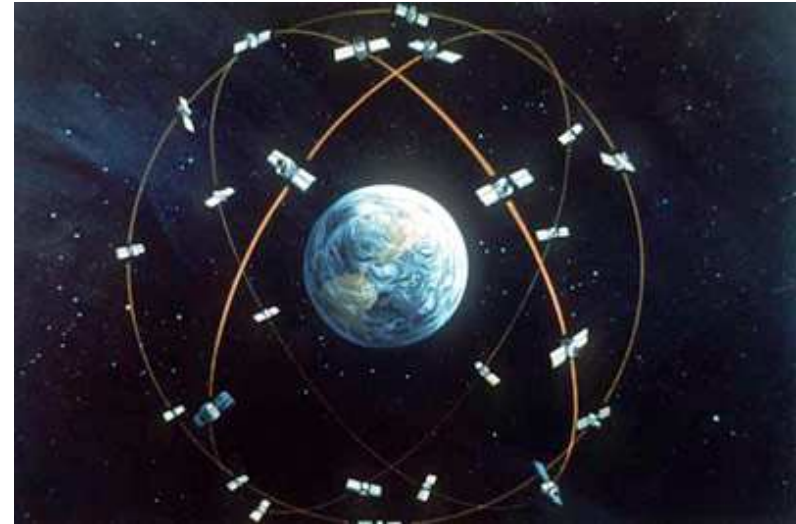
→ Corrección en GPS



Contacto con satélites a 20 000 km  
Imprecisión permitida:  $< 0,03 \mu s/d$



→ Corrección en GPS



Contacto con satélites a 20 000 km

Imprecisión permitida:  $< 0,03 \mu s/d$

Relatividad especial: retraso de  $7 \mu s/d$

Relatividad general: adelanto de  $45 \mu s/d$

Efecto total:  $38 \mu s/d$

→ error acumulativo de 10 km/d!!!

→ Corrección en relojes de satélites

# B. Ondas gravitacionales

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física



NO



más o menos...

# B. Ondas gravitacionales

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física

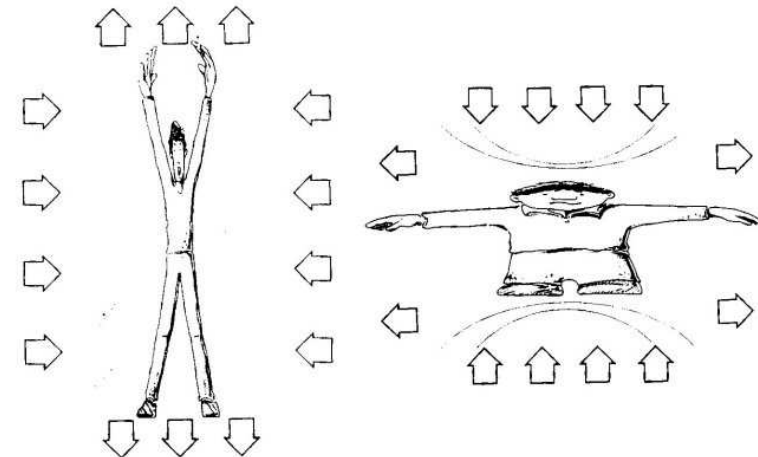
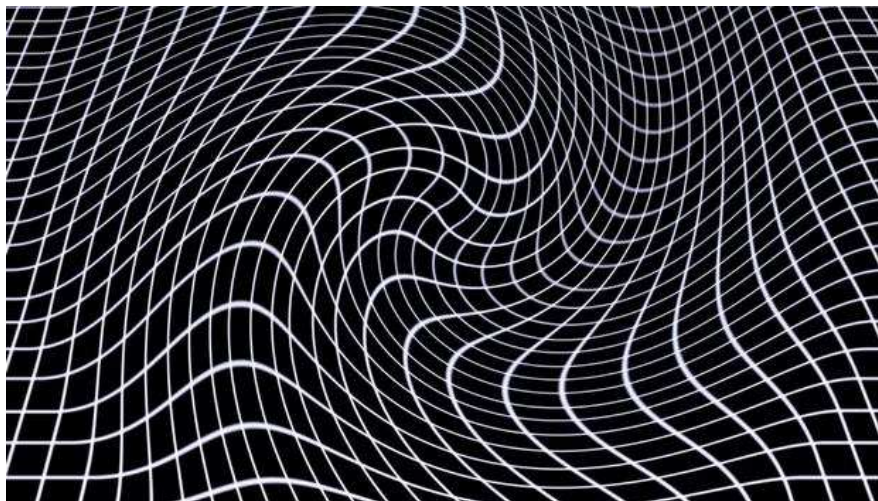


NO

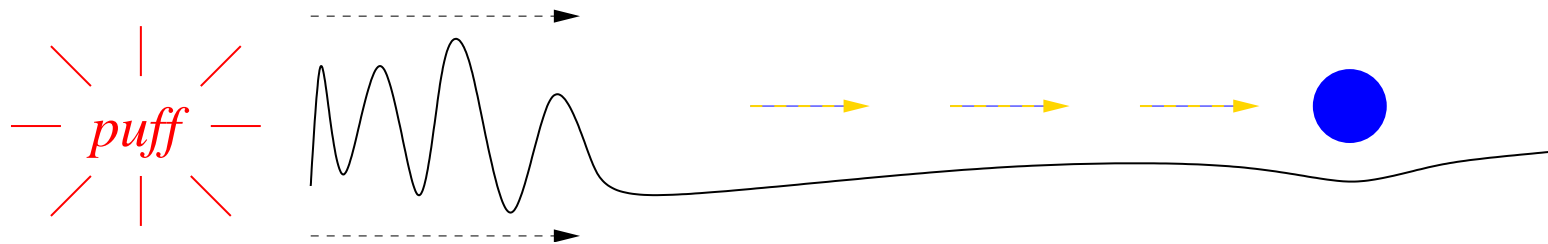
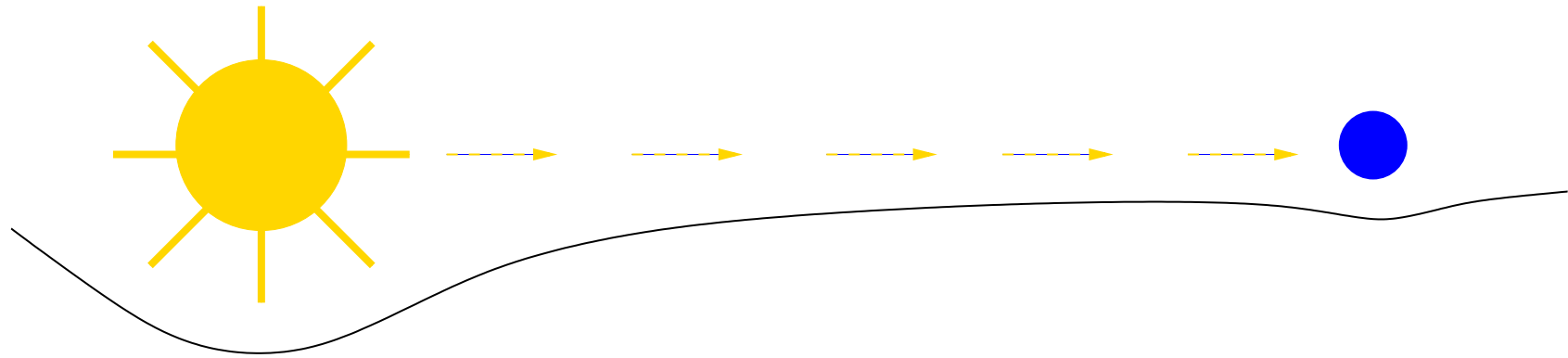


más o menos...

Existen perturbaciones del espacio que se propagan: **ondas gravitacionales**



## Solución a problema de Newton:



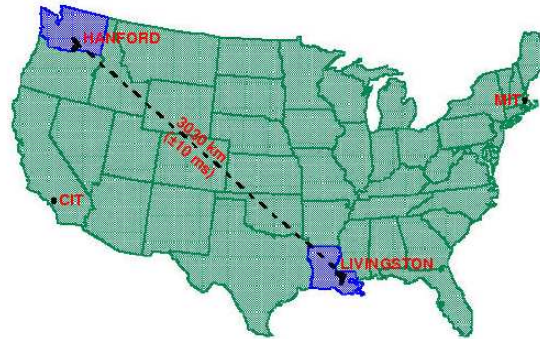
La gravedad se propaga a la velocidad de la luz:

- La Tierra sigue teniendo 8 minutos de luz
- La Tierra sigue 8 minutos más en su órbita

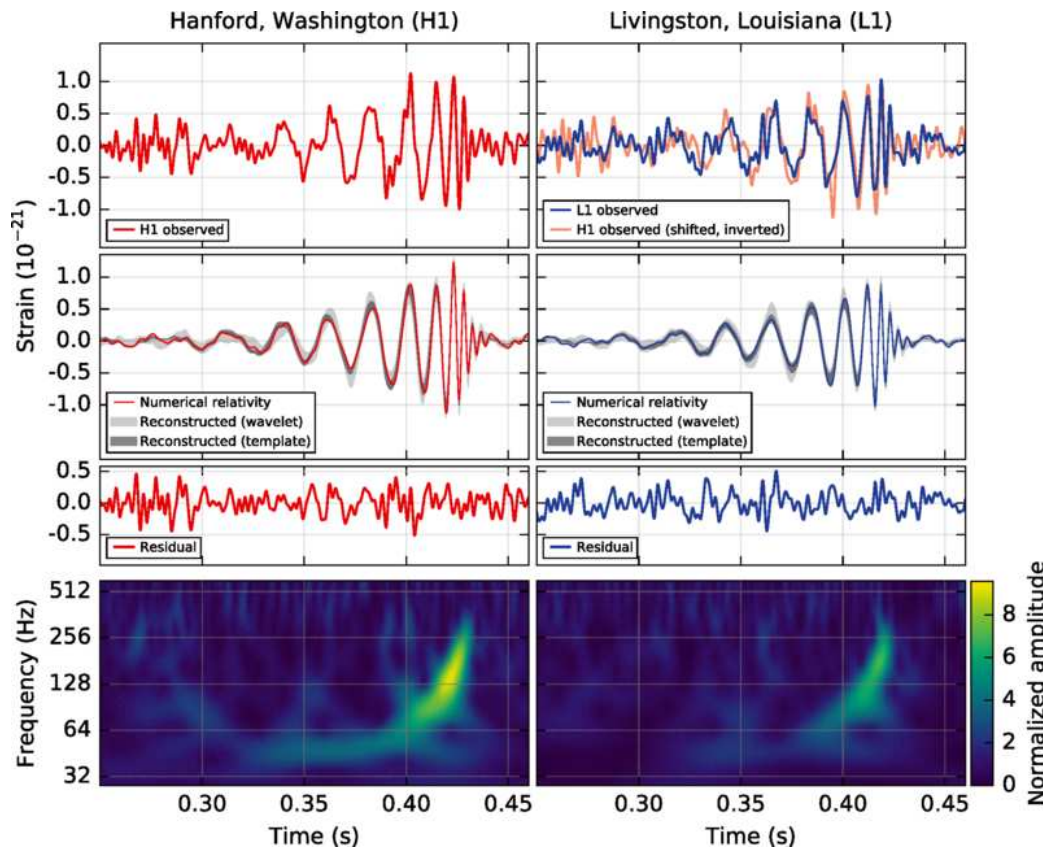
# Detección directa en LIGO: 14 sept 2015



Hanford (WA)



Livingston (LA)



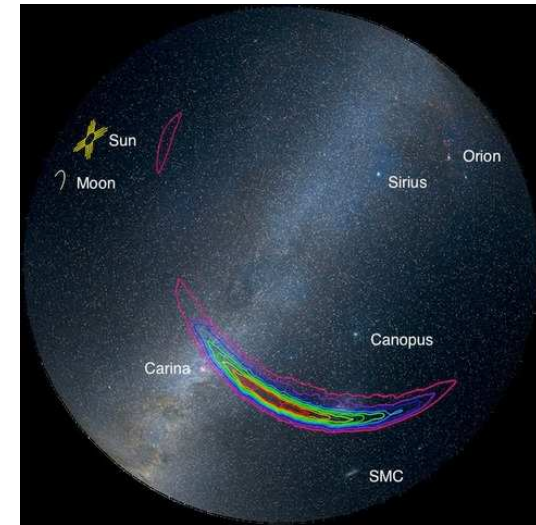
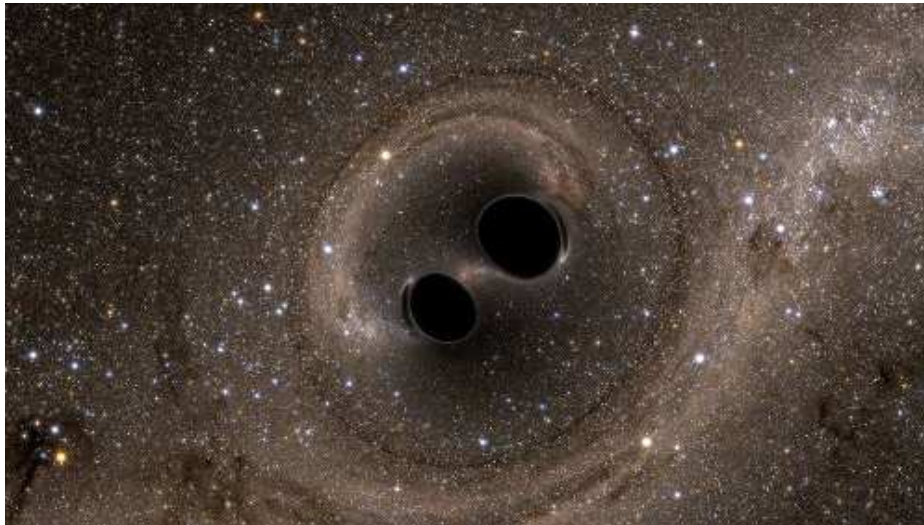
Señal típica de colisión de dos objetos masivos:

- 6,9 ms de retraso entre las dos señales
- Aumento de frecuencia y amplitud de 35 Hz a 150 Hz en 0,2 s
- Oscilaciones amortiguadas después de máximo

Datos indican (90% confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$  dos objetos de  $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$  y  $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$  separación de  $\sim 350 \text{ km}$

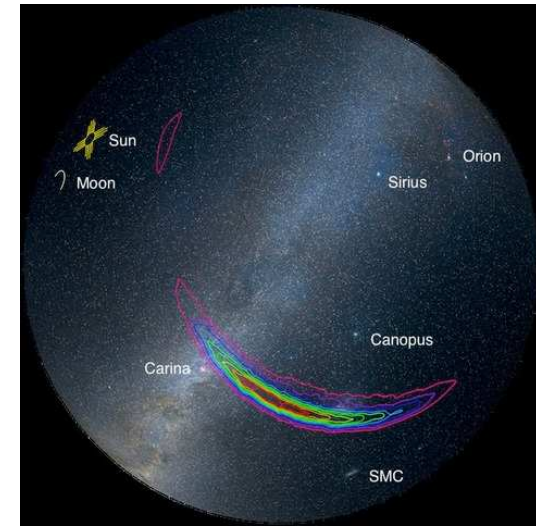
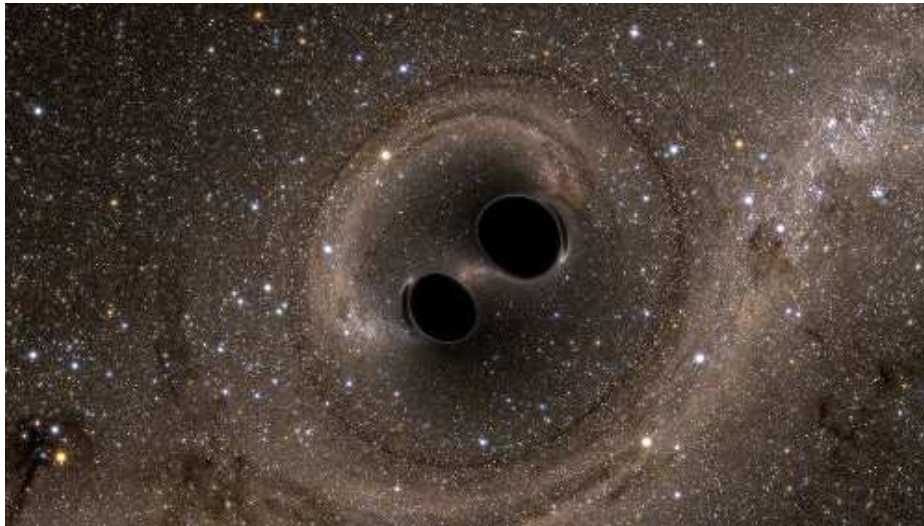
## Fusión de dos agujeros negros!



Datos indican (90% confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$  dos objetos de  $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$  y  $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$  separación de  $\sim 350 \text{ km}$

## Fusión de dos agujeros negros!

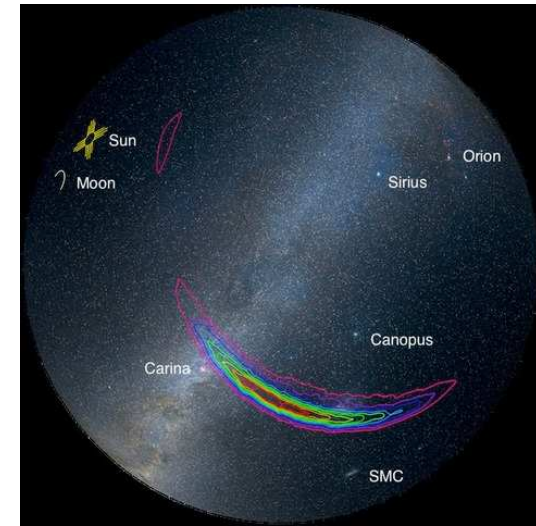
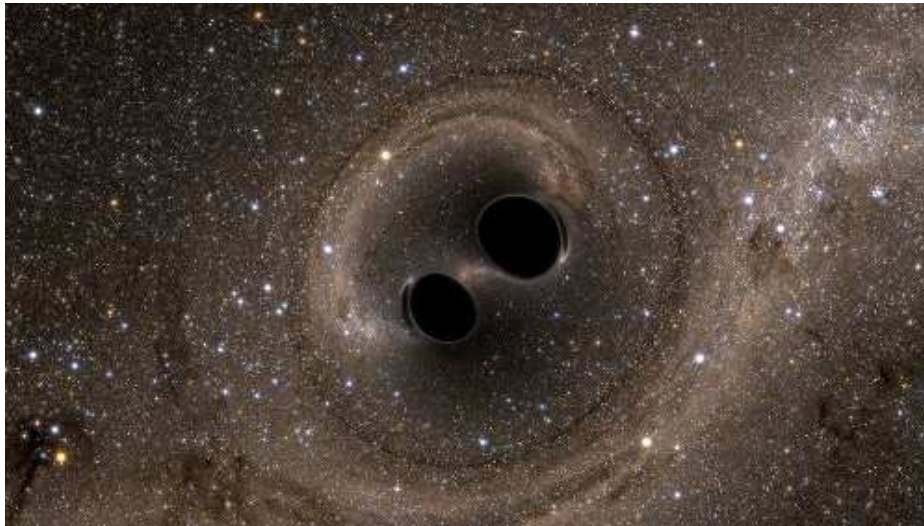


- Agujero negro resultante con  $m_f \approx 62M_{\odot}$  y  $a = 0,67$   
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales:  $E_{\text{rad}} \approx 3 M_{\odot} c^2$   
(comparación:  $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$ ;  $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ )

Datos indican (90% confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$  dos objetos de  $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$  y  $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$  separación de  $\sim 350 \text{ km}$

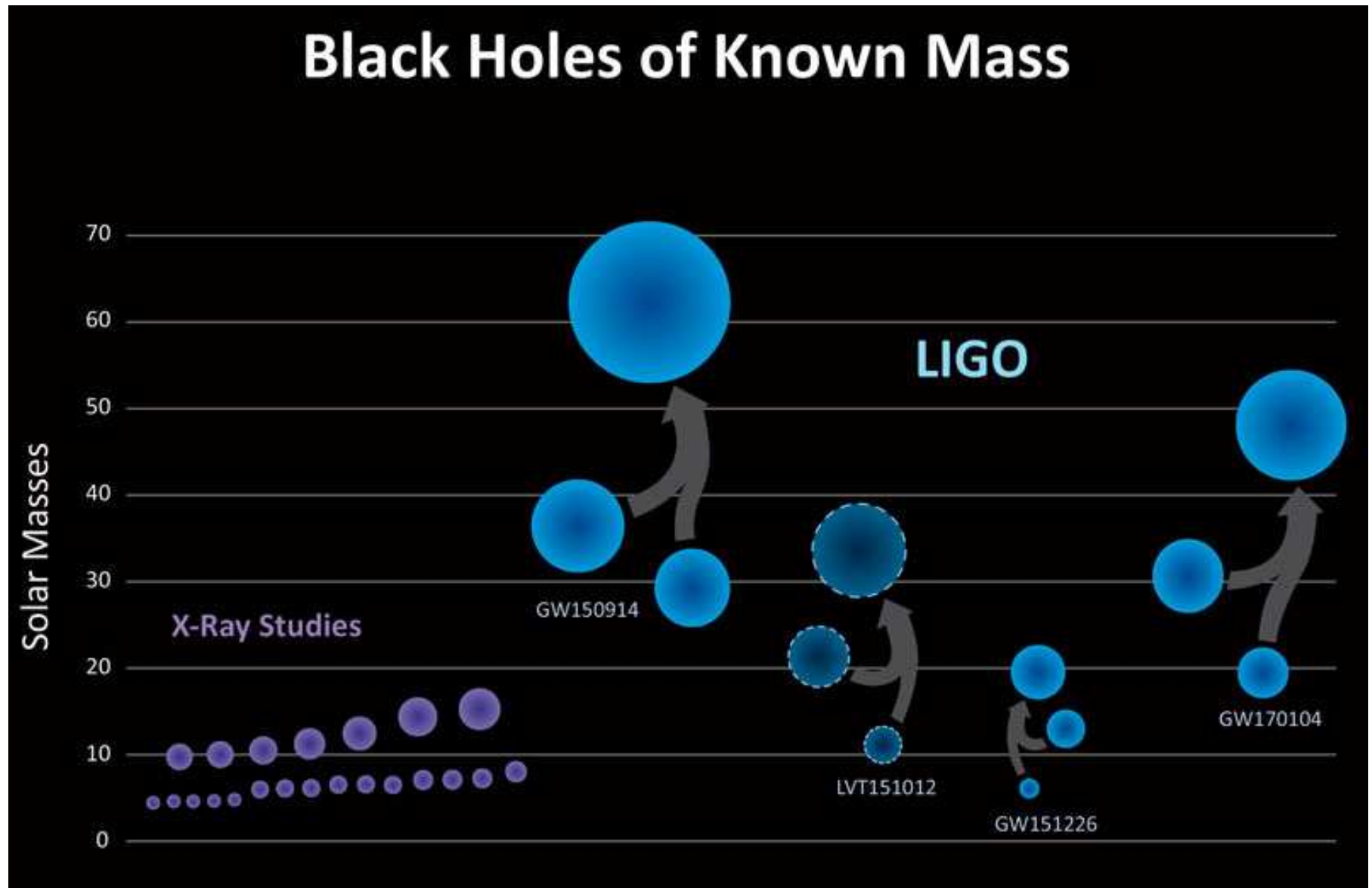
## Fusión de dos agujeros negros!



- Agujero negro resultante con  $m_f \approx 62M_{\odot}$  y  $a = 0,67$   
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales:  $E_{\text{rad}} \approx 3 M_{\odot} c^2$   
(comparación:  $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$ ;  $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ )  
Potencia emitida en máximo:  $\sim 200 M_{\odot} c^2/s \sim 50 \times \sum_{\star} P_{\star}$
- A distancia de  $1,3 \cdot 10^9$  años-luz ( $z \approx 0,09$ )

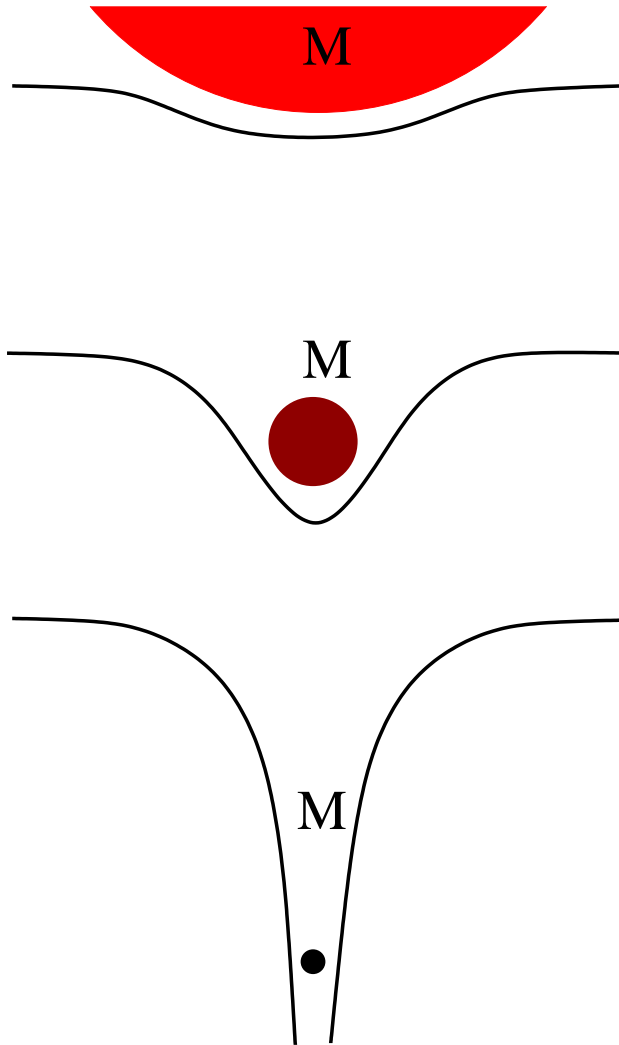


Más detecciones de ondas gravitacionales:  
GW150915, GW151226, GW170104,



# C. Agujeros negros

Objetos con velocidad de escape mayor que la velocidad de la luz



Objeto con masa  $M$  y radio  $R_0$

**Relatividad general:**

Curvatura del espacio :

$$\text{Curvatura} \sim \frac{M^2}{R_0^2}$$

Tiempo que tardan señales desde la superficie:

$$t \sim \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{2M}{R_0}}}$$

NB:  $t \rightarrow \infty$  cuando  $R_0 \rightarrow 2M$

→ No hay señales desde  $R_0 \leq 2M$

→ **Horizonte en  $R_0 = 2M$**

Objetos muy masivos: se forma un **radio crítico** = Radio de Schwarzschild

→ la luz se **queda atrapada** dentro del radio de Schwarzschild

→ Se forma un **horizonte**: no salen señales desde el interior

→ Se forma un **agujero negro**

Radio de Schwarzschild = radio crítico para formar un agujero negro

$$R_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$

Objeto	Masa	$R_s$
Sol	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 1 M_\odot$	$3 \text{ km}$
Tierra	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg} = 3 \cdot 10^{-6} M_\odot$	$9 \text{ mm}$
Ser humano:	$100 \text{ kg} = 5 \cdot 10^{-29} M_\odot$	$1,5 \cdot 10^{-22} \text{ mm}$
Agujero negro supermasivo	$\sim 10^9 M_\odot$	$\sim$ órbita de Saturno
Agujero negro primordial	$\sim 10^{12} \text{ kg} = 10^{-18} M_\odot$	$\sim$ núcleo de átomo

¿Cómo se observa un agujero negro ...

... ya que ni se escapa la luz?

¿Cómo se observa un agujero negro ...

... ya que ni se escapa la luz?

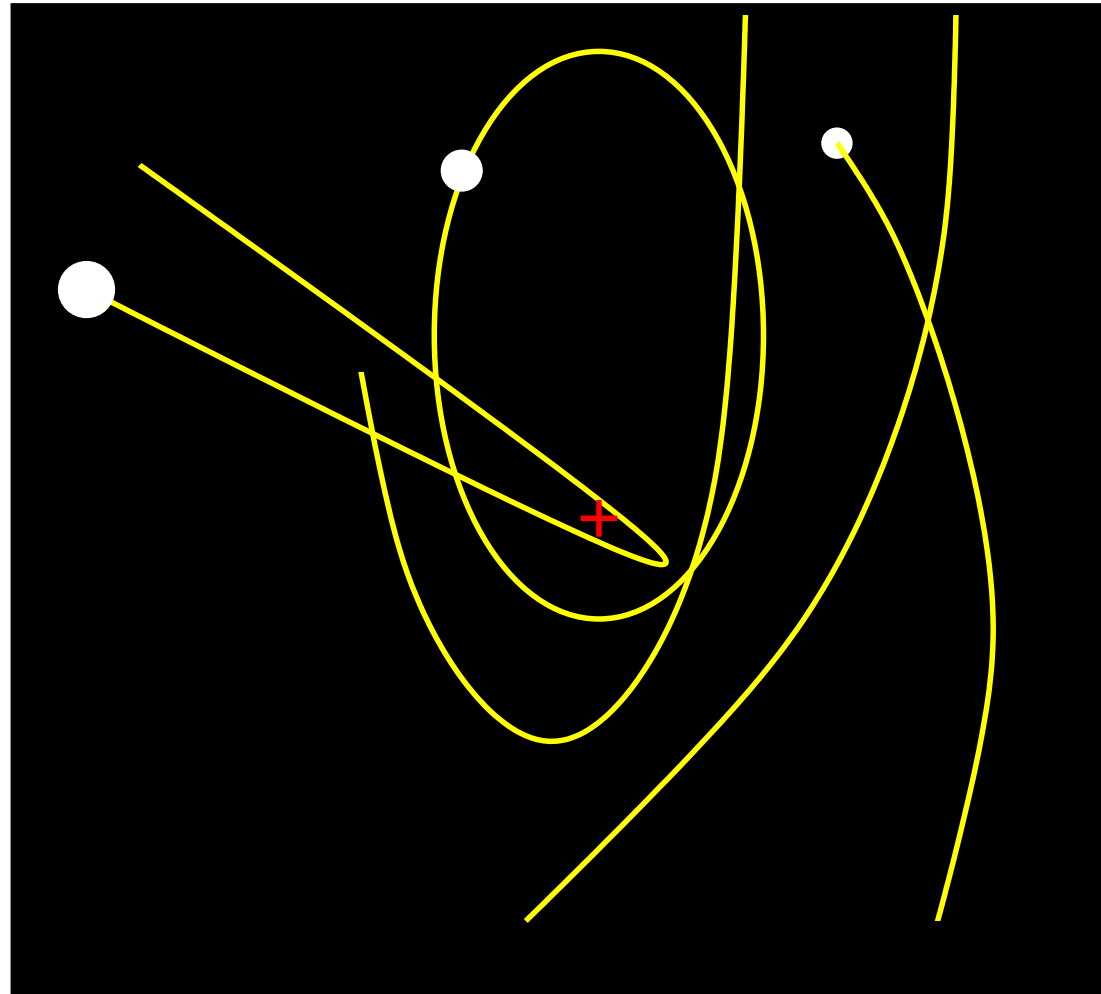
1. Por los efectos en los alrededores:



Absorción de materia cercana → Discos de acreción

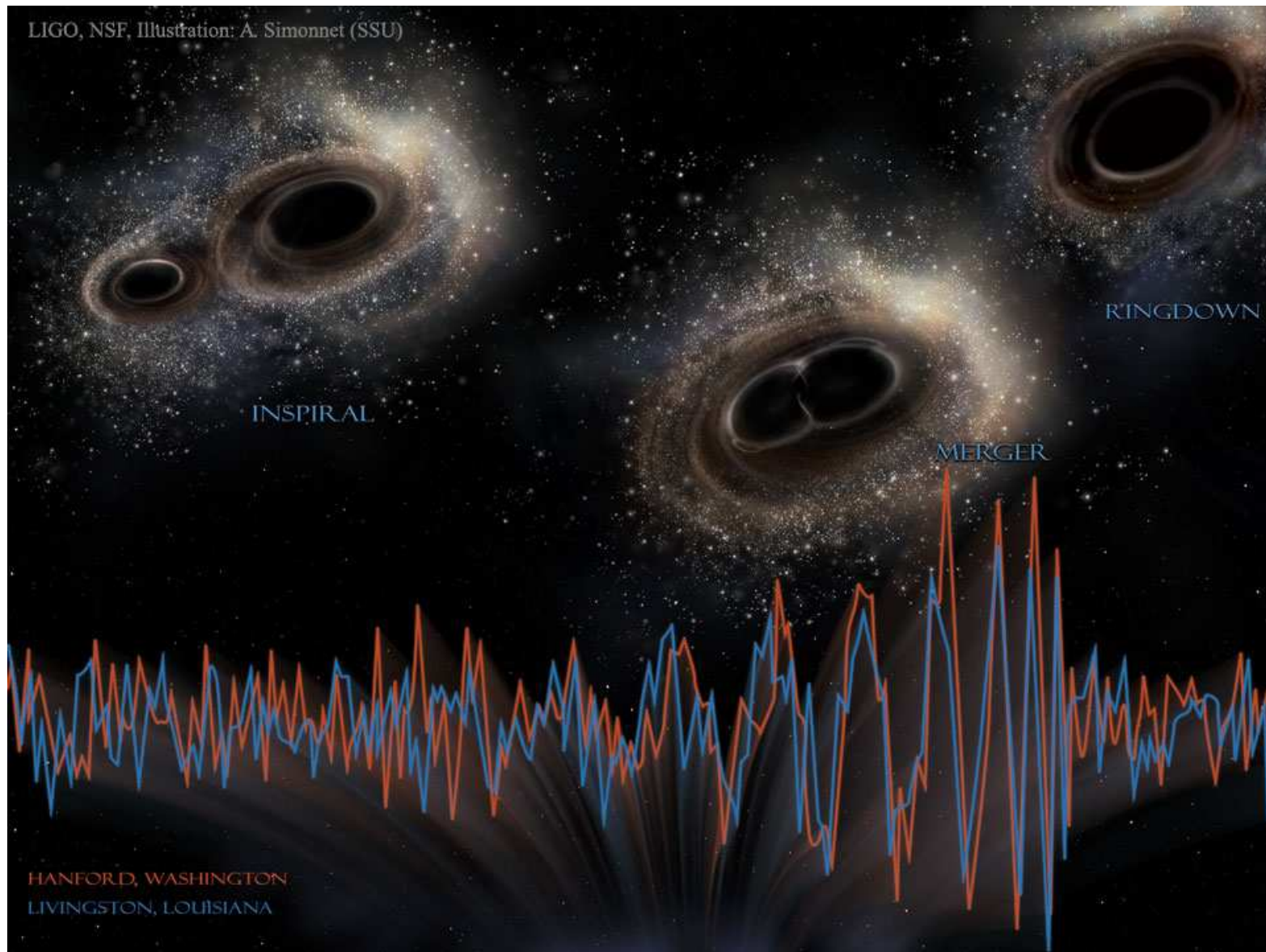
## 2. Por los efectos en los alrededores:

Atracción de objetos cercanos  $\rightarrow$  trayectorias muy aceleradas



Objeto de 3 millones de masas solares en el centro de la galaxia

## 2. Por las ondas gravitacionales que producen sus colisiones:



# D. Cosmología

Gravedad determina la geometría del espaciotiempo

Gravedad determina la geometría del universo entero

Cosmología: estudio de la forma y la evolución del universo entero



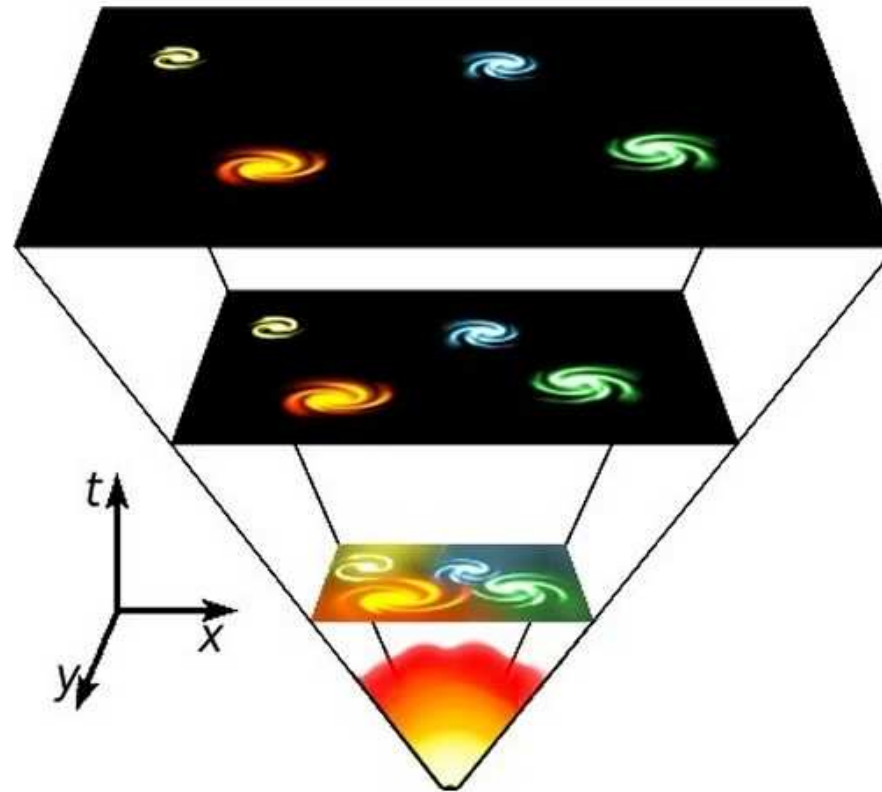
# D. Cosmología

Gravedad determina la geometría del espaciotiempo

Gravedad determina la geometría del universo entero

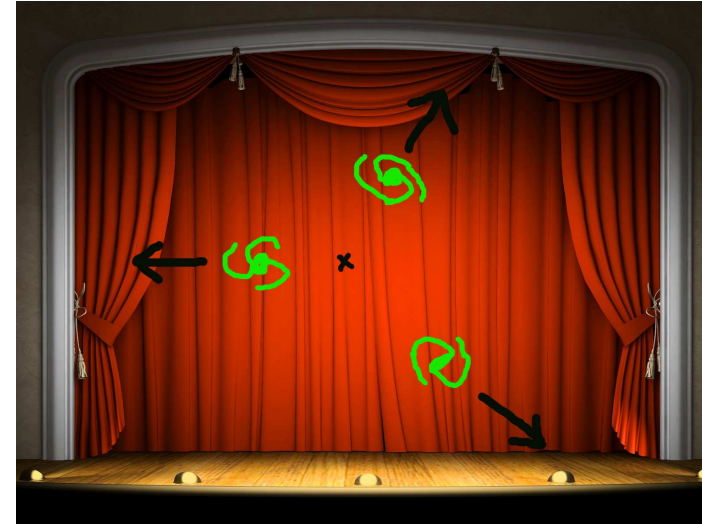
Cosmología: estudio de la forma y la evolución del universo entero

→ el universo **expande**, porque **el espacio expande**

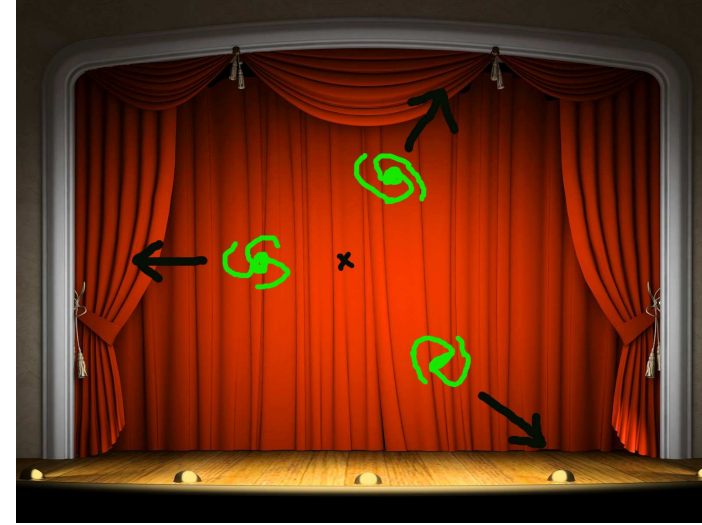


Todas las galaxias se alejan de nosotros, pero no somos el centro...

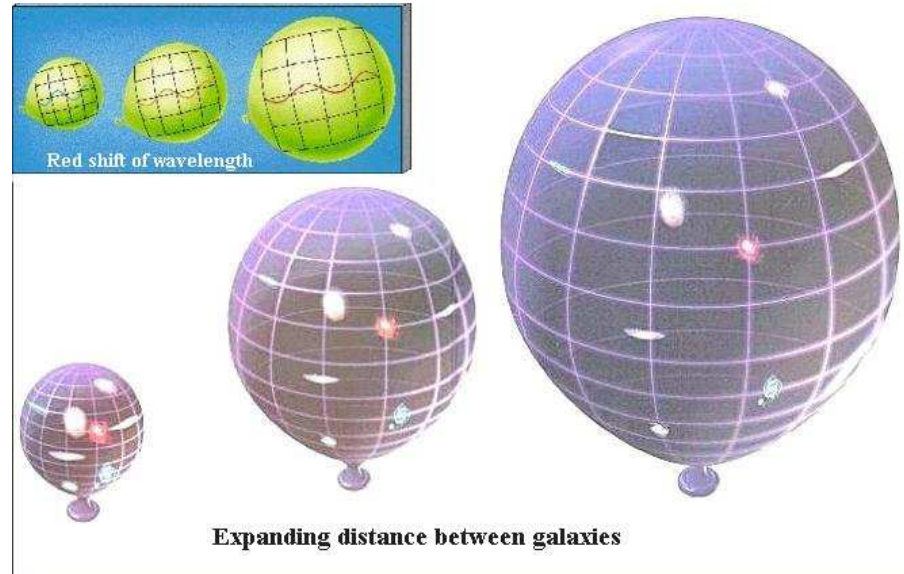
¡Ojo! Expansión  $\neq$  movimiento de galaxias por el espacio...



¡Ojo! Expansión  $\neq$  movimiento de galaxias por el espacio...

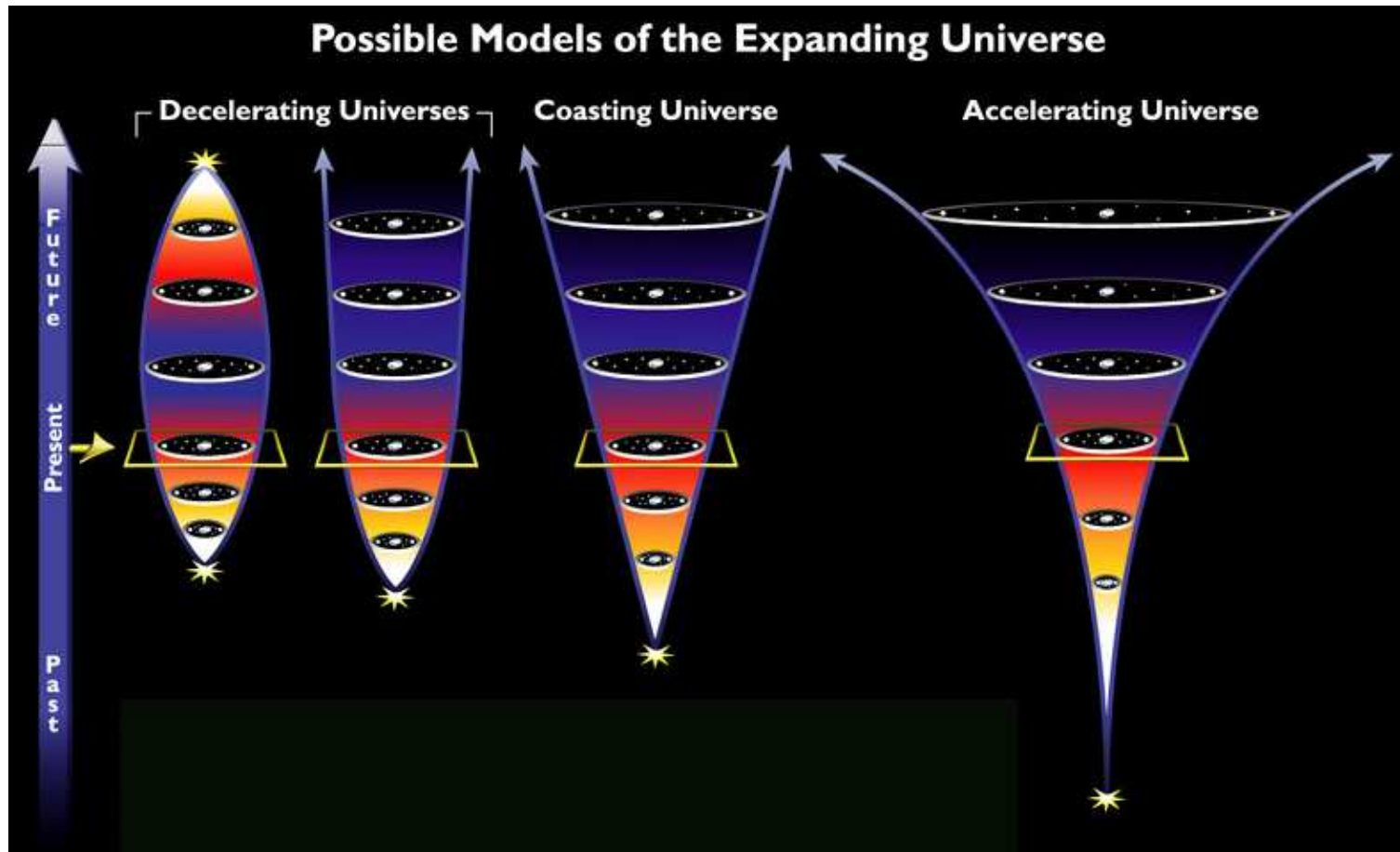


Es la **creación continua de espacio** nuevo...

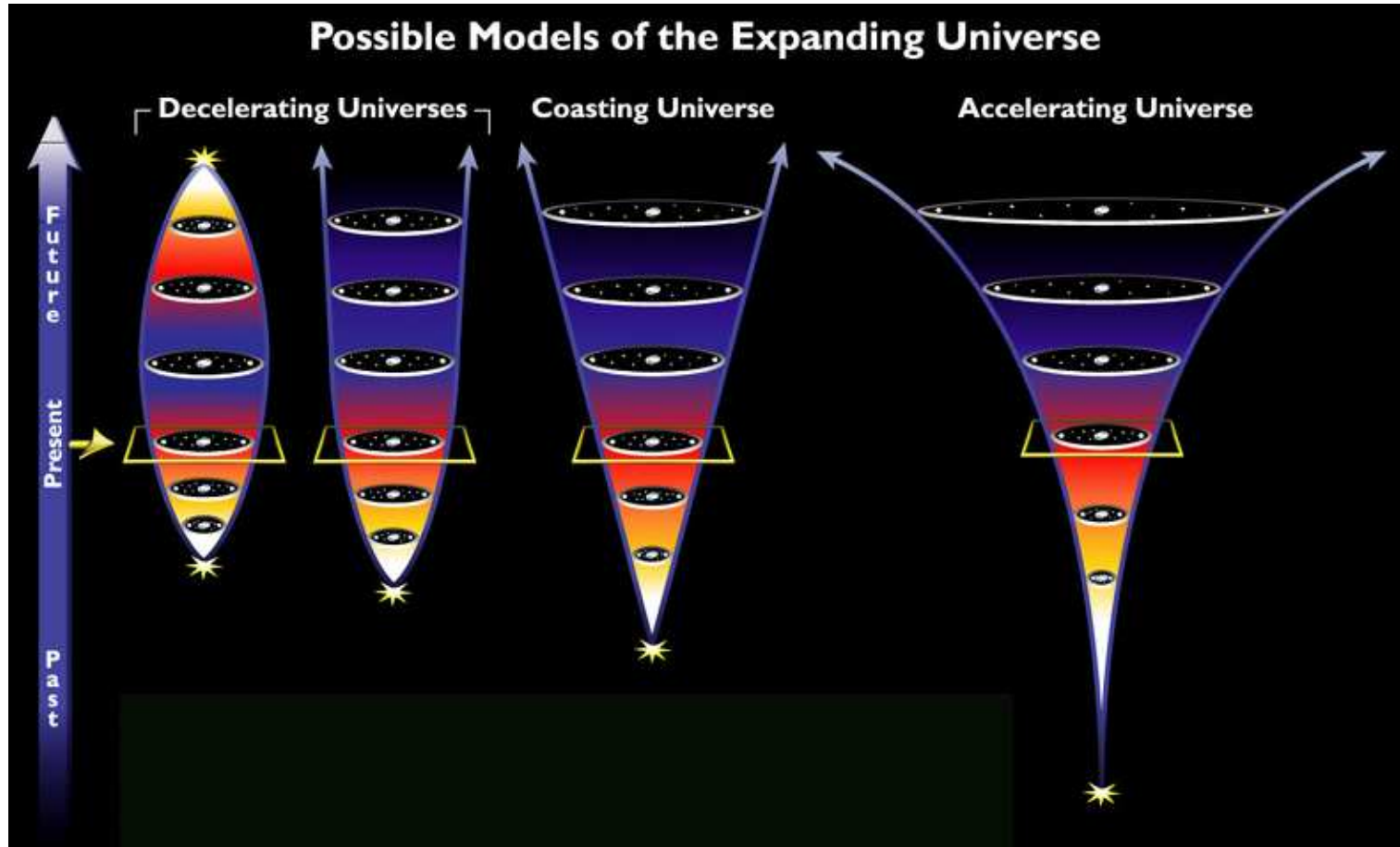


Recuérdase: el espacio no es un escenario estático, sino una parte dinámica!

# Modelos cosmológicos:



## Modelos cosmológicos:

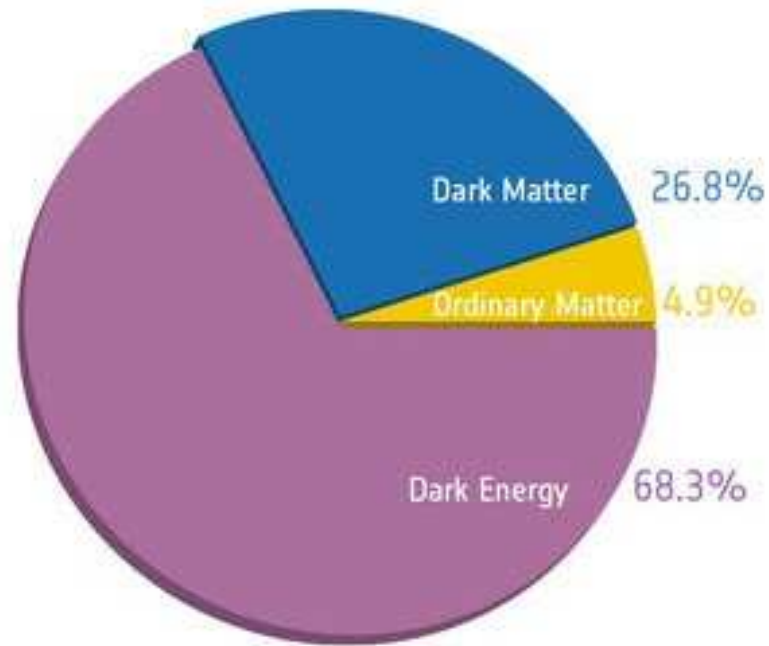


Nuestro universo: **expansión acelerada!**

Observaciones: supernova 1998

—→ ¿Qué causa la aceleración?

## Contenido del universo:

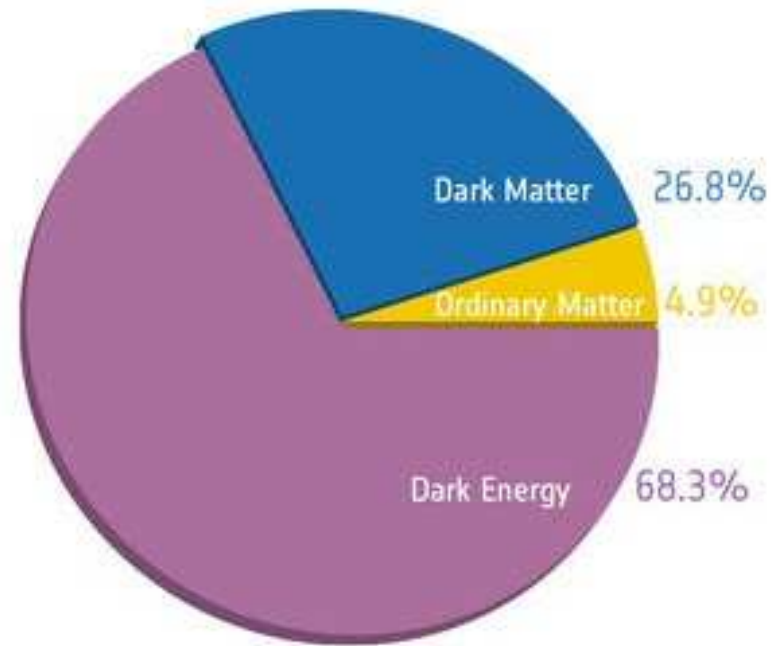


**Materia ordinaria:** átomos, estrellas, planetas, ...

**Materia oscura:** Forma desconocida de materia...

**Energía oscura:** Fuerza desconocida repulsiva...

## Contenido del universo:



**Materia ordinaria:** átomos, estrellas, planetas, ...

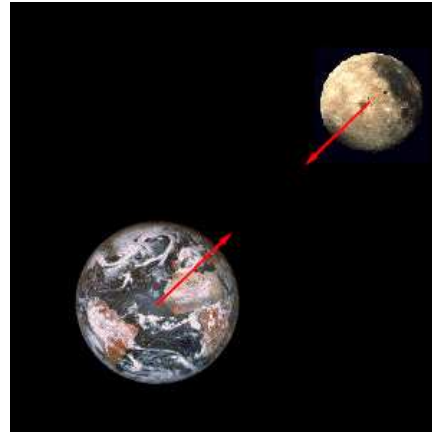
**Materia oscura:** Forma desconocida de materia...

**Energía oscura:** Fuerza desconocida repulsiva...

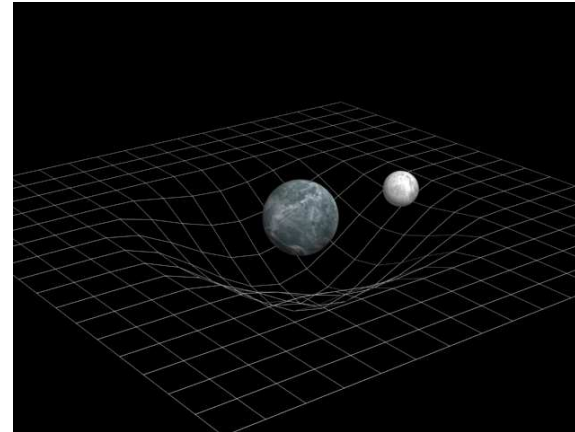
**Sólo entendemos un 5% del contenido del universo!**

# 6. Resumen

- Gravedad no es la fuerza a distancia de Newton  
Gravedad es la **curvatura del espaciotiempo**



NO

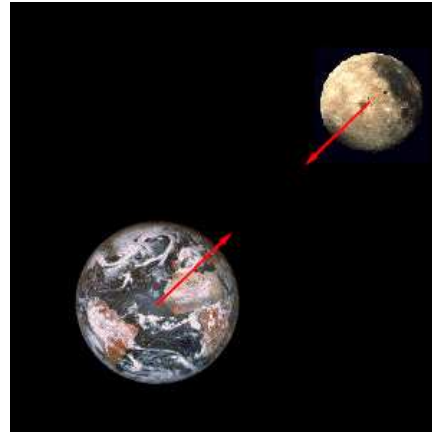


SÍ

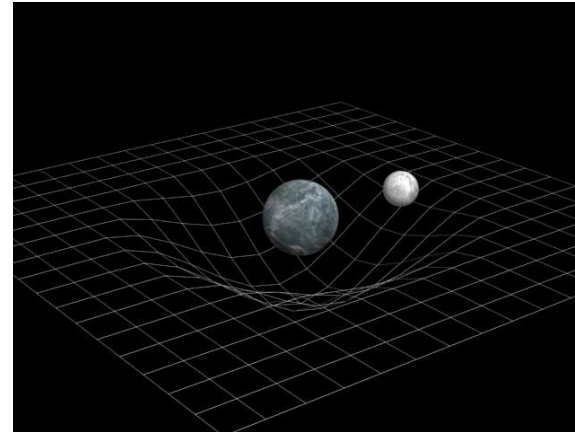


# 6. Resumen

- Gravedad no es la fuerza a distancia de Newton  
Gravedad es la **curvatura del espaciotiempo**



NO

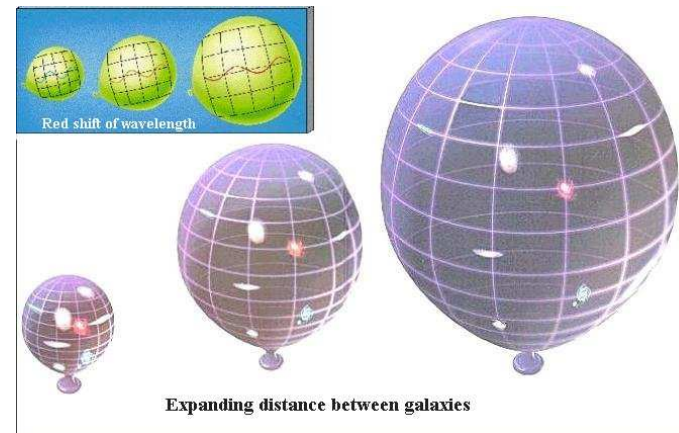


SÍ

- El espaciotiempo es dinámico

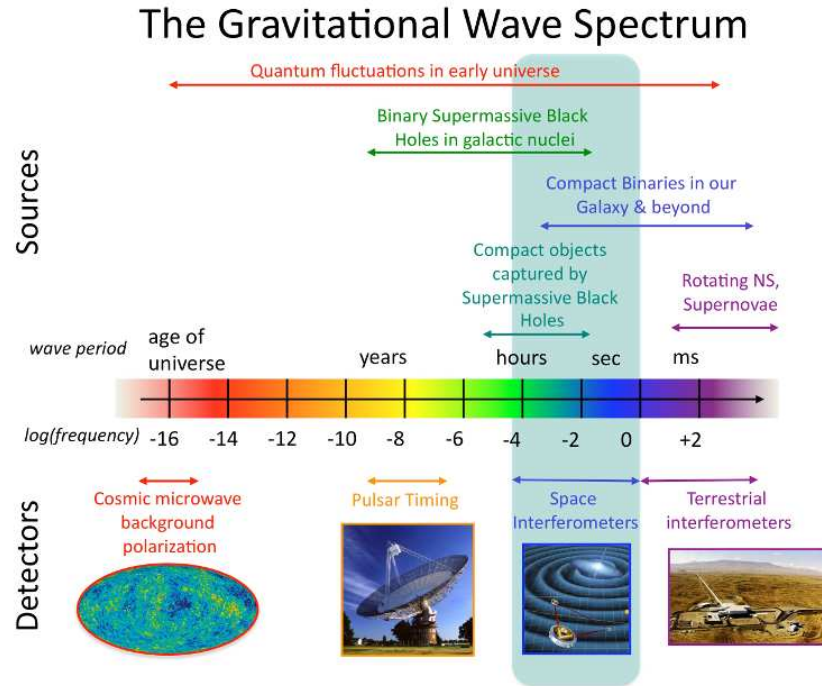


NO



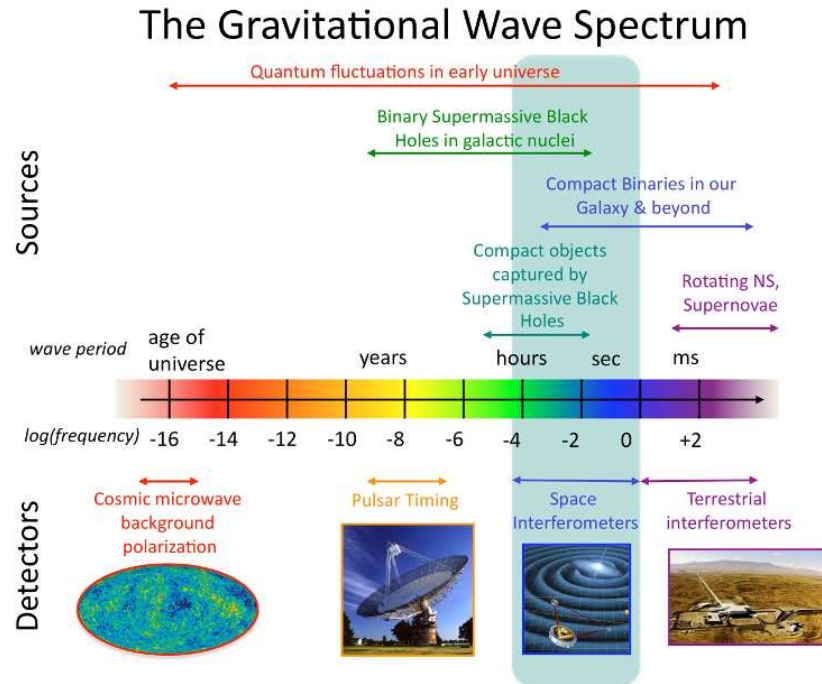
SÍ

- Hay muchas preguntas abiertas...

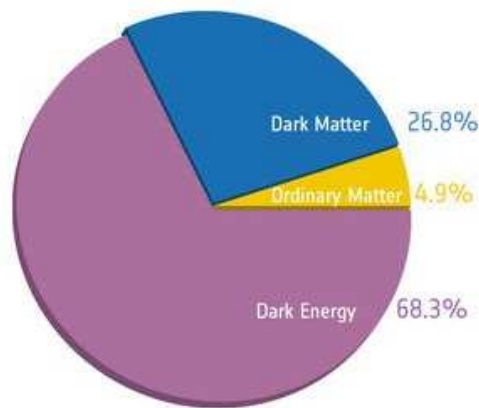


Ondas gravitacionales:  
la nueva ventana al Universo

- Hay muchas preguntas abiertas...

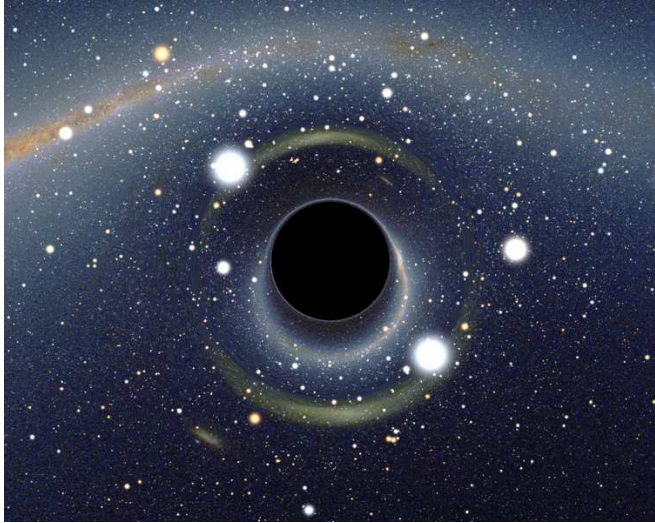


Ondas gravitacionales:  
la nueva ventana al Universo



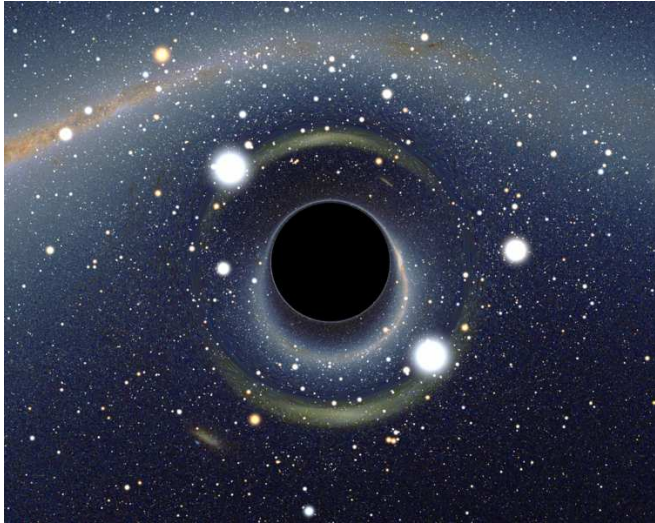
¿Cuál es el contenido del Universo?

- Hay muchas preguntas abiertas...



Agujeros negros: ¿Laboratorio semi-clásico?

- Hay muchas preguntas abiertas...



Agujeros negros: ¿Laboratorio semi-clásico?

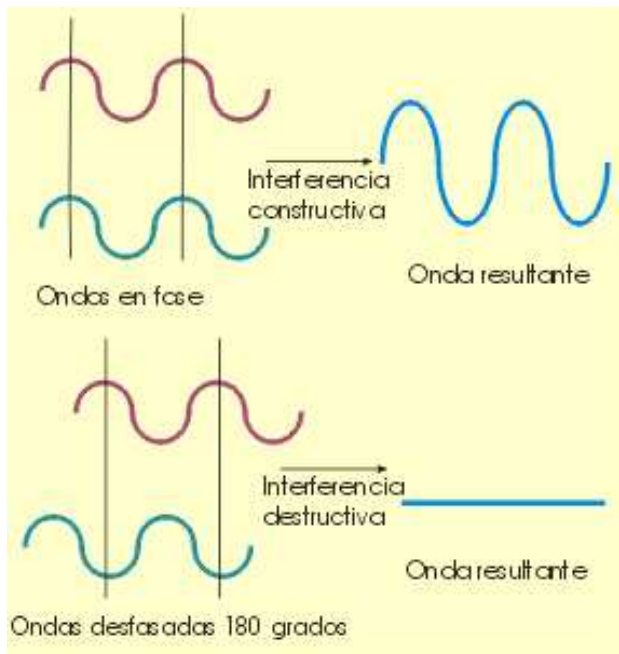
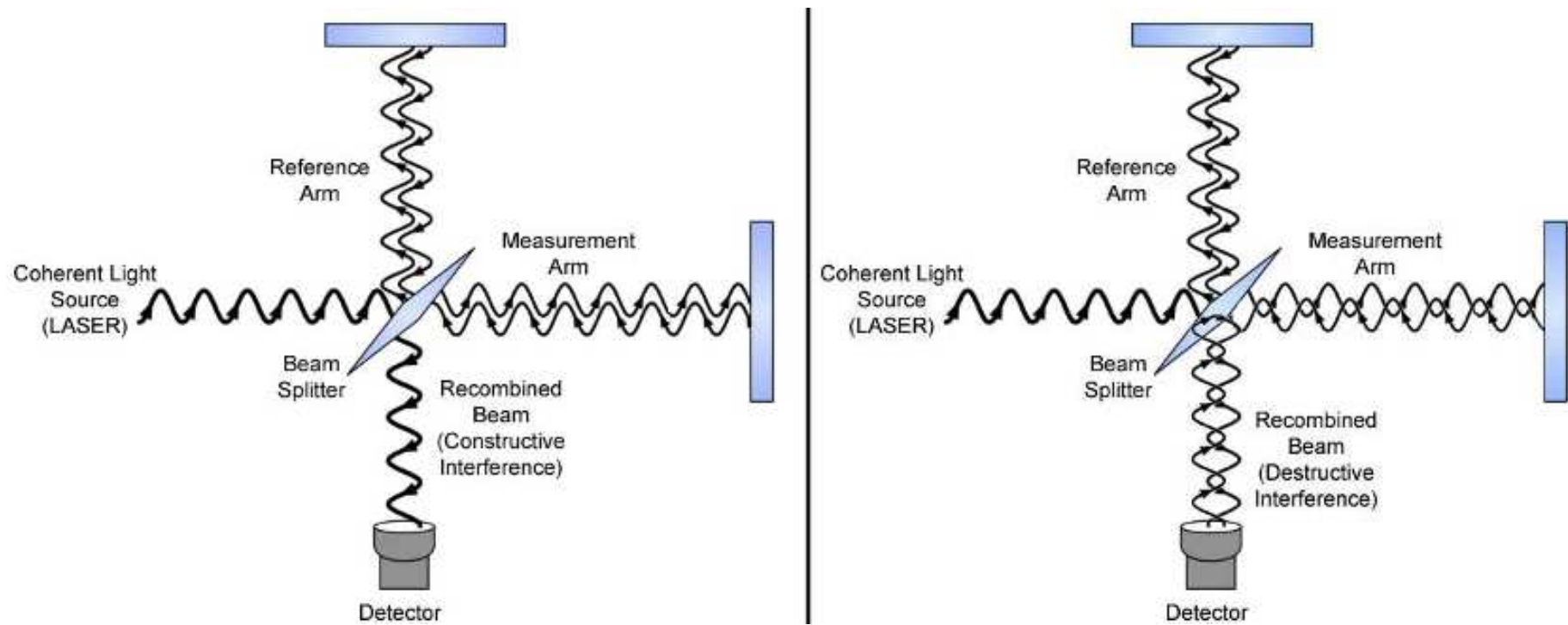


Descripción cuántica de gravedad?



La aventura sigue...

¡Gracias por vuestra atención!



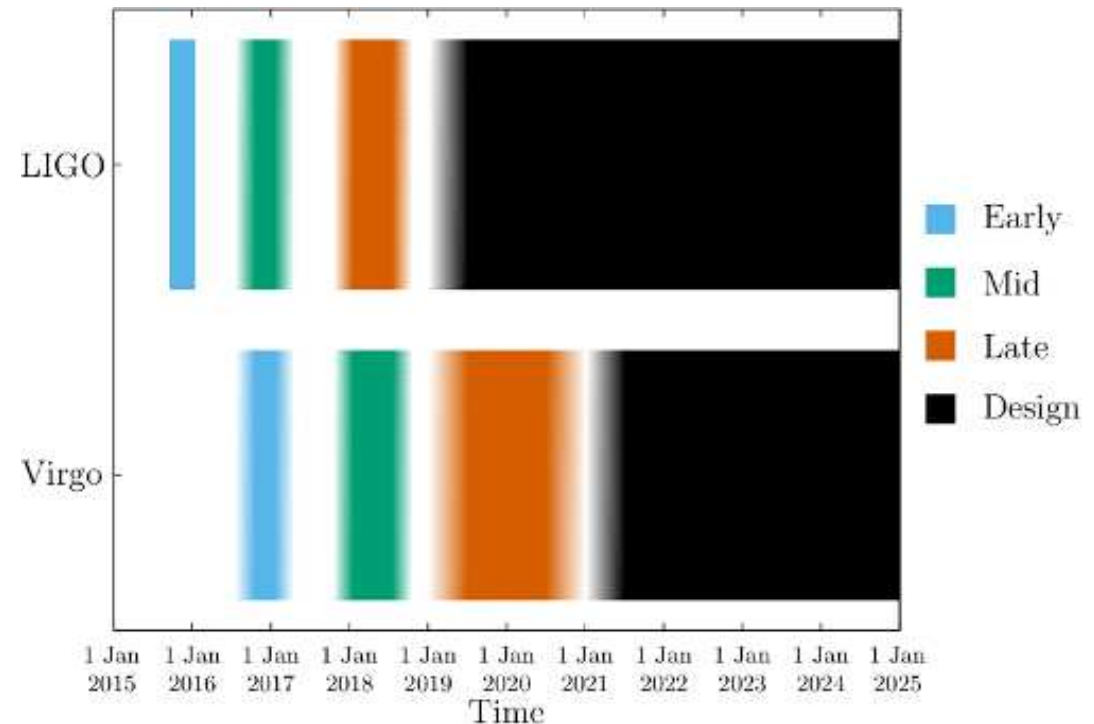
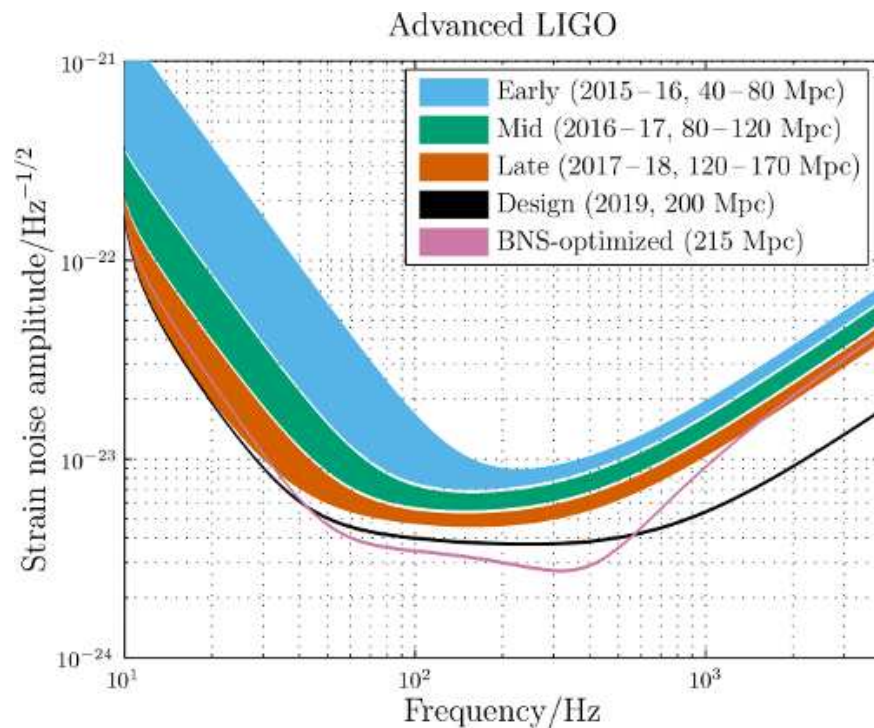
Láser recorre brazos  $\sim 75$  veces  
 Onda gravitacional cambia longitud de brazos  
 $\Rightarrow$  cambia número de longitud de ondas en brazo  
 $\Rightarrow$  cambia la intensidad de la señal medida

Sensibilidad:  $\Delta L/L = 10^{-21}$   
 $\Delta L \sim 10^{-18} m$

NB: radio de carga del protón  $R_p = 0,8 \cdot 10^{-15} m$

# Planes de futuro:

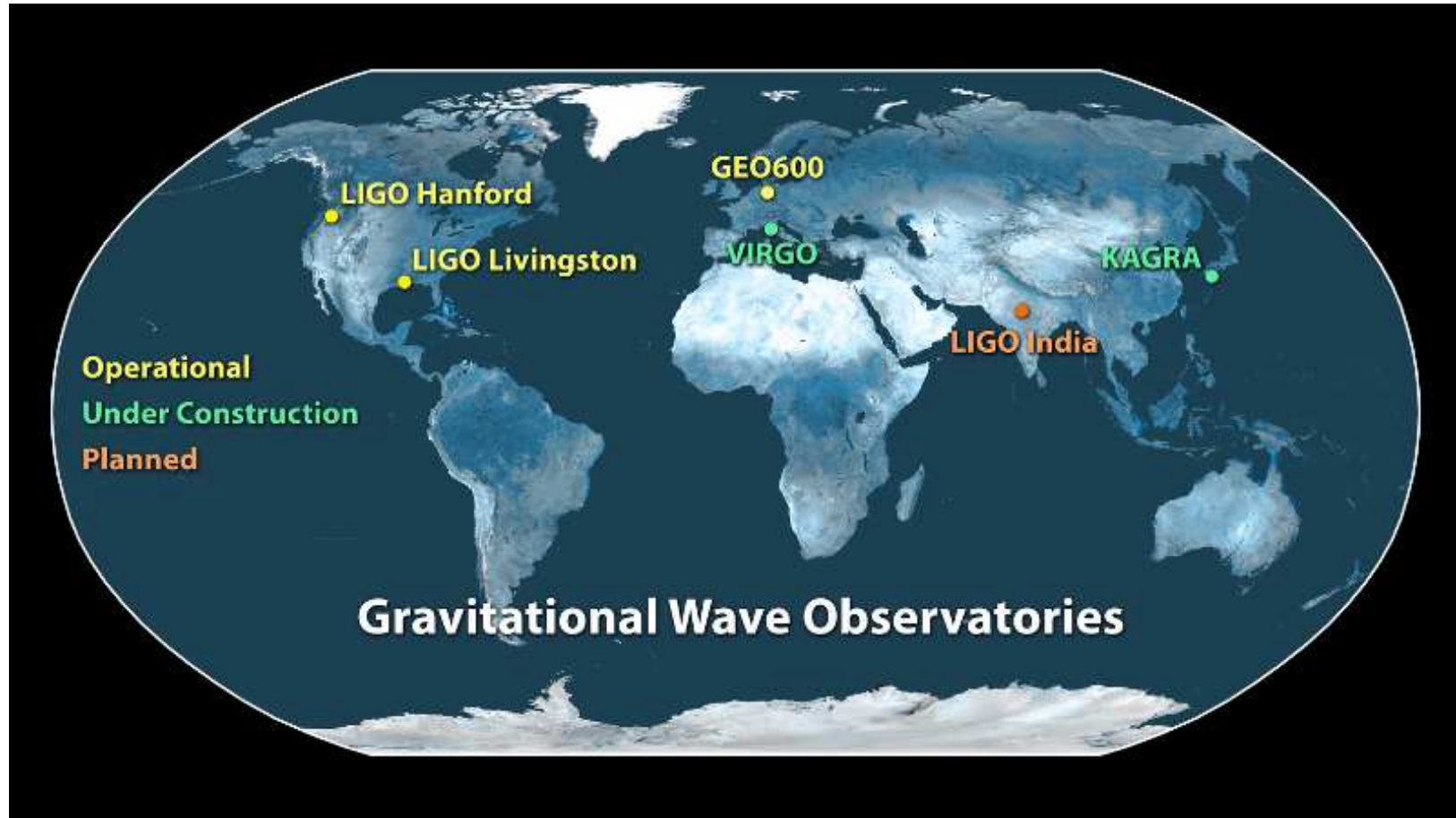
- Aumentar sensibilidad en consecutivas rondas observacionales



- Se esperan entre 3 y 90 fusiones de agujeros negros en esta ronda  
A finales de 2016: estimar frecuencia y distribución de fusiones



- Otros detectores terrestres:



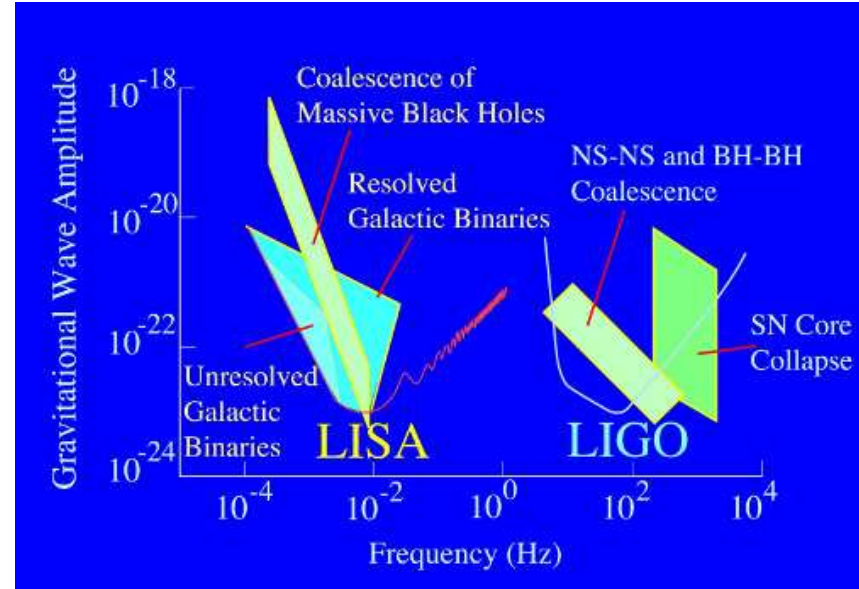
→ Coordinar búsquedas: aumentar la precisión y localización de eventos

**VIRGO:** 2007-2011 y a partir de finales de 2016

**KAGRA:** operacional en 2018?

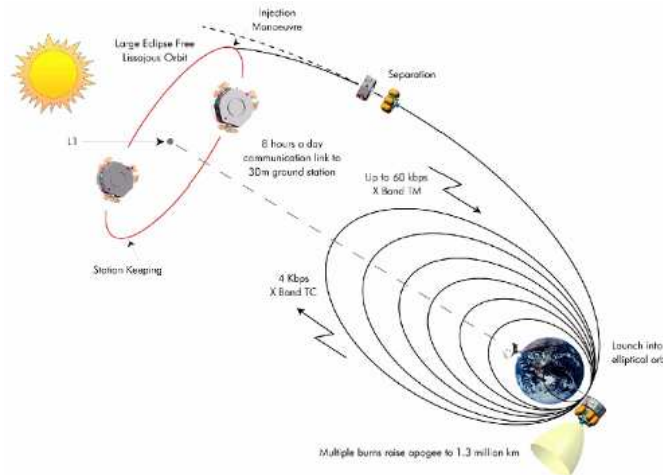
**LIGO India:** acuerdo de principios

- Detectores espaciales: Evolved Laser Interferometer Space Antenna



→ 3 satelites a 1 000 000 000 km en de Sol-Tierra-Luna

→ eLISA Pathfinder (versión prueba) lanzado el 3 dic 2015.



- Relatividad Especial + Mecánica Cuántica  
= Teoría cuántica de campos
  - Describe 3 de las 4 fuerzas fundamentales
  - Modelo estándar, física nuclear, física de plasma,...

- Relatividad Especial + Mecánica Cuántica  
= Teoría cuántica de campos
  - Describe 3 de las 4 fuerzas fundamentales
  - Modelo estándar, física nuclear, física de plasma,...
- Teoría cuántica de campos + Relatividad General  
= Gravedad cuántica
  - Fuerza gravitatoria entre partículas elementales
  - Teoría de cuerdas? Loop Quantum Gravity?
  - Problema teórico, experimentalmente inaccesible

$$E \sim 10^{19} \text{ GeV} \sim 10^{15} \times E_{LHC}$$

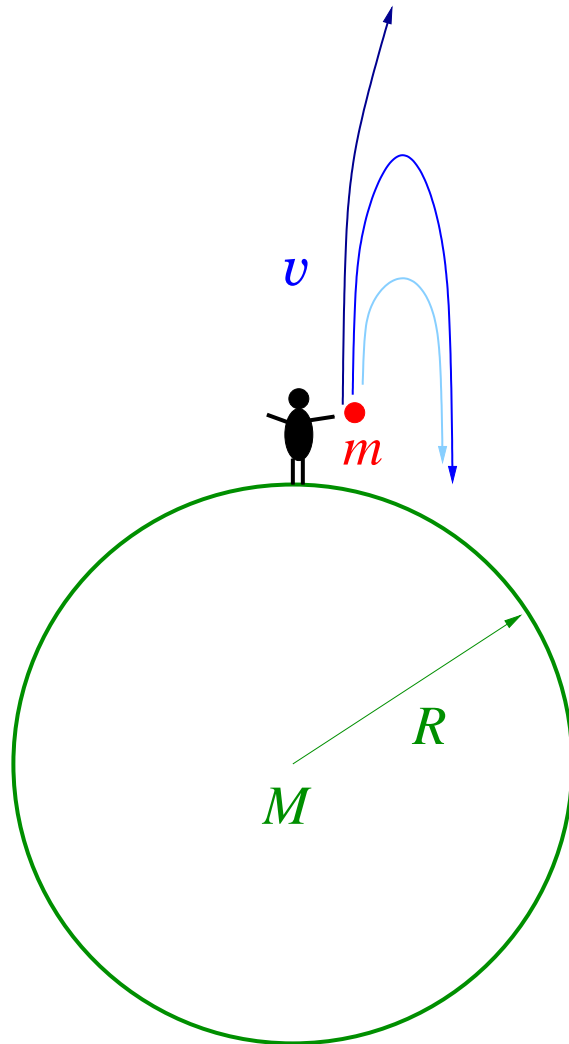
- Relatividad Especial + Mecánica Cuántica  
= Teoría cuántica de campos
  - Describe 3 de las 4 fuerzas fundamentales
  - Modelo estándar, física nuclear, física de plasma,...
- Teoría cuántica de campos + Relatividad General  
= Gravedad cuántica
  - Fuerza gravitatoria entre partículas elementales
  - Teoría de cuerdas? Loop Quantum Gravity?
  - Problema teórico, experimentalmente inaccesible

$$E \sim 10^{19} \text{ GeV} \sim 10^{15} \times E_{LHC}$$

- Santo Grial de la Física: problema fundamental!

# C. Agujeros negros

Objetos con velocidad de escape mayor que la velocidad de la luz



Objeto con masa  $M$  y radio  $R_0$

**Mecánica newtoniana:**

Fuerza gravitatoria en superficie:

$$F = G_N \frac{M m}{R_0^2}$$

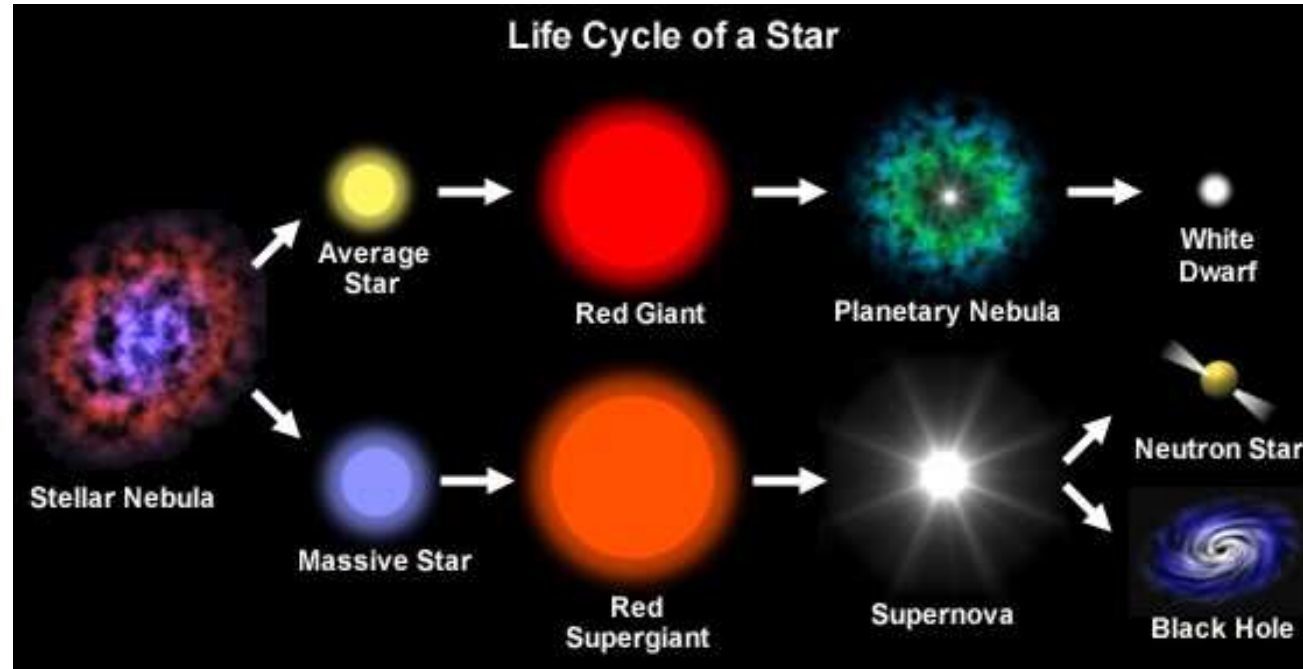
Velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{\frac{2G_N M}{R_0}}$$

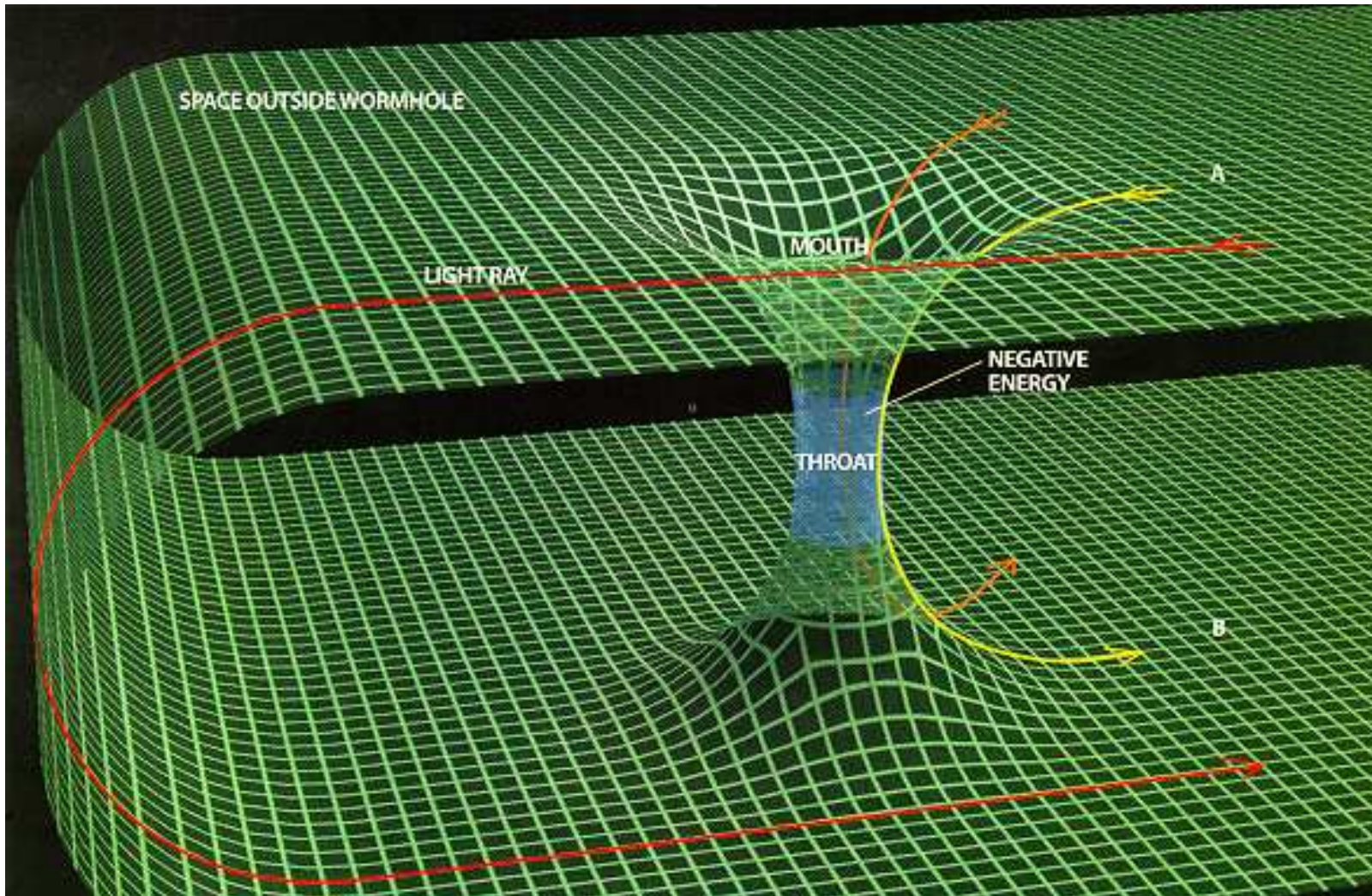
Objeto invisible cuando:

$$v_e \geq c \iff R_0 \leq \frac{2G_N M}{c^2}$$

# Formación de agujeros negros



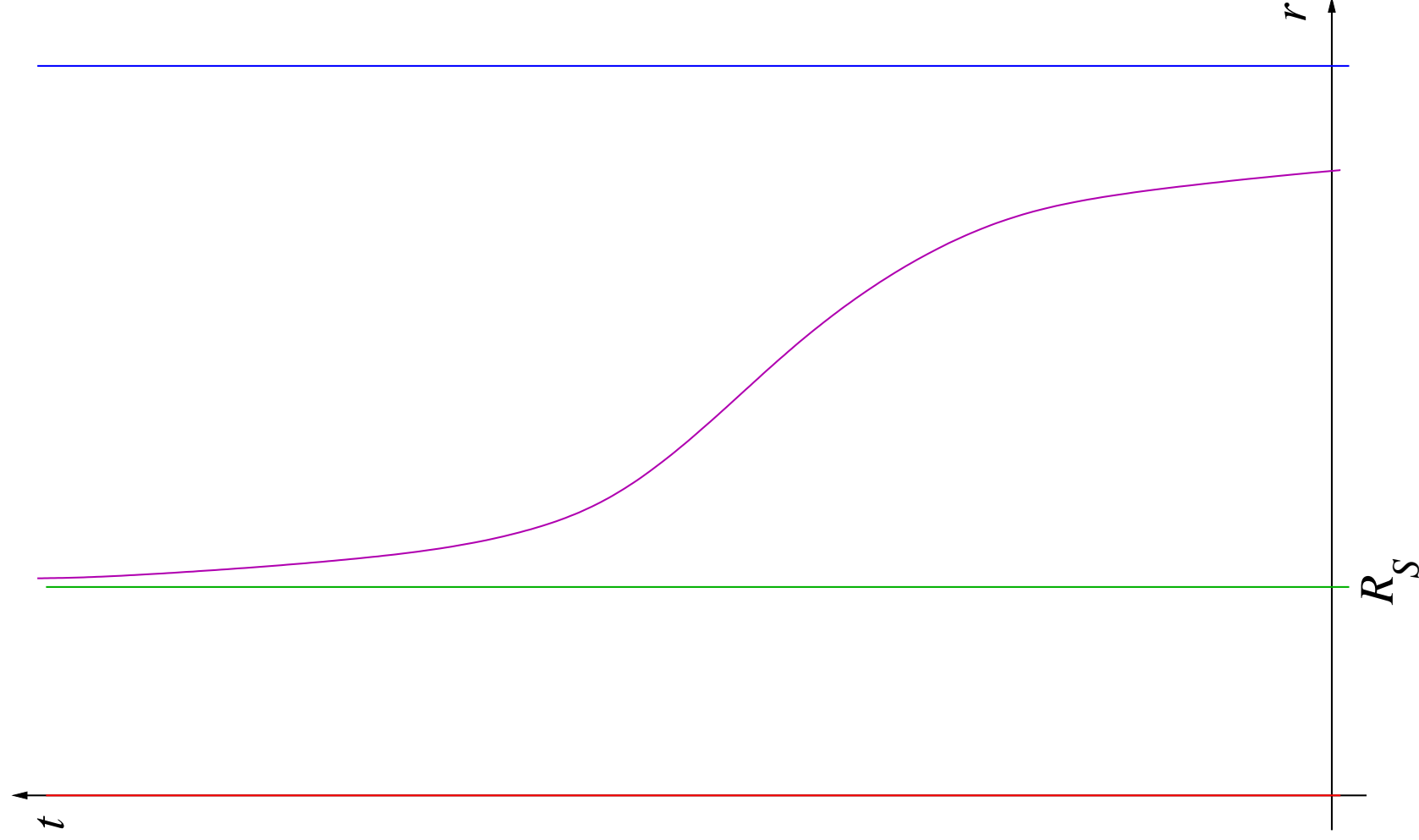
Objeto	Masa	radio
Enano blanco:	$M < 1,4 M_{\odot}$	5000 km
Estrella de neutrones:	$1,4 M_{\odot} < M < 2,3 M_{\odot}$	50 km
Agujero negro:	$M > 2,3 M_{\odot}$	$R_S$





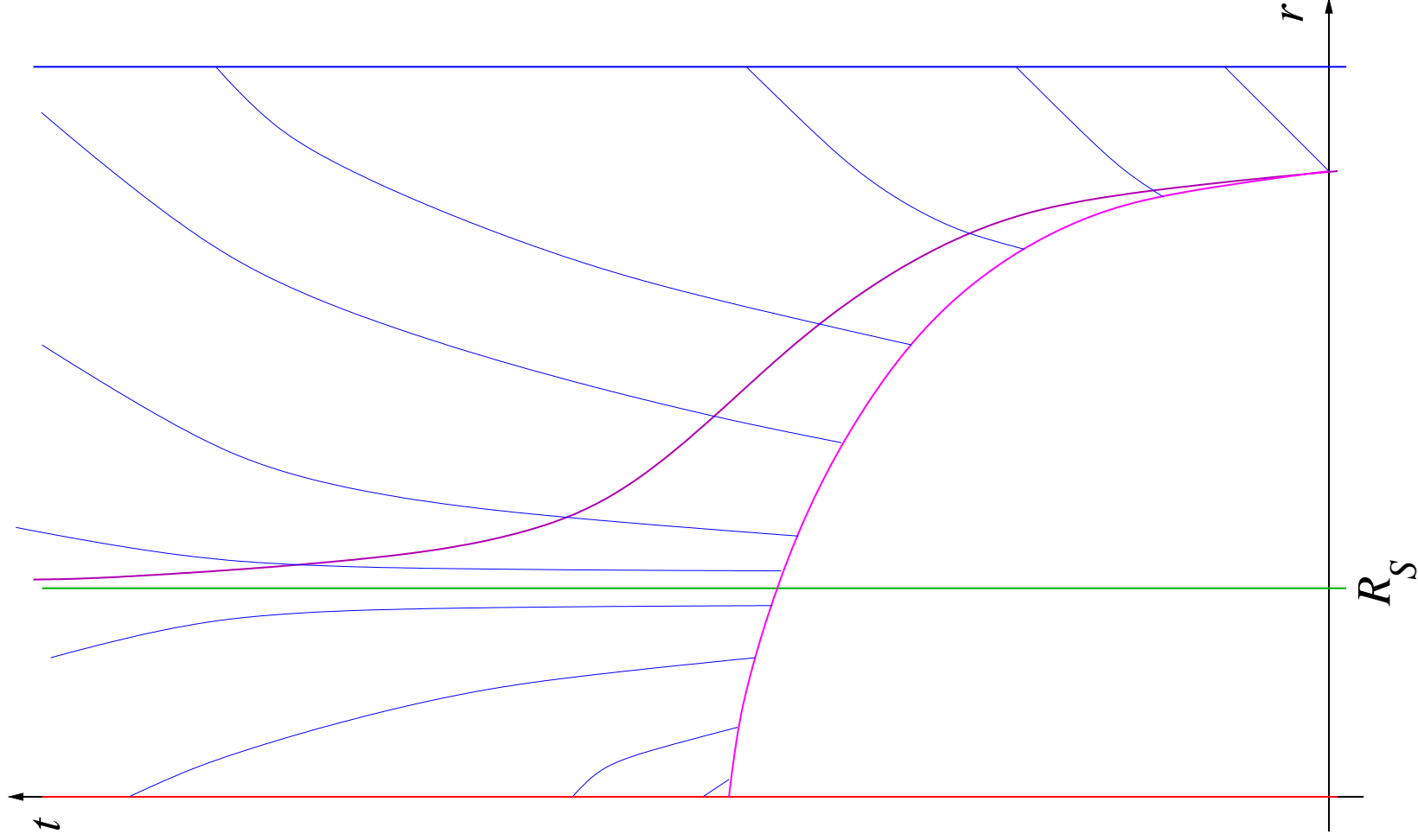
... desde donde se mira:

el observador lejano

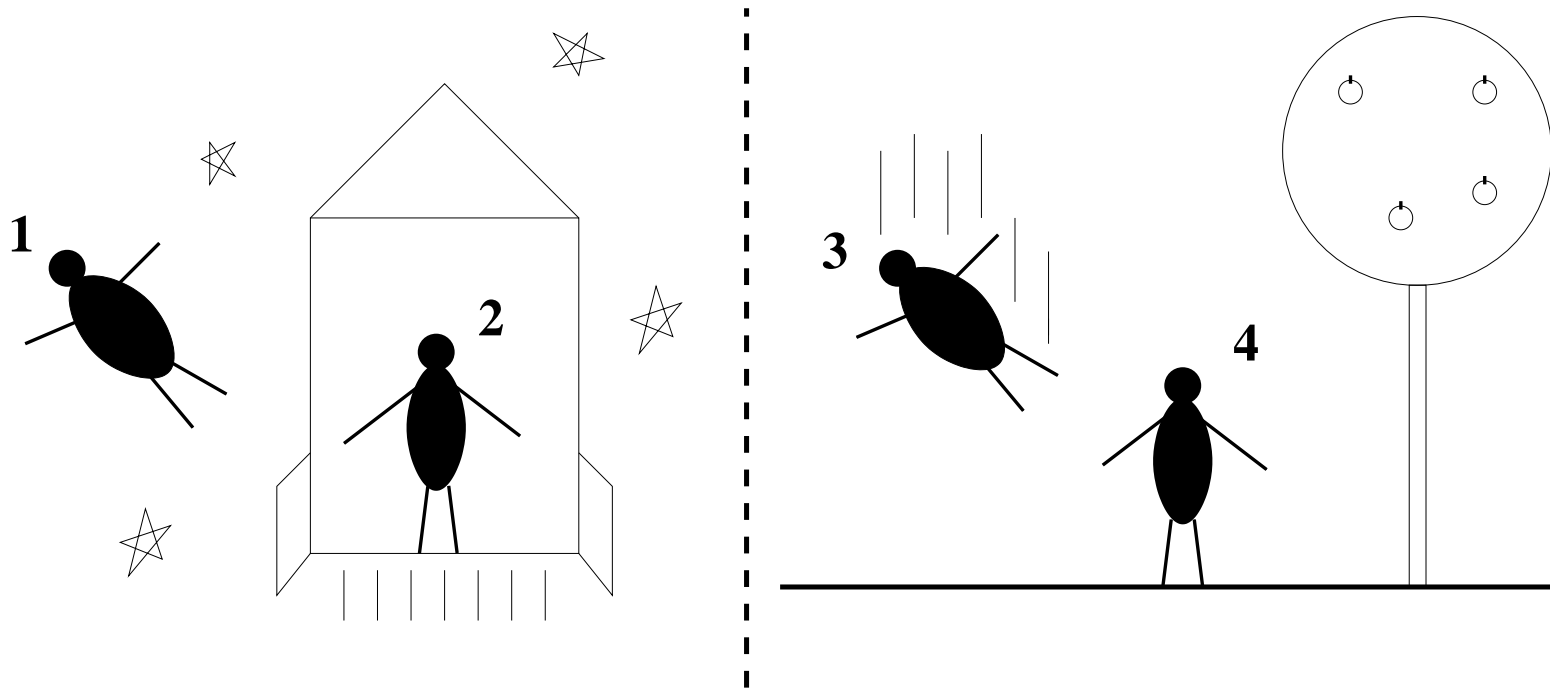


Parece imposible cruzar el horizonte

... desde donde se mira:  
el observador cayendo



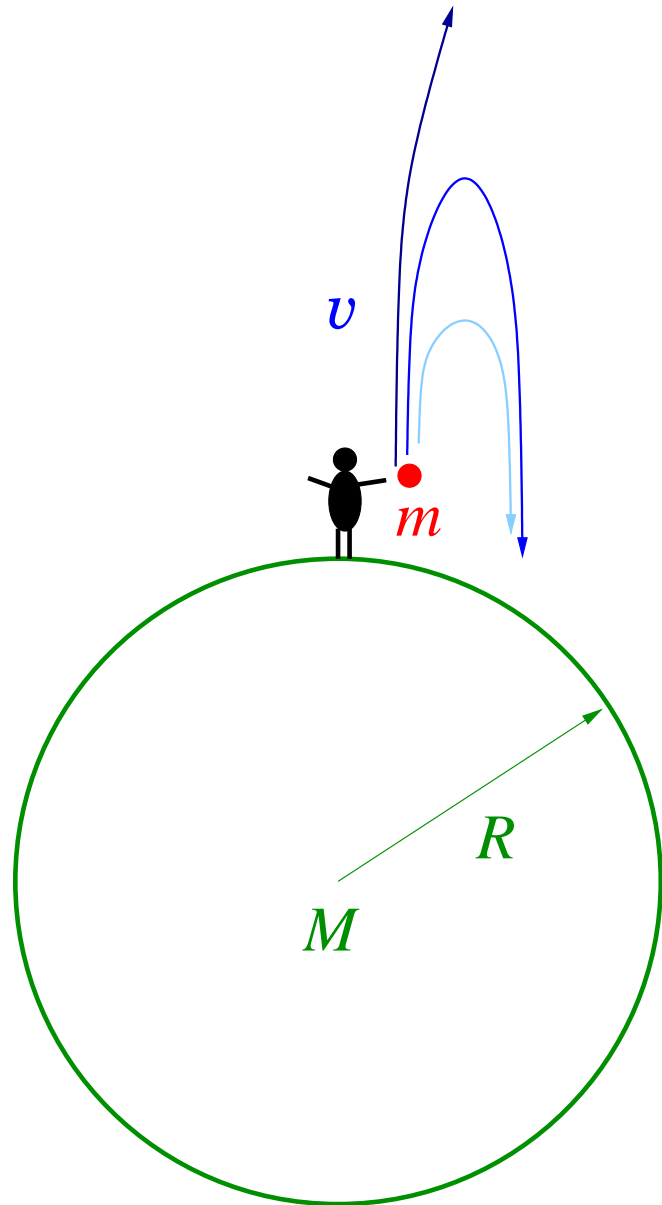
Se llega al horizonte y la singularidad  
en un tiempo finito



	$\mathcal{O}_1$	$\mathcal{O}_2$	$\mathcal{O}_3$	$\mathcal{O}_4$
Peso	No	Sí	No	Sí
Curvatura	No	No	Sí	Sí
Métrica	$\eta_{\mu\nu}$	$g_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial y^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial y^\beta} \eta_{\mu\nu}$	$\eta_{\alpha\beta} + \mathcal{O}(x^2)$	$g_{\mu\nu}$
$\Gamma_{\mu\nu}^\rho$	$= 0$	$\neq 0$	$= 0 + \mathcal{O}(x)$	$\neq 0$
$R_{\mu\nu\rho}{}^\lambda$	$= 0$	$= 0$	$\neq 0$	$\neq 0$

# C. Agujeros negros

Objetos con velocidad de escape mayor que la velocidad de la luz



Velocidad de escape = velocidad necesario para una masa  $m$  no vuelva a caer en la Tierra

$$v_e = \sqrt{\frac{2G_N M}{R}}$$

Tierra:  $v_e = 11,1 \text{ km/s} = 39\,960 \text{ km/h}$

Luna:  $v_e = 2,38 \text{ km/s} = 8\,568 \text{ km/h}$

Sol:  $v_e = 600 \text{ km/s} = 2\,160\,000 \text{ km/h}$

...

$v_e$  es independiente de la masa  $m$  del objeto

$v_e$  aumenta si aumenta la masa  $M$  del planeta

$v_e$  aumenta si disminuye el radio  $R$  del planeta

$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$



**Pierre Simon Laplace (1795):**

*“Una estrella [del mismo material] que la Tierra y [...] 250 veces el tamaño del Sol, no emitiría por su propia gravedad nada de luz hacia nosotros. De esta manera sería posible que los objetos más masivos fueran completamente invisibles.”*

→ Estrella negra!!!

$$v_e \equiv \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} = c \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{2G_N M}{c^2}$$



**Pierre Simon Laplace (1795):**

*“Una estrella [del mismo material] que la Tierra y [...] 250 veces el tamaño del Sol, no emitiría por su propia gravedad nada de luz hacia nosotros. De esta manera sería posible que los objetos más masivos fueran completamente invisibles.”*

→ Estrella negra!!!



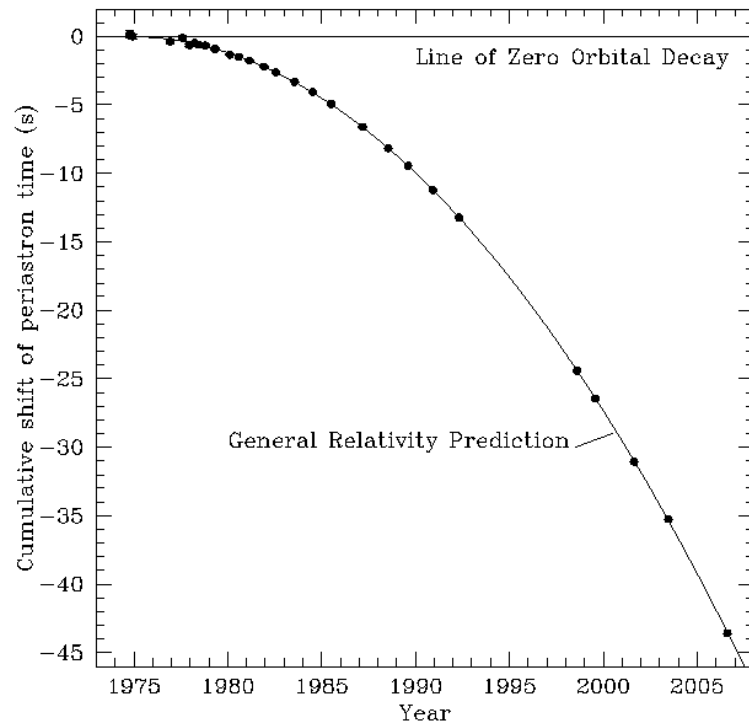
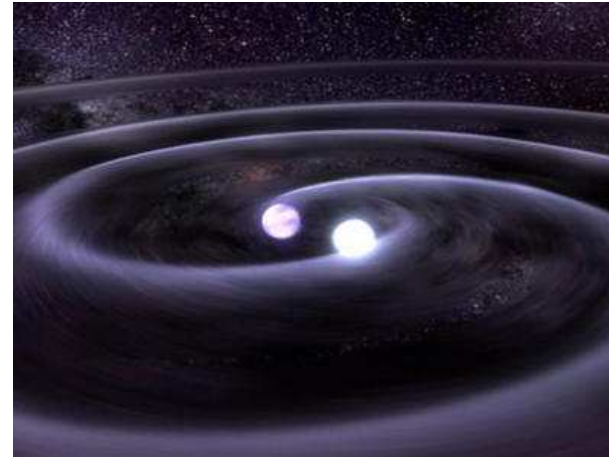
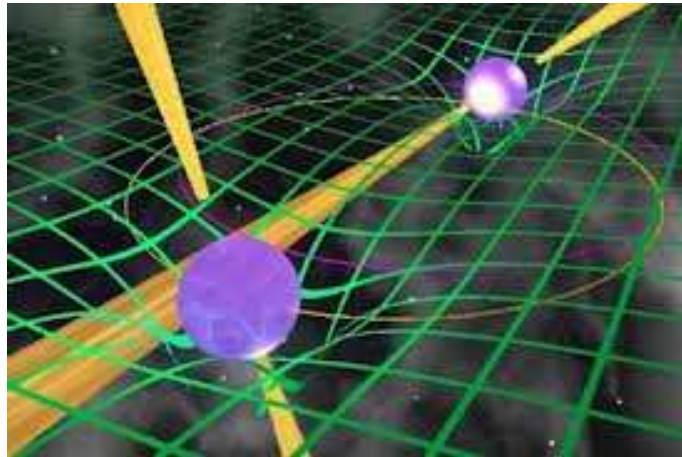
**Albert Einstein (1905):**

*Nada puede moverse más rápido que la luz*

→ Agujero negro: Imposible escapar!

# Púlsar binario PSR B1913+16 de Taylor y Hulse

## Prueba indirecta de la existencia de ondas gravitacionales



$$M_1 \approx M_2 \approx 1,4M_{\odot}$$

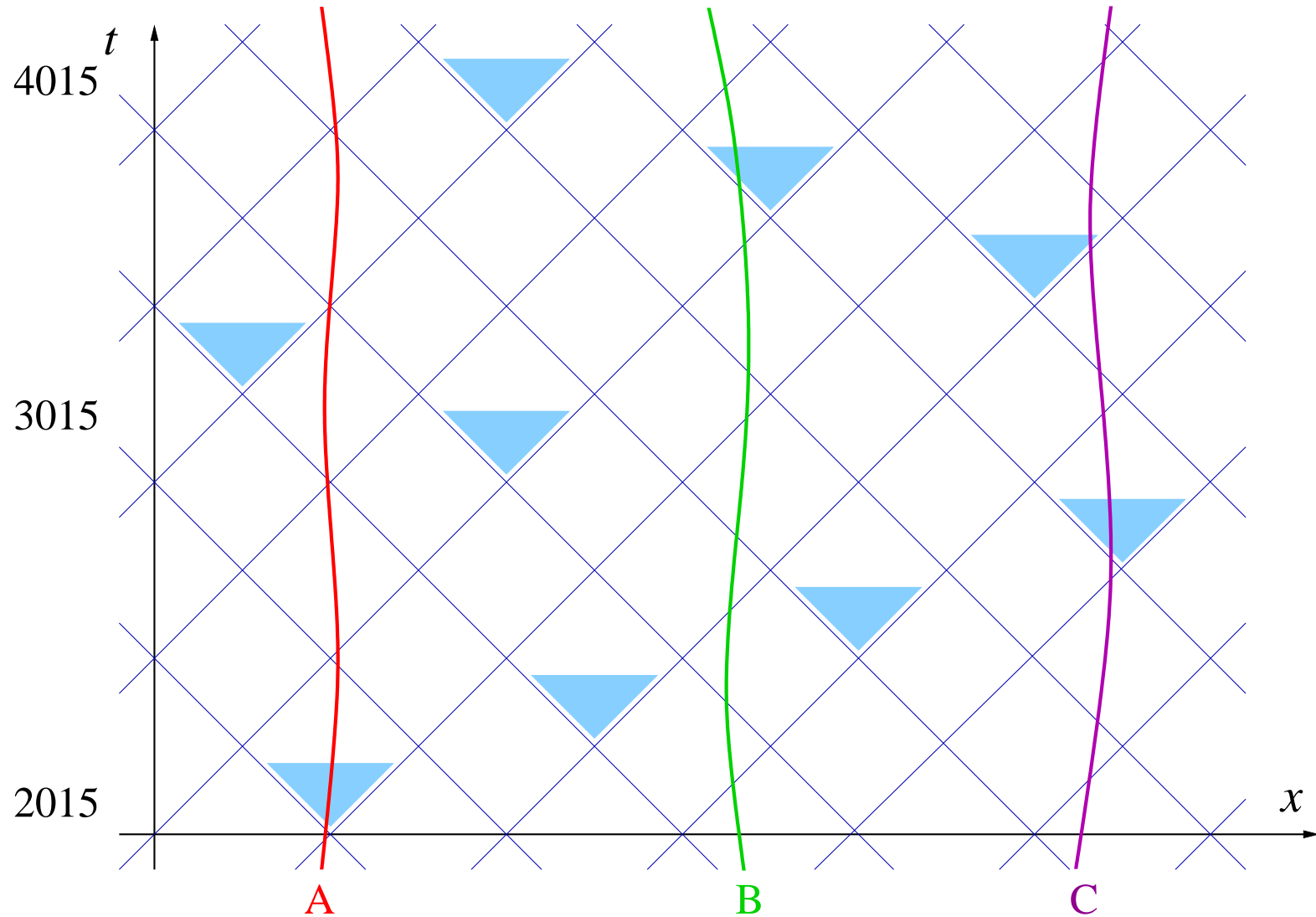
$$1,1R_{\odot} < L < 4,8R_{\odot} \quad \Delta L = 3,5 \text{ m/y}$$

$$T = 7,75 \text{ h} \quad \Delta T = -76,5 \mu\text{s/y}$$

$$P_{\text{rad}} = 7,35 \cdot 10^{24} \text{ W} = 1,9\% P_{\odot}$$

$$\Delta L_{\text{obs}}/\Delta L_{\text{theor}} = 0,997 \pm 0,002$$

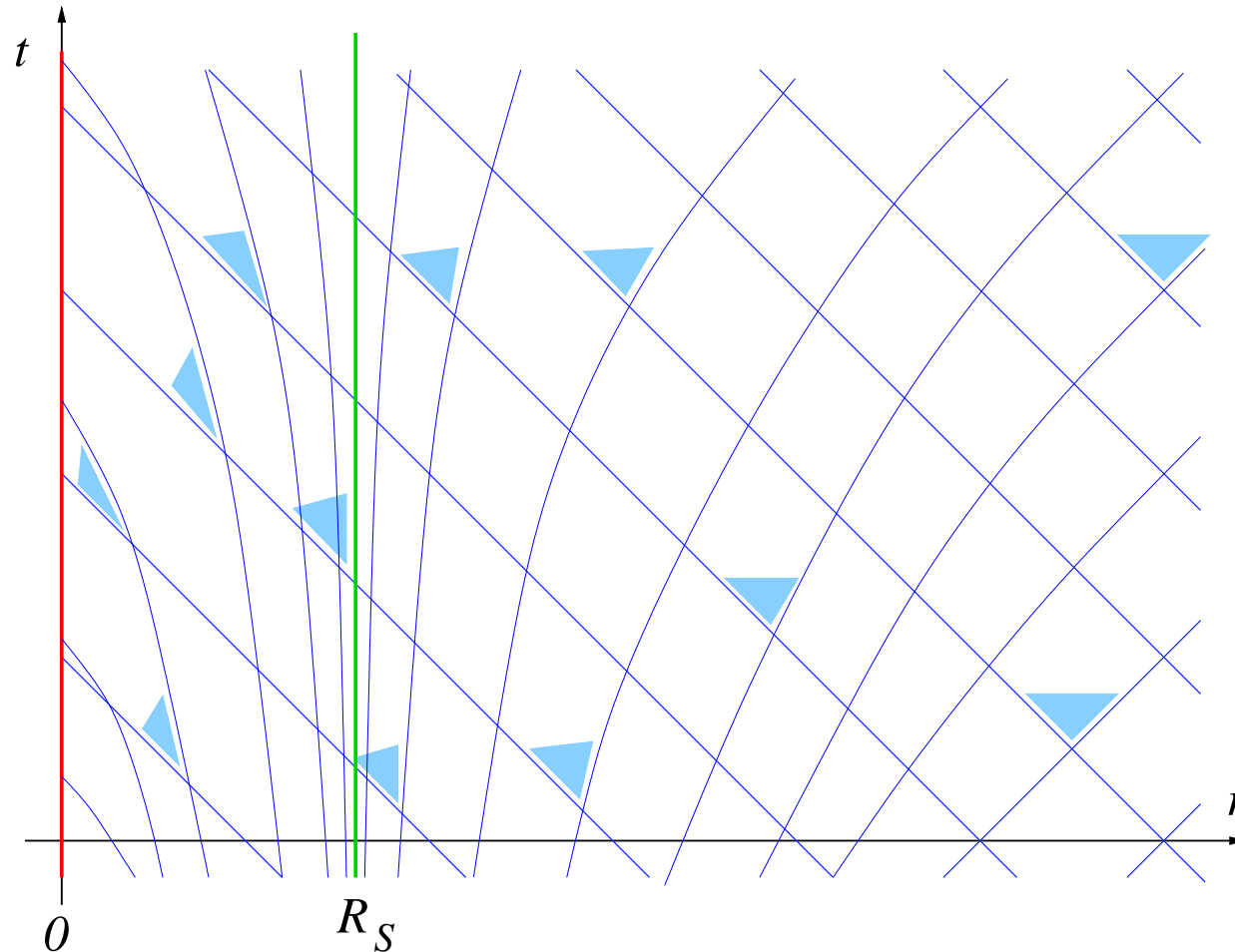
# Espacio plano: La luz sigue líneas rectas



→ influencias causales alcanzan el espacio entero (tarde o temprano)



## Cerca de objetos masivos: La luz le cuesta escapar



**Objetos muy masivos:** se forma un **radio crítico** = Radio de Schwarzschild

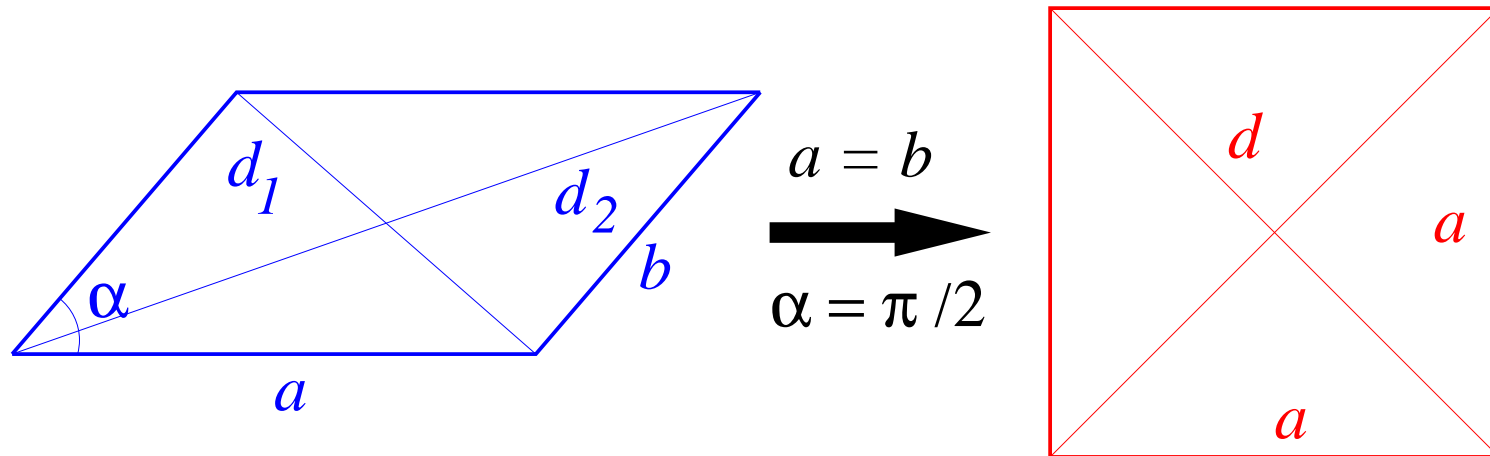
—> la luz se **queda atrapada** dentro del radio de Schwarzschild

—> Se forma un **horizonte**: no salen señales desde el interior

—> Se forma un **agujero negro**

# Relatividad General es más complicada que **Relatividad Especial**

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



$$C = 2(a + b)$$

→

$$C = 4a$$

$$A = ab \sin \alpha$$

→

$$A = a^2$$

$$d_1 = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha}$$

→

$$d = \sqrt{2} a$$

$$d_2 = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \alpha}$$

**Relatividad Especial:** caso especial donde la **velocidad es constante**

**Relatividad General:** movimiento general  $\implies$  **más complicado**