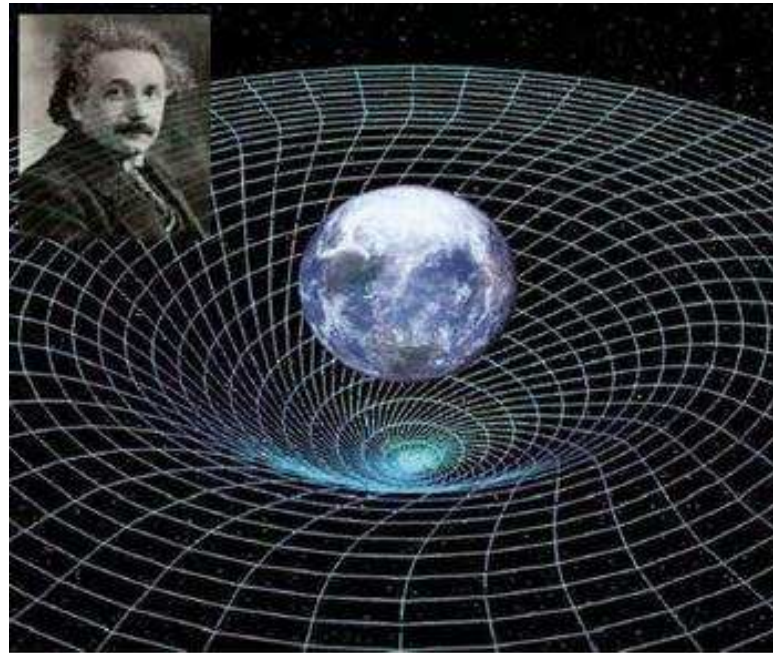




Las ideas físicas de la Relatividad General

100 años de Relatividad General



Bert Janssen

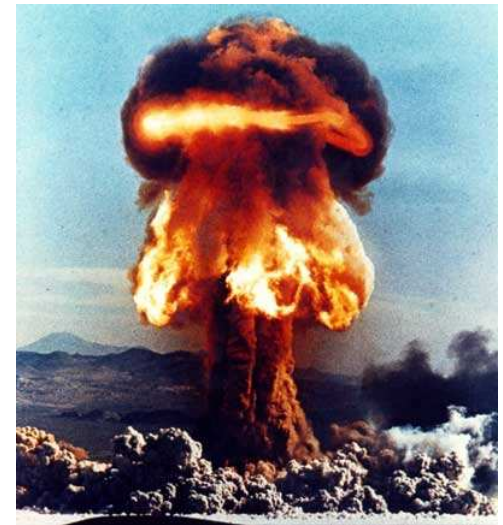
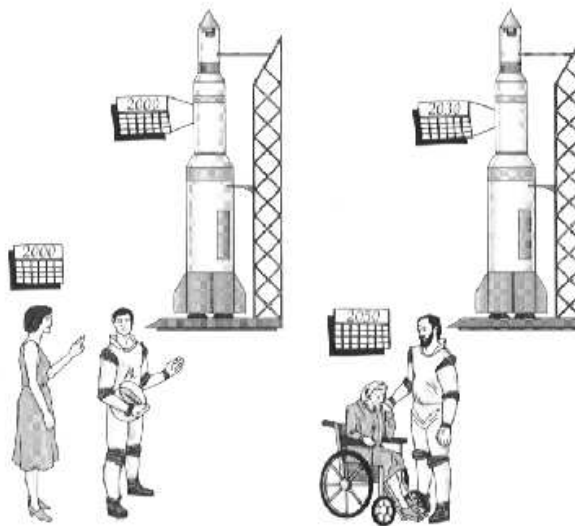
Dpto. de Física Teórica y del Cosmos - UGR

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”



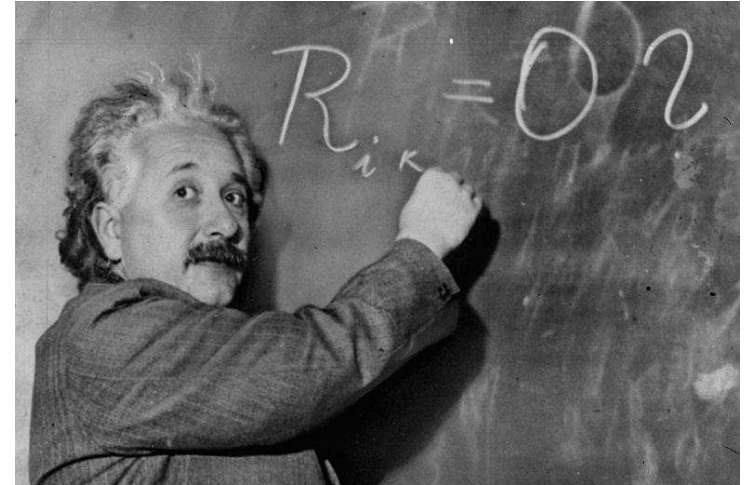
(1687)

+



(1905)

→



(1915)

2. La Relatividad General (Einstein, 1915)

= teoría moderna de la gravedad

= “gravedad newtoniana + relatividad especial”



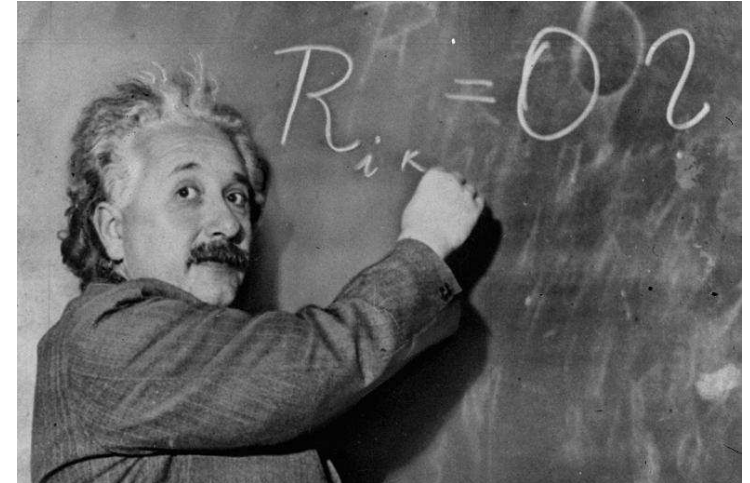
(1687)

+



(1905)

→



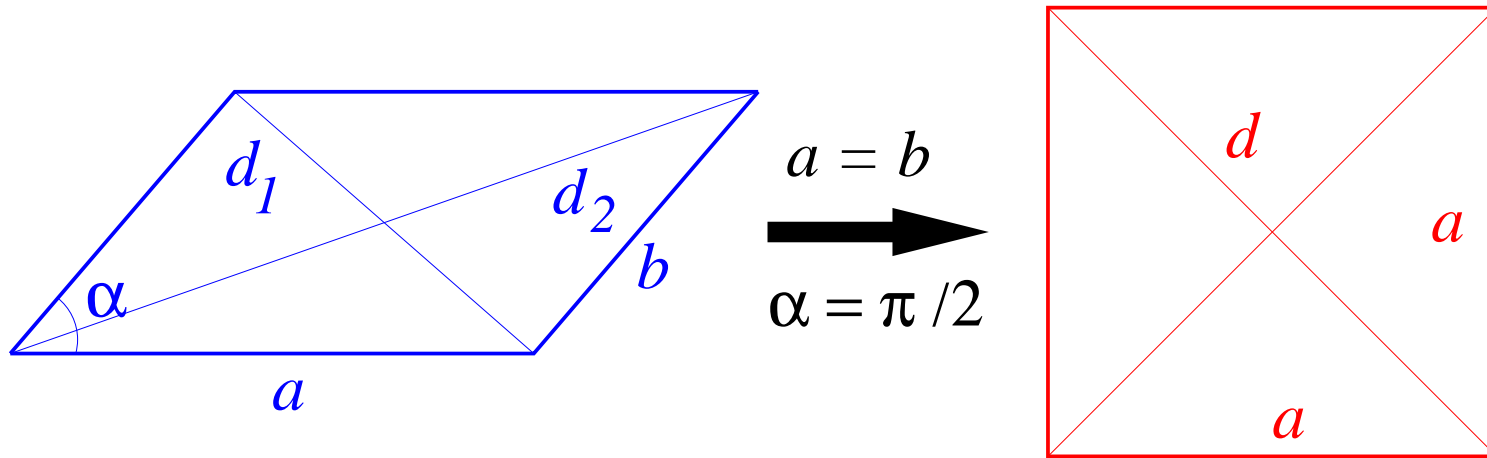
(1915)

- Espaciotiempo curvo
- Agujeros negros
- Cosmología

→ Sí es el tema de hoy...

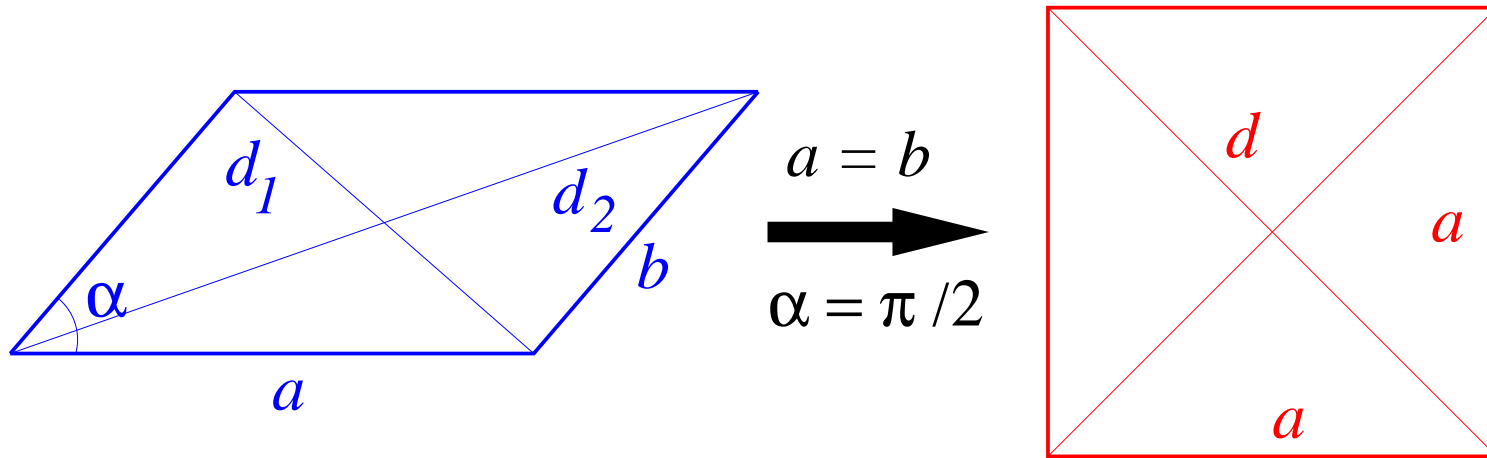
Relatividad General es más complicada que **Relatividad Especial**

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



Relatividad General es más complicada que Relatividad Especial

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



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

→

$$C = 4a$$

$$A = ab \sin \alpha$$

→

$$A = a^2$$

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

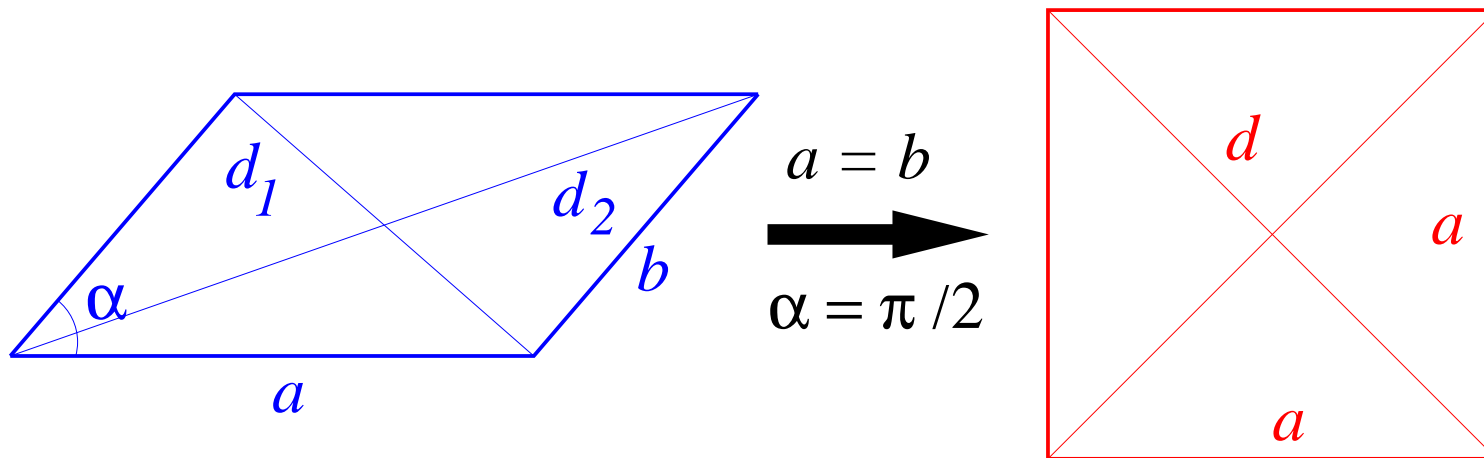
→

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

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

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

Cfr: Cuadrado como caso especial de un paralelogramo



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

→

$$C = 4a$$

$$A = ab \sin \alpha$$

→

$$A = a^2$$

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

→

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

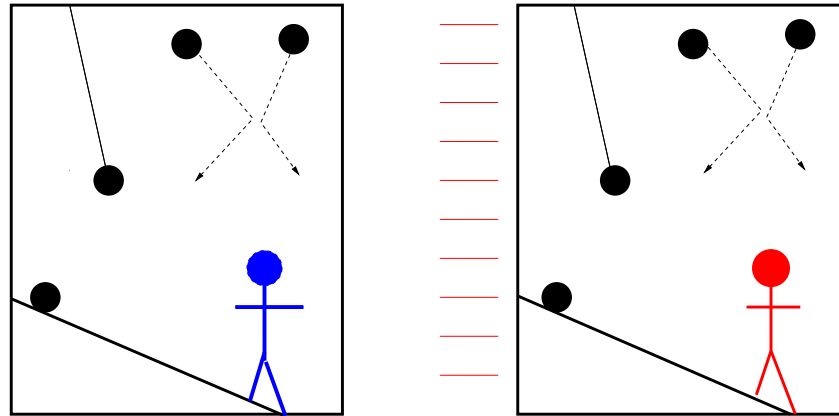
$$d_2 = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \alpha}$$

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

Relatividad General = movimiento general \implies **más complicado**

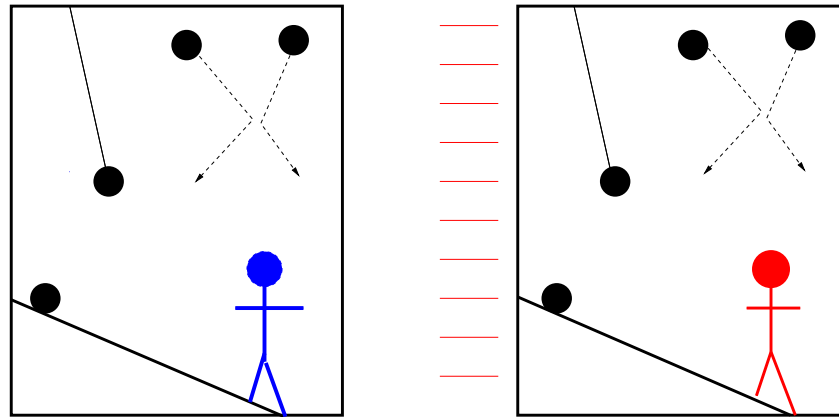
Plan de la conferencia

1. Breve repaso de Relatividad Especial



Plan de la conferencia

1. Breve repaso de Relatividad Especial

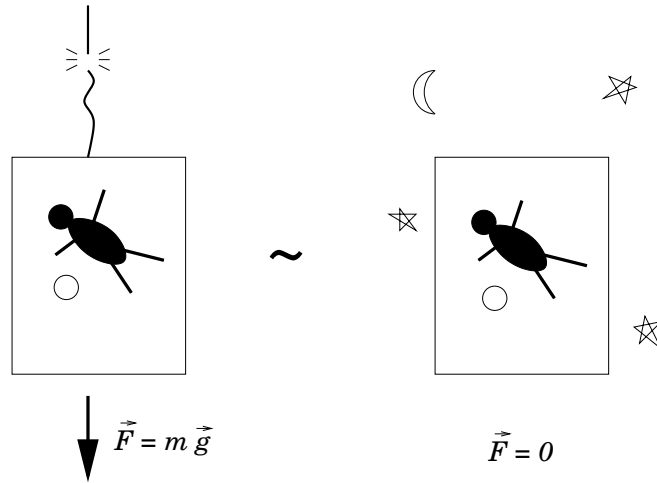


2. La gravedad

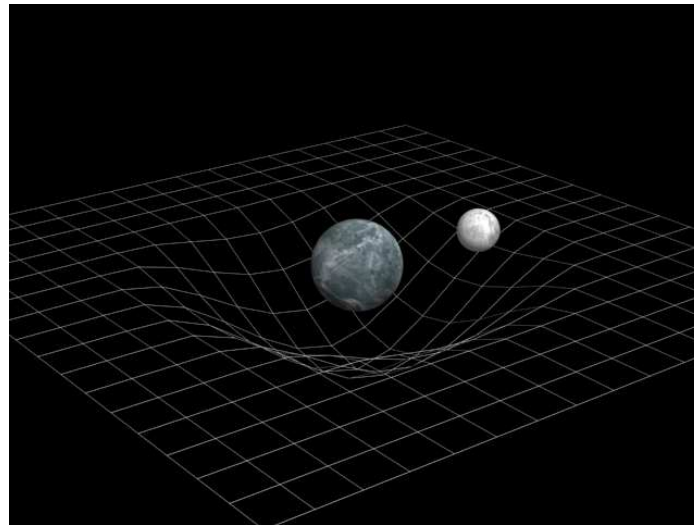


—→ **Conflicto!**

3. El Principio de Equivalencia



4. Relatividad General



5. Consecuencias y aplicaciones

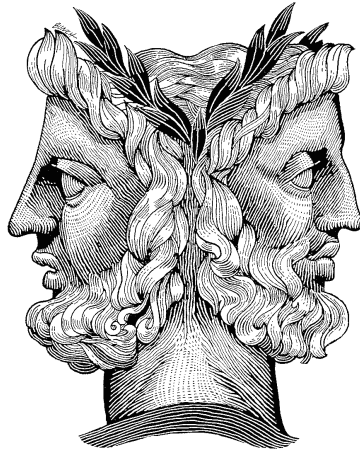


6. Resumen y preguntas abiertas



1. Repaso de Relatividad Especial

- Izquierda y derecha, delante y detras, arriba y abajo son **conceptos relativos**



1. Repaso de Relatividad Especial

- Izquierda y derecha, delante y detras, arriba y abajo son **conceptos relativos**



- Reposo y movimiento uniforme rectilíneo **también lo son**



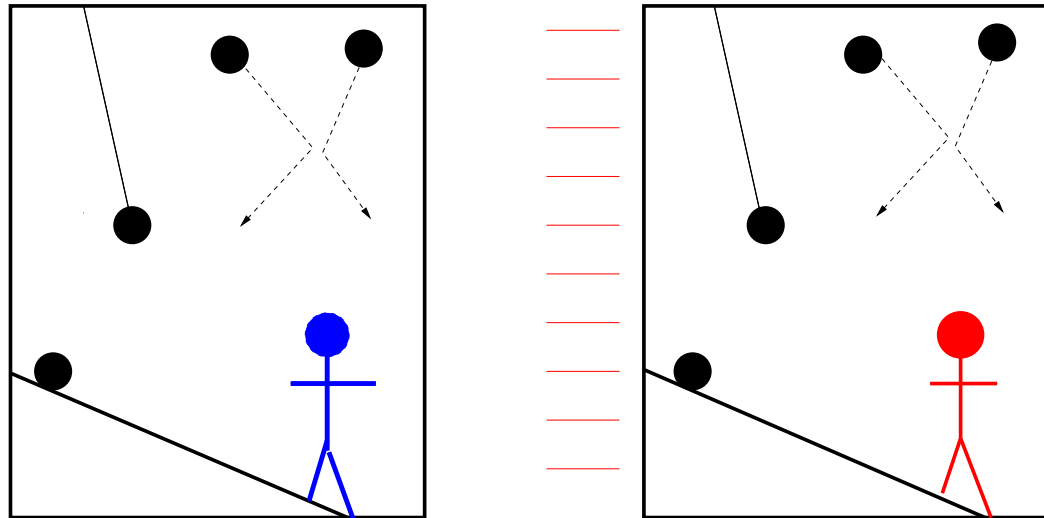
?
←



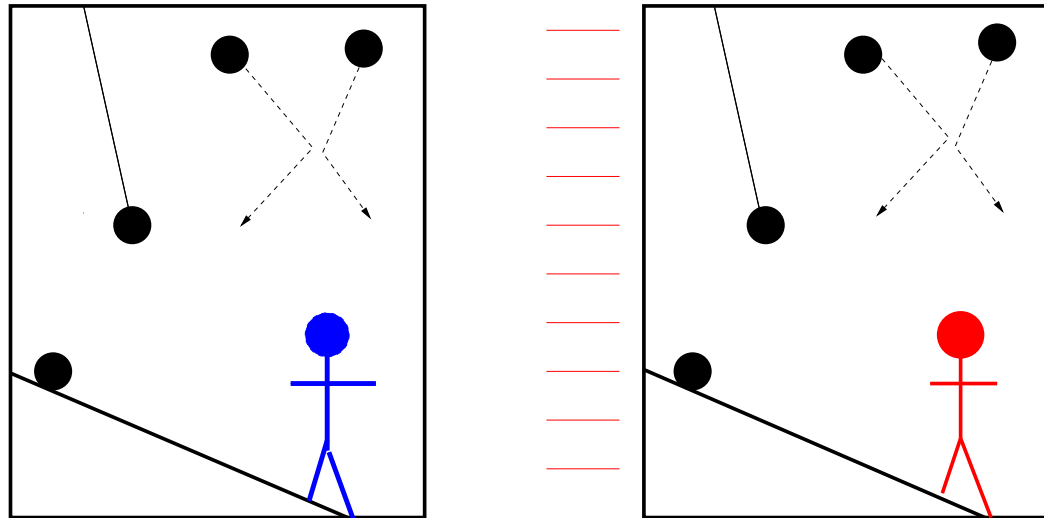
?
→



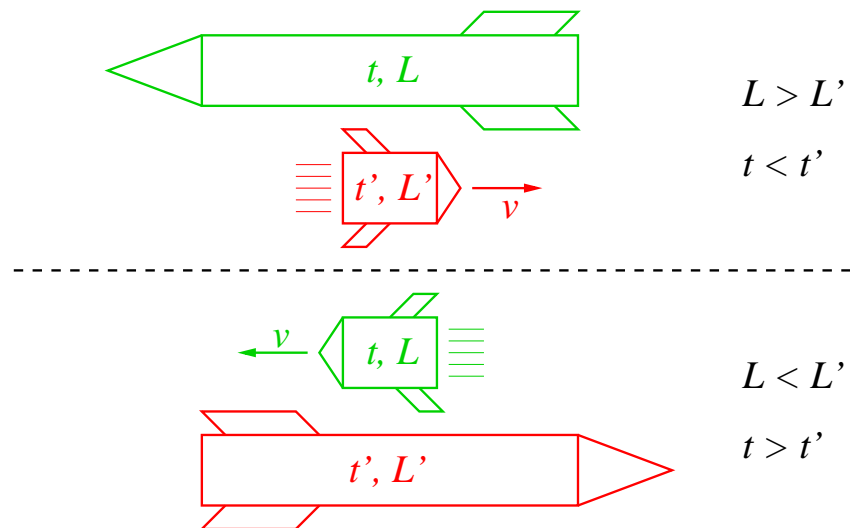
- **La física es la misma** en reposo y en movimiento uniforme rectilíneo



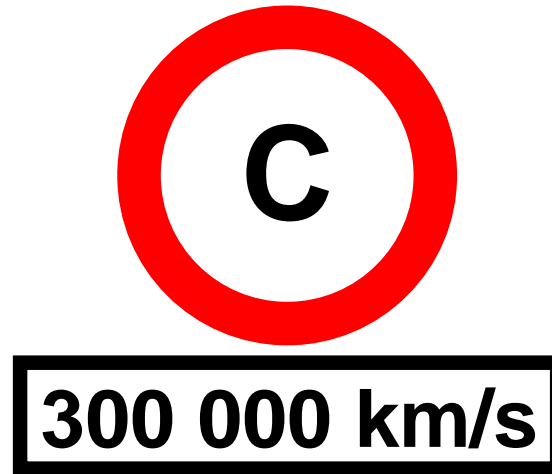
- La física es la misma en reposo y en movimiento uniforme rectilíneo



- El tiempo y las longitudes también se vuelven relativos



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

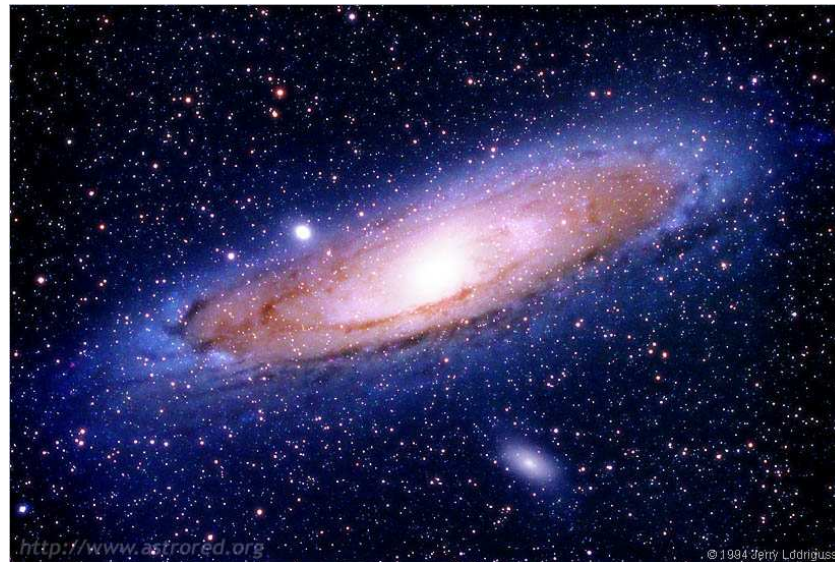


- Velocidad de la luz es la *velocidad máxima permitida*

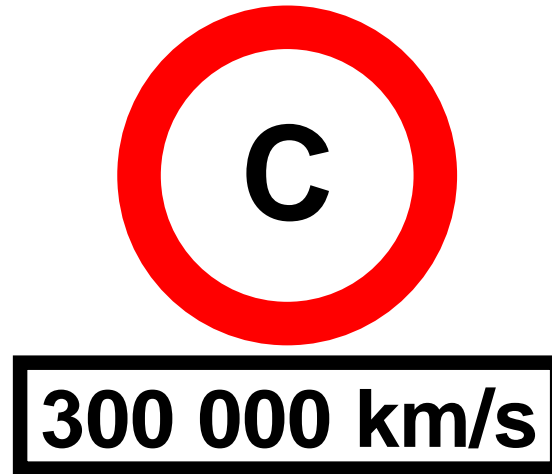


300 000 km/s

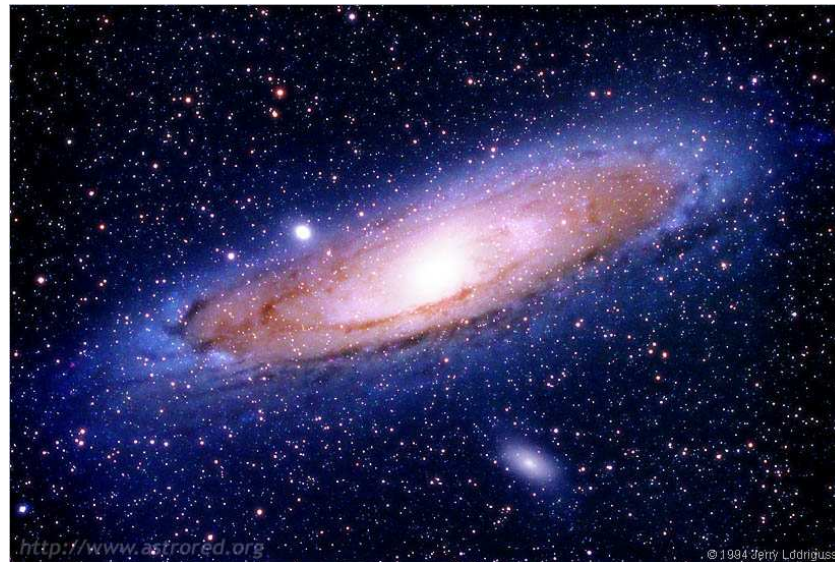
—→ Luz de lejos ha tardado mucho en llegar...



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



—→ 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...



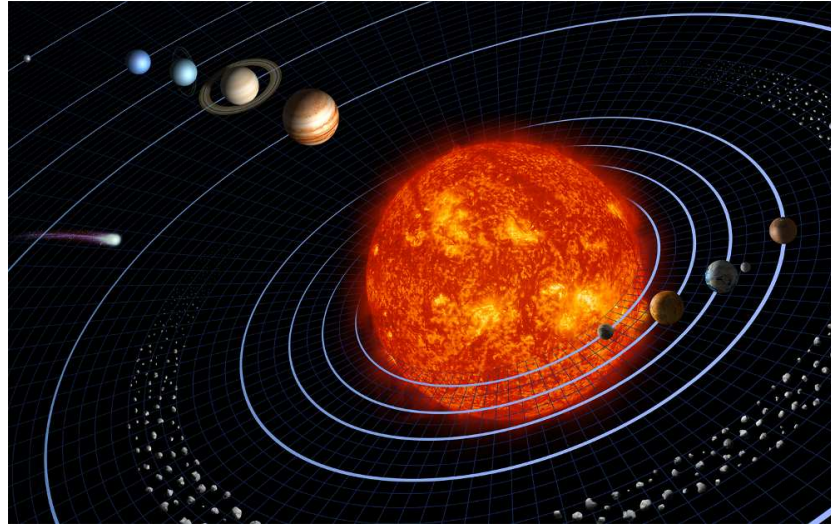
Hace que las cosas tengan peso...



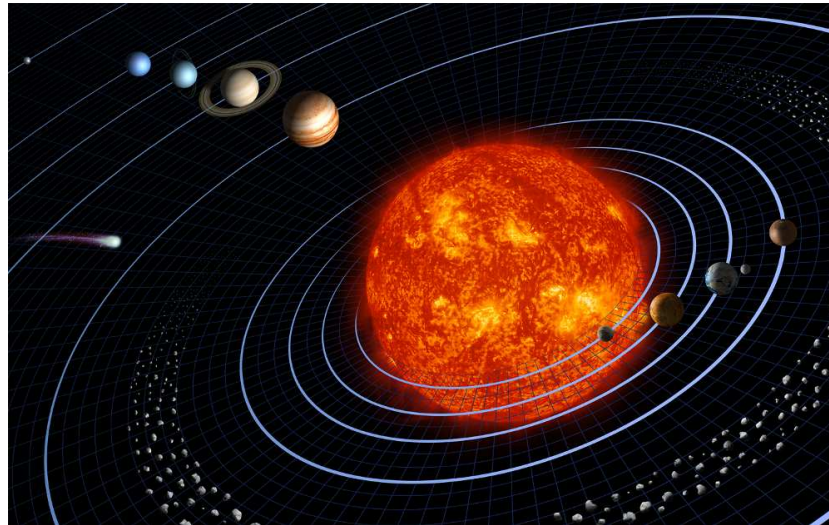
Define lo que llamamos arriba y abajo...



Mantiene la luna y los planetas en órbita...



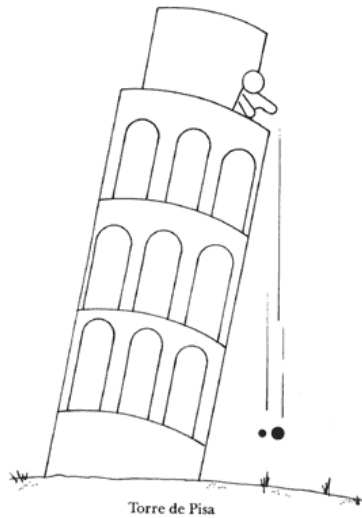
Mantiene la luna y los planetas en órbita...



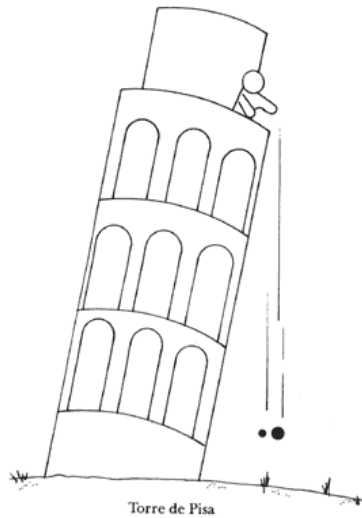
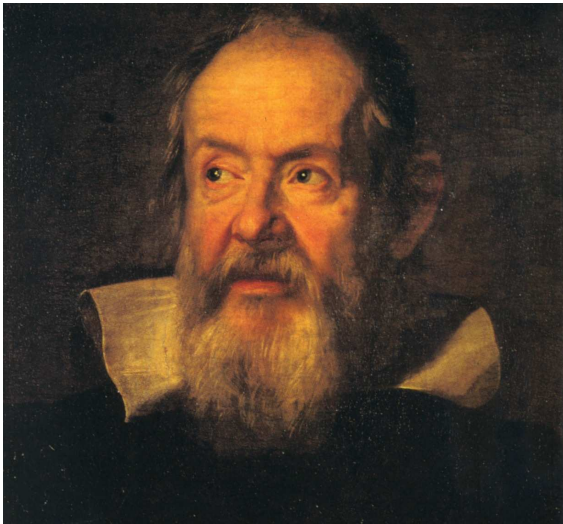
Es la fuerza que domina el universo...



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

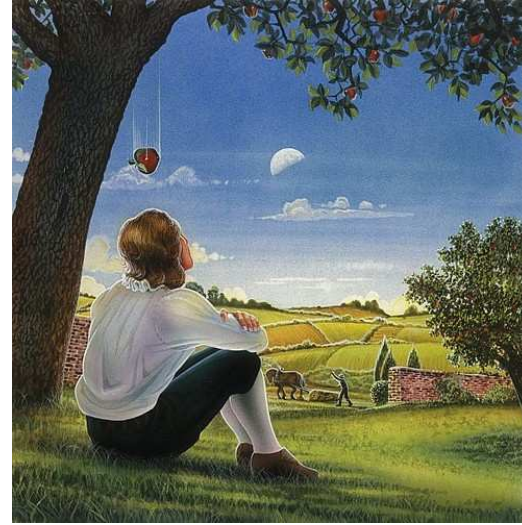
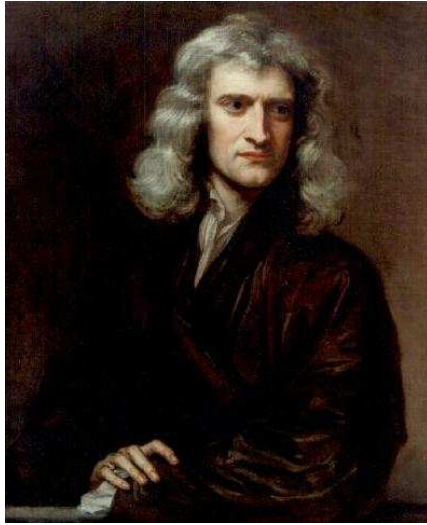


Caída libre:

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

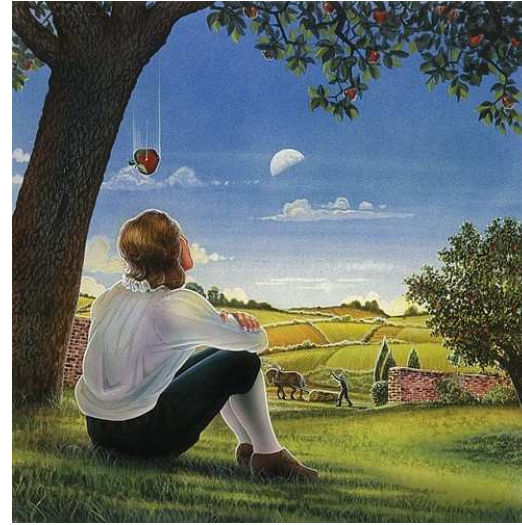
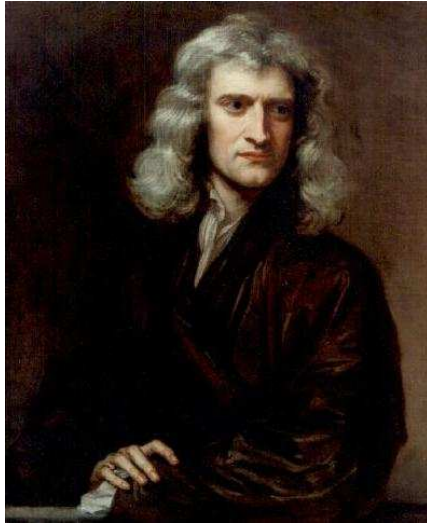
$$v(t) = -g t$$

Mejor entendida por Newton en 1687

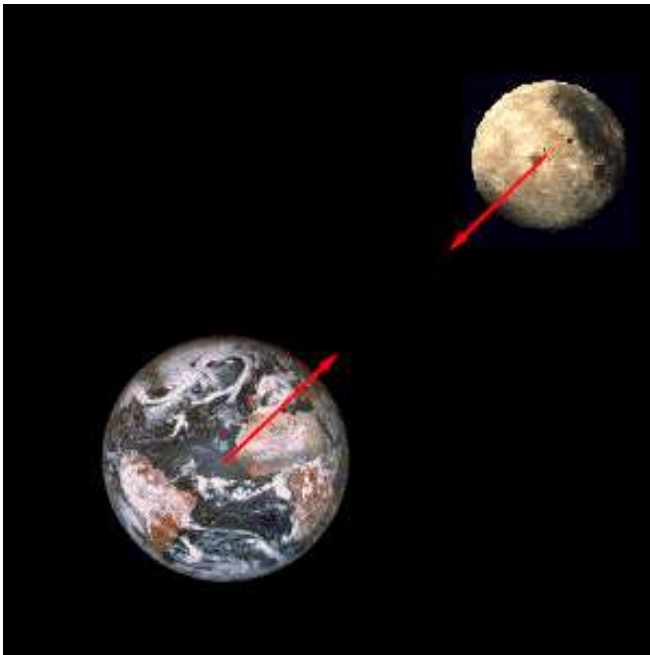


Cualesquiera dos masas en el universo se atraen por una fuerza...

Mejor entendida por Newton en 1687

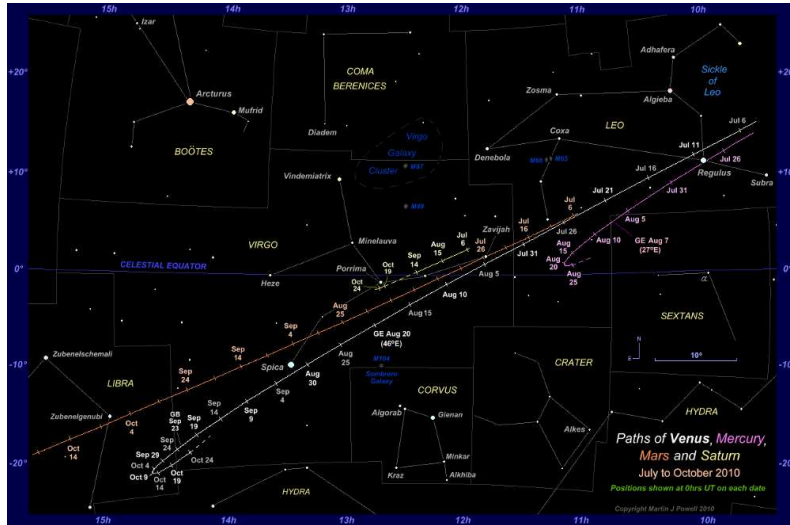


Cualesquiera dos masas en el universo se atraen por una fuerza...

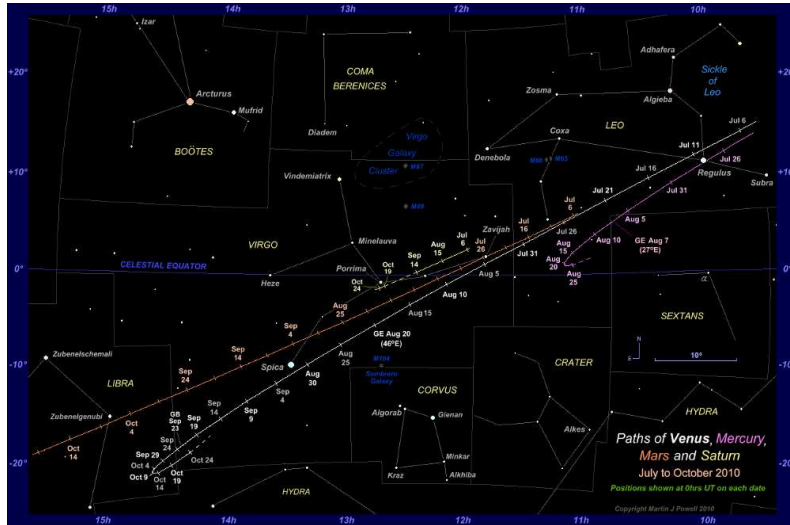


$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

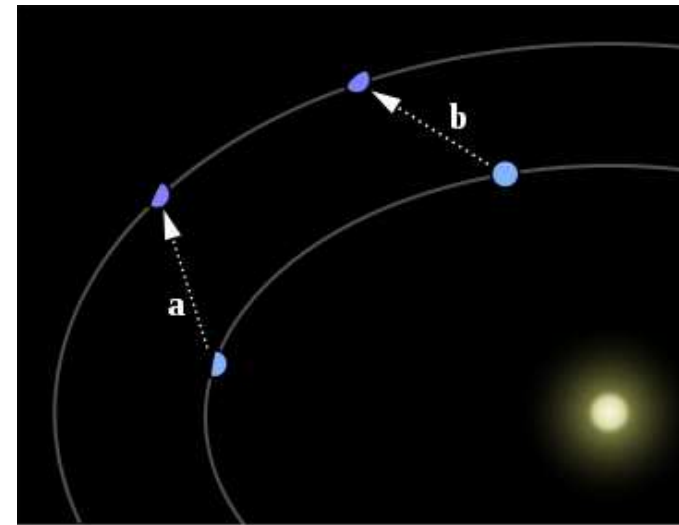
Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias



Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias

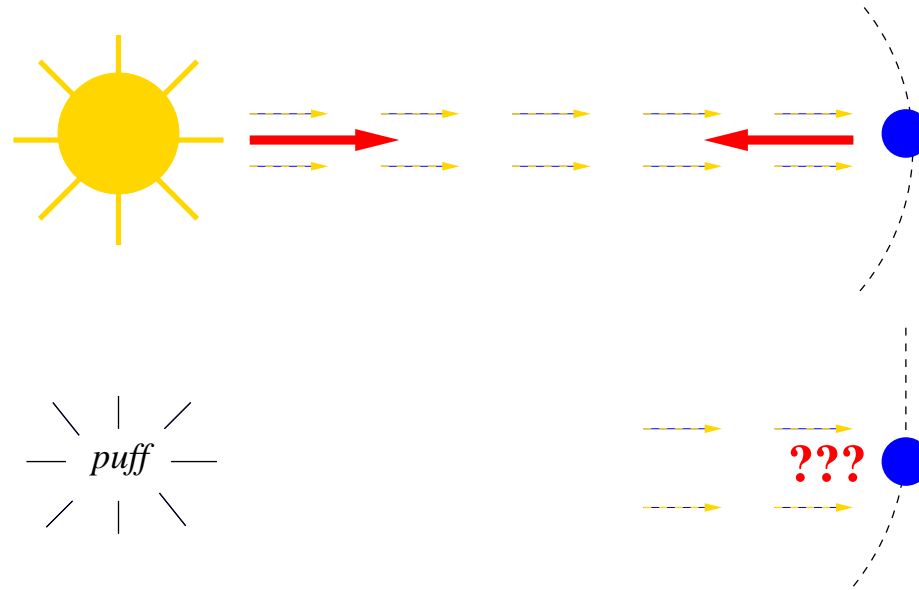


Hasta predijo la **existencia de Neptuno** por perturbaciones en órbita de Urano



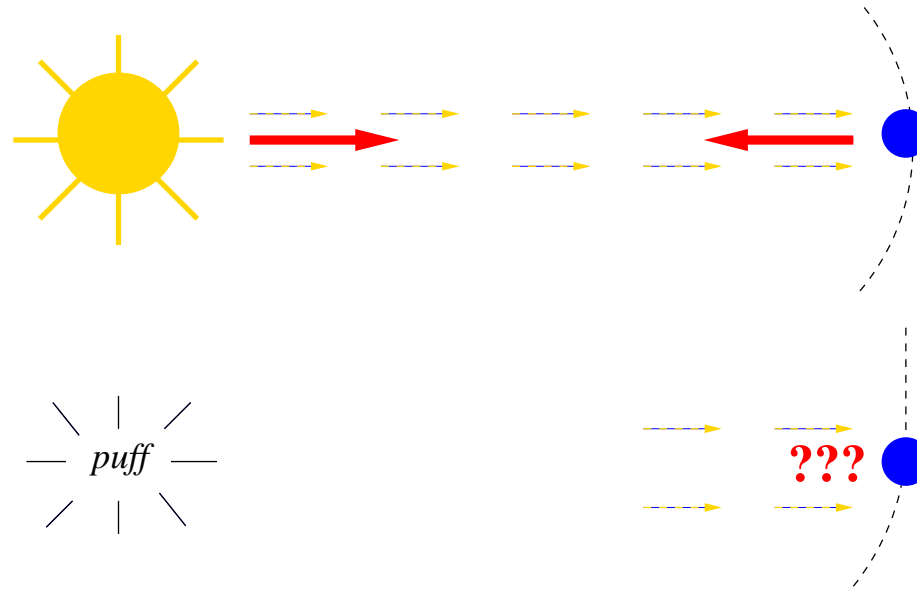
Couch-Adams & Le Verrier, 1845

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



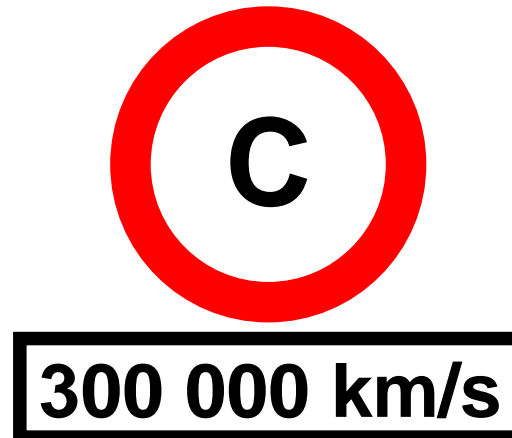
Newton: “Hypotheses non fingo”

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

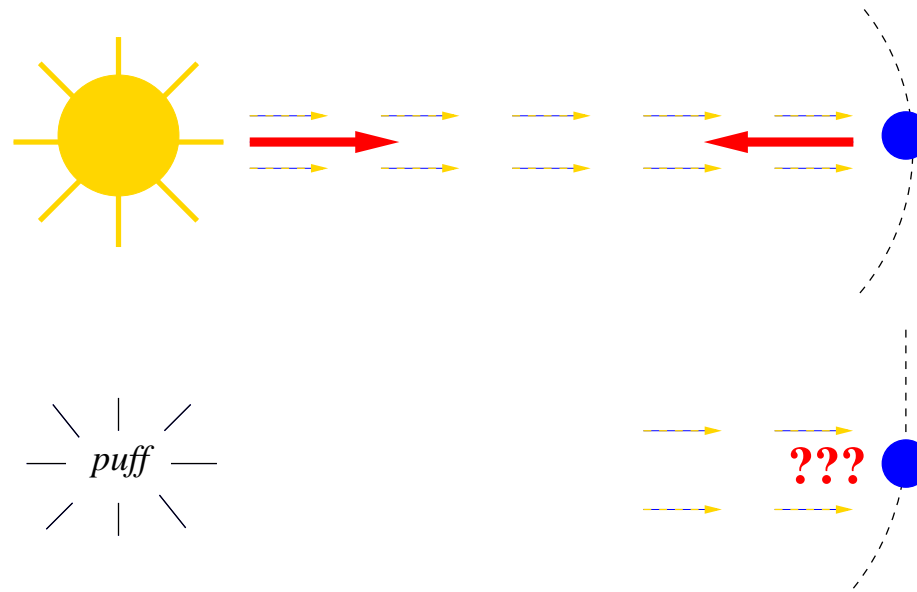


Newton: “Hypotheses non fingo”

Einstein:

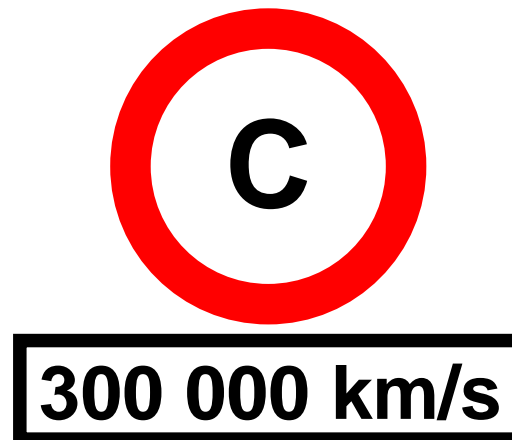


Pero ¿Cómo se propaga la gravedad? ¿A qué velocidad?



Newton: “Hypotheses non fingo”

Einstein:



→ **Clara contradicción!!!**

La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

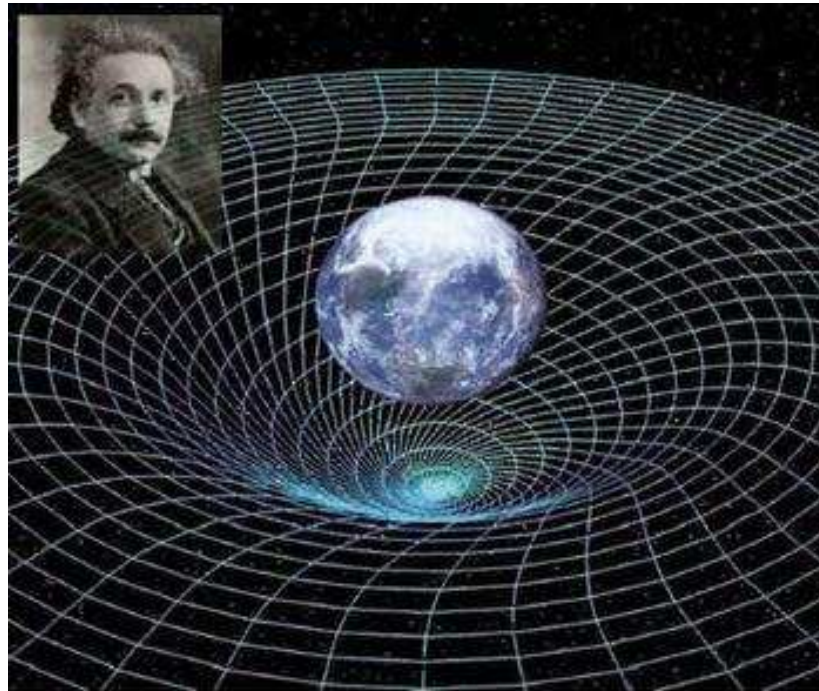
¿Cómo compatibilizarlo?

La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

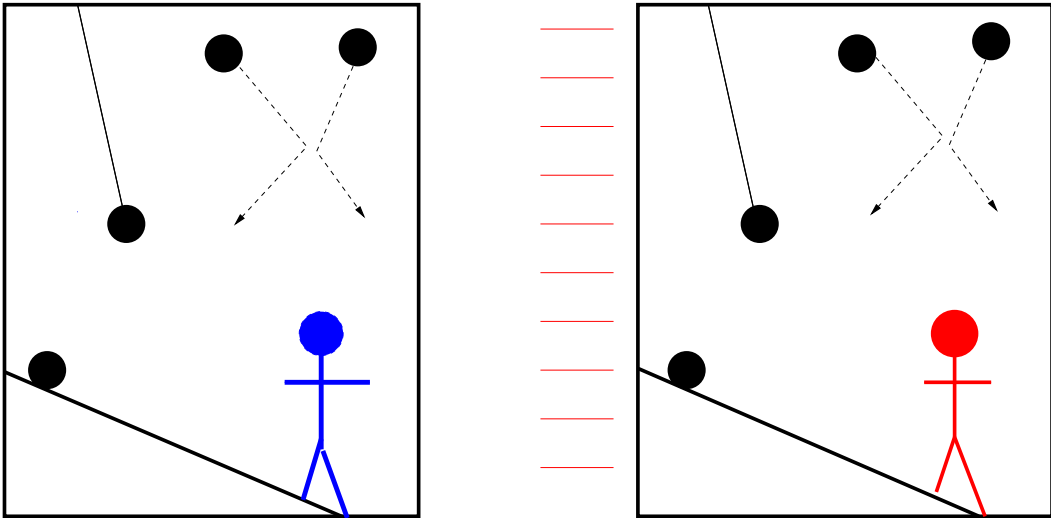
¿Cómo compatibilizarlo?

Con una nueva teoría de la gravedad...

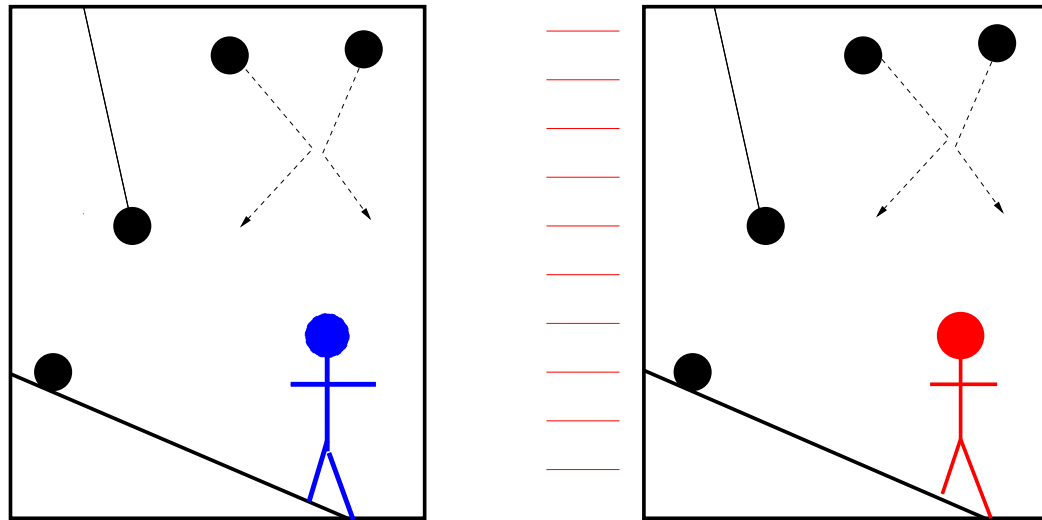


Relatividad General

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



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



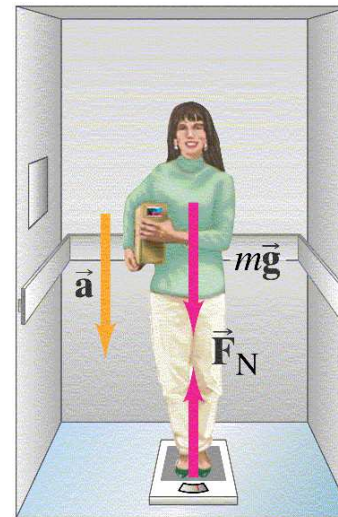
Pero no para observadores acelerados



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

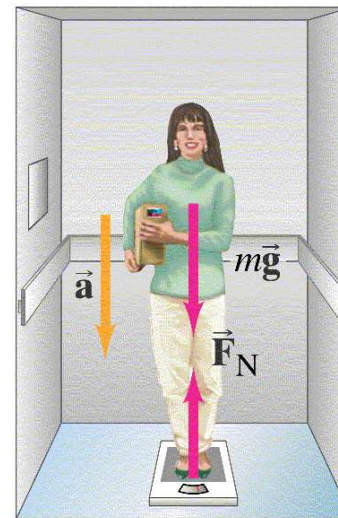
3. El Principio de Equivalencia

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

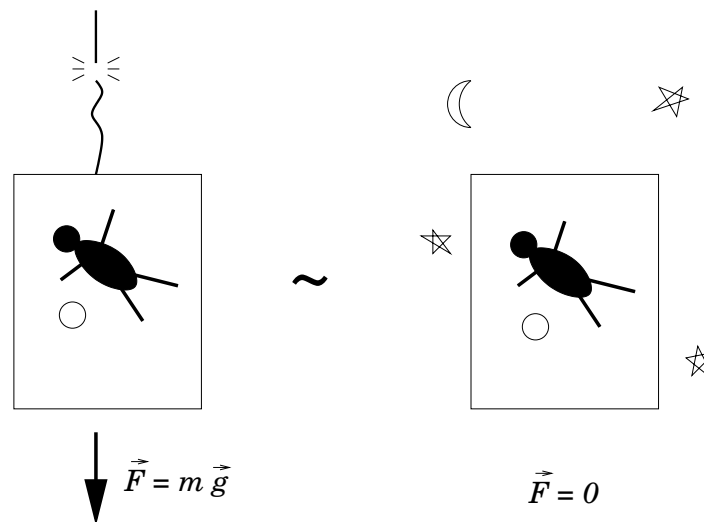


3. El Principio de Equivalencia

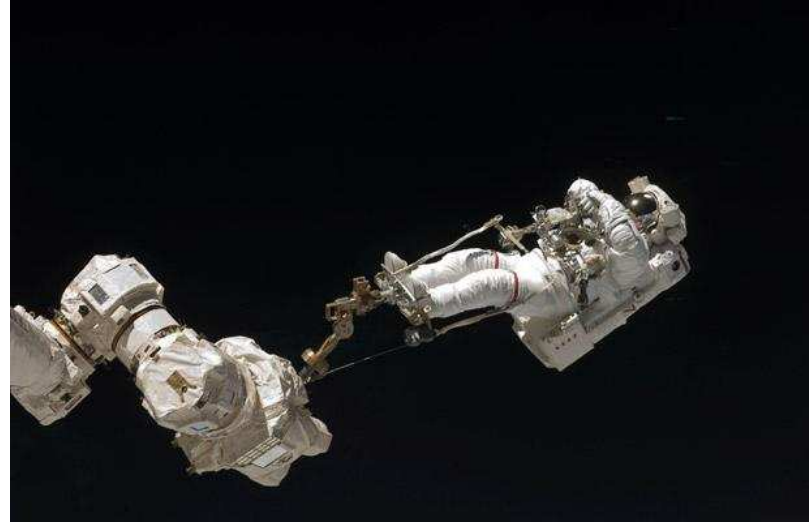
La fuerza gravitatoria se puede aumentar o disminuir con aceleraciones...



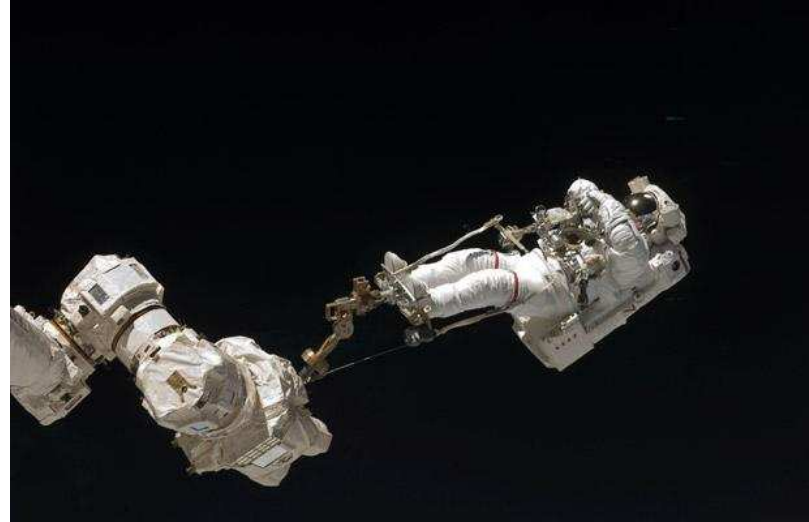
hasta tal punto que...



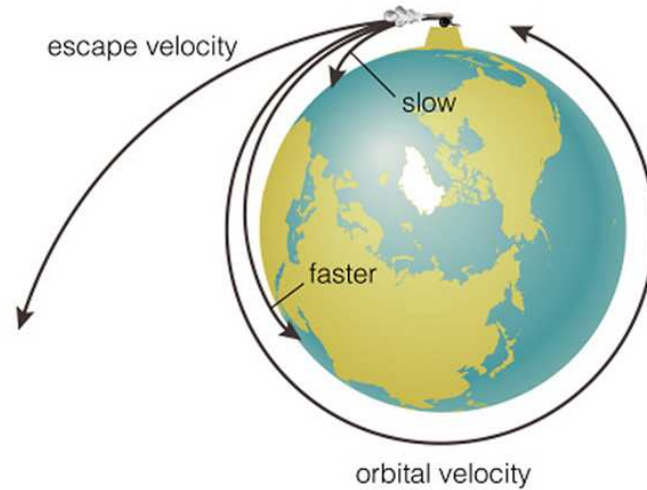
En realidad no hay tanta diferencia entre...



En realidad no hay tanta diferencia entre...

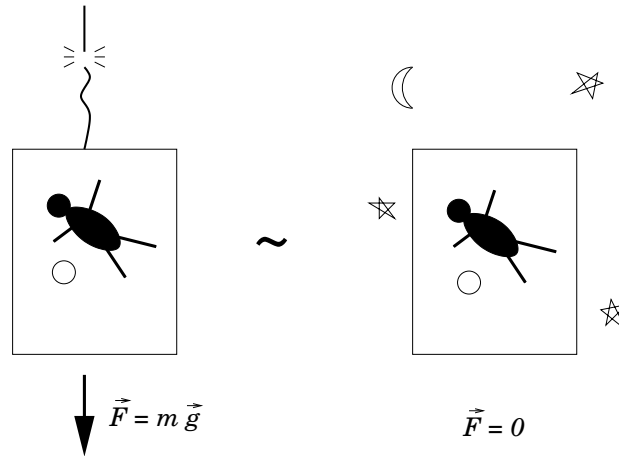


De hecho, no tienen peso porque están cayendo alrededor de la Tierra



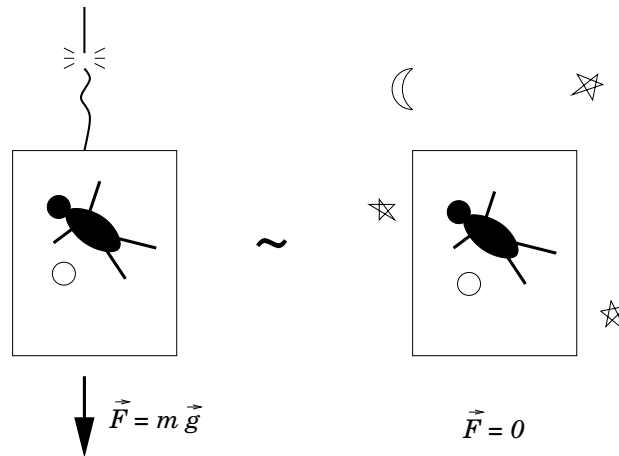
Principio de Equivalencia:

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

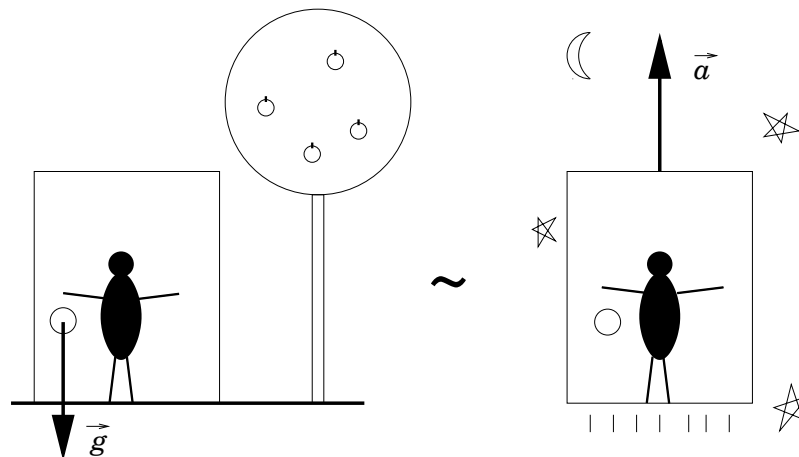


Principio de Equivalencia:

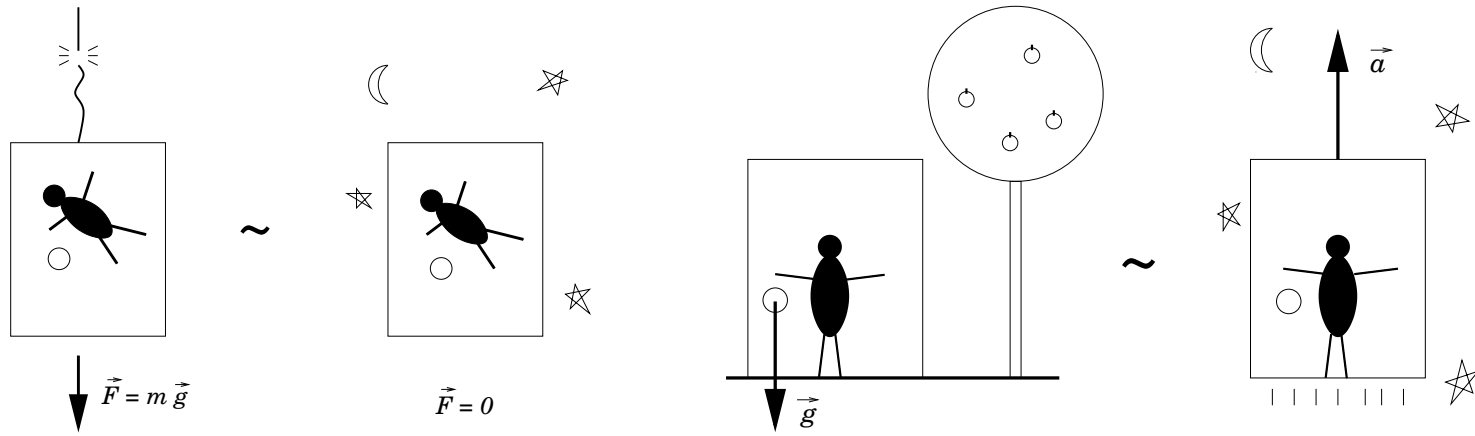
Un observador en caída libre es *localmente* indistinguible de un observador inercial



Un observador en campo gravitatorio es *localmente* indistinguible de un observador acelerado

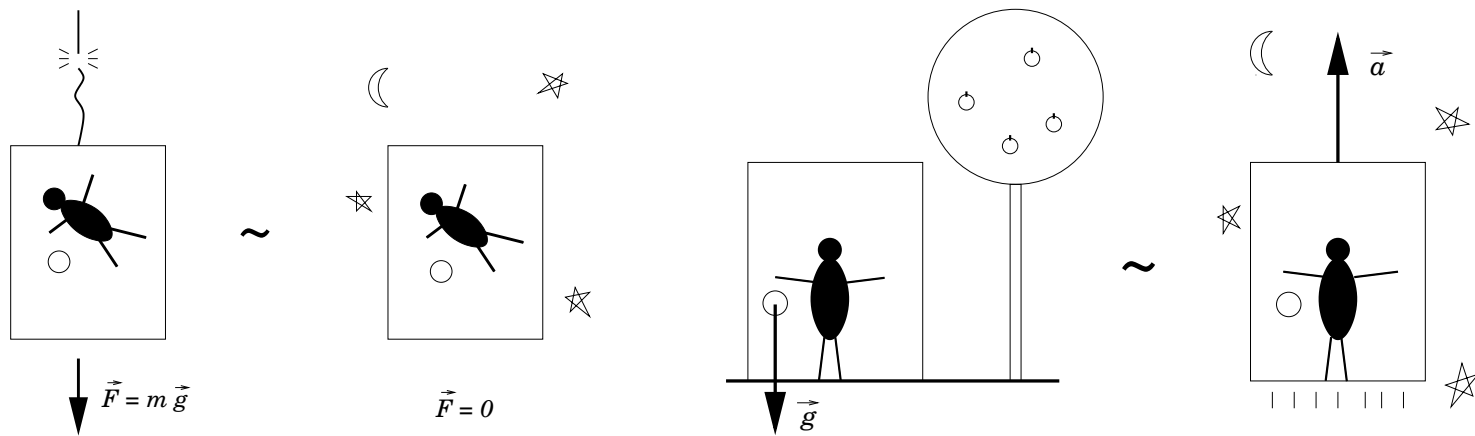


Se puede “apagar” la gravedad...



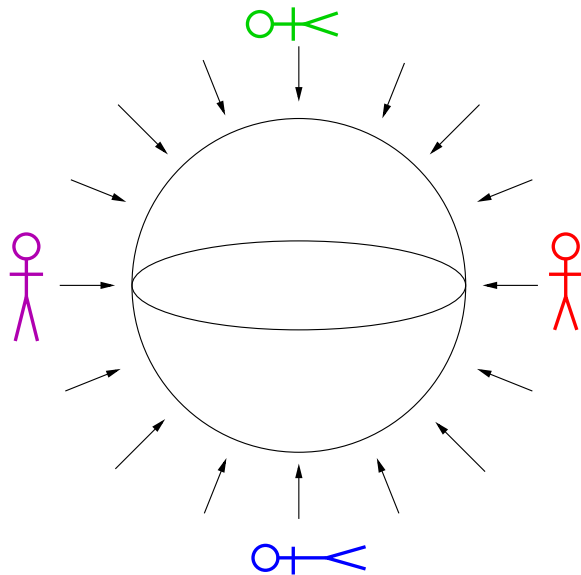
... y considerar observadores acelerados como inerciales

Se puede “apagar” la gravedad...



... y considerar observadores acelerados como inerciales

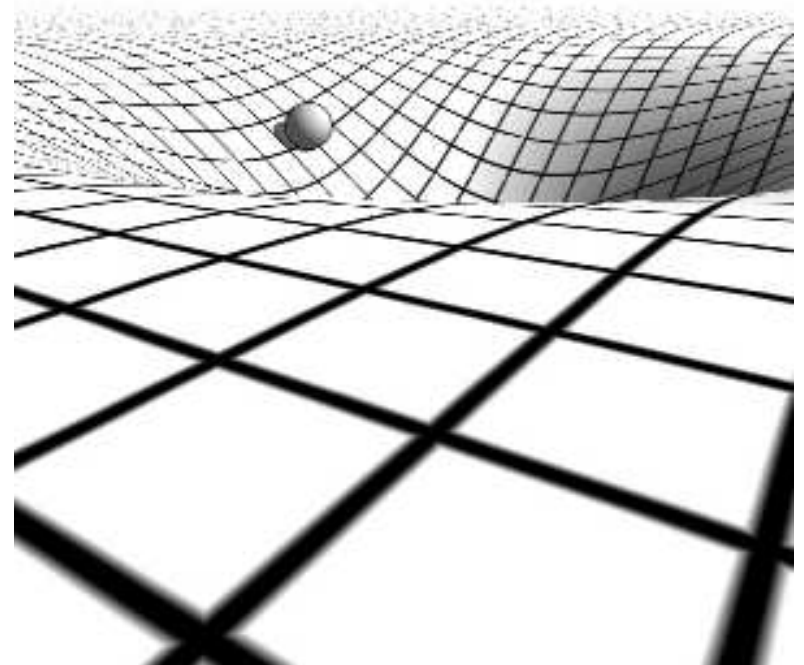
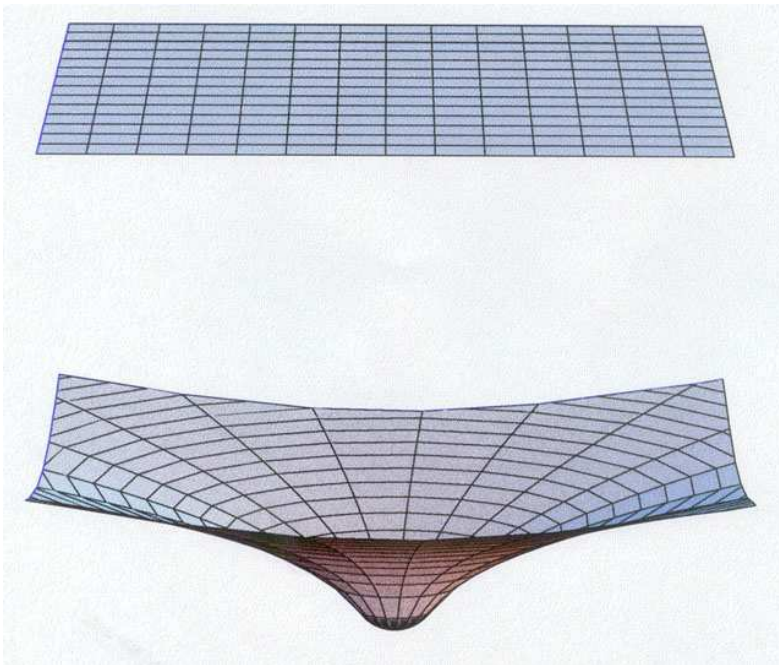
... pero sólo localmente...



→ Espacio localmente plano = Espacio curvo!

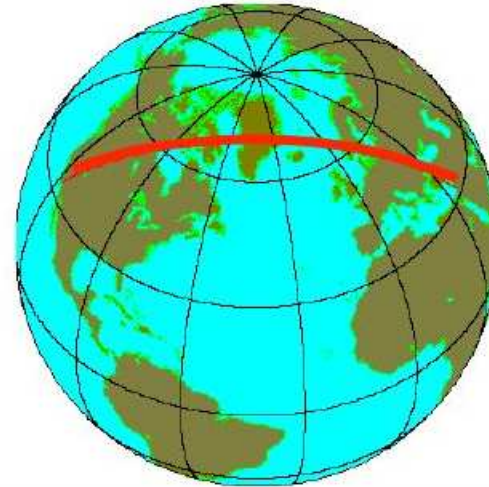
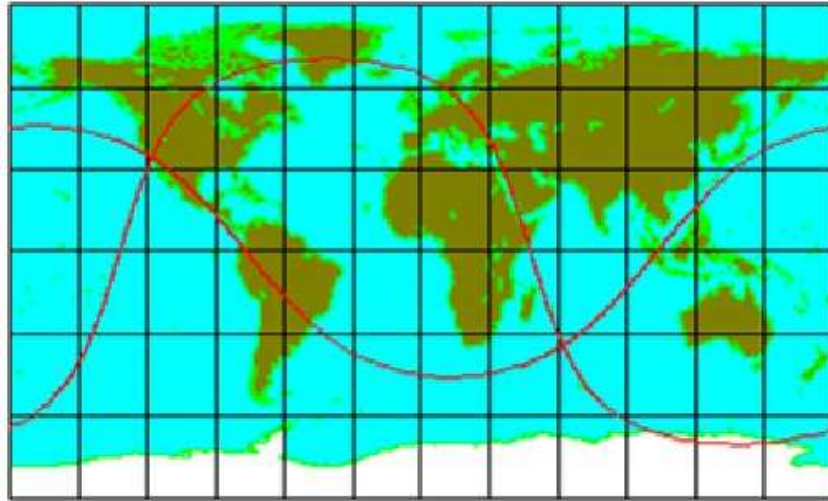
4. Relatividad General

Gravedad = espacio curvo

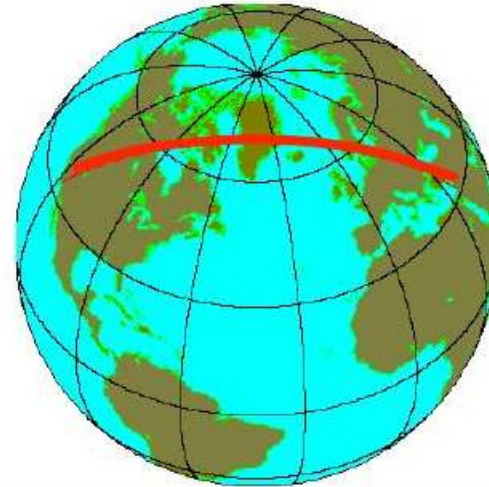
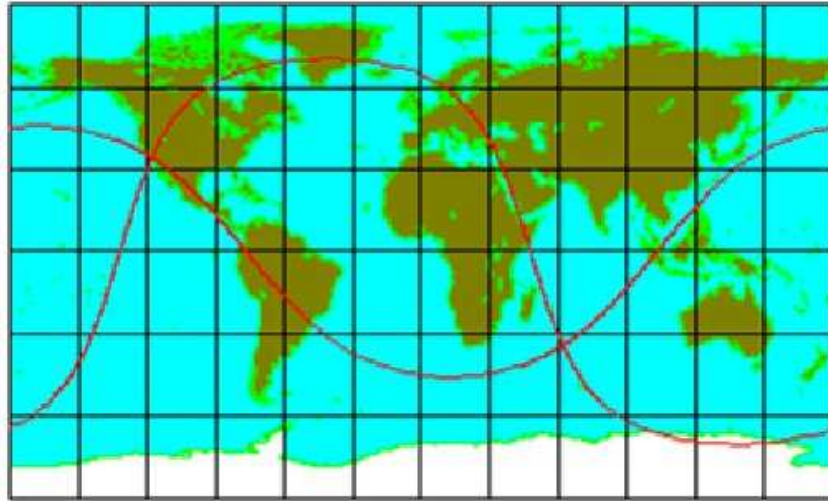


La materia indica cómo se curva el espacio.
El espacio indica cómo se mueve la materia.

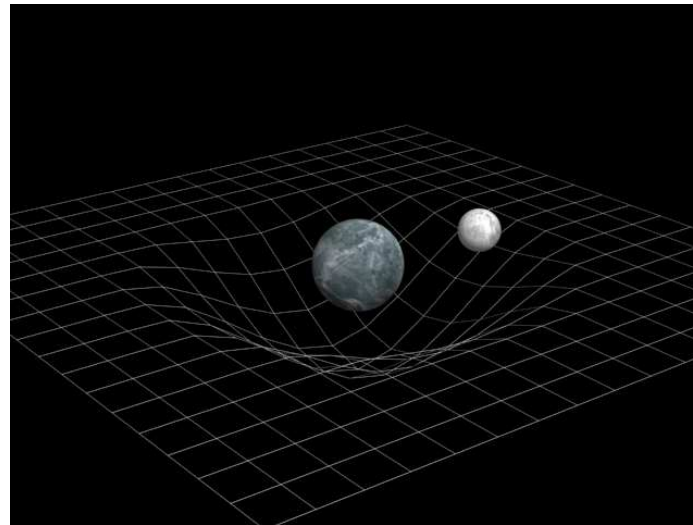
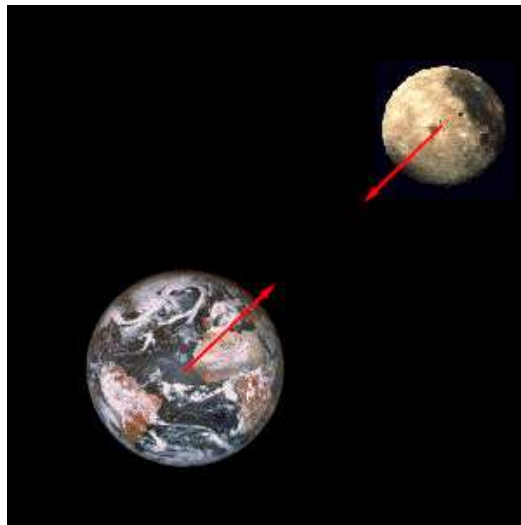
La materia sigue la trayectoria más recta posible



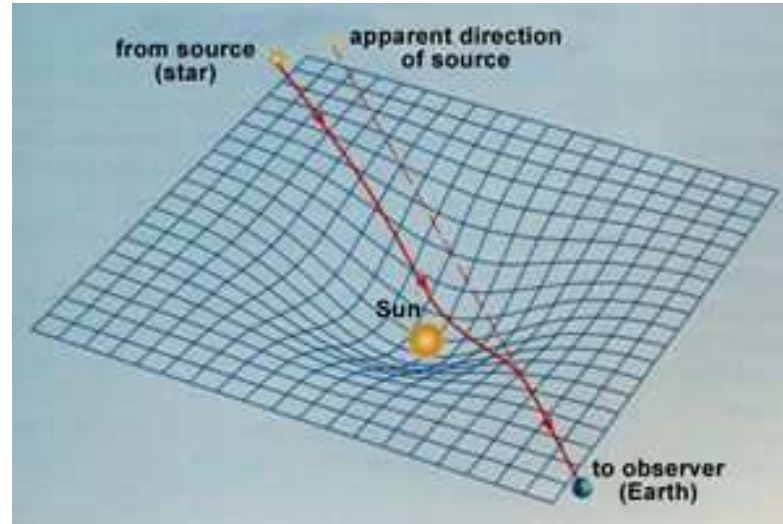
La materia sigue la trayectoria más recta posible



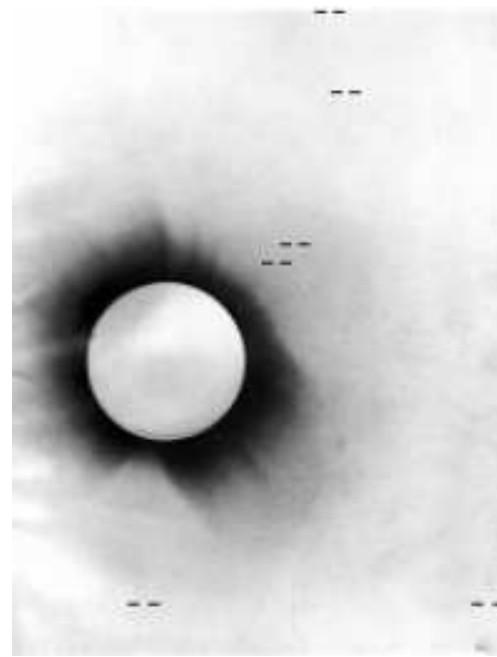
No hay fuerza gravitatoria à la Newton, sino trayectorias en espacio curvo.



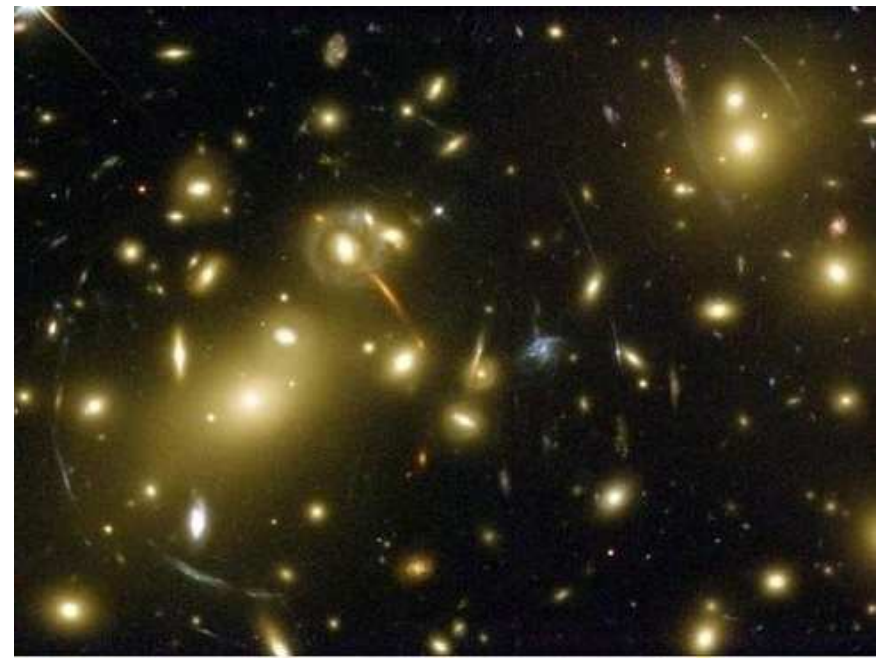
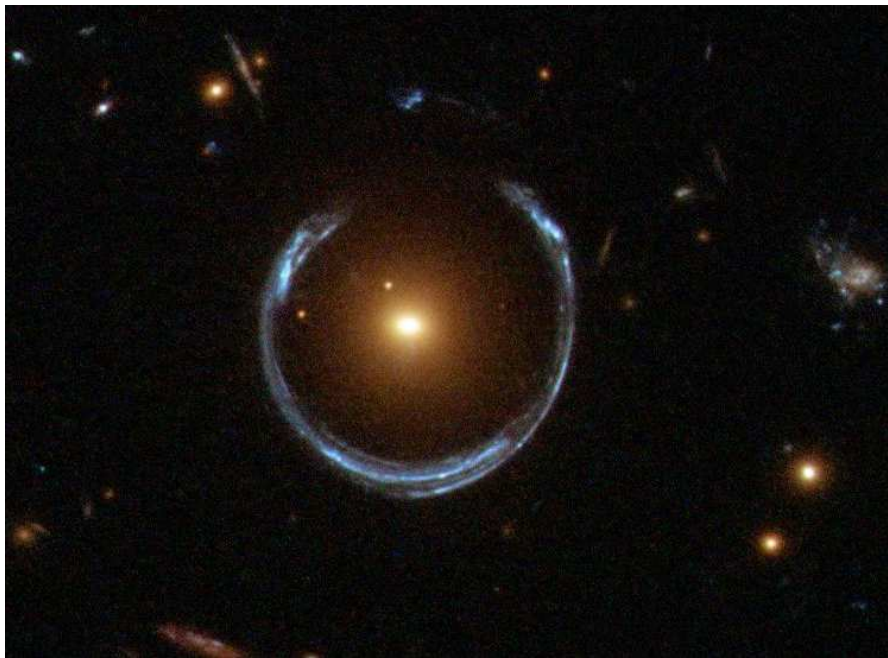
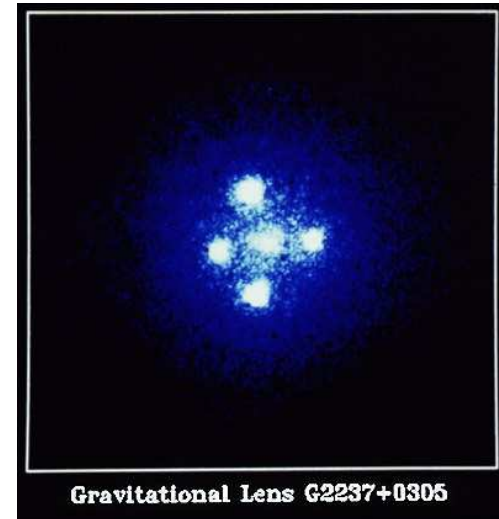
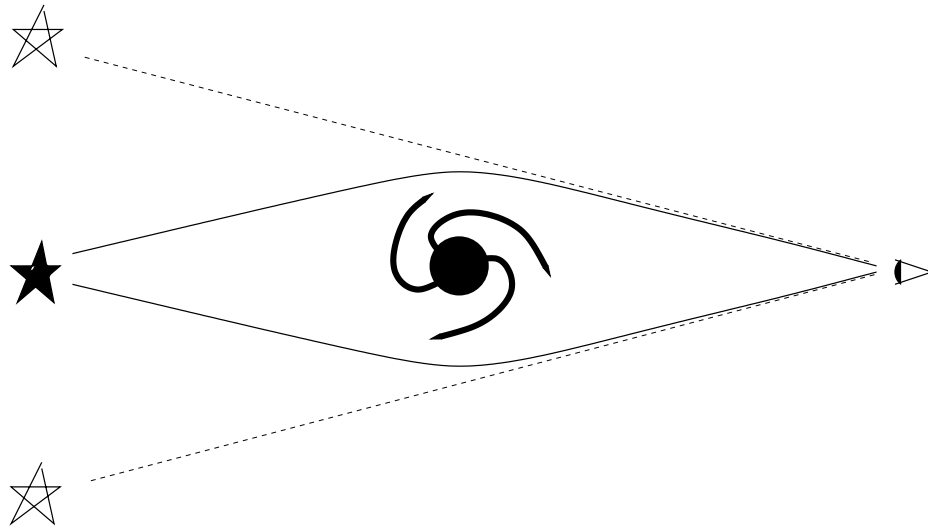
No sólo la materia, sino también la luz



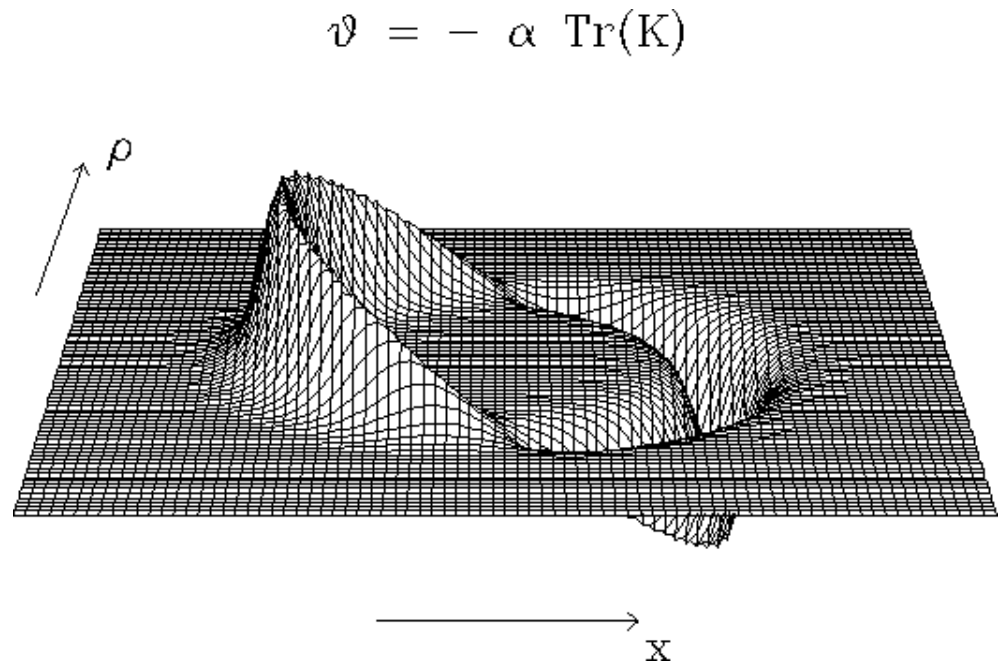
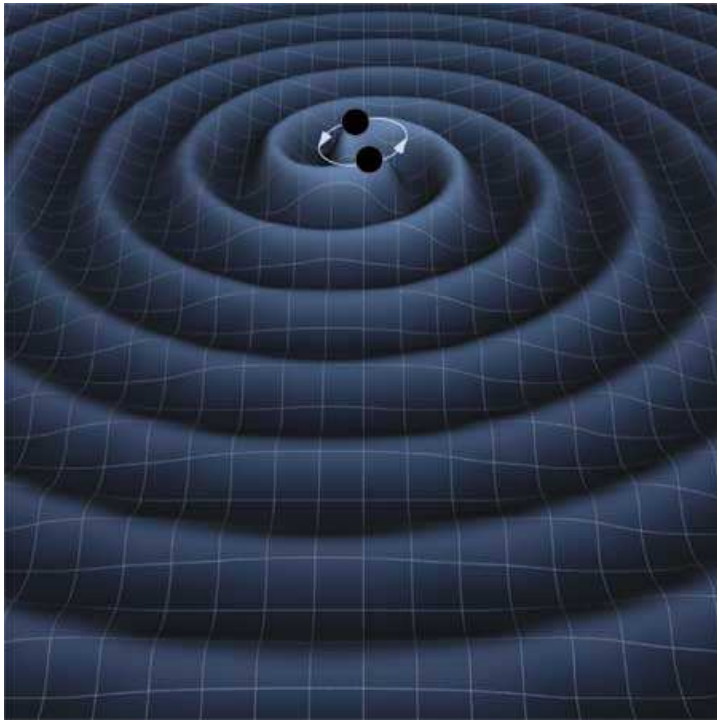
Efecto medido en eclipse solar de 1919 por Eddington & Co



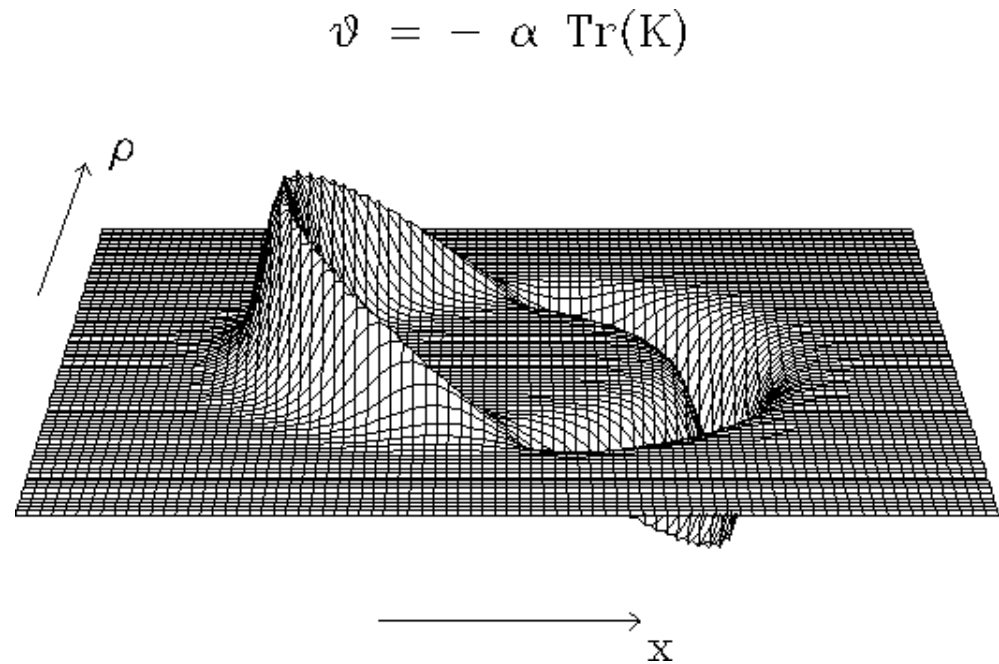
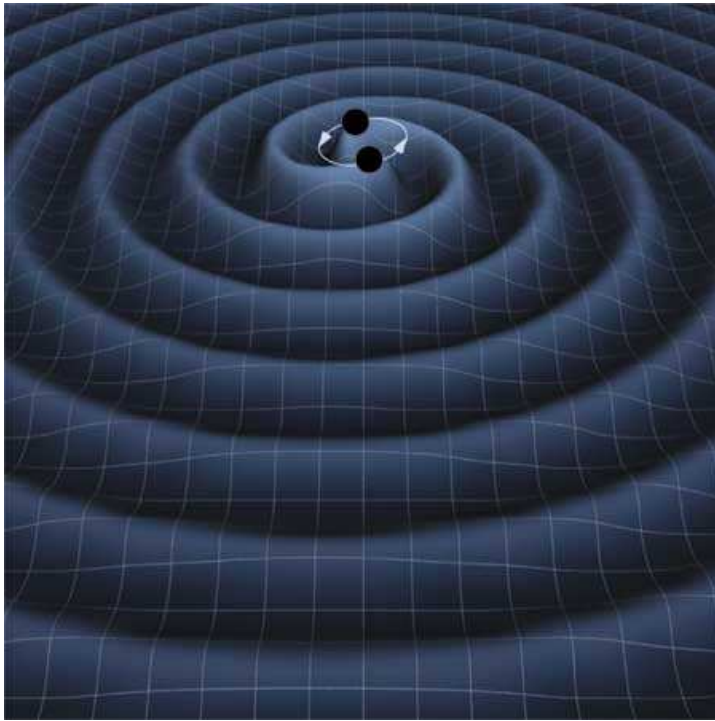
—> Objetos masivos actúan como lentes gravitatorias



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**

$$R_{\mu\nu\rho}{}^{\lambda} = \partial_{\mu}\Gamma_{\nu\rho}^{\lambda} - \partial_{\nu}\Gamma_{\mu\rho}^{\lambda} + \Gamma_{\mu\sigma}^{\lambda}\Gamma_{\nu\rho}^{\sigma} - \Gamma_{\nu\sigma}^{\lambda}\Gamma_{\mu\rho}^{\sigma}$$

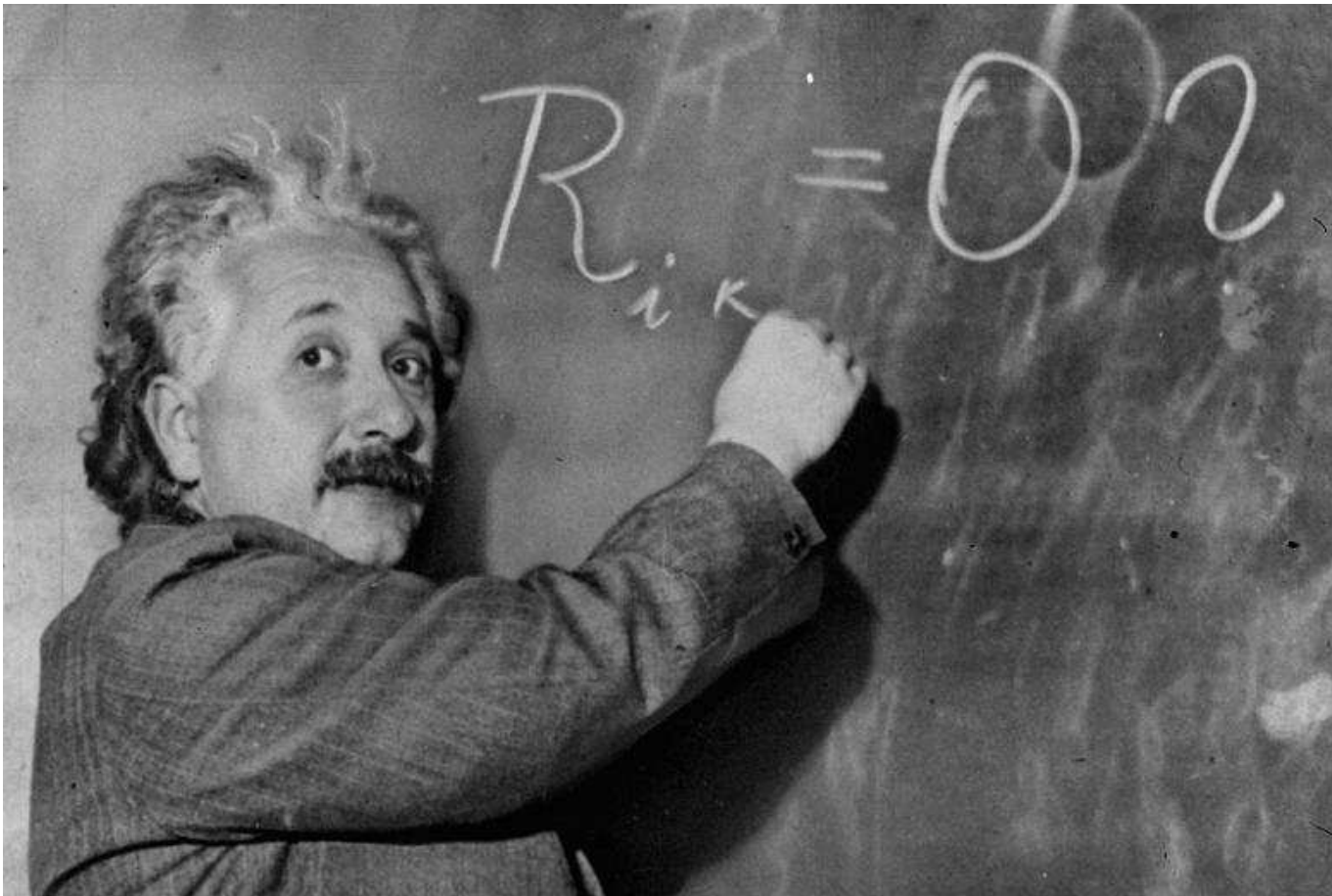
$$\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma} = \frac{1}{2}g^{\sigma\lambda}\left(\partial_{\mu}g_{\lambda\nu} + \partial_{\nu}g_{\mu\lambda} - \partial_{\lambda}g_{\mu\nu}\right)$$

$$\ddot{x}^{\mu} + \Gamma_{\nu\rho}^{\mu}\dot{x}^{\nu}\dot{x}^{\rho} = 0$$

A Einstein le costó 8 años aprenderlo...

Campo gravitatorio descrito por la ecuación de Einstein

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





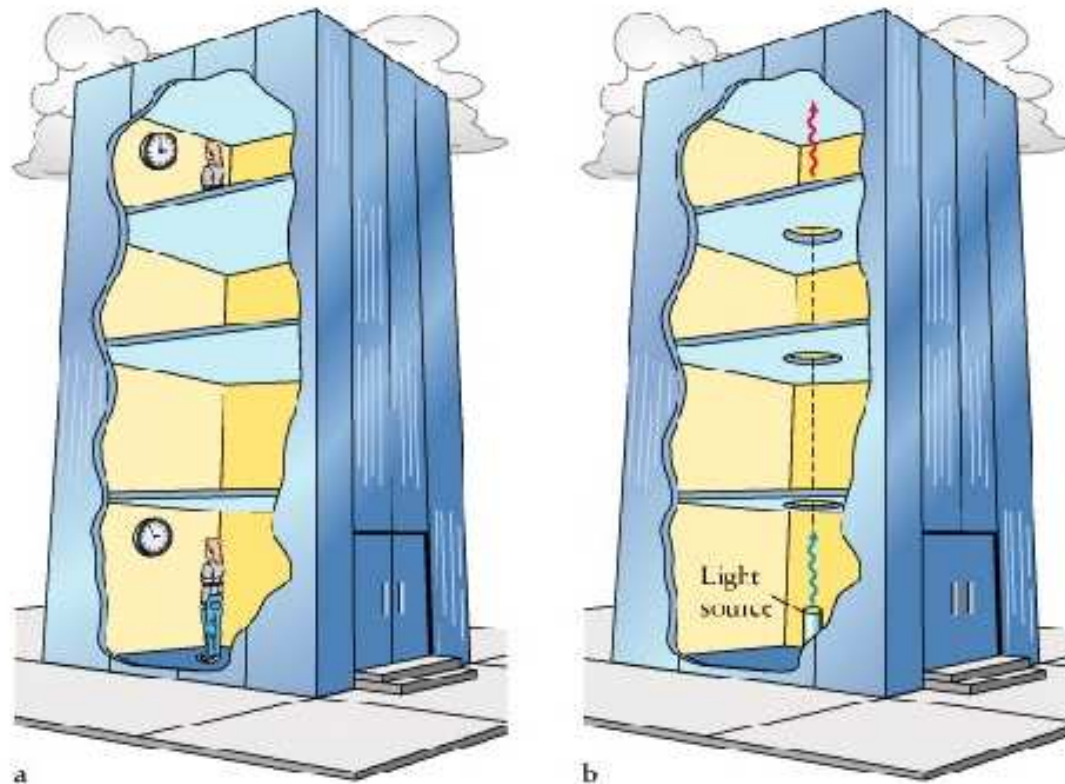
Cementerio de trenes, Uyuni, Bolivia

5. Consecuencias

A. Dilatación temporal

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

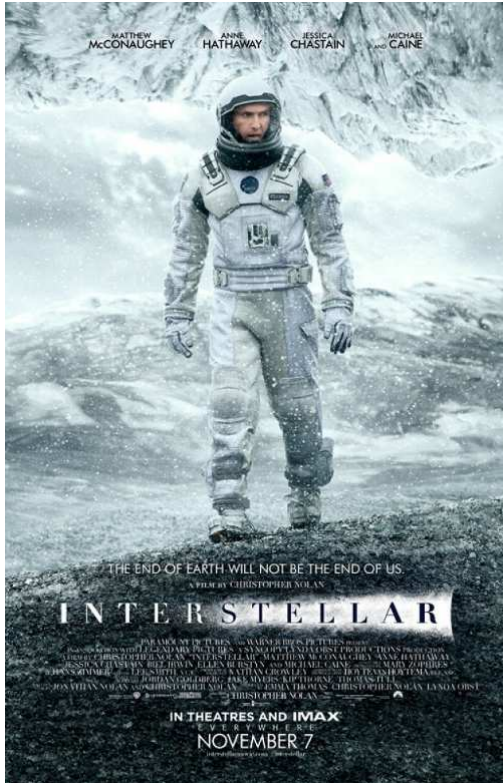
→ Efecto Doppler gravitacional



→ Tiempo corre más lento abajo que arriba!

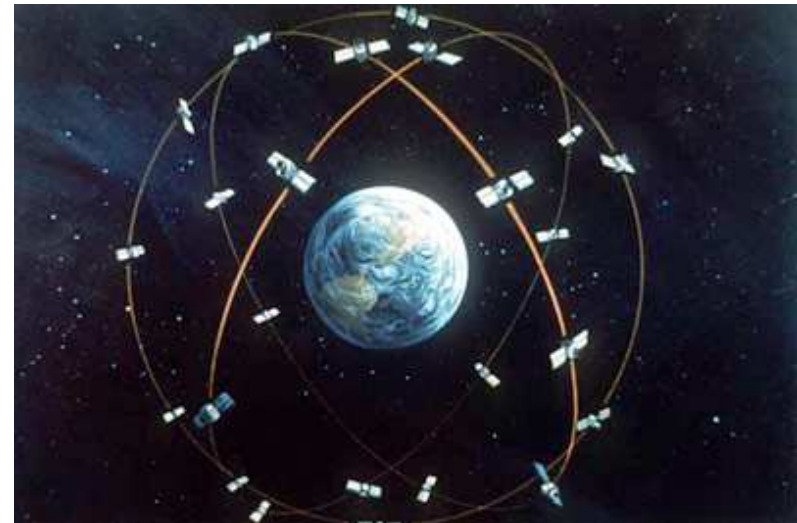
Dilatación temporal gravitatorio:

Abajo en un pozo gravitatorio el tiempo corre más lento!



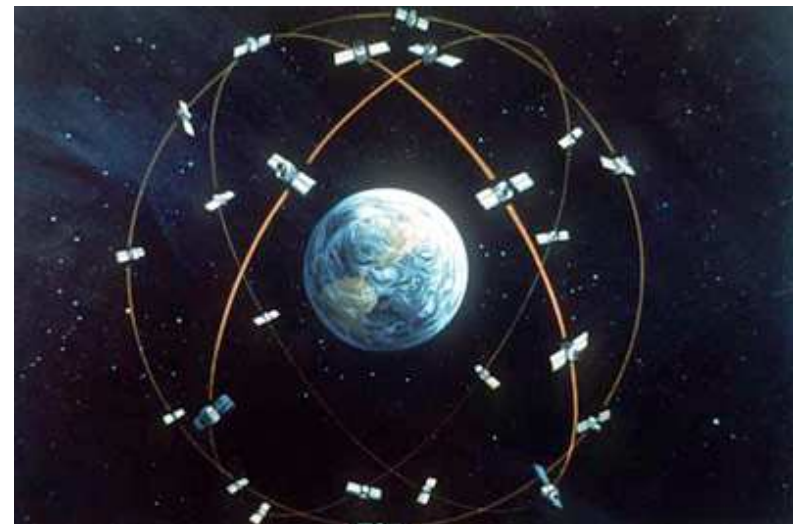
- 1 hora en planeta de agua cerca de Gargantúa equivale a 7 años en la Tierra
- En la vida real: efecto importante en GPS

→ 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

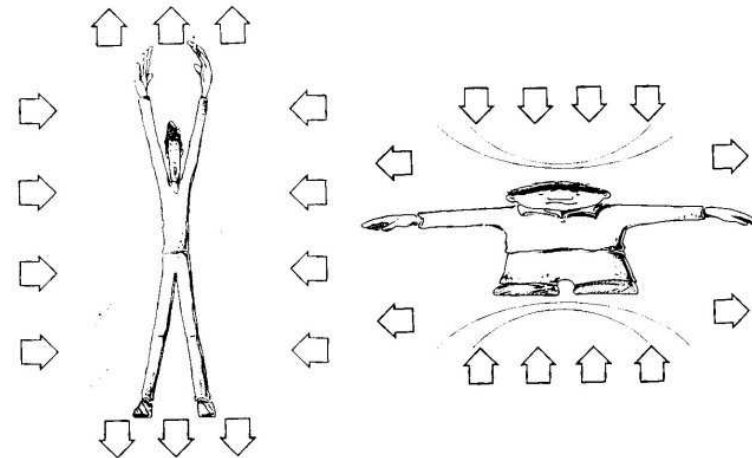
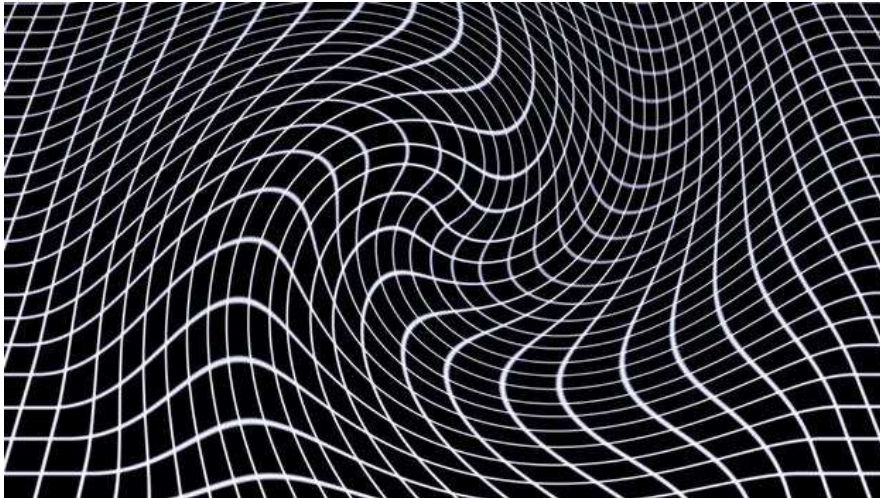


NO

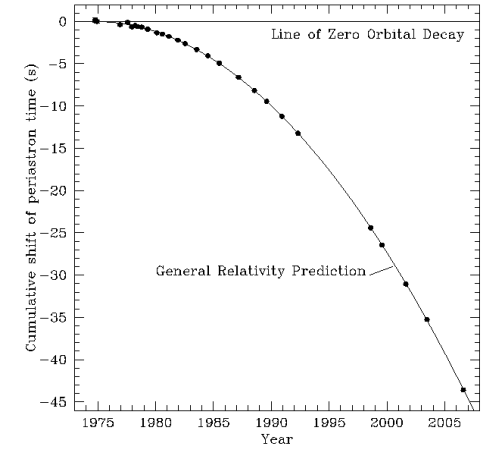
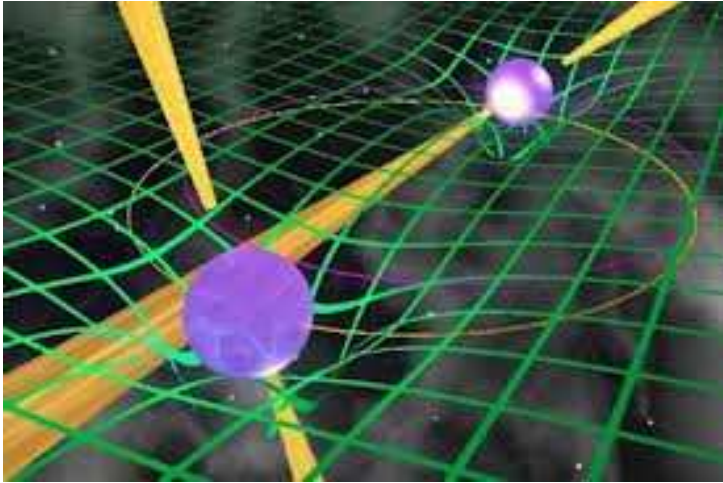


más o menos...

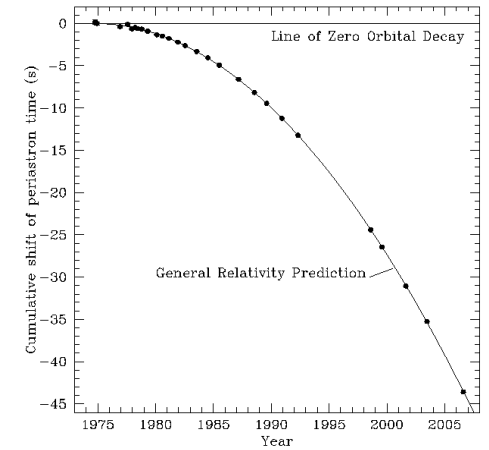
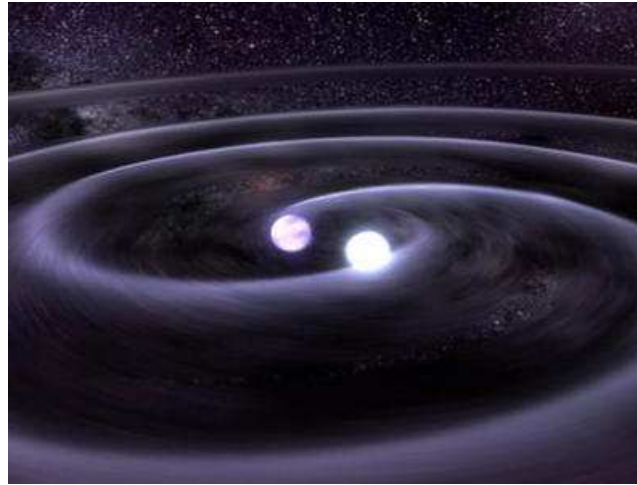
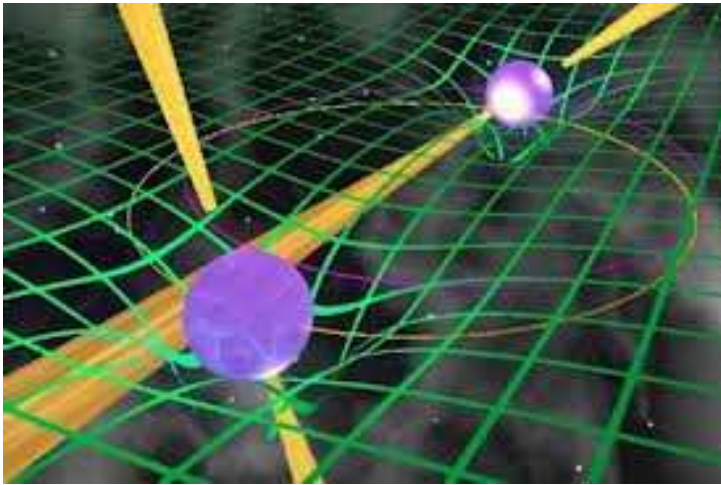
Existen perturbaciones del espacio que se propagan: **ondas gravitacionales**



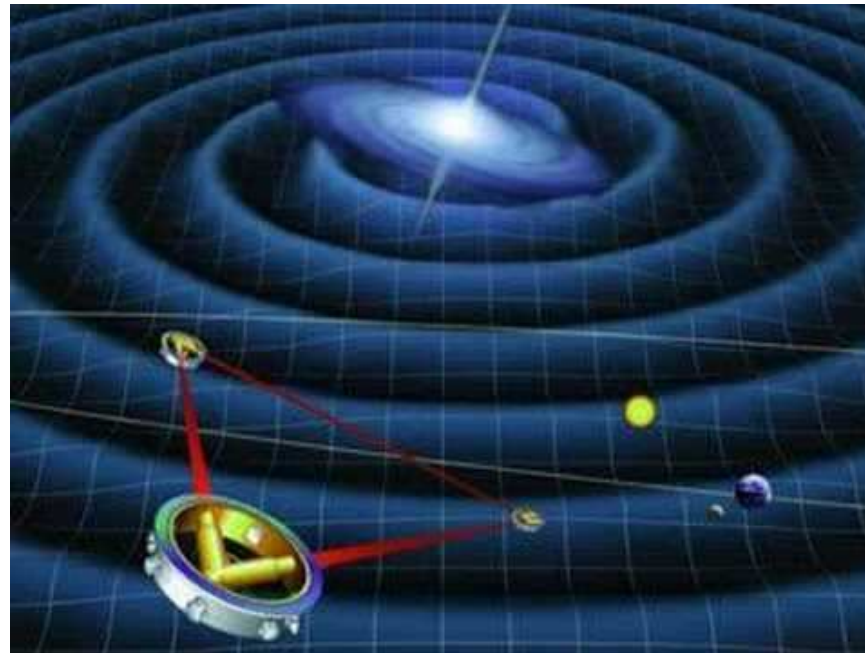
Detección indirecta en púlsares binarios



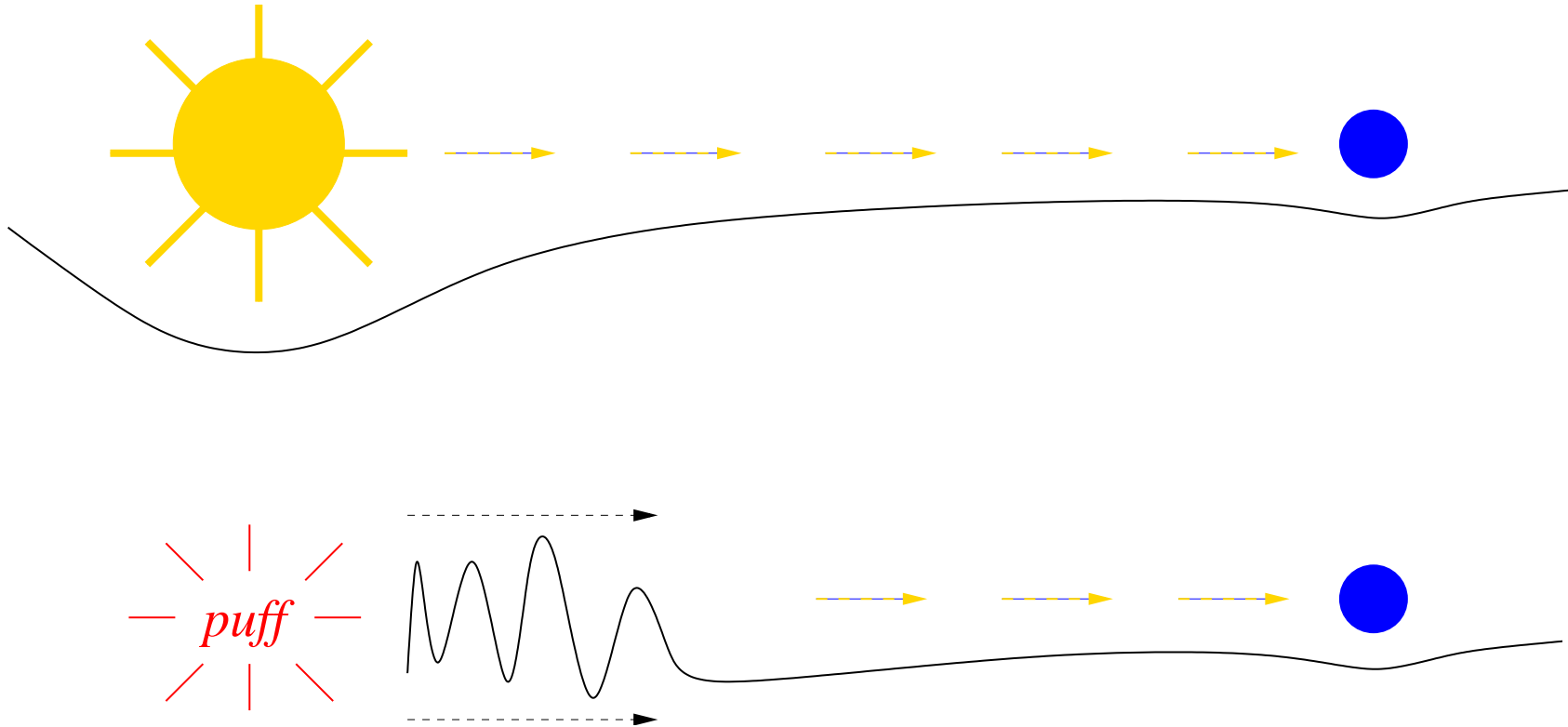
Detección indirecta en púlsares binarios



Detección directa en futuro cercano?



Solución a problema de Newton:

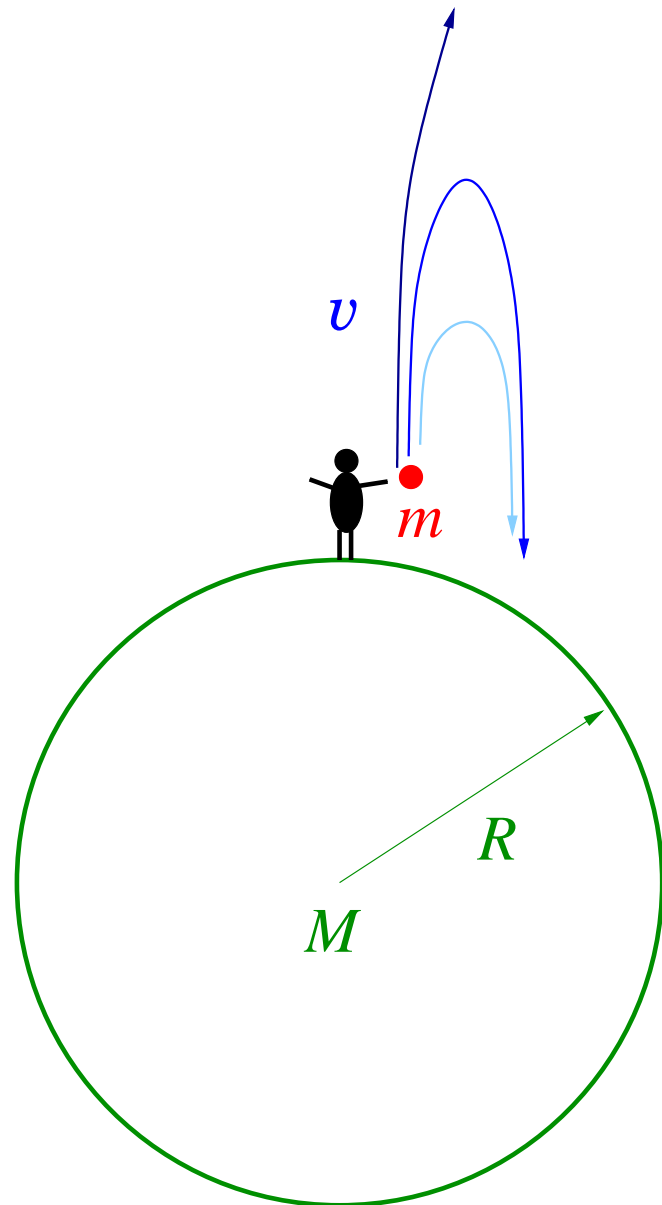


La gravedad se propaga a la velocidad de la luz:

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

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!!!

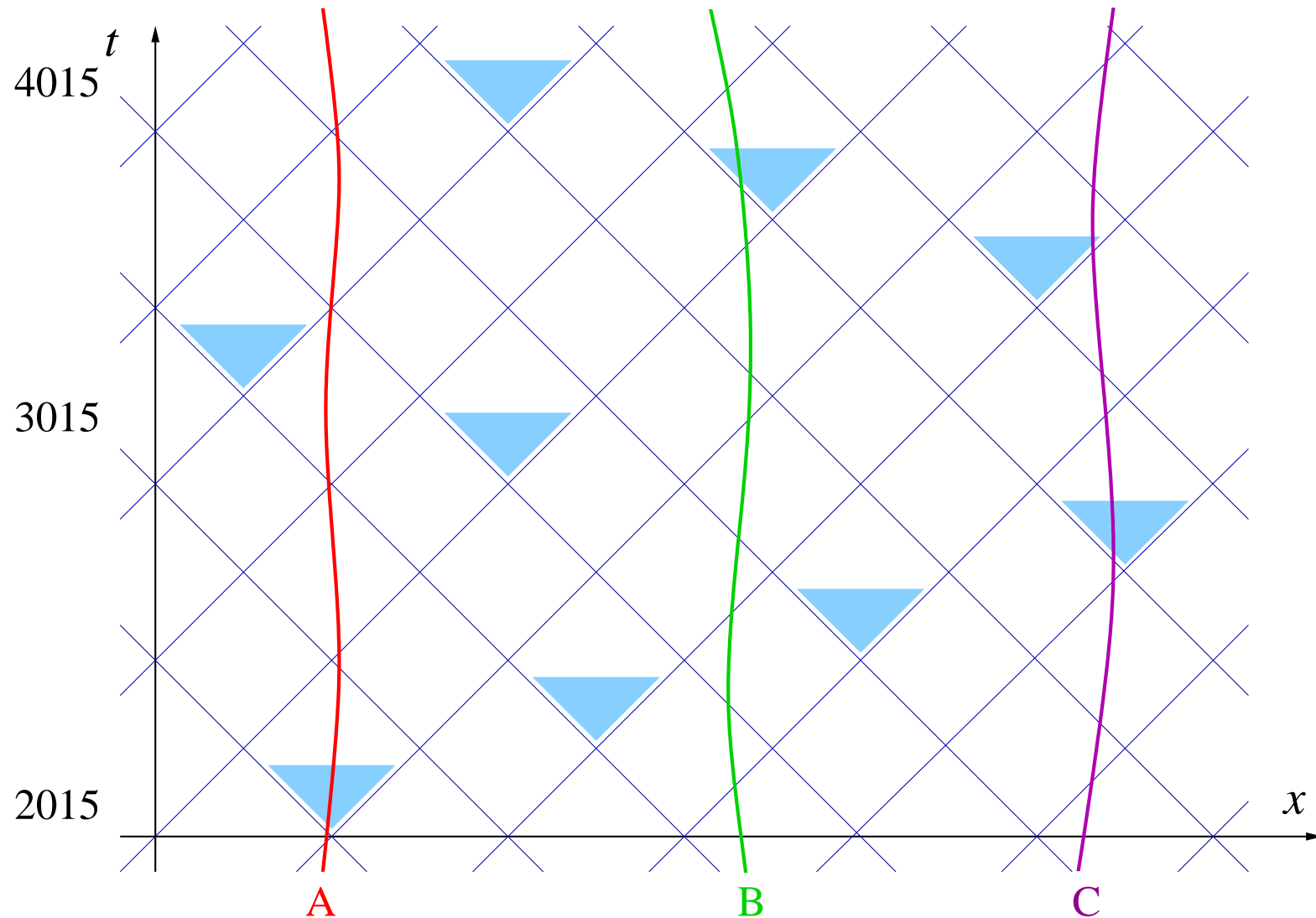


Albert Einstein (1905):

Nada puede moverse más rápido que la luz

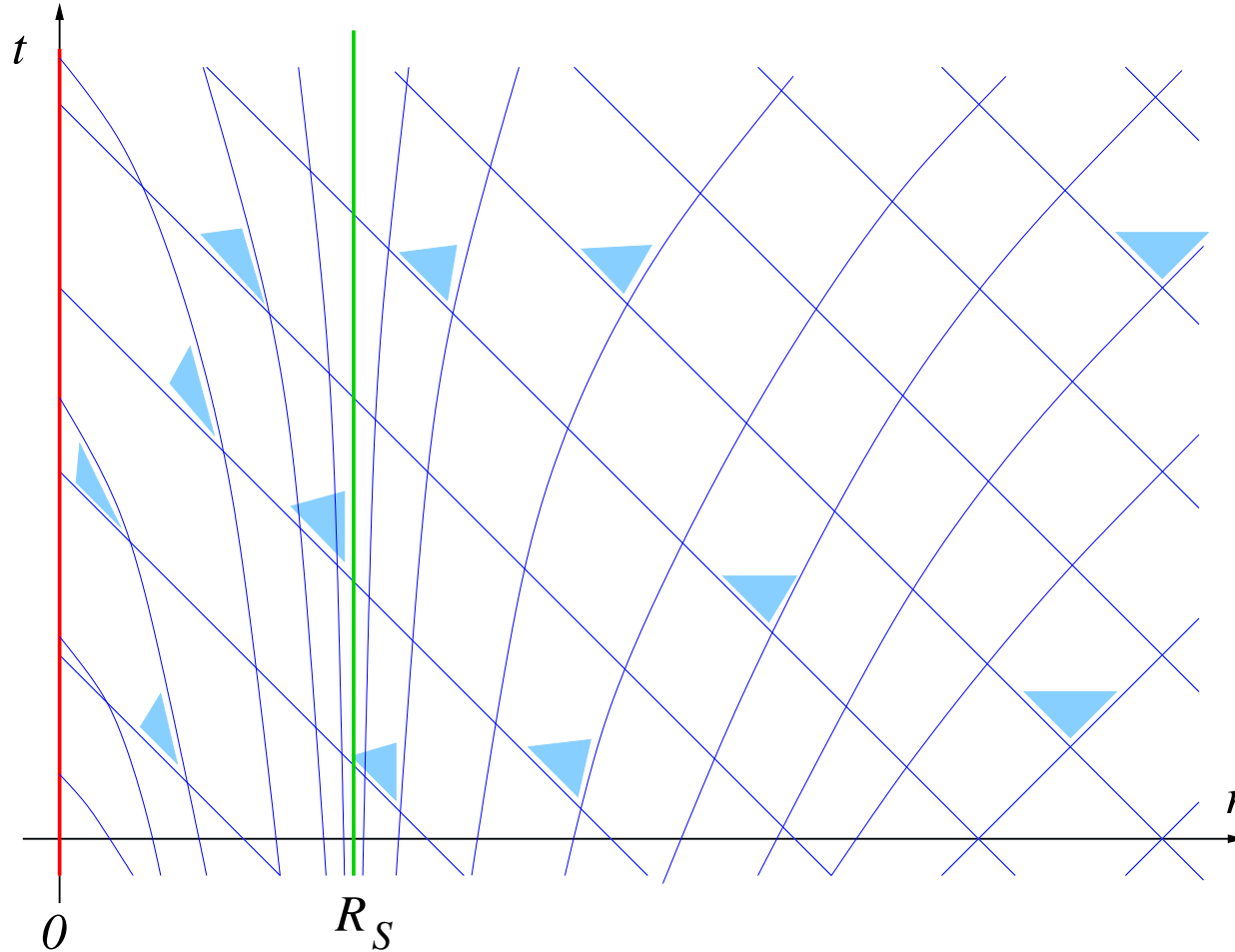
→ Agujero negro: Imposible escapar!

Espacio plano: La luz sigue **lineas 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**

Observación importante:

La formación de un agujero negro:

depende de la **densidad** del objeto

NO depende de la **masa**

Radio de Schwarzschild = radio crítico para formar un agujero negro

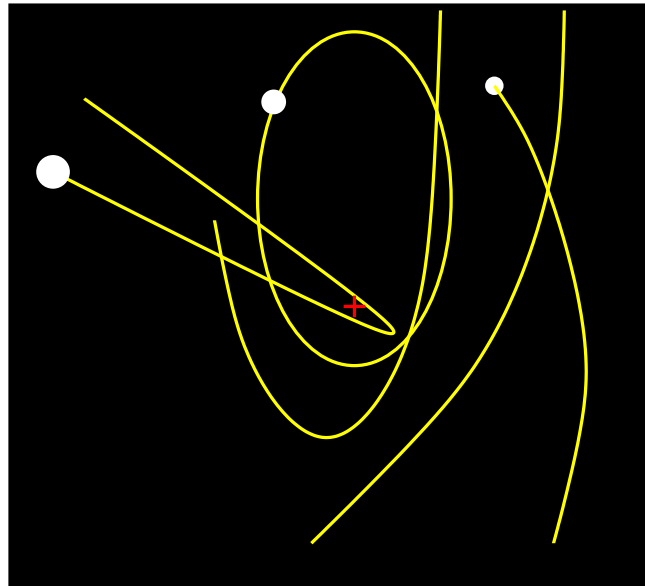
$$R_s = \frac{2G_N M}{c^2}$$

Objeto	Masa	R_s
Sol	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 1 M_\odot$	3 km
Tierra	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg} = 3 \cdot 10^{-6} M_\odot$	9 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

Agujeros negros estelares ($M \sim M_{\odot}$)



Agujeros negros supermasivos ($M \sim 10^9 M_{\odot}$):



—> Objeto de 4 millones de masas solares en el centro de la galaxia

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

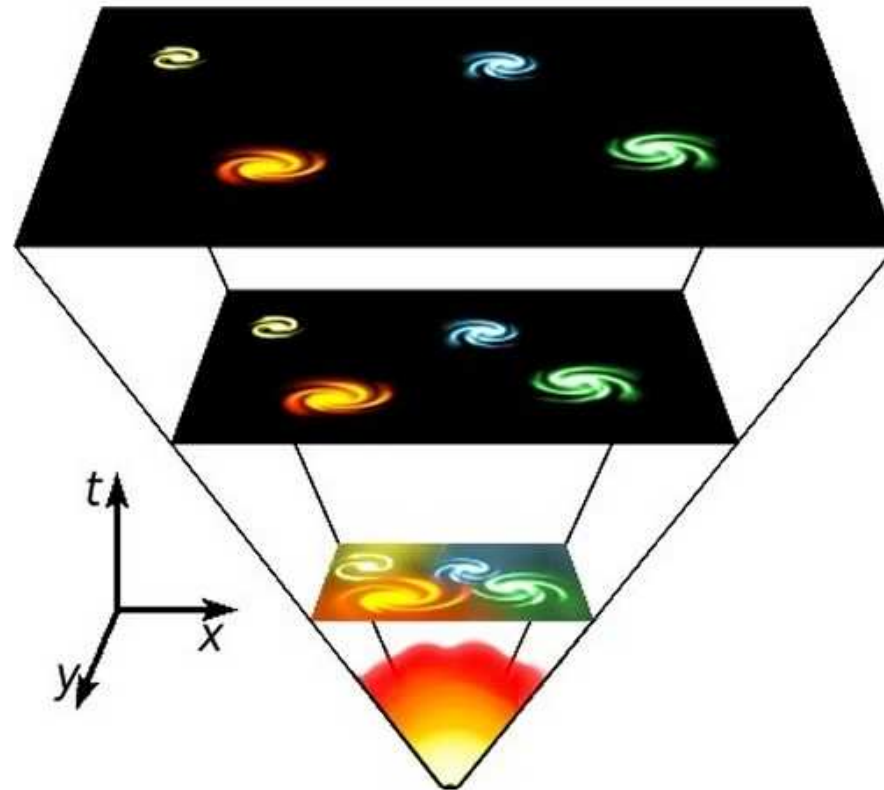
D. Cosmología

Gravedad determina la geometría del espaciotiempo

Gravedad determina la geometría del universo entero

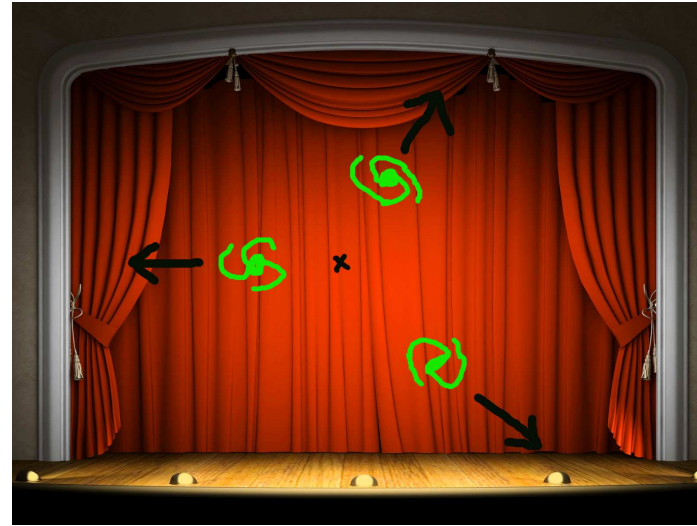
Cosmología: estudio de la forma y la evolución del universo entero

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

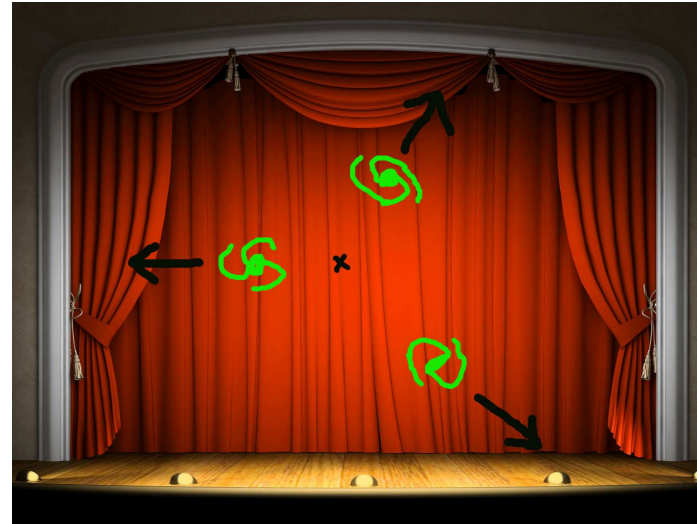


Todas las galaxias se alejan de nosotros, pero no somos el centro...

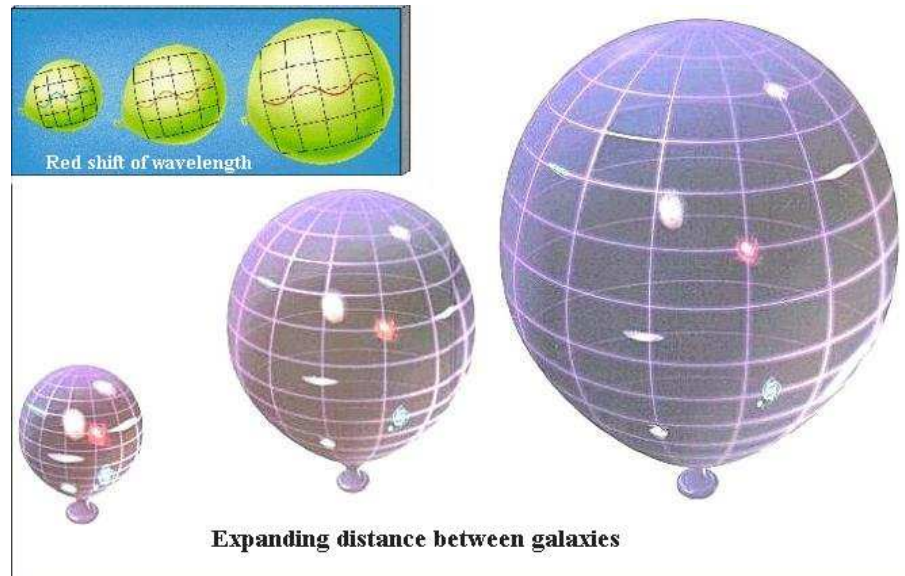
¡Ojo! Expansión \neq movimiento de galaxias por el espacio...



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

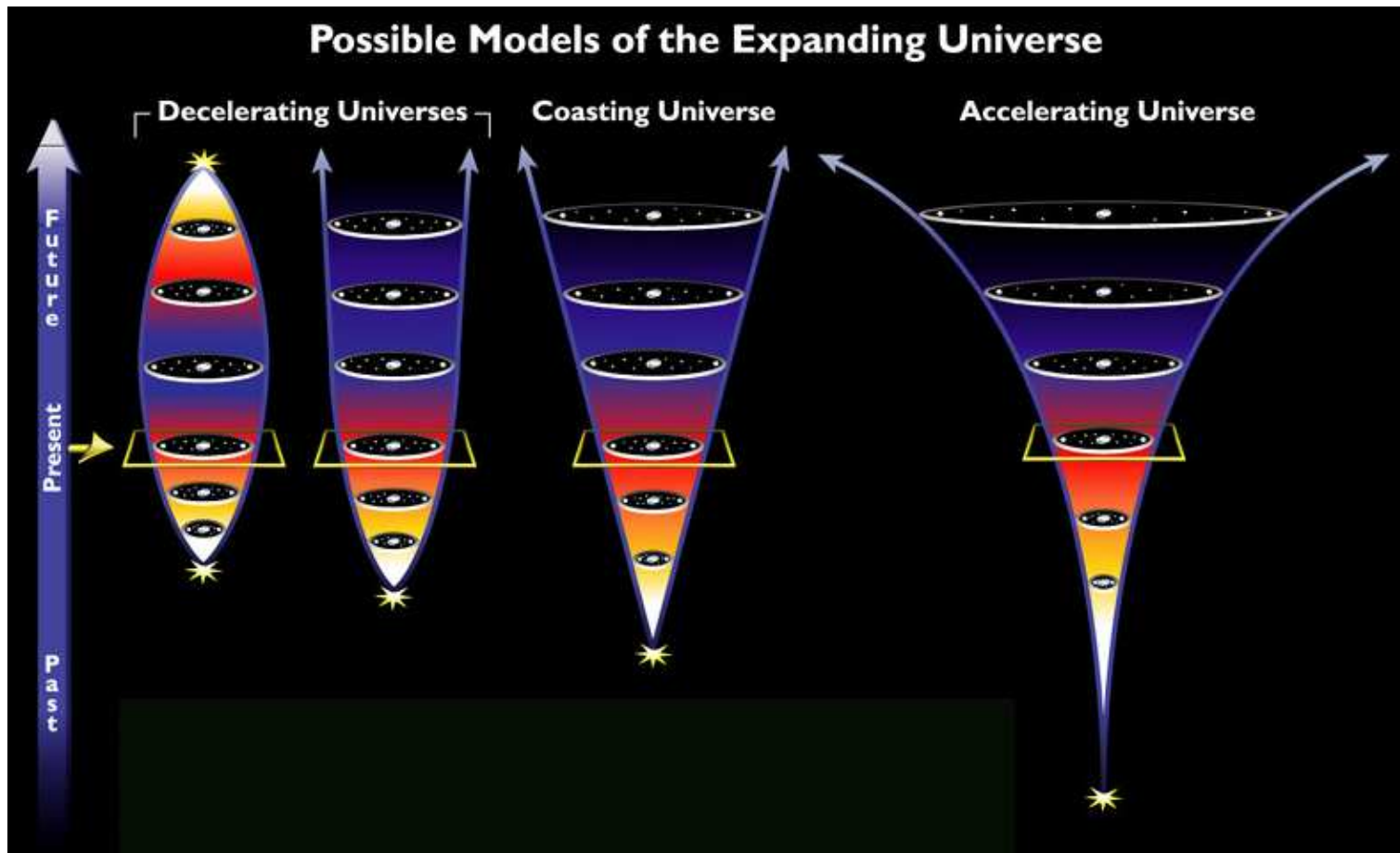


Es la **creación continua de espacio** nuevo...

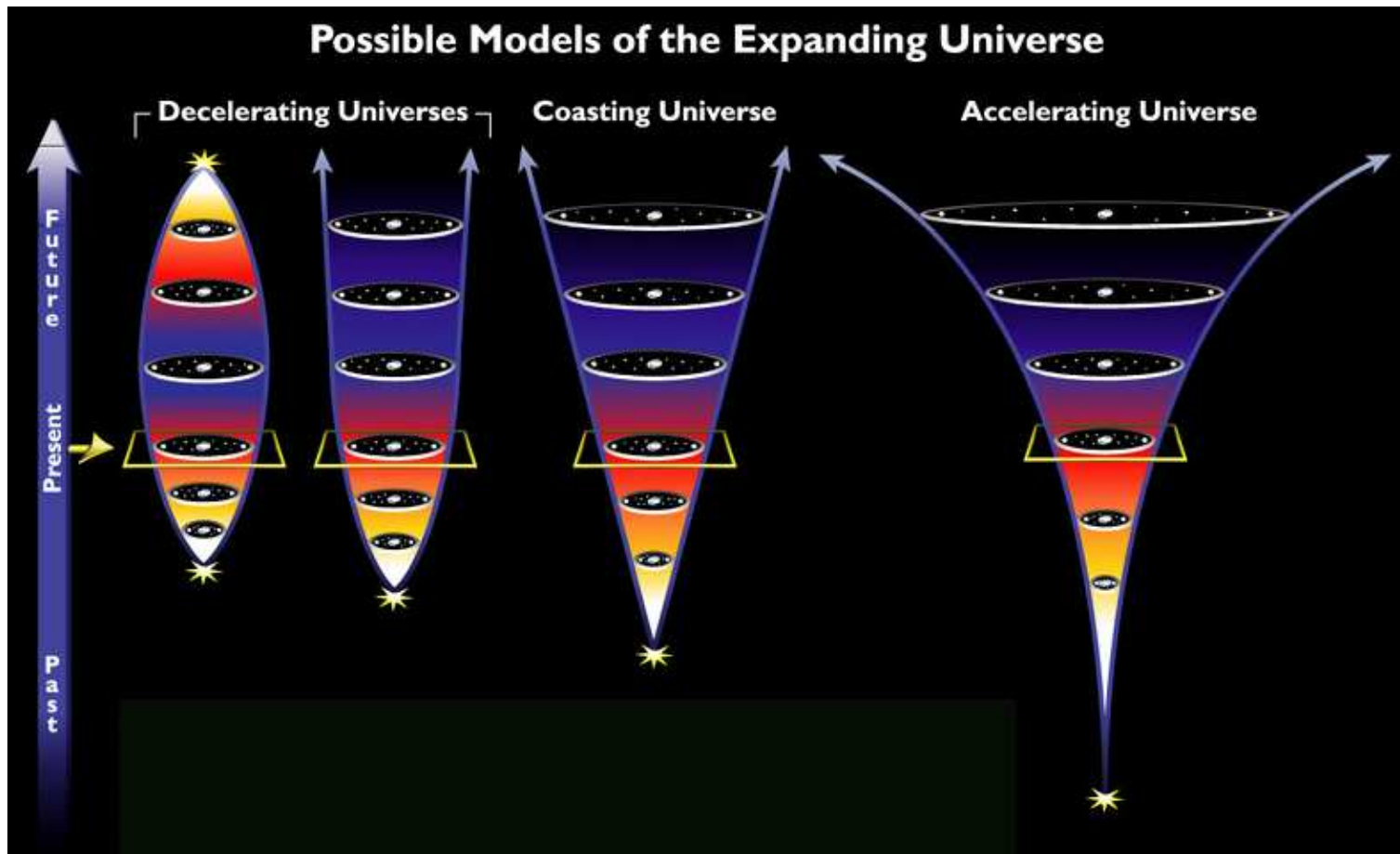


Recuérdase: el espacio no es un escenario estático, sino una parte dinámica!

Modelos cosmológicos:



Modelos cosmológicos:

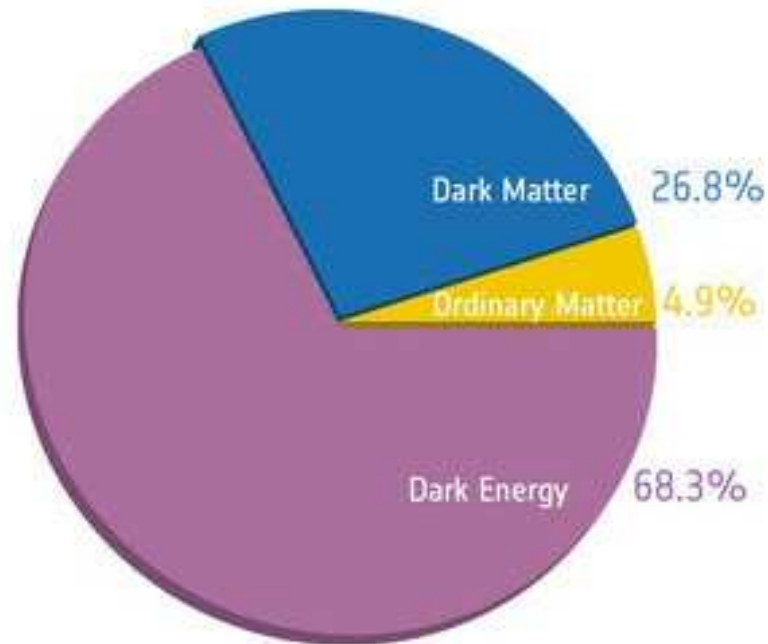


Nuestro universo: **expansión acelerada!**

Observaciones: supernova 1998

→ ¿Qué causa la aceleración?

Contenido del universo:

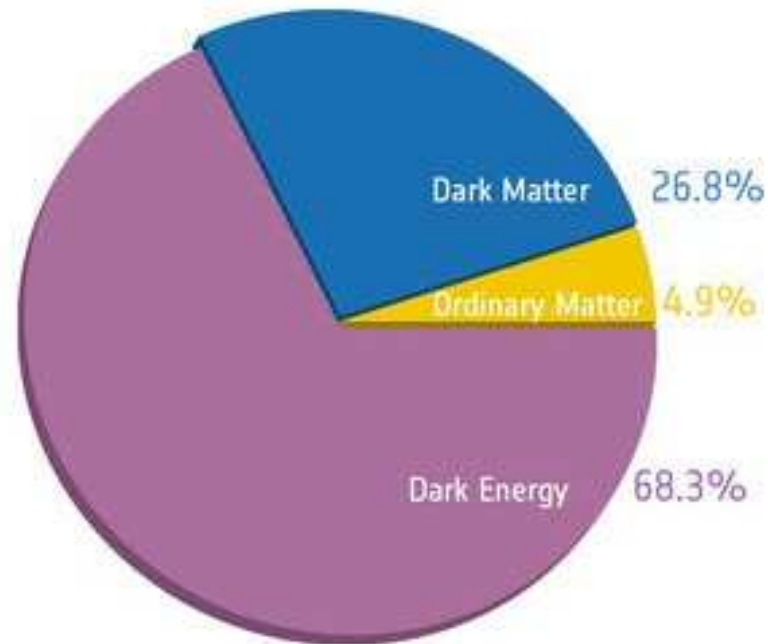


Materia ordinaria: átomos, estrellas, planetas, ...

Materia oscura: Forma desconocida de materia...

Energía oscura: Fuerza desconocida repulsiva...

Contenido del universo:



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

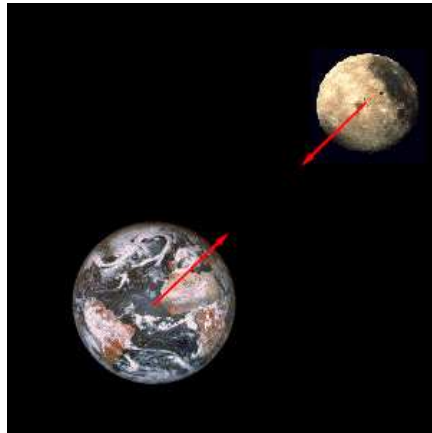
Materia oscura: Forma desconocida de materia...

Energía oscura: Fuerza desconocida repulsiva...

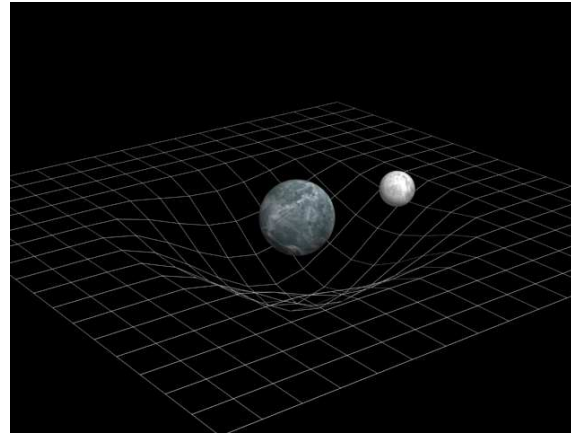
Sólo entendemos un 5 % del contenido del universo!

6. Resumen

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



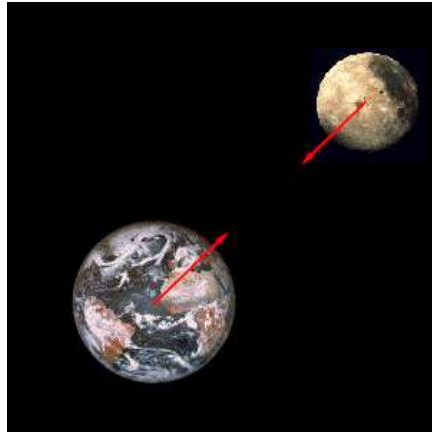
NO



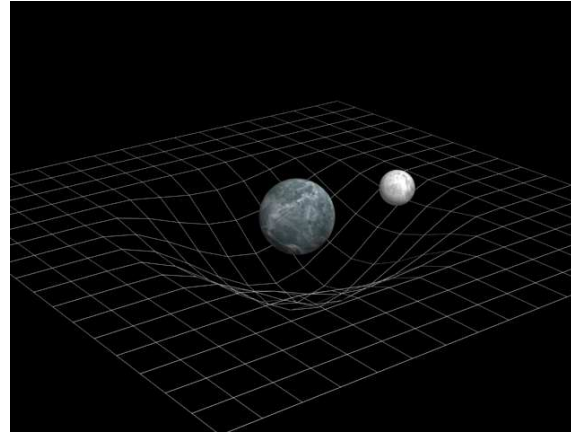
SÍ

6. Resumen

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



NO

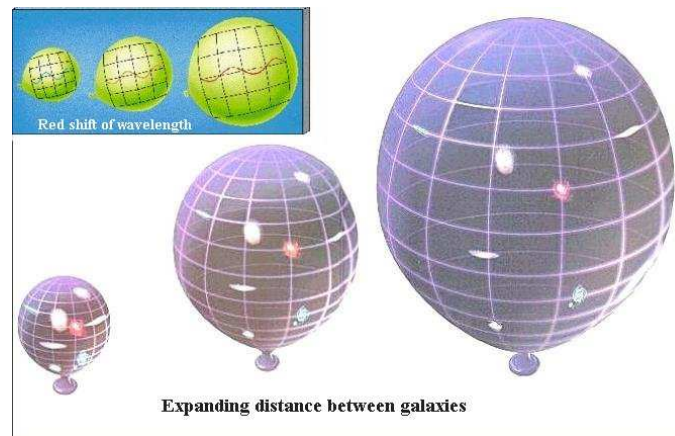


SÍ

- El espaciotiempo es dinámico

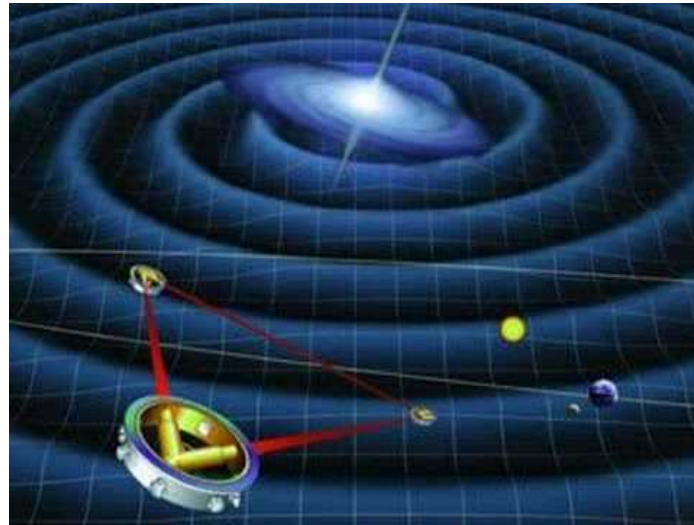


NO



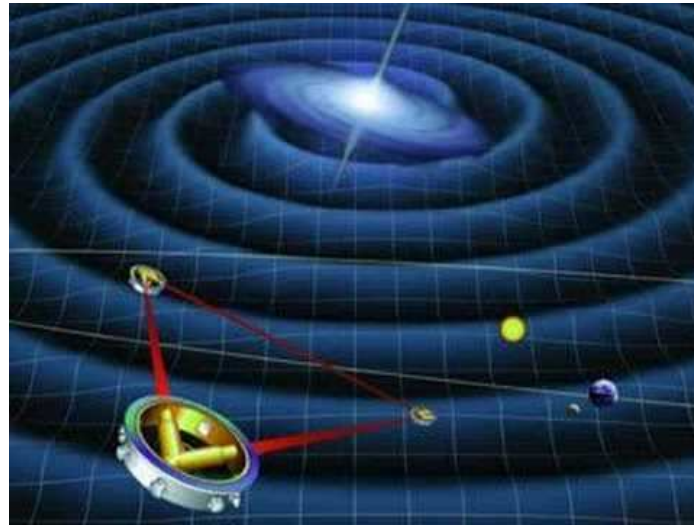
SÍ

- Hay muchas preguntas abiertas...

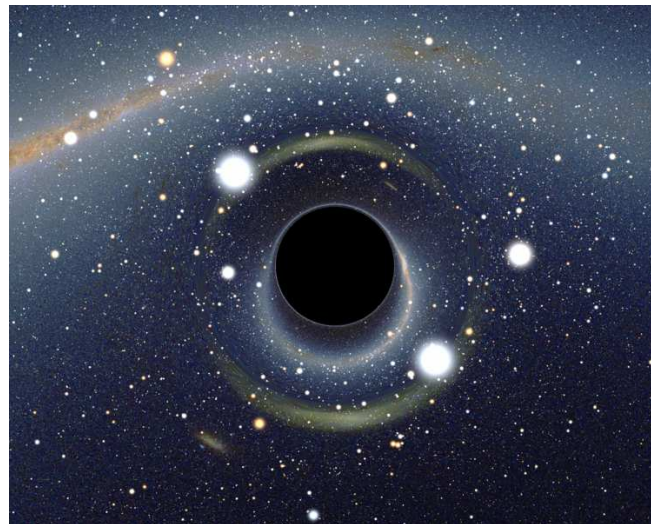


¿Detección de ondas gravitacionales?

- Hay muchas preguntas abiertas...

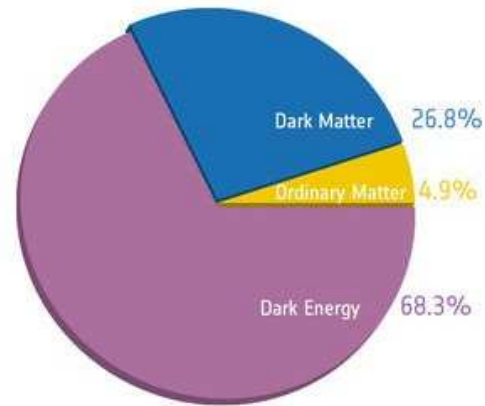


¿Detección de ondas gravitacionales?



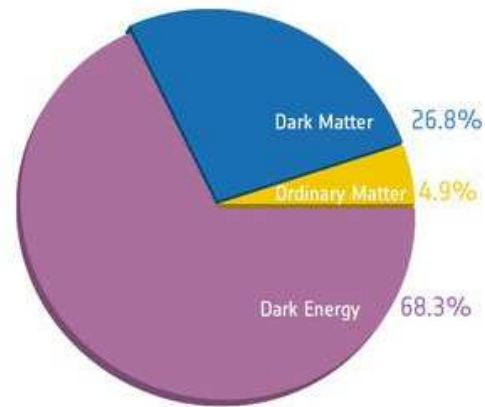
¿Física de agujeros negros?

- Hay muchas preguntas abiertas...

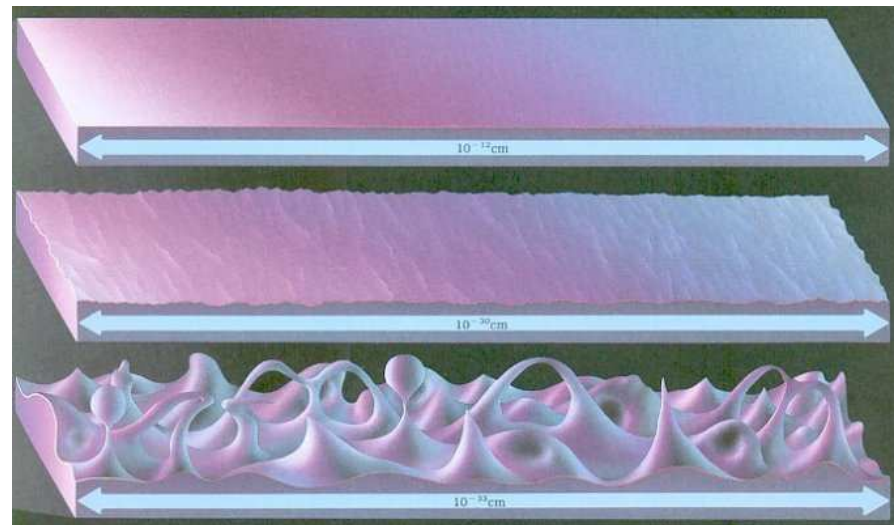


¿Contenido del universo?

- Hay muchas preguntas abiertas...



¿Contenido del universo?



¿Descripción cuántica de la gravedad?



La aventura sigue...



La aventura sigue...

¡Gracias por vuestra atención!

- 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

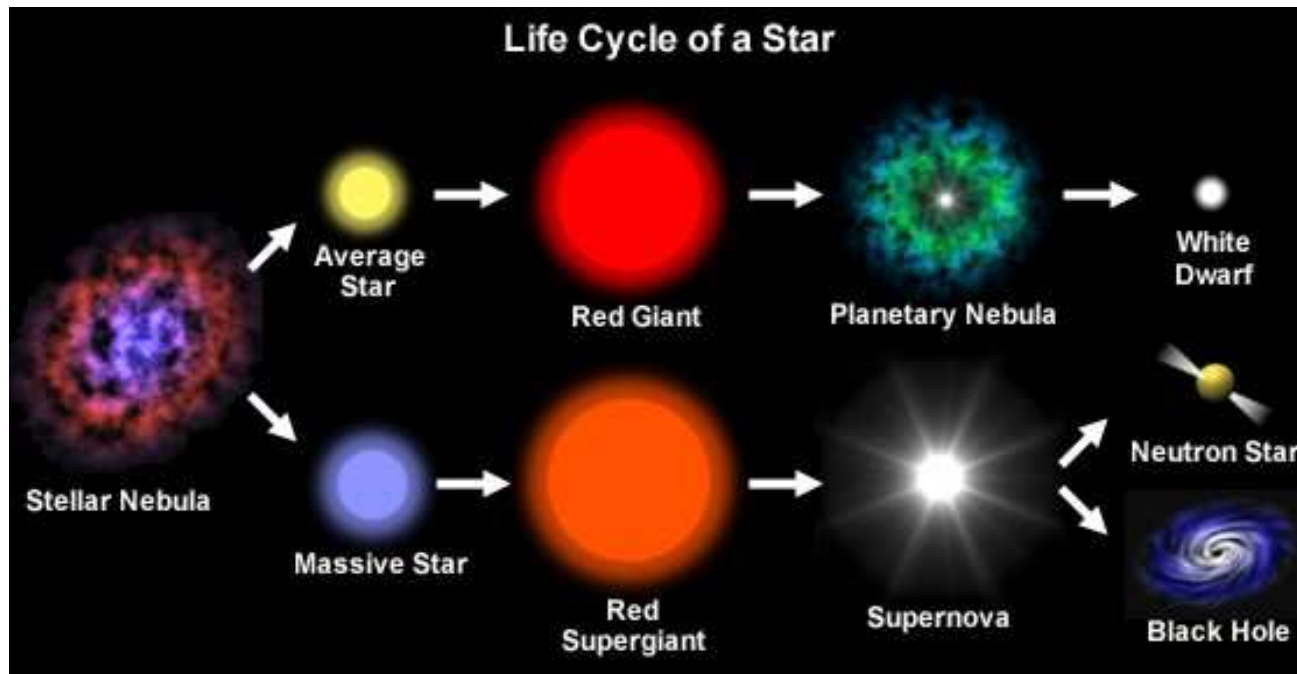
$$E \sim 10^{19} \text{ GeV} \sim 10^{15} \times E_{LHC}$$

- 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

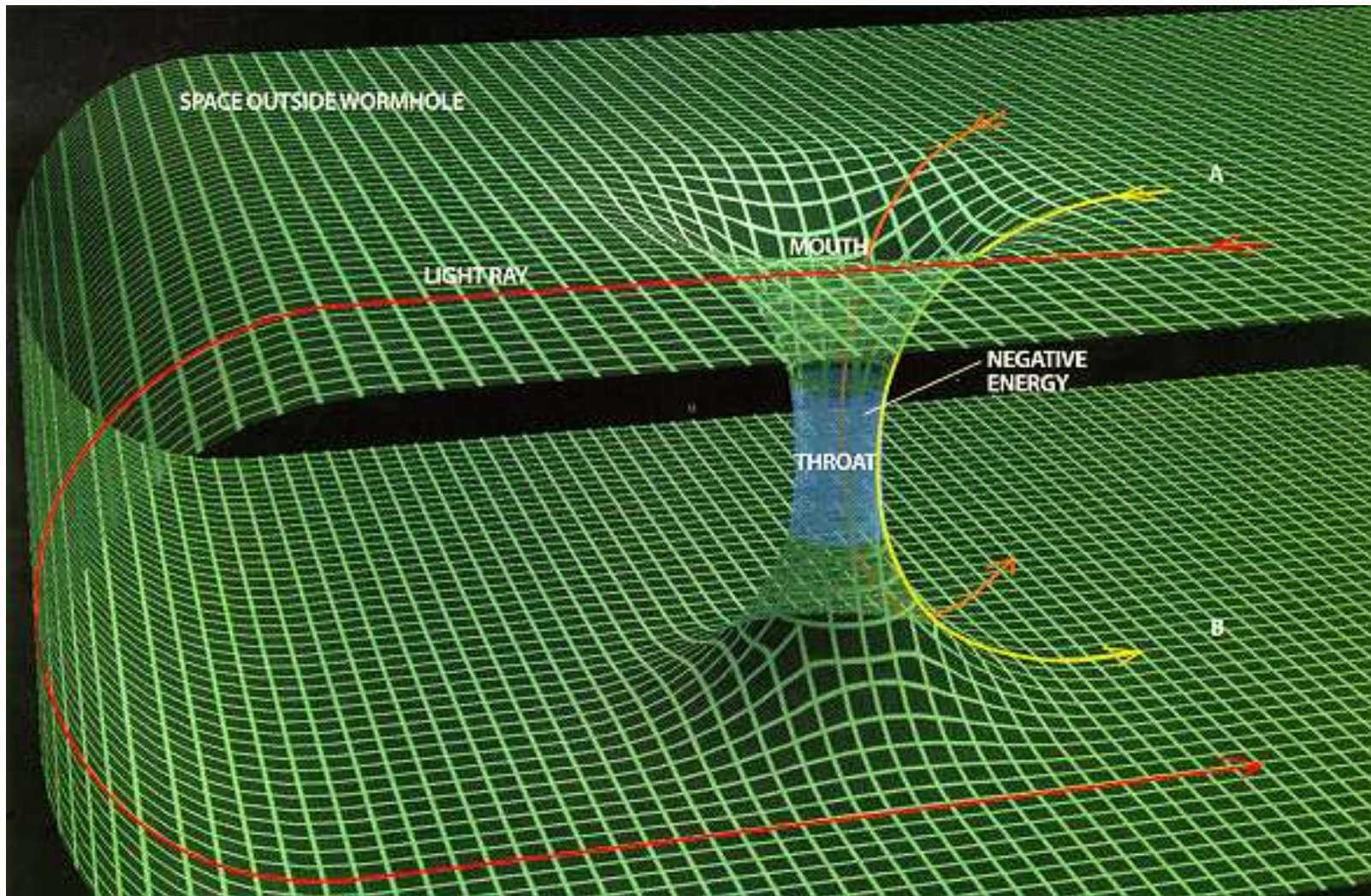
$$E \sim 10^{19} \text{ GeV} \sim 10^{15} \times E_{LHC}$$

- Santo Grial de la Física: problema fundamental!

Formación de agujeros negros

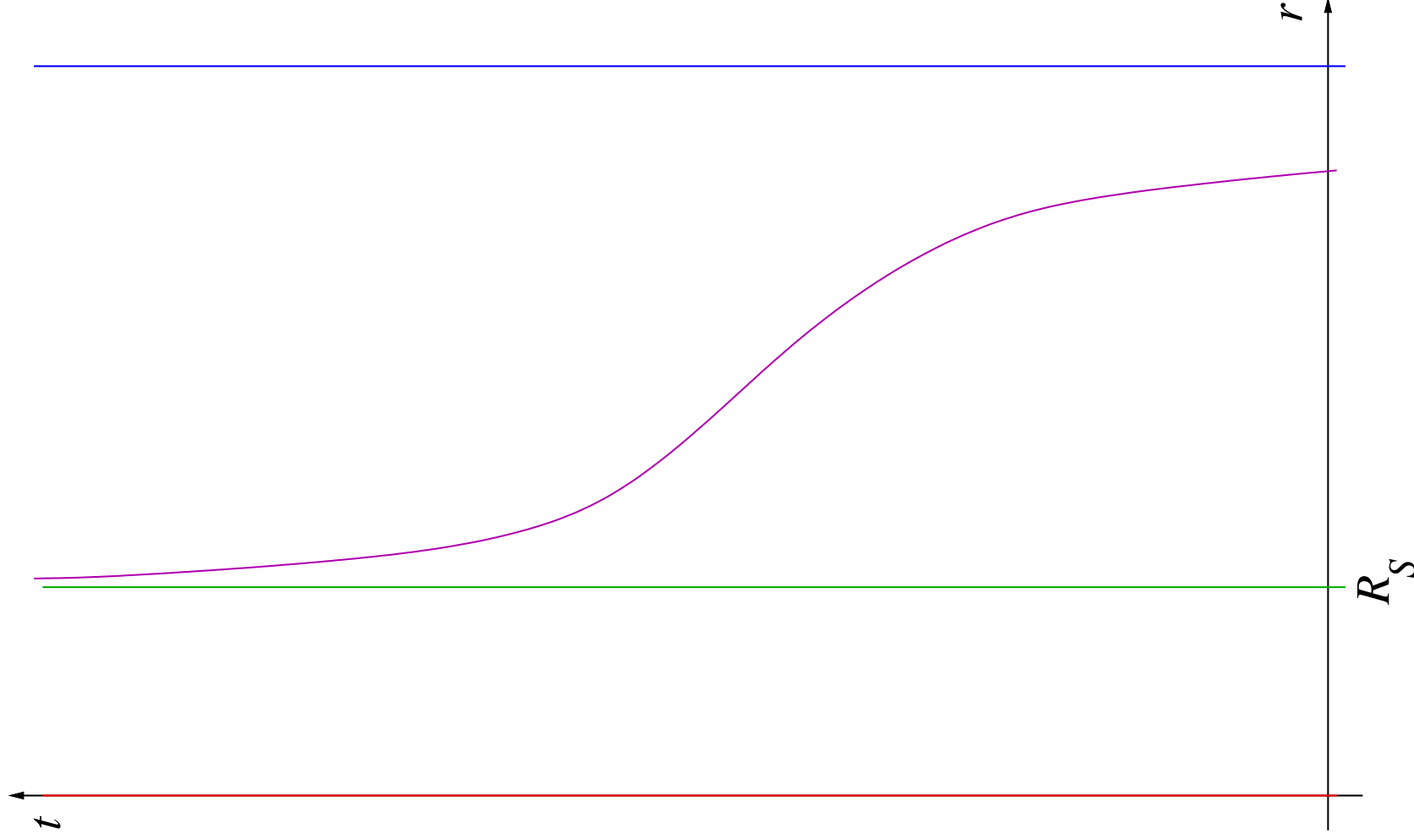


Objeto	Masa	radio
Enano blanco:	$M < 1,4 M_{\odot}$	5000 <i>km</i>
Estrella de neutrones:	$1,4 M_{\odot} < M < 2,3 M_{\odot}$	50 <i>km</i>
Agujero negro:	$M > 2,3 M_{\odot}$	R_S



... desde donde se mira:

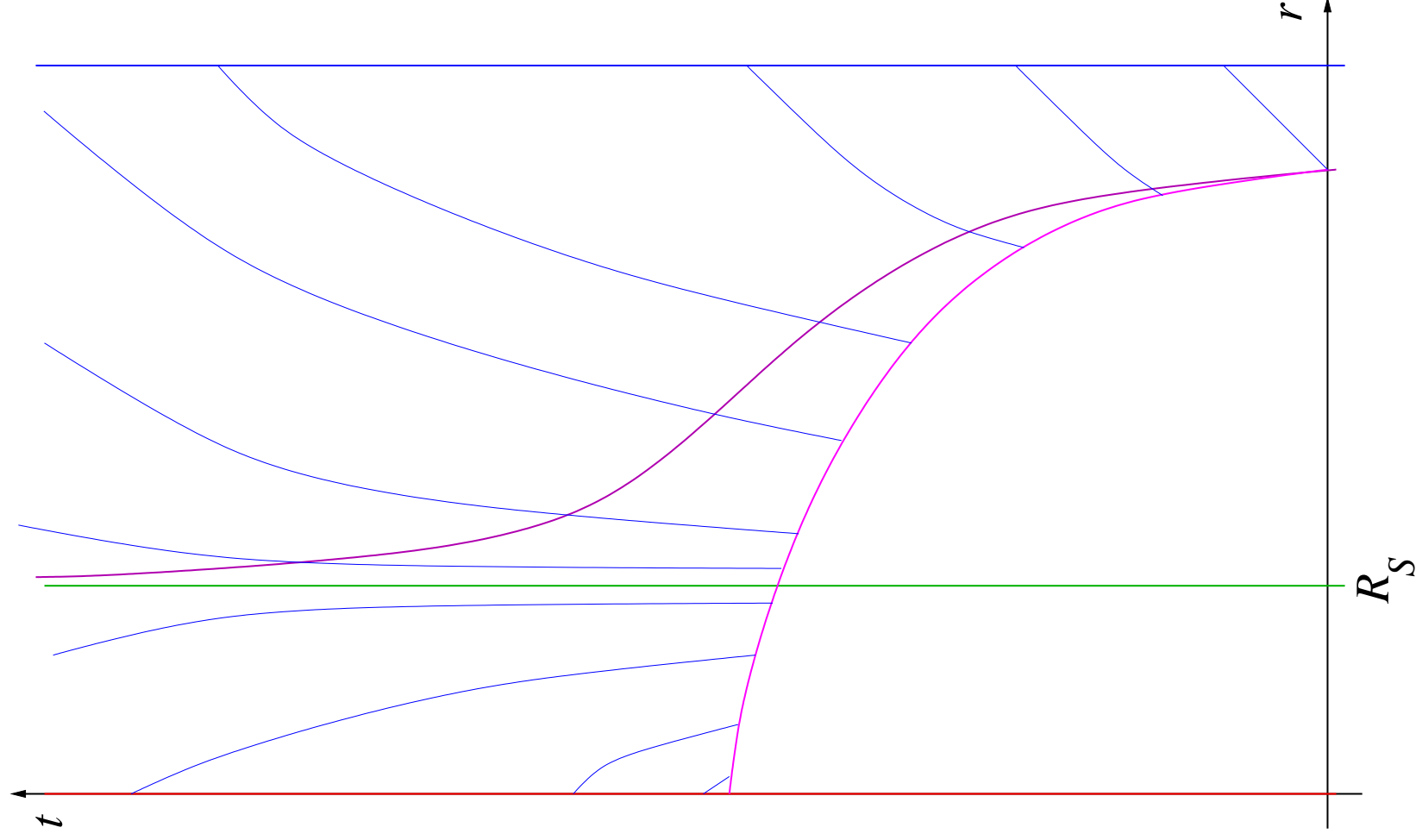
el observador lejano



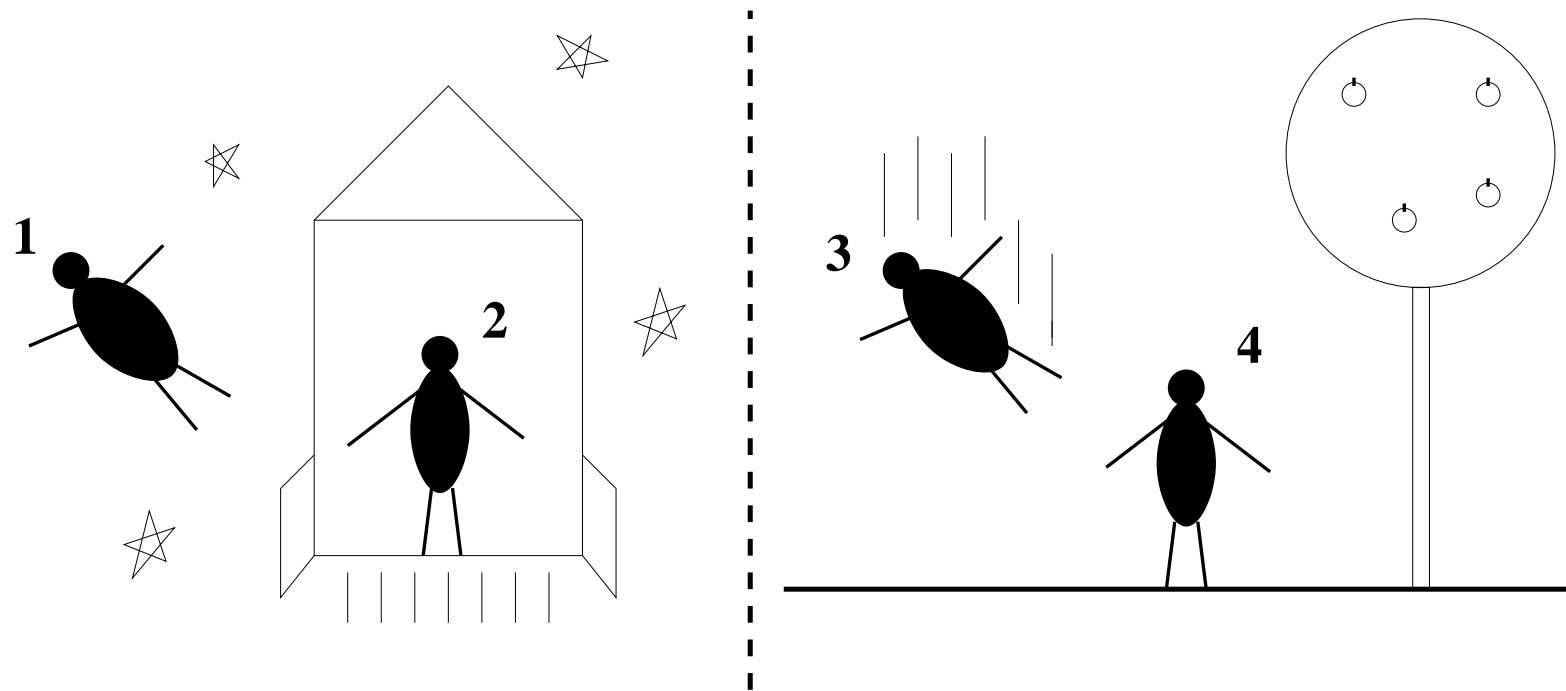
Parece imposible cruzar el horizonte

... 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	$\eta_{\mu\nu}$	$g_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial y^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial y^\beta} \eta_{\mu\nu}$	$\eta_{\alpha\beta} + \mathcal{O}(x^2)$	$g_{\mu\nu}$
$\Gamma_{\mu\nu}^\rho$	$= 0$	$\neq 0$	$= 0 + \mathcal{O}(x)$	$\neq 0$
$R_{\mu\nu\rho}{}^\lambda$	$= 0$	$= 0$	$\neq 0$	$\neq 0$