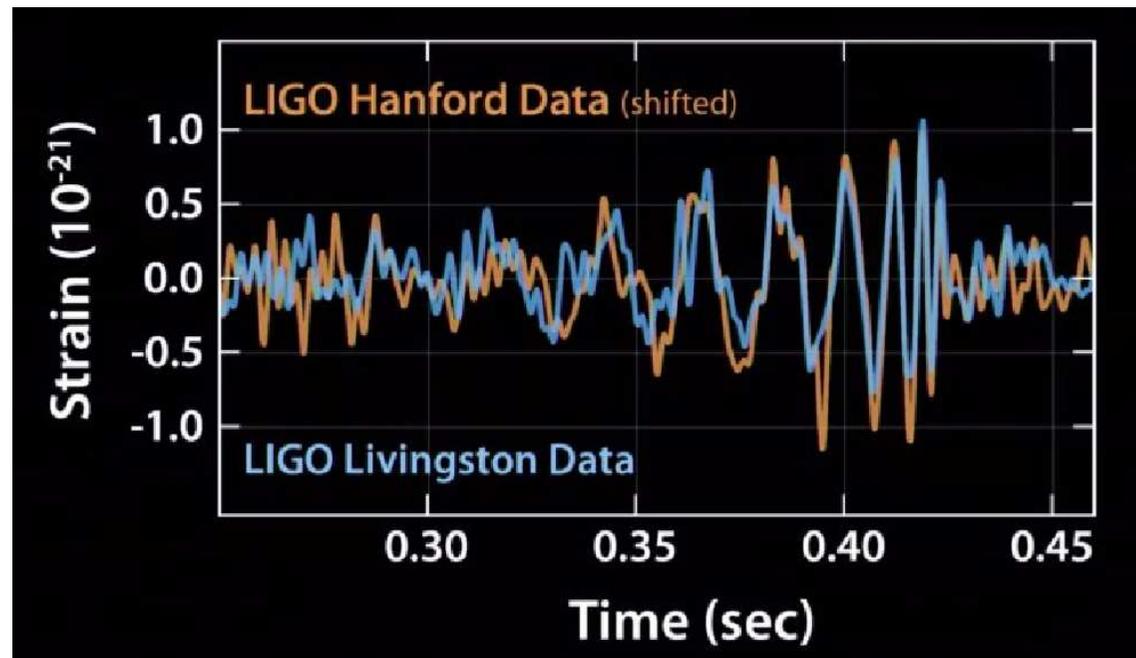




Las ondas gravitacionales al alcance de todos



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos - UGR
Centro Andaluz de Física de Partículas Elementales

Plan de la Conferencia

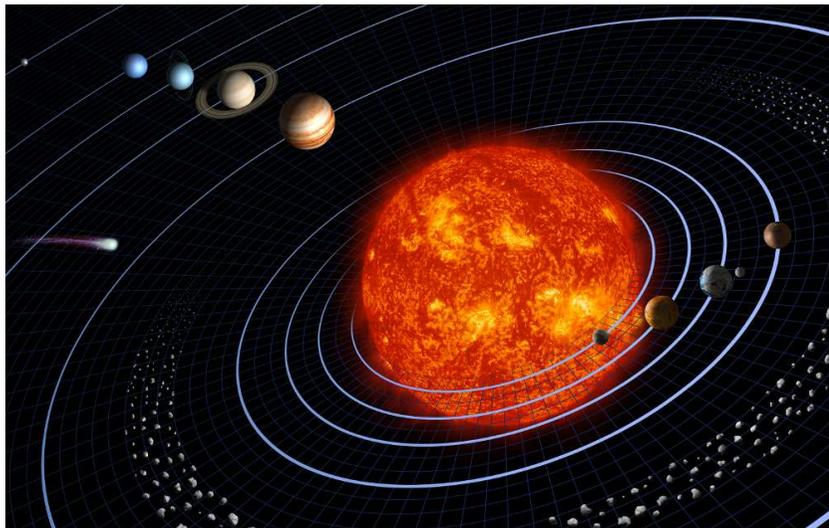
1. Gravedad y Relatividad General
2. Ondas gravitacionales
3. Un poco de historia
4. La detección directa de LIGO
5. ¿Y ahora qué...?

1. Gravedad y Relatividad General

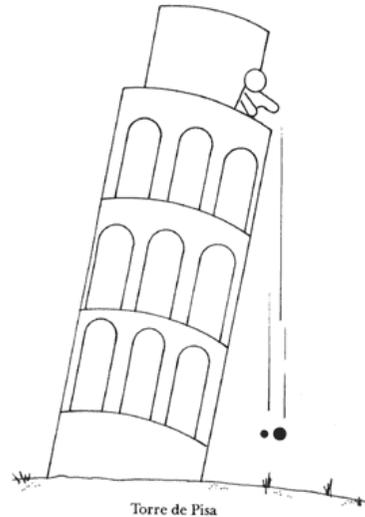
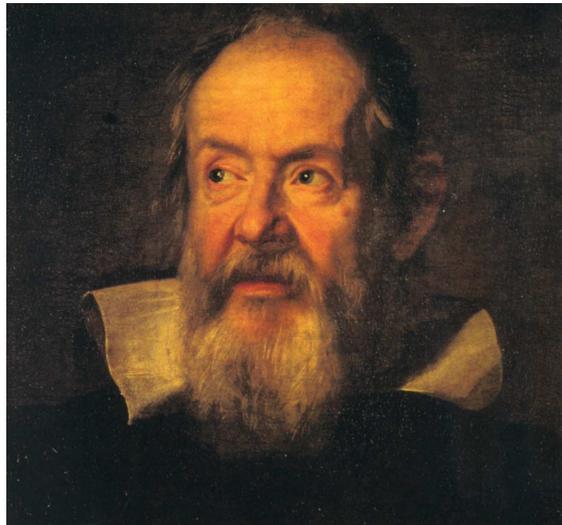
Gravedad es la fuerza más familiar y la menos entendida



Domina el universo a todas las escalas: $10^{-2} \text{ m} \lesssim L \lesssim 10^{26} \text{ m}$



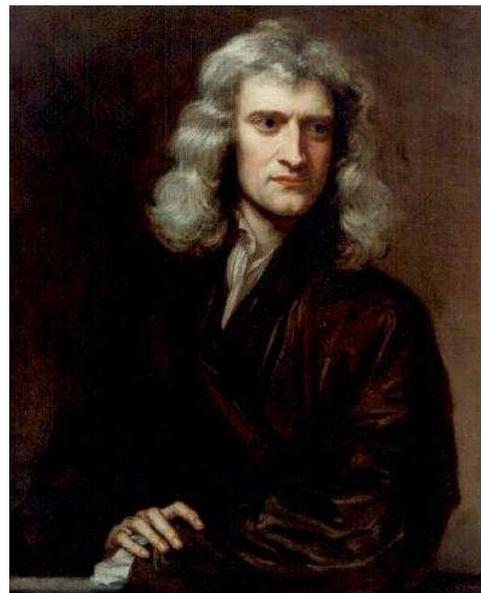
Estudiada por Galilei y postulada por Newton



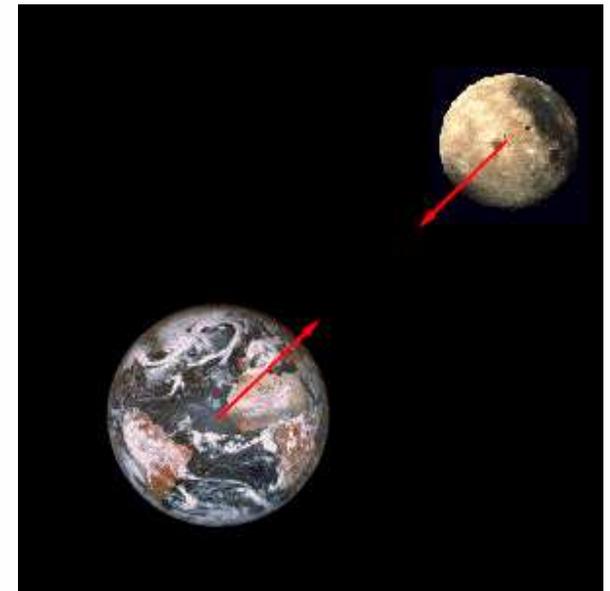
Caída libre:

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

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

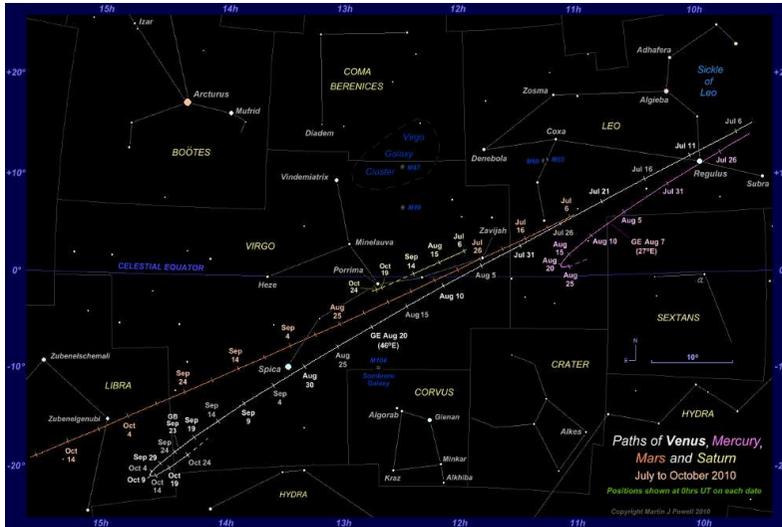


$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

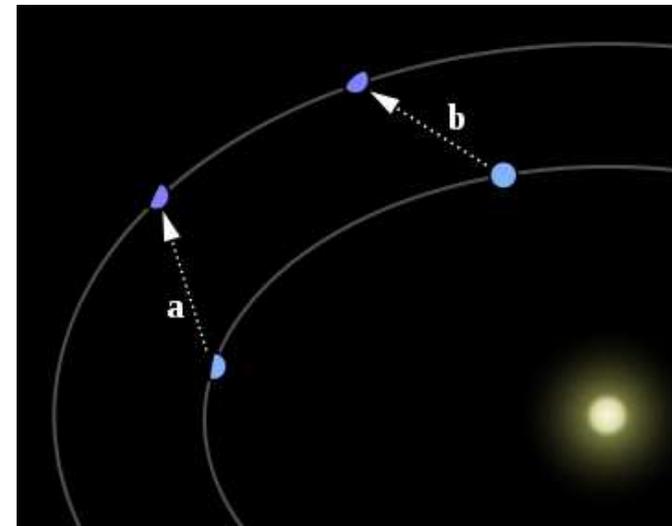
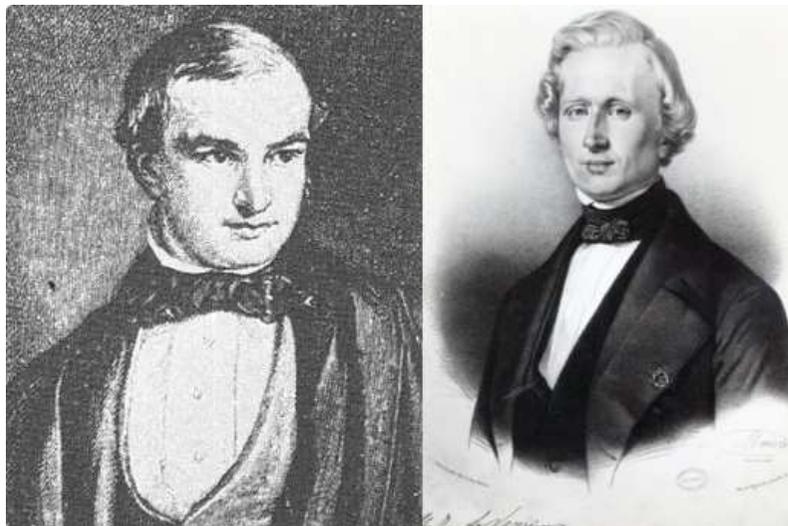


→ Fuerza universal entre cualesquiera dos masas

Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias

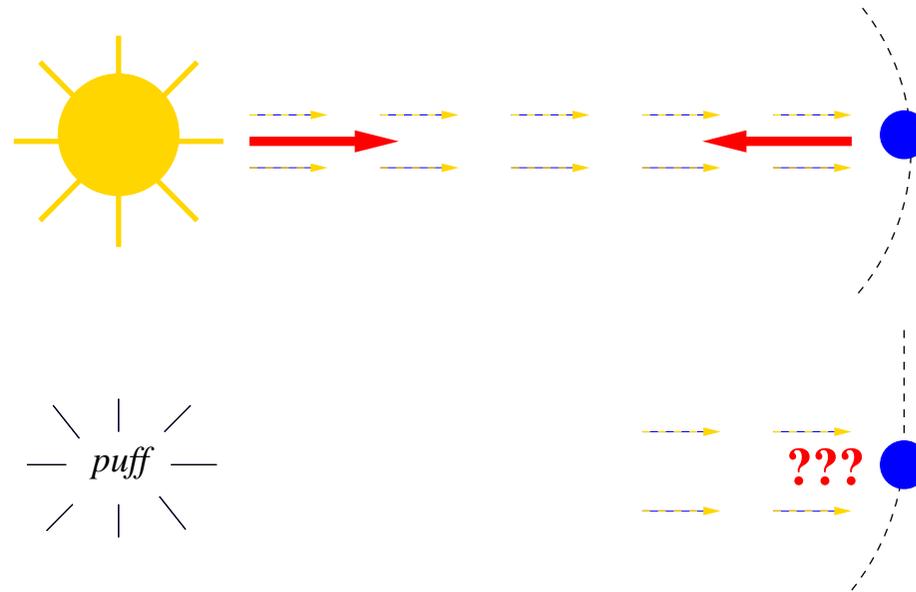


Hasta predijo la existencia de Neptuno por perturbaciones en órbita de Urano



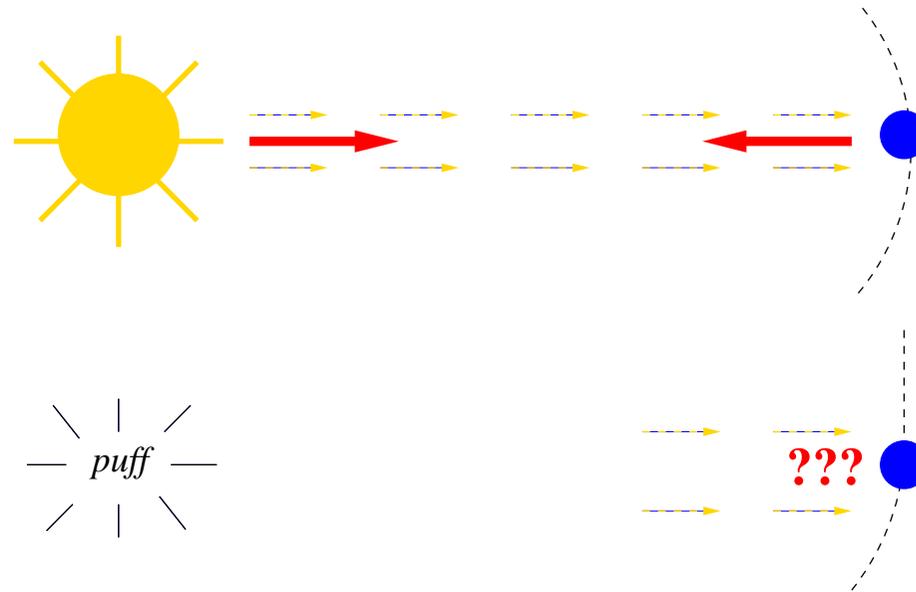
Couch-Adams & Le Verrier, 1845

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



Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

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

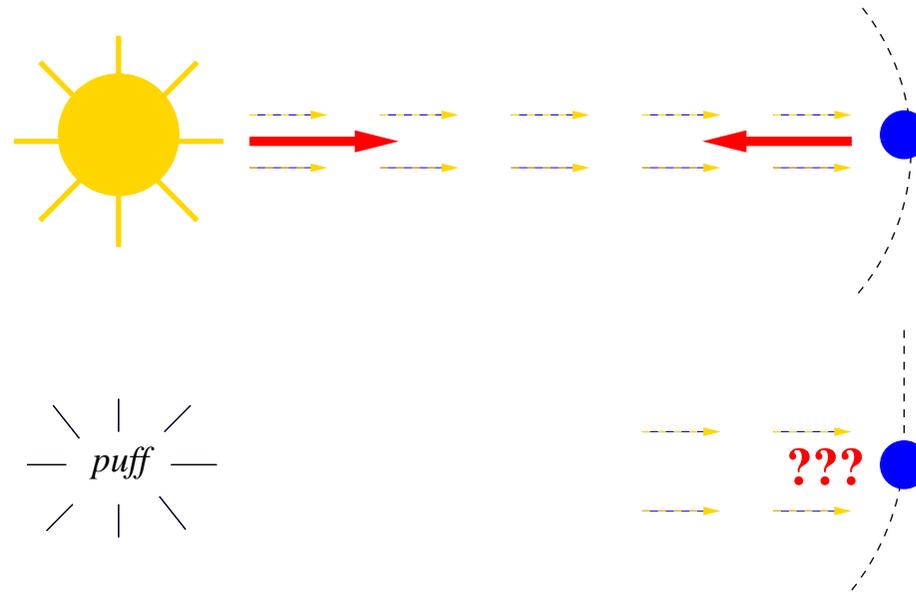


Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

Einstein (1905):

C
300 000 km/s

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



Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

Einstein (1905):

C
300 000 km/s

→ **Clara contradicción!!!**

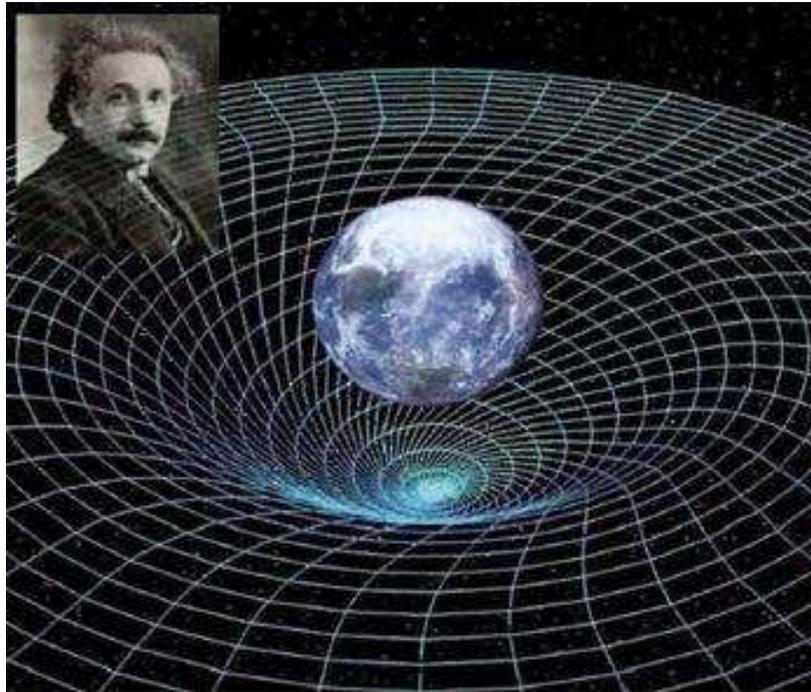
La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

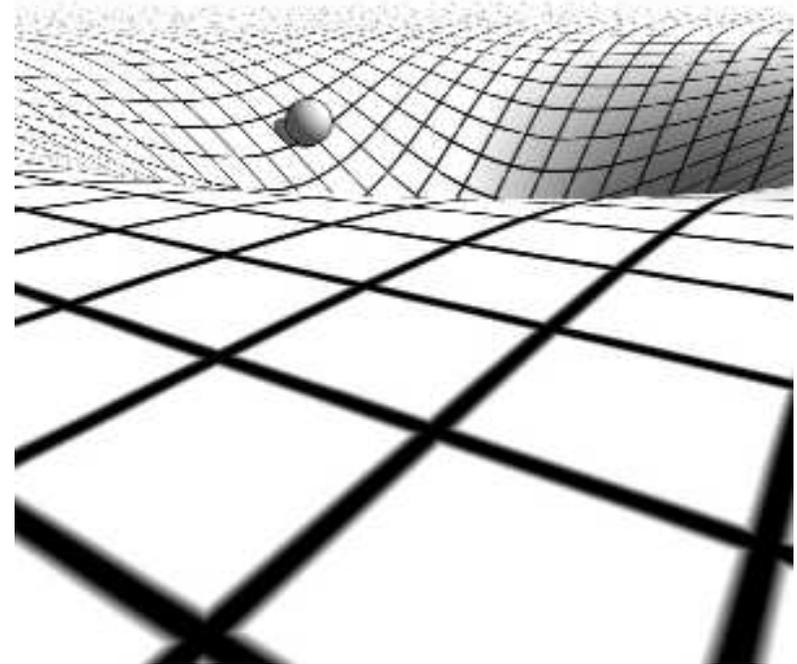
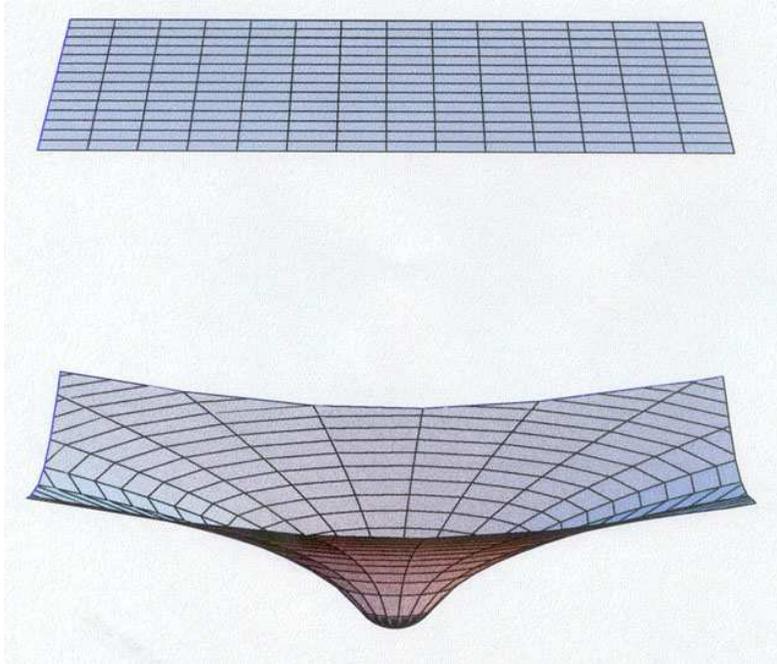
La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

—→ Nueva teoría de la gravedad: **Relatividad General**

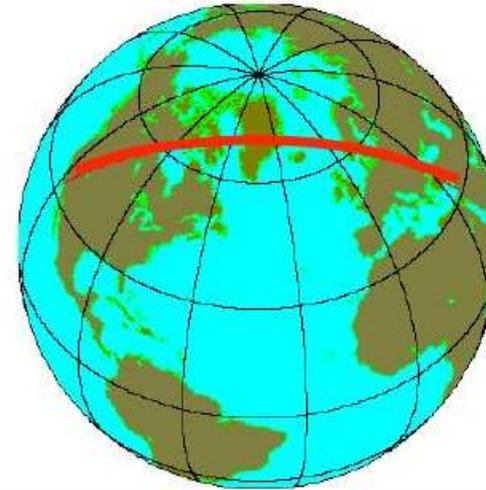
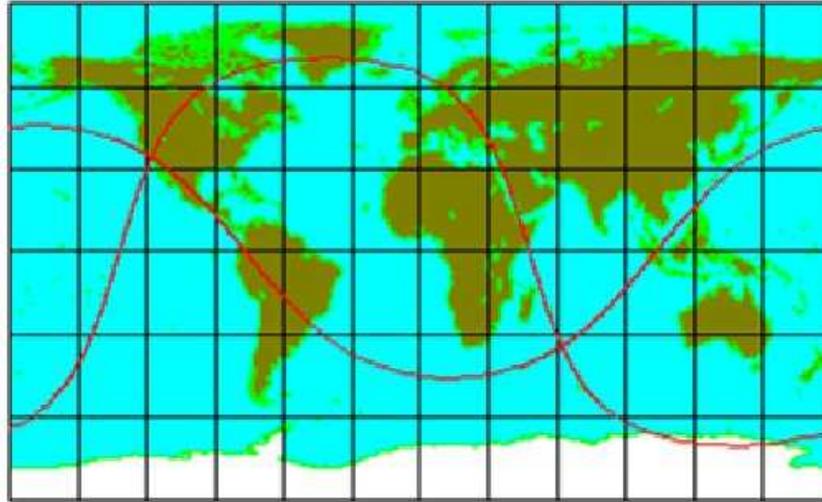


Gravedad = espacio curvo

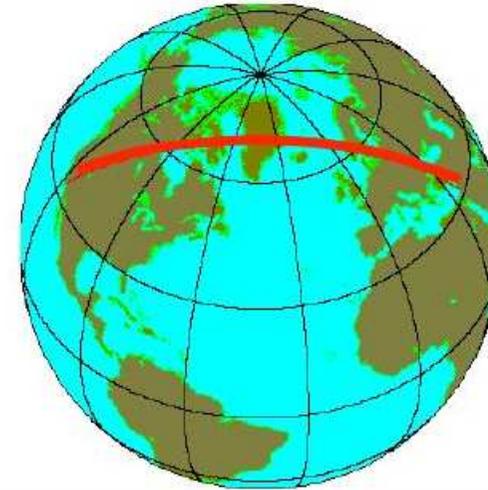
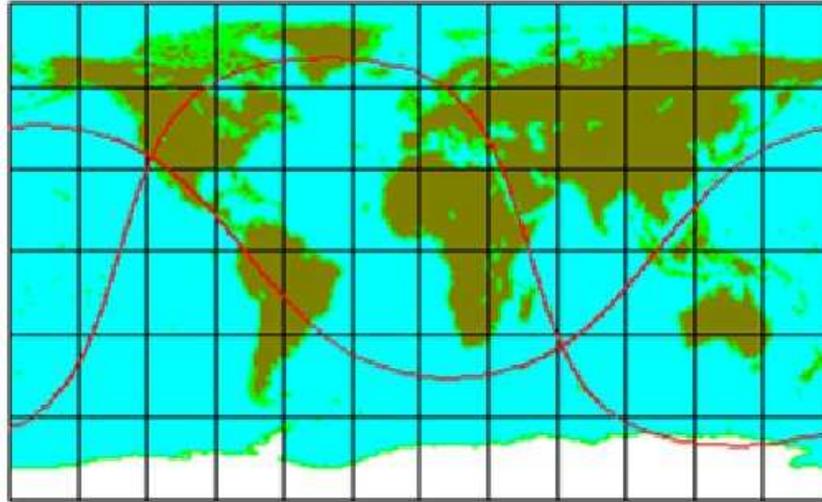


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

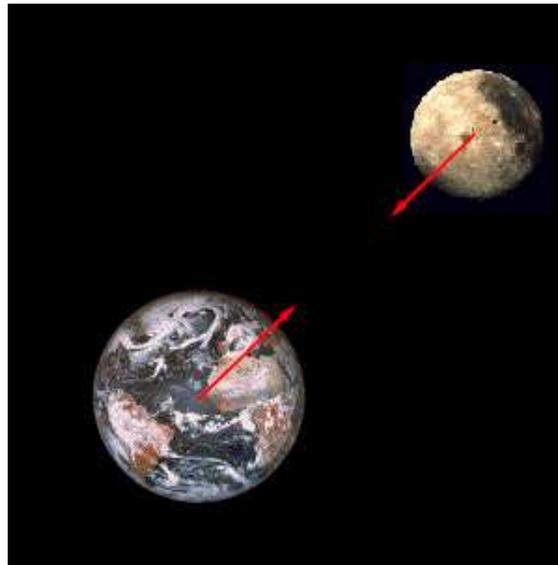
La materia sigue la trayectoria más recta posible



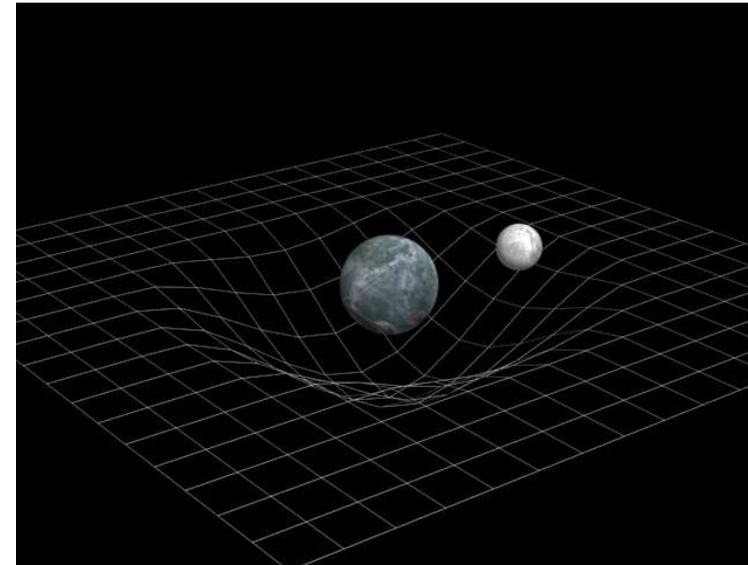
La materia sigue la trayectoria más recta posible



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

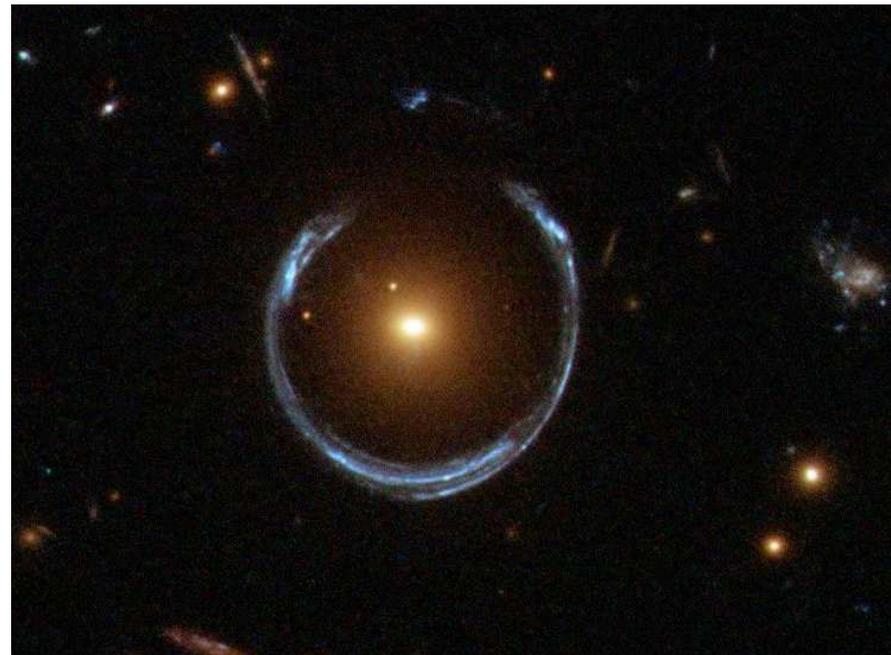
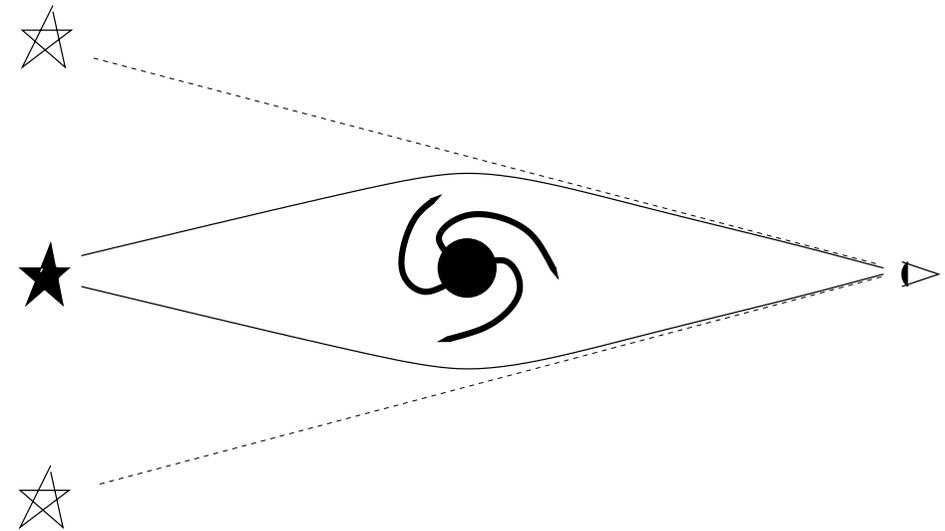
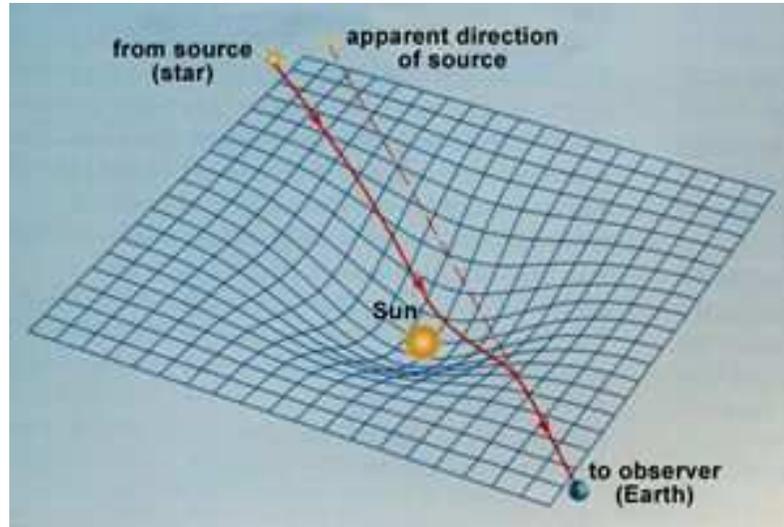


NO



SÍ

No sólo la materia, sino también la luz



Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- Precesión del perihelio de Mercurio:

predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)

observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo

Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**
 - predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)
 - observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo
- **Desviación de la luz:** 0.03% para Sol (1998)

Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**
 - predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)
 - observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo
- **Desviación de la luz:** 0.03% para Sol (1998)
- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)

Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**
 - predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)
 - observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo
- **Desviación de la luz:** 0.03% para Sol (1998)
- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)
- **Dilatación temporal gravitatoria:** $7 \cdot 10^{-5}\%$ (Gravity Probe A, 1976)
Efecto notable en GPS

Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**
 - predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)
 - observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo
- **Desviación de la luz:** 0.03% para Sol (1998)
- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)
- **Dilatación temporal gravitatoria:** $7 \cdot 10^{-5}\%$ (Gravity Probe A, 1976)
Efecto notable en GPS
- **Efecto geodético:** 0.5% (Gravity Probe B, 2005)
- **Efecto Lenz-Thirring:** 19% (Gravity Probe B, 2005)

Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**
 - predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)
 - observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo
- **Desviación de la luz:** 0.03% para Sol (1998)
- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)
- **Dilatación temporal gravitatoria:** $7 \cdot 10^{-5}\%$ (Gravity Probe A, 1976)
Efecto notable en GPS
- **Efecto geodético:** 0.5% (Gravity Probe B, 2005)
- **Efecto Lenz-Thirring:** 19% (Gravity Probe B, 2005)
- **Predicciones cosmológicas:**
 - fondo cósmico de microondas a $2,7K$
 - abundancias de elementos primordiales: 75% H y 25% He

Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**
 - predic: 574.64 ± 0.69 arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)
 - observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo
- **Desviación de la luz:** 0.03% para Sol (1998)
- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)
- **Dilatación temporal gravitatoria:** $7 \cdot 10^{-5}\%$ (Gravity Probe A, 1976)
Efecto notable en GPS
- **Efecto geodético:** 0.5% (Gravity Probe B, 2005)
- **Efecto Lenz-Thirring:** 19% (Gravity Probe B, 2005)
- **Predicciones cosmológicas:**
 - fondo cósmico de microondas a $2,7K$
 - abundancias de elementos primordiales: 75% H y 25% He
- **Ondas gravitacionales?** Predichas por Einstein en 1916

2. Ondas gravitacionales

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

2. Ondas gravitacionales

Wheeler: La materia indica cómo se curva el espacio.

El espacio indica cómo se mueve la materia.

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física



NO



más como...

2. Ondas gravitacionales

Wheeler: La materia indica cómo se curva el espacio.

El espacio indica cómo se mueve la materia.

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física

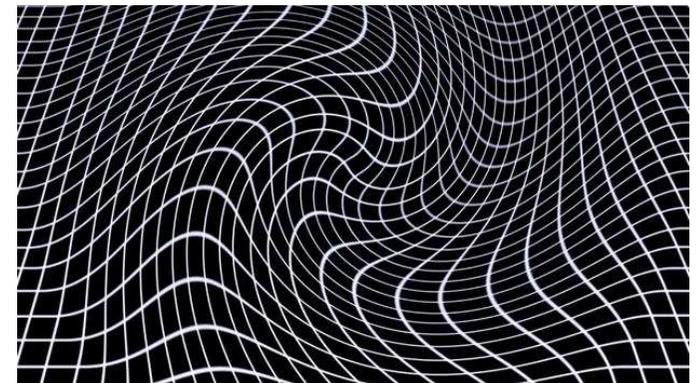


NO



más como...

- Interacciona con el contenido de energía y materia
- Tiene dinámica propia: puede cambiar de forma y tamaño



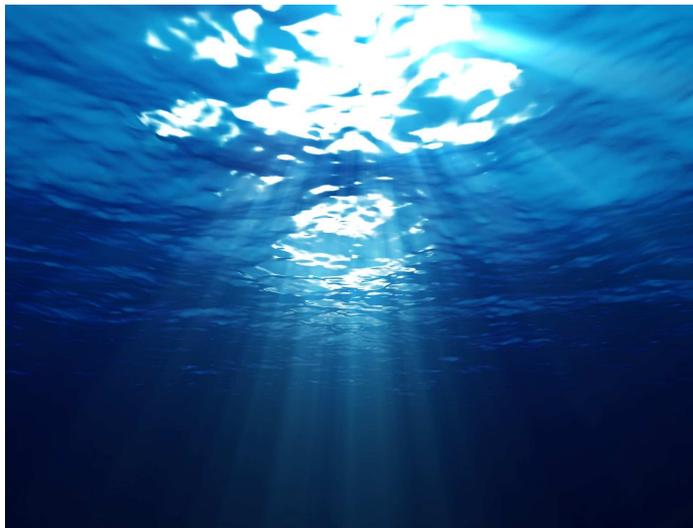
Ondas gravitacionales =
perturbaciones en el espaciotiempo que se
propagan solos



Ondas gravitacionales =
perturbaciones en el espaciotiempo que se
propagan solos



¡OJO! No son ondas *de algo* propagando por el espaciotiempo
Son oscilaciones del espaciotiempo mismo...



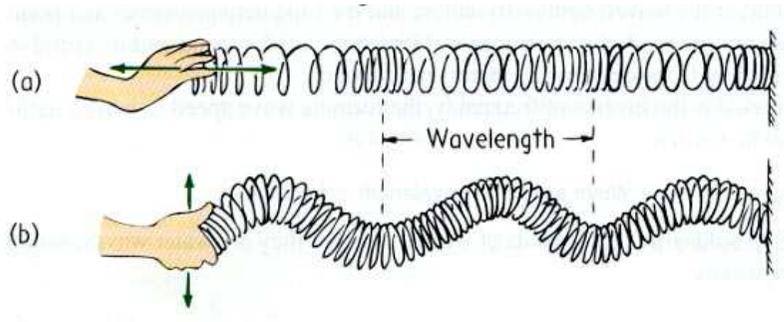
NO



SÍ

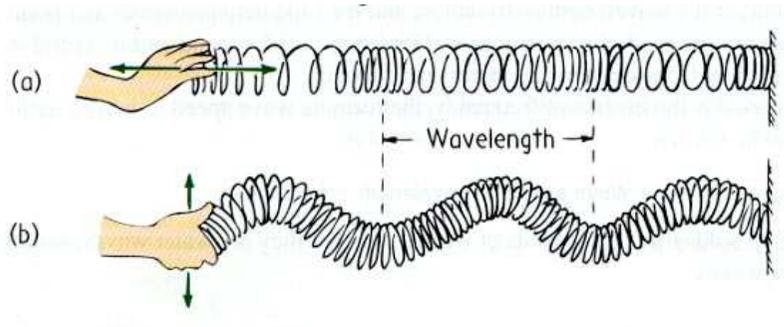
Predicciones de Relatividad General:

- Ondas transversales



Predicciones de Relatividad General:

- Ondas transversales

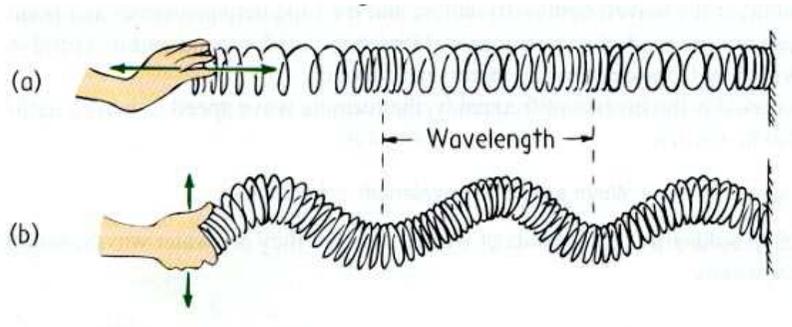


- Se propagan a la velocidad de la luz

$$\frac{1}{c^2} \partial_t^2 h_{\mu\nu} - \partial_x^2 h_{\mu\nu} - \partial_y^2 h_{\mu\nu} - \partial_z^2 h_{\mu\nu} = 0$$

Predicciones de Relatividad General:

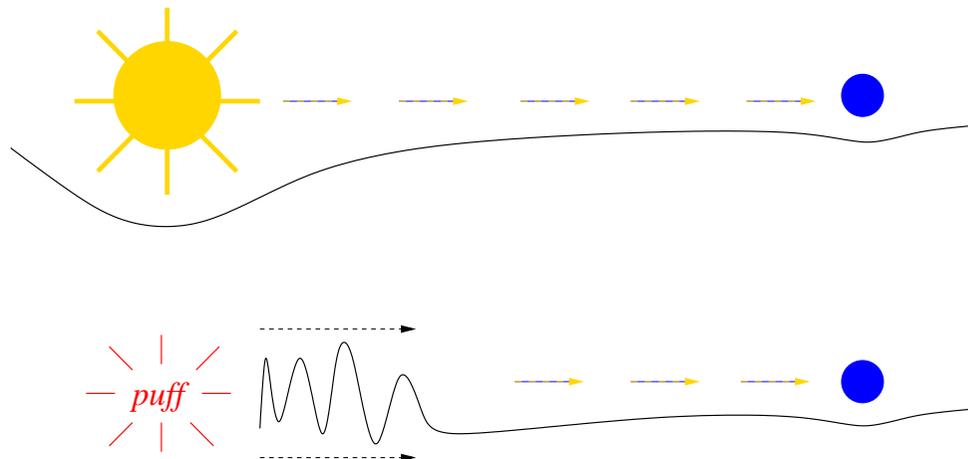
- Ondas transversales



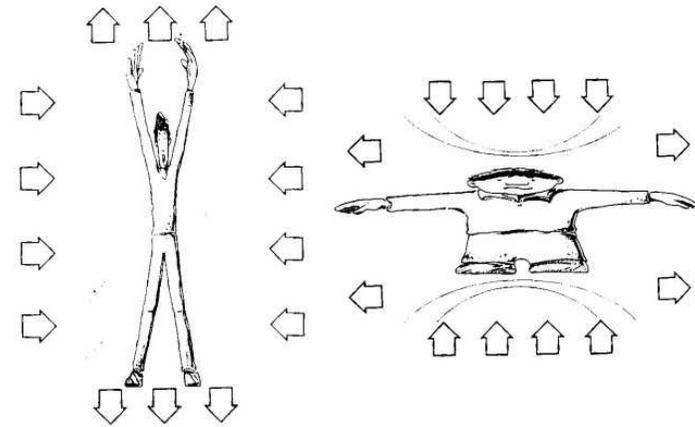
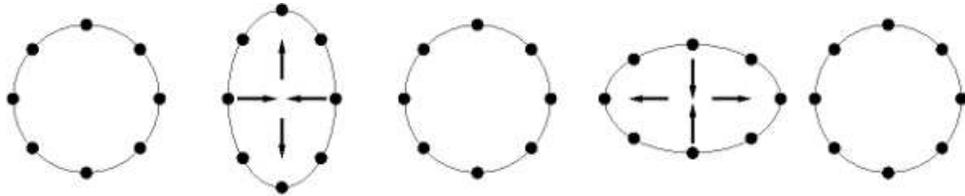
- Se propagan a la velocidad de la luz

$$\frac{1}{c^2} \partial_t^2 h_{\mu\nu} - \partial_x^2 h_{\mu\nu} - \partial_y^2 h_{\mu\nu} - \partial_z^2 h_{\mu\nu} = 0$$

→ Solución al problema de Newton

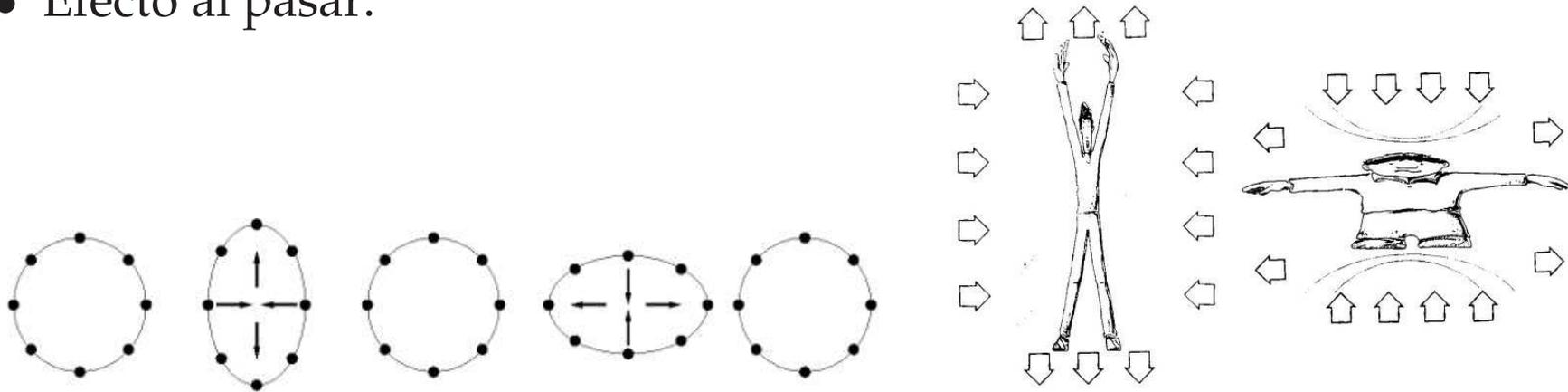


- Efecto al pasar:



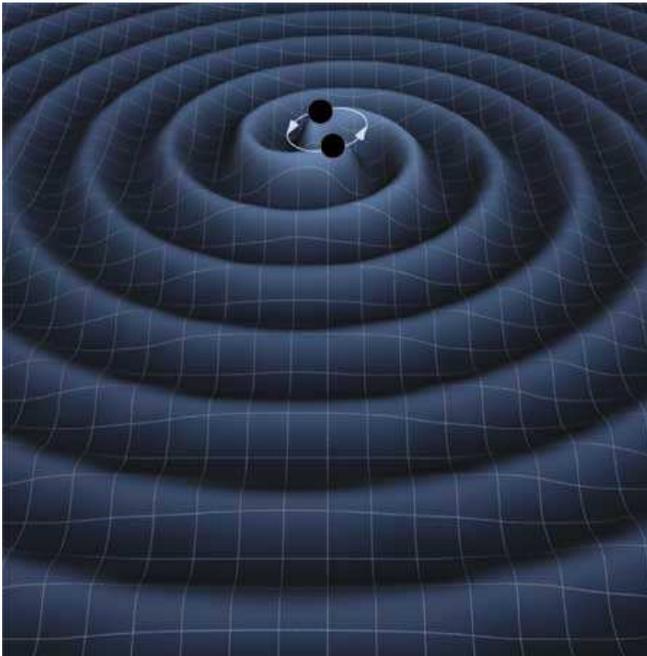
→ diferencia con ondas electromagnéticas (grav: espín 2)

- Efecto al pasar:



—→ diferencia con ondas electromagnéticas (grav: espín 2)

- Generadas por cambio en momento cuadrupolar de la materia

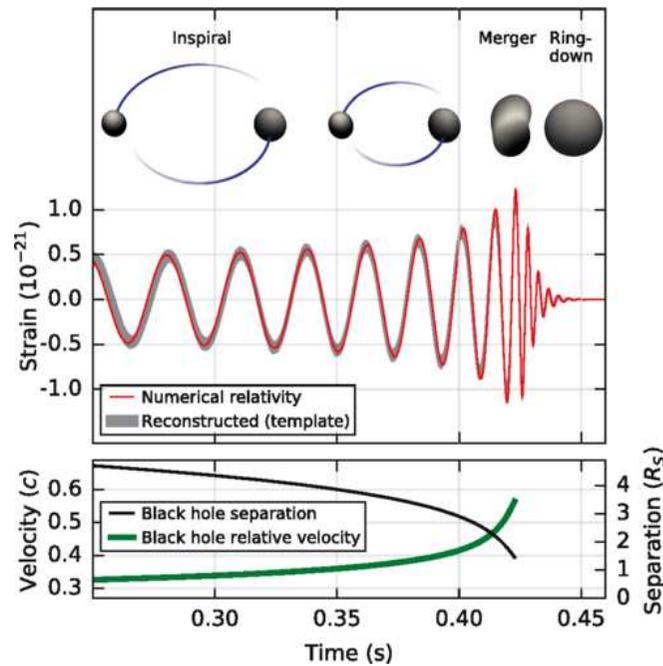


Ejemplo más común: sistema binario

Más débiles que ondas electromagnéticas

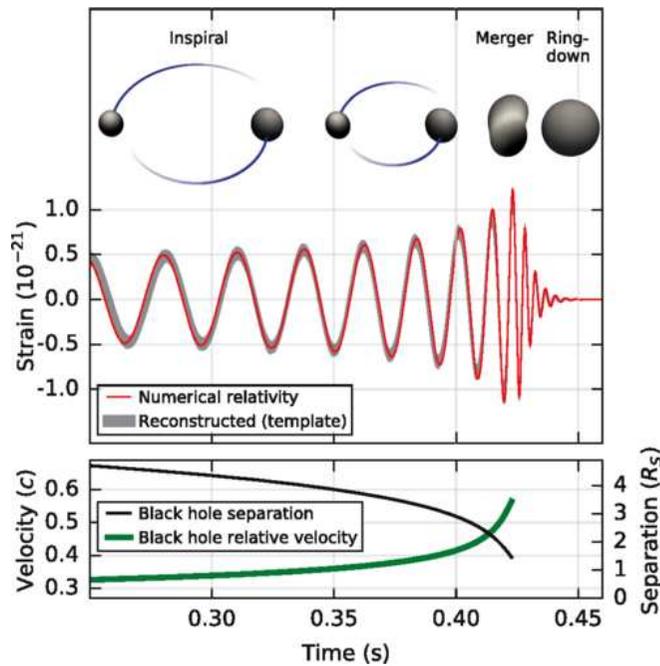
—→ más difíciles de detectar...

- Ondas gravitacionales se llevan energía de sistema binario



- masas se acercan
- masas giran más rápido
- masas emiten más radiación
- masas se acercan más aún
- ...
- sistema colapsa en $\sim 10^8$ años
- señal muy típica

- Ondas gravitacionales se llevan energía de sistema binario



- masas se acercan
- masas giran más rápido
- masas emiten más radiación
- masas se acercan más aún
- ...
- sistema colapsa en $\sim 10^8$ años
- señal muy típica

- Amplitud decae como $h_{\mu\nu} \sim r^{-1}$
Efecto medible decae como $R_{\mu\nu\rho}{}^\lambda \sim r^{-2}$

3. Un poco de historia

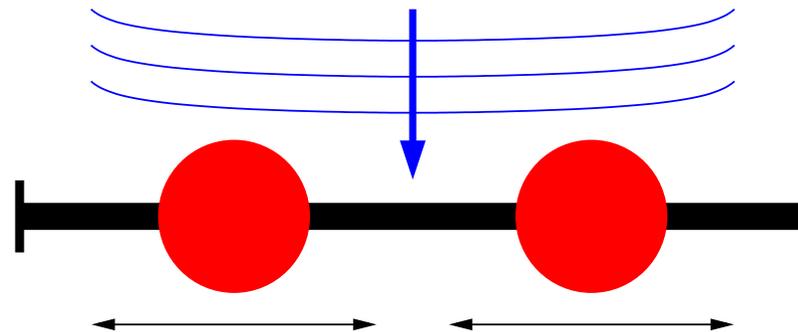
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales
→ difícilmente detectables

3. Un poco de historia

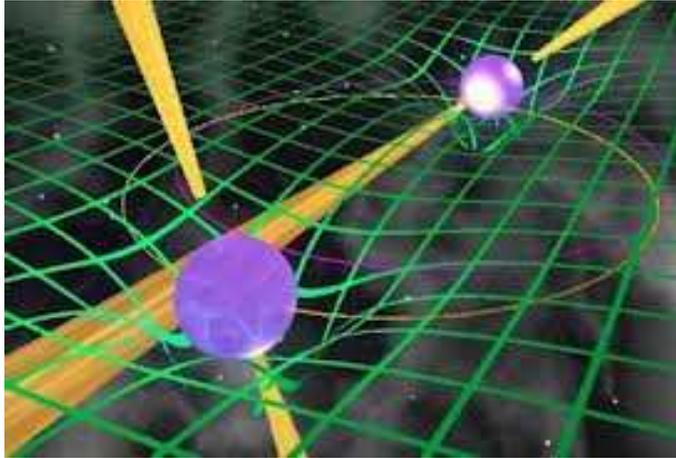
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales
→ difícilmente detectables
- 1925: Brinkmann publica solución exacta de una onda gravitacional
- 1936: Einstein y Rosen argumentan que ondas gravitacionales no existen (como solución exacta)
 - Confunden singularidades de coordenadas con singularidades físicas
 - Problemas al definir la energía transportada por ondas gravitacionales

3. Un poco de historia

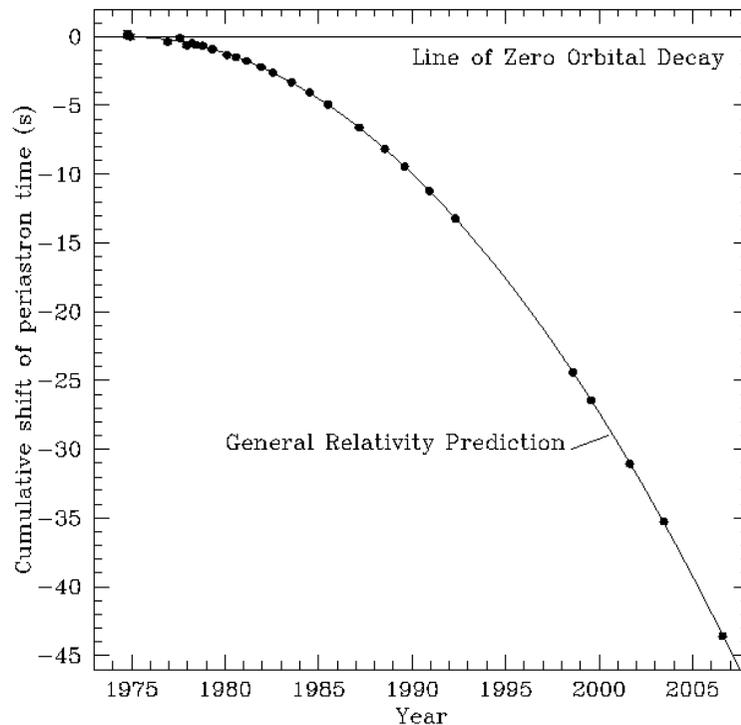
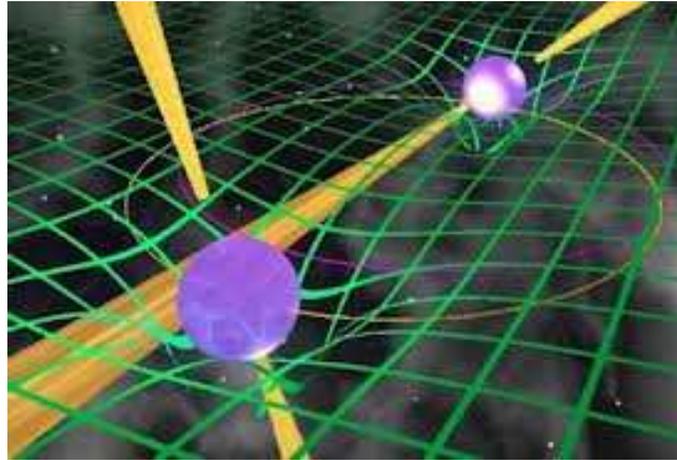
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales
→ difícilmente detectables
- 1925: Brinkmann publica solución exacta de una onda gravitacional
- 1936: Einstein y Rosen argumentan que ondas gravitacionales no existen (como solución exacta)
 - Confunden singularidades de coordenadas con singularidades físicas
 - Problemas al definir la energía transportada por ondas gravitacionales
- 1957: Feynman inventa el argumento del abalorio con fricción:
→ Ondas gravitacionales transportan energía



- 1974: Taylor y Hulse descubren pulsar binario PSR B1913+16
Prueba indirecta de la existencia de ondas gravitacionales



- 1974: Taylor y Hulse descubren pulsar binario PSR B1913+16
Prueba indirecta de la existencia de ondas gravitacionales



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

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

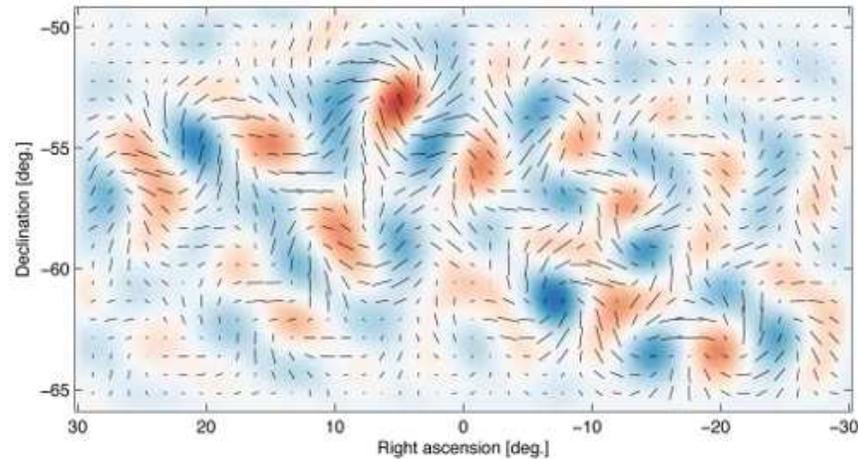
$$T = 7,75 \text{ h} \quad \Delta T = -76,5 \mu\text{s/y}$$

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

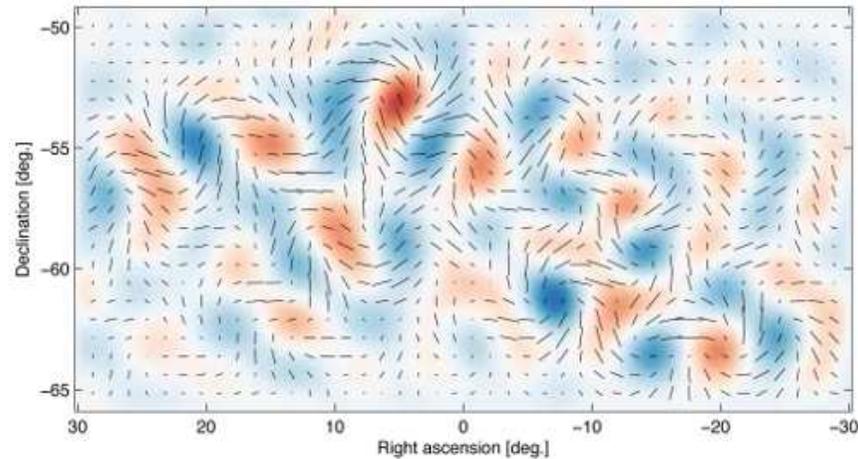
$$\Delta L_{\text{obs}}/\Delta L_{\text{theor}} = 0,997 \pm 0,002$$

- 1984: Thorne, Drever y Weiss fundan LIGO
- 2002 - 2010: Primera ronda de mediciones de LIGO: sin resultados

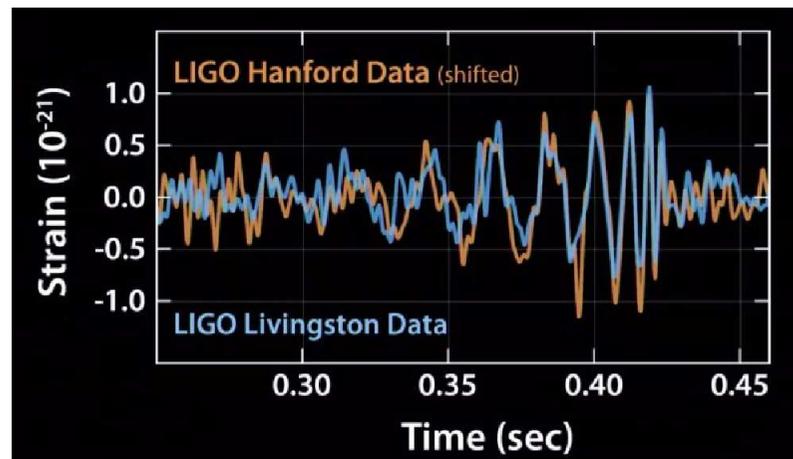
- 1984: Thorne, Drever y Weiss fundan LIGO
- 2002 - 2010: Primera ronda de mediciones de LIGO: sin resultados
- 2014: BICEPS2 anuncian y retiran B-modes en CMB
→ polvo en la Via Láctea



- 1984: Thorne, Drever y Weiss fundan LIGO
- 2002 - 2010: Primera ronda de mediciones de LIGO: sin resultados
- 2014: BICEPS2 anuncian y retiran B-modes en CMB
→ polvo en la Via Láctea



- 14 sept 2015: Detección directa en LIGO



4. La detección directa de LIGO

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)



Livingston (LA)

4. La detección directa de LIGO

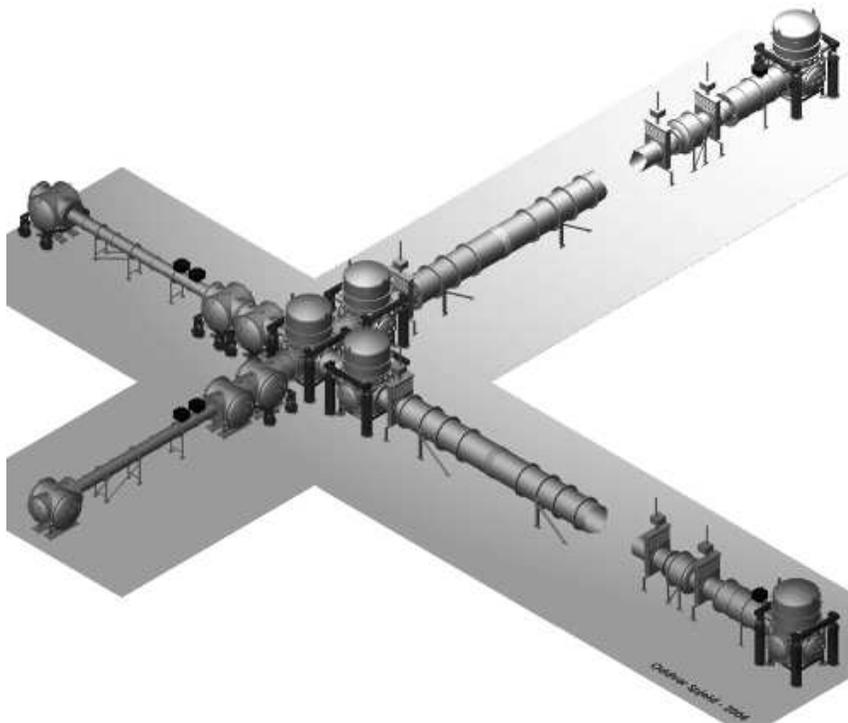
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)



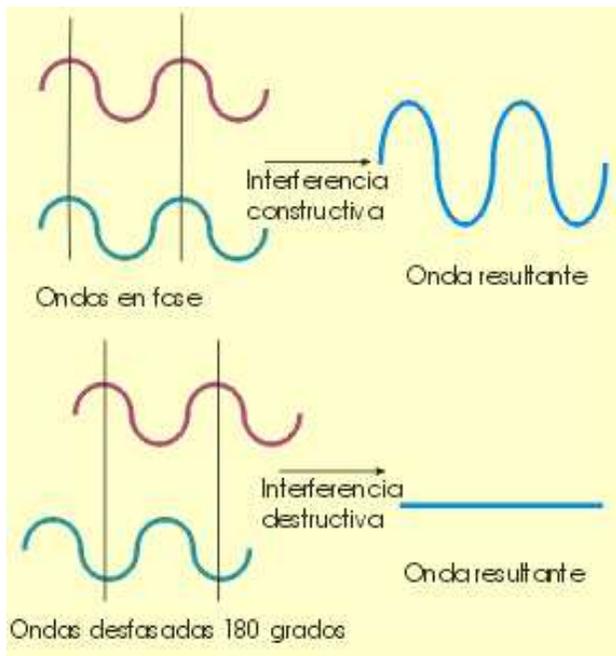
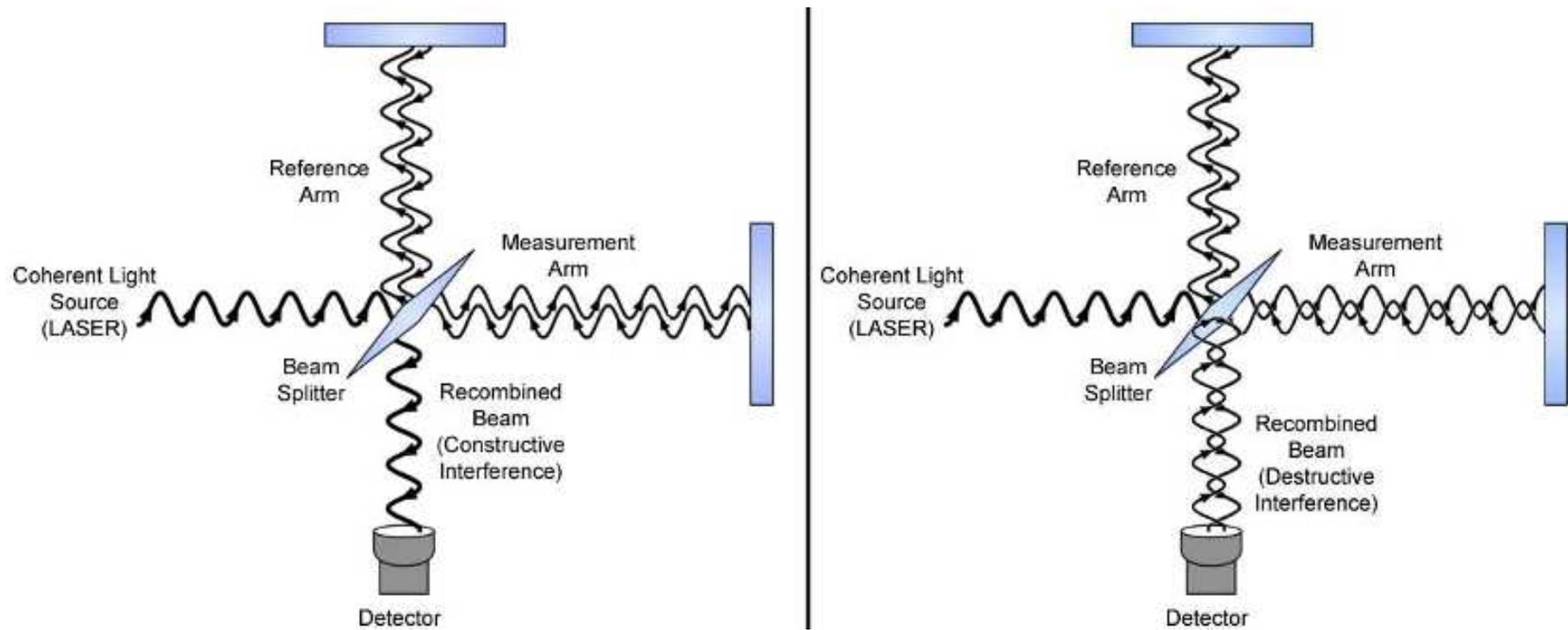
Livingston (LA)



2 interferómetros (a la Michelson)
con brazos de 4 km a 90° a 3200 km
distancia

Initial LIGO: 2002 - 2010

Advanced LIGO: 18 sept 2015



Láser recorre brazos ~ 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

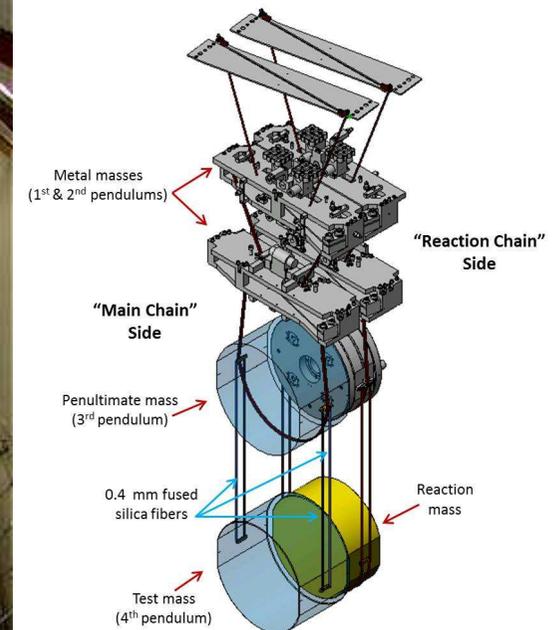
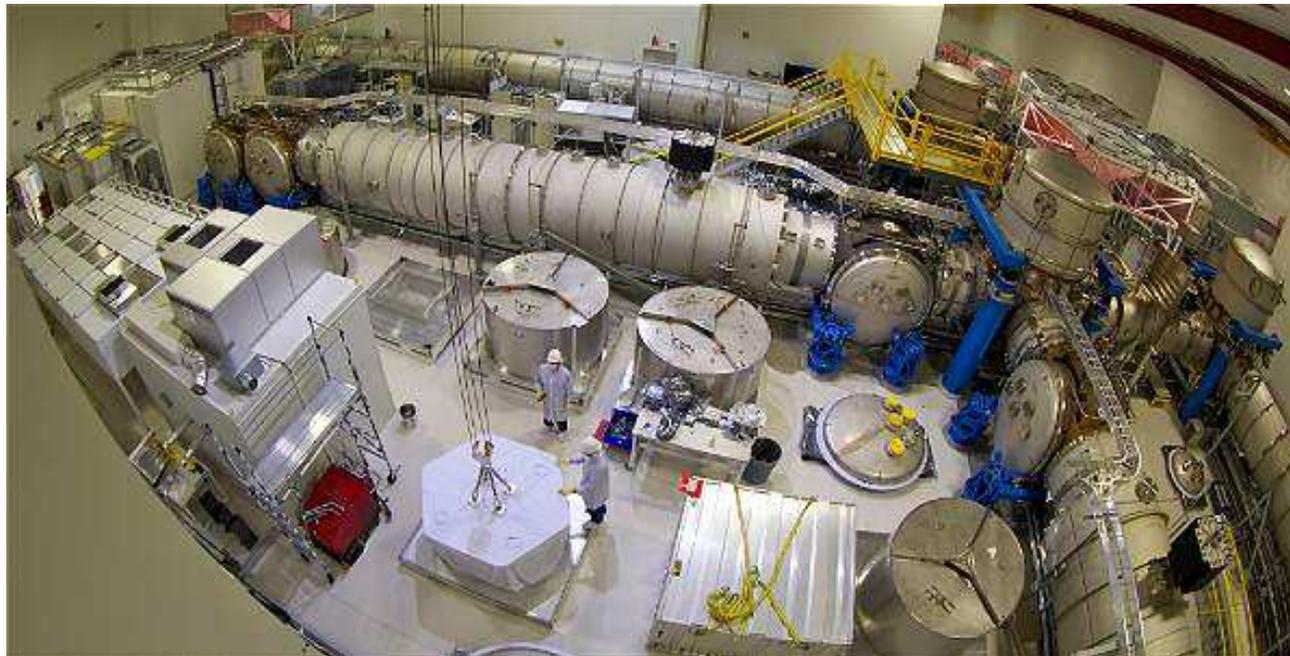
Sensibilidad: $\Delta L/L = 10^{-21}$

$$\Delta L \sim 10^{-18} m$$

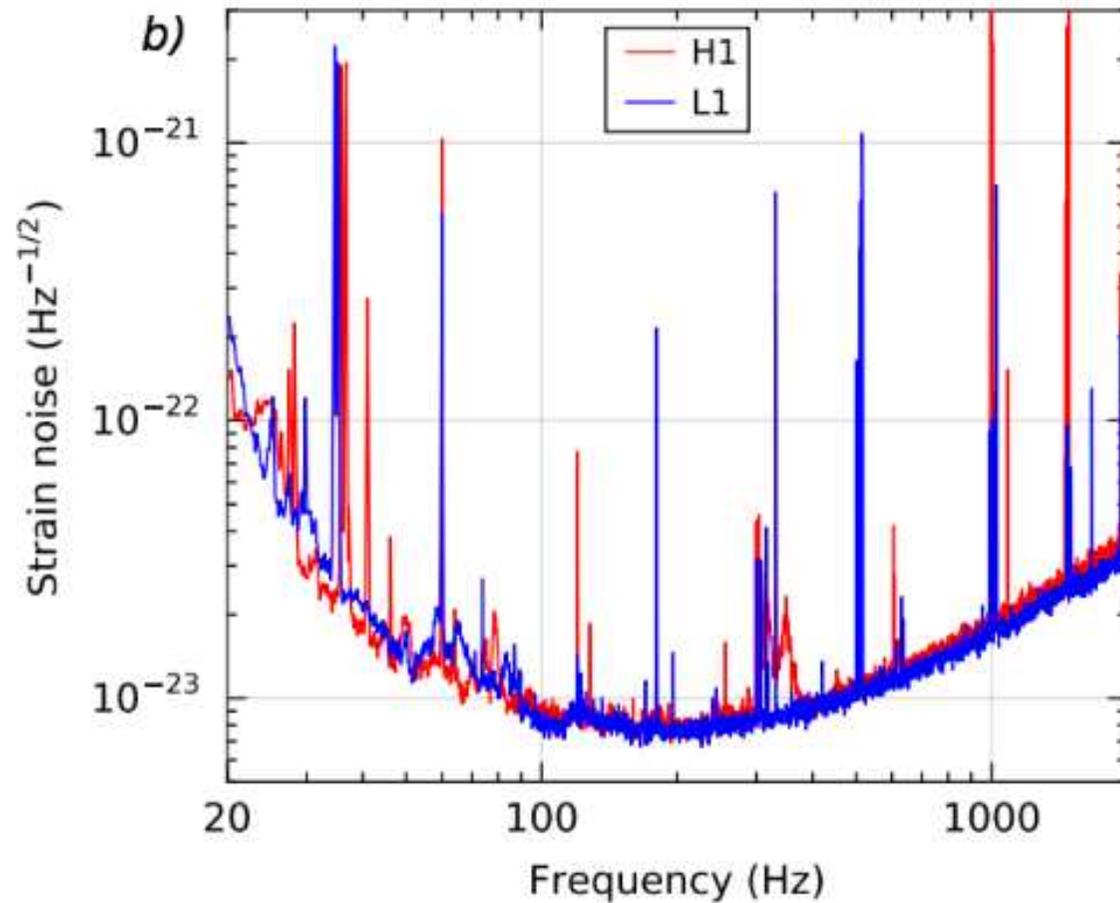
NB: radio de carga del protón $R_p = 0,8 \cdot 10^{-15} m$

Filtrando la señal...

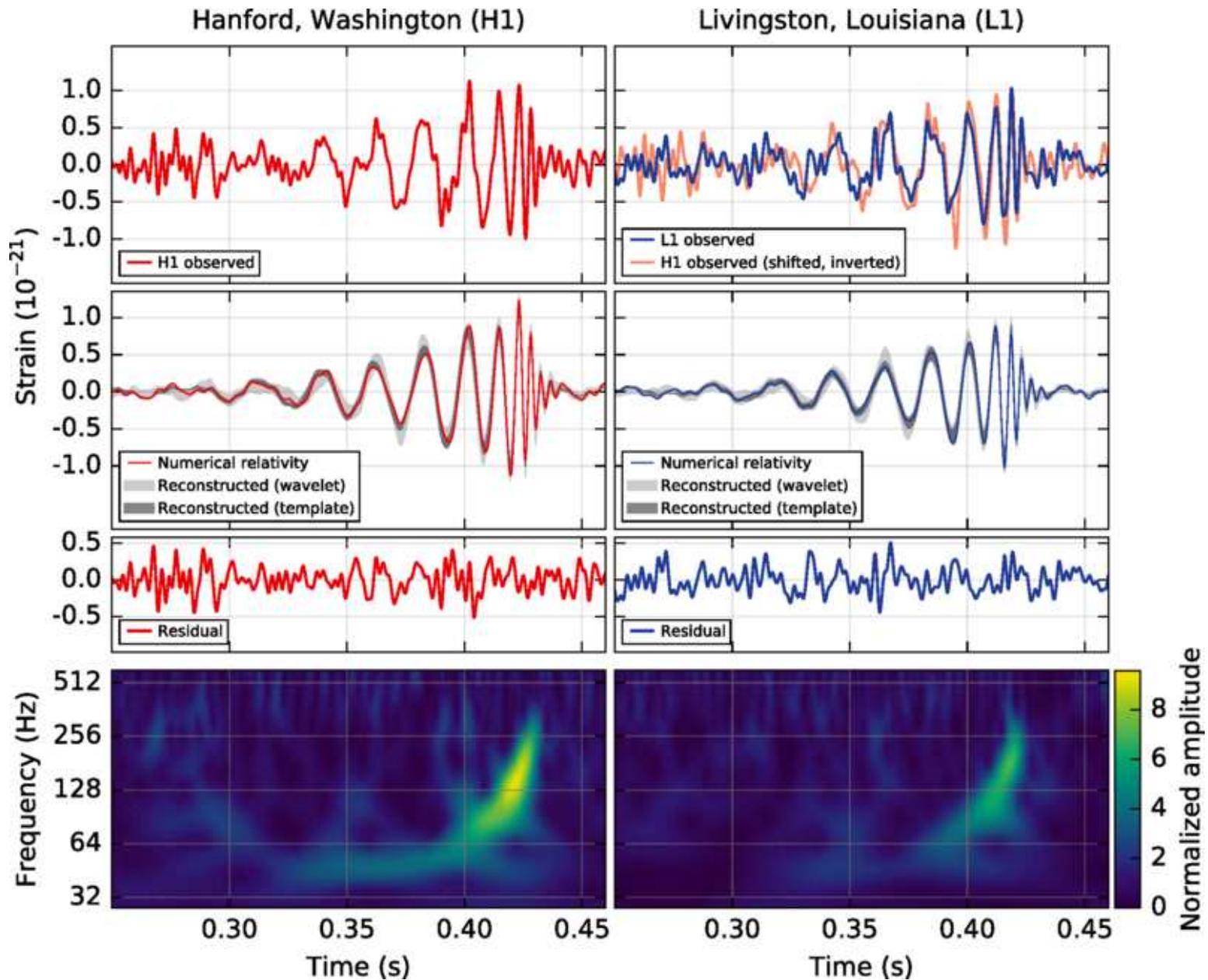
- Tubos de 4 km \times 1,2 m de ultravacío ($P < 1 \mu\text{Pa}$)
- Supresión de 10 órdenes de magnitud de movimiento terrestres de $> 10 \text{ Hz}$
- Monitorización de influencias ambientales a través de seismógrafos, acelerómetros, micrófonos, magnetómetros, sensores meteorológicos, ...
- Estimar el fondo de ruido es un problema complicado!



- Advanced LIGO 3 a 5 veces más sensible que initial LIGO para 100 - 300 Hz
- Advanced LIGO más de 10 veces más sensible que initial LIGO para < 60 Hz



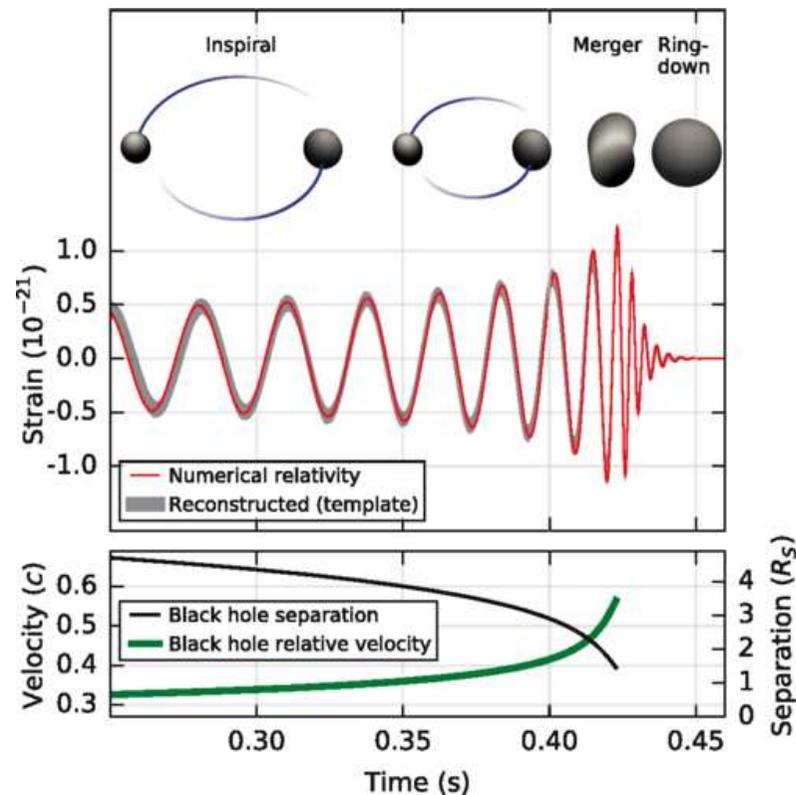
El 14 de septiembre 2015 a las 9:50 UTC: [GW150914](#)



Probabilidad de falsa alarma $< 2 \cdot 10^{-7} \Leftrightarrow 5,1\sigma$

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

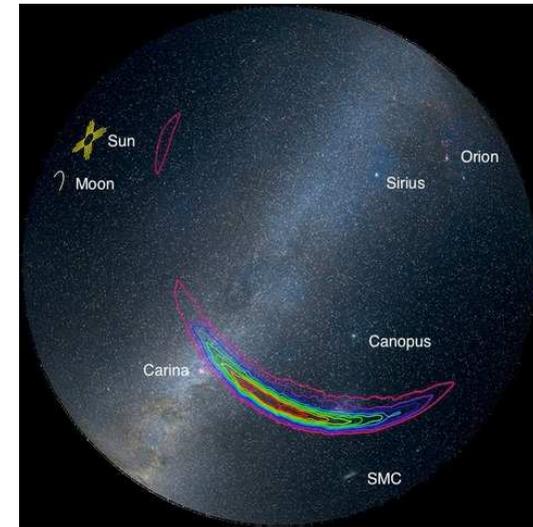
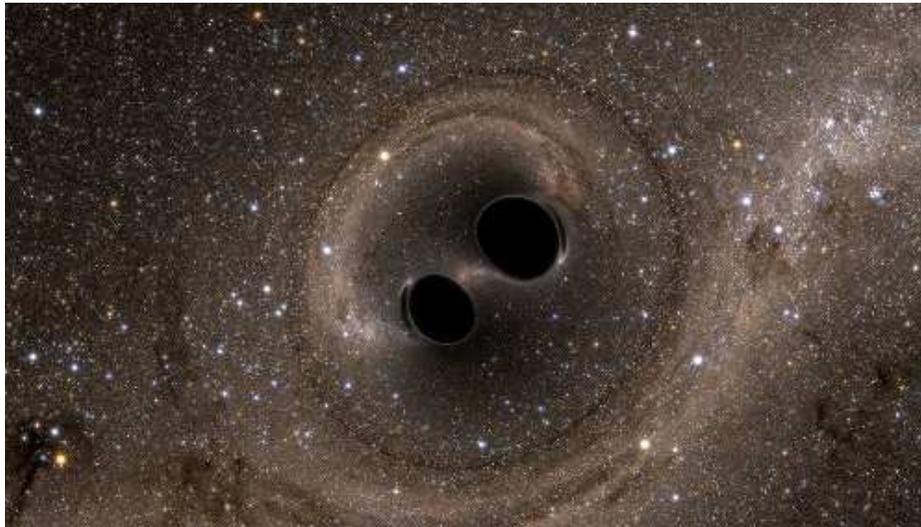


$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G_N} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

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 $\sim 350 \text{ km}$

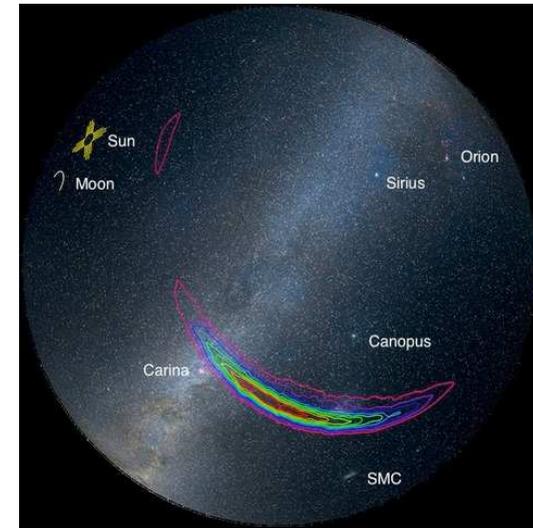
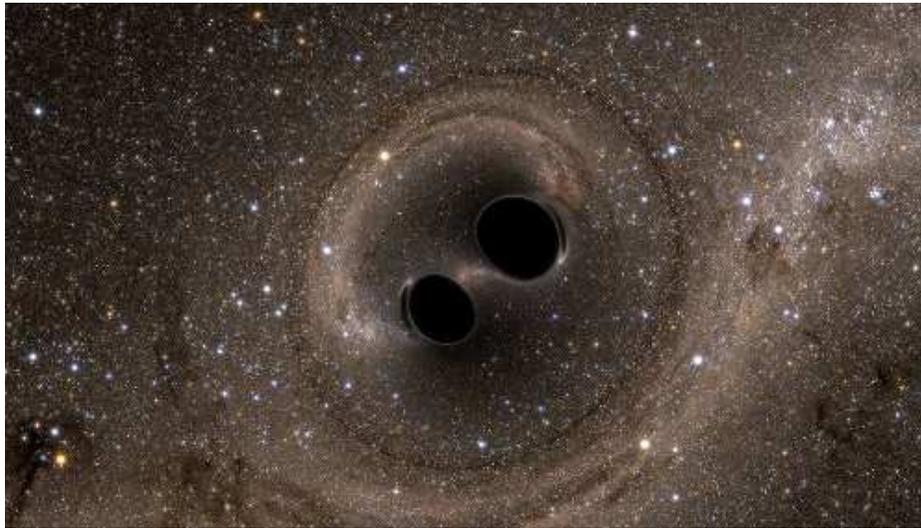
Fusión de dos agujeros negros!



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!

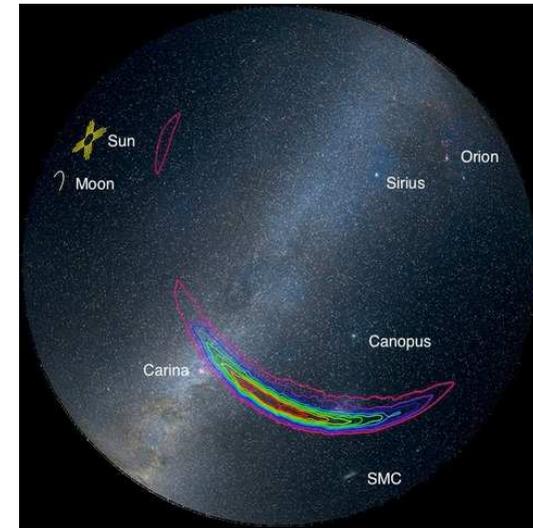
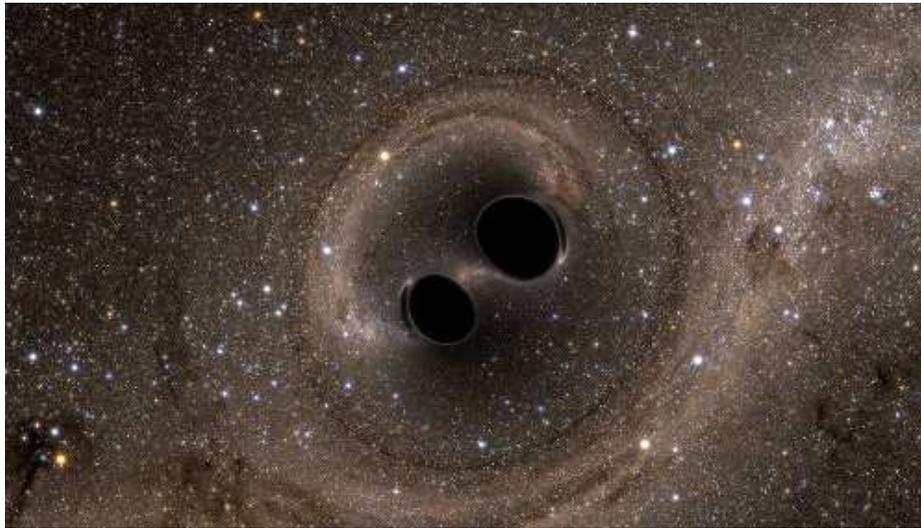


- Agujero negro resultante con $m_f \approx 62M_{\odot}$ y $a = 0,67$
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales: $E_{\text{rad}} \approx 3 M_{\odot} c^2$
(comparación: $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$; $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$)

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 ($z \approx 0,09$)

5. ¿Y ahora qué...?

Hemos aprendido mucho:

5. ¿Y ahora qué...?

Hemos aprendido mucho:

- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas

5. ¿Y ahora qué...?

Hemos aprendido mucho:

- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen

5. ¿Y ahora qué...?

Hemos aprendido mucho:

- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen
- Los agujeros negros de $M \sim 30 M_{\odot}$ existen
(hasta ahora sólo XRB's con $M \lesssim 20 M_{\odot}$)

5. ¿Y ahora qué...?

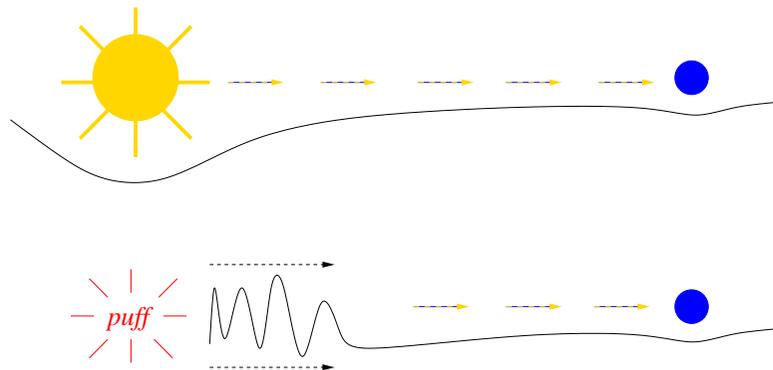
Hemos aprendido mucho:

- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen
- Los agujeros negros de $M \sim 30 M_{\odot}$ existen
(hasta ahora sólo XRB's con $M \lesssim 20 M_{\odot}$)
- Primer test de Relatividad General en régimen de campo extra-fuerte
(hasta ahora sólo test de púlsares binarios)

5. ¿Y ahora qué...?

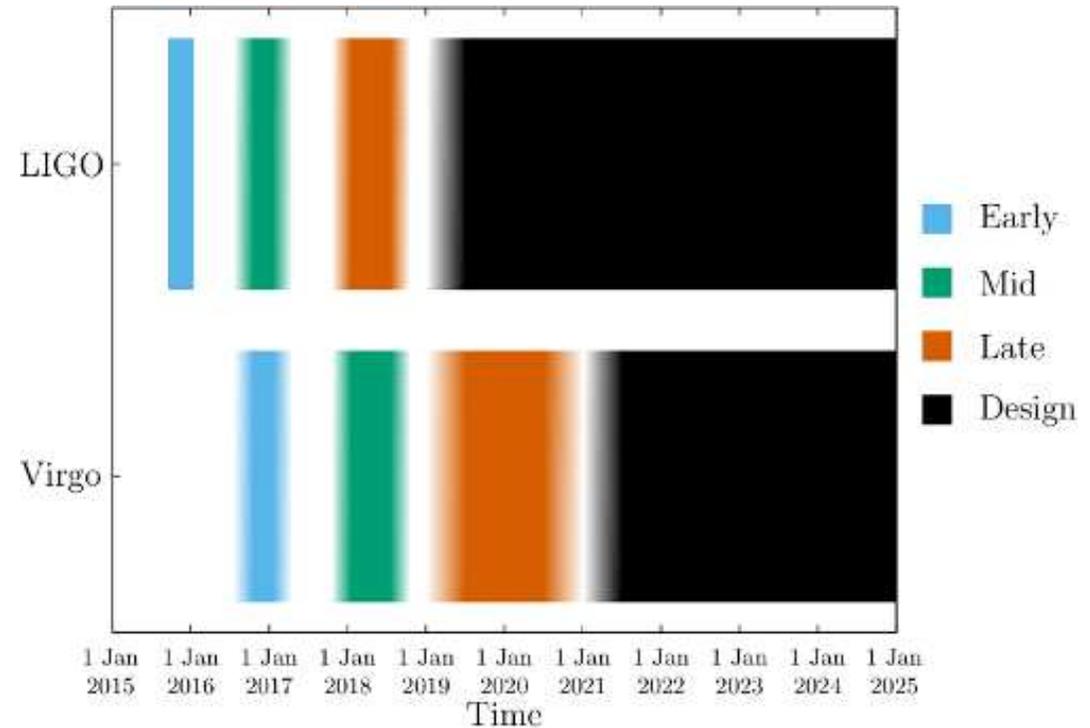
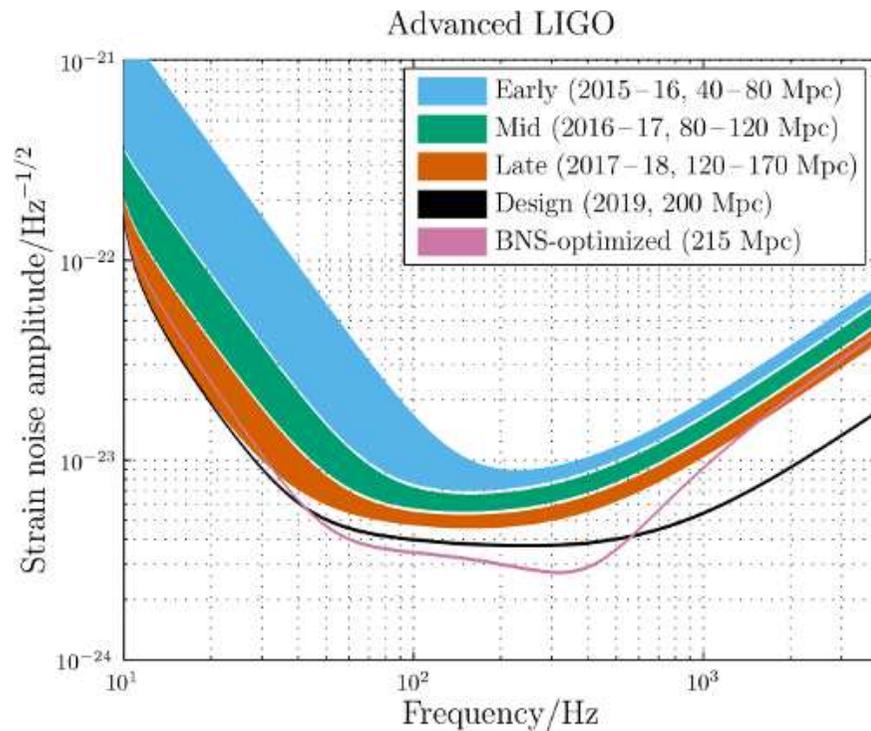
Hemos aprendido mucho:

- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen
- Los agujeros negros de $M \sim 30 M_{\odot}$ existen
(hasta ahora sólo XRB's con $M \lesssim 20 M_{\odot}$)
- Primer test de Relatividad General en régimen de campo extra-fuerte
(hasta ahora sólo test de púlsares binarios)
- Límite en masa del gravitón: $m_g < 1,2 \cdot 10^{-22} \text{ eV}/c^2$
(comparación: $m_e = 0,5 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$, $m_{\nu_e} \lesssim 2 \text{ eV}/c^2$)
→ Gravedad se propaga a la velocidad de la luz



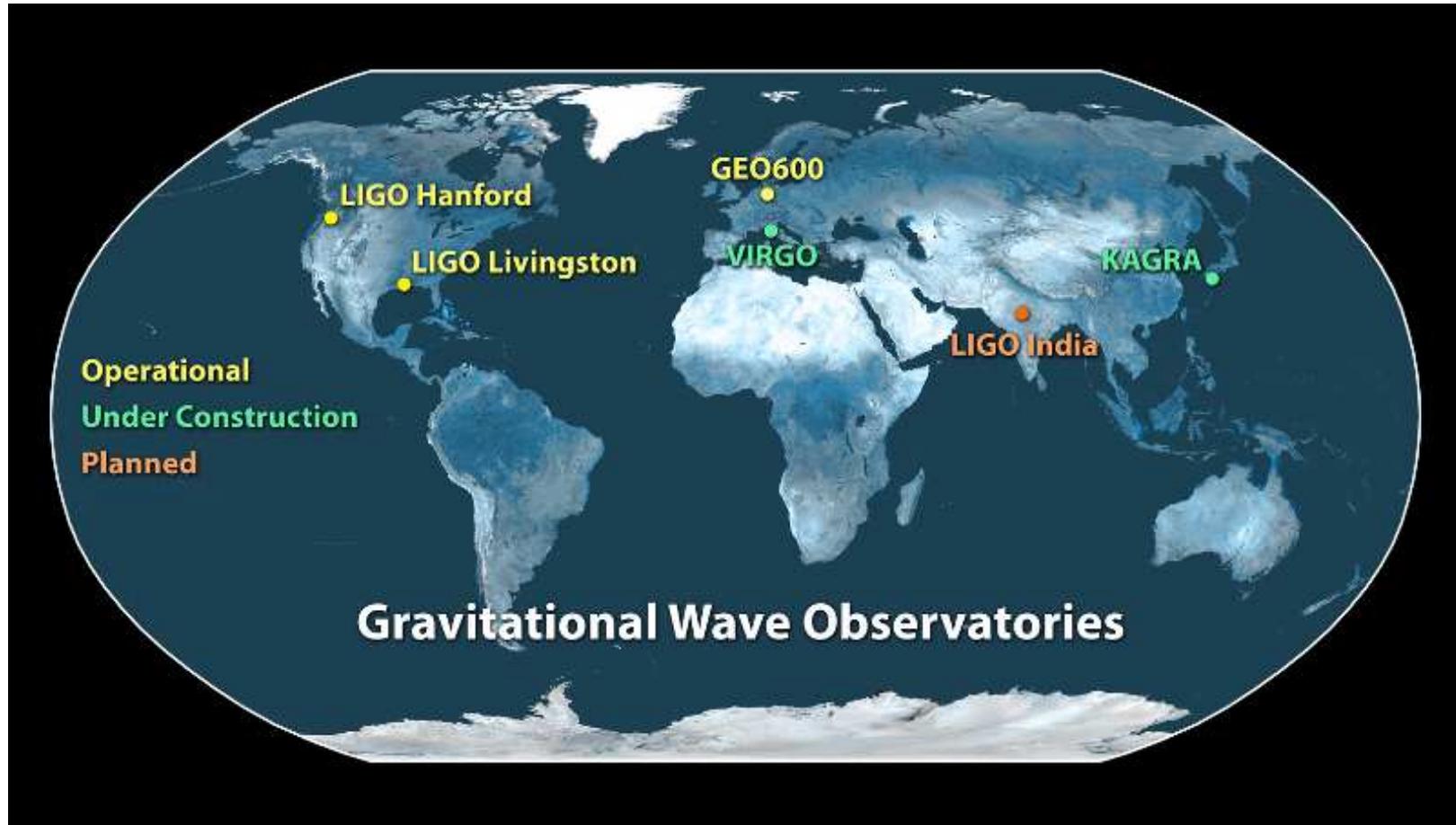
Planes de futuro:

- 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:



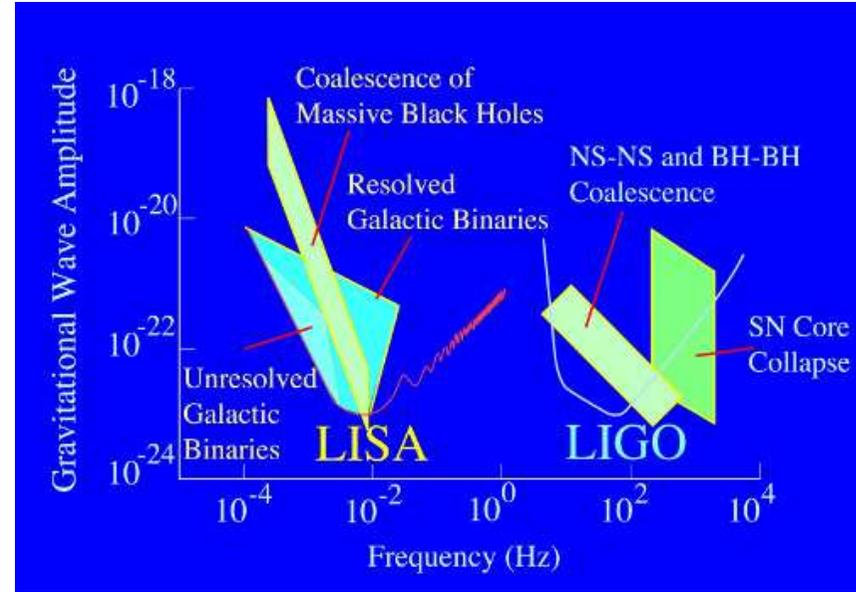
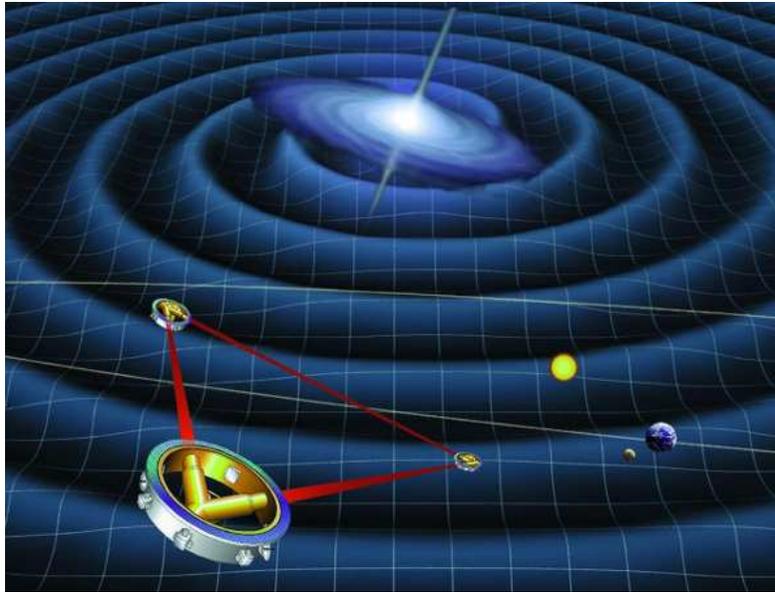
→ Coordinar búsquedas: aumentar la precisión y localización de eventos

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

KAGRA: operacional en 2018?

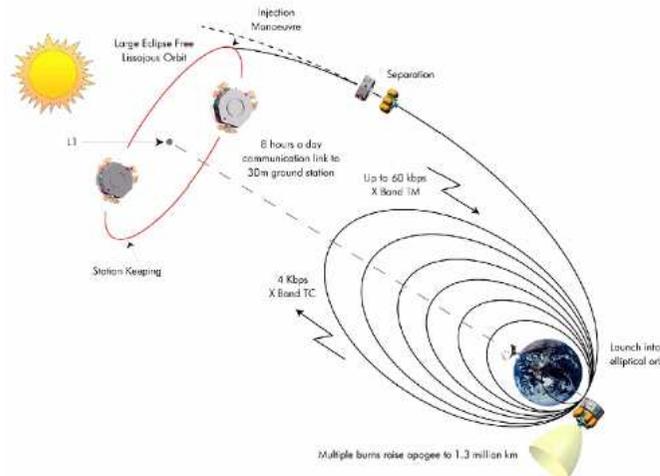
LIGO India: acuerdo de principios

- Detectores espaciales: Evolved Laser Interferometer Space Antenna

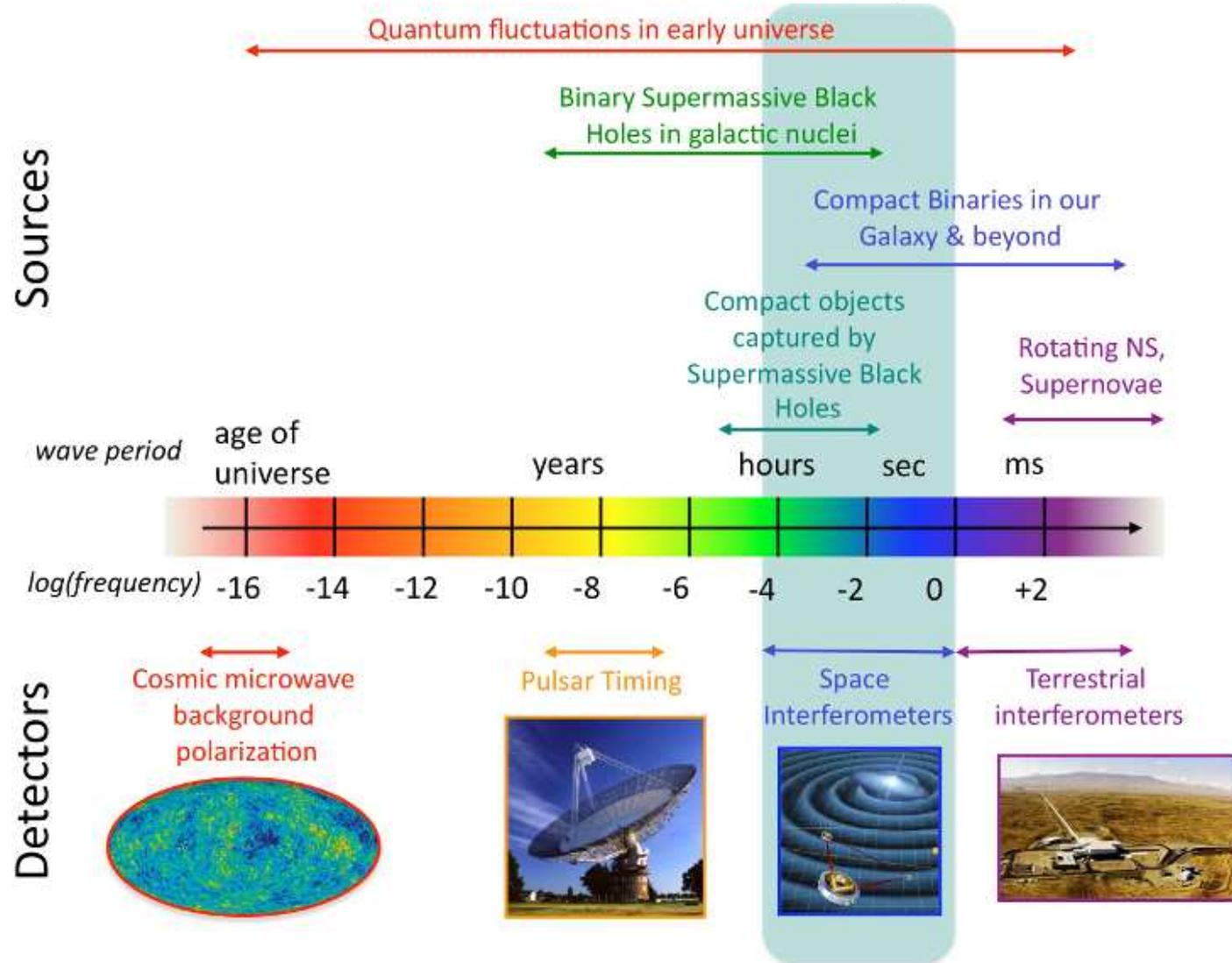


→ 3 satelites a 1 000 000 000 km en de Sol-Tierra-Luna

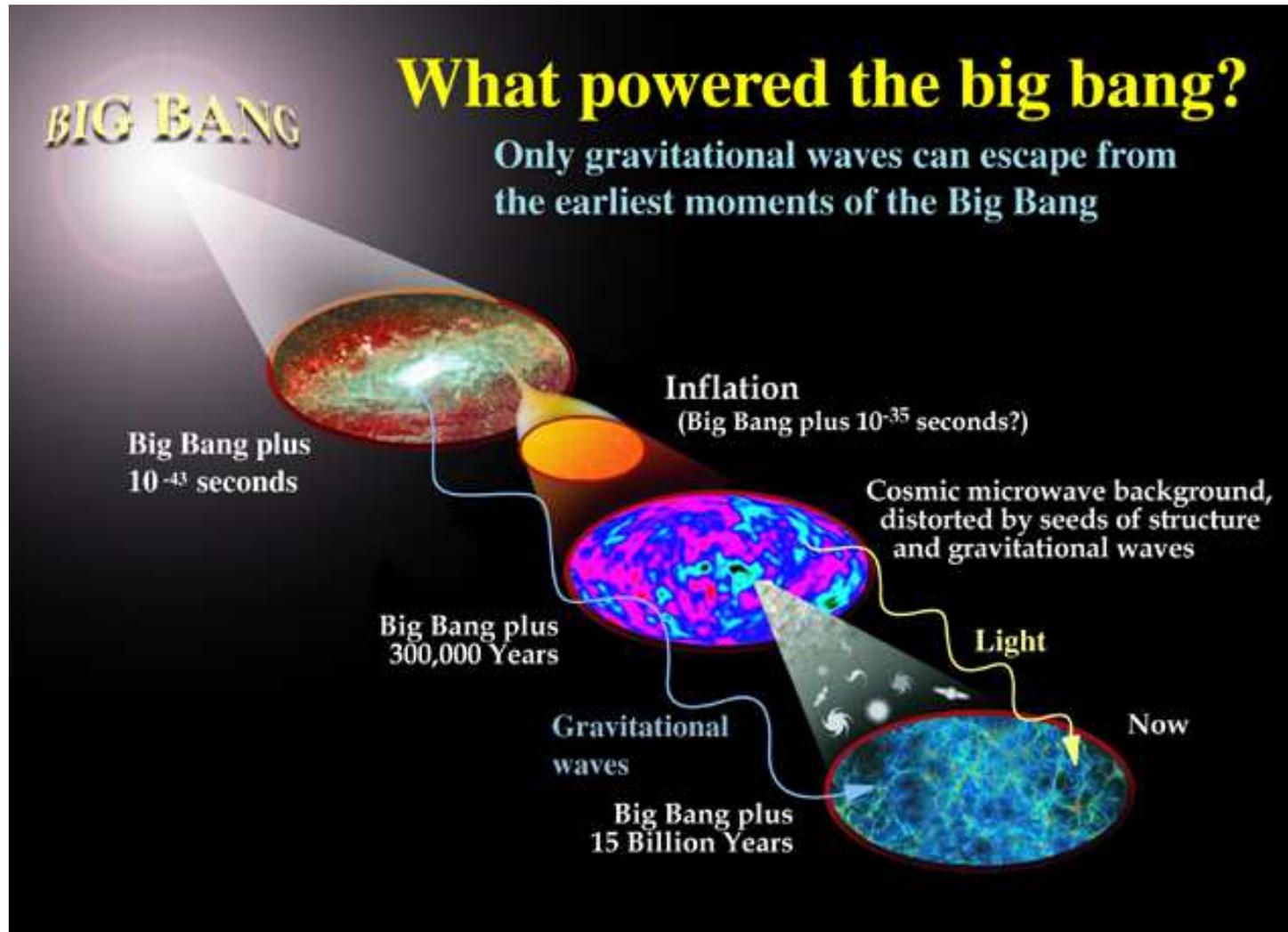
→ eLISA Pathfinder (versión prueba) lanzado el 3 dic 2015.



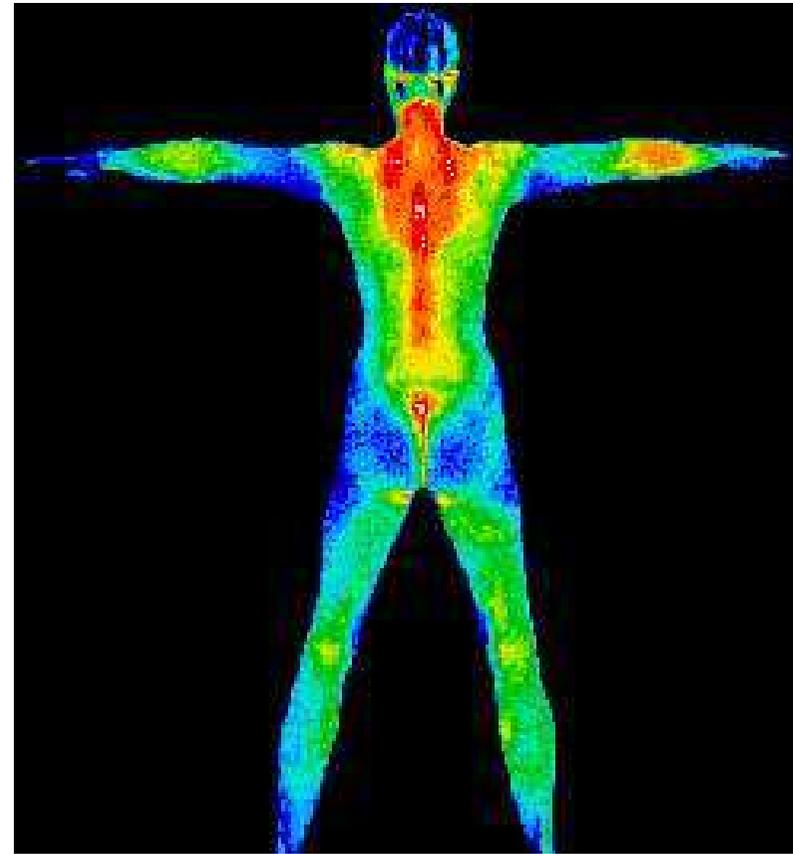
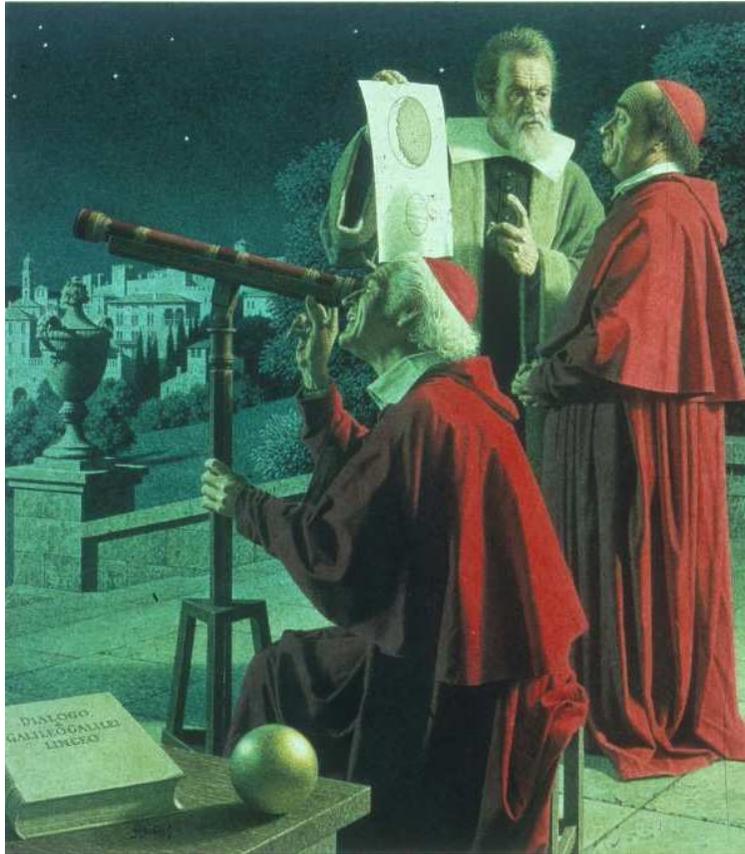
The Gravitational Wave Spectrum



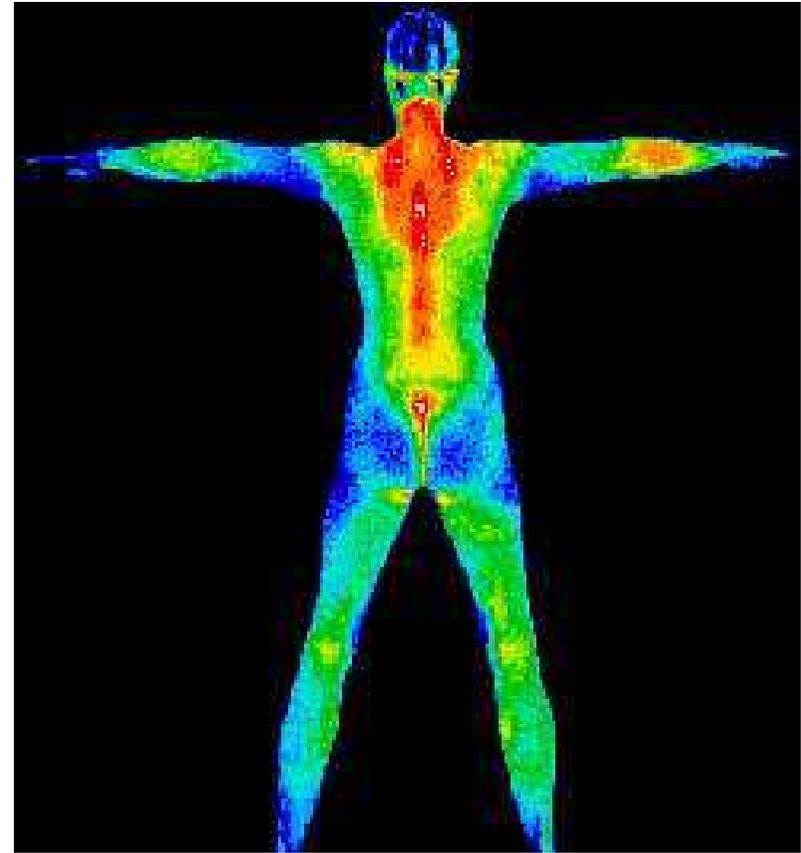
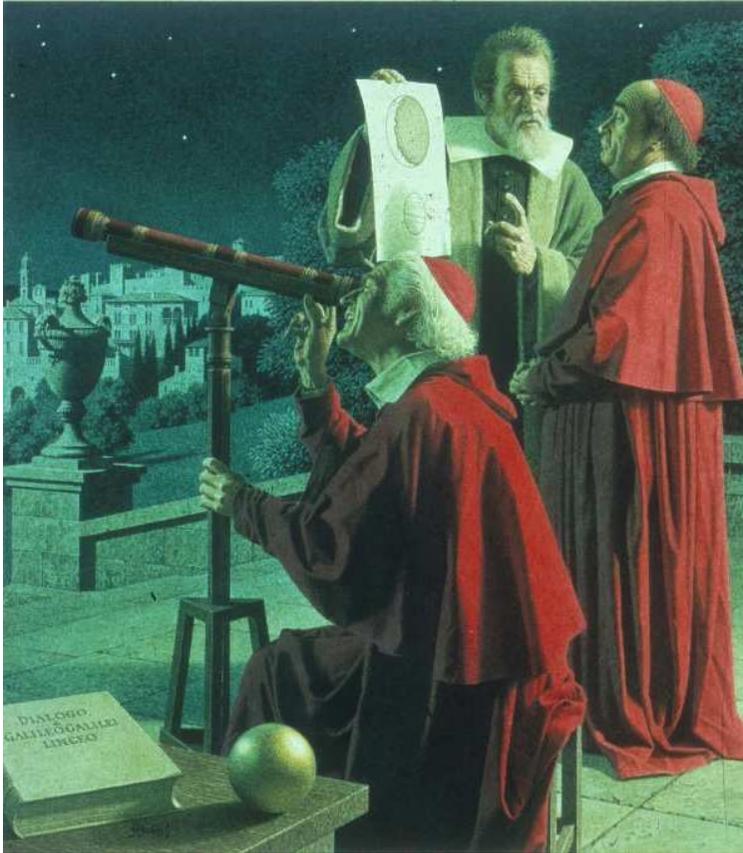
- Ruido estocástico de ondas gravitacionales?
- Ondas del Big Bang?



Nueva tecnología implica un nuevo mundo por descubrir



Nueva tecnología implica un nuevo mundo por descubrir

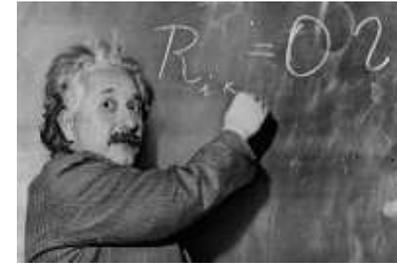


¡Queda mucho trabajo por hacer!

¡Gracias!

Intermedio técnico:

Ondas gravitacionales en relatividad linealizada

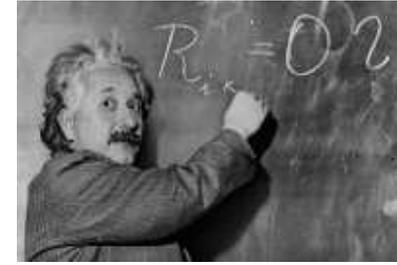


Perturbación de la métrica: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$

Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} = \varepsilon \left[\frac{1}{2} \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \partial_\mu \partial_\nu h - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\mu h_\nu{}^\rho - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\nu h_\mu{}^\rho \right]$

Intermedio técnico:

Ondas gravitacionales en relatividad linealizada



Perturbación de la métrica: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$

Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} = \varepsilon \left[\frac{1}{2} \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \partial_\mu \partial_\nu h - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\mu h_\nu{}^\rho - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\nu h_\mu{}^\rho \right]$

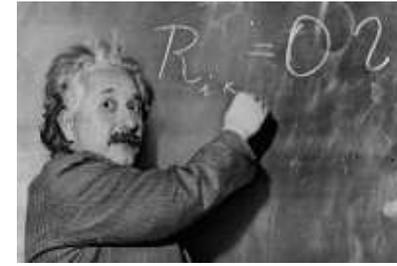
Cambio general de coordenadas: $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu$

Elección de gauge: $\partial_\mu h^{\mu\nu} - \frac{1}{2} \partial^\nu h \stackrel{*}{=} 0$

Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} \frac{1}{2} \varepsilon \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu}$

Intermedio técnico:

Ondas gravitacionales en relatividad linealizada



Perturbación de la métrica: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$

Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} = \varepsilon \left[\frac{1}{2} \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \partial_\mu \partial_\nu h - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\mu h_\nu{}^\rho - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\nu h_\mu{}^\rho \right]$

Cambio general de coordenadas: $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu$

Elección de gauge: $\partial_\mu h^{\mu\nu} - \frac{1}{2} \partial^\nu h \stackrel{*}{=} 0$

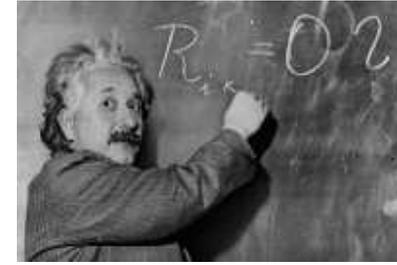
Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} \frac{1}{2} \varepsilon \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu}$

Ecn de Einstein del vacío: $\frac{1}{c^2} \partial_t^2 h_{\mu\nu} - \partial_x^2 h_{\mu\nu} - \partial_y^2 h_{\mu\nu} - \partial_z^2 h_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} 0$

→ Ecuación de onda

Intermedio técnico:

Ondas gravitacionales en relatividad linealizada



Perturbación de la métrica: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$

Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} = \varepsilon \left[\frac{1}{2} \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \partial_\mu \partial_\nu h - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\mu h_\nu{}^\rho - \frac{1}{2} \partial_\rho \partial_\nu h_\mu{}^\rho \right]$

Cambio general de coordenadas: $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu$

Elección de gauge: $\partial_\mu h^{\mu\nu} - \frac{1}{2} \partial^\nu h \stackrel{*}{=} 0$

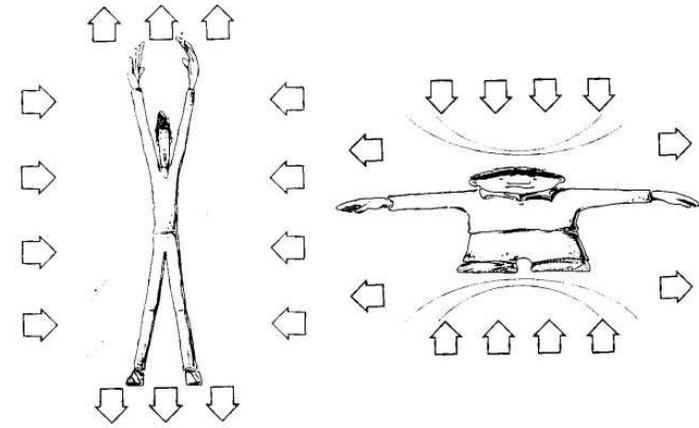
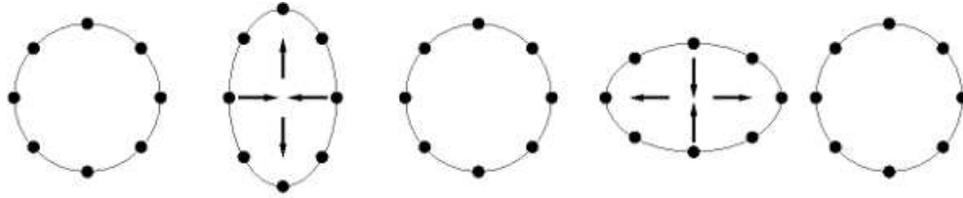
Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} \frac{1}{2} \varepsilon \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu}$

Ecn de Einstein del vacío: $\frac{1}{c^2} \partial_t^2 h_{\mu\nu} - \partial_x^2 h_{\mu\nu} - \partial_y^2 h_{\mu\nu} - \partial_z^2 h_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} 0$

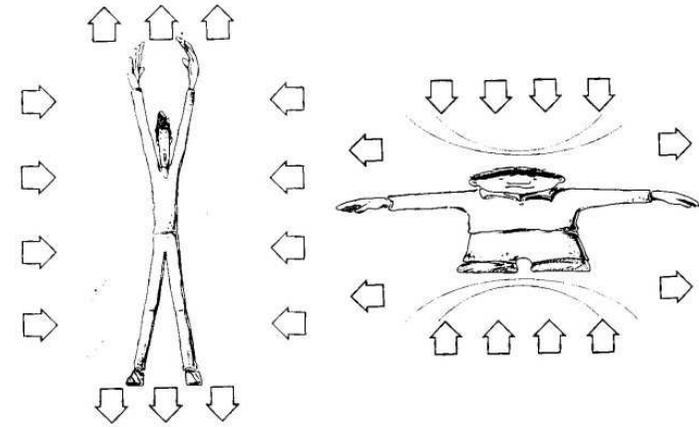
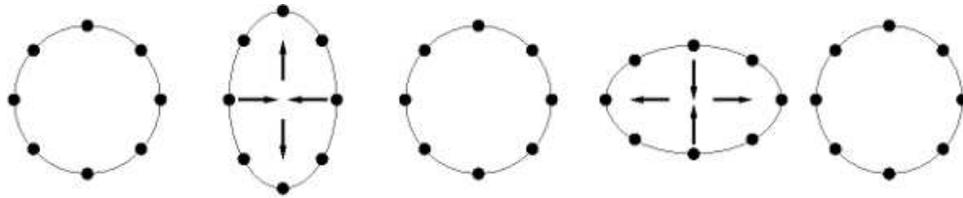
→ Ecuación de onda

(Fin del intermedio)

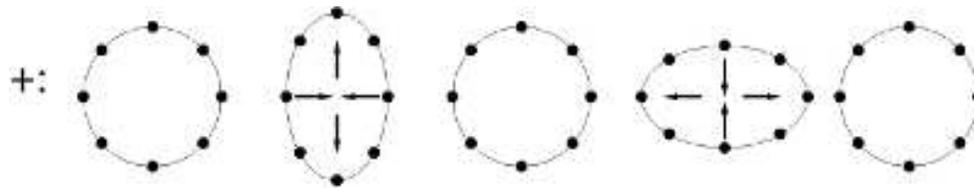
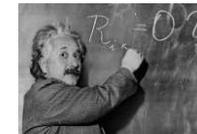
- Efecto al pasar:



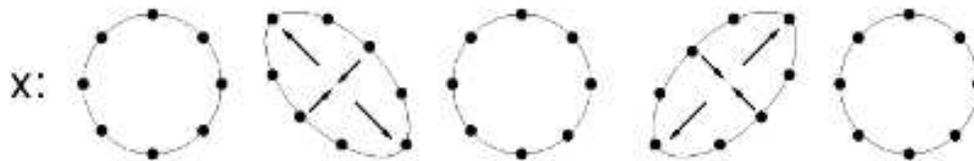
- Efecto al pasar:



- Onda con 2 polarizaciones de espín 2



$$C_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_+ & c_\times & 0 \\ 0 & c_\times & -c_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



$$C_R = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_+ + iC_\times)$$

$$C_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_+ - iC_\times)$$

Electromagn: $A_\mu = \mathcal{A}_\mu e^{ik_\lambda x^\lambda}$

$$\mathcal{A}'_\mu = \Lambda^\nu{}_\mu \mathcal{A}_\nu$$

$$\mathcal{A}'_{R/L} = e^{\pm i\theta} \mathcal{A}_{R/L}$$

Gravitación: $h_{\mu\nu} = C_{\mu\nu} e^{ik_\lambda x^\lambda}$

$$C'_{\mu\nu} = \Lambda^\rho{}_\mu \Lambda^\lambda{}_\nu C_{\rho\lambda}$$

$$C'_{R/L} = e^{\pm 2i\theta} C_{R/L}$$