



Ondas gravitacionales: la nueva ventana al Universo



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos & CAFPE
Universidad de Granada

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

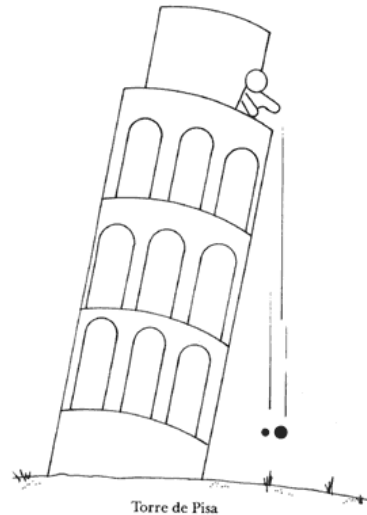
Gravedad es la fuerza más familiar y la menos entendida



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



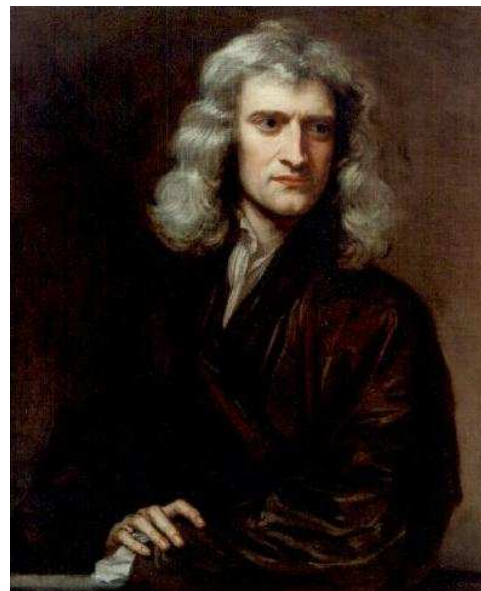
Estudiada por Galilei y postulada por Newton



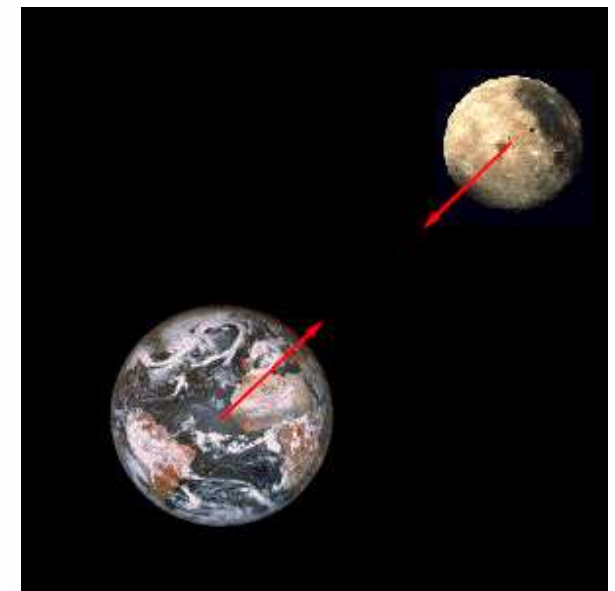
Caída libre:

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

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

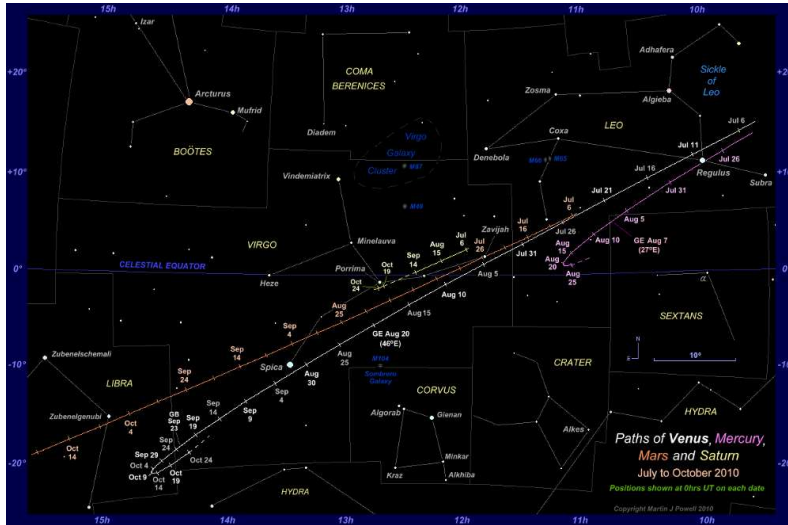


$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

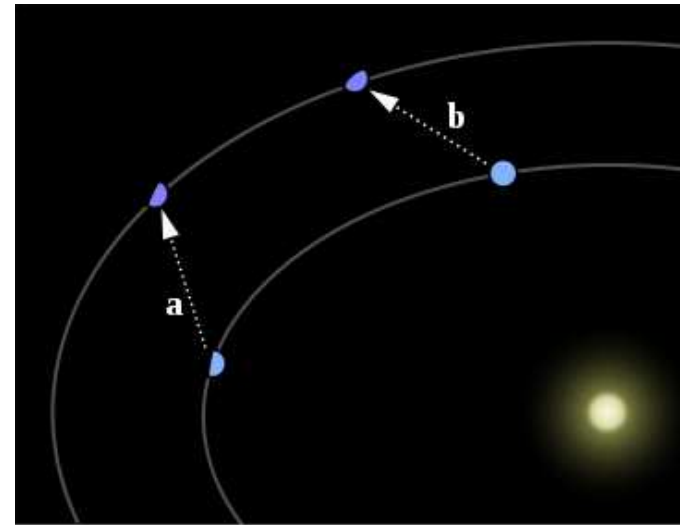


→ Fuerza universal entre cualesquiera dos masas

Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias

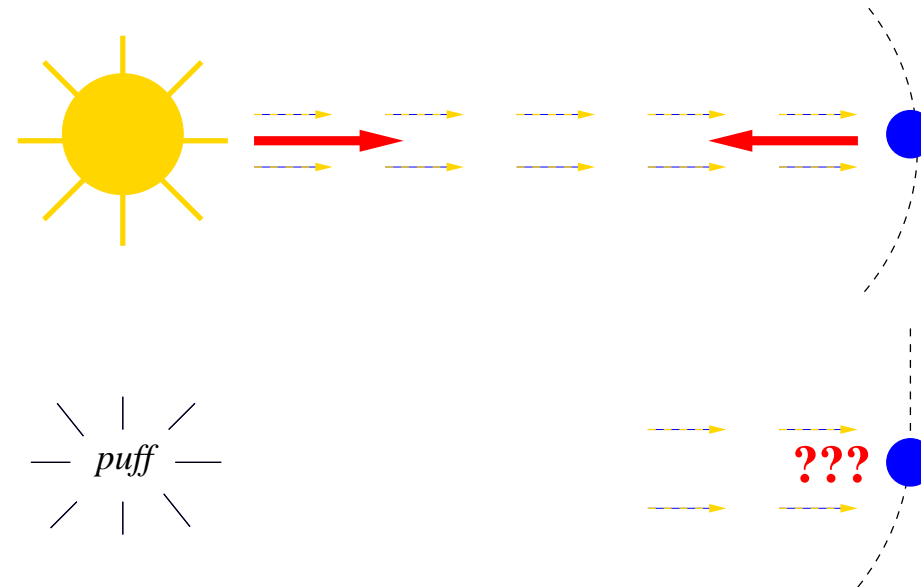


Hasta predijo la **existencia de Neptuno** por perturbaciones en órbita de Urano



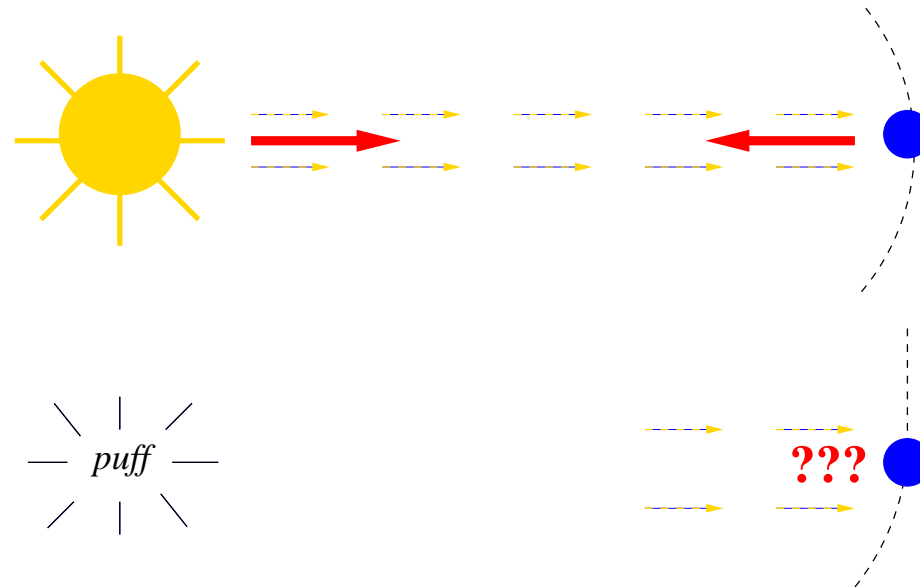
Couch-Adams & Le Verrier, 1845

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



Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

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

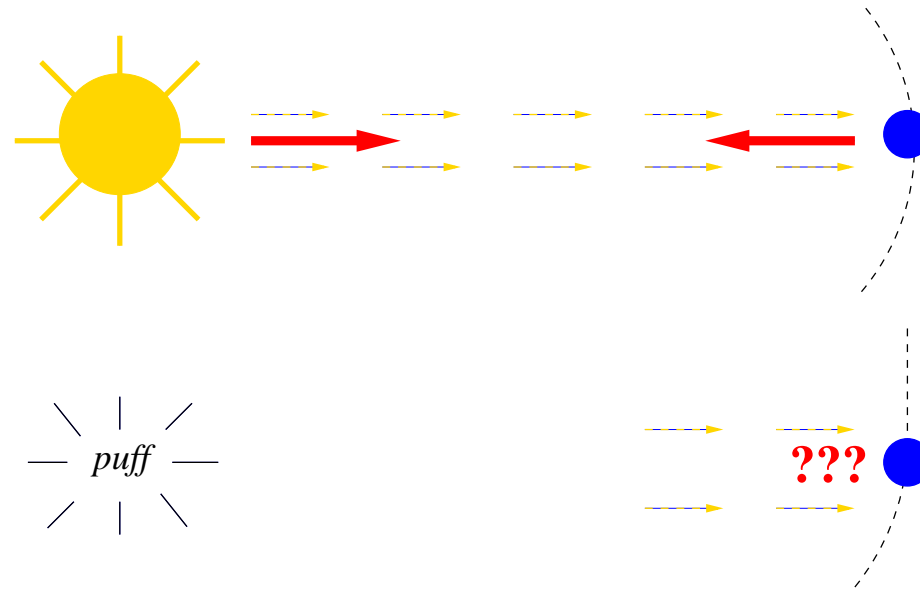


Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

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!!!**

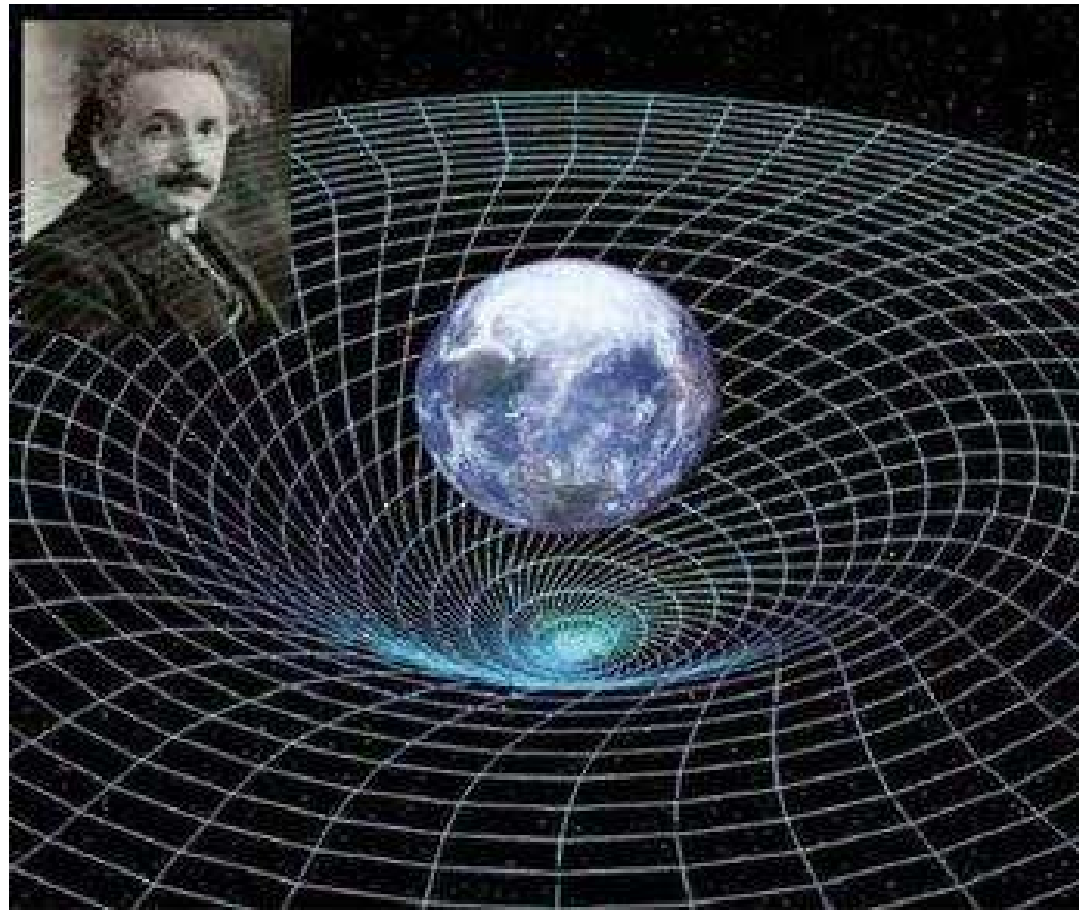
La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

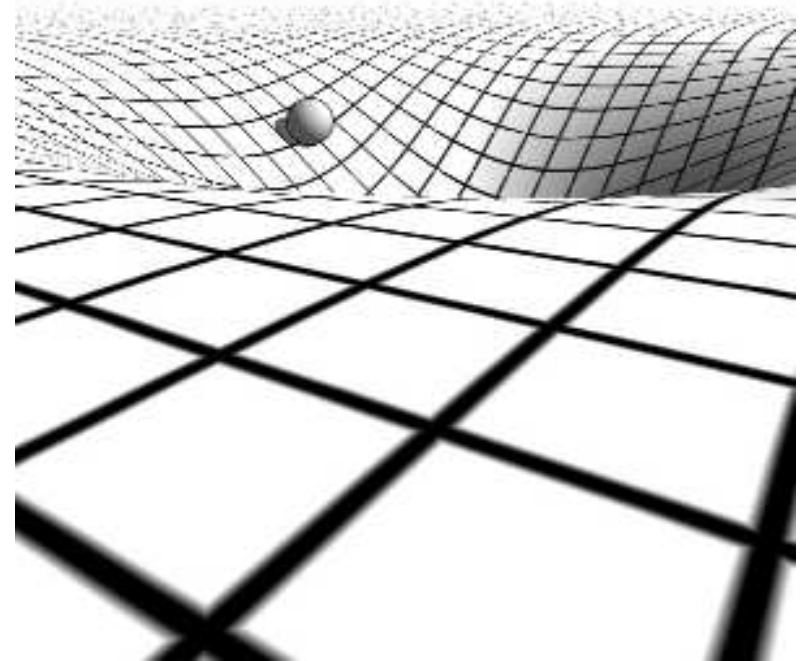
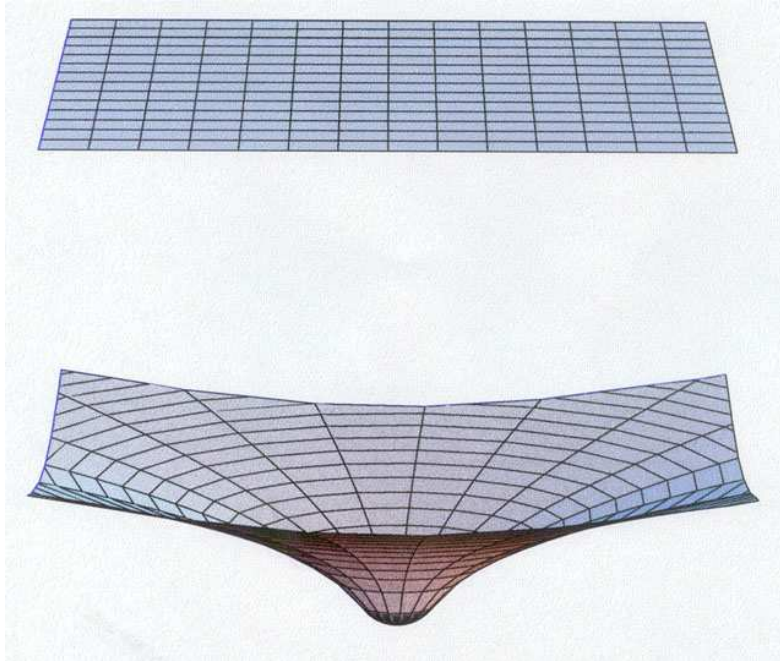
La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

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

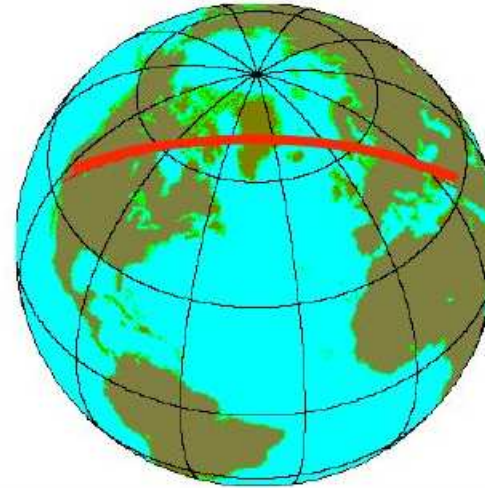
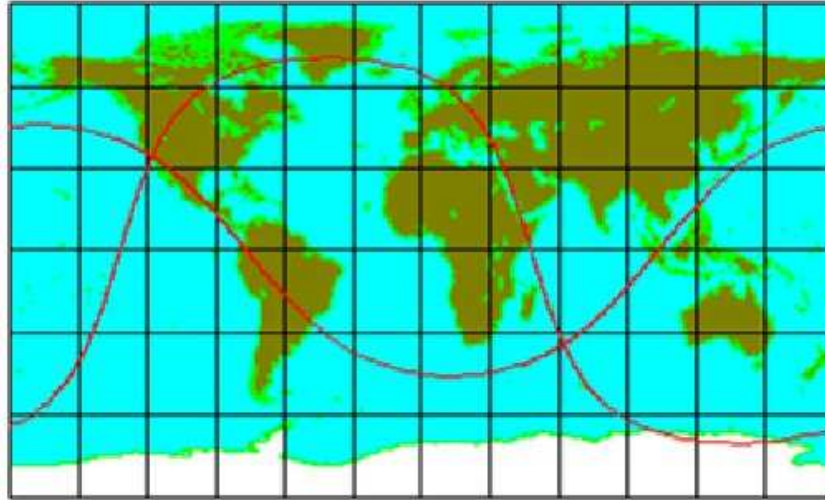


Gravedad = espacio curvo

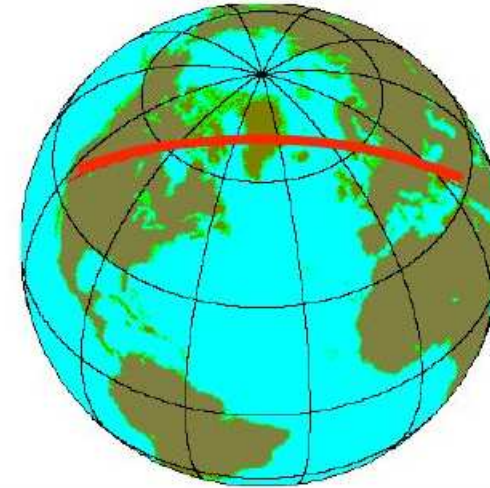
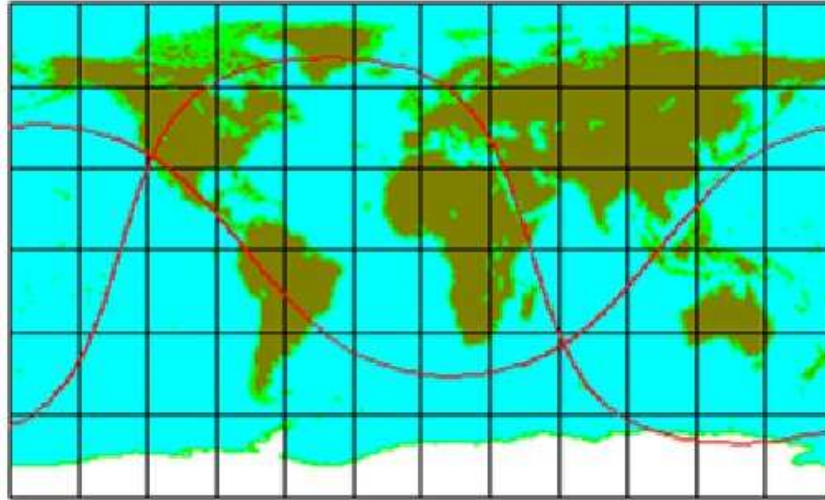


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

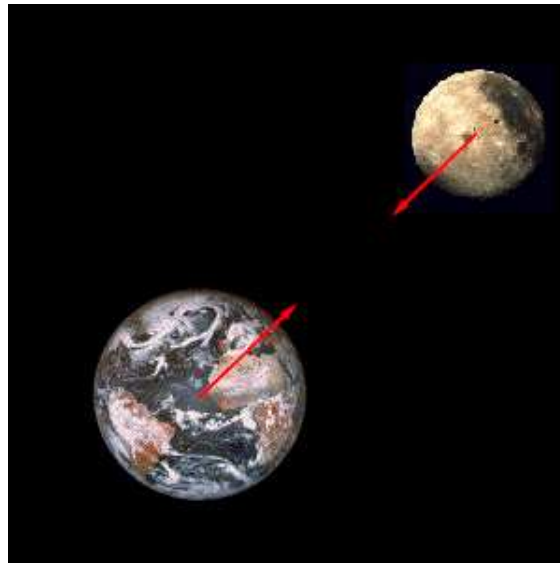
La materia sigue la trayectoria más recta posible



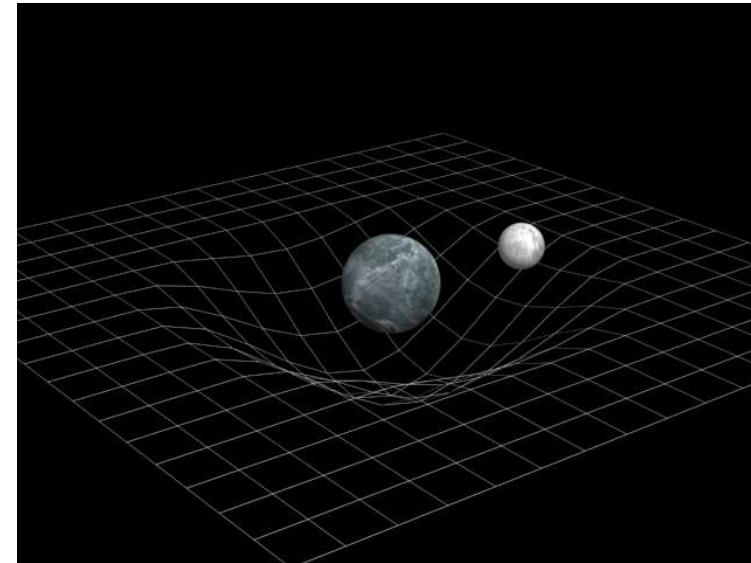
La materia sigue la trayectoria más recta posible



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

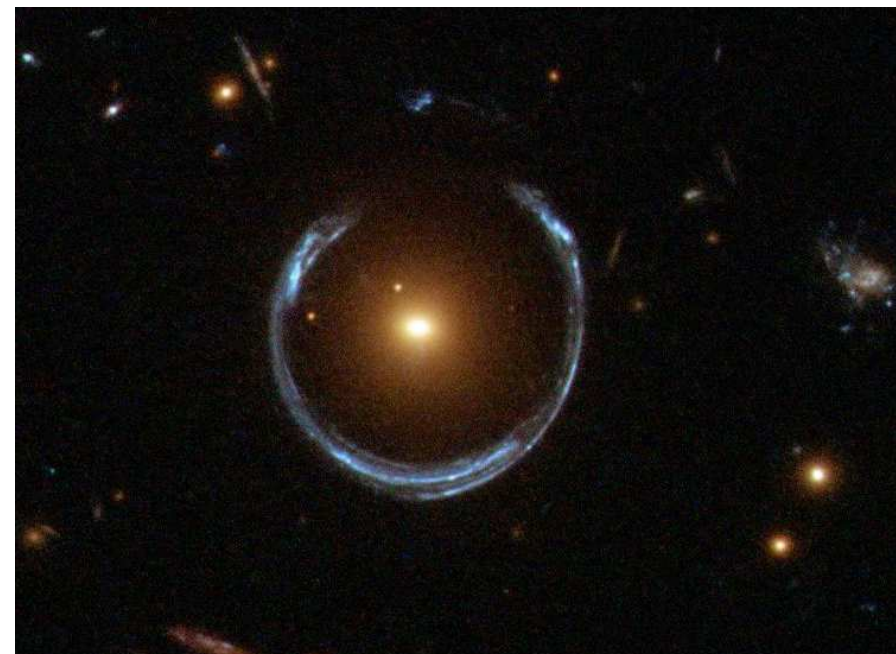
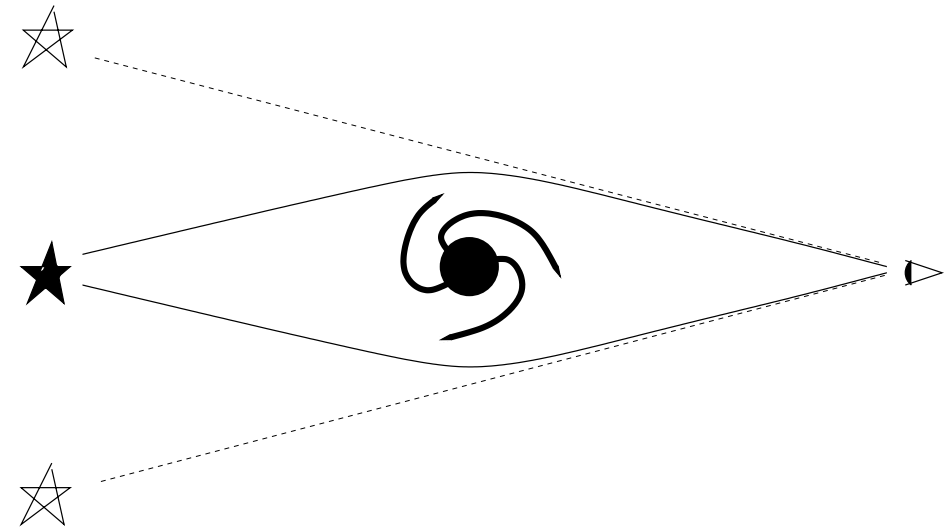
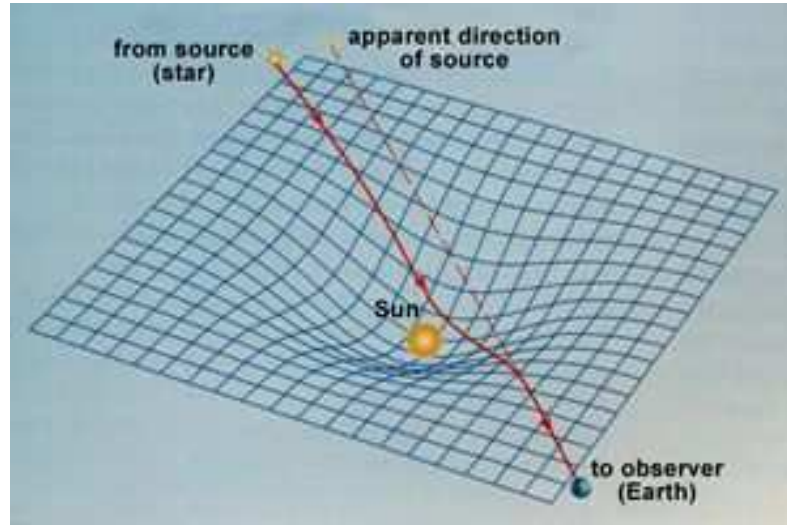


NO



SÍ

No sólo la materia, sino también la luz

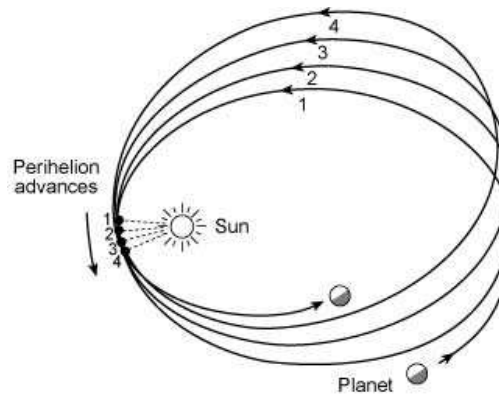


Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **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

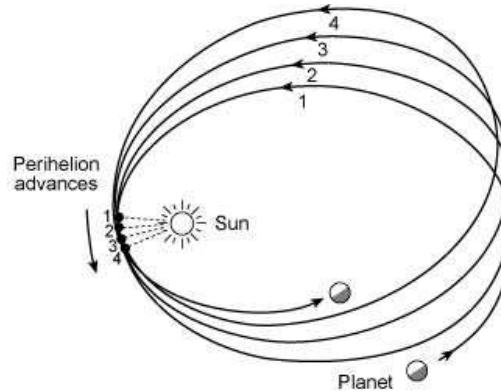


Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

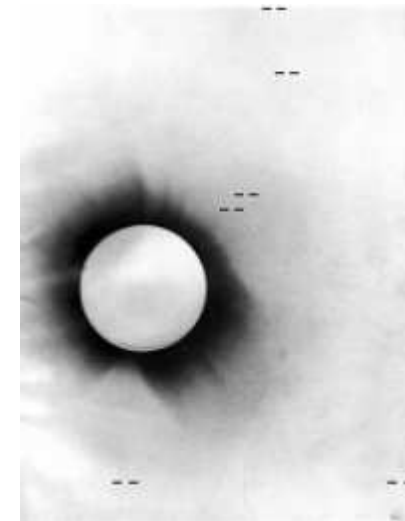
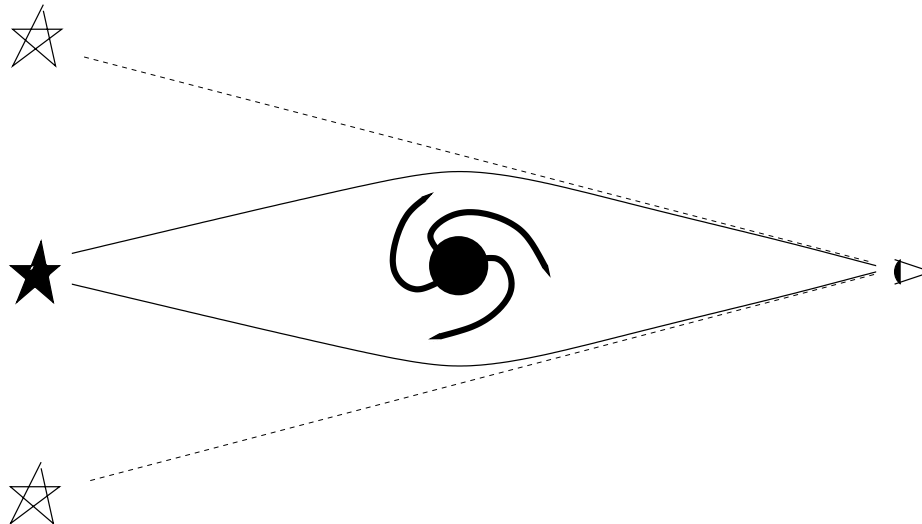
- **Precesión del perihelio de Mercurio:**

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

observ: 574.10 ± 0.65 arcsec/siglo

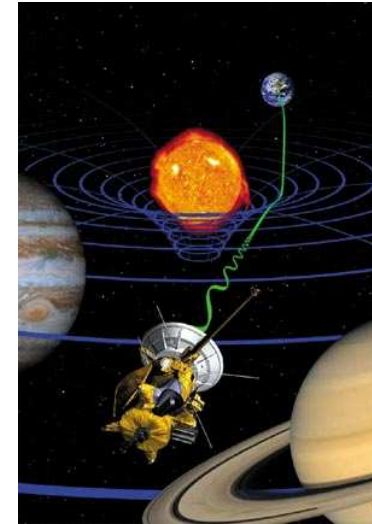
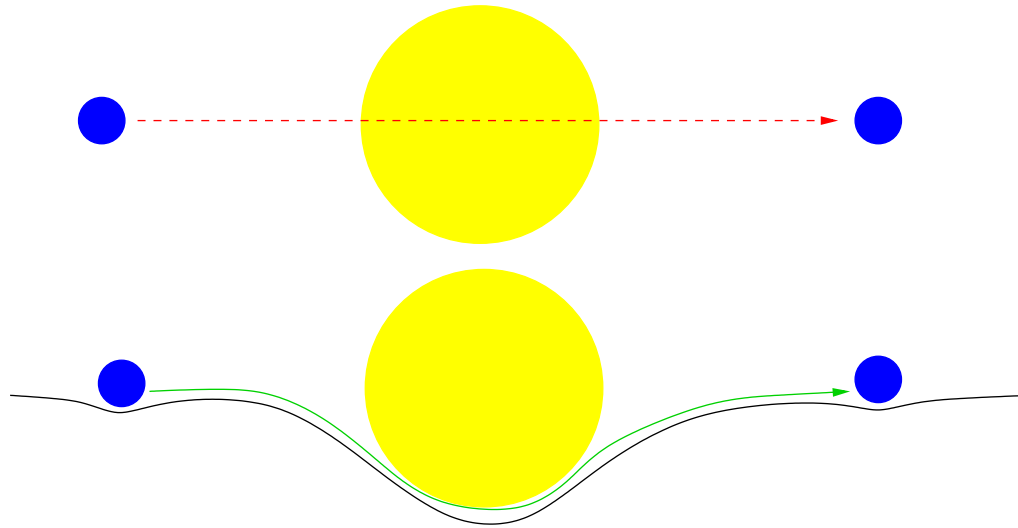


- **Desviación de la luz: 0.03% para Sol (1998)**



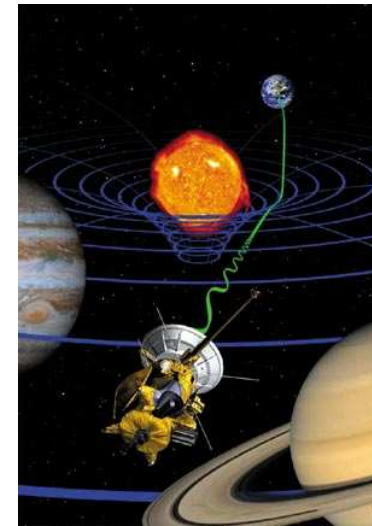
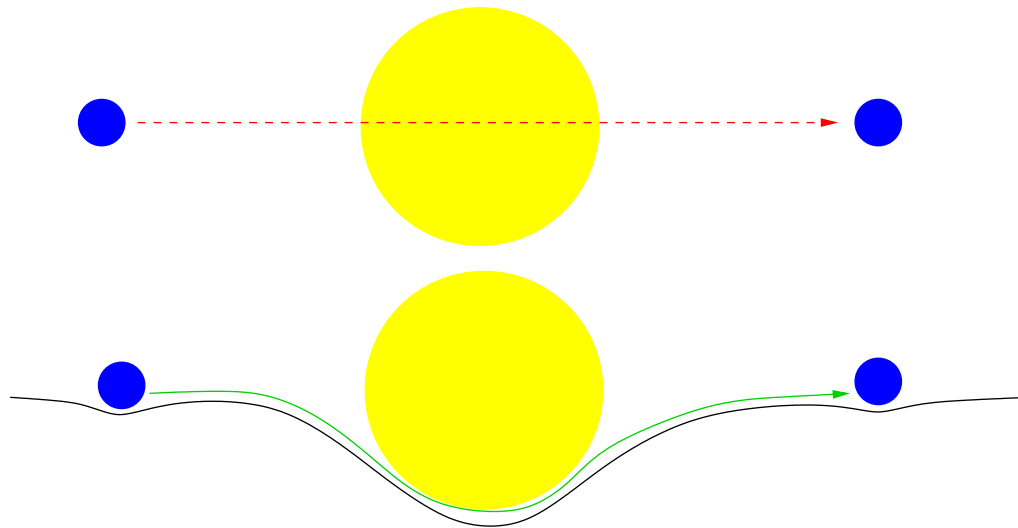
Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)



Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

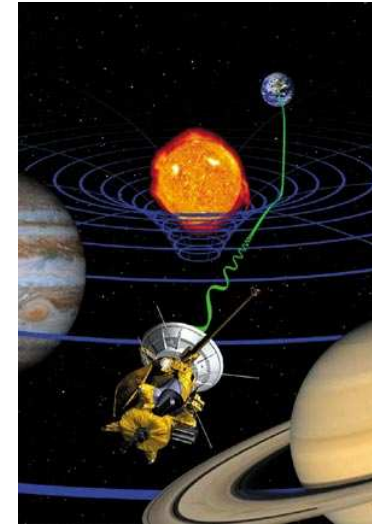
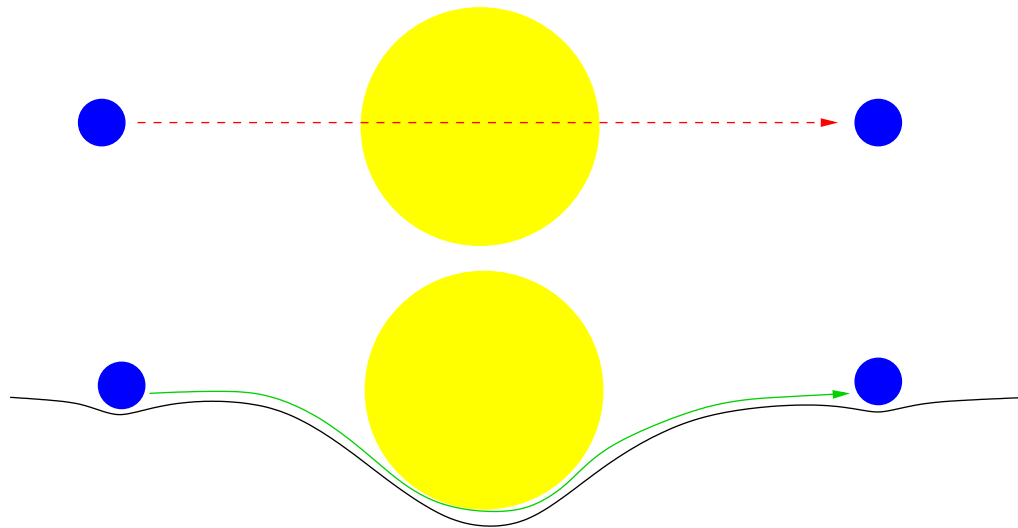
- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)



- **Dilatación temporal gravitatoria:** $7 \cdot 10^{-5}\%$ (Gravity Probe A, 1976)
- **Efecto geodético:** 0.5% (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

- **Efecto Shapiro:** 0.002% (Cassini en Saturno, 2003)



- **Dilatación temporal gravitatoria:** $7 \cdot 10^{-5}\%$ (Gravity Probe A, 1976)
- **Efecto geodético:** 0.5% (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

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física



NO



más como...

2. Ondas gravitacionales

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física

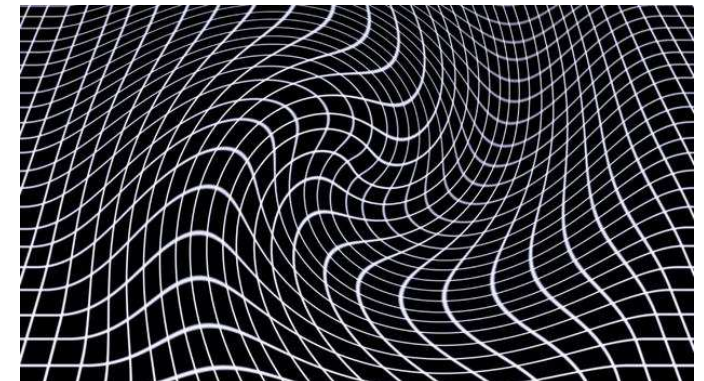


NO



más como...

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



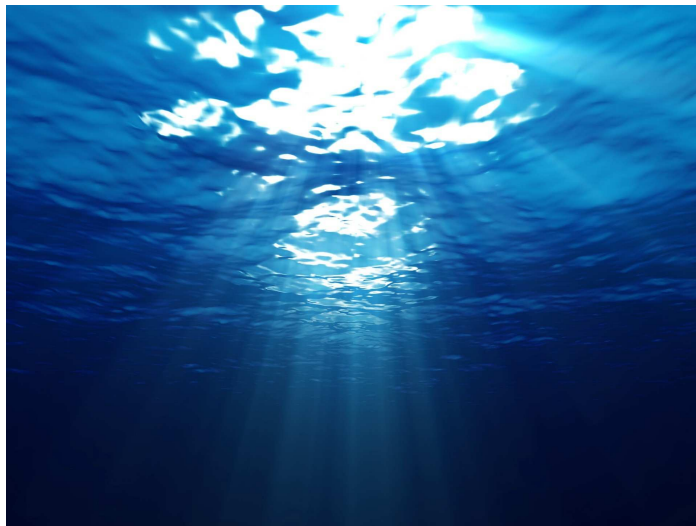
Ondas gravitacionales =
perturbaciones en el espaciotiempo que se
propagan solos



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...



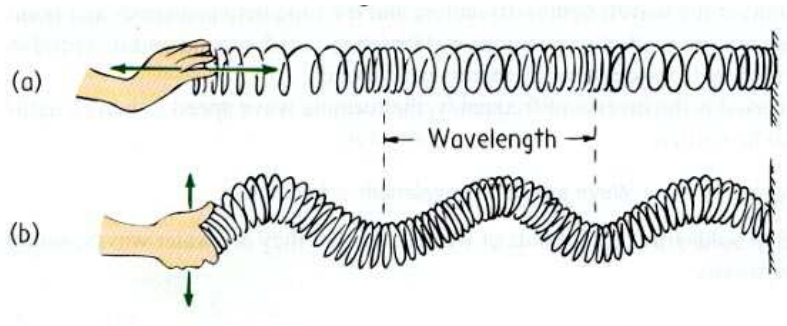
NO



SÍ

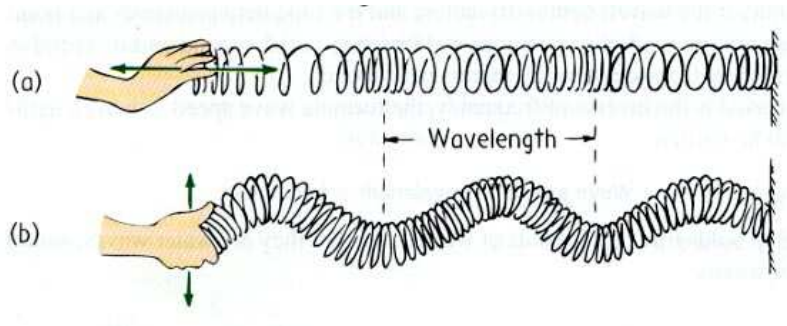
Predicciones de Relatividad General:

- Ondas transversales



Predicciones de Relatividad General:

- Ondas transversales

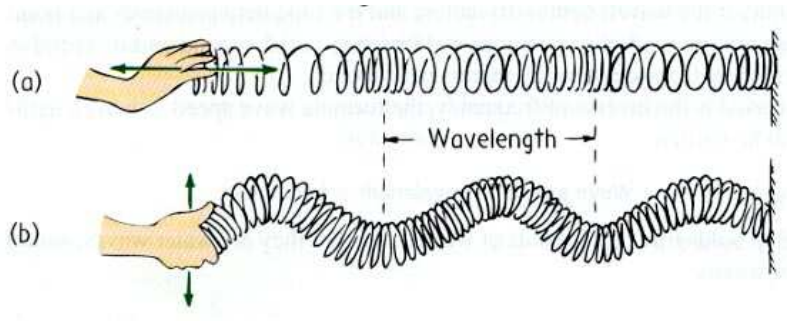


- Se propagan a la velocidad de la luz

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

Predicciones de Relatividad General:

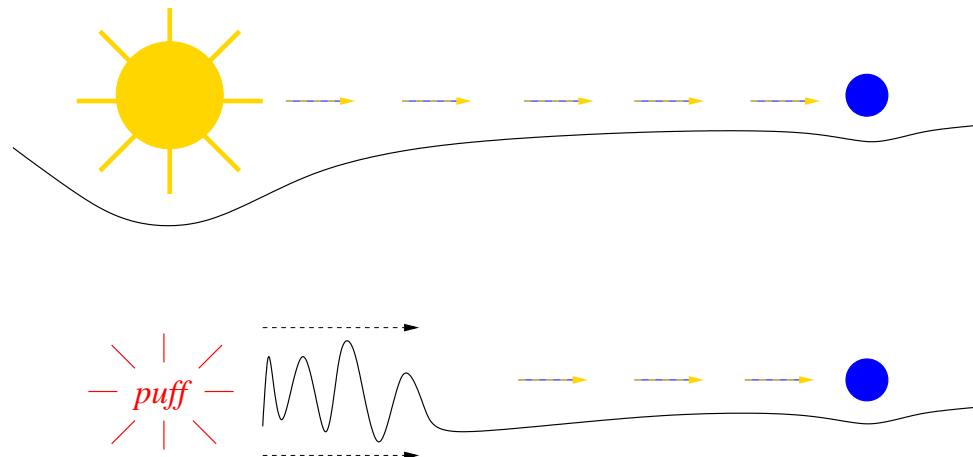
- Ondas transversales



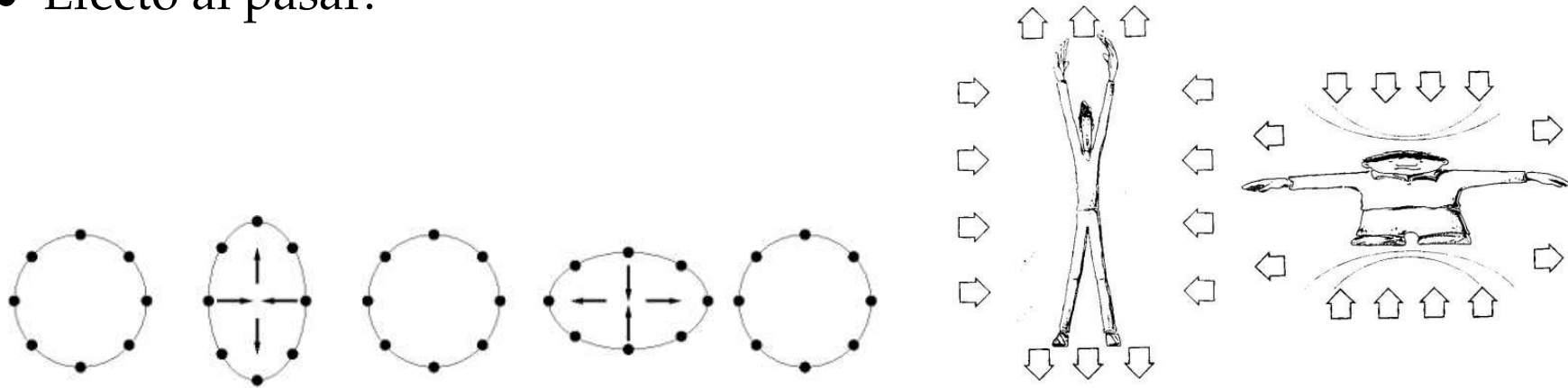
- Se propagan a la velocidad de la luz

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

→ Solución al problema de Newton

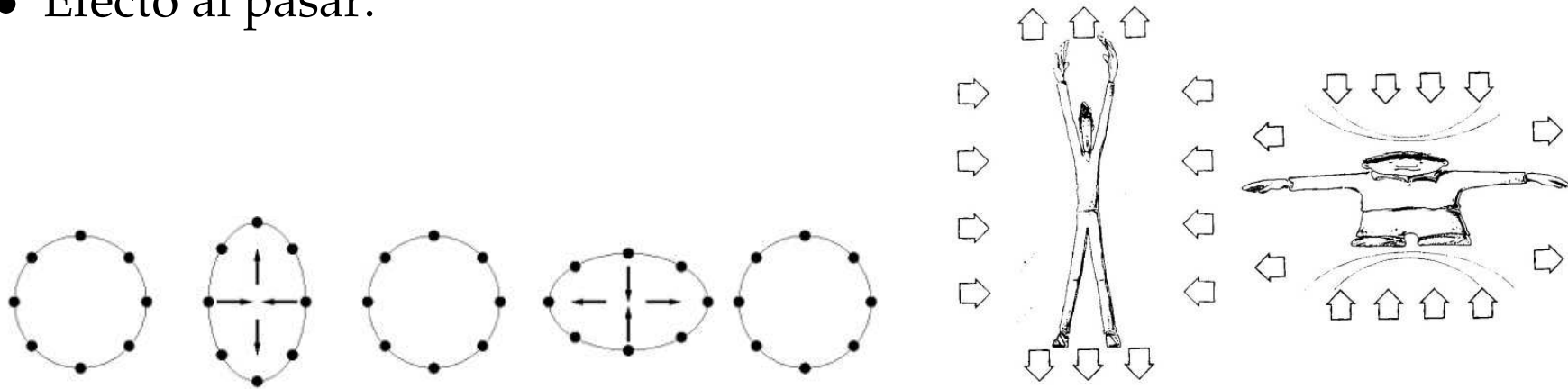


- Efecto al pasar:



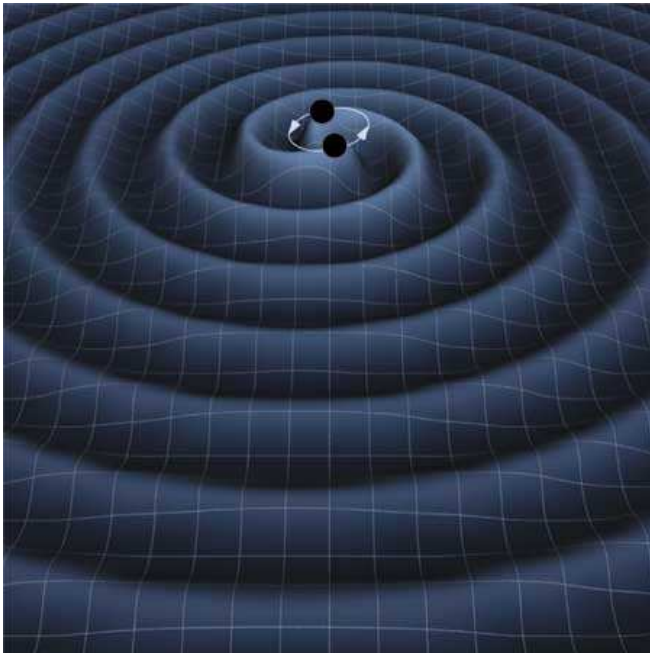
→ diferencia con ondas electromagnéticas (grav: espín 2)

- Efecto al pasar:



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

- Generadas por cambio en momento cuadrupolar de la materia

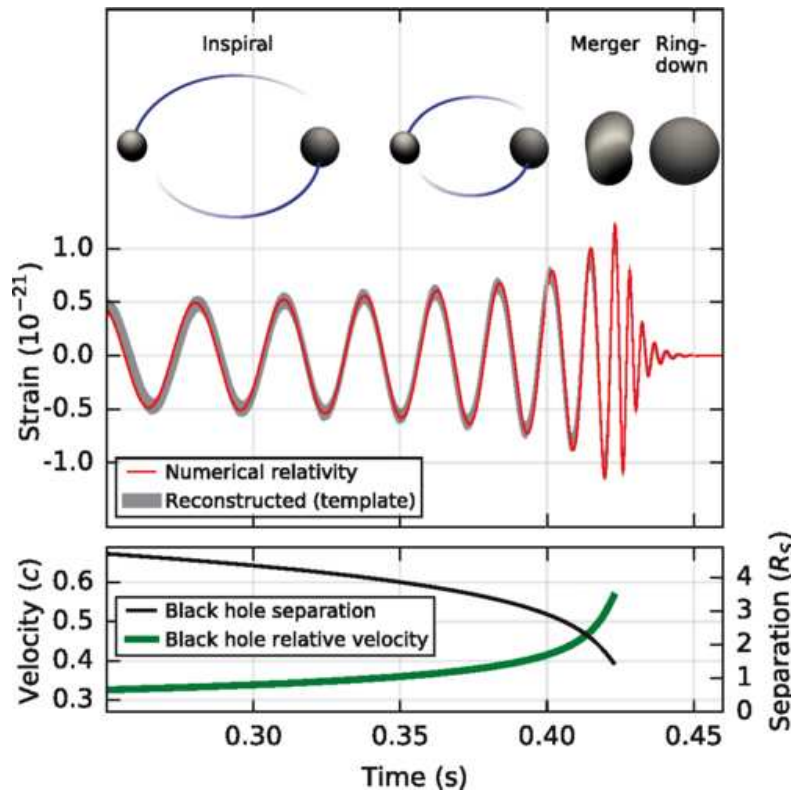


Ejemplo más común: sistema binario

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
- señal muy típica

3. Un poco de historia

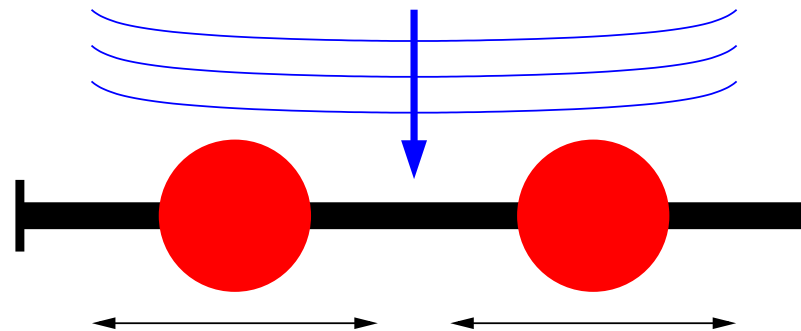
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales
→ difícilmente detectables

3. Un poco de historia

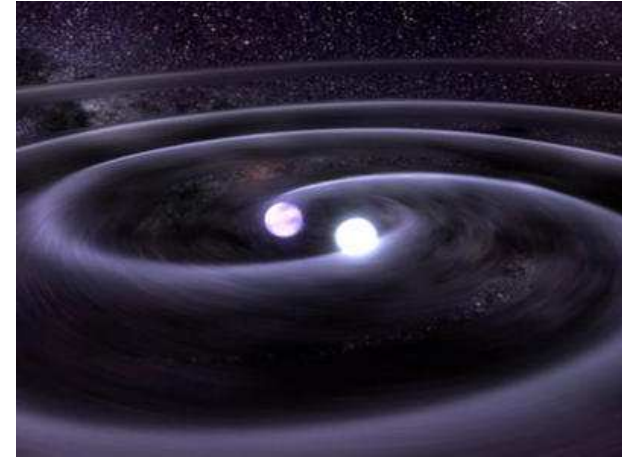
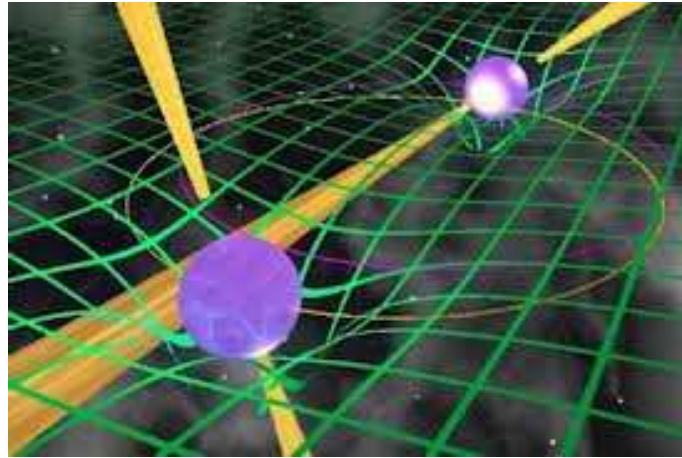
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales
→ difícilmente detectables
- 1925: Brinkmann publica solución exacta de una onda gravitacional
- 1936: Einstein y Rosen argumentan que ondas gravitacionales no existen (como solución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

3. Un poco de historia

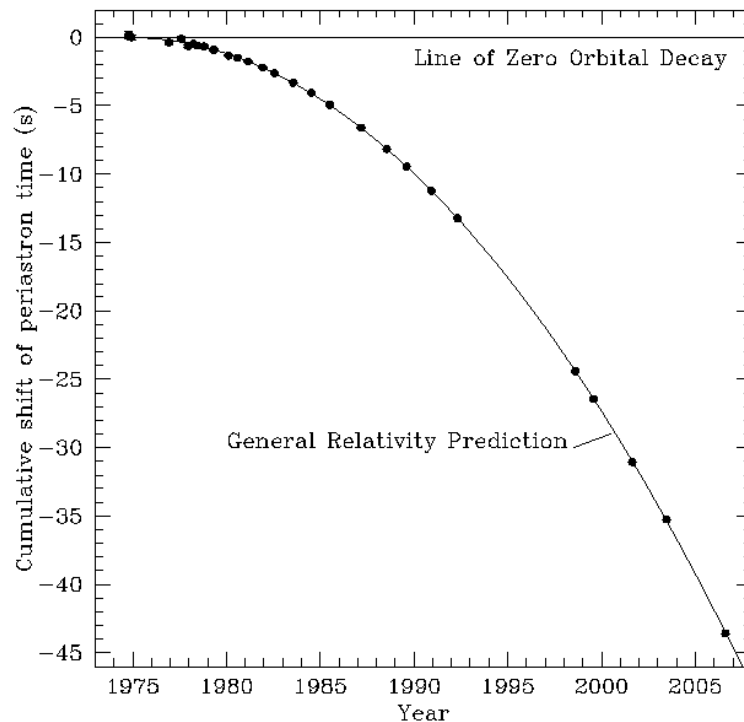
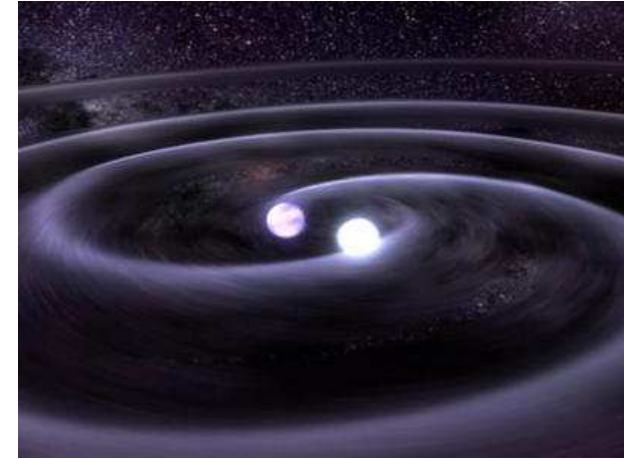
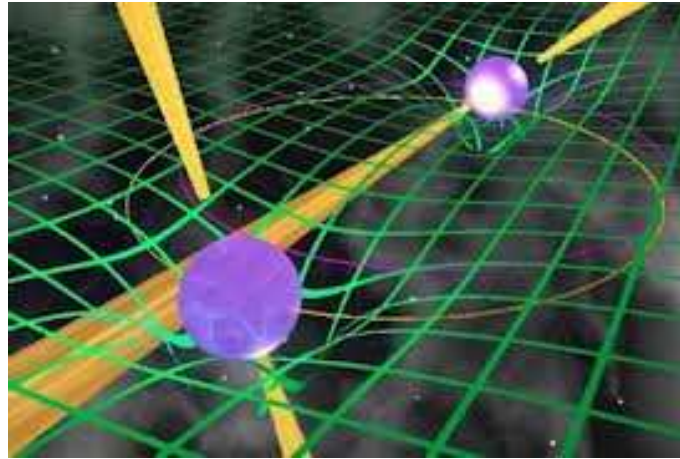
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales
→ difícilmente detectables
- 1925: Brinkmann publica solución exacta de una onda gravitacional
- 1936: Einstein y Rosen argumentan que ondas gravitacionales no existen (como solución 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



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

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

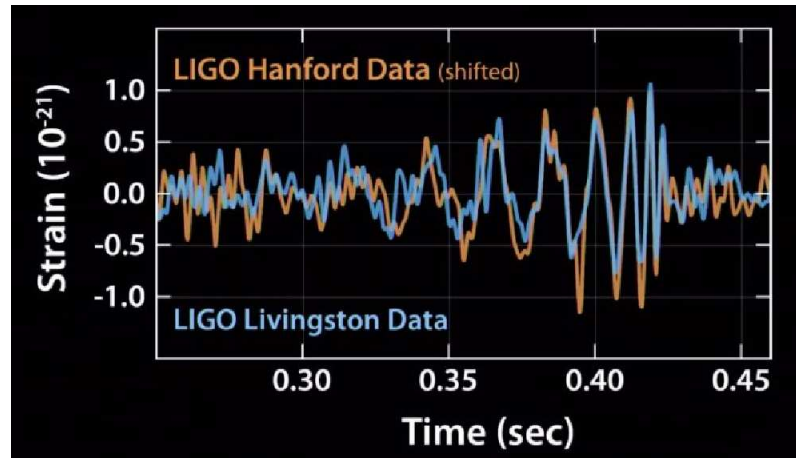
$$T = 7,75 \text{ h} \quad \Delta T = -76,5 \mu\text{s/y}$$

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

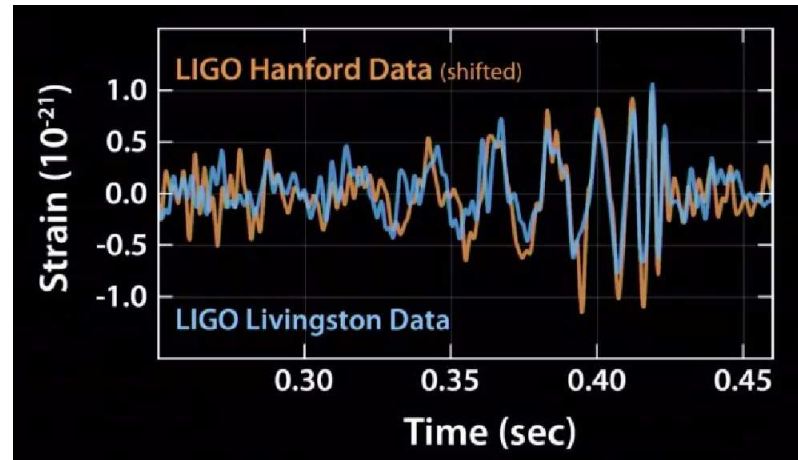
$$\Delta L_{\text{obs}}/\Delta L_{\text{theor}} = 0,997 \pm 0,002$$

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

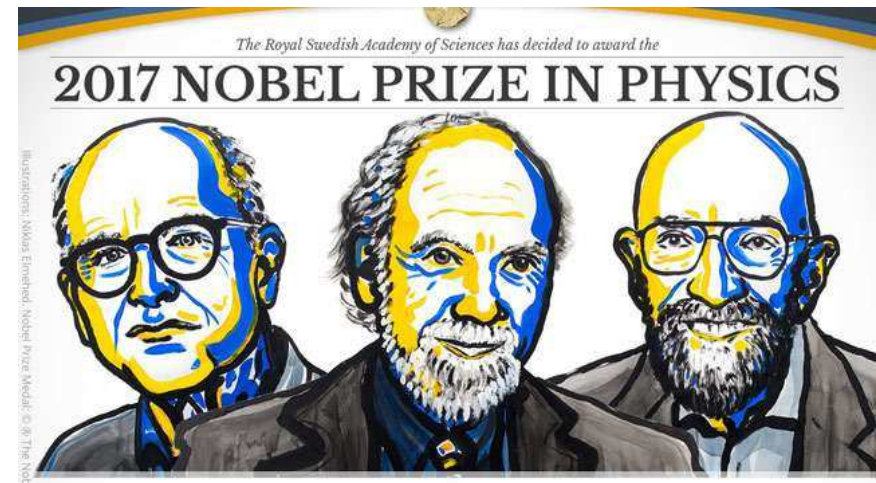
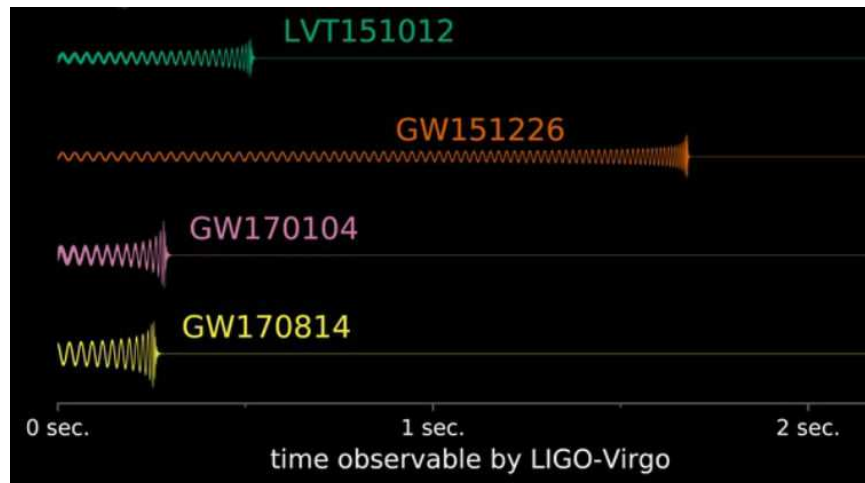
- 1984: Thorne, Drever y Weiss fundan LIGO
- 2002 - 2010: Primera ronda de mediciones de LIGO: sin resultados
- 14 sept 2015: Detección directa en Advanced LIGO: GW150914



- 1984: Thorne, Drever y Weiss fundan LIGO
- 2002 - 2010: Primera ronda de mediciones de LIGO: sin resultados
- 14 sept 2015: Detección directa en Advanced LIGO: GW150914



- 2015 - 2019: LVT151012, GW151226, GW170104, GW170814, GW170817
Colaboración de Virgo, Premio Nobel 2017, ...

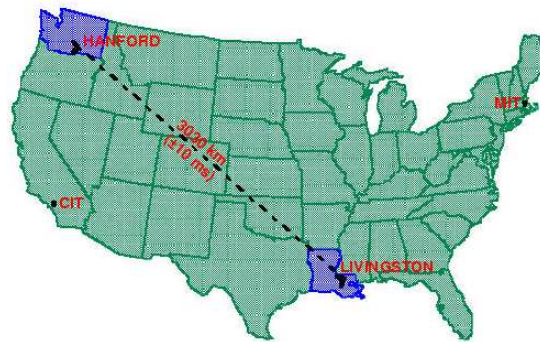


4. La detección directa de LIGO

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)



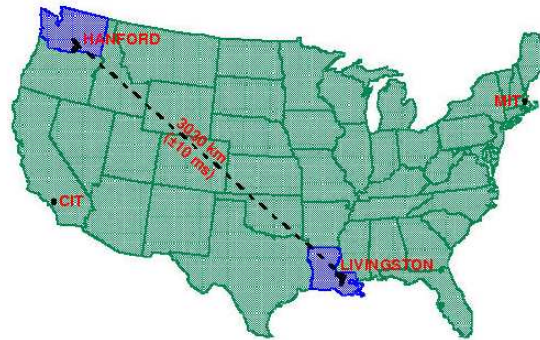
Livingston (LA)

4. La detección directa de LIGO

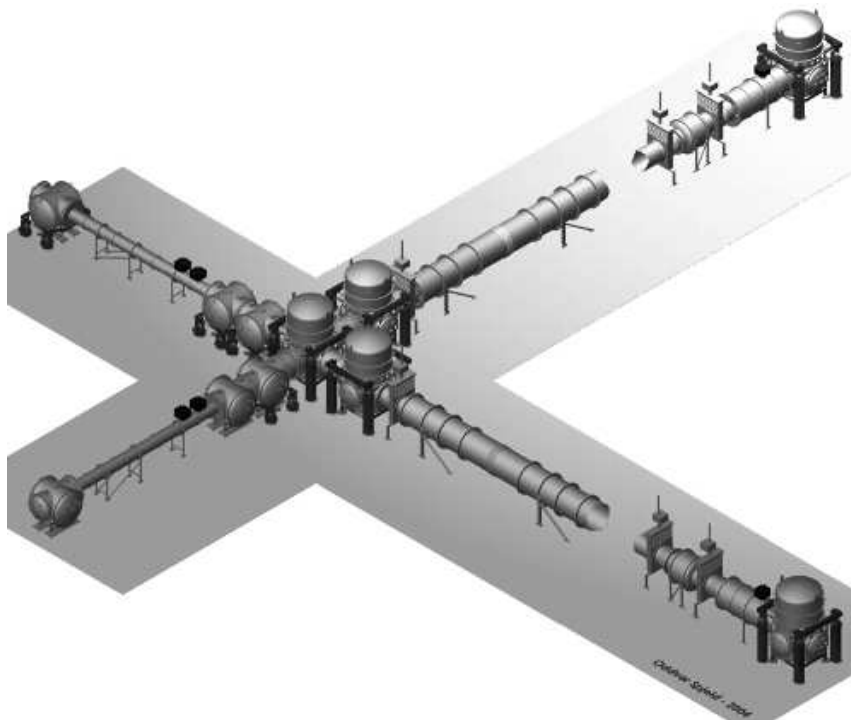
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)



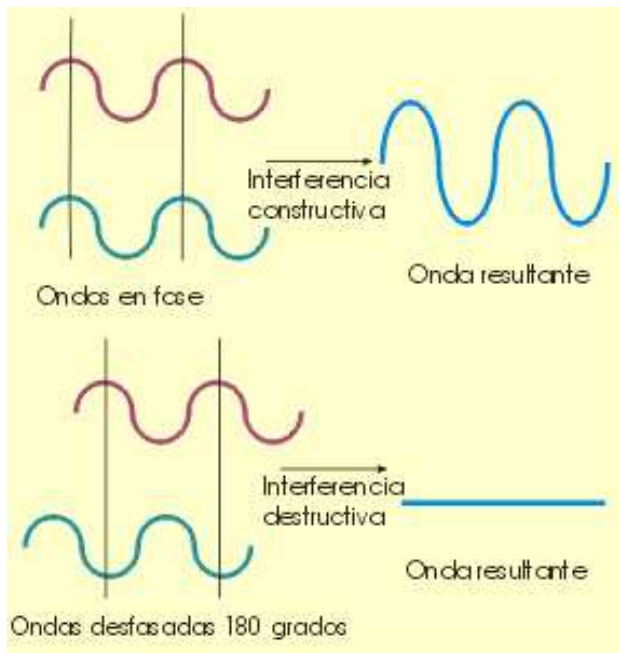
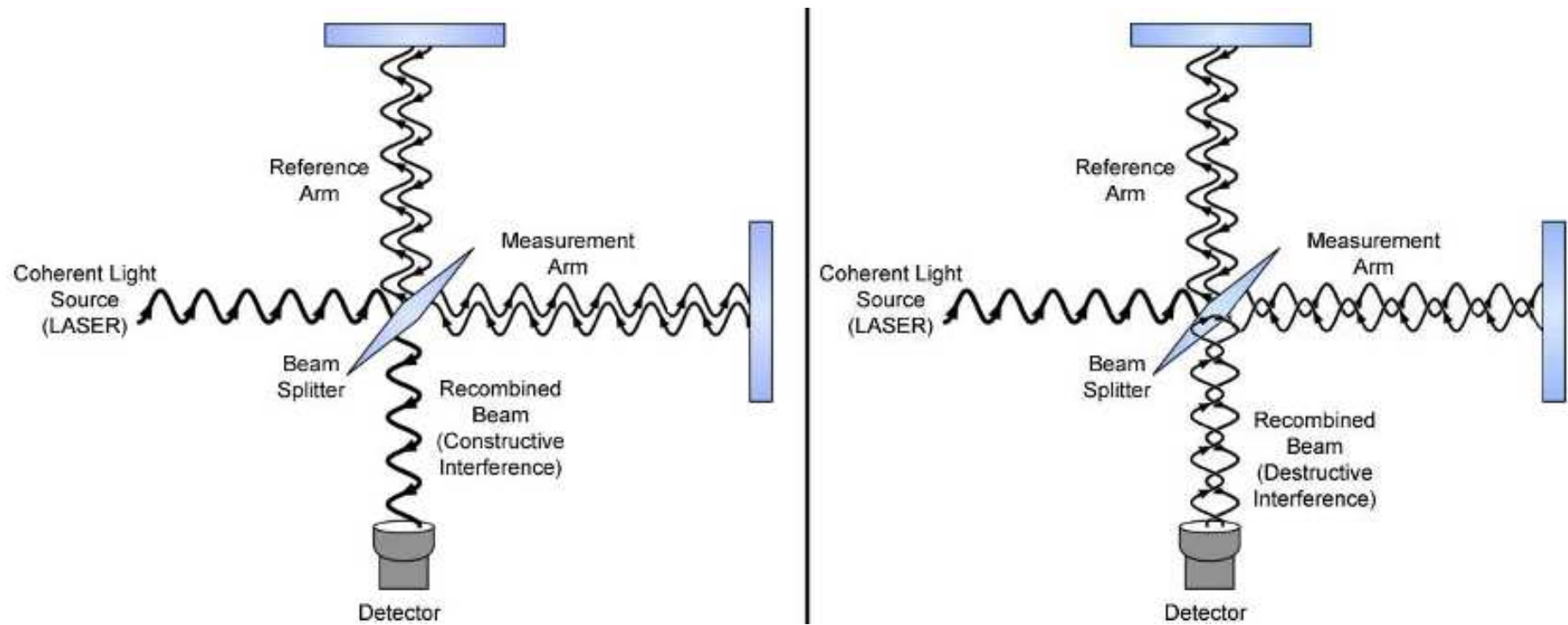
Livingston (LA)



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

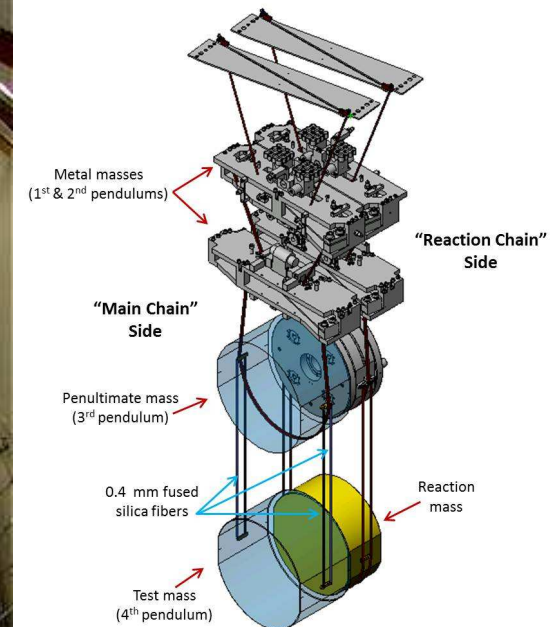
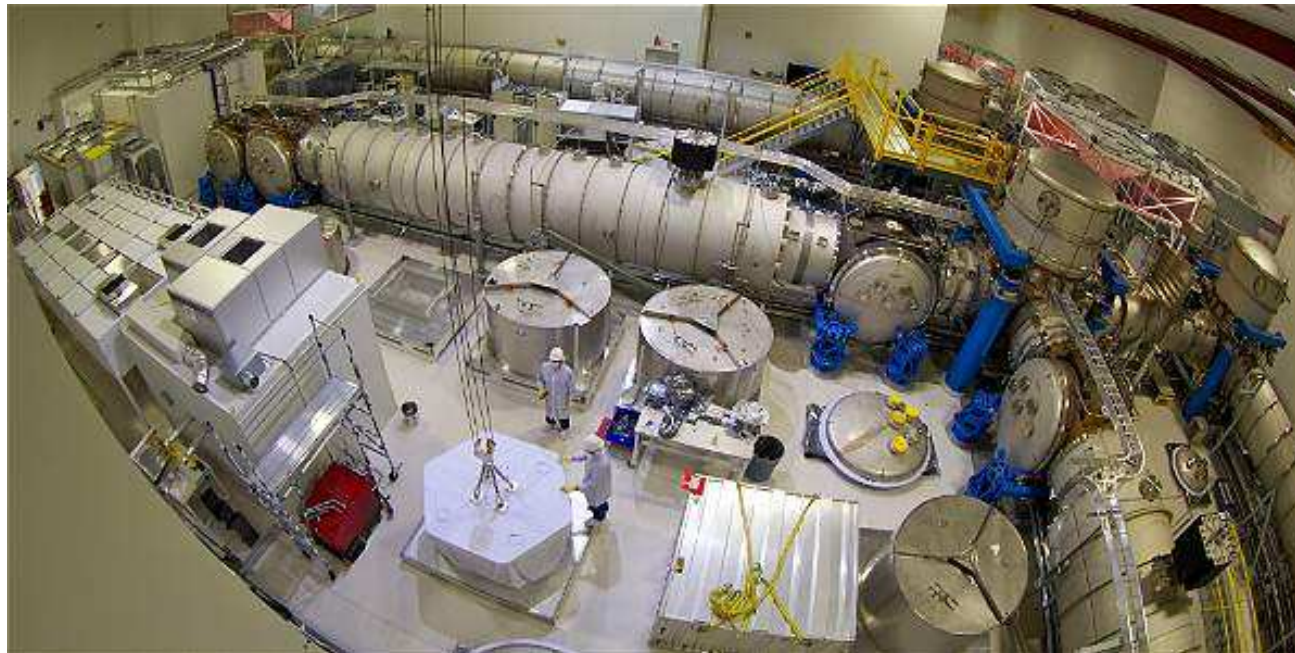
Sensibilidad: $\Delta L/L = 10^{-21}$

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

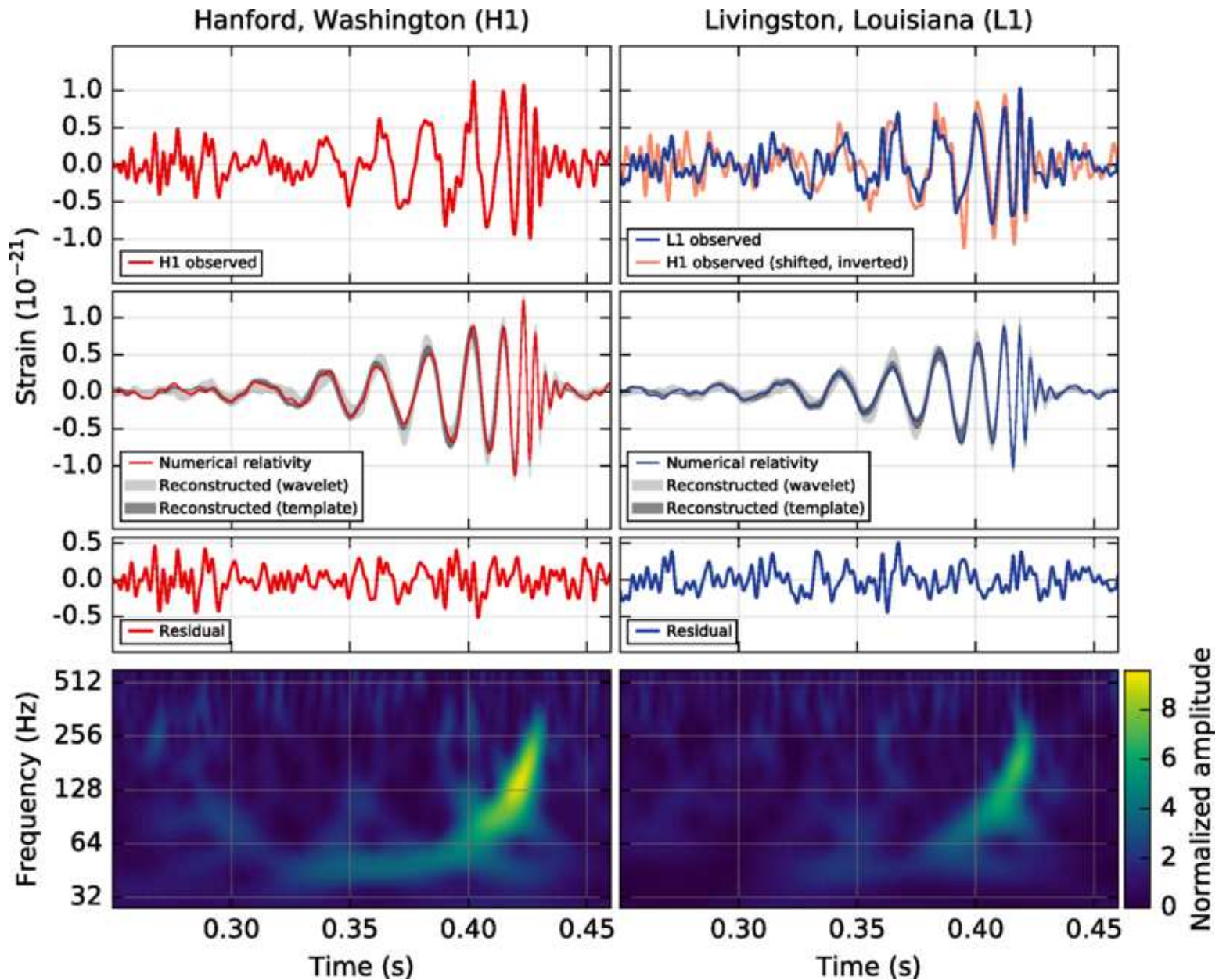
NB: radio de carga del protón $R_p = 0,8 \cdot 10^{-15} m$

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!



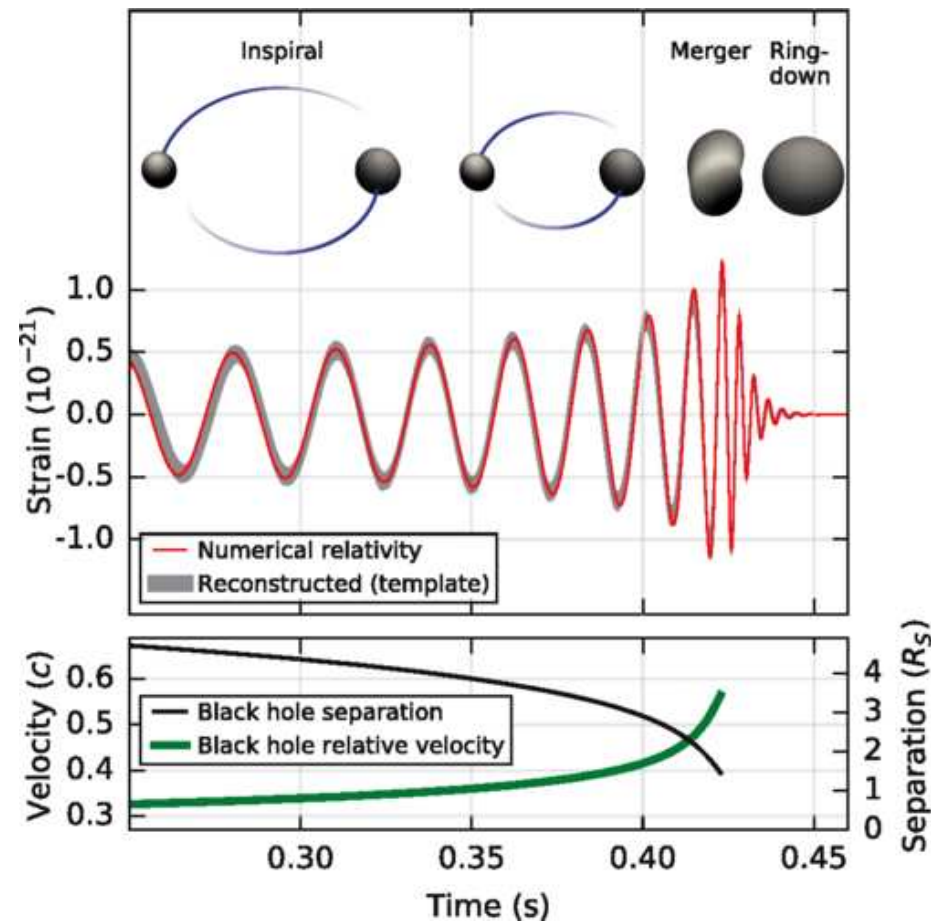
El 14 de septiembre 2015 a las 9:50 UTC: GW150914



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

Señal típica de colisión de dos objetos masivos:

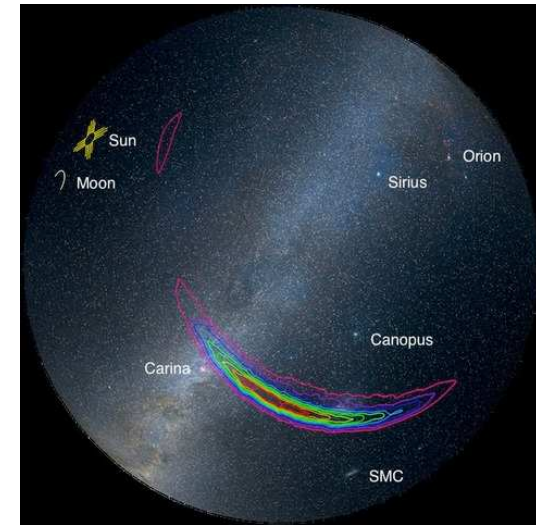
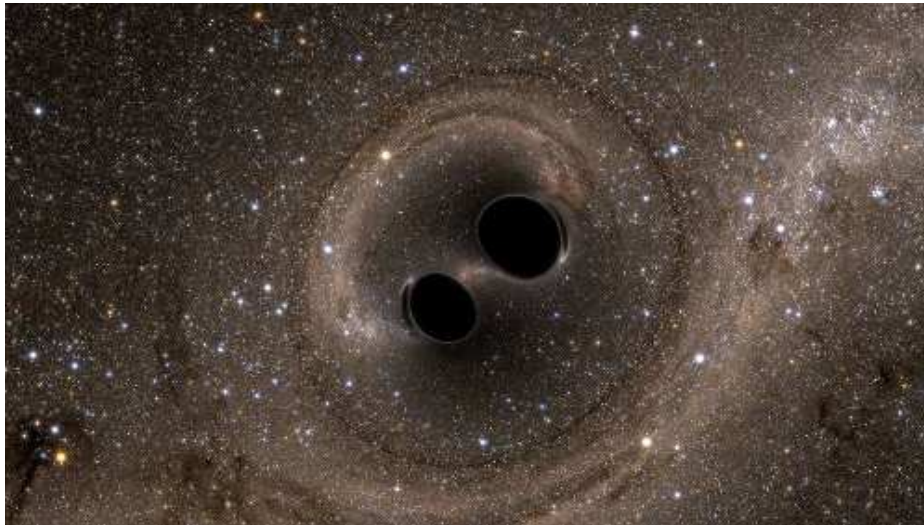
- 6,9 ms de retraso entre las dos señales
- Aumento de frecuencia y amplitud de 35 Hz a 150 Hz en 0,2 s
- Oscilaciones amortiguadas después de máximo



Datos indican (90% confidence level):

- Dos objetos de $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ y $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

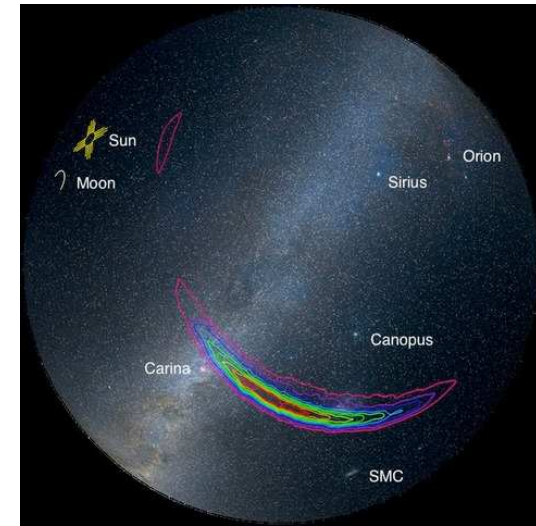
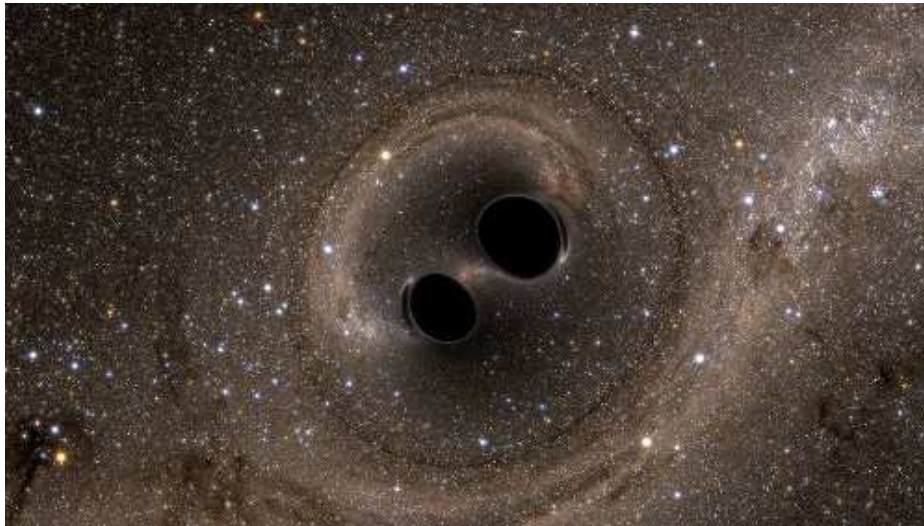
Fusión de dos agujeros negros!



Datos indican (90% confidence level):

- Dos objetos de $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_\odot$ y $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_\odot$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

Fusión de dos agujeros negros!

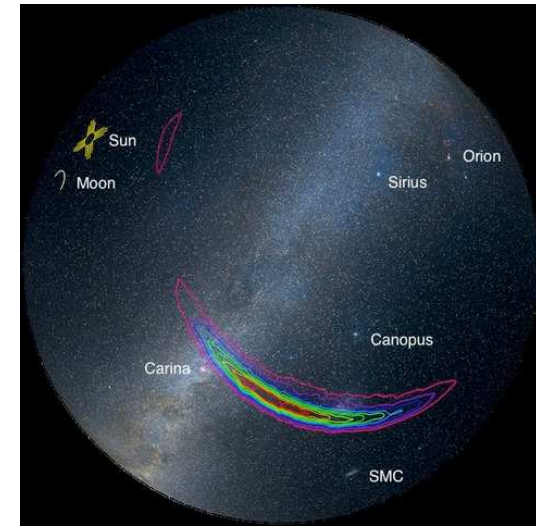
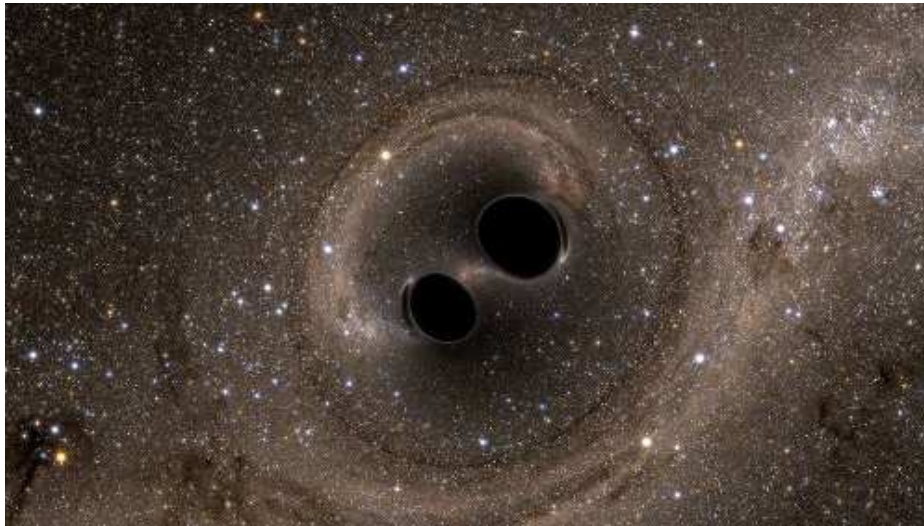


- Agujero negro resultante con $m_f = 62_{-4}^{+4} M_\odot$ y $a = 0,67_{-0,07}^{+0,05}$
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales: $E_{\text{rad}} \approx 3_{-0,5}^{-0,5} M_\odot c^2$
(comparación: $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$; $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$)

Datos indican (90% confidence level):

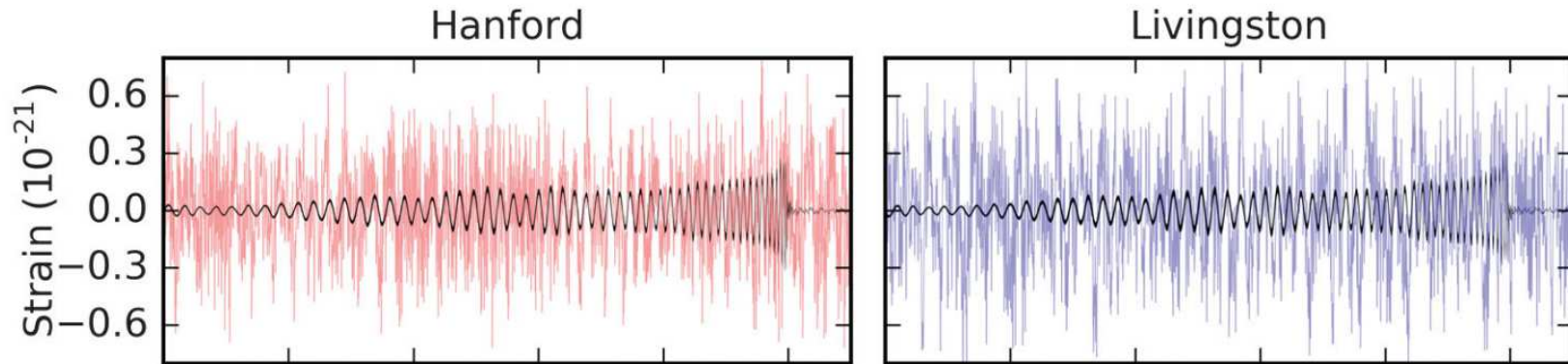
- Dos objetos de $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_\odot$ y $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_\odot$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

Fusión de dos agujeros negros!



- Agujero negro resultante con $m_f = 62_{-4}^{+4} M_\odot$ y $a = 0,67_{-0,07}^{+0,05}$
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales: $E_{\text{rad}} \approx 3_{-0,5}^{-0,5} M_\odot c^2$
(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 ($z \approx 0,09$)

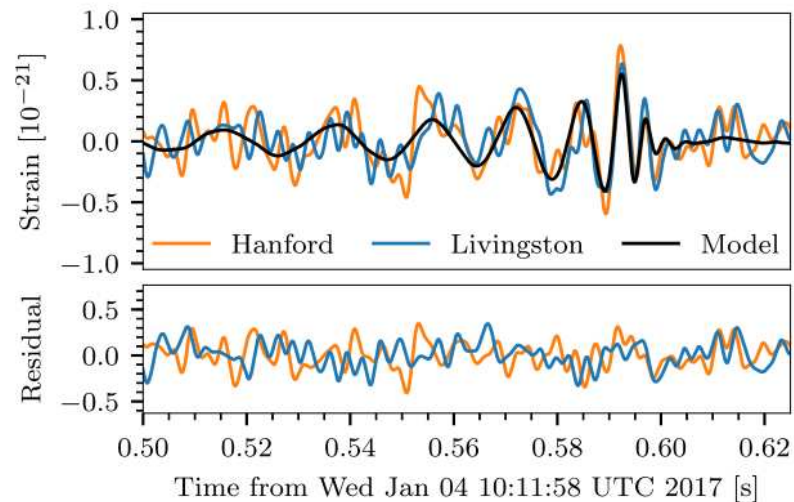
Segundo evento: 26 de diciembre 2015 a las 3:38 UTC: GW151226



Fusión de agujeros negros con $M_1 = 14,2_{-3,7}^{+8,3} M_\odot$ y $M_2 = 7,5_{-2,3}^{+2,3} M_\odot$

Agujero negro resultante con $M_3 \approx 20,8_{-1,7}^{+6,1} M_\odot \implies E/c^2 \approx 1M_\odot$

Tercer evento: 4 de enero 2017 a las 10:11:58 UTC: GW170104

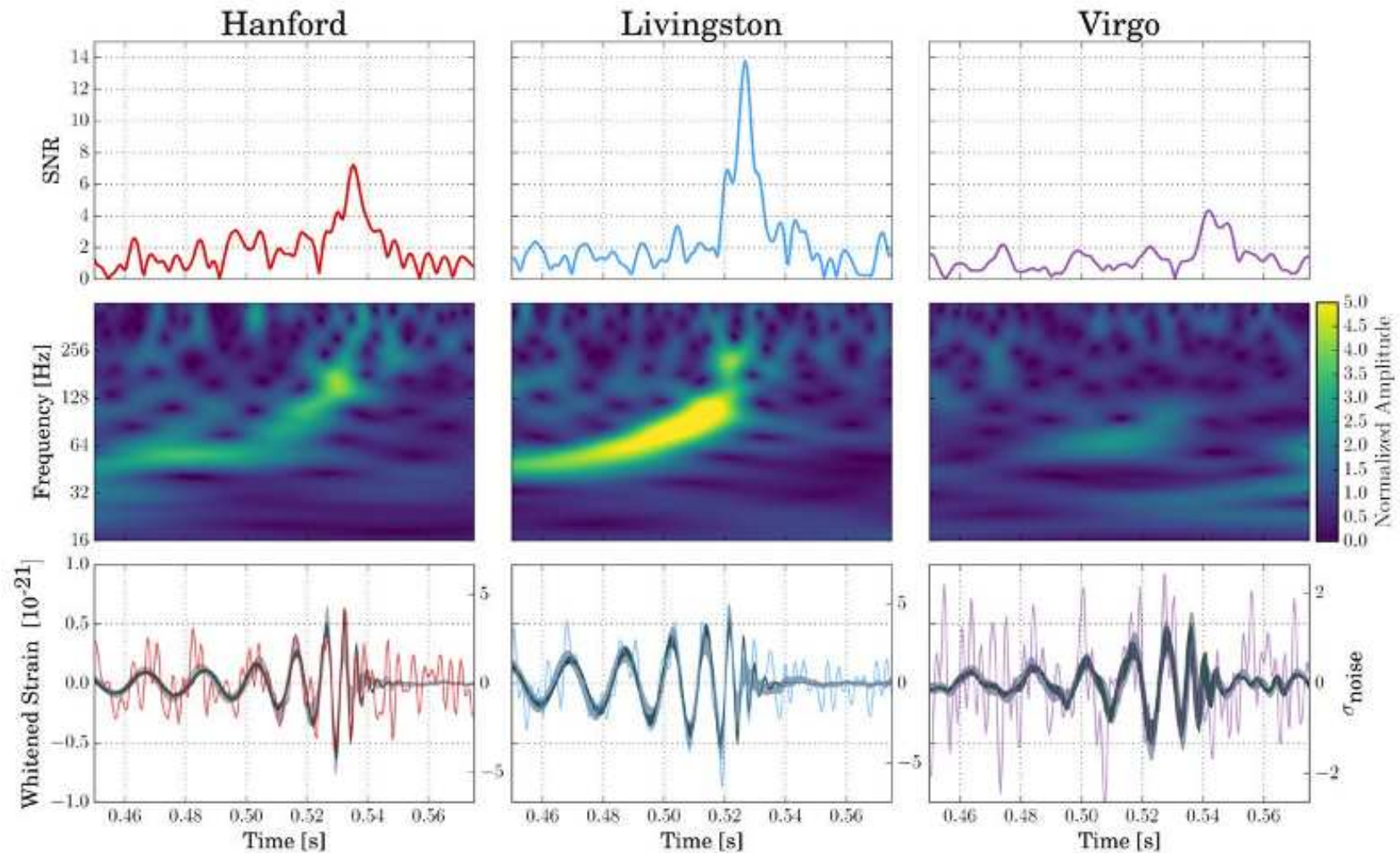


Fusión de agujeros negros con $M_1 = 31,2_{-6,0}^{+8,4} M_\odot$ y $M_2 = 19,4_{-5,9}^{+5,3} M_\odot$

Agujero negro resultante con $M_3 = 48,7_{-4,6}^{+5,7} M_\odot \implies E/c^2 \approx 2M_\odot$

Cuatro evento: 14 de agosto 2018 a las 10:30:43 UTC: GW170814

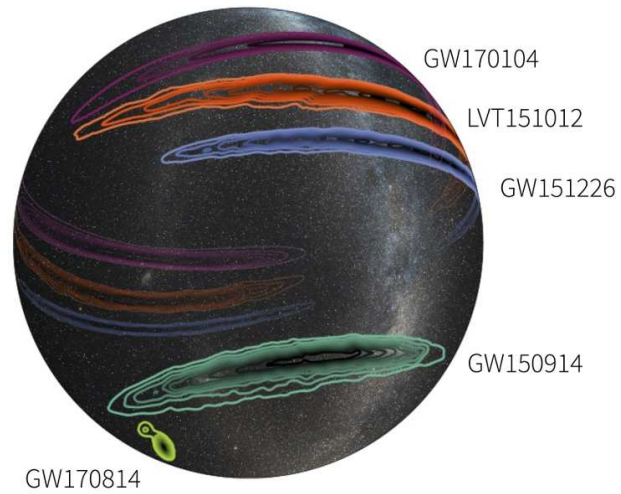
→ Incorporación de VIRGO (Pisa)



Fusión de agujeros negros con $M_1 = 30,5^{+5,7}_{-3,0} M_\odot$ y $M_2 = 25,3^{+2,8}_{-4,2} M_\odot$

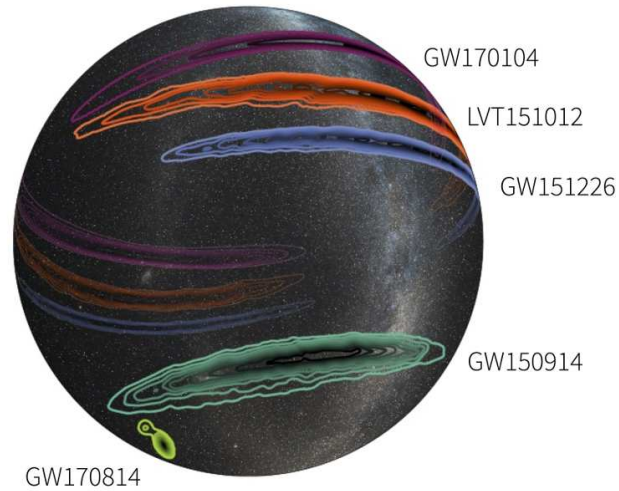
Agujero negro resultante con $M_3 = 53,2^{+3,2}_{-2,5} M_\odot \implies E/c^2 = 2,7^{+0,5}_{-0,5} M_\odot$

Detectado en 3 detectores: **mucho más información obtenible!**

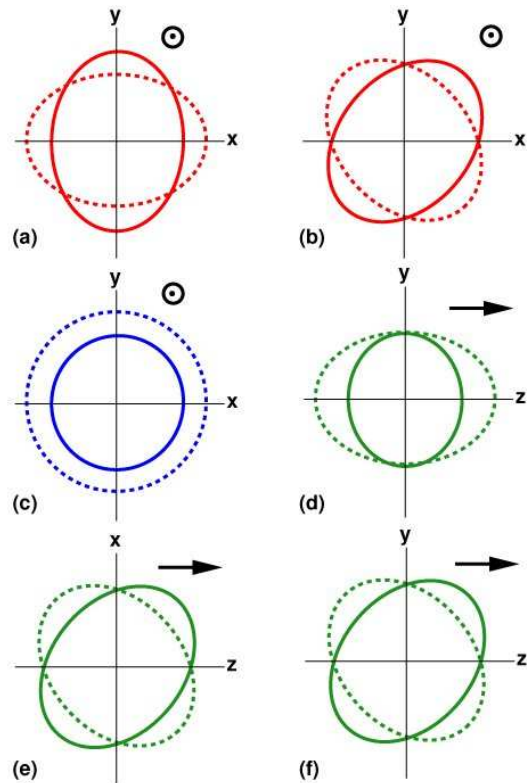


Triangulación de posición:
Localizado en área de 60 grados^2
—→ 20 veces más precisión
—→ buscar otras señales?

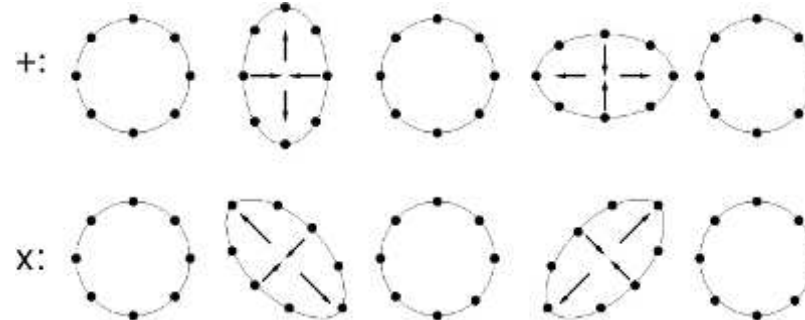
Detectado en 3 detectores: **mucho más información obtenible!**



Triangulación de posición:
 Localizado en área de 60 grados^2
 → 20 veces más precisión
 → buscar otras señales?



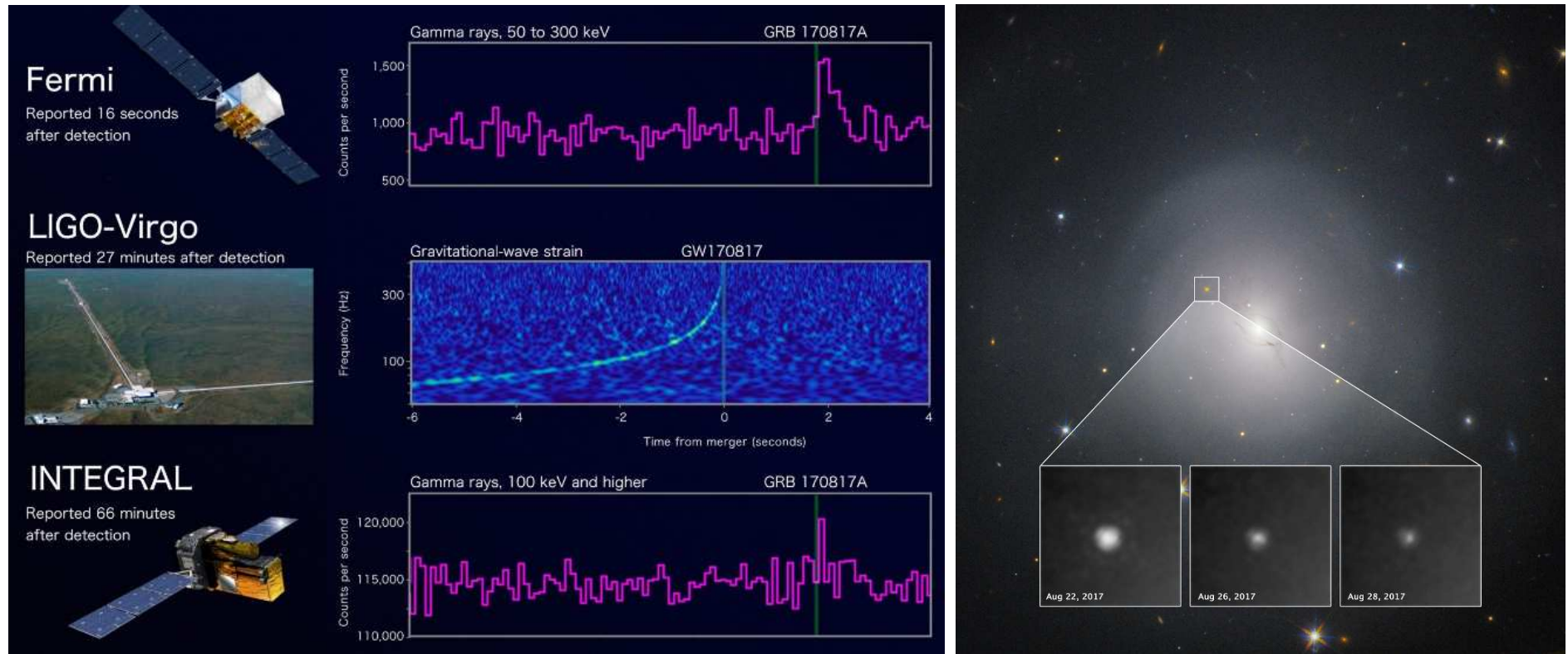
Polarización de ondas gravitacionales:
 Relat. Gen. predice (a) y (b)
 Relat. Gen. prohíbe (c), (d), (e), (f)



→ Análisis de GW170814 favorece (a) y (b)!

Quinto evento: 17 de agosto 2017: GW170817

Correlaciones con señales ópticas GW170817 = GRB 170817A = AT 2017gfo

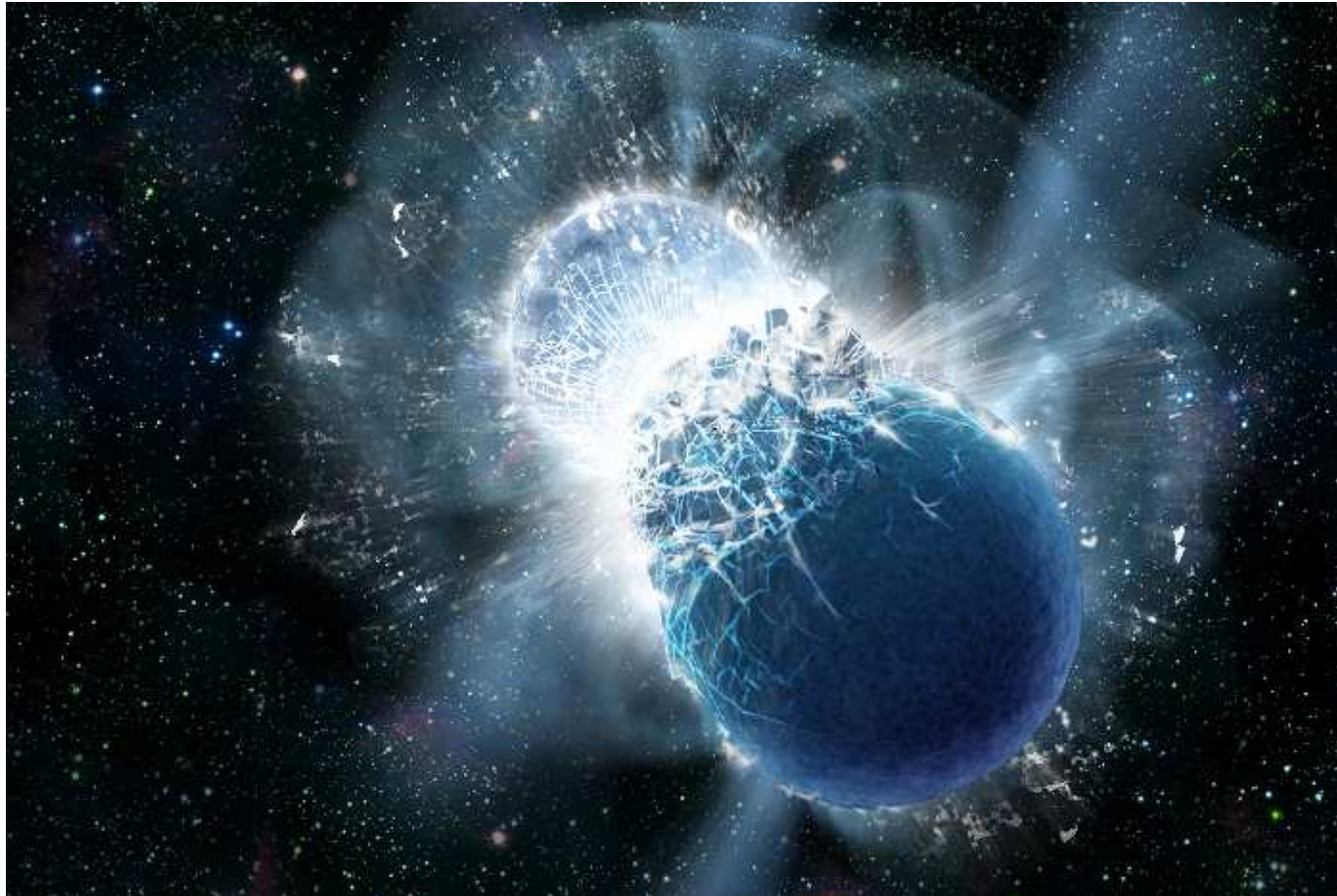


Detectado en rayos gamma, rayos X, luz visible, infrarrojo, radioondas, ...

Kilonova: Fusión de dos estrellas de neutrones con $M_{\text{tot}} = 2,82^{+0,47}_{-0,09} M_{\odot}$

90% confidence level: $M_1 = 1,36 - 2,26 M_{\odot}$ y $M_2 = 0,86 - 1,36 M_{\odot}$

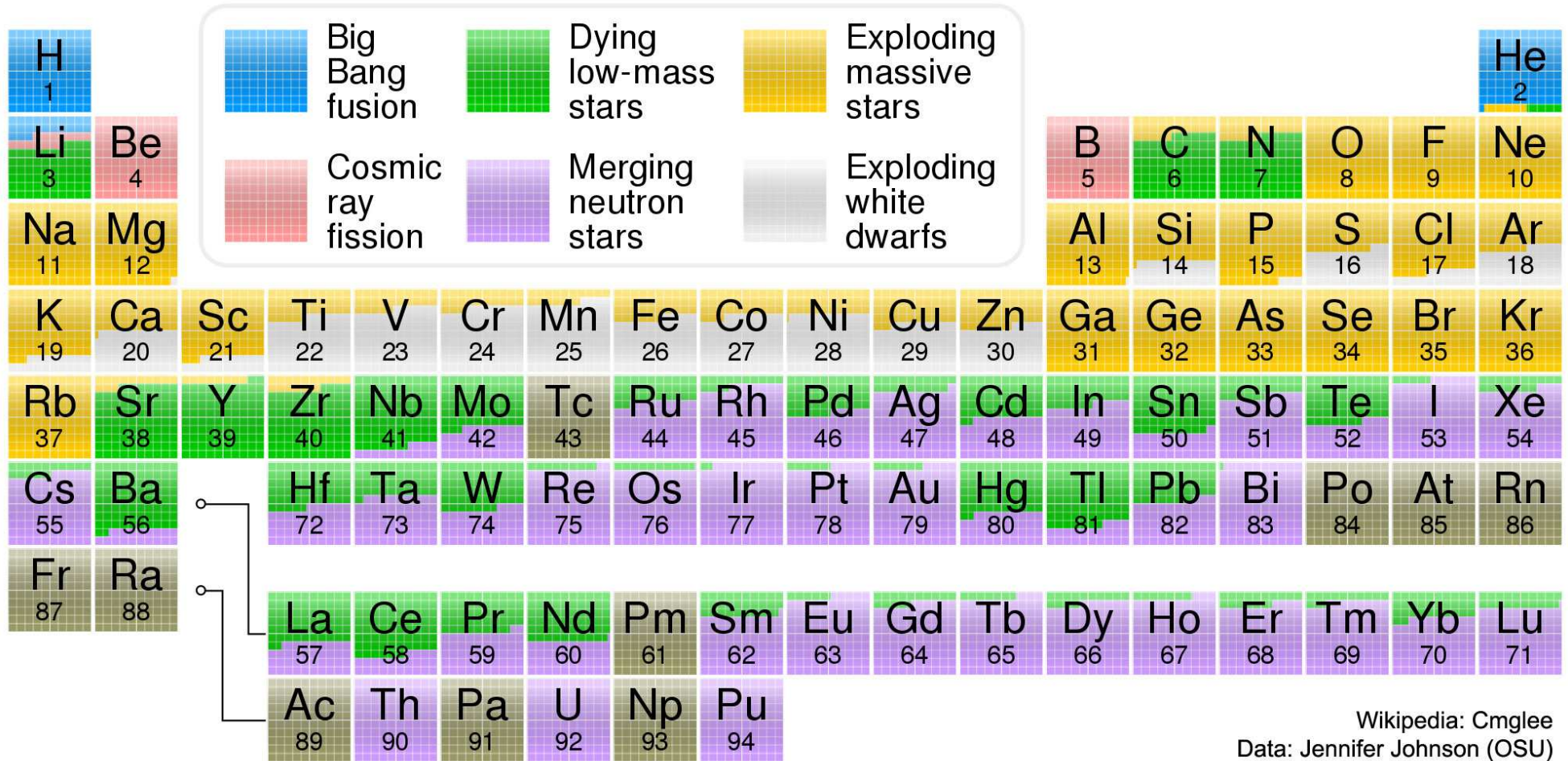
Resultado final: estrella de neutrones muy pasada o agujero negro muy ligero?



→ formación de $16000 M_{\oplus}$ en metales pesados ($> \text{Fe}$)

formación de $10 M_{\oplus}$ en oro y platino

Origen físico de los elementos:



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 agujeros negros de $M \gtrsim 30 M_{\odot}$ existen
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen

5. ¿Y ahora qué...?

Hemos aprendido mucho:

- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas
- Los agujeros negros de $M \gtrsim 30 M_{\odot}$ existen
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen
- Los GRB vienen de fusiones de estrellas de neutrones

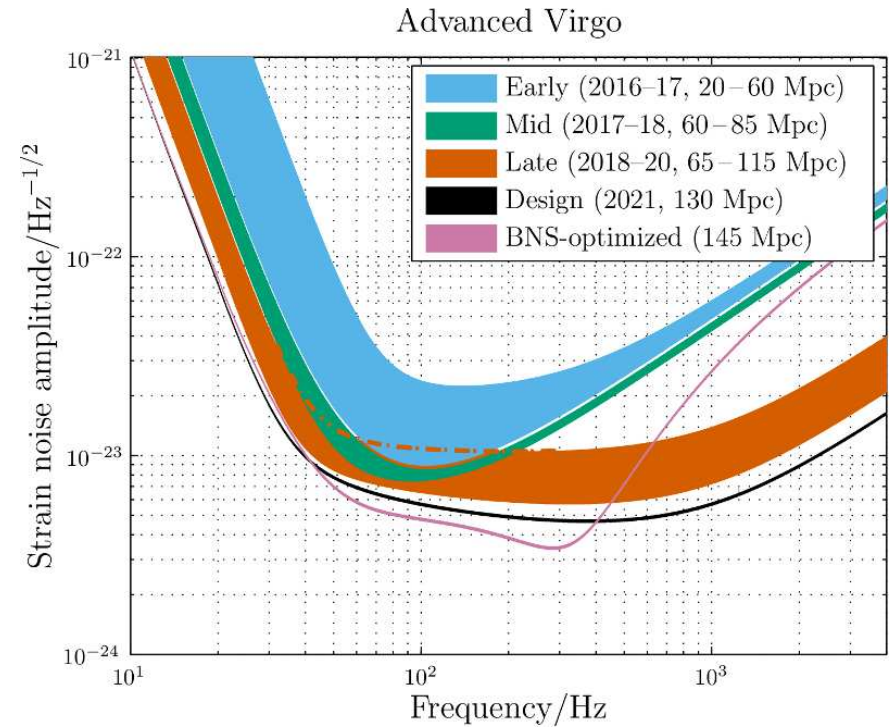
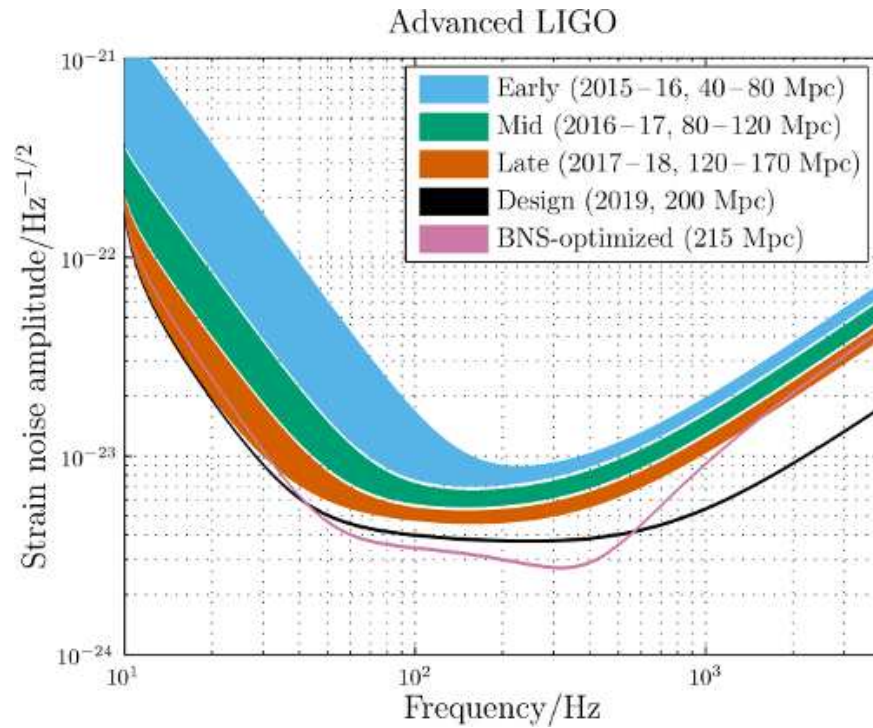
5. ¿Y ahora qué...?

Hemos aprendido mucho:

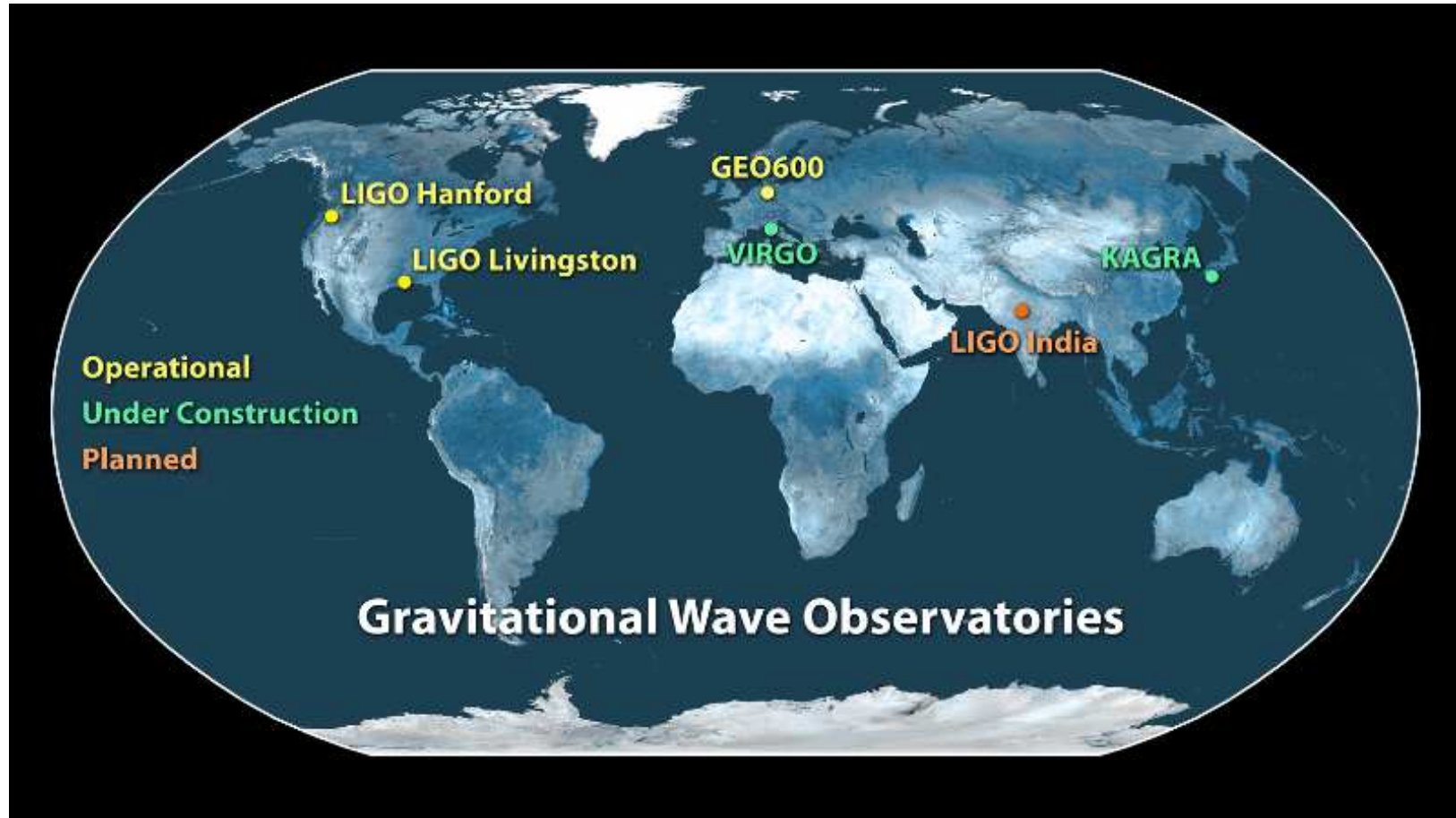
- Las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas
- Los agujeros negros de $M \gtrsim 30 M_{\odot}$ existen
- Los sistemas binarios de agujeros negros existen
- Los GRB vienen de fusiones de estrellas de neutrones
- Relatividad General ha pasado numerosos tests:
 - Test en régimen de campo extra-fuerte
 - Cuadrar cálculos numéricos con cálculos analíticos y observaciones
 - Polarizaciones favorecen gravedad einsteiniana
 - Límites experimentales sobre diferencia entre v_{GW} y v_{EM}
 - Límites experimentales sobre masa gravitón

Planes de futuro:

- Aumentar sensibilidad en consecutivas rondas observacionales



- Otros detectores terrestres:

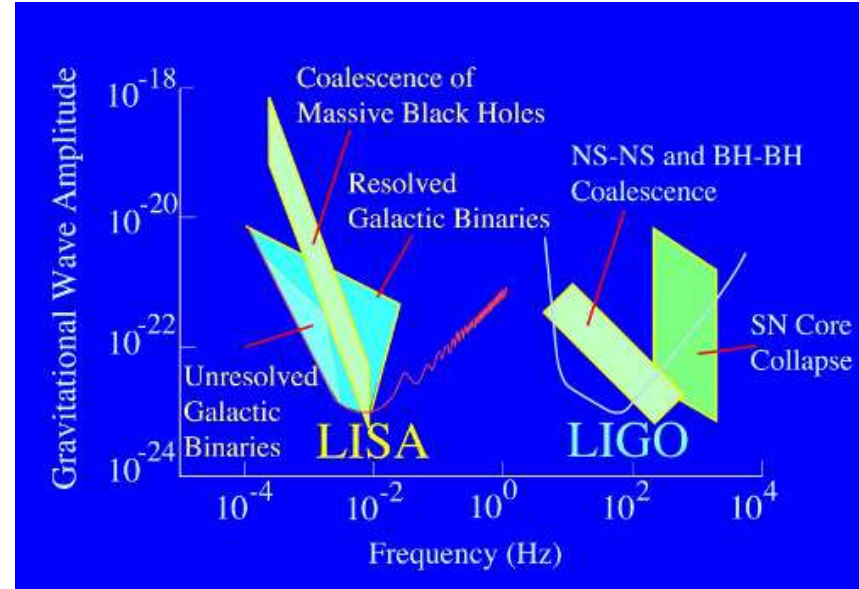
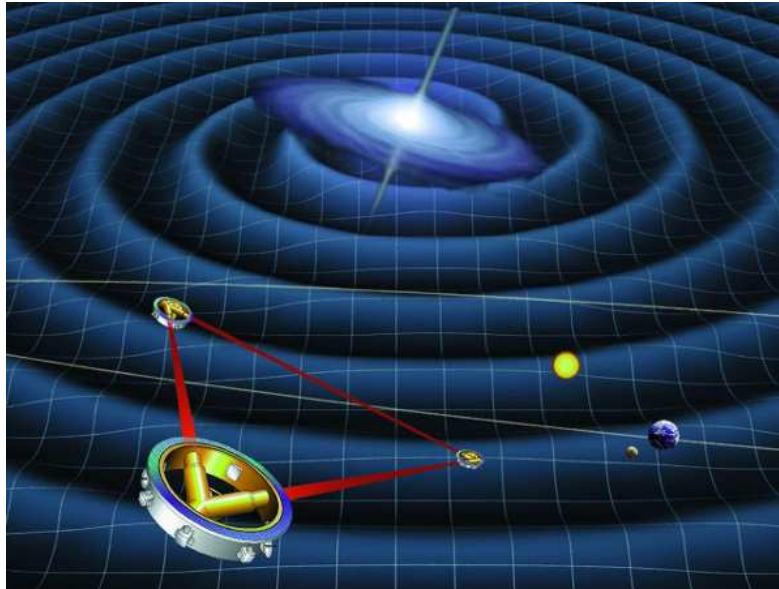


VIRGO: incorporado en verano 2017 en red de detectores gravitacionales

KAGRA: operacional en 2018?

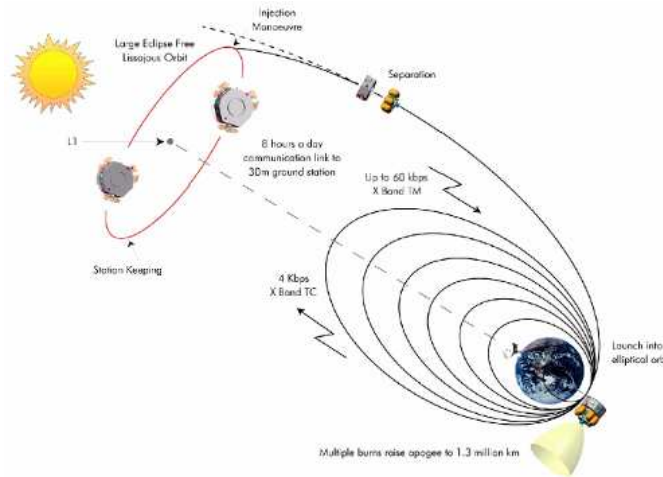
LIGO India: acuerdo de principios

- Detectores espaciales: Evolved Laser Interferometer Space Antenna

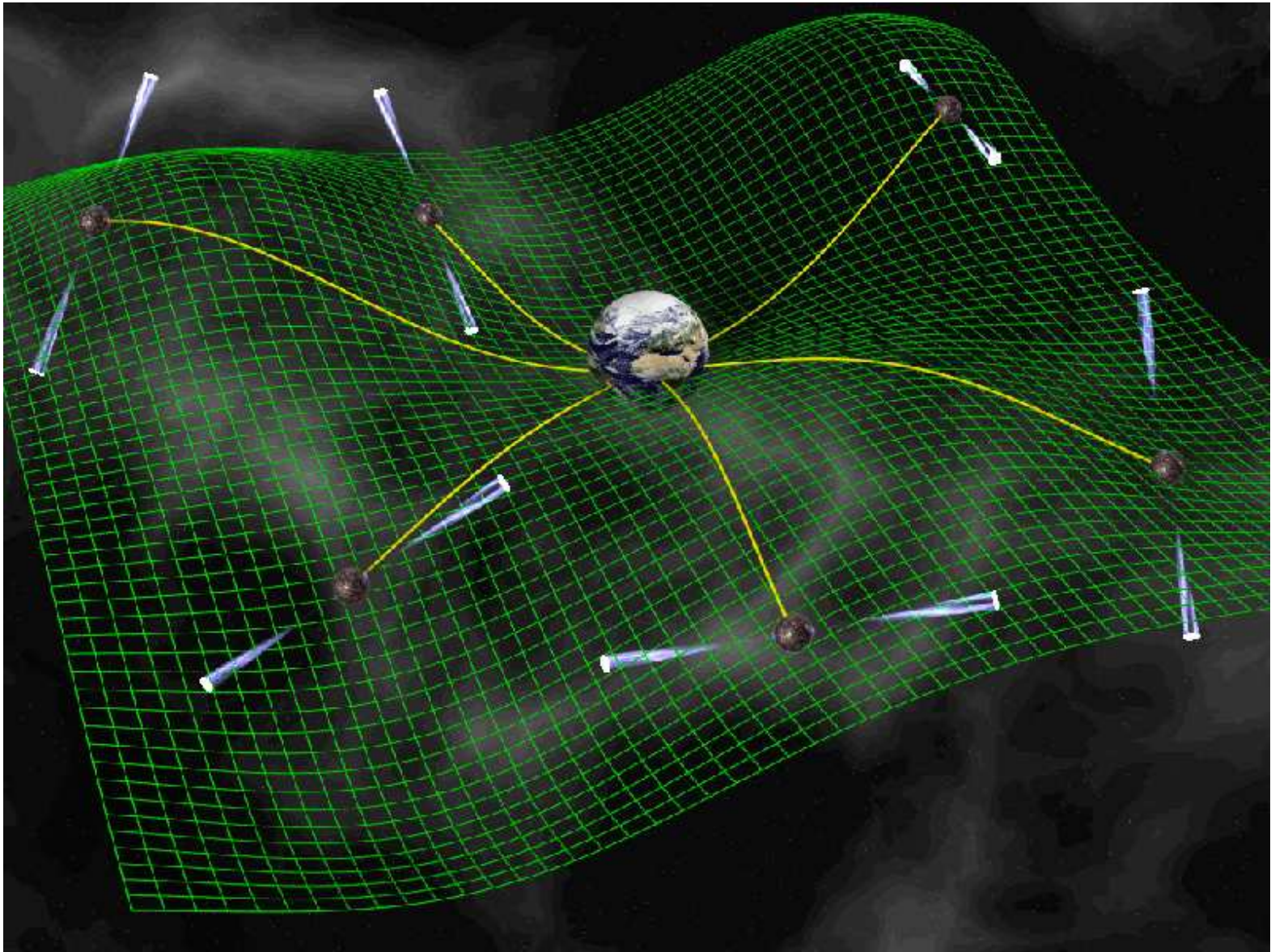


→ 3 satelites a 1 000 000 000 km cerca de la Tierra

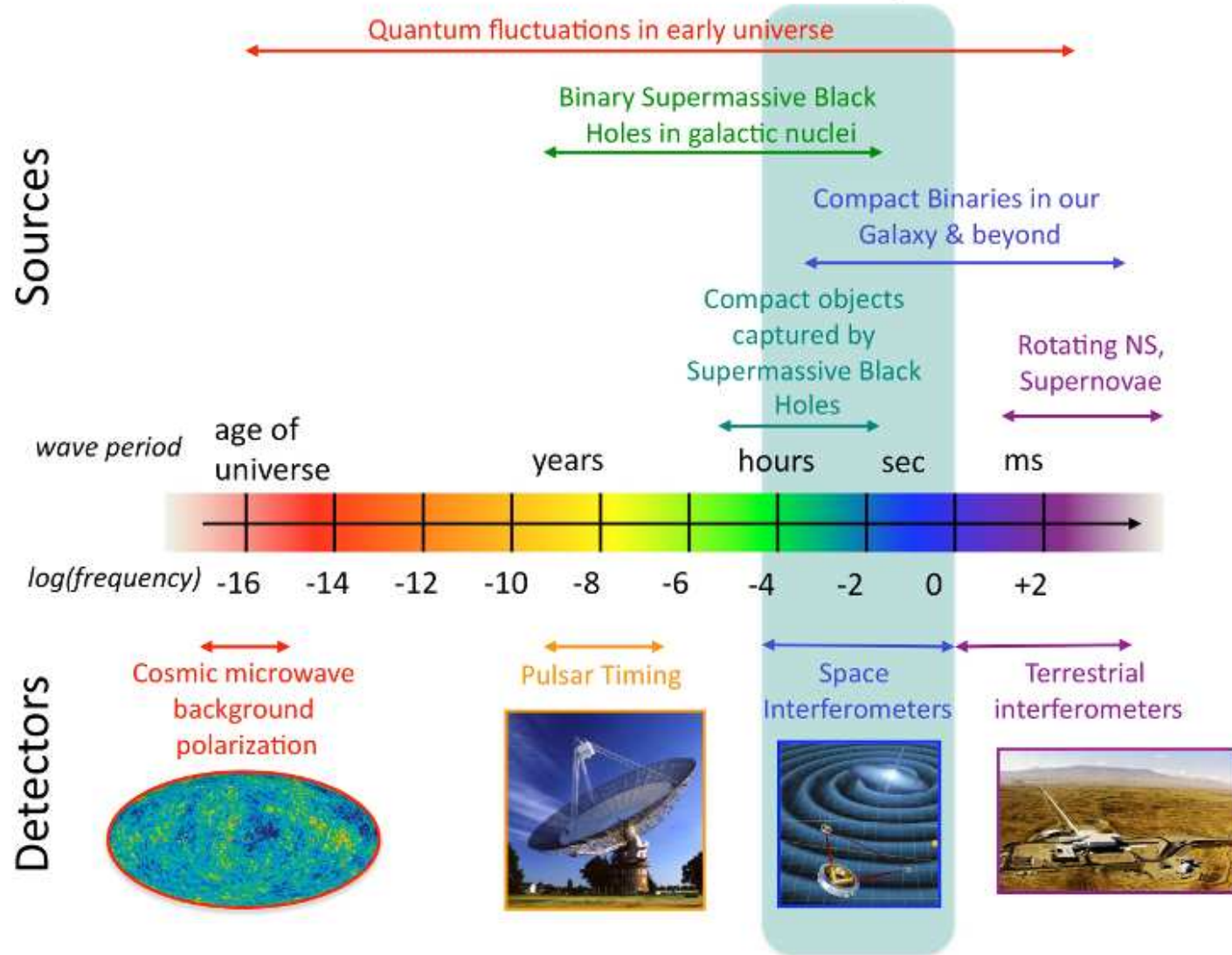
→ Planeado para 2030; LISA Pathfinder (versión de prueba) lanzado en dic 2015.

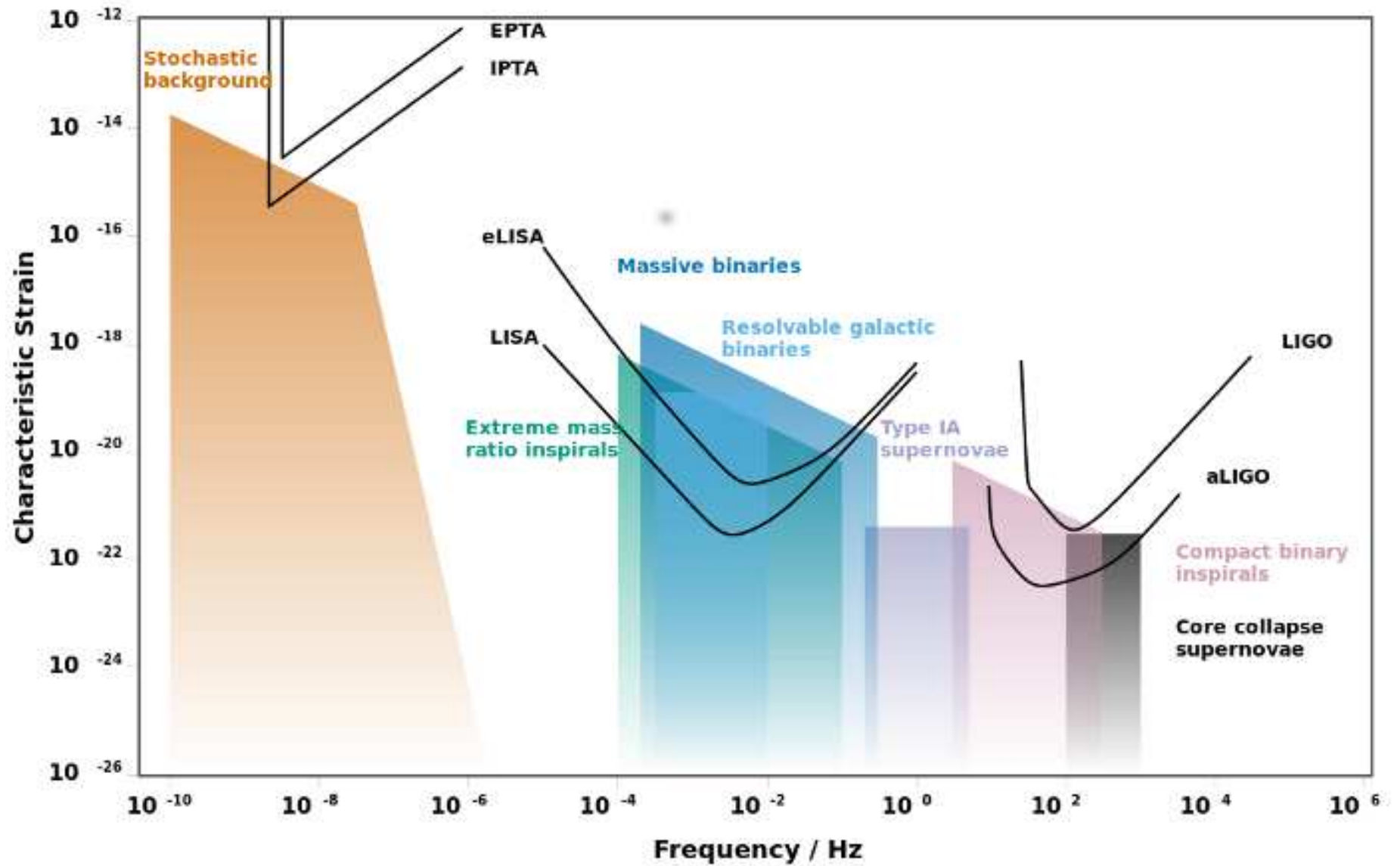


- Pulsar Timing Arrays: correlaciones en efecto Doppler de distintas púlsares?

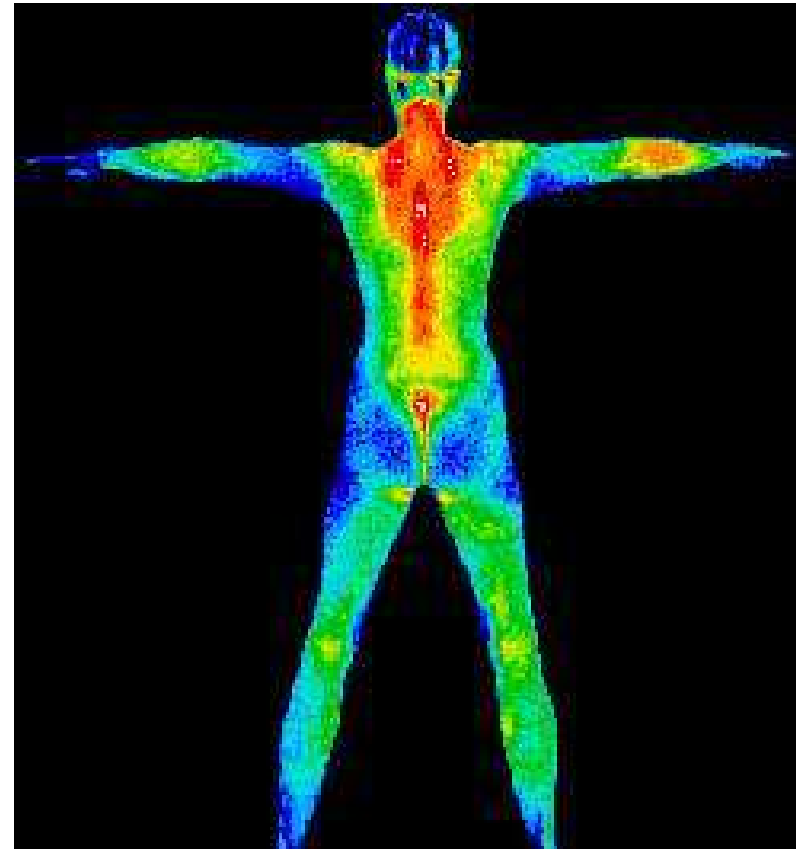
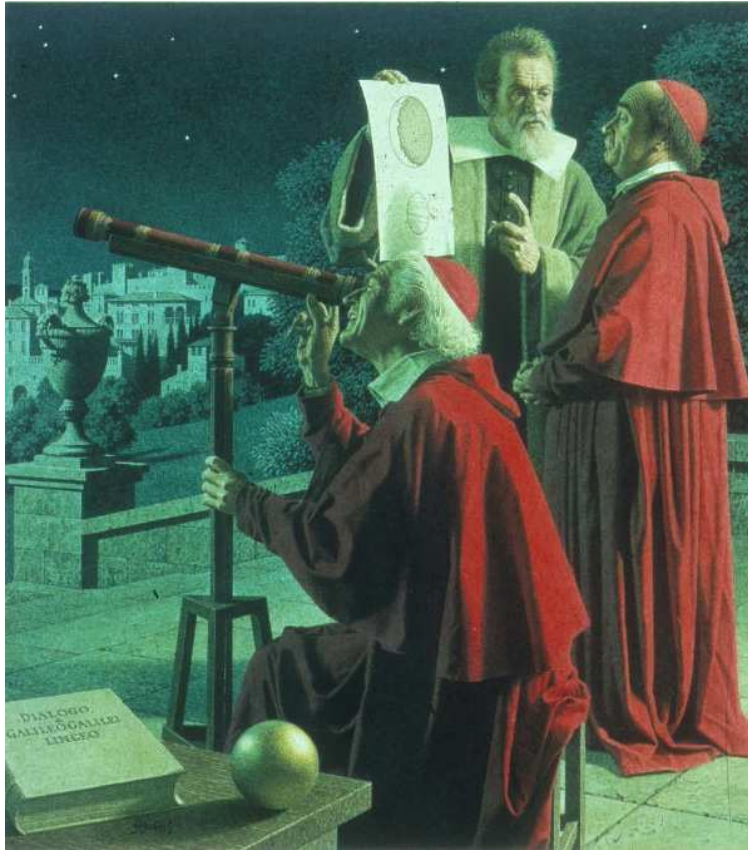


The Gravitational Wave Spectrum

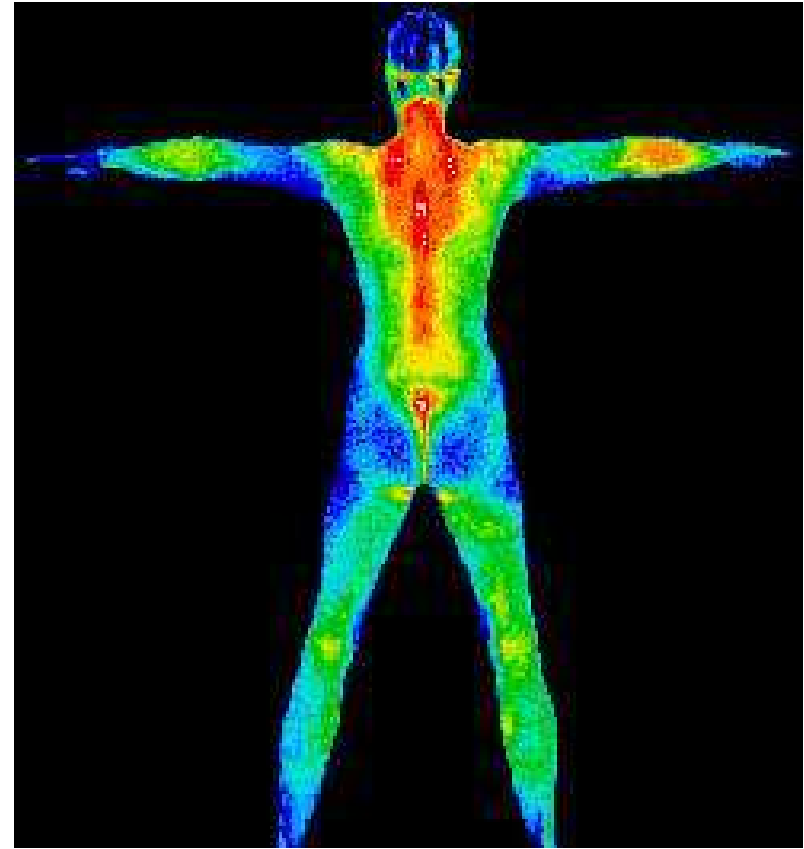
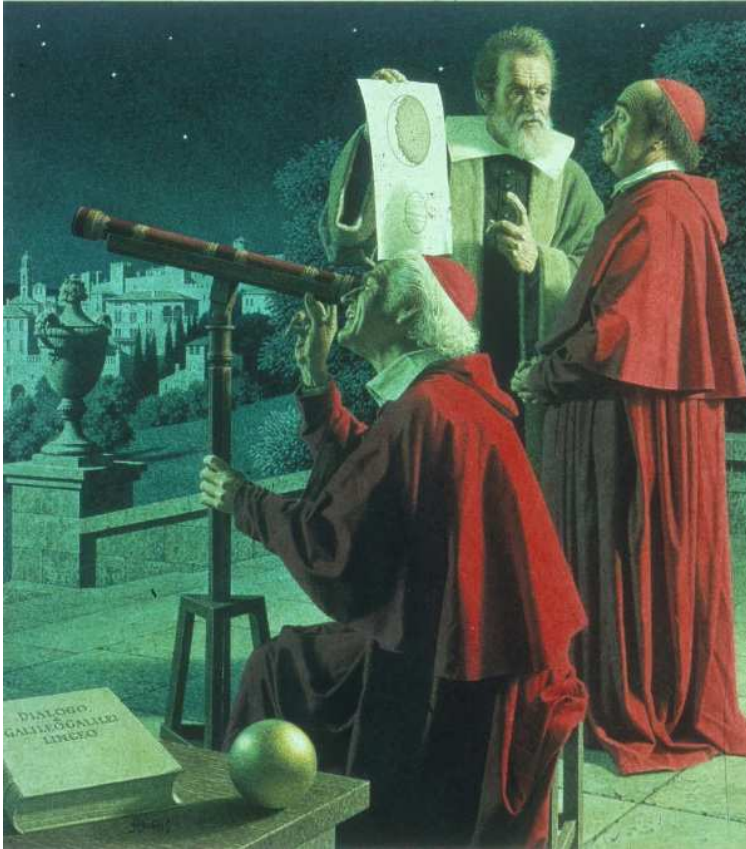




Nueva tecnología implica un nuevo mundo por descubrir...

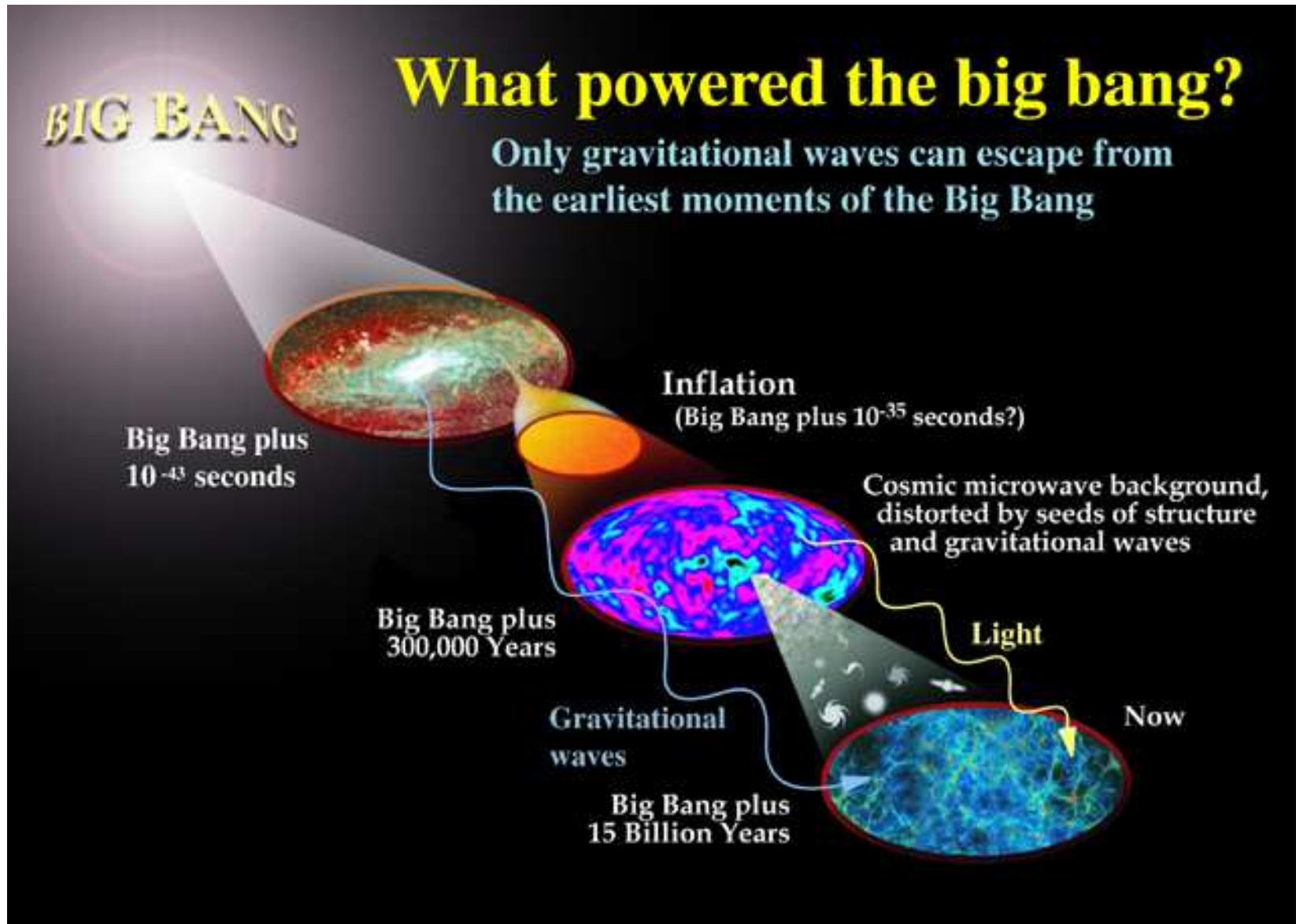


Nueva tecnología implica un nuevo mundo por descubrir...

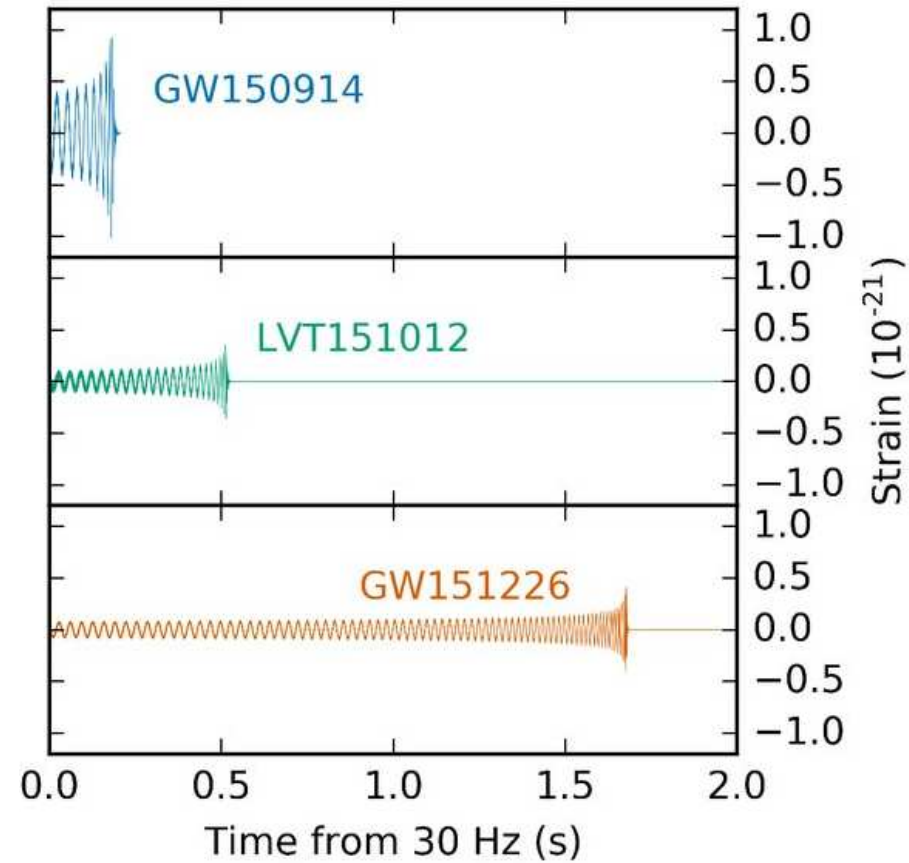


¡Queda mucho trabajo por hacer!

¡Gracias!

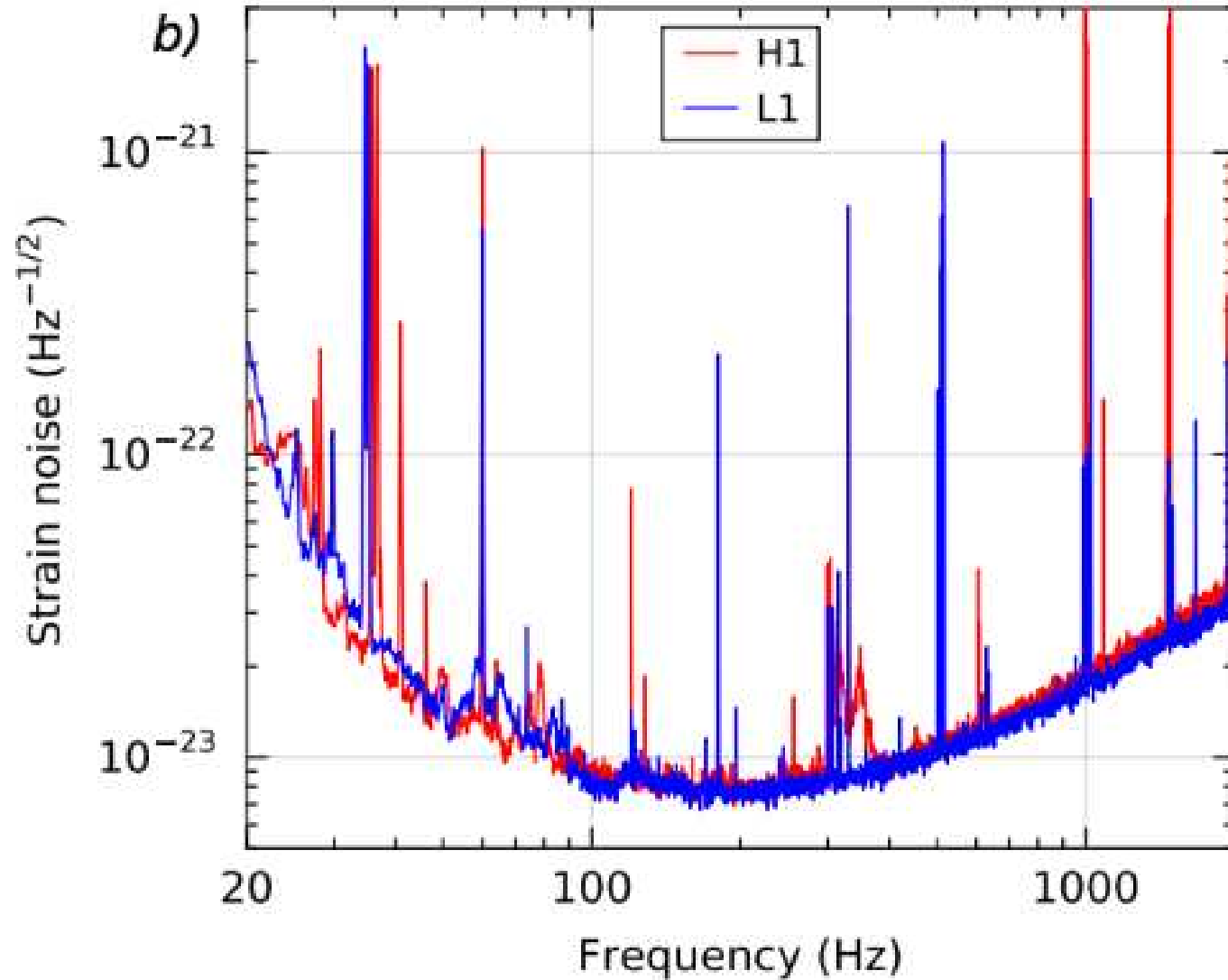


Candidato: 12 de octubre 2015 a las 9h54 UTC: **LVT151012**



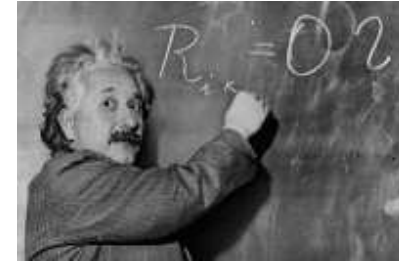
Data estadísticamente no suficientemente significativa ($\sim 2\sigma$)...

- 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



Intermedio técnico:

Ondas gravitacionales en relatividad linealizada

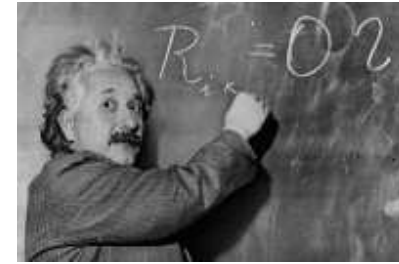


Perturbación de la métrica: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$

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

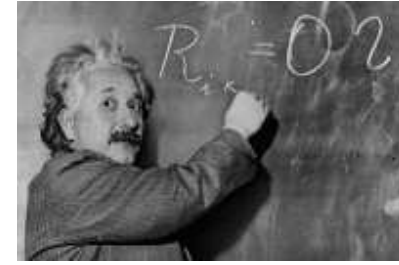
Cambio general de coordenadas: $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu$

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

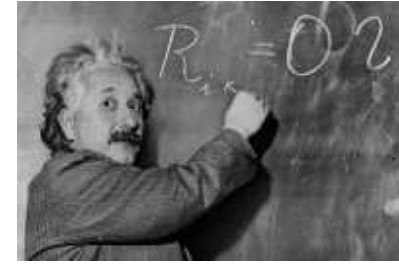
Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} \frac{1}{2} \varepsilon \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu}$

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

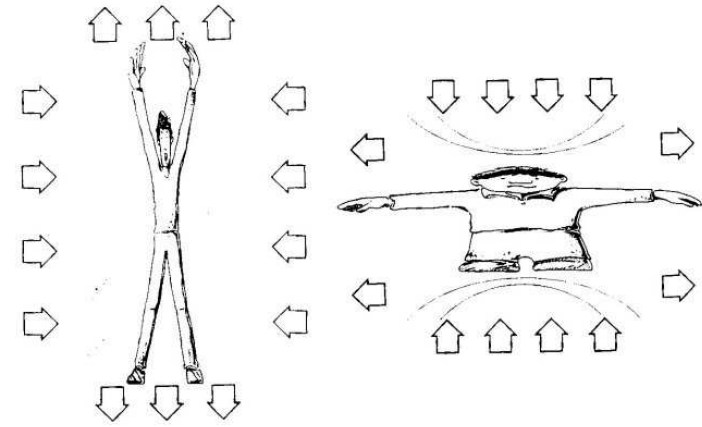
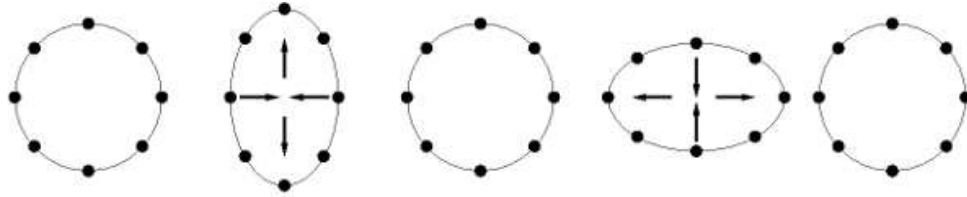
Tensor de Ricci: $R_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} \frac{1}{2} \varepsilon \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu}$

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

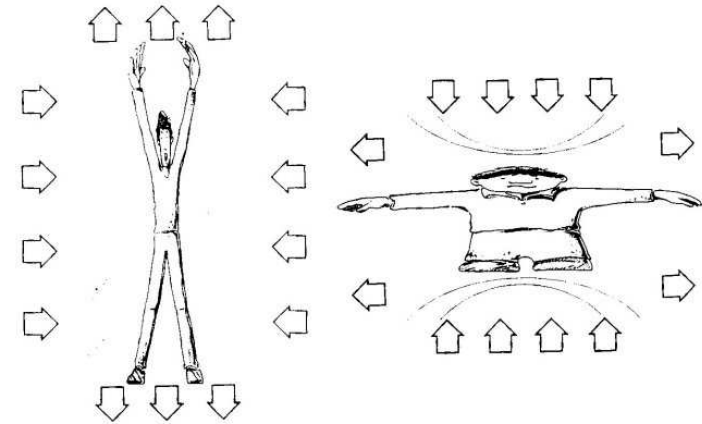
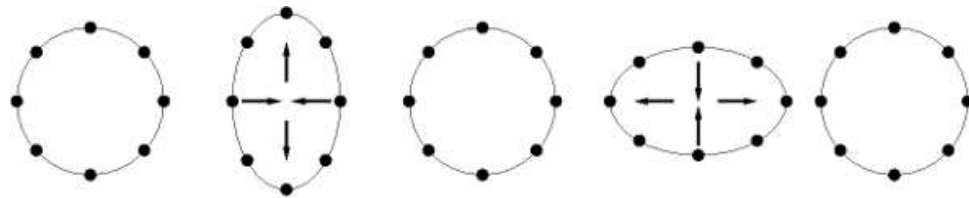
→ Ecuación de onda

(Fin del intermedio)

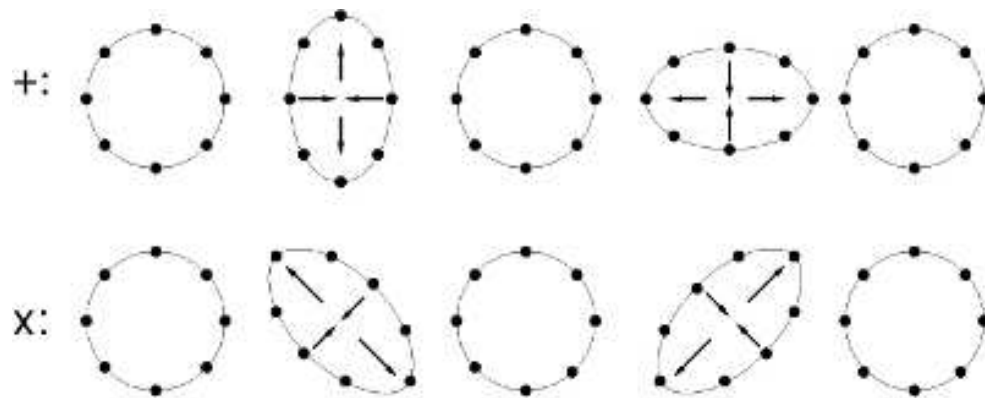
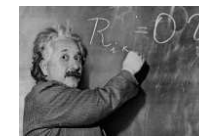
- Efecto al pasar:



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

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

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