



# 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...?

# Interrumpidme cuando queráis



Las preguntas tontas no existen.  
Sólo existen las respuestas tontas.

# 1. Gravedad y Relatividad General

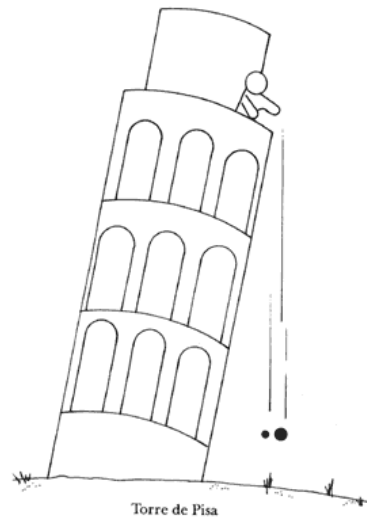
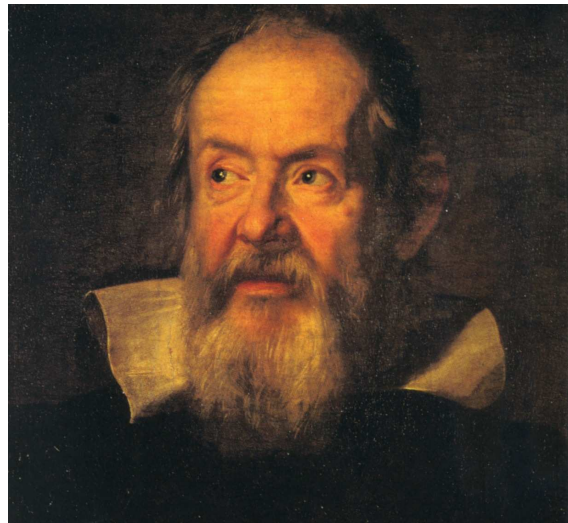
Gravedad es la fuerza más familiar y la menos entendida



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



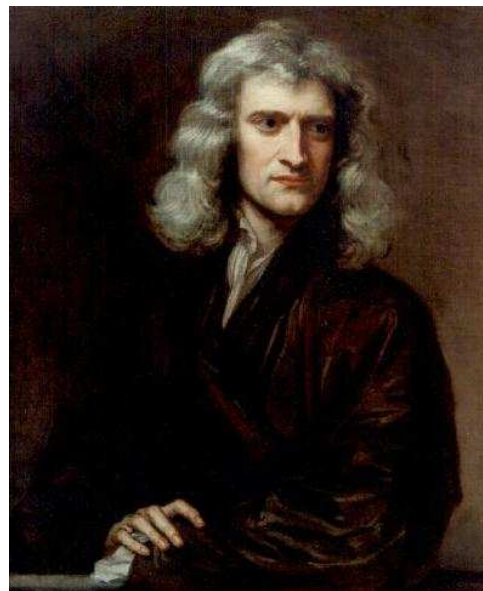
# Estudiada por Galilei y postulada por Newton



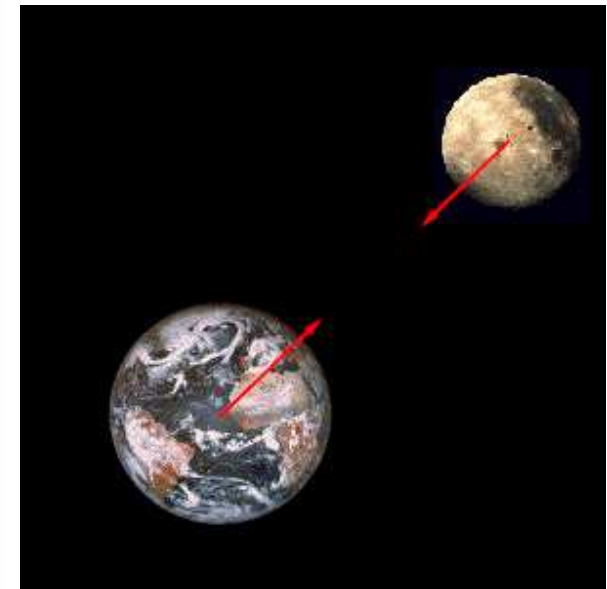
Caída libre:

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

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



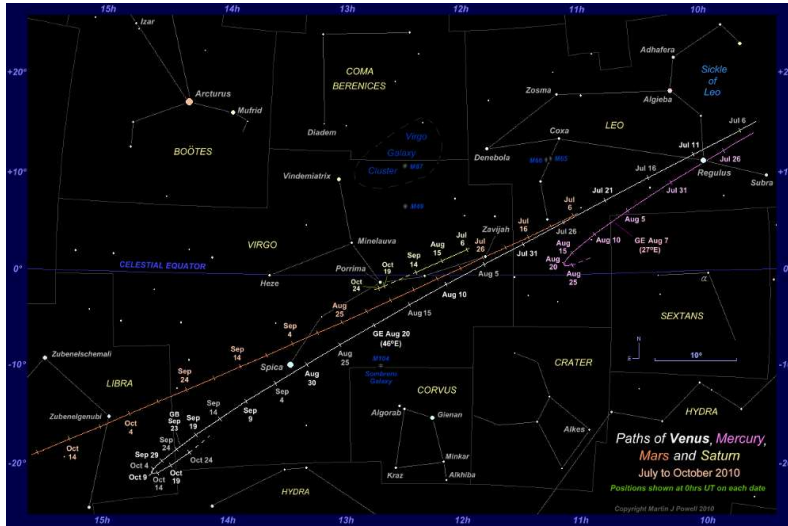
$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$



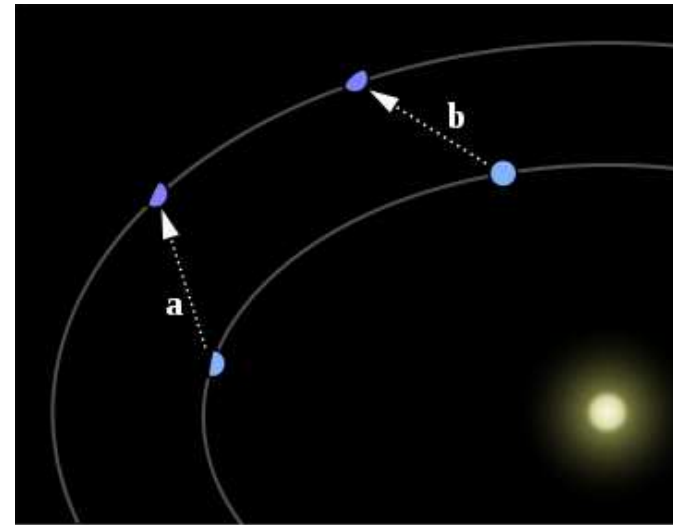
→ Fuerza universal entre cualesquiera dos masas



# Una teoría muy exitosa! Predice las efemérides planetarias

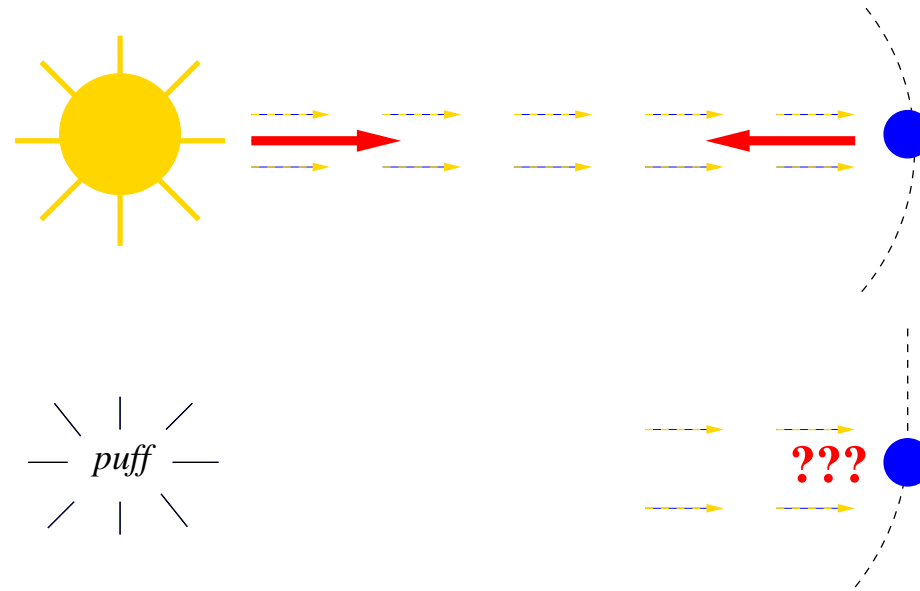


Hasta predijo la **existencia de Neptuno** por perturbaciones en órbita de Urano



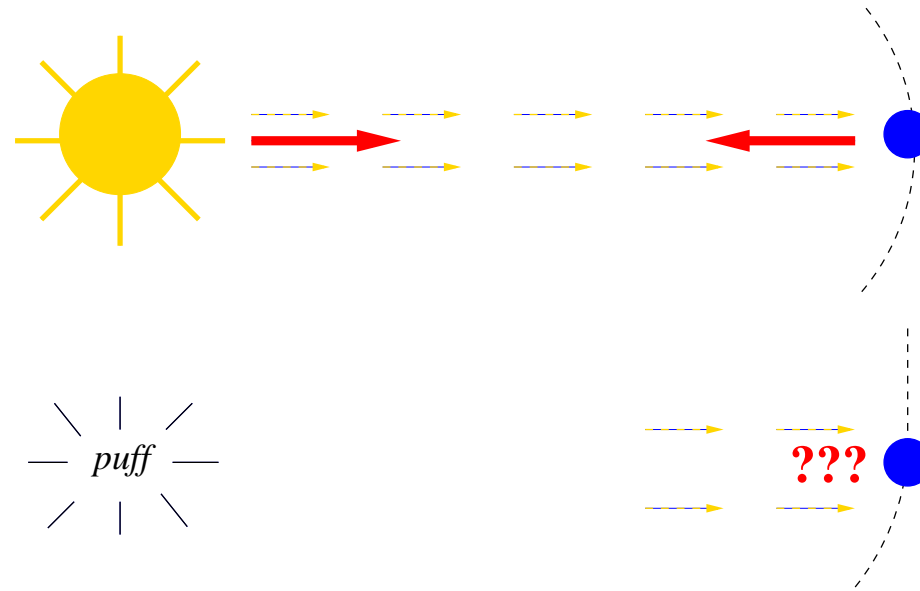
Couch-Adams & Le Verrier, 1845

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



Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

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



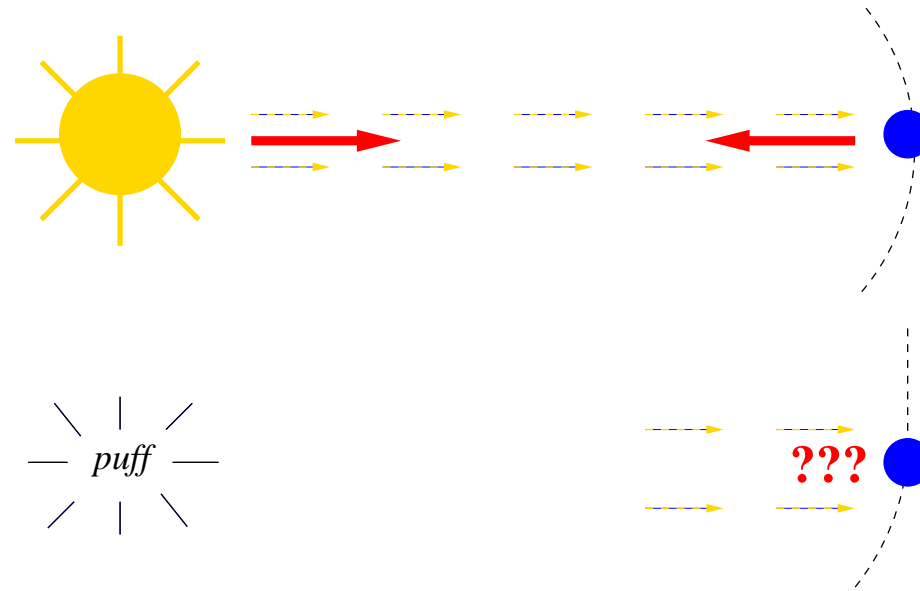
Newton (1729): “Hypotheses non fingo”

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!!!**

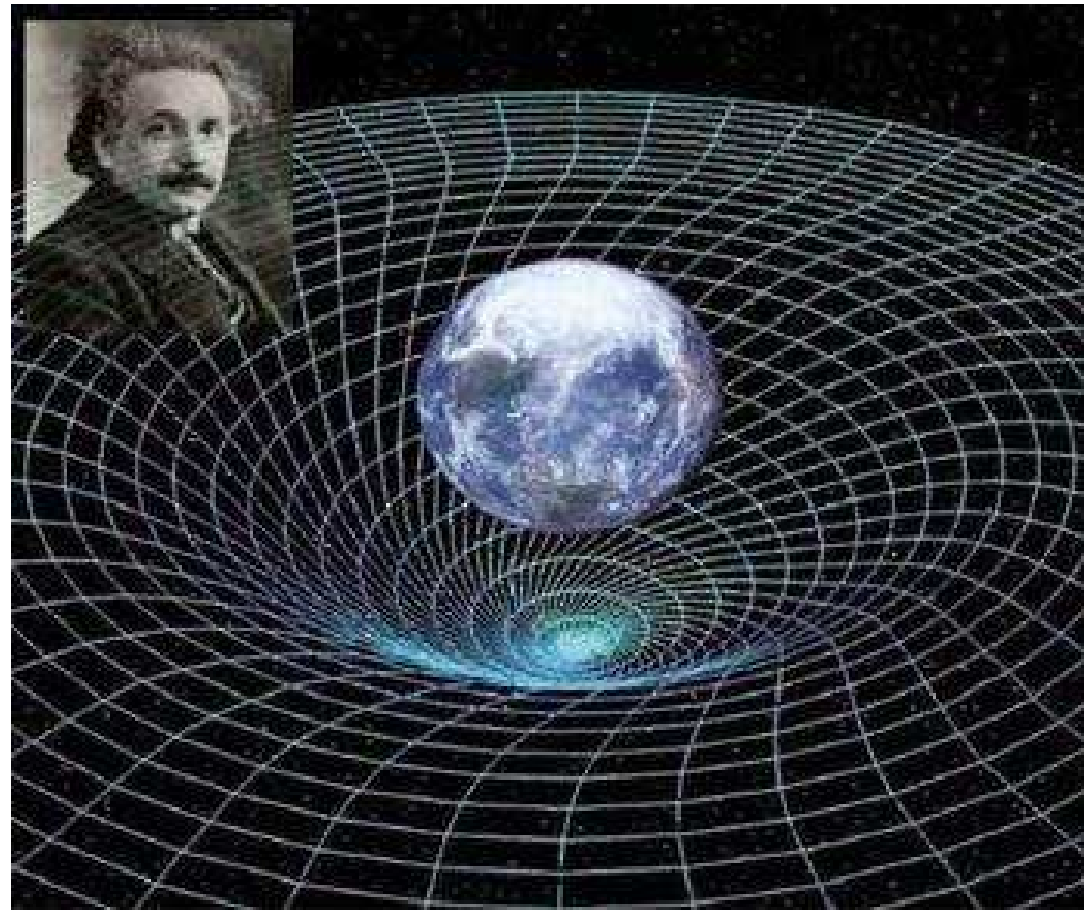
La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

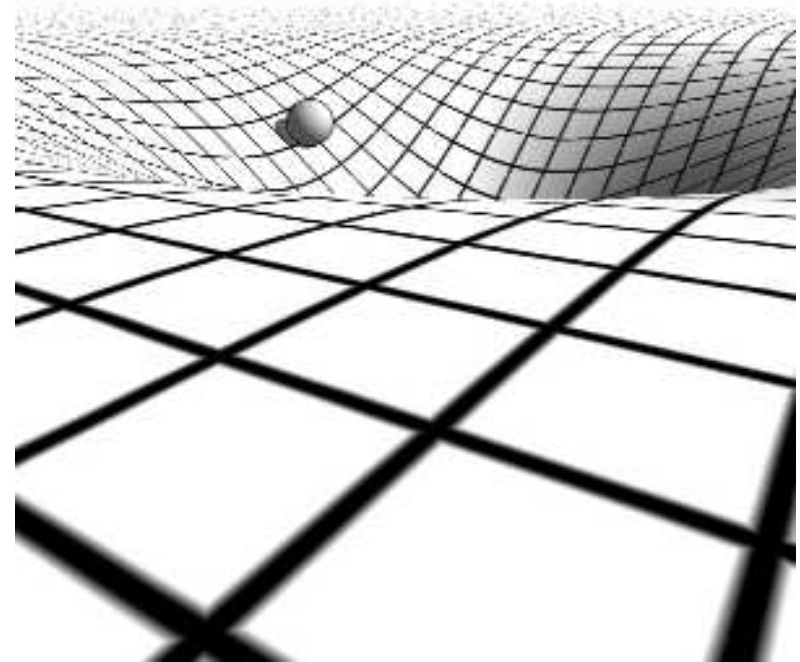
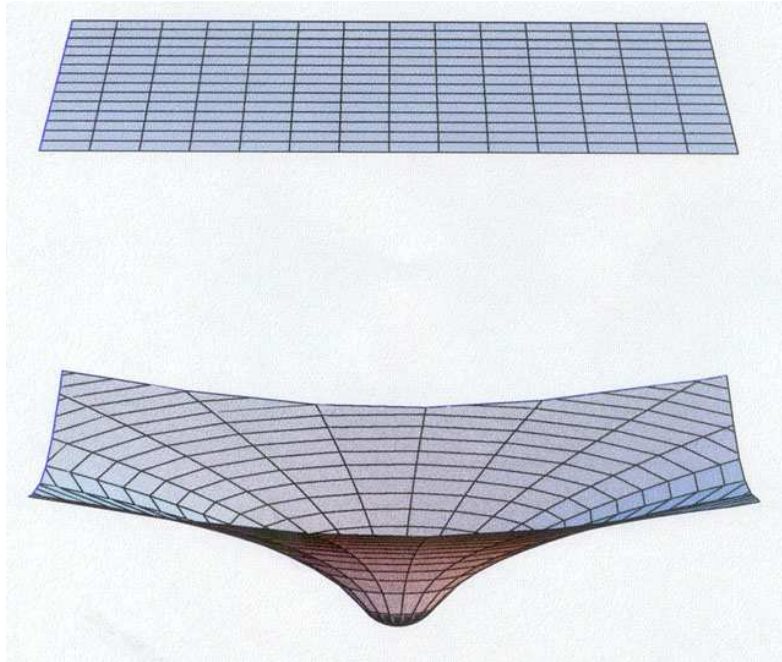
La gravedad newtoniana es incompatible con la Relatividad Especial

- Acción a distancia
- Velocidad de propagación infinita

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

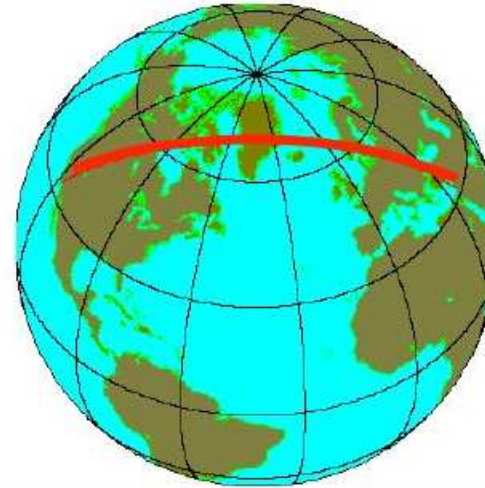
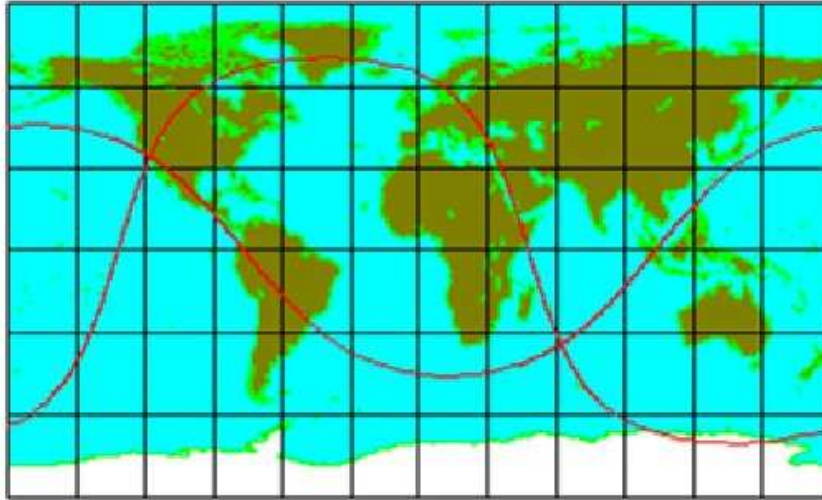


# Gravedad = espacio curvo

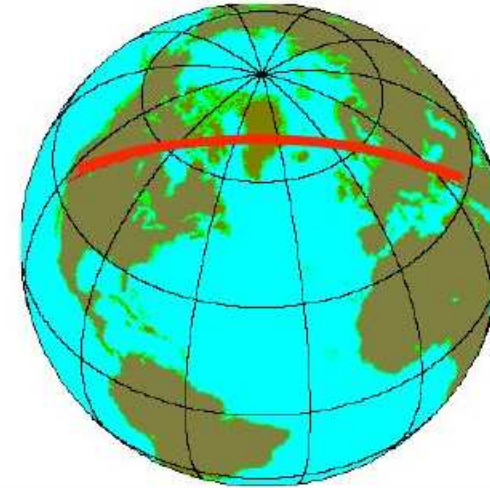
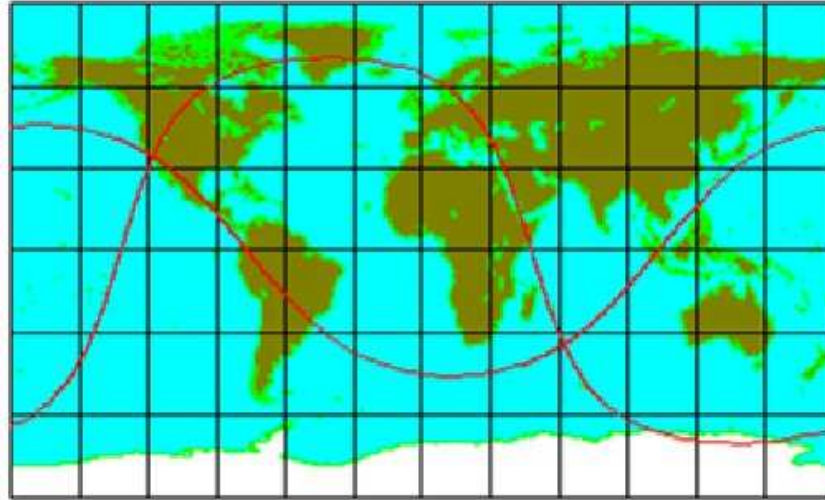


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

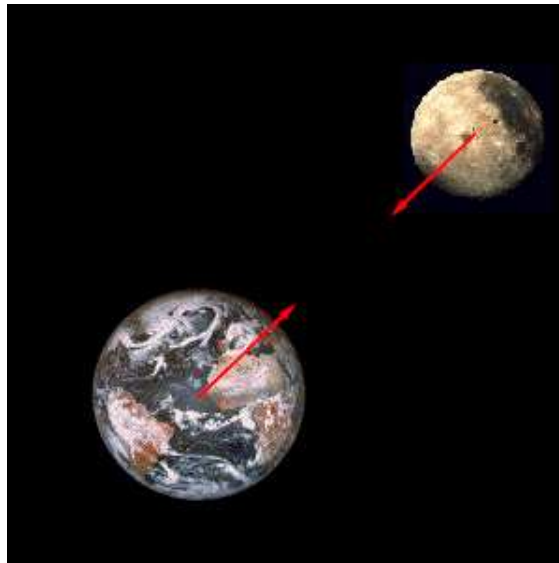
La materia sigue la trayectoria más recta posible



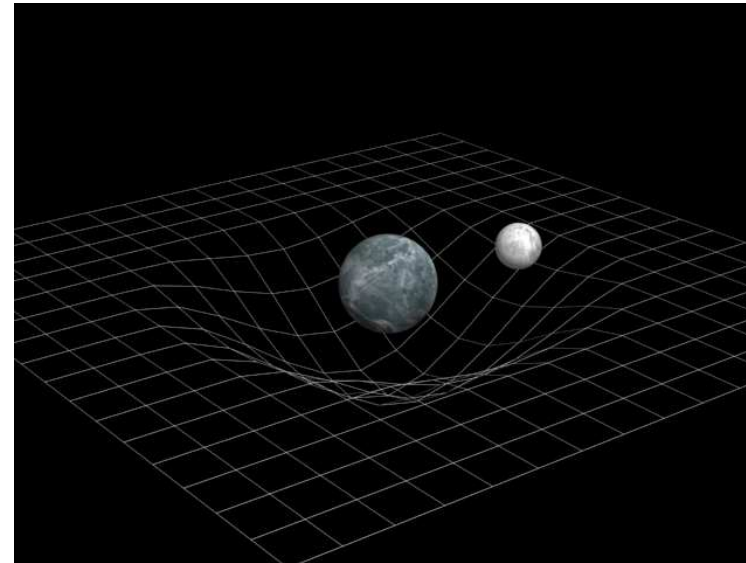
La materia sigue la trayectoria más recta posible



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



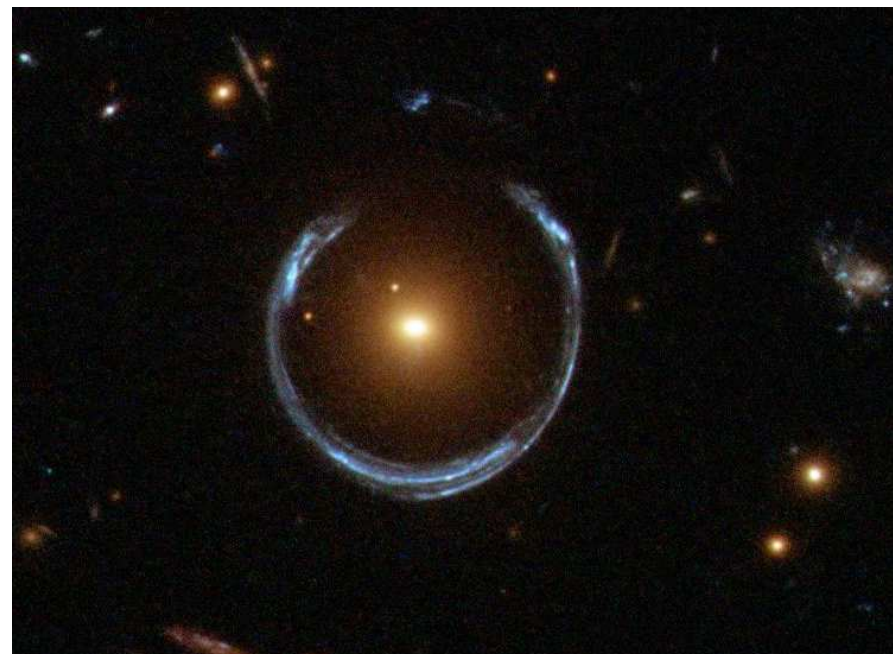
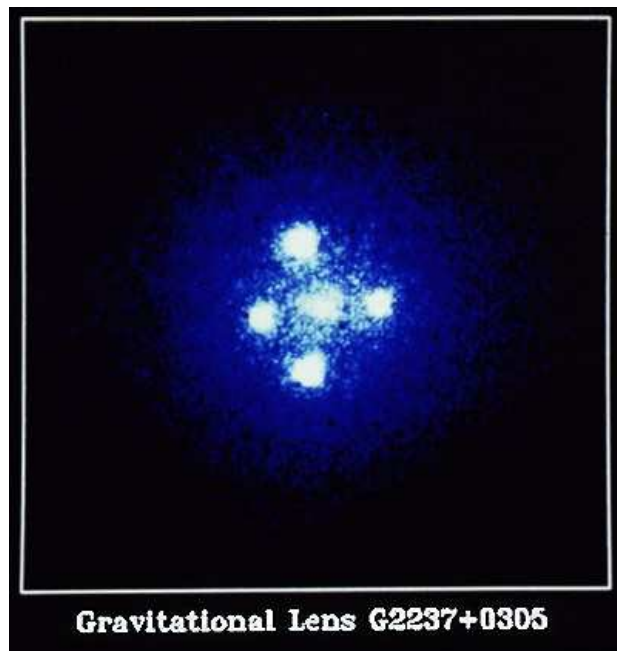
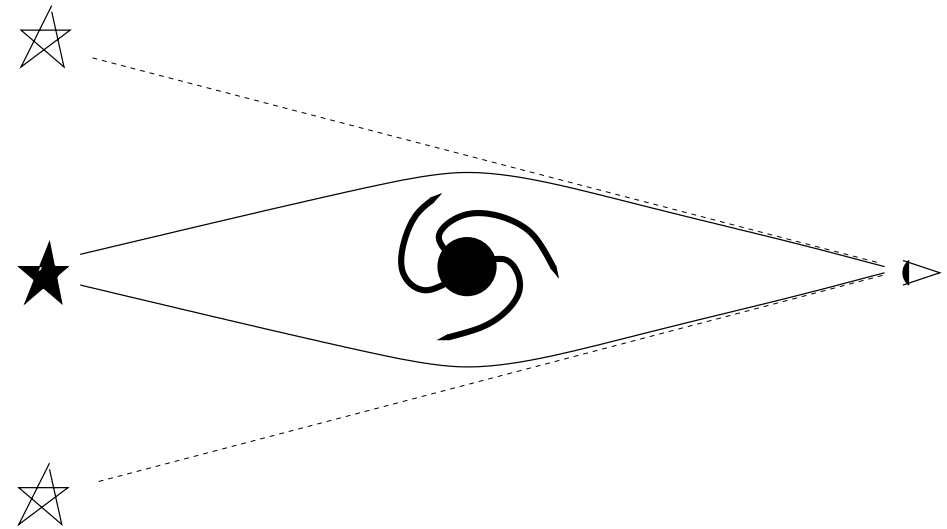
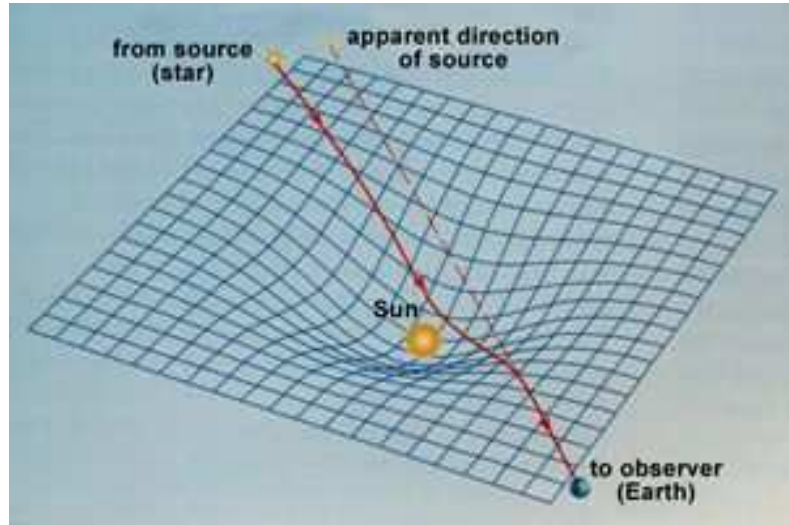
NO



SÍ



# No sólo la materia, sino también la luz

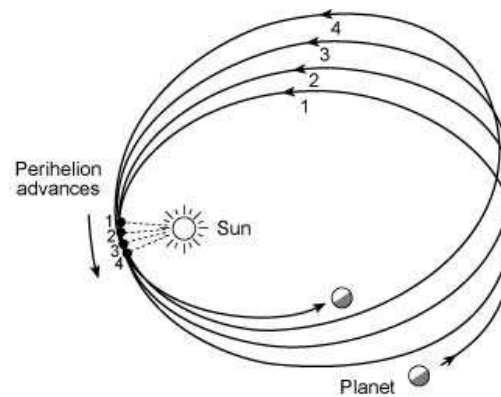


# Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Precesión del perihelio de Mercurio:**

predic:  $574,64 \pm 0,69$  arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)

observ:  $574,10 \pm 0,65$  arcsec/siglo

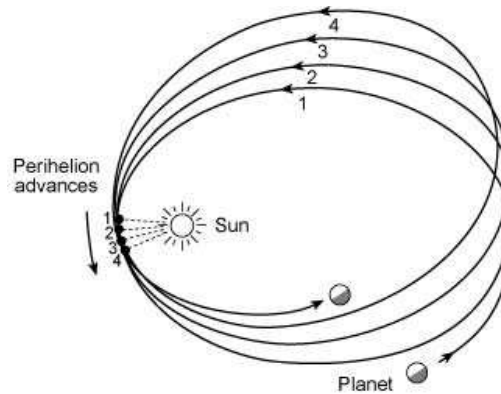


# Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

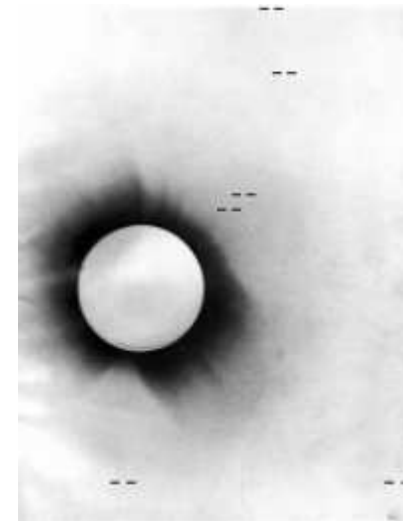
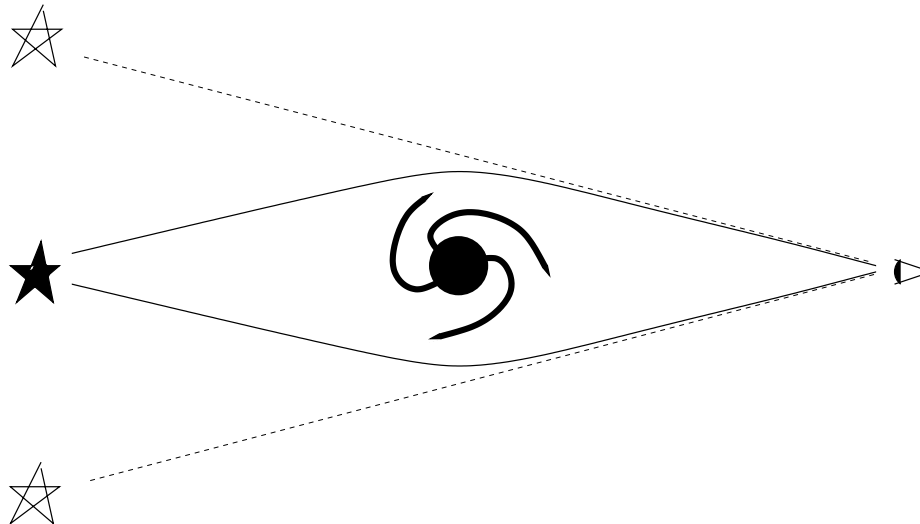
- **Precesión del perihelio de Mercurio:**

predic:  $574,64 \pm 0,69$  arcsec/siglo (42 arcsec/siglo debido a Rel. Gen.)

observ:  $574,10 \pm 0,65$  arcsec/siglo

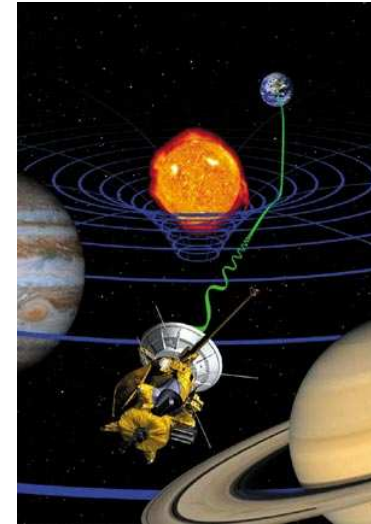
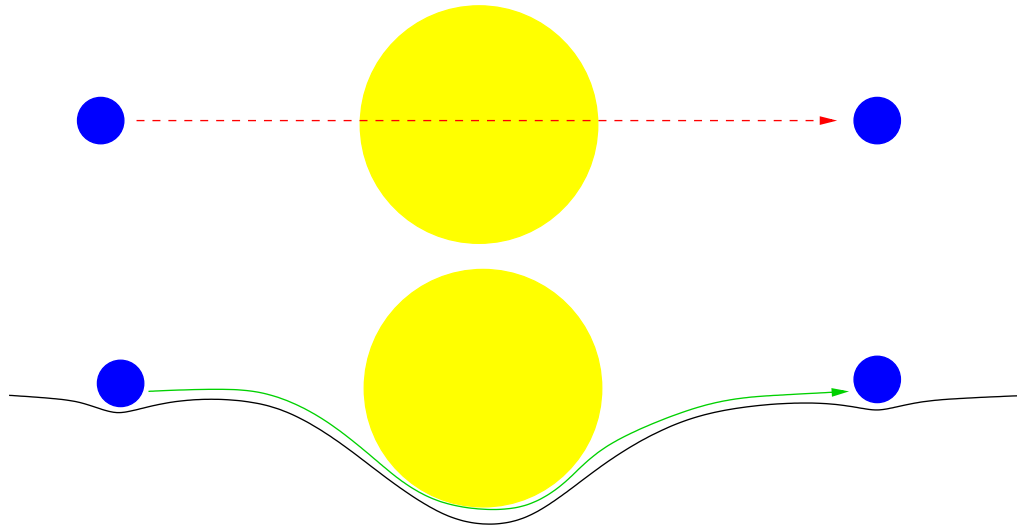


- **Desviación de la luz: 0,03 % para Sol (1998)**



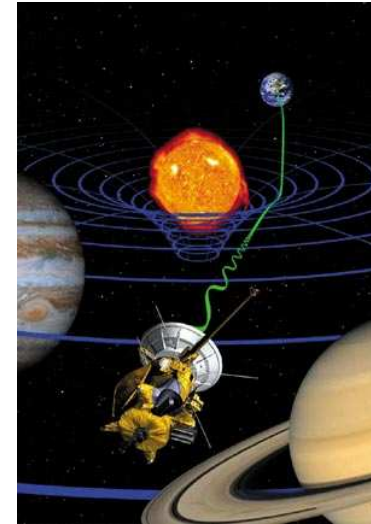
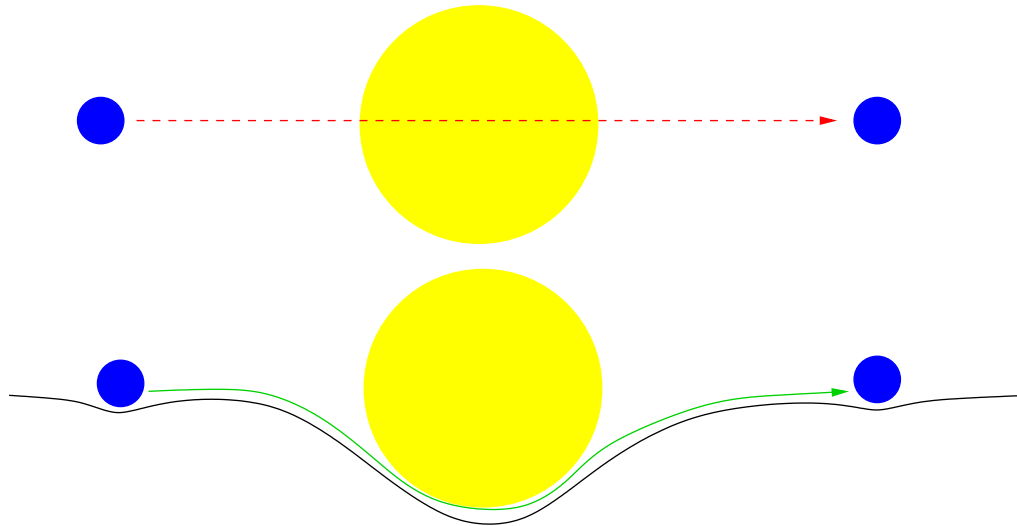
# Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

- **Efecto Shapiro:** 0,002 % (Cassini en Saturno, 2003)



# Relatividad General ha pasado numerosos tests con éxito

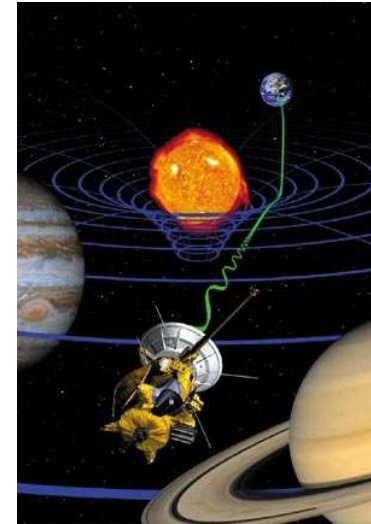
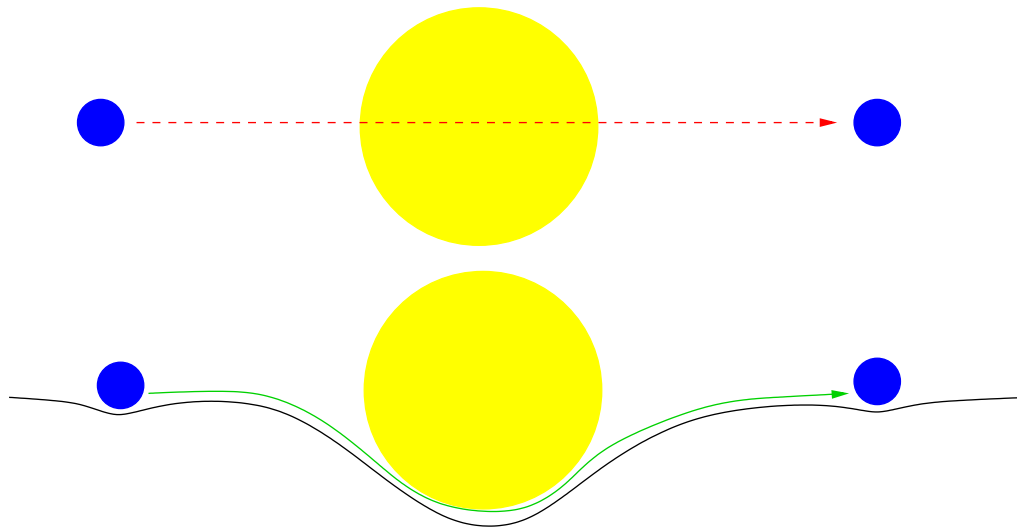
- **Efecto Shapiro:** 0,002 % (Cassini en Saturno, 2003)



- **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

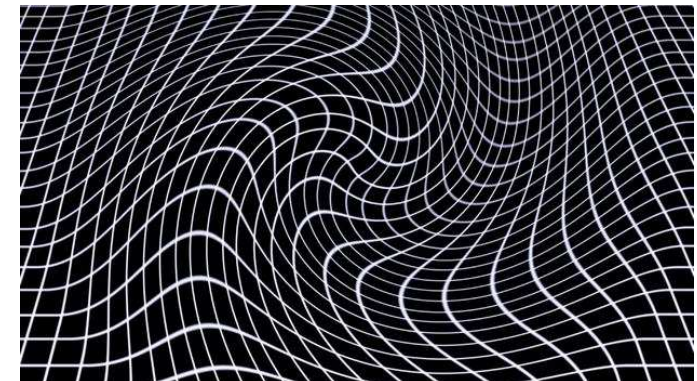


NO



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

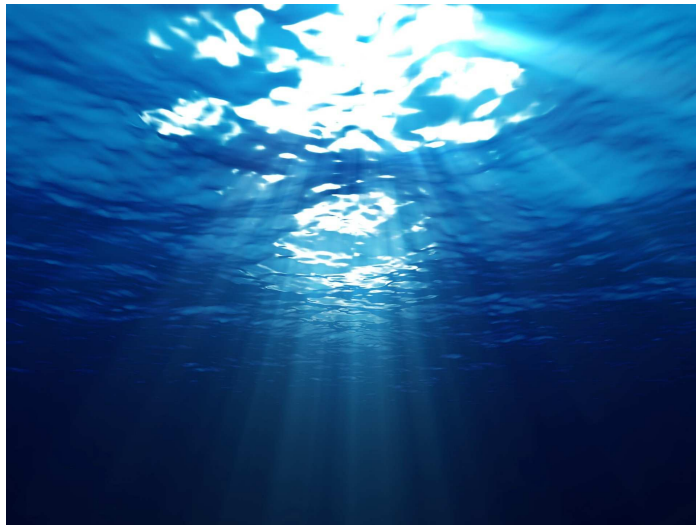




Ondas gravitacionales =  
perturbaciones en el espaciotiempo que se  
propagan solos



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



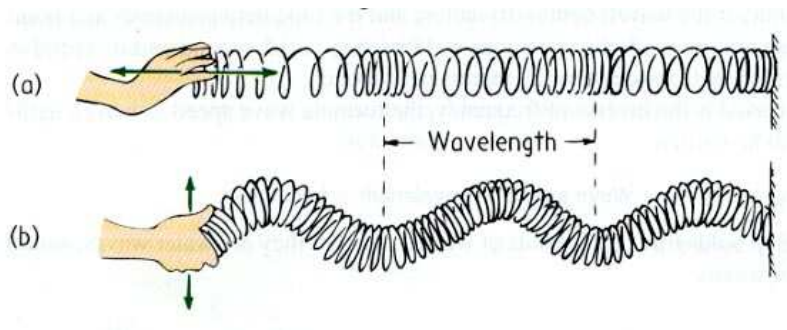
NO



SÍ

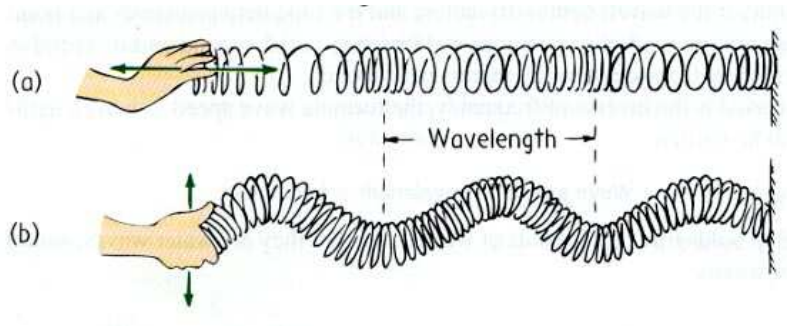
# Predicciones de Relatividad General:

- Ondas transversales



## Predicciones de Relatividad General:

- Ondas transversales



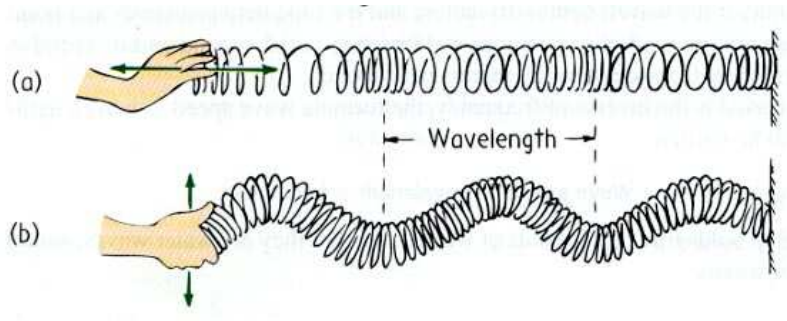
- Se propagan a la velocidad de la luz

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



# Predicciones de Relatividad General:

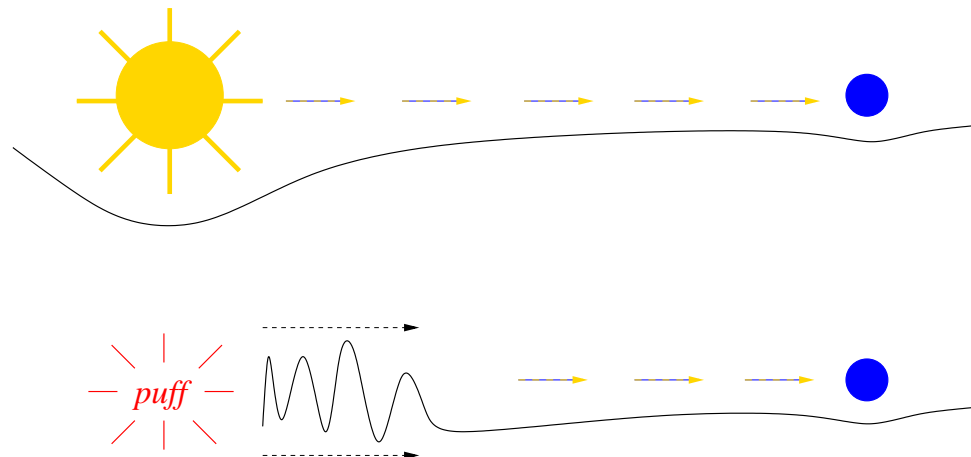
- Ondas transversales



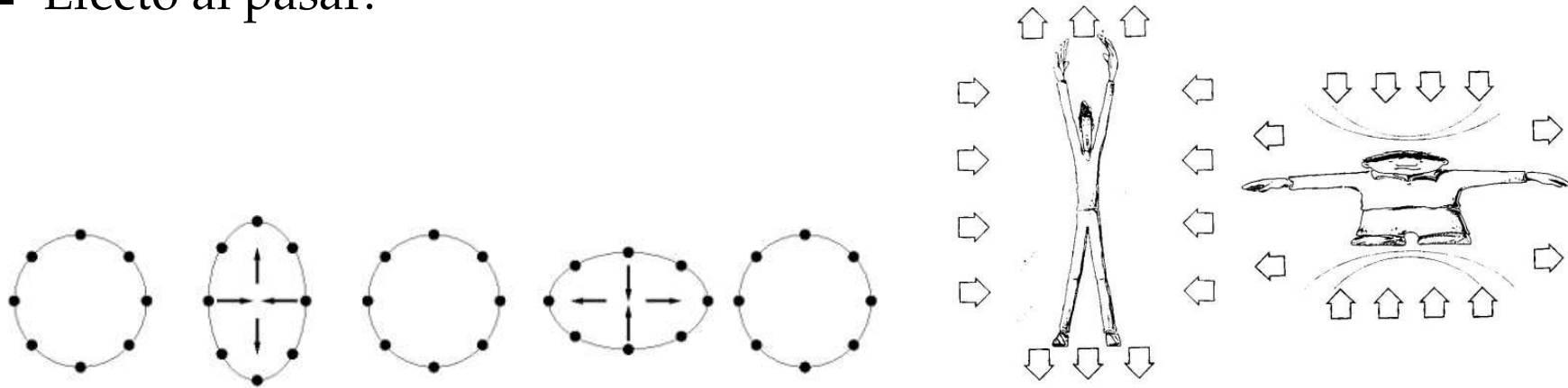
- Se propagan a la velocidad de la luz

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

→ Solución al problema de Newton

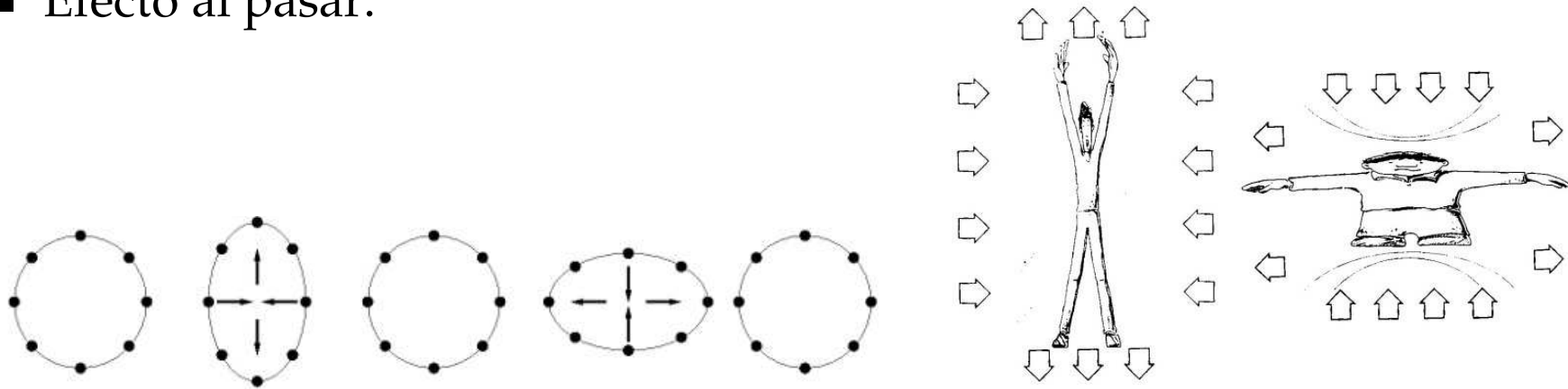


■ Efecto al pasar:



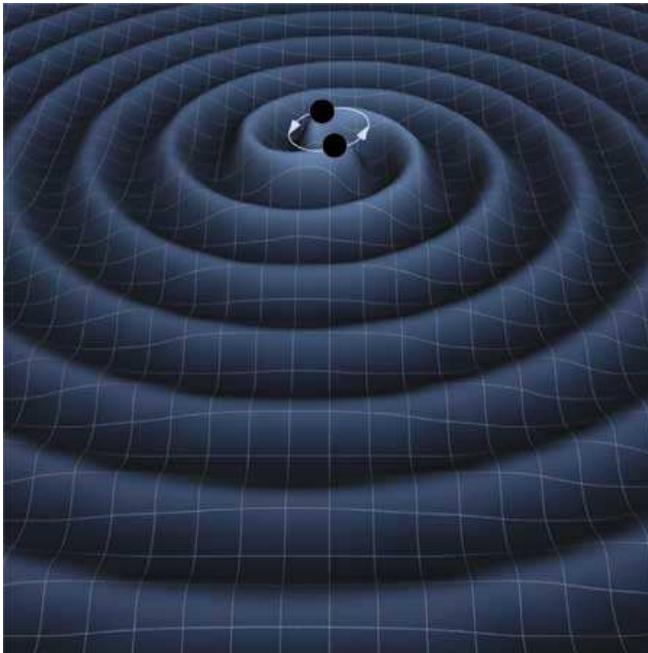
→ diferencia con ondas electromagnéticas (grav: espín 2)

- Efecto al pasar:



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

- Generadas por cambio en momento cuadrupolar de la materia

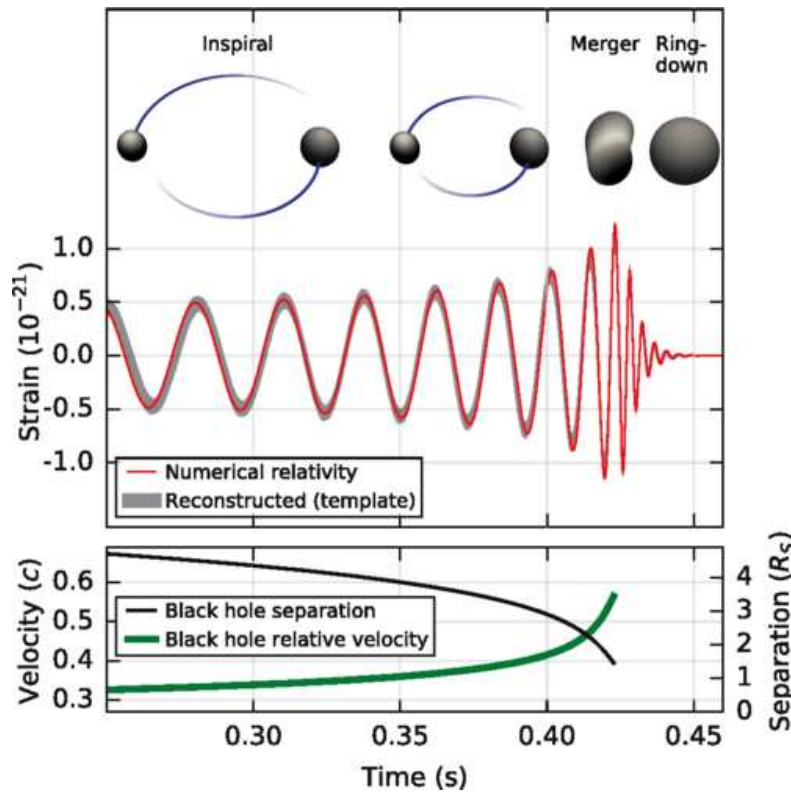


Ejemplo más común: sistema binario

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

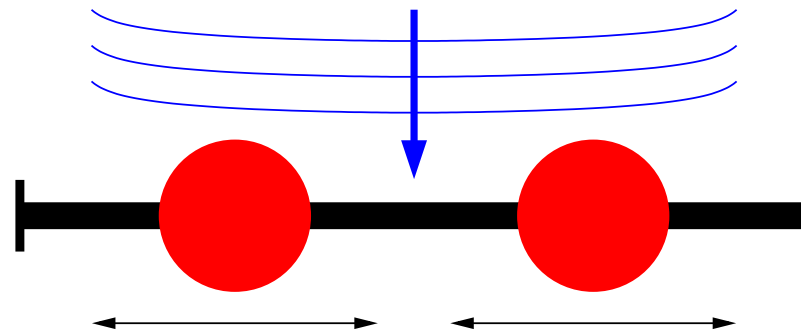
# 3. Un poco de historia

- 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

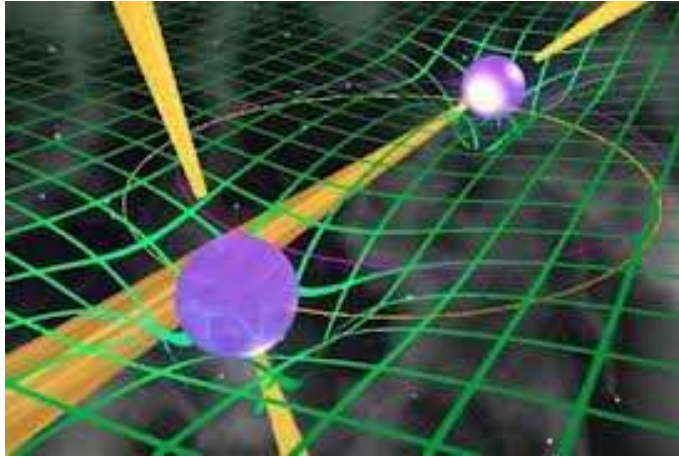


# 3. Un poco de historia

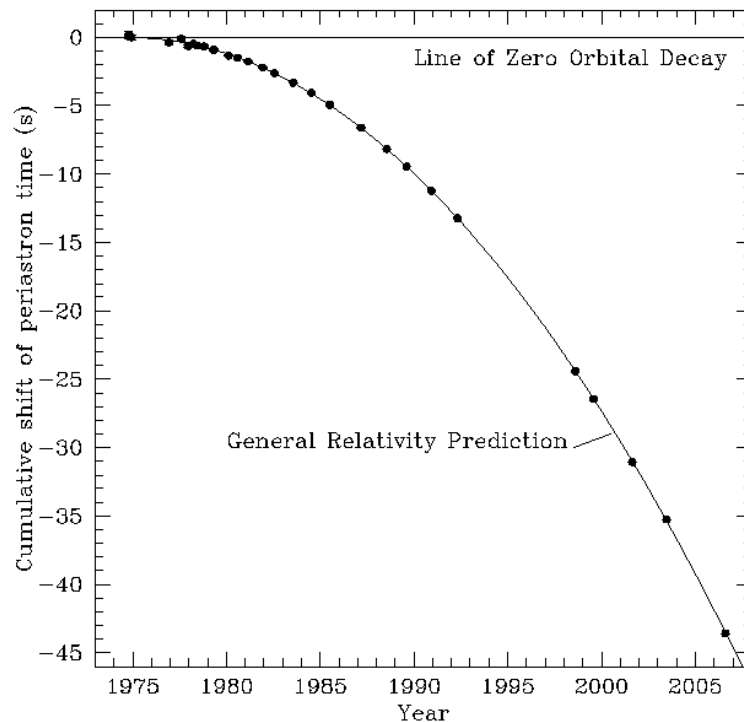
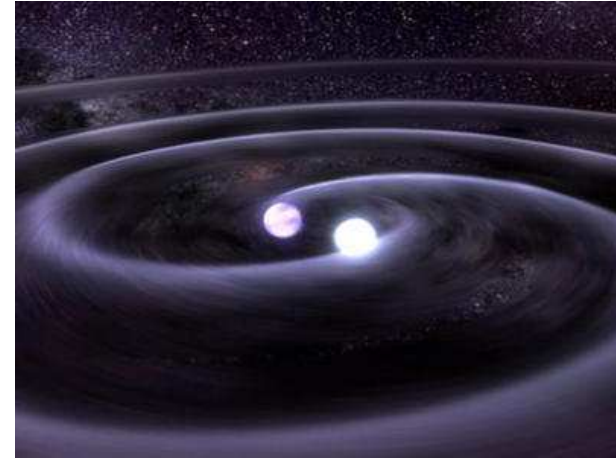
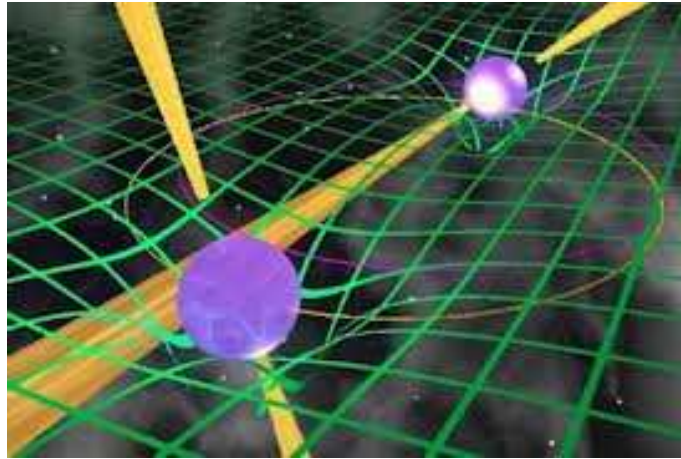
- 1915: Einstein publica su Relatividad General
- 1916 - 1918: Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales  
→ difícilmente detectables
- 1925: Brinkmann publica solución exacta de una onda gravitacional
- 1936: Einstein y Rosen argumentan que ondas gravitacionales no existen (como solución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



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

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

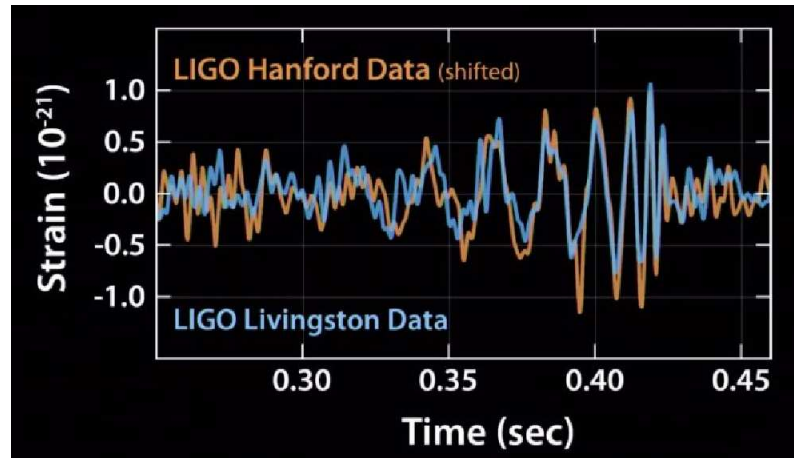
$$T = 7,75 \text{ h} \quad \Delta T = -76,5 \mu\text{s/y}$$

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

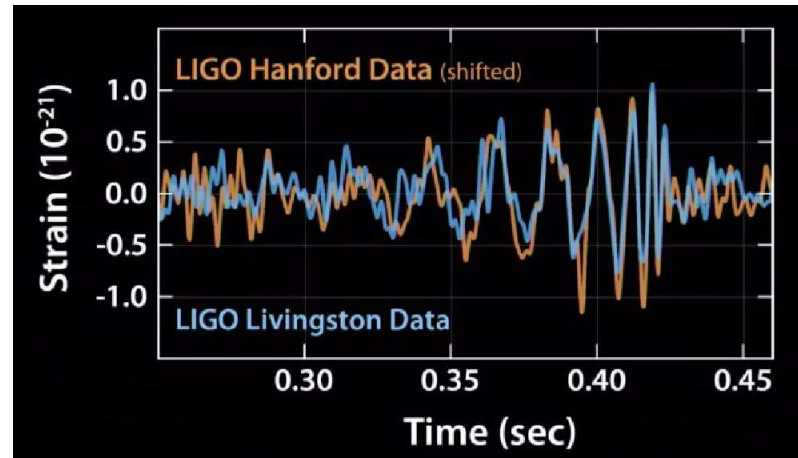
$$\Delta L_{\text{obs}}/\Delta L_{\text{theor}} = 0,997 \pm 0,002$$

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

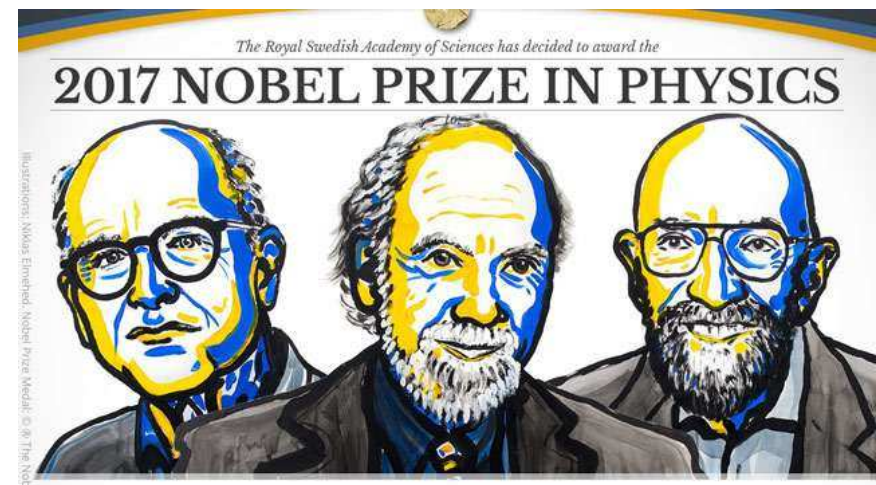
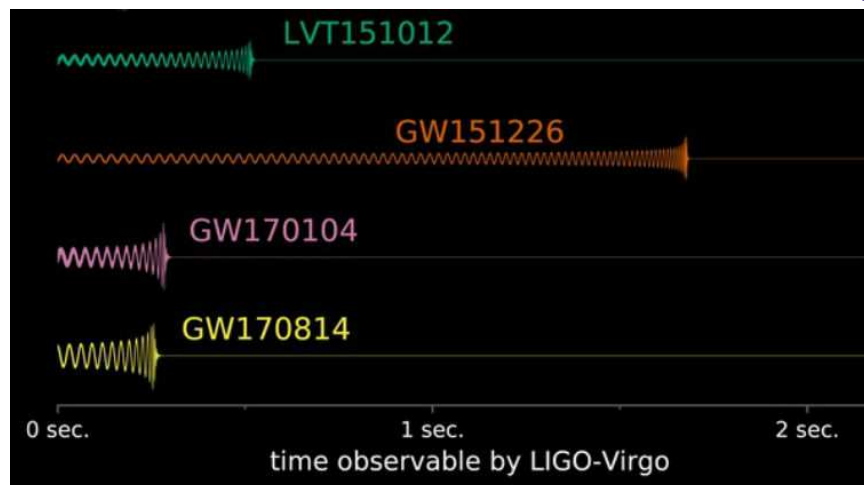
- 1984: Thorne, Drever y Weiss fundan LIGO
- 2002 - 2010: Primera ronda de mediciones de LIGO: sin resultados
- 14 sept 2015: Detección directa en Advanced LIGO: GW150914



- 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, ...



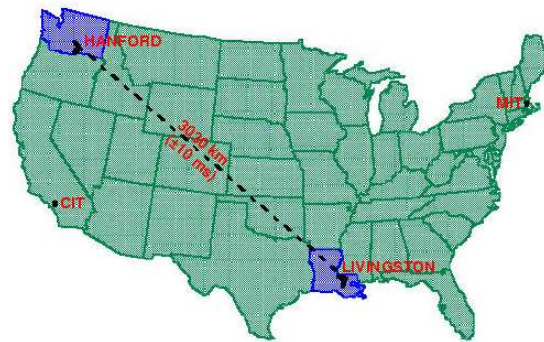


# 4. La detección directa de LIGO

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)



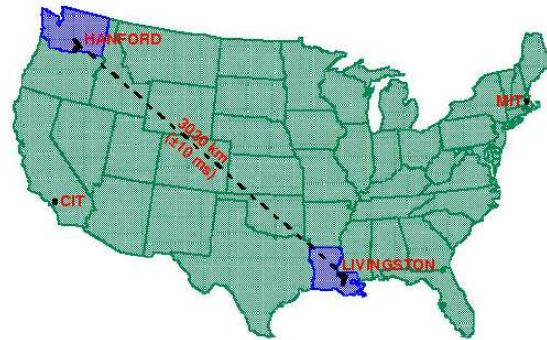
Livingston (LA)

# 4. La detección directa de LIGO

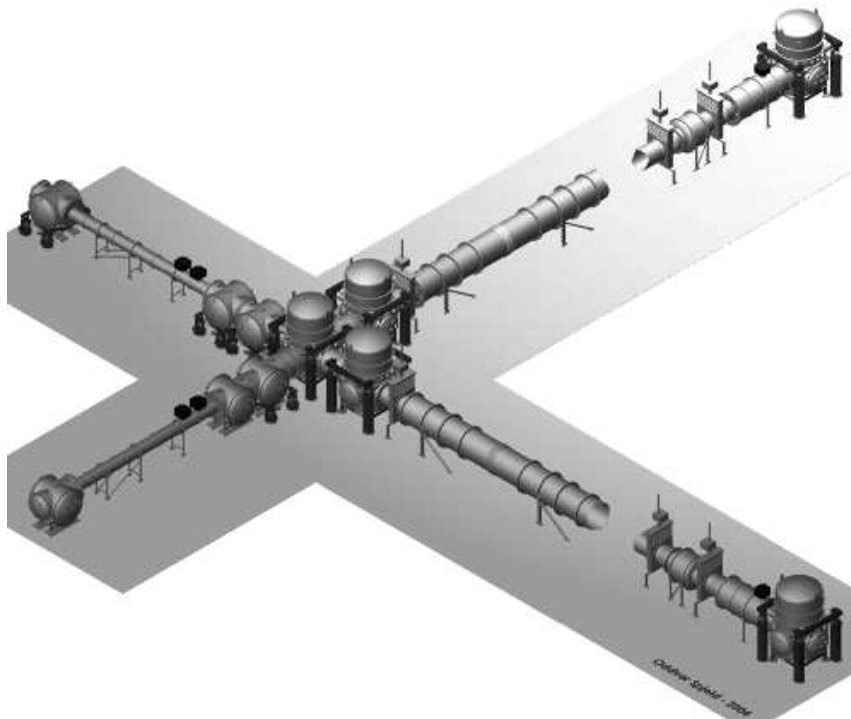
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)



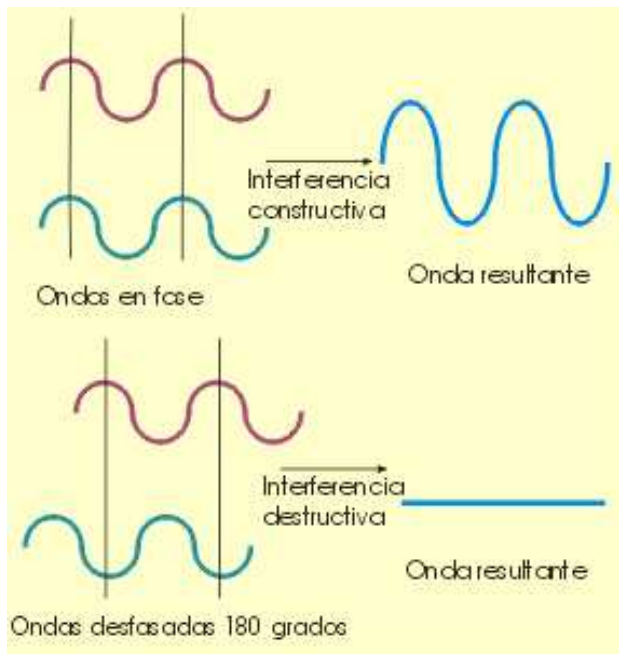
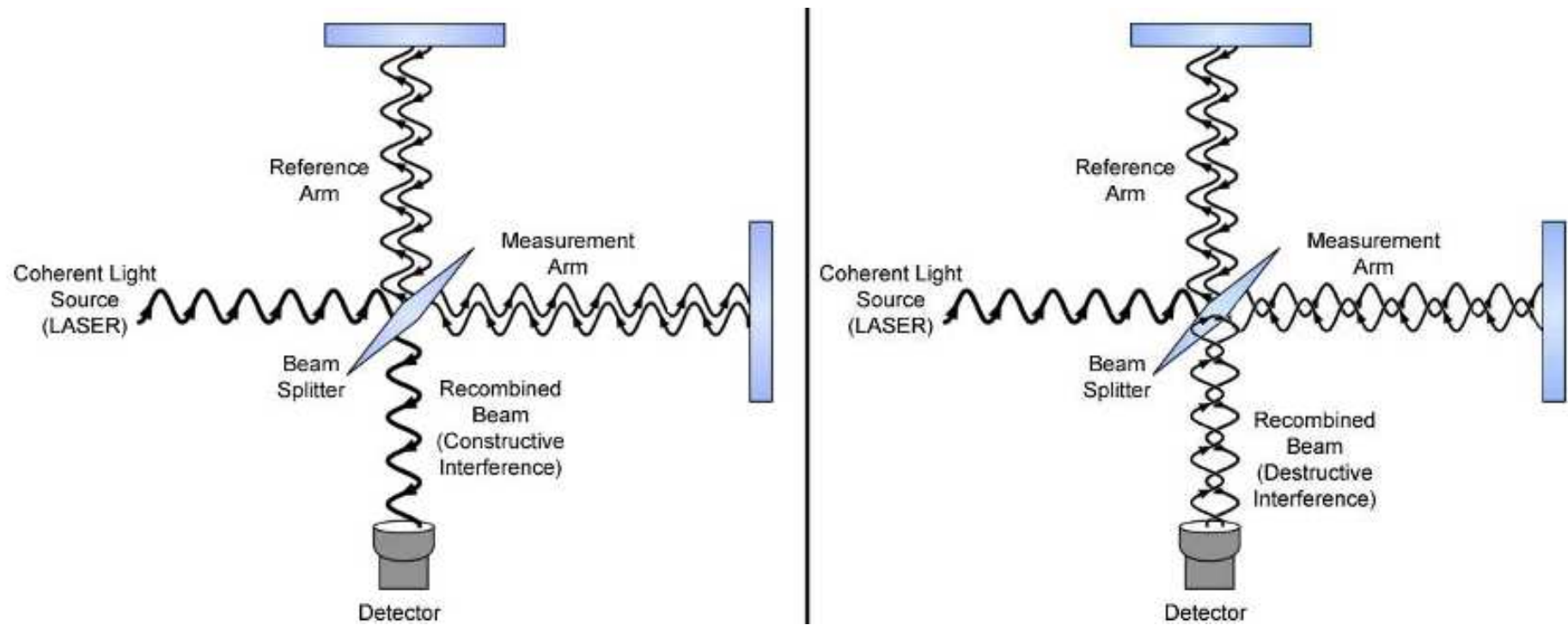
Livingston (LA)



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  $\sim 75$  veces

Onda gravitacional cambia longitud de brazos

$\Rightarrow$  cambia número de longitud de ondas en brazo

$\Rightarrow$  cambia la intensidad de la señal medida

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

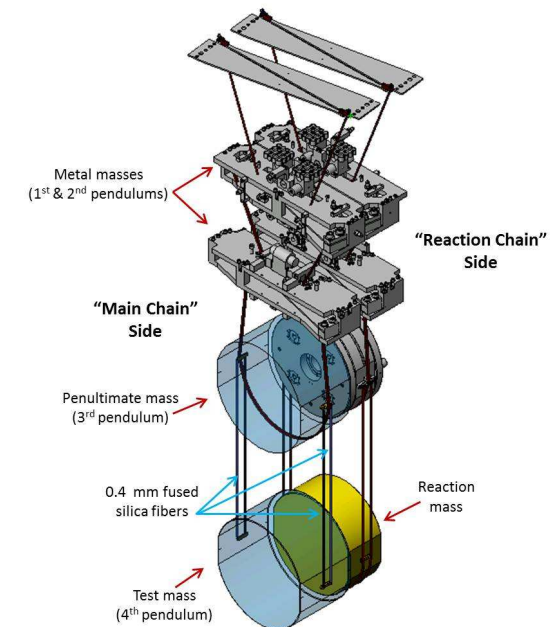
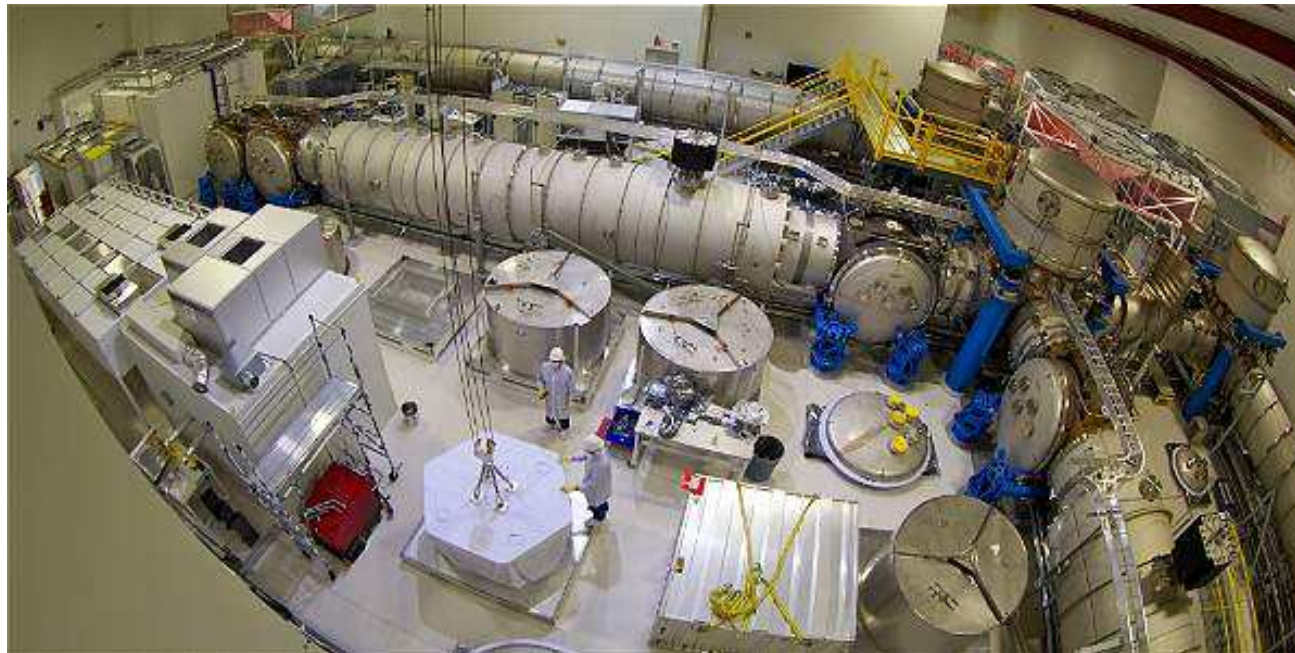
$$\Delta L \sim 10^{-18} m$$

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

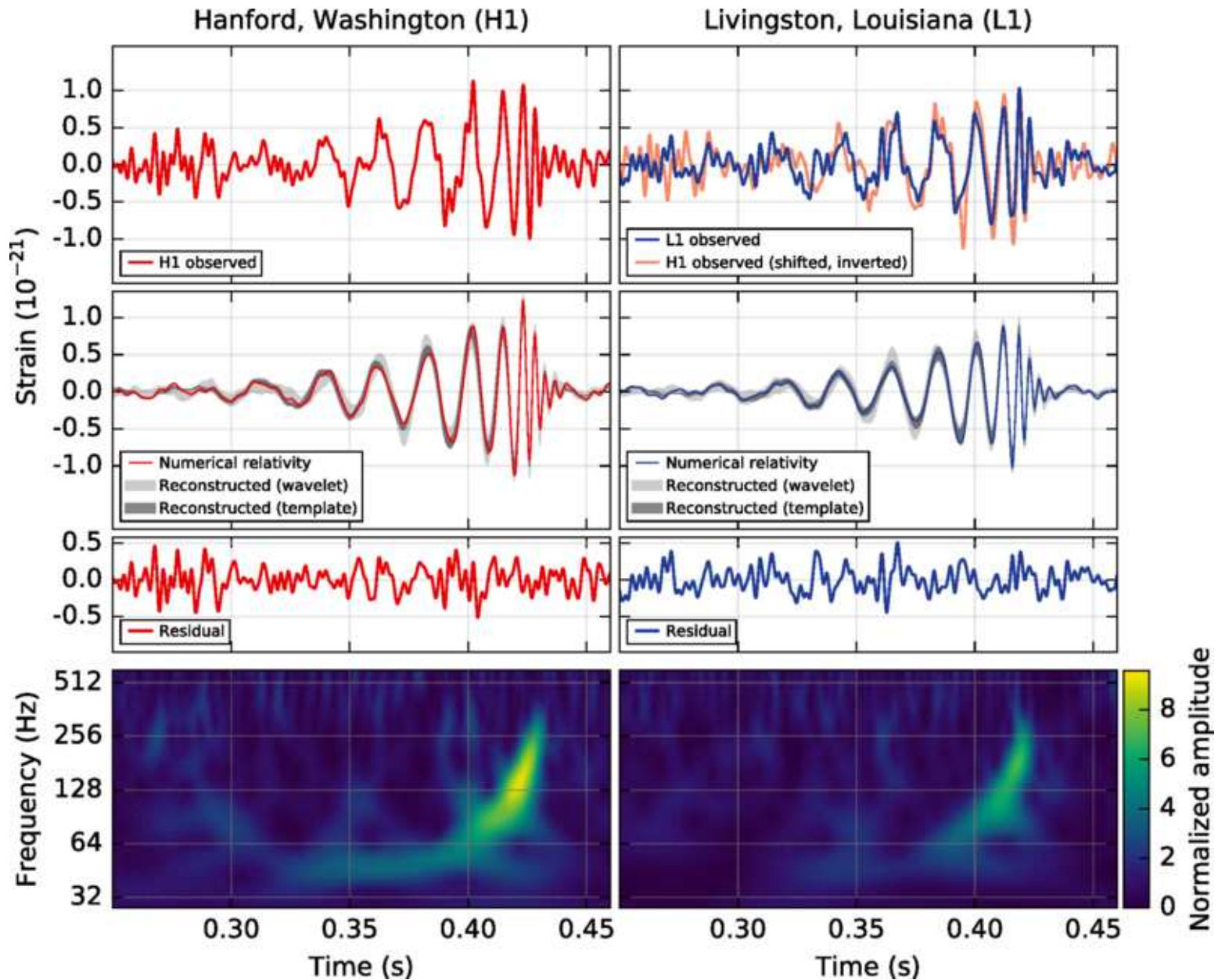


## Filtrando la señal...

- 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!



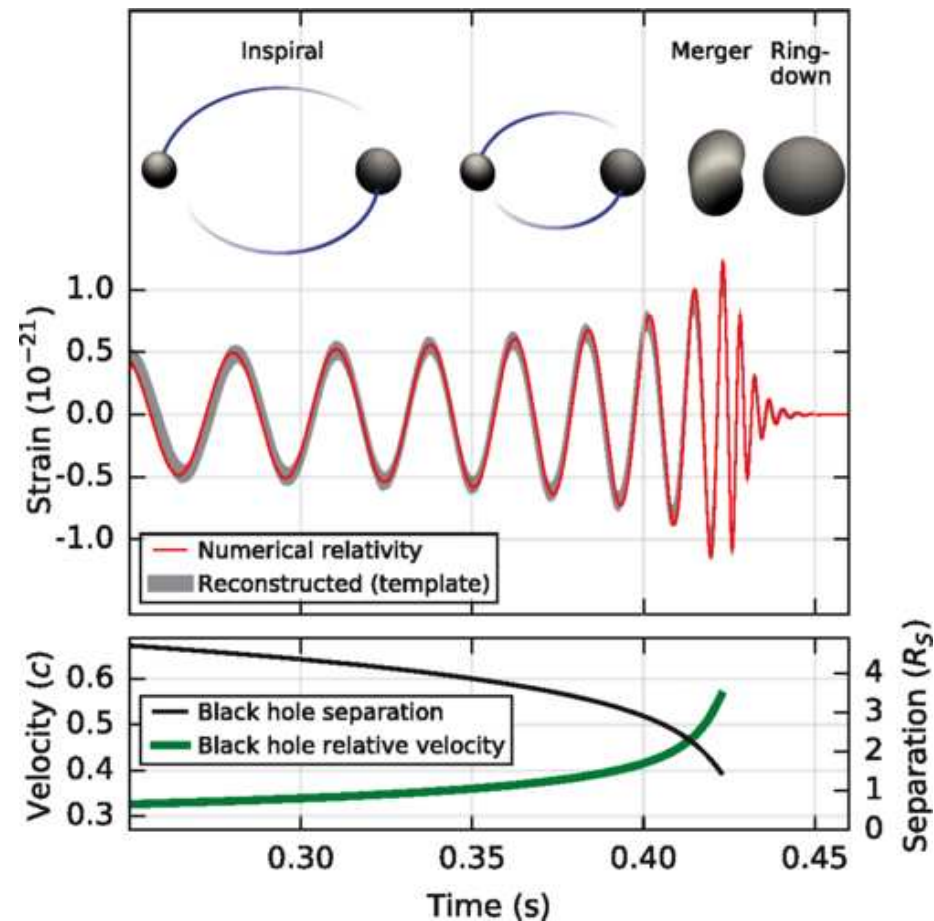
El 14 de septiembre 2015 a las 9:50 UTC: [GW150914](#)



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

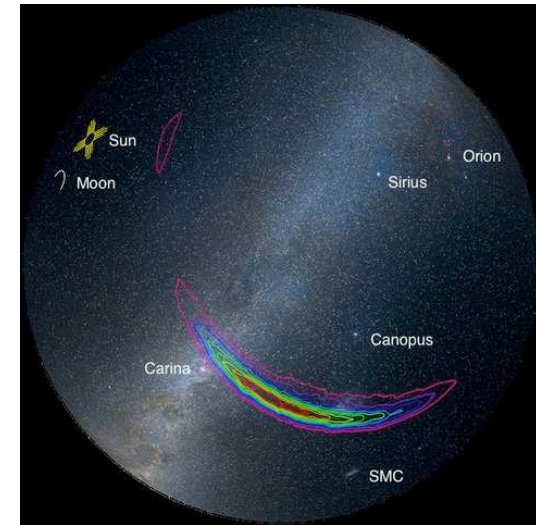
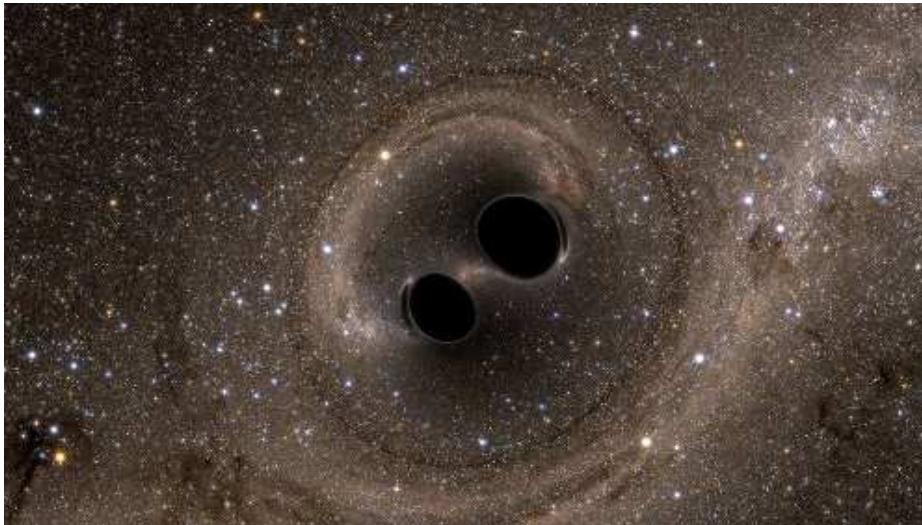




Datos indican (90 % confidence level):

- 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  $\sim 350 \text{ km}$

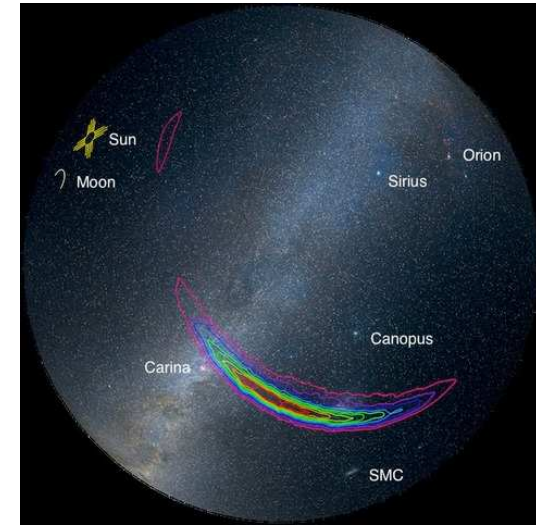
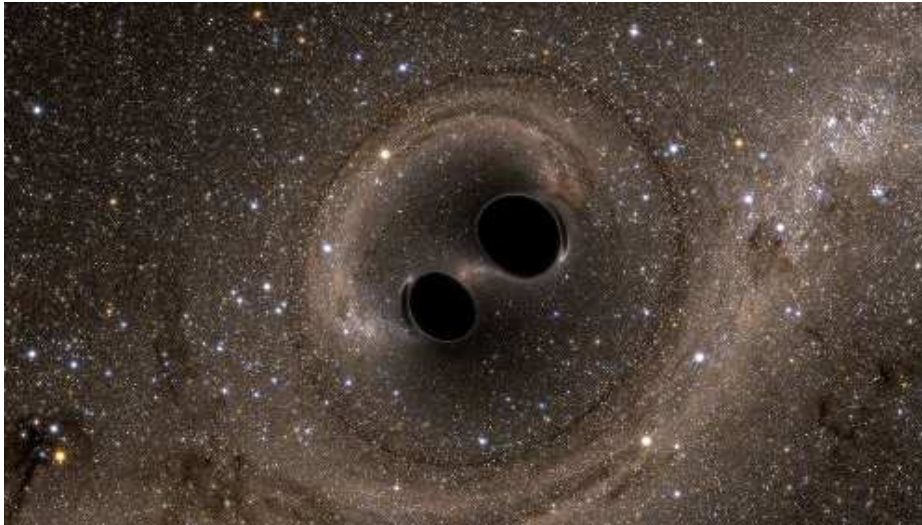
## Fusión de dos agujeros negros!



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!

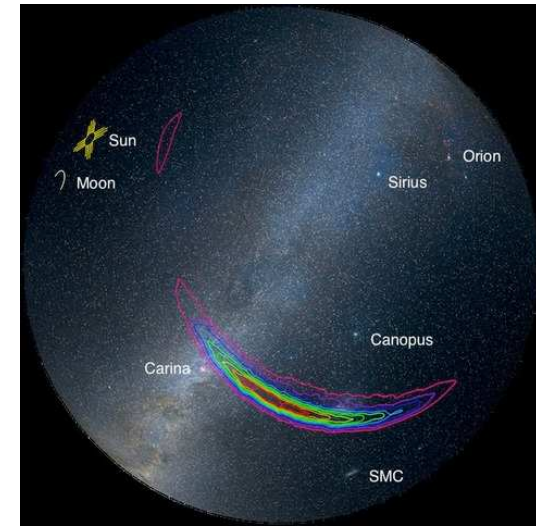
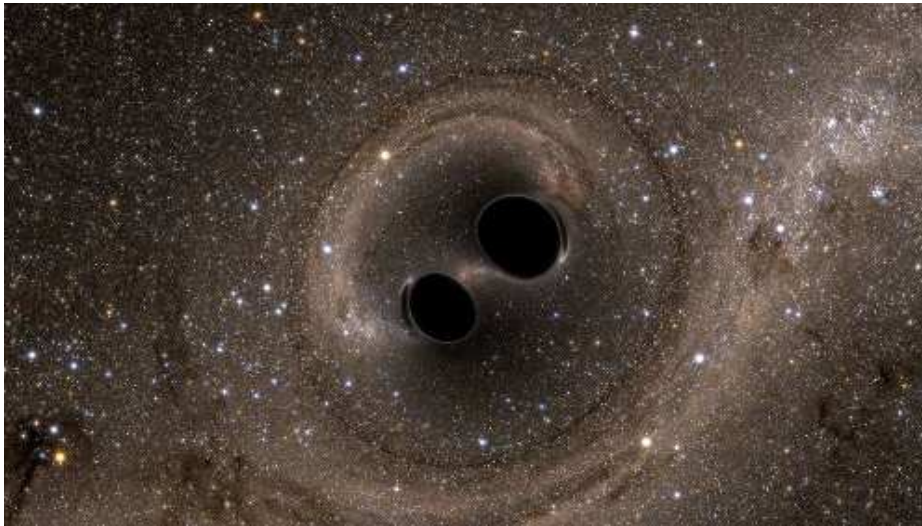


- Agujero negro resultante con  $m_f = 62_{-4}^{+4} M_\odot$  y  $a = 0,67_{-0,07}^{+0,05}$   
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales:  $E_{\text{rad}} \approx 3_{-0,5}^{+0,5} M_\odot c^2$   
(comparación:  $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$ ;  $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{30} \text{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

Datos indican (90 % confidence level):

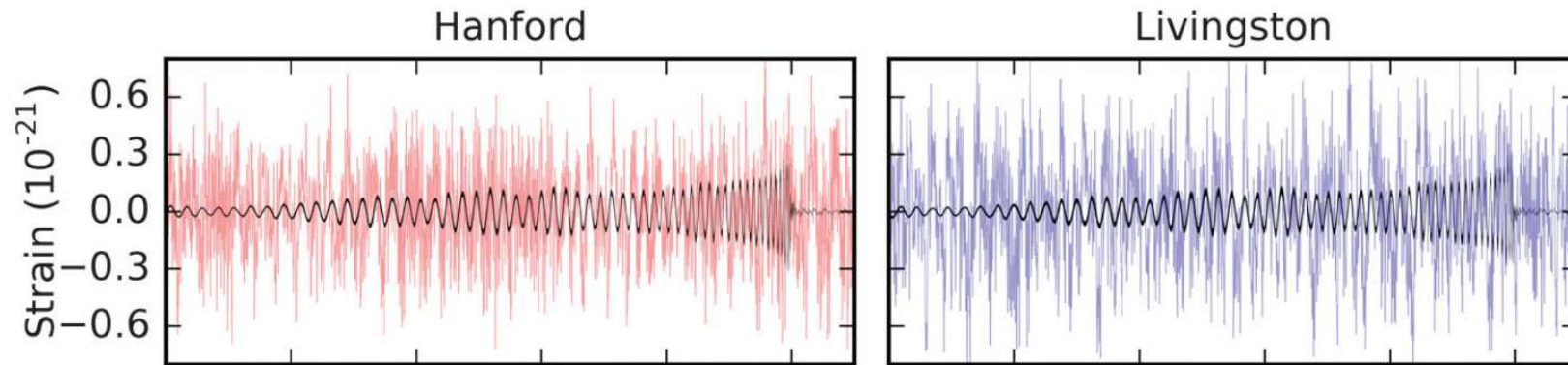
- Dos objetos de  $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_\odot$  y  $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_\odot$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$  separación de  $\sim 350 \text{ km}$

## 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 ( $z \approx 0,09$ )

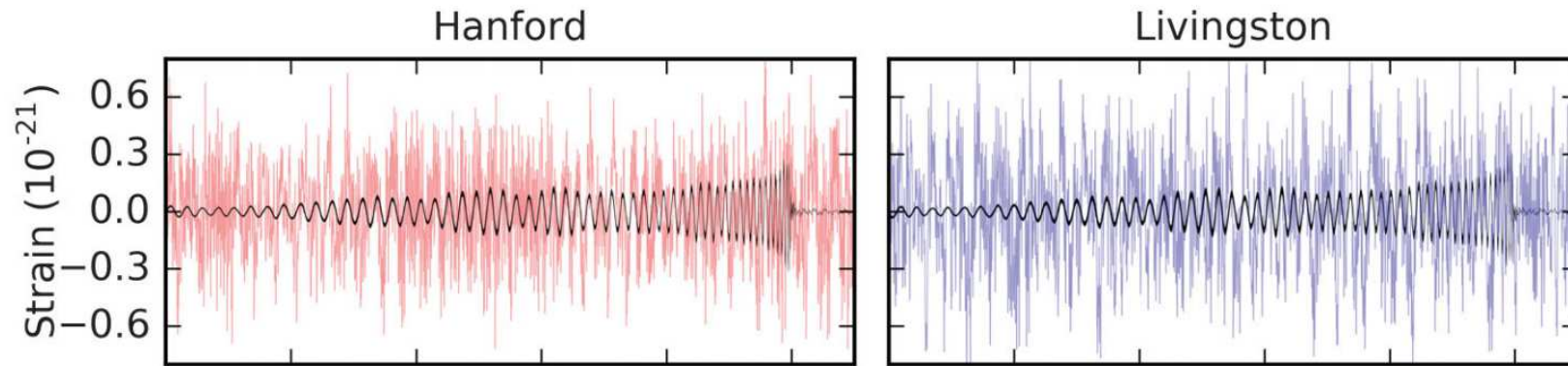
Segundo evento: 26 de diciembre 2015 a las 3:38 UTC: GW151226



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

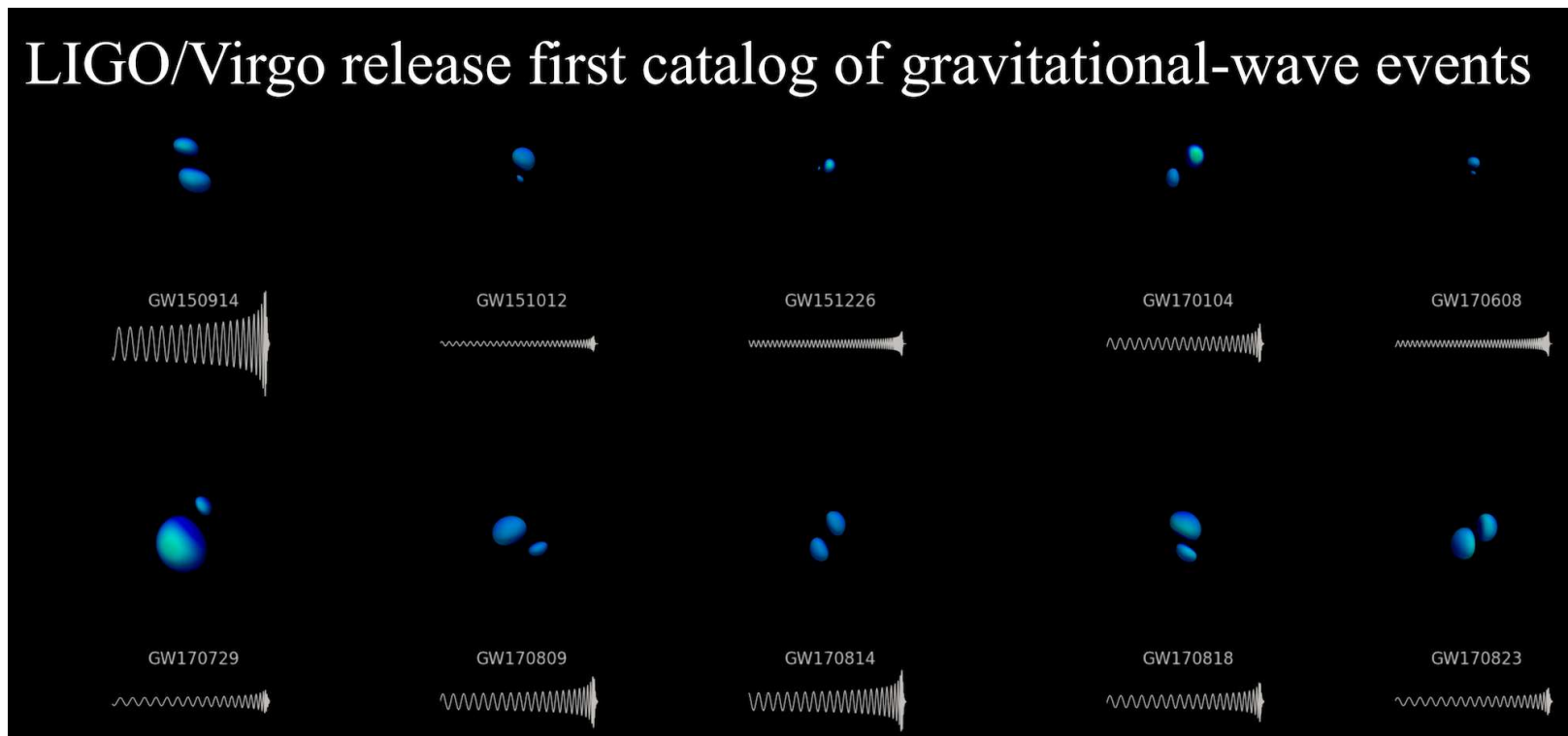


## Segundo evento: 26 de diciembre 2015 a las 3:38 UTC: GW151226



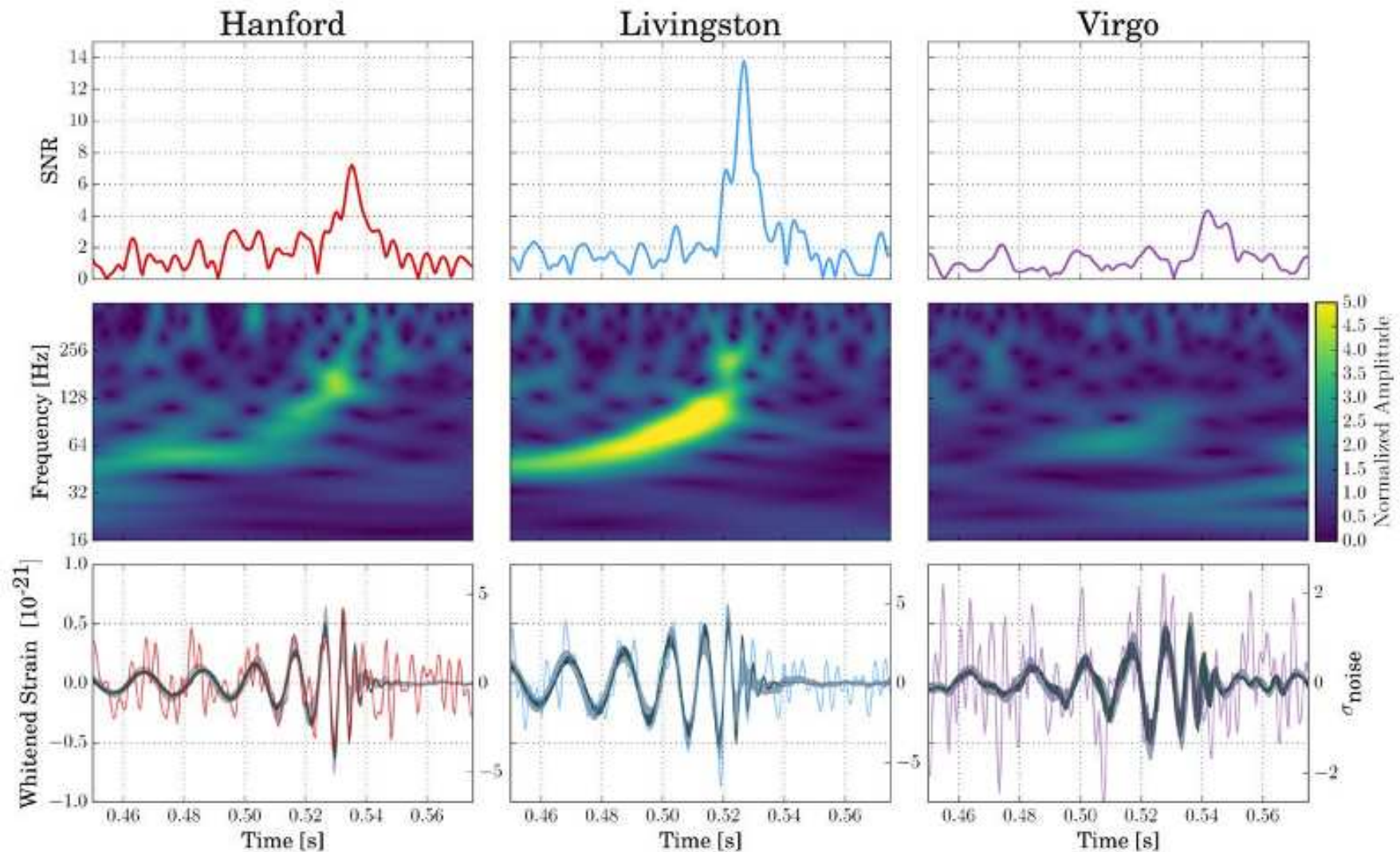
Fusión de agujeros negros con  $M_1 = 14,2_{-3,7}^{+8,3} M_{\odot}$  y  $M_2 = 7,5_{-2,3}^{+2,3} M_{\odot}$

Hasta ahora: 10 eventos detectados!



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

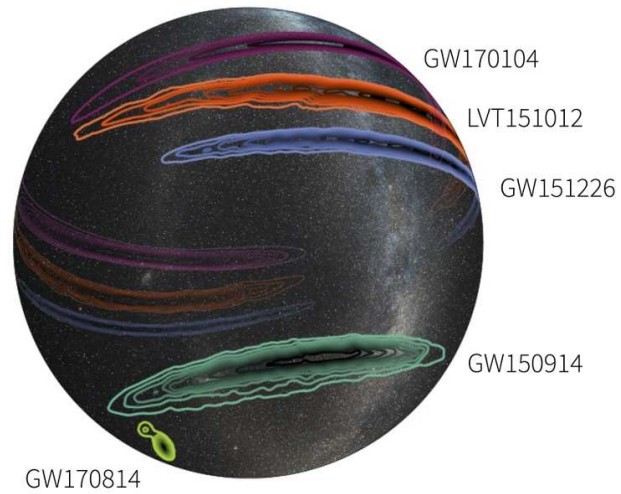
→ Incorporación de VIRGO (Pisa)



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



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



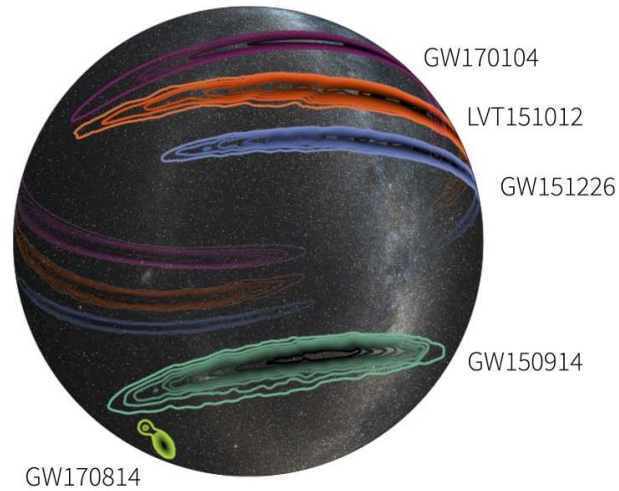
Triangulación de posición:

Localizado en área de  $60 \text{ grados}^2$

—→ 20 veces más precisión

—→ buscar otras señales?

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

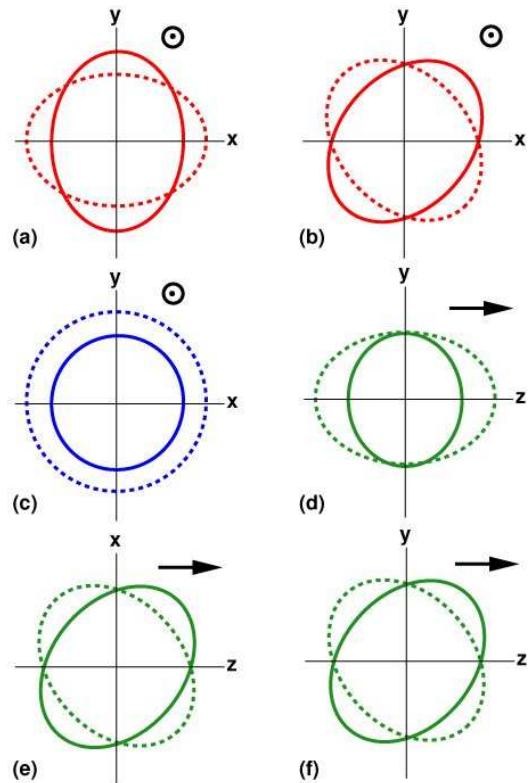


**Triangulación de posición:**

Localizado en área de  $60 \text{ grados}^2$

→ 20 veces más precisión

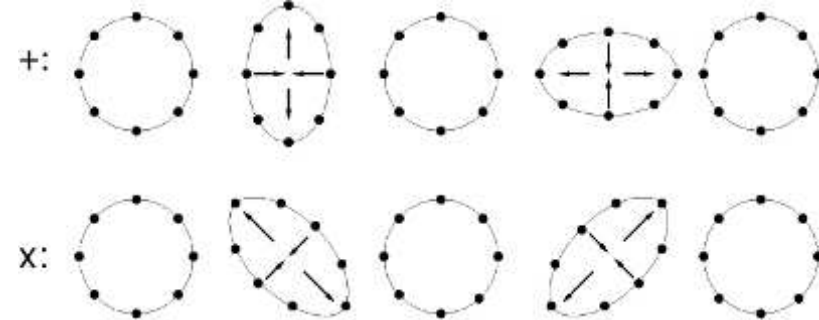
→ buscar otras señales?



**Polarización de ondas gravitacionales:**

Relat. Gen. predice (a) y (b)

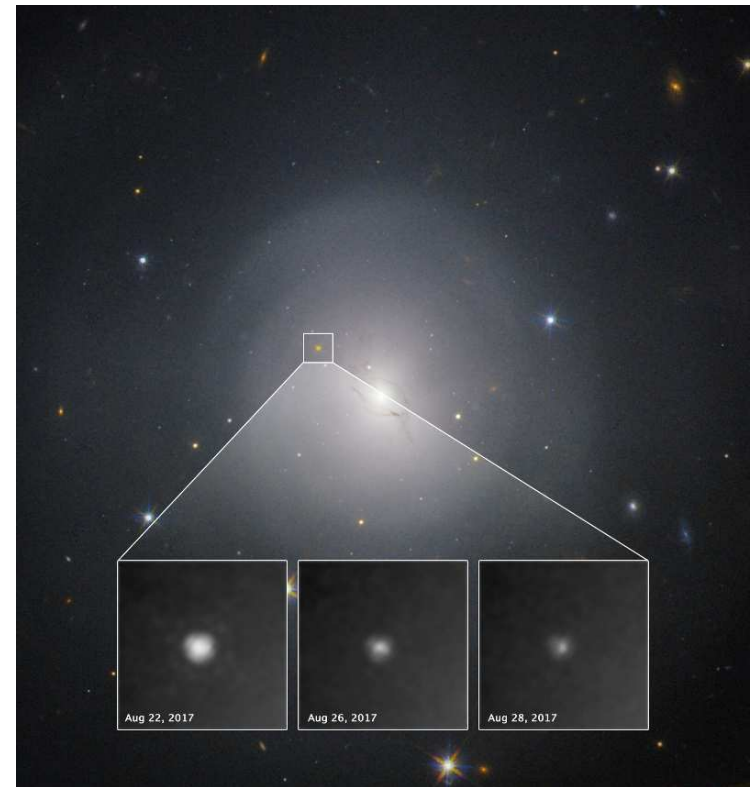
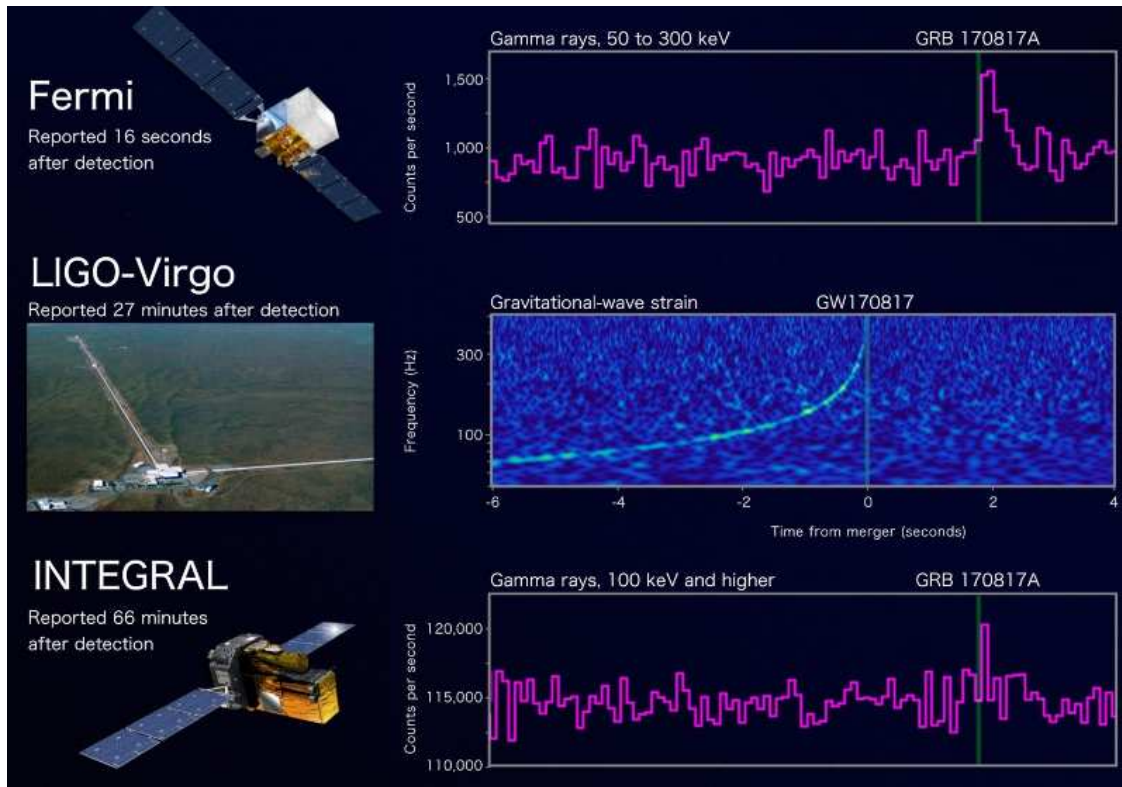
Relat. Gen. prohíbe (c), (d), (e), (f)



→ 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, ...

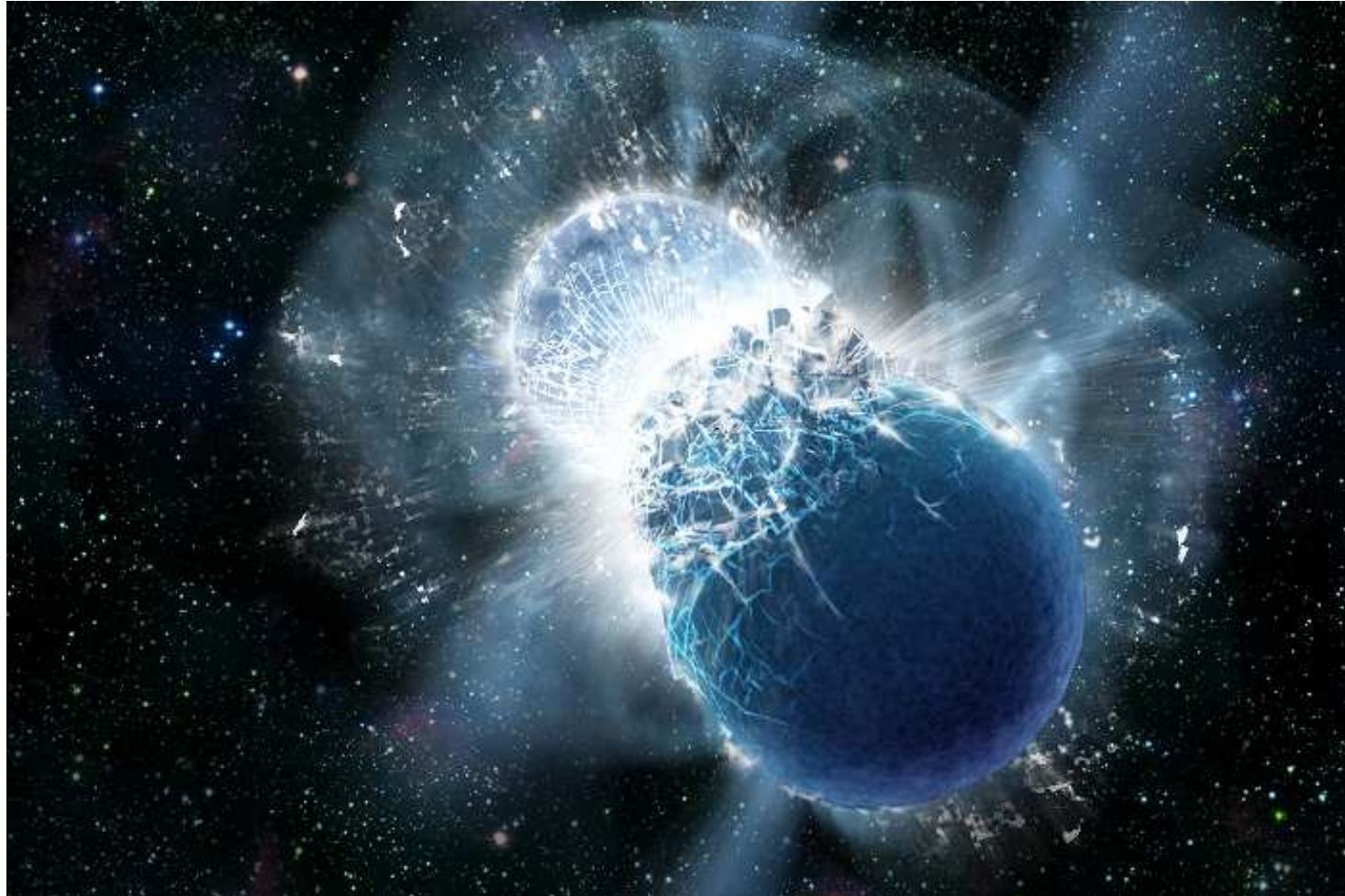
→ no es fusión de agujeros negros

→ ¿Qué ha sido?



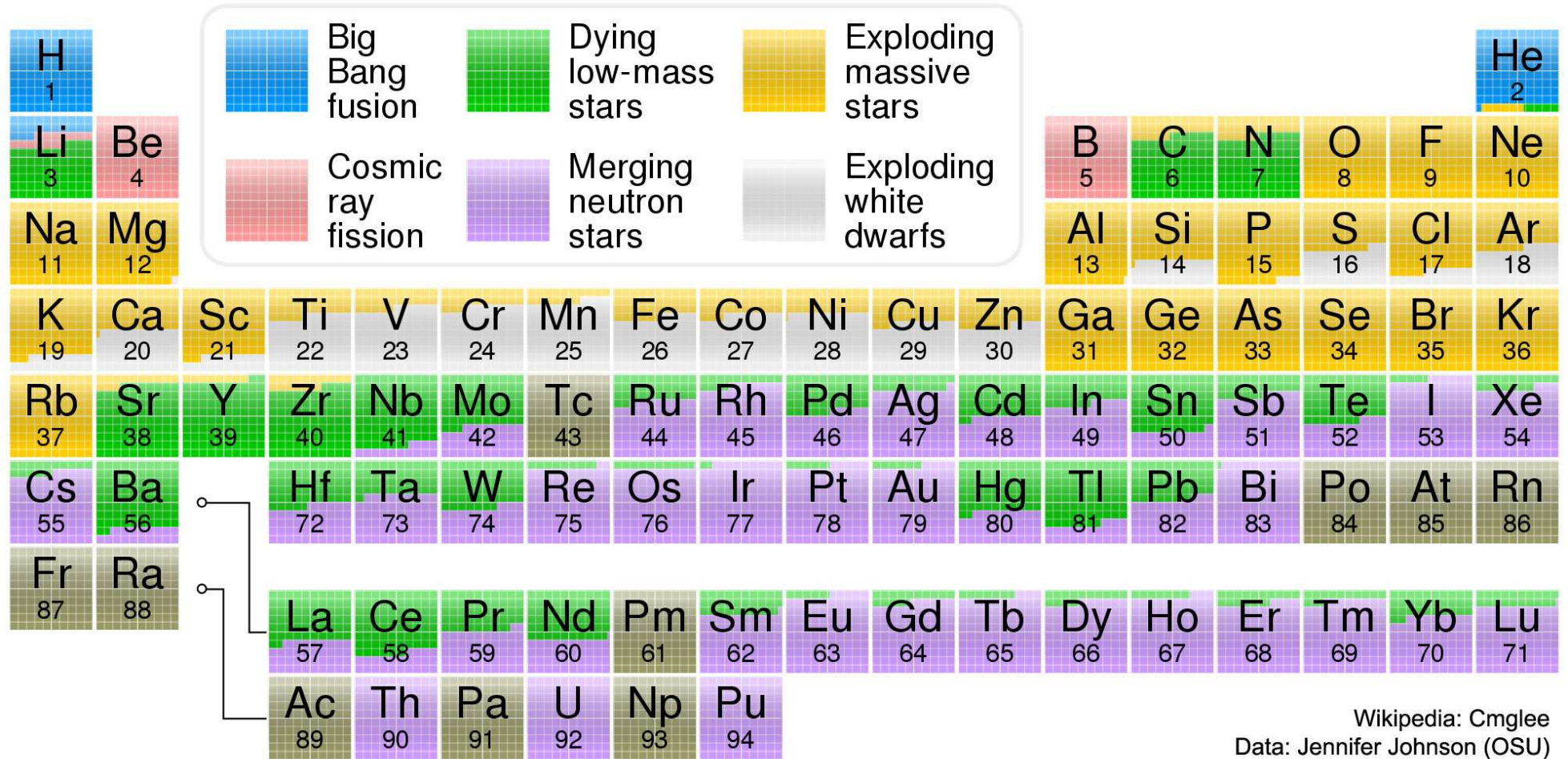
Kilonova: Fusión de dos estrellas de neutrones

$$M_1 = 1,36 - 2,26M_{\odot} \quad \text{y} \quad M_2 = 0,86 - 1,36M_{\odot}$$



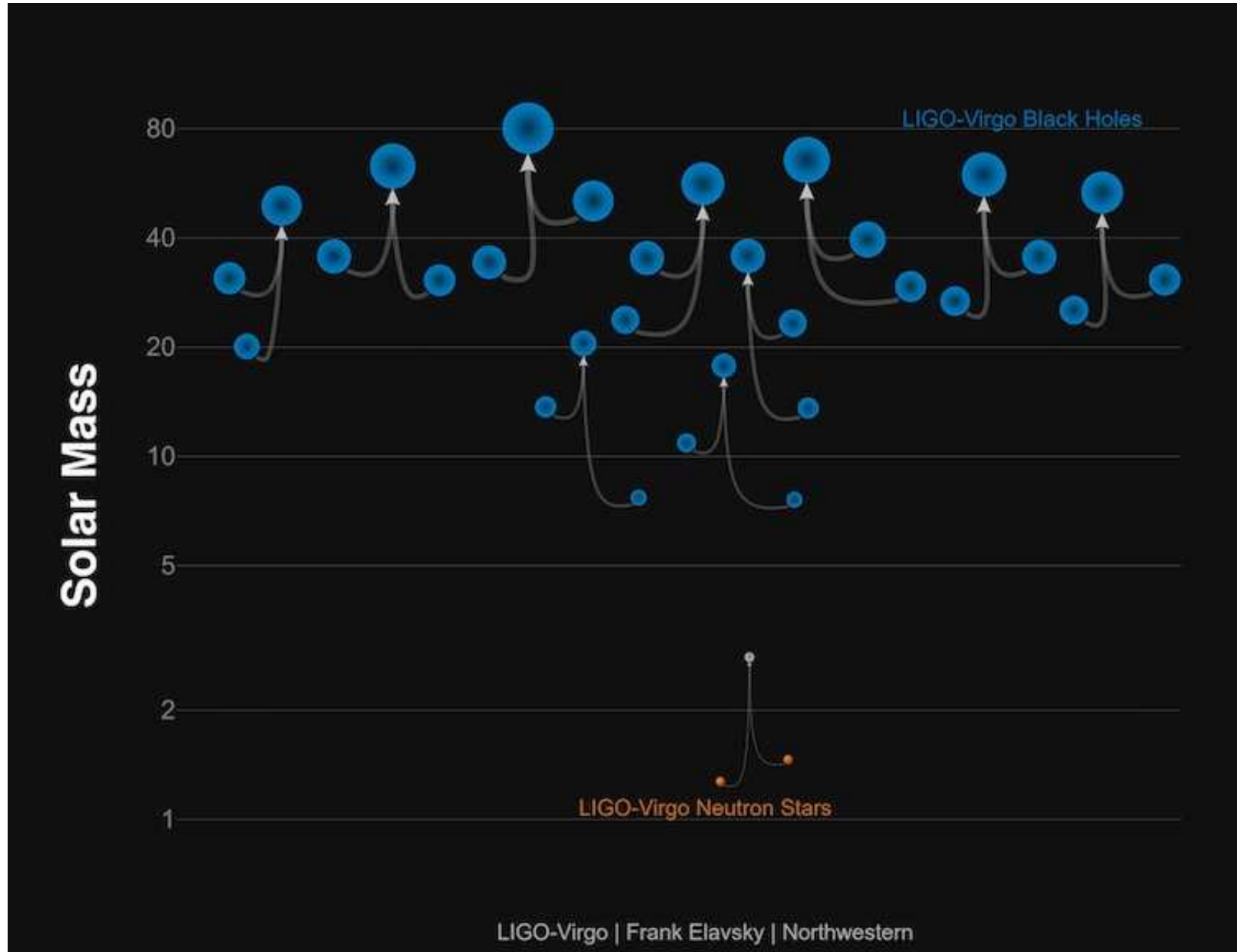
—→ formación de  $16000 M_{\oplus}$  en metales pesados ( $> \text{Fe}$ )  
formación de  $10 M_{\oplus}$  en oro y platino

# Origen físico de los elementos:





# Observaciones hasta ahora: 9 fusiones de agujeros negros + 1 kilonova





# 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...?

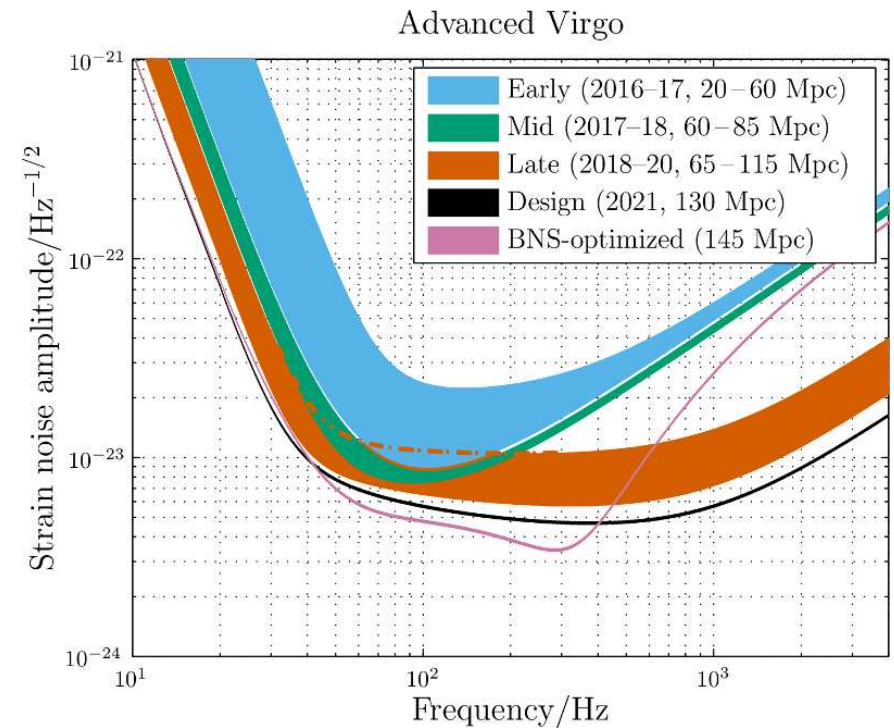
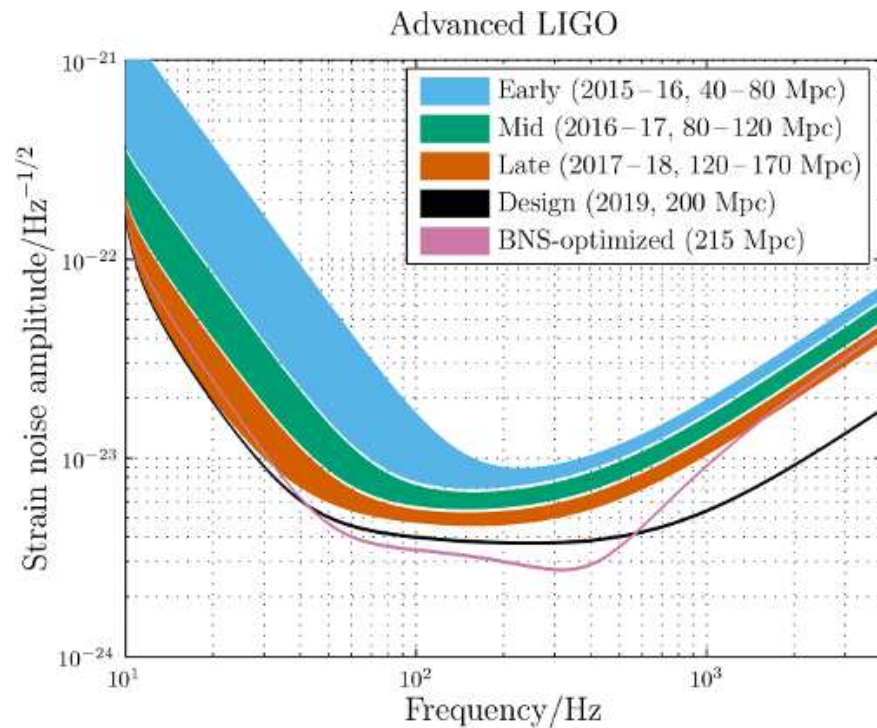
## Hemos aprendido mucho:

- 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  $v_{EM}$



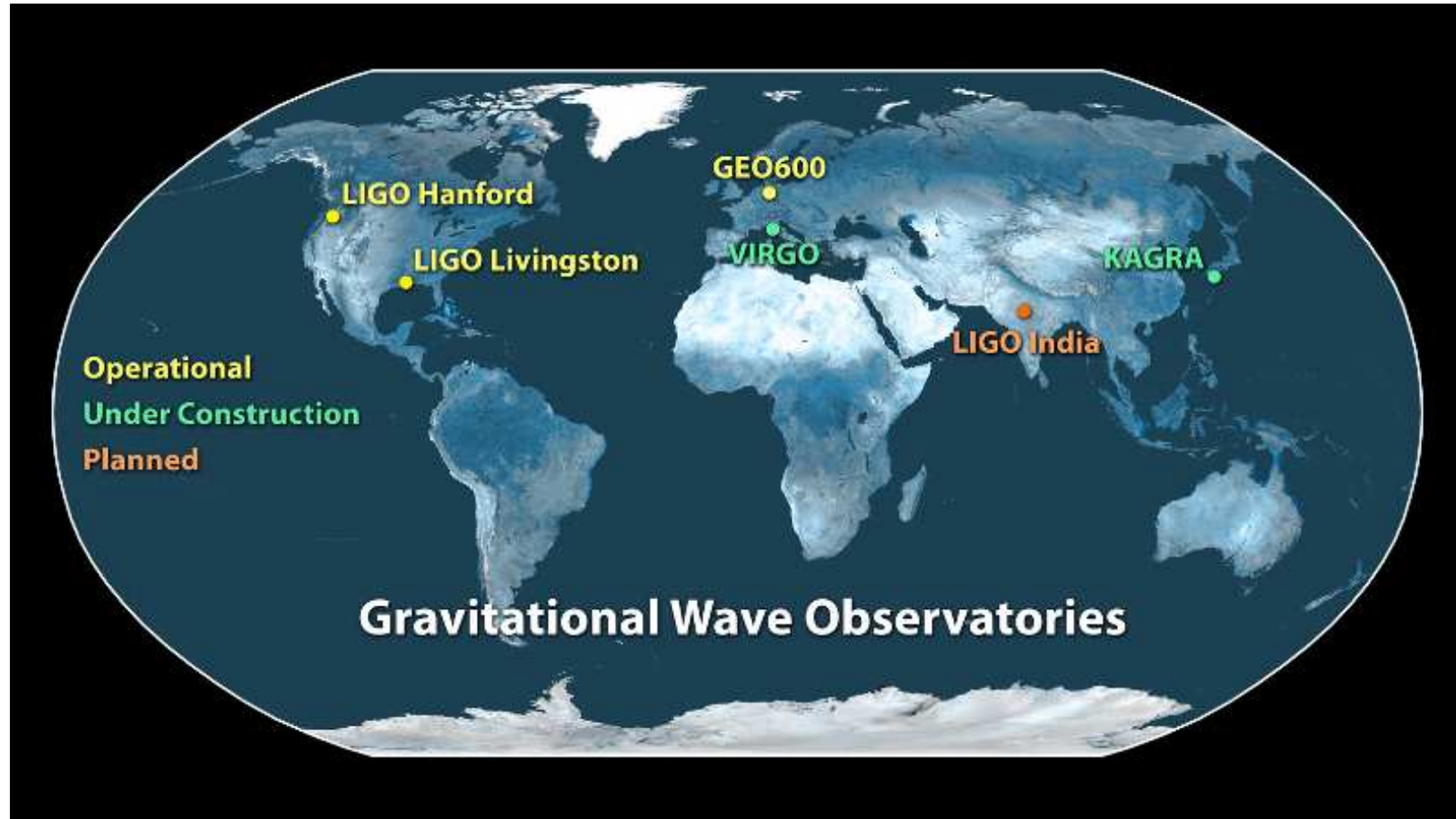
# Planes de futuro:

- Aumentar sensibilidad en consecutivas rondas observacionales



→ Nueva ronda empieza en 1 abril 2019,  
con 40 % (LIGO) y 100 % (Virgo) más sensibilidad

- Otros detectores terrestres:

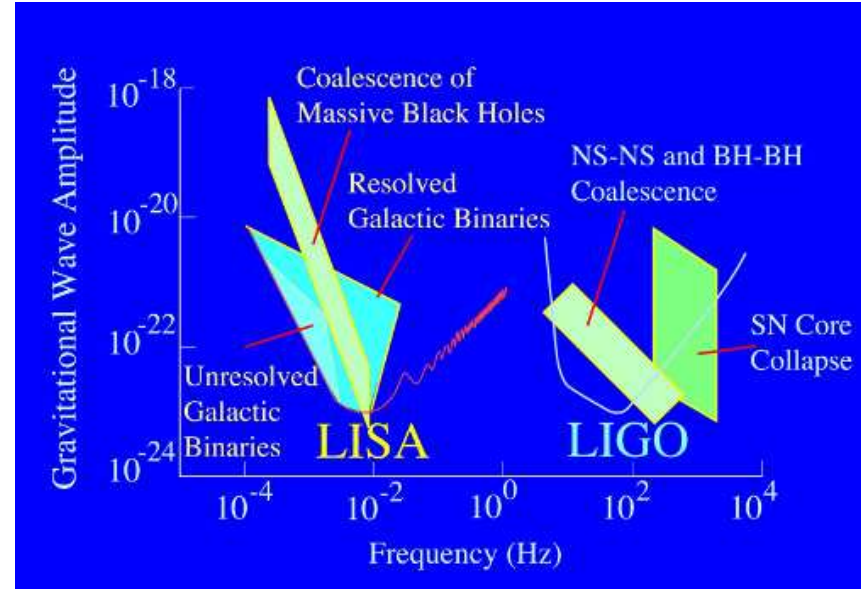
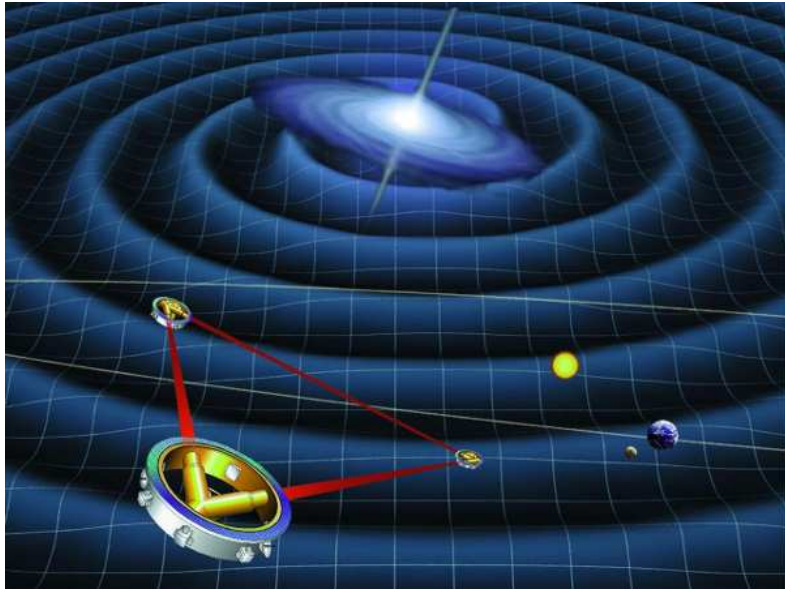


**VIRGO:** incorporado en verano 2017 en red de detectores gravitacionales

**KAGRA:** operacional en 2018?

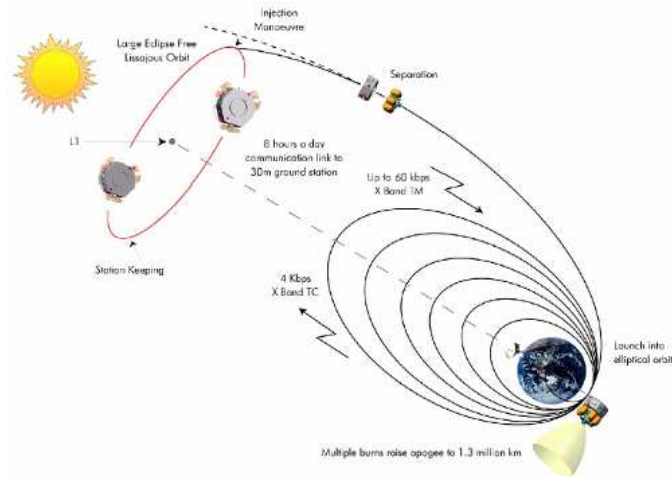
**LIGO India:** acuerdo de principios

- Detectores espaciales: Evolved Laser Interferometer Space Antenna



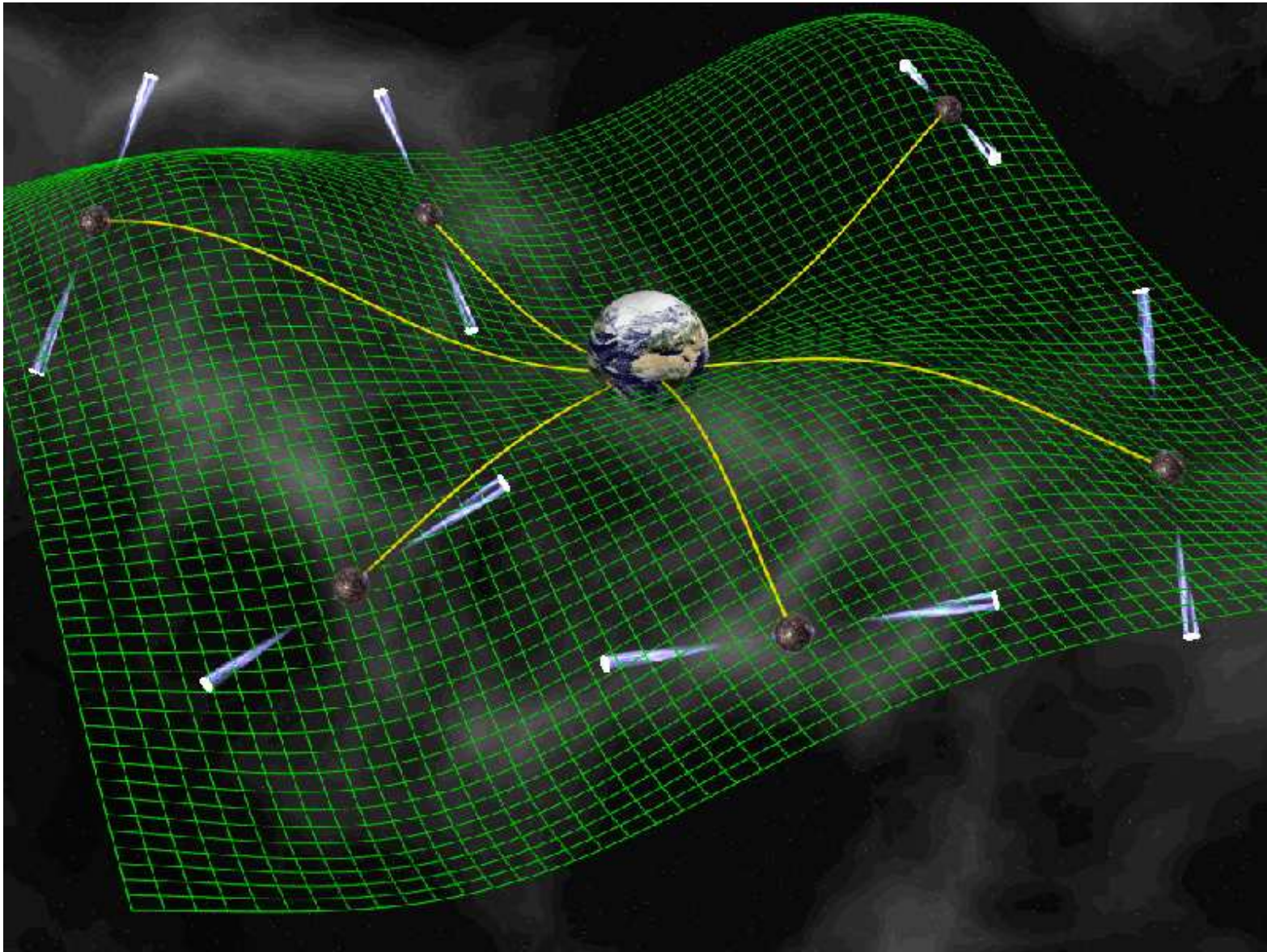
→ 3 satelites a 1 000 000 000 km cerca de la Tierra

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

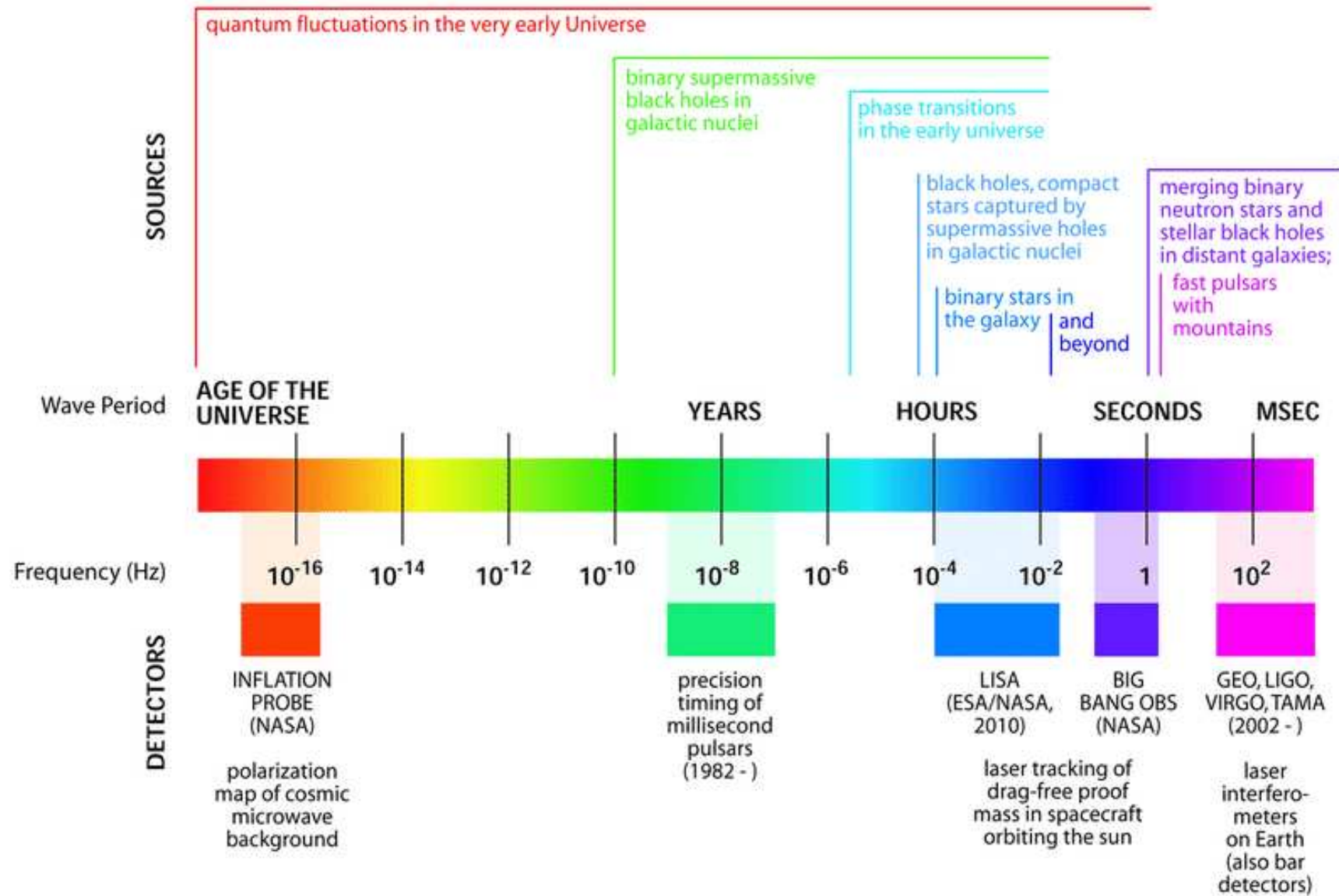




- Pulsar Timing Arrays: correlaciones en efecto Doppler de distintas púlsares?

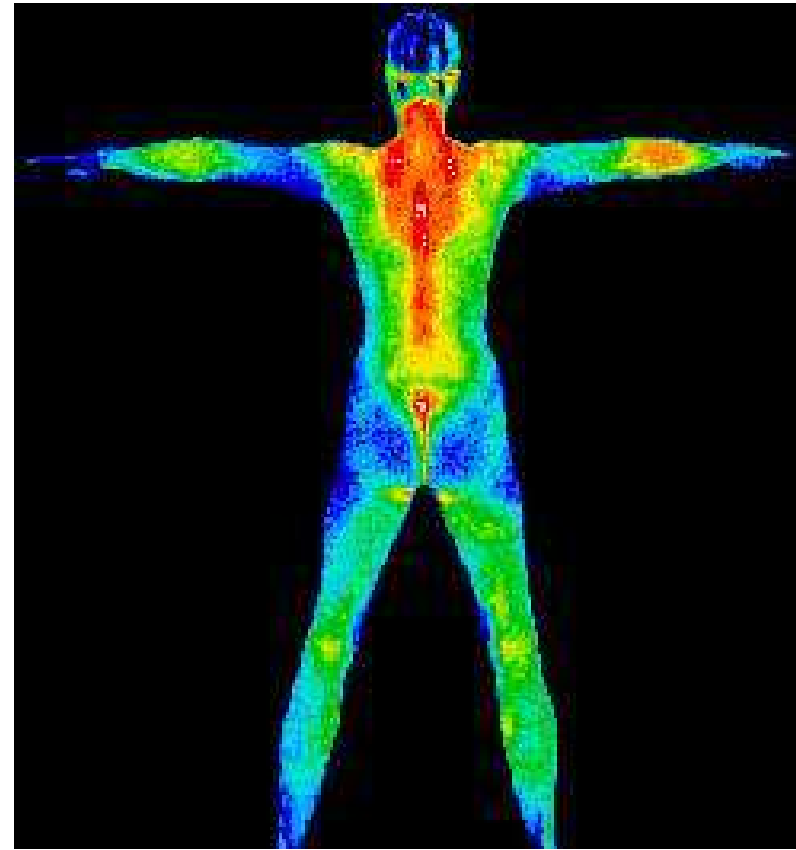
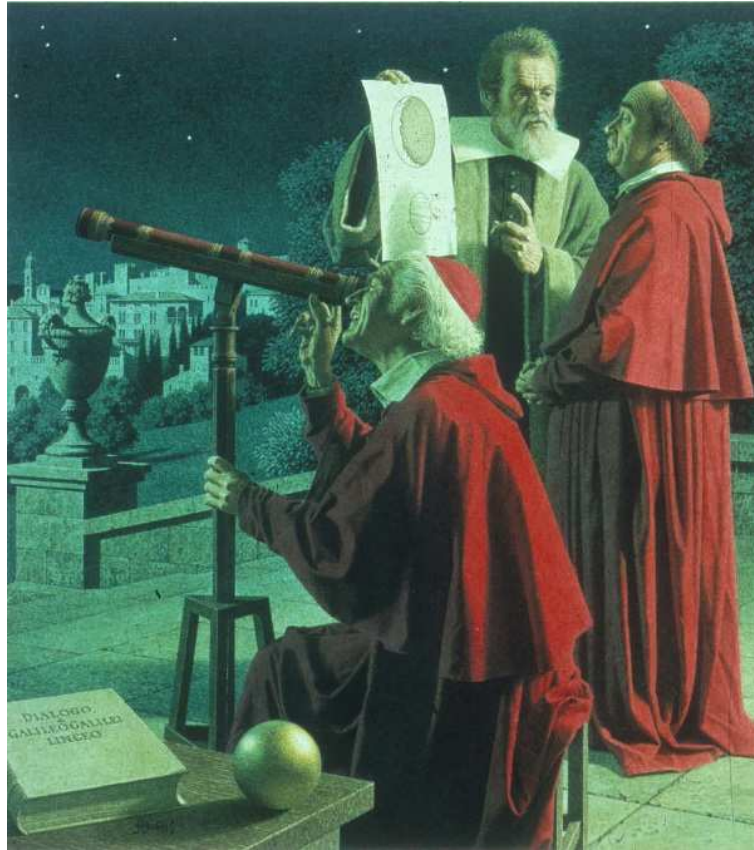


# THE GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM

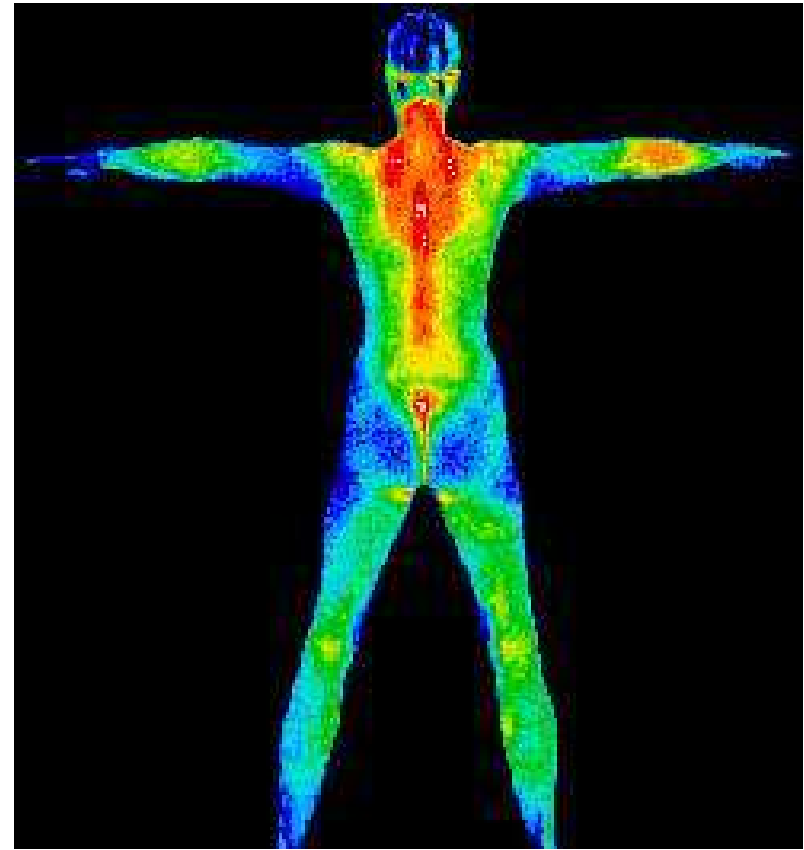
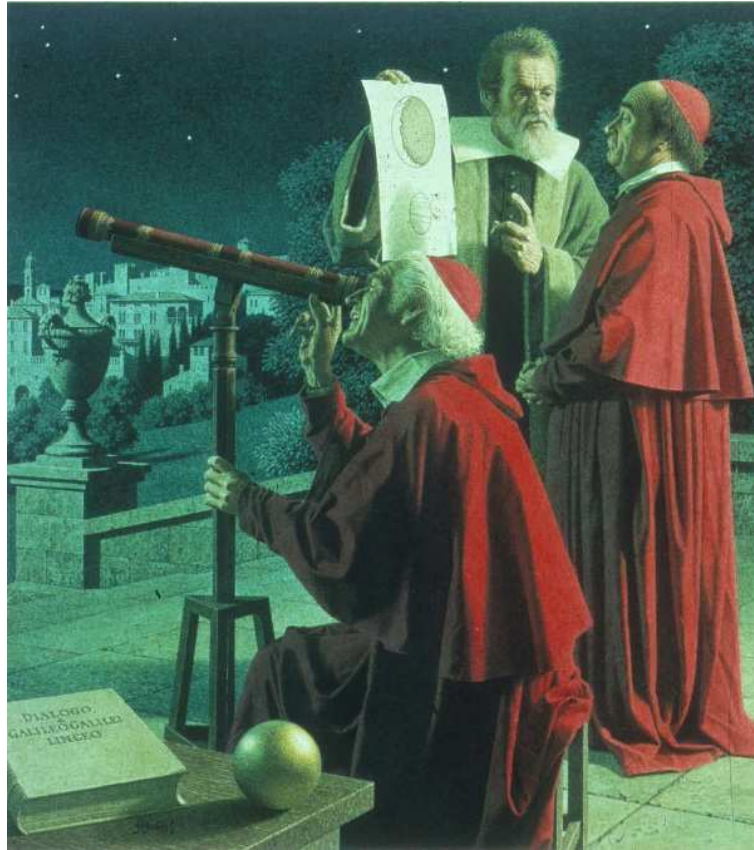




Nueva tecnología implica un nuevo mundo por descubrir...



Nueva tecnología implica un nuevo mundo por descubrir...

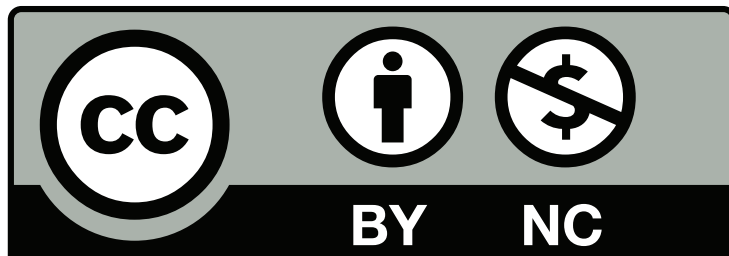


¡Queda mucho trabajo por hacer!

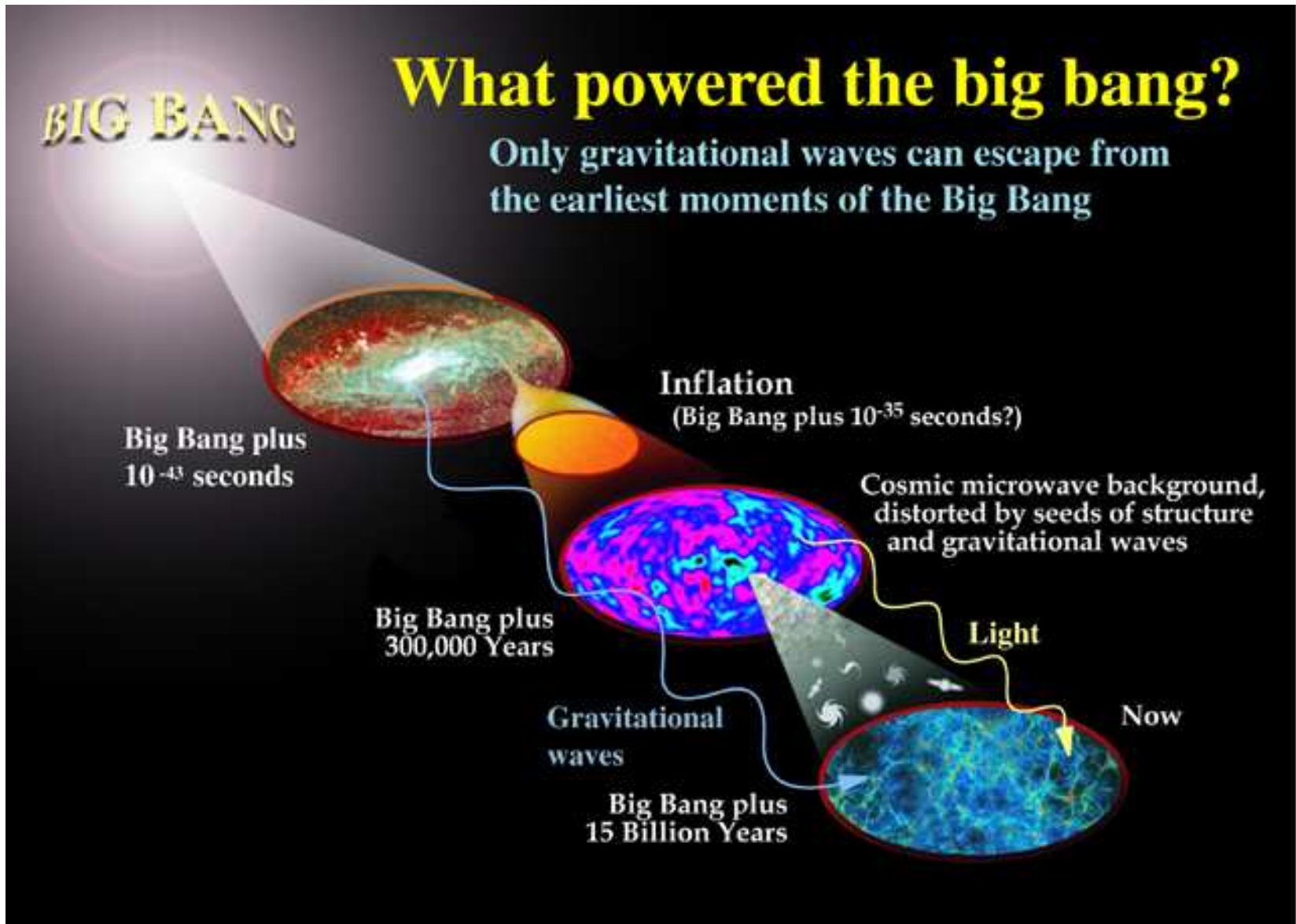
¡Gracias!

<http://www.ugr.es/local/bjanssen>

Google: Bert Janssen UGR

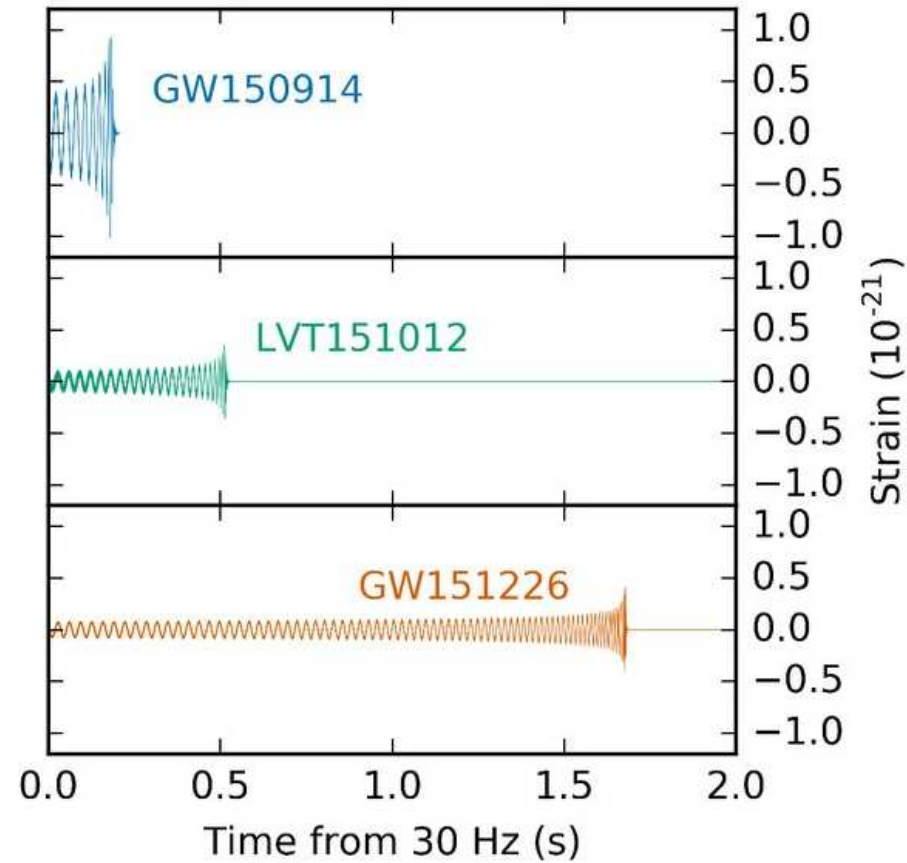






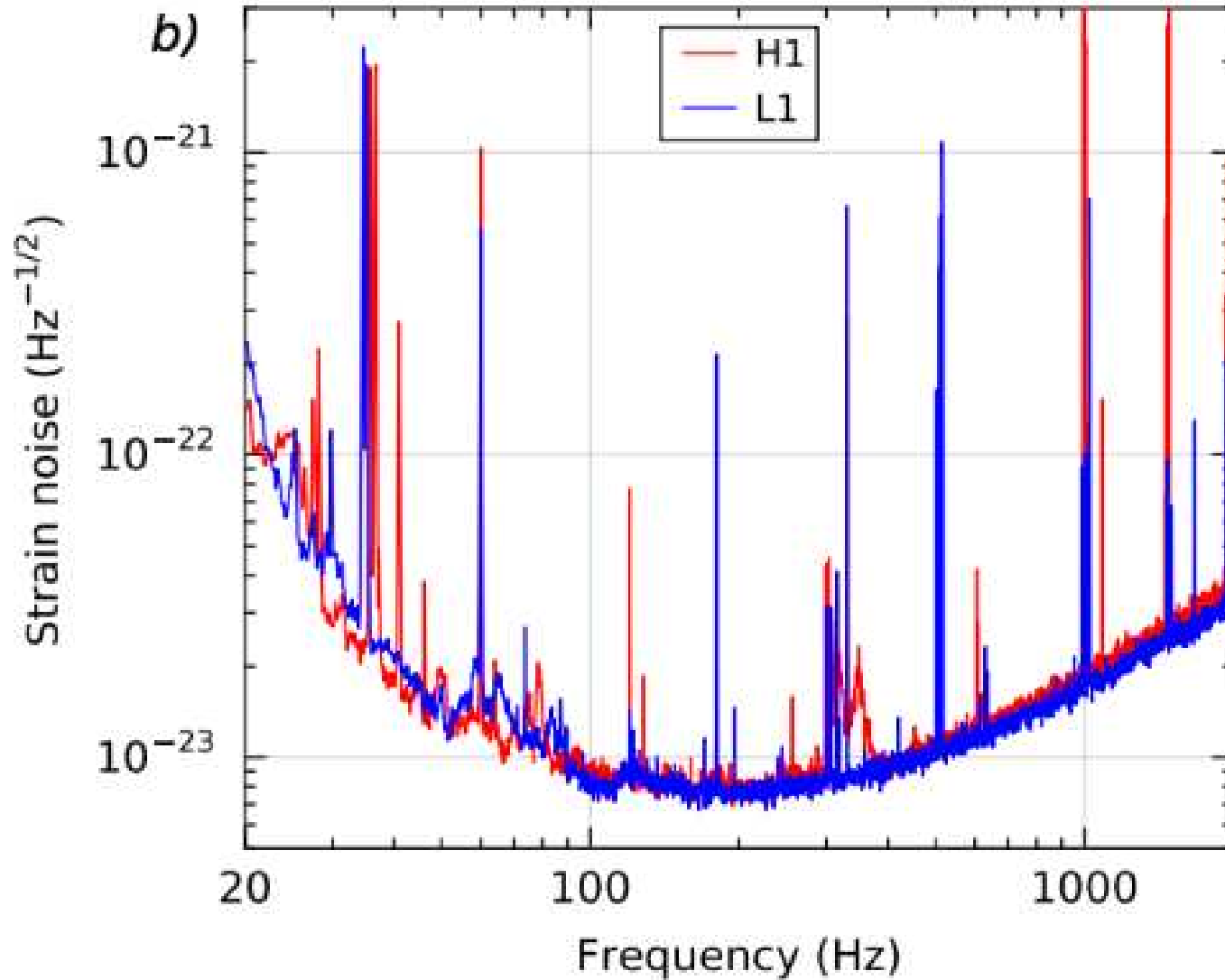


Candidato: 12 de octubre 2015 a las 9h54 UTC: **LVT151012**



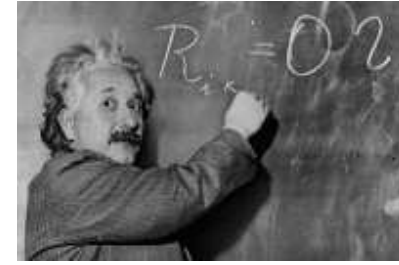
Data estadísticamente no suficientemente significativa ( $\sim 2\sigma$ )...

- 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

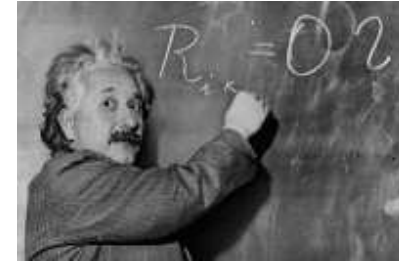


Perturbación de la métrica:  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \varepsilon h_{\mu\nu}$

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

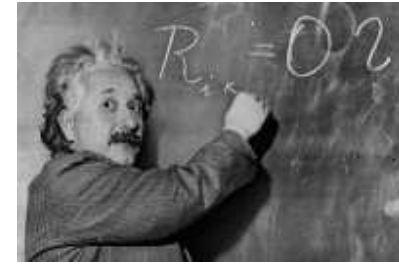
Cambio general de coordenadas:  $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu$

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

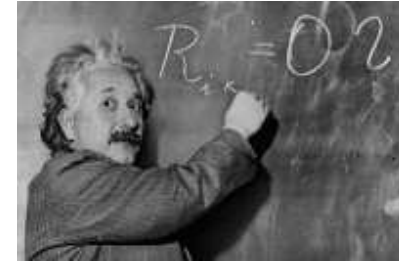
Ecn de Einstein del vacío:  $\frac{1}{c^2} \partial_t^2 h_{\mu\nu} - \partial_x^2 h_{\mu\nu} - \partial_y^2 h_{\mu\nu} - \partial_z^2 h_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} 0$

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

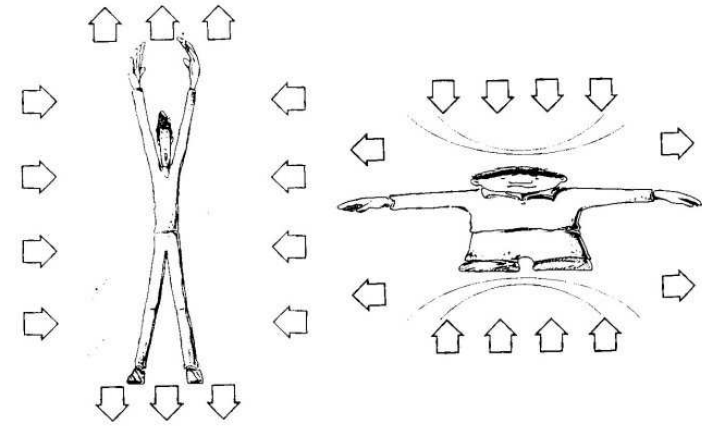
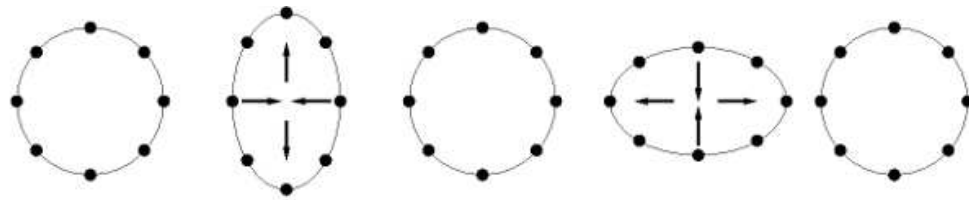
Tensor de Ricci:  $R_{\mu\nu} \stackrel{*}{=} \frac{1}{2} \varepsilon \partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu}$

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

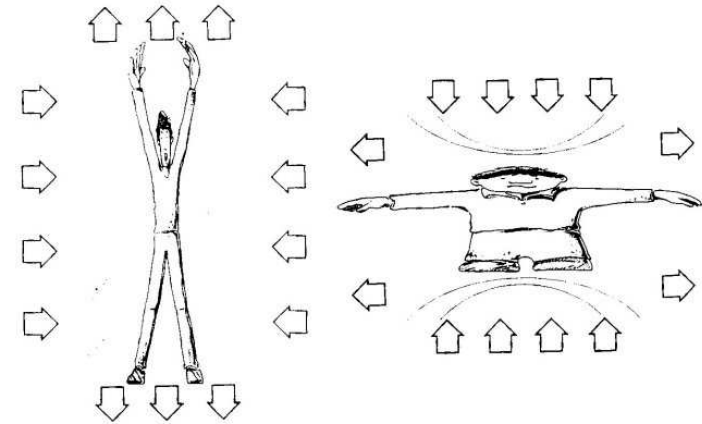
→ Ecuación de onda

(Fin del intermedio)

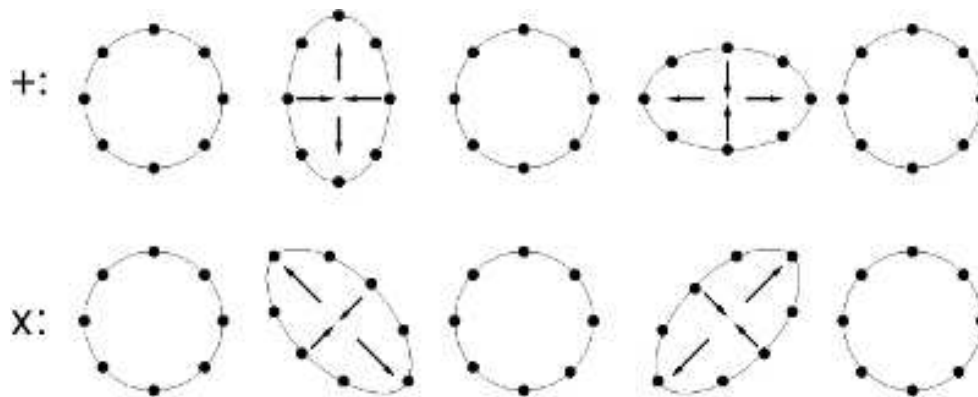
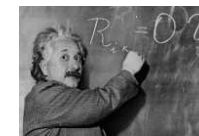
■ Efecto al pasar:



■ Efecto al pasar:



■ Onda con 2 polarizaciones de espín 2



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

$$C_R = \frac{1}{\sqrt{2}}(c_+ + ic_x)$$

$$C_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(c_+ - ic_x)$$

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

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

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

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

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

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