

# Astrofísica de Altas Energías

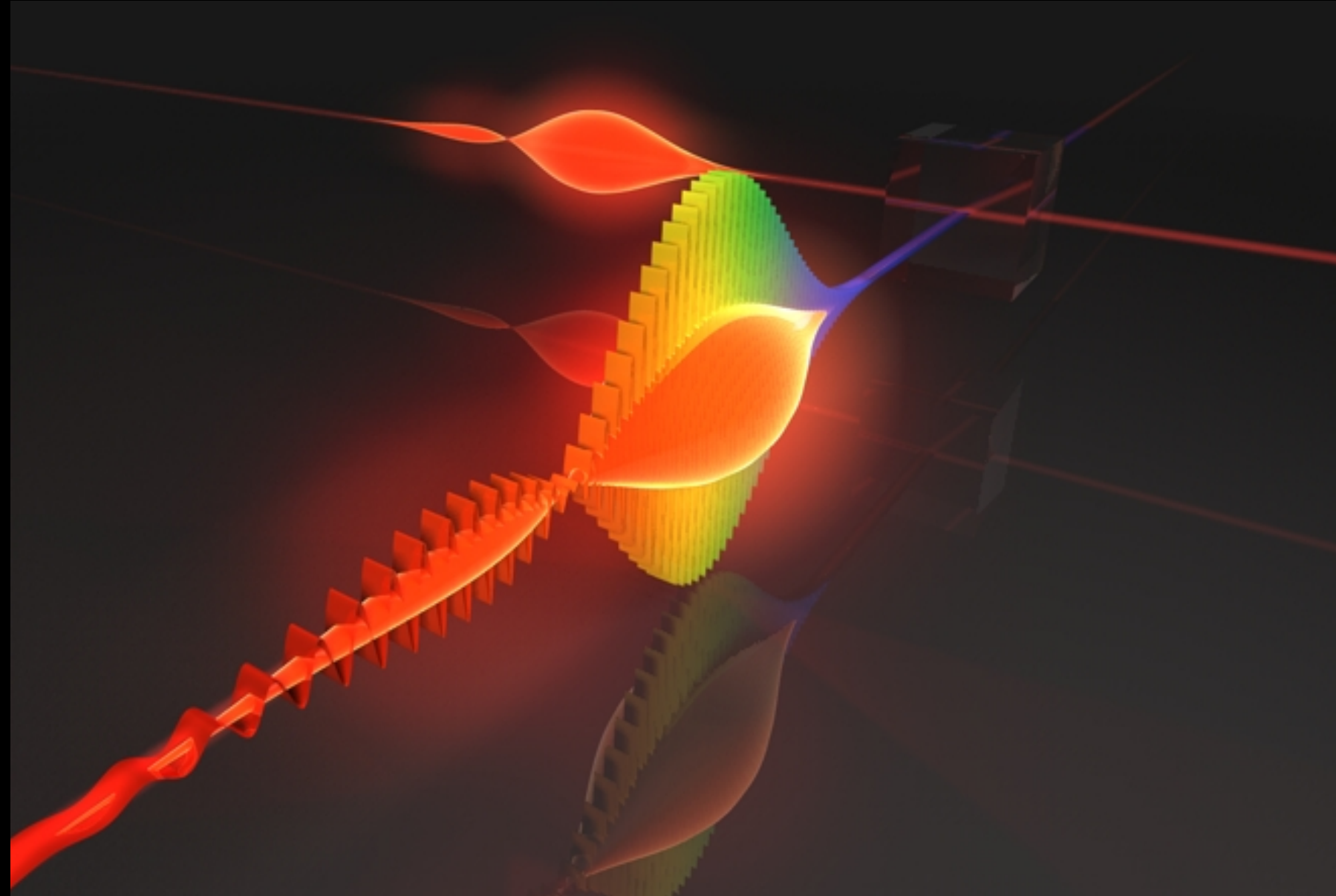
## 6. Ondas gravitacionales

Alberto Carramiñana

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica  
Luis Enrique Erro 1, Tonantzintla, Puebla, México



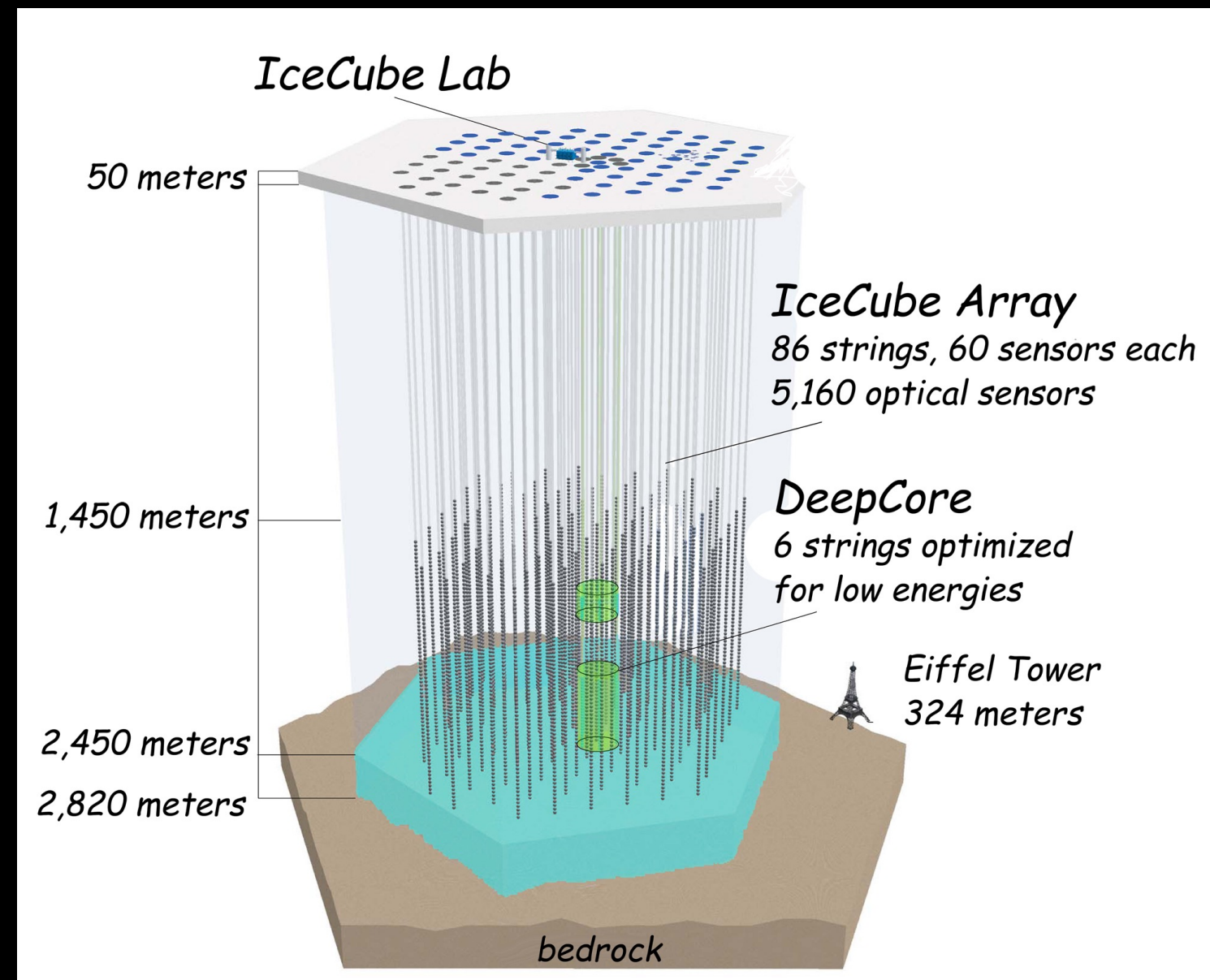
## Luz y ondas electromagnéticas



## Partículas cósmicas



## Neutrinos



## Ondas gravitacionales





# Ondas gravitacionales

The background features a stylized illustration of gravitational waves. It consists of concentric, swirling bands of light blue and dark blue, creating a sense of depth and movement. In the center of the waves, two bright yellow spheres are depicted, representing celestial bodies like black holes or neutron stars that are the source of the waves. The overall aesthetic is scientific and artistic.

1. Ondas gravitacionales
2. Detectores de ondas gravitacionales
3. Observaciones de ondas gravitacionales (\*)
4. Futuros detectores



# Ondas gravitacionales

## 1. Ondas gravitacionales



• Tipos de ondas gravitacionales

• Observaciones de ondas gravitacionales

• Futuros detectores



# Relatividad - unas referencias

- ▶ “El origen y desarrollo de la relatividad”, José Manuel Sánchez Ron, 1983.
- ▶ “Black holes & time warps”, Kip Thorne, 1994.
- ▶ Relatividad especial: Jackson, Rybicki & Lightman, Shu, etc...
- ★ “Gravitation and cosmology: principles and applications”, Stephen Weinberg, 1972.
- ★ “Spacetime and geometry”, Sean Carroll, 2004.



# 1. Relatividad especial - postulados

- ▶ La relatividad especial se basa en dos postulados:
  1. Las leyes de la física tienen misma forma en todo marco de referencia inercial.
  2. La velocidad de la luz es constante e independiente del marco de referencia.  
 $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$  exactamente.
- ▶ Al definir un **evento** por sus cuatro coordenadas  $x^\alpha$ , con índices  $\alpha \in \{0, 1, 2, 3\}$ ,

$$x^0 = ct, \quad x^1 = x, \quad x^2 = y, \quad x^3 = z \quad \Rightarrow \quad x^\alpha = \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}, = \begin{pmatrix} ct \\ \vec{r} \end{pmatrix},$$

los dos postulados conducen a la definición del intervalo entre eventos,

$$ds^2 \equiv -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (1)$$

y el requerimiento de su invariancia ante transformaciones de coordenadas.



# 1. Relatividad especial - transformaciones

- ▶ Las transformaciones de coordenadas que preservan la forma del intervalo,

$$ds' = ds,$$

son las transformaciones de Lorentz:

- traslaciones: cambio del origen del sistema de coordenadas;
- rotaciones: re-orientación de los ejes con ángulos fijos;
- inversiones espaciales y temporales;
- desplazamientos a velocidad constante (*boosts*),

$$x' = \gamma (x - vt), \quad t' = \gamma (t - vx/c^2), \quad (2)$$

con

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3)$$



# 1. Relatividad especial - tensor de Minkowski

- ▶ El intervalo entre eventos (ec. 1), invariante ante transformaciones de Lorentz, se puede expresar como,

$$ds^2 = \eta_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta. \quad (4)$$

al definir el **tensor de Minkowski**<sup>1</sup>,

$$\eta_{\alpha\beta} \equiv \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{pmatrix} = \text{diag}(-1, +1, +1, +1), \quad (5)$$

- La luz y demás formas de radiación electromagnética cumplen  $ds^2 = 0$ .
- Eventos conectados causalmente cumplen  $ds^2 \leq 0$ .

---

<sup>1</sup>además de emplear la convención de sumatorias implícitas



# 1. Relatividad especial - vectores, tensores

- ▶ Las leyes de la física se enuncian de misma manera en todo marco de referencia inercial (primer postulado) mediante (cuadri)vectores y tensores.
- ▶ La relatividad maneja vectores descritos con cuatro componentes, mediante un índice  $\alpha \in \{0, 1, 2, 3\}$ , y tensores descritos con varios índices (dos o más).
- ▶ El espacio de vectores es un **espacio dual**, con vectores **covariantes** ( $A_\alpha$ ) y **contravariantes** ( $A^\alpha$ ) asociados entre sí.
  - Dada una transformación de coordenadas,  $\partial x'^\alpha / \partial x^\beta$ , vectores **contravariantes**,  $A^\alpha$ , y **covariantes**,  $A_\alpha$ , se transforman de acuerdo a,

$$A'^\alpha = \frac{\partial x'^\alpha}{\partial x^\beta} A^\beta, \quad A'_\alpha = \frac{\partial x^\alpha}{\partial x'^\beta} A_\beta. \quad (6)$$

- Los dos tipos de vectores se relacionan a través del tensor de Minkowski,

$$A_\alpha = \eta_{\alpha\beta} A^\beta. \quad (7)$$



# 1. Relatividad especial - vectores, tensores

- ▶ Se define el producto escalar entre vectores<sup>2</sup>,

$$A_{\alpha}B^{\alpha} = A_0B^0 + A_1B^1 + A_2B^2 + A_3B^3,$$

y, de ahí, la norma de un cuadrivector,  $A_{\alpha}A^{\alpha}$ .

- ▶ El concepto de vector se generaliza al de tensor:
  - un escalar es un tensor de rango 0. La norma de un 4-vector es un escalar.
  - un vector es un tensor de rango 1, y se transforma de acuerdo a las reglas (6).
  - un tensor de rango 2 se representa con una matriz de  $4 \times 4$ . Hay contravariante, transformándose de acuerdo a,

$$F'^{\alpha\beta} = \frac{\partial x'^{\alpha}}{\partial x^{\gamma}} \frac{\partial x'^{\beta}}{\partial x^{\delta}} F'^{\gamma\delta}, \quad (8)$$

covariantes ( $F_{\alpha\beta}$ ) y mixtos ( $F^{\alpha}_{\beta}$ ,  $F_{\alpha}^{\beta}$ ), de acuerdo a las reglas de transformación respectivas.

---

<sup>2</sup>Sumatoria entre índices y superíndices repetidos.



# 1. Relatividad especial - leyes de la física; mecánica

- ▶ Las leyes de la física se pueden enunciar definiendo el **tiempo propio**,

$$d\tau = \frac{1}{c} \sqrt{-ds^2} = \sqrt{dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)/c^2}. \quad (9)$$

- ▶ El **movimiento inercial** sigue de definir 4-velocidad y 4-aceleración,

$$u^\alpha = \frac{dx^\alpha}{d\tau}, \quad a^\alpha = \frac{du^\alpha}{d\tau}. \quad (10)$$

- Un movimiento inercial cumple  $a^\alpha = 0 \Rightarrow u^\alpha$  constante.
- ▶ Al definir el 4-vector de energía-momento, que satisface la relación de invariancia,

$$p^\alpha = mu^\alpha \quad \Rightarrow \quad p^\alpha p_\alpha = -E^2/c^2 + p^2 = -m^2 c^2, \quad (11)$$

se pueden generalizar las ecuaciones de movimiento, definiendo la 4-fuerza,

$$\mathcal{F}^\alpha \equiv \frac{dp^\alpha}{d\tau}. \quad (12)$$



# 1. Relatividad especial - leyes de la física; electrodinámica

- ▶ El operador de derivación parcial (covariante),

$$\partial_\alpha = \frac{\partial}{\partial x^\alpha} = \left( \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right), \quad (13)$$

permite enunciar la conservación de la carga eléctrica,

$$j^\alpha = \begin{pmatrix} \rho c \\ \vec{j} \end{pmatrix} \Rightarrow \partial_\alpha j^\alpha = 0. \quad (14)$$

- ▶ El tensor (antisimétrico) de campo electromagnético se define combinando el operador  $\partial_\alpha$  con el 4-vector que combina los potenciales escalar,  $\phi$ , y vectorial  $\vec{A}$ ,

$$A^\alpha = \begin{pmatrix} \phi \\ \vec{A} \end{pmatrix}, \quad F^{\alpha\beta} = \partial^\alpha A^\beta - \partial^\beta A^\alpha. \quad (15)$$

- ▶ De donde las ecuaciones de Maxwell, escritas en forma covariante,

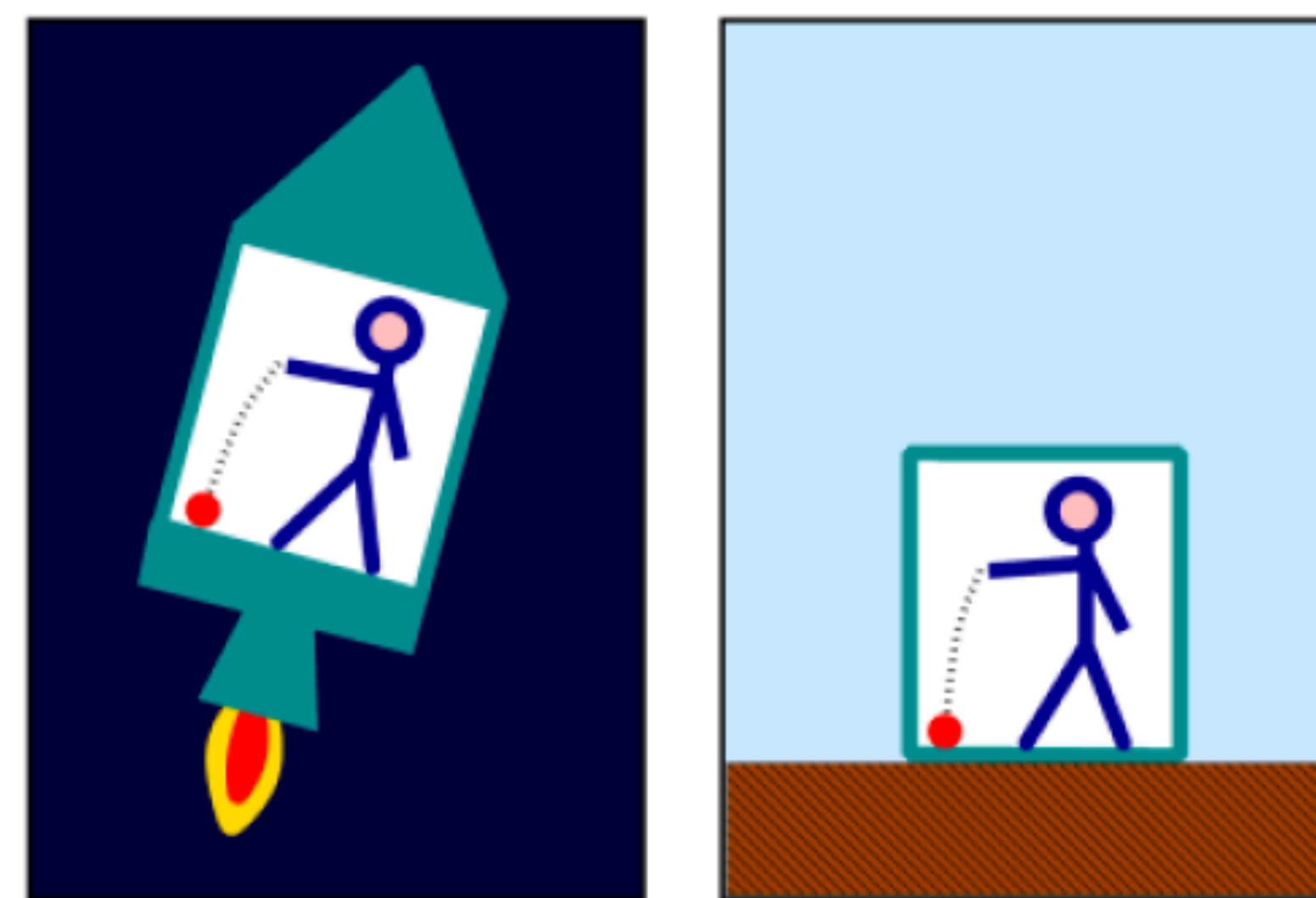
$$\partial_\beta F^{\alpha\beta} = \frac{4\pi}{c} j^\alpha, \quad \partial_\gamma F^{\alpha\beta} + \partial^\alpha F^{\beta\gamma} + \partial^\beta F^{\gamma\alpha} = F^{[\alpha\beta,\gamma]} = 0. \quad (16)$$



## 2. El principio de equivalencia

El **principio de equivalencia** permite describir la gravedad: la proporcionalidad entre **masa inercial** y **masa gravitacional** indica la equivalencia (local) entre un campo gravitacional y un marco de referencia acelerado.

- **Weak EP**: las masas inercial y gravitacional son proporcionales  $\Rightarrow$  el movimiento de una masa en caída libre se describe de misma forma en un campo gravitacional que en un marco de referencia acelerado.
- **Einstein EP**: en regiones pequeñas del espacio-tiempo, las leyes de la física se reducen a las de la relatividad especial. No es posible distinguir **localmente** la presencia de un campo gravitacional de una aceleración.



Markus Pössel @ wikipedia



## 2. El principio de equivalencia

- ▶ El principio de equivalencia permite inferir el **corrimiento al rojo gravitacional**,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta v}{c} = \frac{gh}{c} \longrightarrow \frac{\Delta\Phi}{c^2}, \quad (22)$$

con  $\Delta\Phi$  el cambio en el potencial gravitacional.

- ▶ La relatividad generaliza el tensor de Minkowski al tensor métrico,  $g_{\mu\nu}$  función de las coordenadas  $x_\alpha$ , de forma que los intervalos no son fijos y su medición es local,

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (23)$$

- En el caso de campos gravitacionales *pequeños*, se puede aproximar,

$$g_{\alpha\beta} \simeq \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}, \quad |h_{\alpha\beta}| \ll 1.$$

- En el límite de un potencial gravitacional Newtoniano,  $\phi$ , se tiene

$$h_{00} \simeq -2\phi/c^2 \rightarrow 2GM/r c^2.$$



### 3. Espacios curvos - trayectorias geodésicas

- ▶ Dada una métrica  $g_{\mu\nu}$ , una partícula en el campo gravitacional sigue una trayectoria **geodésica**  $x^\mu(\lambda)$ , dada por los principios de equivalencia y mínima acción,

$$\frac{d^2 x^\alpha}{d\lambda^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda} = 0. \quad (24)$$

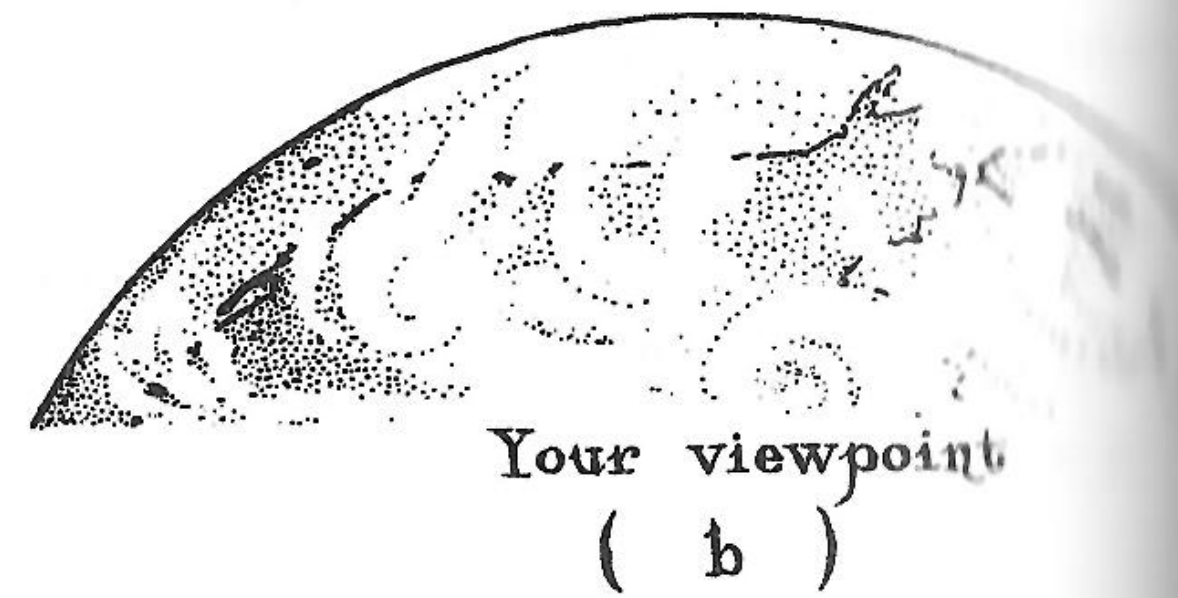
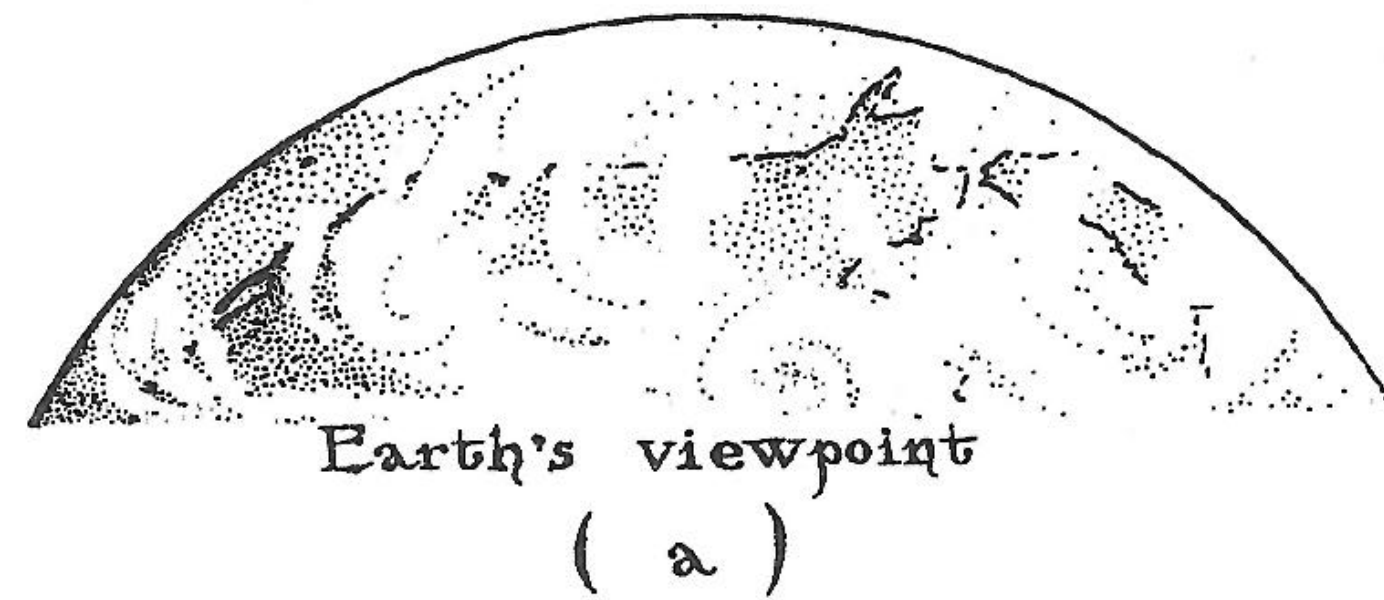
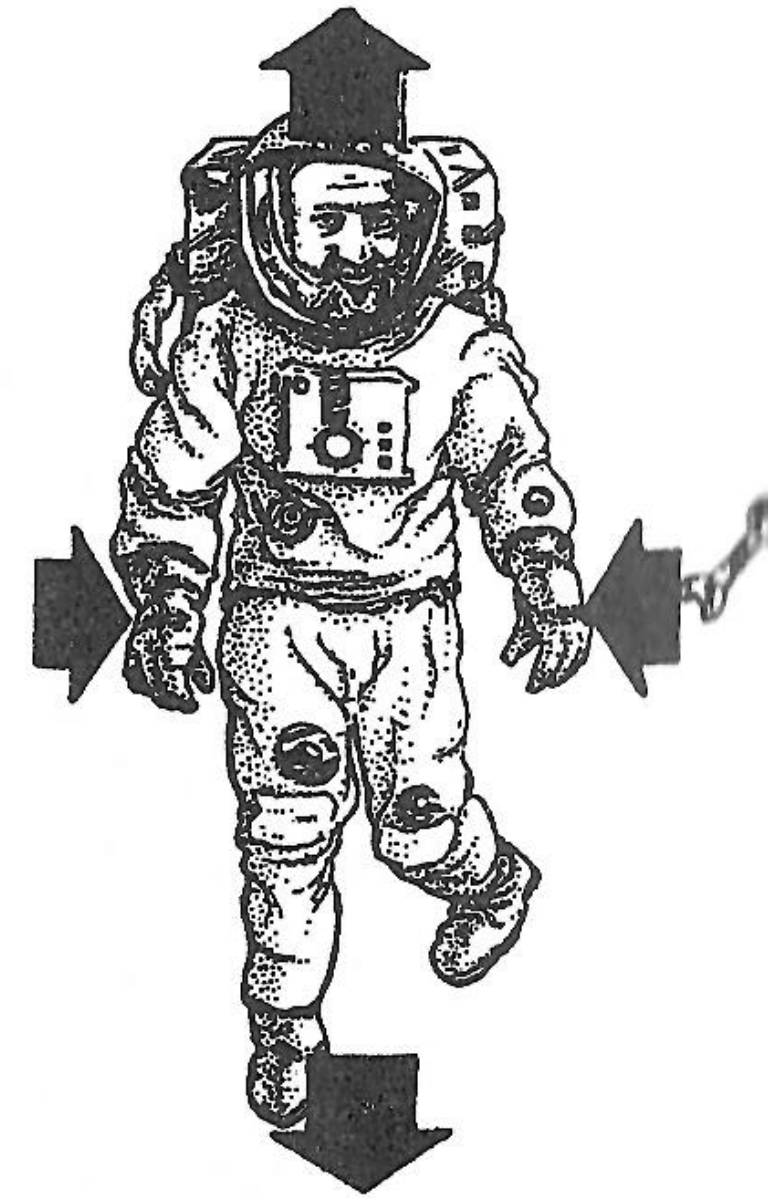
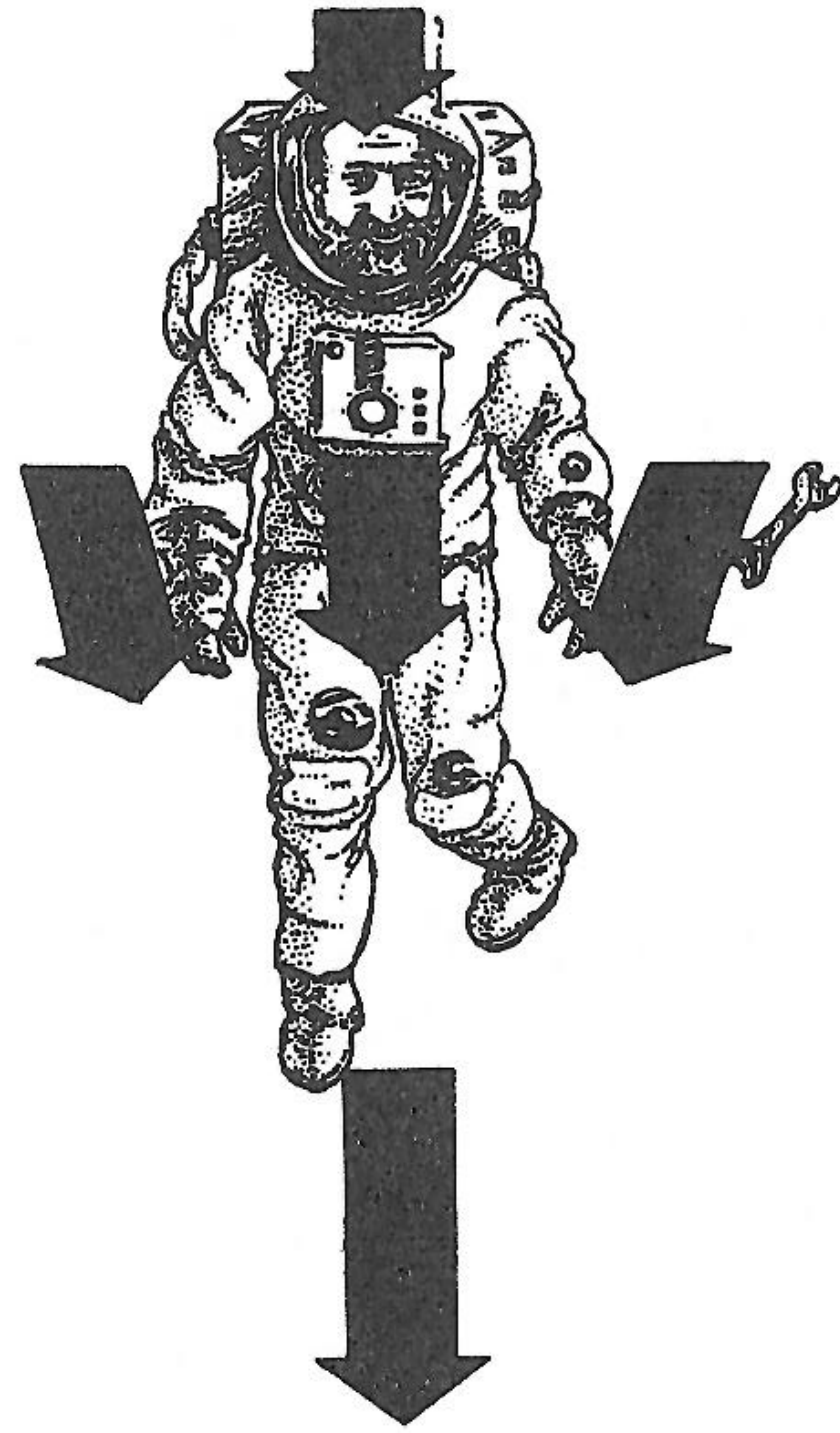
donde  $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$  son combinaciones de primeras derivadas parciales del tensor métrico,

$$\Gamma_{\mu\nu}^\alpha = \frac{1}{2} g^{\alpha\sigma} (\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\sigma\mu} - \partial_\sigma g_{\mu\nu}). \quad (25)$$

- ▶ La presencia de marcos de referencia **localmente inerciales** requiere extender la relatividad a espacios curvos.



2.3 As you fall toward Earth, tidal gravitational forces stretch you from head to foot and squeeze you from the sides.





### 3. Espacios curvos - tensor de curvatura

- ▶ Para describir la curvatura del espacio se requiere definir el tensor de Riemann, o tensor de curvatura<sup>3</sup>,

$$R^{\rho}_{\sigma\mu\nu} = \partial_{\mu}\Gamma^{\rho}_{\nu\sigma} - \partial_{\nu}\Gamma^{\rho}_{\mu\sigma} + \Gamma^{\rho}_{\mu\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\sigma} - \Gamma^{\rho}_{\nu\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\mu\sigma}.$$

- ▶ El tensor de Riemann se contrae al tensor de Ricci<sup>4</sup>,

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}_{\mu\lambda\nu} = \partial_{\rho}\Gamma^{\rho}_{\nu\mu} - \partial_{\nu}\Gamma^{\rho}_{\rho\mu} + \Gamma^{\rho}_{\rho\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\mu} - \Gamma^{\rho}_{\nu\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\rho\mu},$$

que, a su vez, se contrae al escalar de Ricci,

$$R = R^{\mu}_{\mu} = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}.$$

- ▶ El tensor de Riemann define completamente las propiedades del espacio-tiempo y, junto con una descripción de la distribución de energía y momento, permite formular la ecuación de Einstein.

<sup>3</sup>de 256 componentes, de las cuales 20 son independientes.

<sup>4</sup>y también al tensor de Weyl, pero aquí ya no viene al caso...



## 4. Ecuación de Einstein - la ecuación

- ▶ La ecuación de Einstein permite calcular el tensor métrico a partir de una descripción de la distribución espacial de la materia y energía que originan el campo gravitacional.
- ▶ La distribución de materia y energía se describe con el tensor de energía-momento,

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p) u_{\mu} u_{\nu} + p g_{\mu\nu}, \quad (26)$$

siendo  $\rho$  la densidad y  $p$  la presión (unidades  $c = 1$ ).

- La conservación de energía ( $\nu = 0$ ) y momento (1, 2, 3) se expresa como,

$$\partial_{\mu} T^{\mu\nu} = 0.$$

- ▶ La métrica se calcula de la ecuación de Einstein<sup>5</sup>,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}, \quad (27)$$

- ▶ La ecuación (27) tiende a la de Poisson,  $\nabla^2 \phi = -4\pi G \rho$ , en el límite newtoniano.

---

<sup>5</sup>aquí sin constante cosmológica.



## Una soluci3n: la m3trica de Schwarzschild

- Comunicada a Einstein por Schwarzschild en diciembre de 1915. Se expresa como,

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2. \quad (31)$$

con  $r_s = 2GM/c^2$ ,  $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2$ .

- Las trayectorias  $x^\mu(\lambda)$  quedan definidas por las cuatro ecuaciones geod3sicas (27), determinadas por los s3mbolos de Christoffel,  $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$  (ec. 28).

De las ecuaciones geod3sicas se obtienen ecuaciones de conservaci3n y las trayectorias para fotones y part3culas con masa.



## 5. Ondas gravitacionales - gravedad linealizada

- ▶ Las ondas gravitacionales pueden describirse de forma lineal cuando se dan como perturbaciones pequeñas de la métrica, con la aproximación,

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1.$$

- ▶ En el vacío  $T_{\mu\nu} = 0$  y la ecuación de Einstein equivale a

$$\square h_{\mu\nu}^{TT} = 0, \tag{41}$$

con  $\square \approx \eta^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu$ .

- ▶ El tensor  $h_{\mu\nu}^{TT}$  es una variante del tensor de deformaciones,  $h_{\mu\nu}$ , construido con traza nula y componentes temporales nulas ( $h_{0\nu}^{TT} = h_{\nu 0}^{TT} = 0$ ).
- ▶ La ecuación de onda (41) tiene soluciones armónicas,

$$h_{\mu\nu}^{TT} = C_{\mu\nu} e^{ik_\sigma x^\sigma}, \tag{42}$$

que cumplen la relación de dispersión,  $k_\mu k^\mu = 0$ , y de ortogonalidad,  $k_\mu C^{\mu\nu} = 0$ .



## 5. Ondas gravitacionales - propagación en el vacío

- ▶ Tomando el eje  $z$  con el de propagación de la onda tenemos

$$k^\mu = (\omega, 0, 0, \omega), \quad C_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (43)$$

- ▶ El efecto del paso de la onda gravitacional se puede describir con el vector  $S^\mu$  que mide la separación entre partículas,  $S^1 \rightarrow \Delta x$ ,  $S^2 \rightarrow \Delta y$ .
- ▶ De la ecuación geodésica (24) se obtiene,

$$\frac{\partial^2 S^\mu}{\partial t^2} = \frac{1}{2} S^\sigma \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( h_\sigma^\mu{}^{TT} \right) = \frac{1}{2} S^\sigma \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( C_\sigma^\mu e^{ik_\alpha x^\alpha} \right).$$



## 5. Ondas gravitacionales - deformaciones

- ▶ para  $h_{\times} = 0$ ,

$$\frac{\partial^2 S^1}{\partial t^2} = \frac{S^1}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( h_+ e^{ik_{\alpha} x^{\alpha}} \right), \quad \frac{\partial^2 S^2}{\partial t^2} = -\frac{S^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( h_+ e^{ik_{\alpha} x^{\alpha}} \right).$$

La solución describe dos modos de polarización lineal (+).

$$S^1 = \left( 1 + \frac{h_+}{2} e^{ik_{\sigma} x^{\sigma}} \right) S^1(0), \quad S^2 = \left( 1 - \frac{h_+}{2} e^{ik_{\sigma} x^{\sigma}} \right) S^2(0).$$

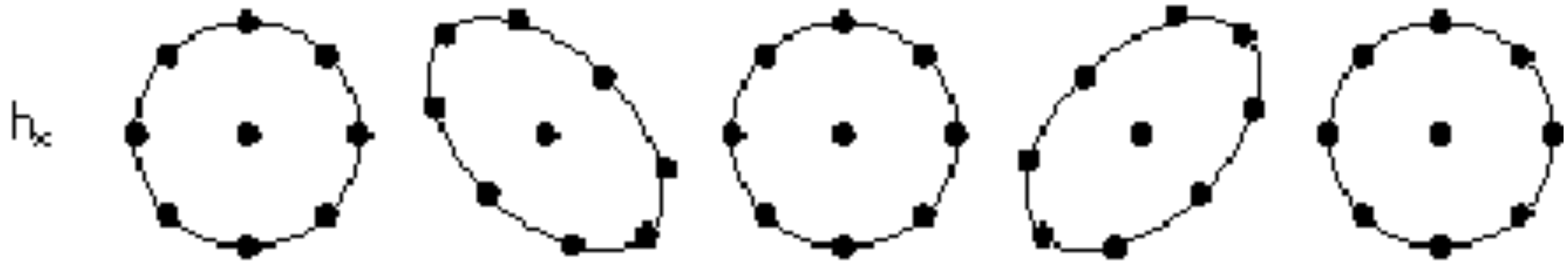
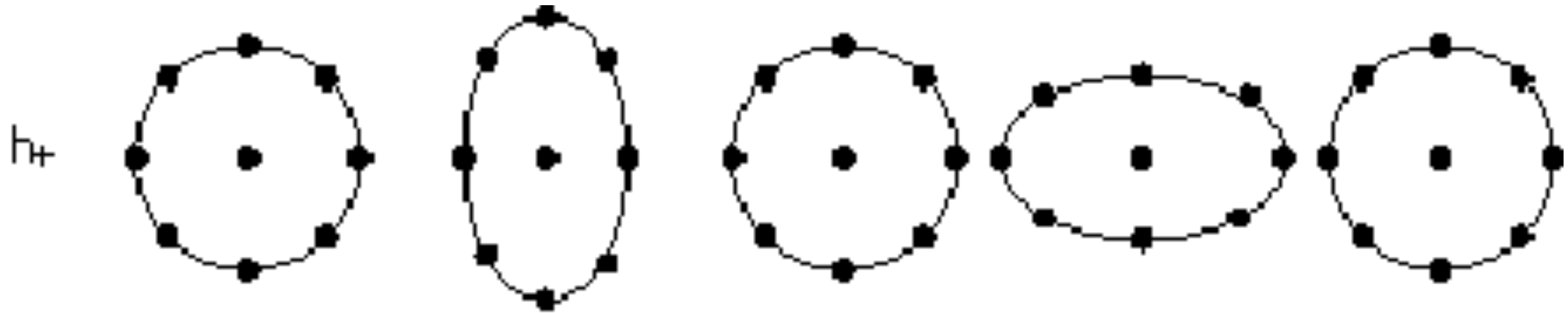
- ▶ para  $h_+ = 0$  se obtienen otros dos modos ( $\times$ ) de polarización lineal,

$$S^1 = S^1(0) + \frac{h_{\times}}{2} e^{ik_{\alpha} x^{\alpha}} S^2(0), \quad S^2 = S^2(0) + \frac{h_{\times}}{2} e^{ik_{\alpha} x^{\alpha}} S^1(0).$$

- ▶ Los modos lineales son ortogonales y equivalentes a modos circulares derecho e izquierdo,

$$h_R = (h_+ + ih_{\times}) / \sqrt{2}, \quad h_L = (h_+ - ih_{\times}) / \sqrt{2}.$$





Phase

0

$\pi/2$

$\pi$

$3\pi/2$

$2\pi$



## 5. Ondas gravitacionales - generación, 1

- ▶ La amplitud de la onda gravitacional depende de la fuente y su distancia.
- ▶ Para estudiar la ecuación de Einstein con fuentes se emplea una versión distinta del tensor de deformación que, por construcción, satisface la norma de Lorenz,

$$\tilde{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - (h/2)\eta_{\mu\nu} \quad \Rightarrow \quad \partial_\mu \tilde{h}^{\mu\nu} = 0,$$

- La ecuación de Einstein queda como

$$\square \tilde{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}. \quad (44)$$

- ▶ La solución se obtiene con una función de Green de potenciales retardados,

$$\tilde{h}_{\mu\nu}(t, \vec{x}) = 4G \int \frac{T_{\mu\nu}(t - |\vec{x} - \vec{x}'|, \vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} d^3x', \quad (45)$$

siendo  $t_r = t - |\vec{x} - \vec{x}'|$  el tiempo retardado ( $c = 1$ ).



## 5. Ondas gravitacionales - generación, 2

- ▶ Para describir la fuente que genera las ondas gravitacionales se emplea el tensor de energía y momento,  $T_{\mu\nu}$ .
- ▶ Para una distribución de masa y energía lejana, con movimientos internos no relativistas, aproximamos la transformada de Fourier de (45) como,

$$\tilde{h}_{\mu\nu}(\omega, \vec{x}) = \int \tilde{h}_{\mu\nu}(t, \vec{x}) e^{i\omega t} dt = 4G \left( \frac{e^{i\omega r}}{r} \right) \int T_{\mu\nu}(\omega, \vec{x}') d^3x',$$

- ▶ El tensor de energía-momento se relaciona directamente con la distribución de masa,

$$\int T^{ij}(\omega, \vec{x}') d^3x' = -\frac{\omega^2}{2} \int x^{i'} x^{j'} T^{00} d^3x' = -\frac{\omega^2}{2} I_{ij}(\omega),$$

siendo  $I_{ij}$  el momento inercia (tensor 3D).



## 5. Ondas gravitacionales - generación, 3

- ▶ De la ecuación de Einstein (ec. 44),

$$\tilde{h}_{ij}(\omega, \vec{x}) = -2G \left( \frac{e^{i\omega r}}{r} \right) \omega^2 I_{ij}(\omega) \quad \Rightarrow \quad \tilde{h}_{ij}(t, \vec{x}) = \left( \frac{2G}{r} \right) \frac{d^2 I_{ij}}{dt^2}(t_r).$$

- ▶ La emisión de ondas gravitacionales requiere una distribución de masa con momento cuadrupolar dependiente del tiempo.
- ▶ Para un sistema de dimensiones  $R$ , comparables con su radio de Schwarzschild,  $R_s = 2GM/c^2$ , observado a una distancia  $r$ , esperamos observar una deformación  $h$  de frecuencia  $f = \omega/2\pi$ , de orden,

$$f \sim \frac{1}{2\pi} \left( \frac{GM}{R^3} \right)^{1/2} \sim \frac{c/R}{10} \left( \frac{R_s}{R} \right)^{1/2}, \quad h \sim \frac{2GMR^2\omega^2}{r} \sim \frac{R_s^2}{rR}. \quad (46)$$

- Para  $M \sim 3M_\odot$ ,  $r \sim 30\text{Mpc}$ ,  $R = 10R_s$  se tiene  $f \sim 100\text{ Hz}$ ,  $h \sim 10^{-21}$ .



## 5. Ondas gravitacionales - flujo de energía

- ▶ La cuantificación del flujo de energía de una onda gravitacional es indirecta. Para una onda propagándose sobre  $k_\mu = (-\omega, 0, 0, \omega)$ , se puede usar el tensor,

$$t_{\mu\nu} = \frac{\pi}{8G} f^2 (h_+^2 + h_\times^2) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

- ▶ Para la fusión de dos objetos compactos se espera

$$10^{-4} \text{ Hz} \lesssim f \lesssim 10^4 \text{ Hz}, \quad h \simeq 10^{-22} - 10^{-21},$$

de donde<sup>6</sup>,

$$-t_{0z} \sim 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \left( \frac{f}{\text{Hz}} \right)^2 \frac{(h_+^2 + h_\times^2)}{(10^{-21})^2}.$$

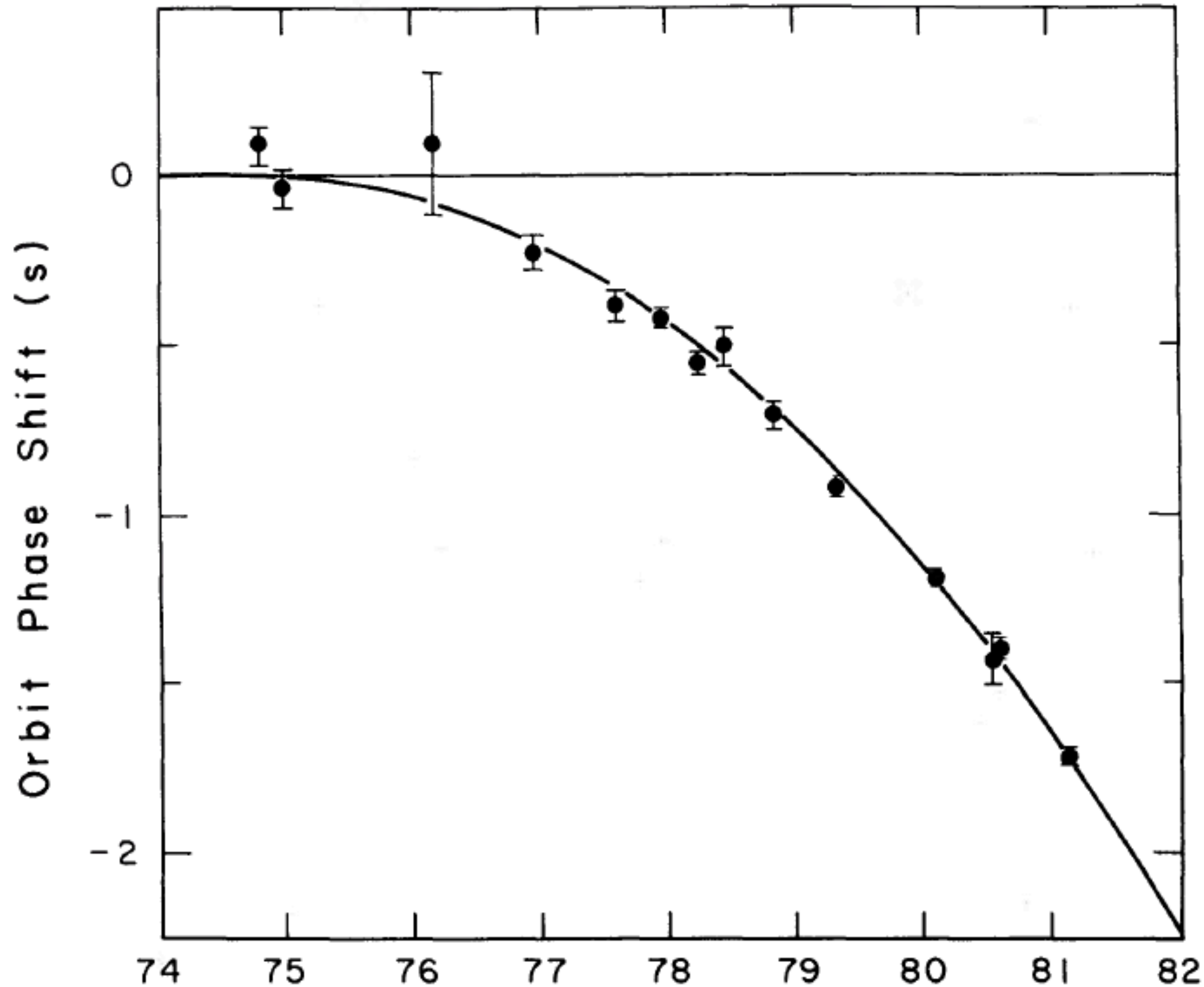
<sup>6</sup>incluyendo, al parecer, un factor  $c^3$ ...



# PSR 1913+16

- Evidencia indirecta de la emisión de ondas gravitacionales.
- Decaimiento de la órbita conforme con emisión cuadrupolar.

$$P(2\Omega) = \frac{32G}{5c^5} \Omega^6 I^2 e^2$$



Date PSR 1913+16 :: Taylor & Weisberg (1982)

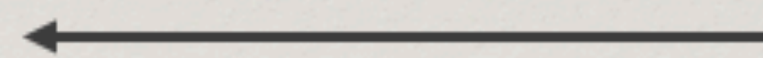


# Why did it take 100 years to detect GWs?

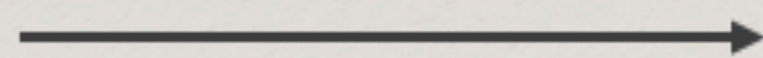
- Gravitational waves are weakly coupled
- **Loud** gravitational waves would change the distance between us and the next closest star (4.3 lightyears away) by the width of a human hair!



Earth



4.3 lightyears



Alpha Centauri



Daniel Holtz, SSI 2020



# Ondas gravitacionales

1. Ondas gravitacionales

2. Detectores de ondas gravitacionales

3. Observaciones de ondas gravitacionales

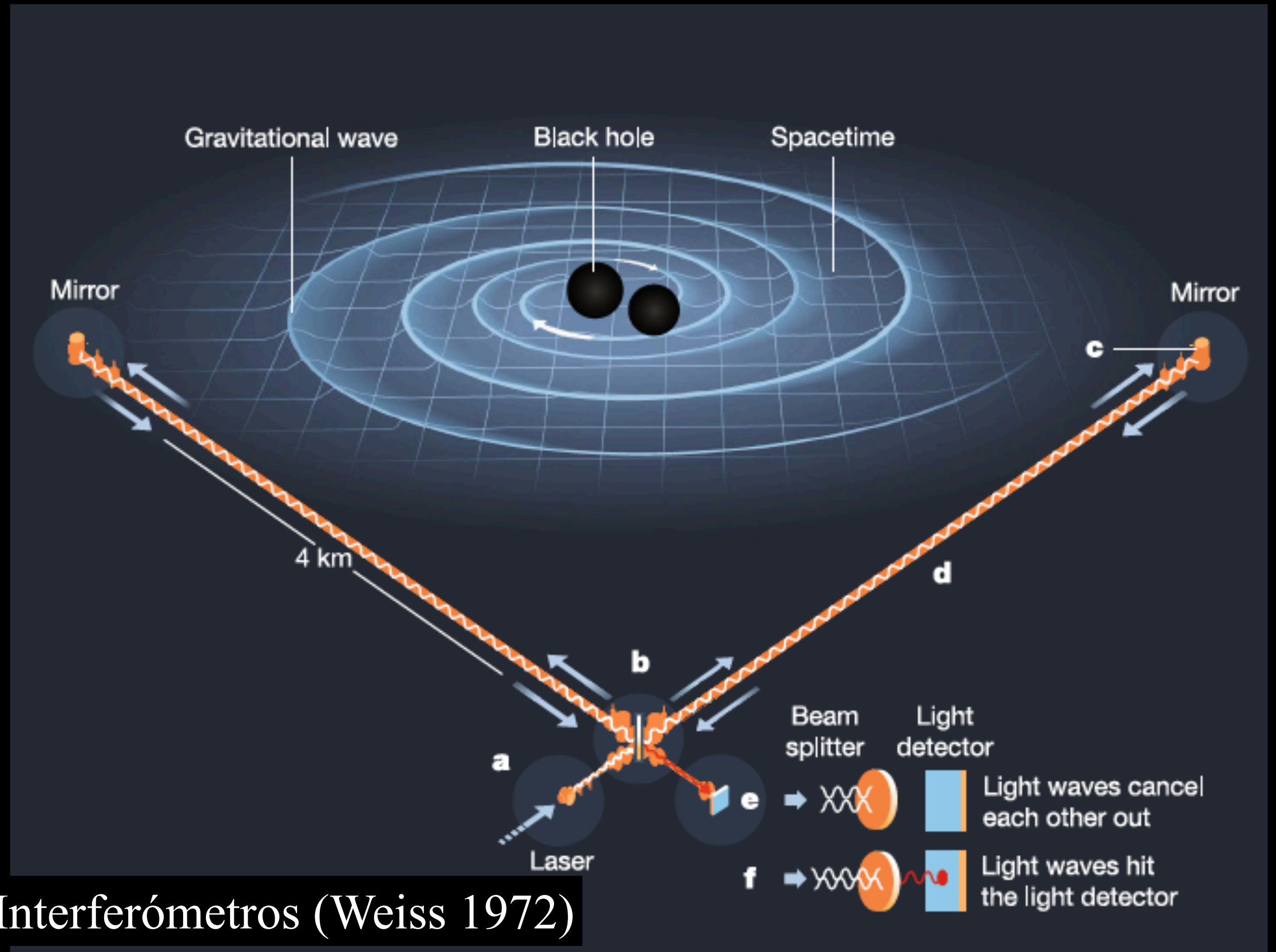
4. Futuros detectores



# Detectores de GW



Barras resonantes (Weber 1957, 1969)



Interferómetros (Weiss 1972)



Table I. Argonne National Laboratory and University of Maryland detector coincidences. Time resolution for the two 66-cm detectors is 0.4 sec. The 61- and 96-cm detectors are not coupled to a coincidence counter. Their threshold crossing time is not accurately known and this is taken into account in computing the frequency of accidental three- and four-detector coincidences.

DATE MONTH/DAY/YEAR	UNIVERSAL TIME	NUMBER OF TIMES PER DAY COINCIDENCE AMPLITUDE IS EXCEEDED		PERIOD PER ACCIDENTAL COINCIDENCE
		MARYLAND 66 CM DETECTOR	ARGONNE 66 CM DETECTOR	
12/30/68 <sup>a</sup>	1033	25	15	18 YEARS
1/1/69 <sup>b</sup>	0052	6	88	$8 \times 10^4$ YEARS
1/6/69 <sup>b</sup>	0025	110	4	230 YEARS
1/28/69	1546	24	5	720 DAYS
1/30/69	1656	1	5	48 YEARS
2/5/69 <sup>a</sup>	2221	30	30	7 YEARS
2/6/69	0447	150	4	144 DAYS
2/16/69	0130	20	72	$3 \times 10^4$ YEARS
2/16/69	0130.5	200	200	
2/16/69	0159	1	24	10 YEARS
2/21/69	0634	26	12	280 DAYS
2/23/69 <sup>a</sup>	1218	40	12	15 YEARS
3/4/69	0913	30	15	190 DAYS
3/15/69	0341	75	6	190 DAYS
3/20/69 <sup>a</sup>	1741 $\frac{1}{2}$	140	96	$7 \times 10^7$ YEARS
3/20/69 <sup>a</sup>	1744	60	125	
3/21/69 <sup>b</sup>	0311	48	2	$4 \times 10^4$ YEARS

<sup>a</sup>Triple coincidence.

<sup>b</sup>Quadruple coincidence.

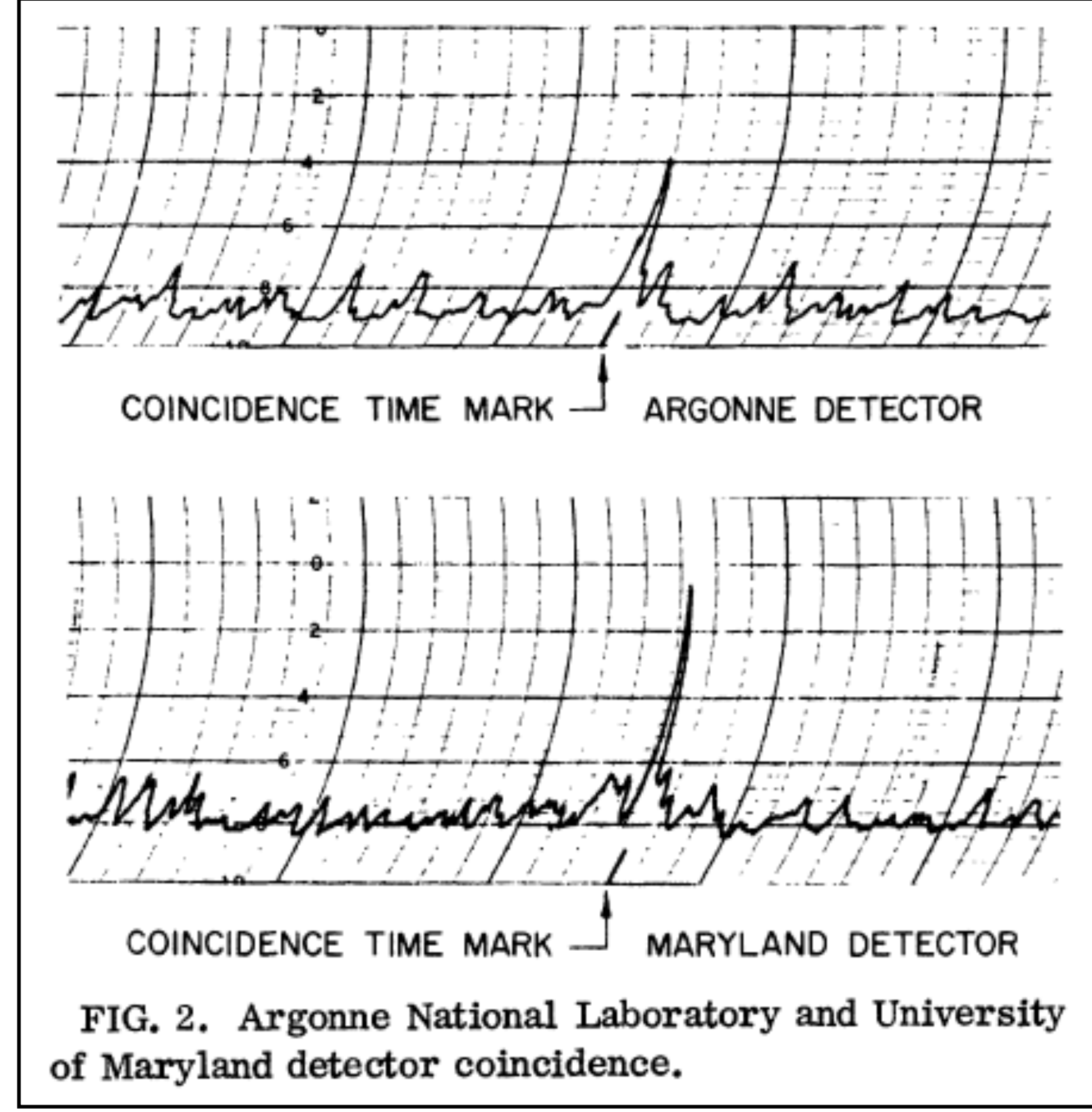
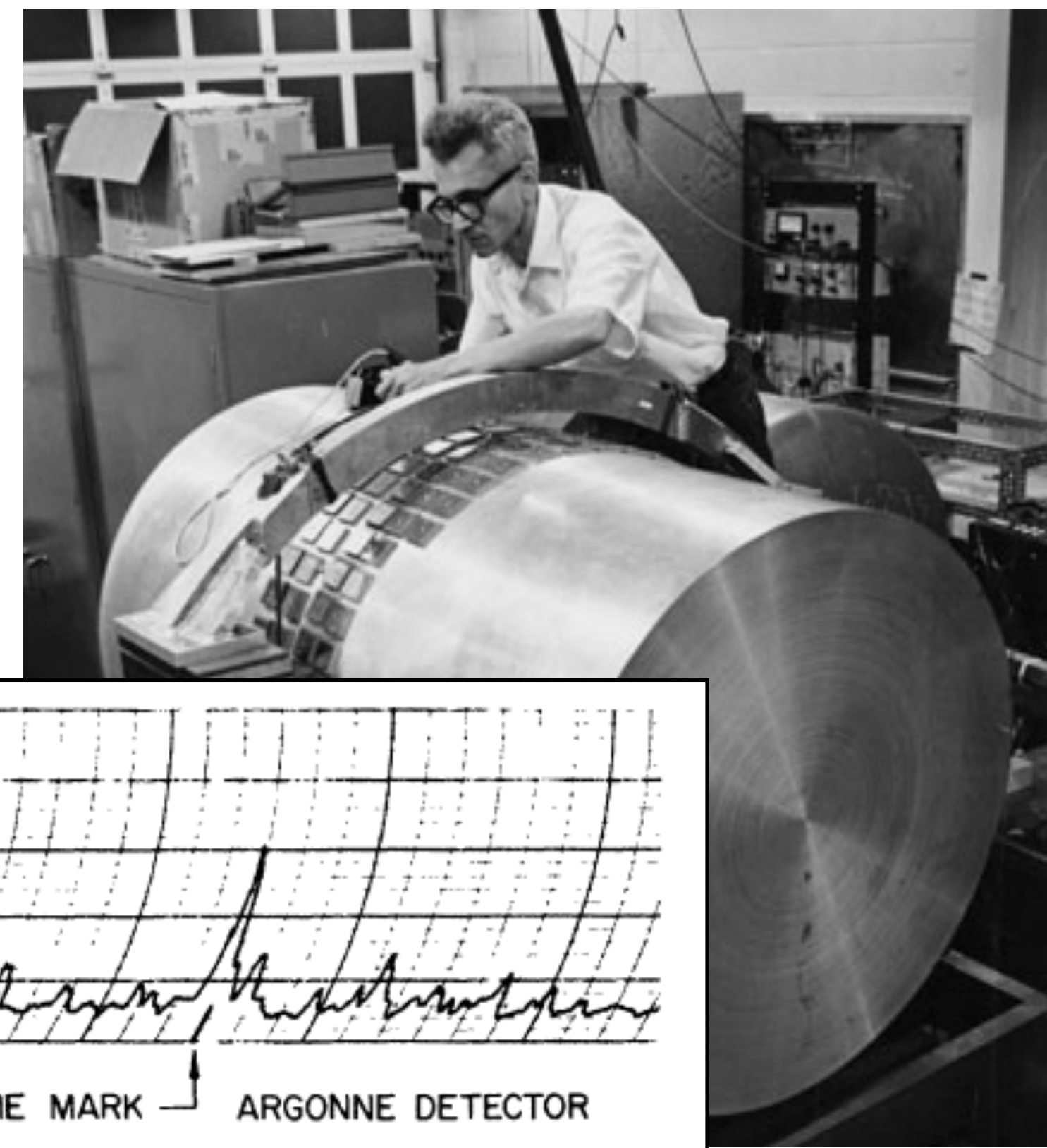


FIG. 2. Argonne National Laboratory and University of Maryland detector coincidence.



# Interferómetros

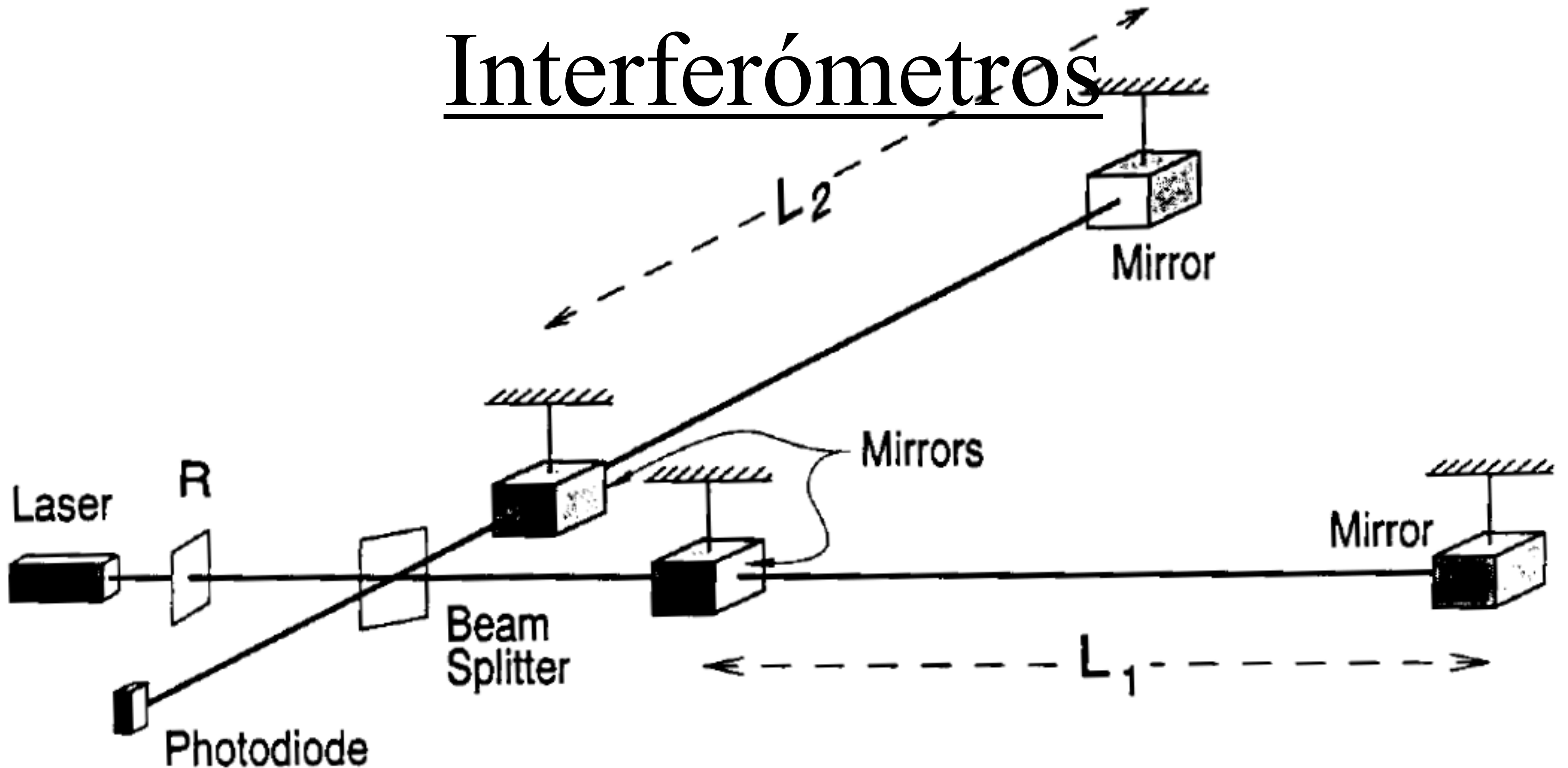


FIG. 2: Layout of an interferometer for detecting gravitational waves (from Ref. [4]).



## 5. Ondas gravitacionales - detección

- ▶ ¡El observatorio LIGO ha logrado la detección de ondas gravitacionales!
- ▶ Referencias relevantes: astro-ph/0110349; Nat 568, 469 (2019); arXiv 1304.0670 de LIGO...
- ▶ Un detector de ondas gravitacionales requiere medir

$$\delta L/L \sim h \longrightarrow \delta L \sim 10^{-16} \text{ cm} \left( \frac{h}{10^{-21}} \right) \left( \frac{L}{\text{km}} \right).$$

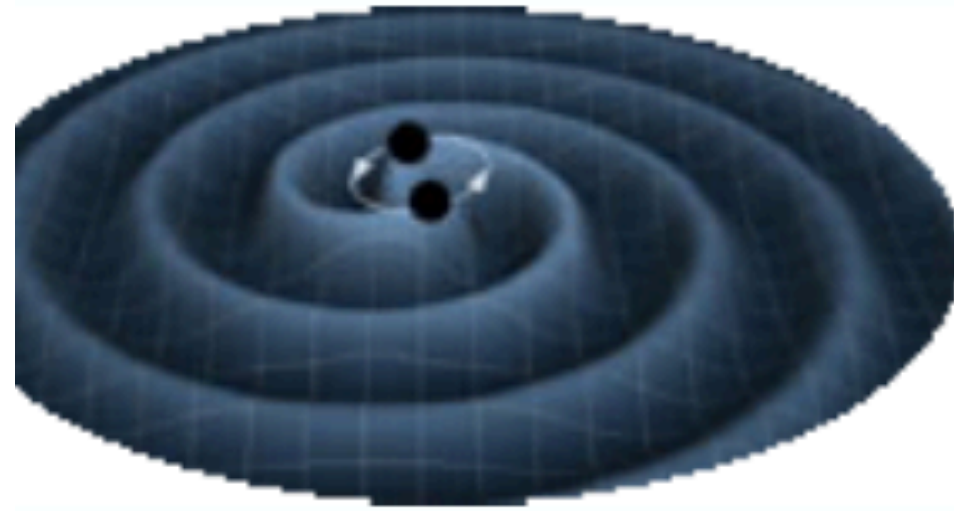
- ▶ Interferómetros trabajando en  $\lambda \sim 10^{-4}$  cm pueden medir, con 100 recorridos, un desplazamiento en fase,

$$\delta\phi \sim 200 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \delta L \sim 10^{-9}.$$

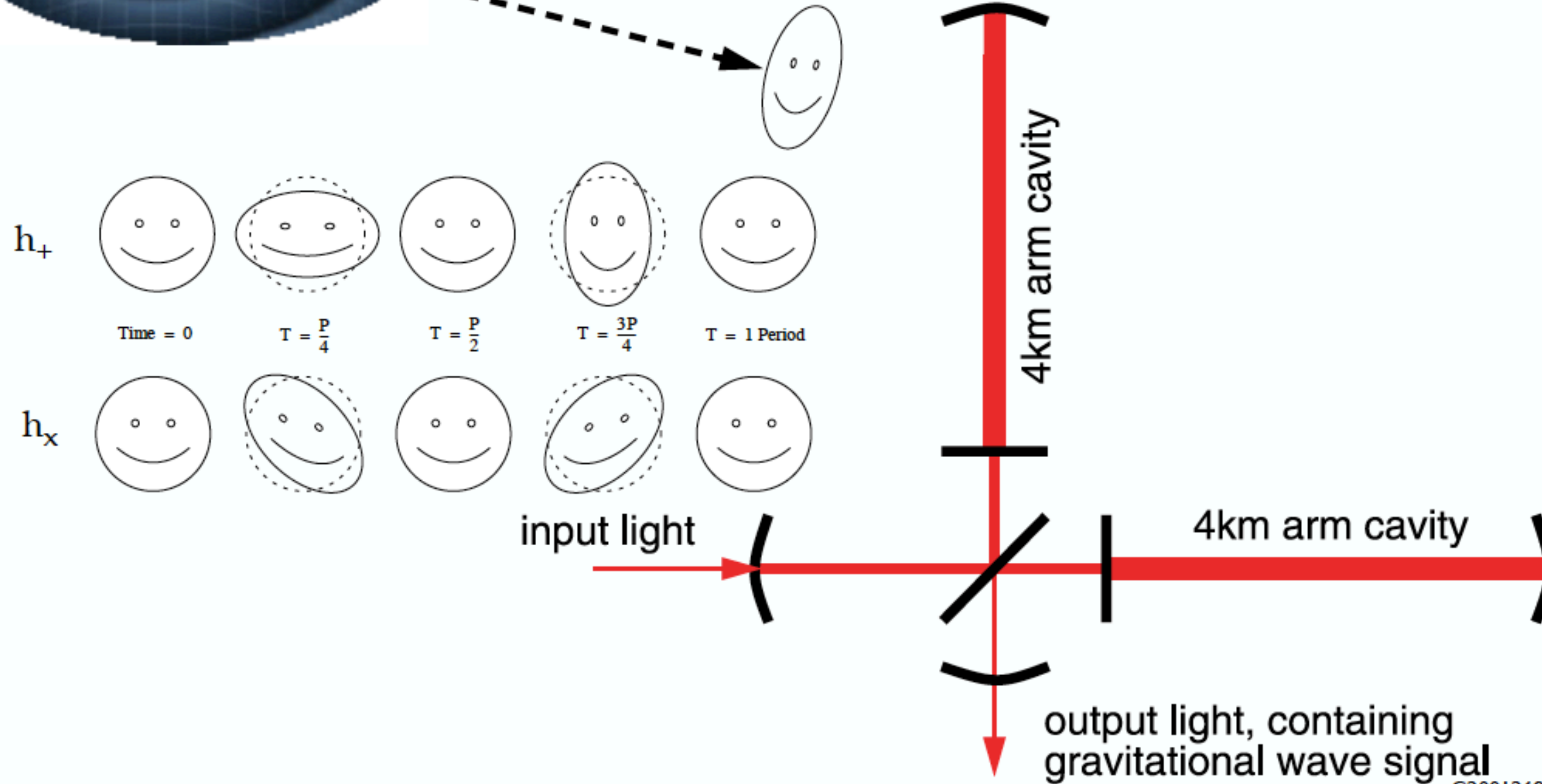
- ▶ La precisión mejora con  $N$  fotones de acuerdo a  $\delta\phi\sqrt{N} \sim 1 \Rightarrow N \sim 10^{18}$ .



# The LIGO concept



It's sort of like this, except spacetime is stretching, and the mirrors don't move.



G2001269 5

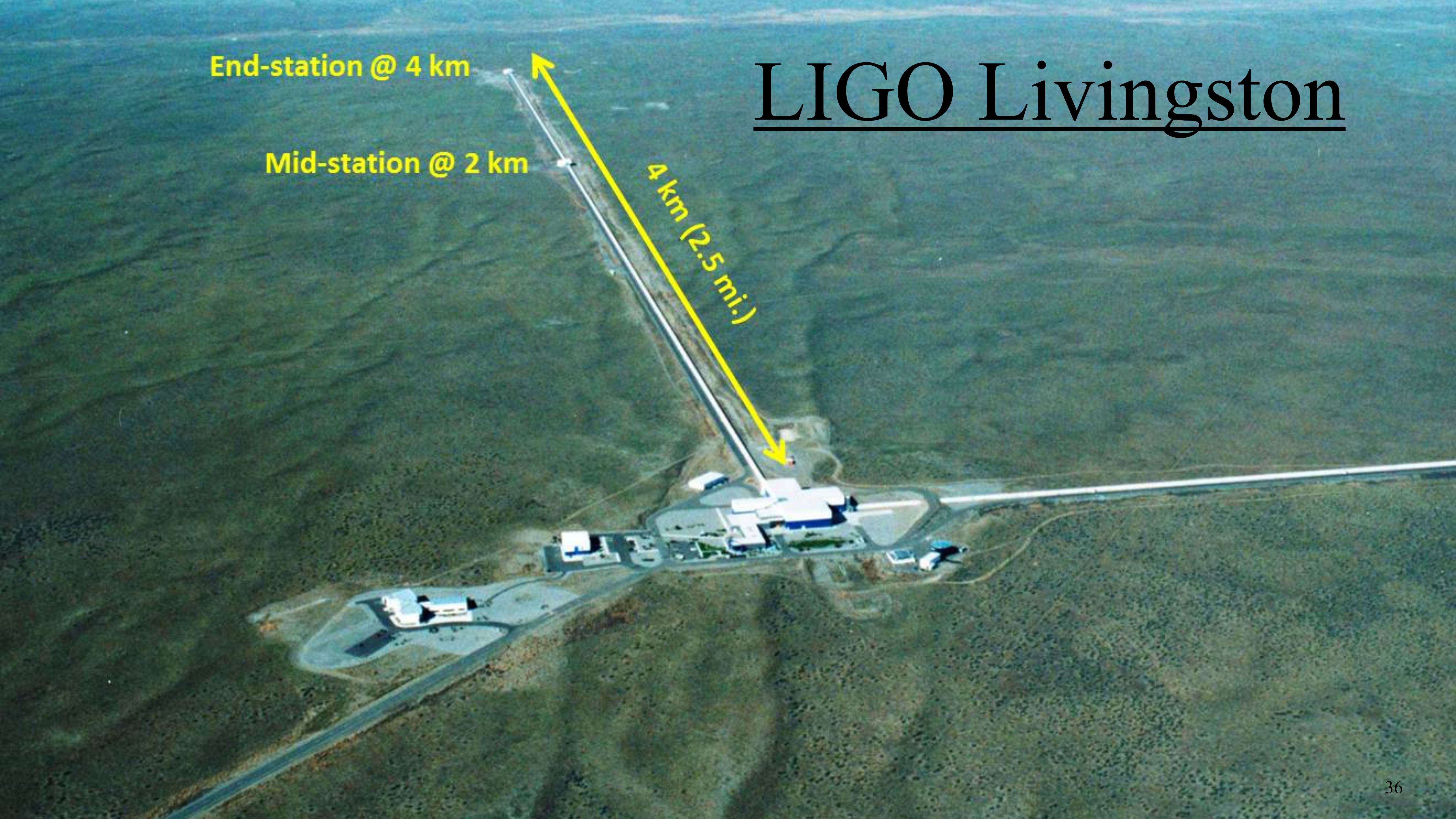


# LIGO Livingston

End-station @ 4 km

Mid-station @ 2 km

4 km (2.5 mi.)

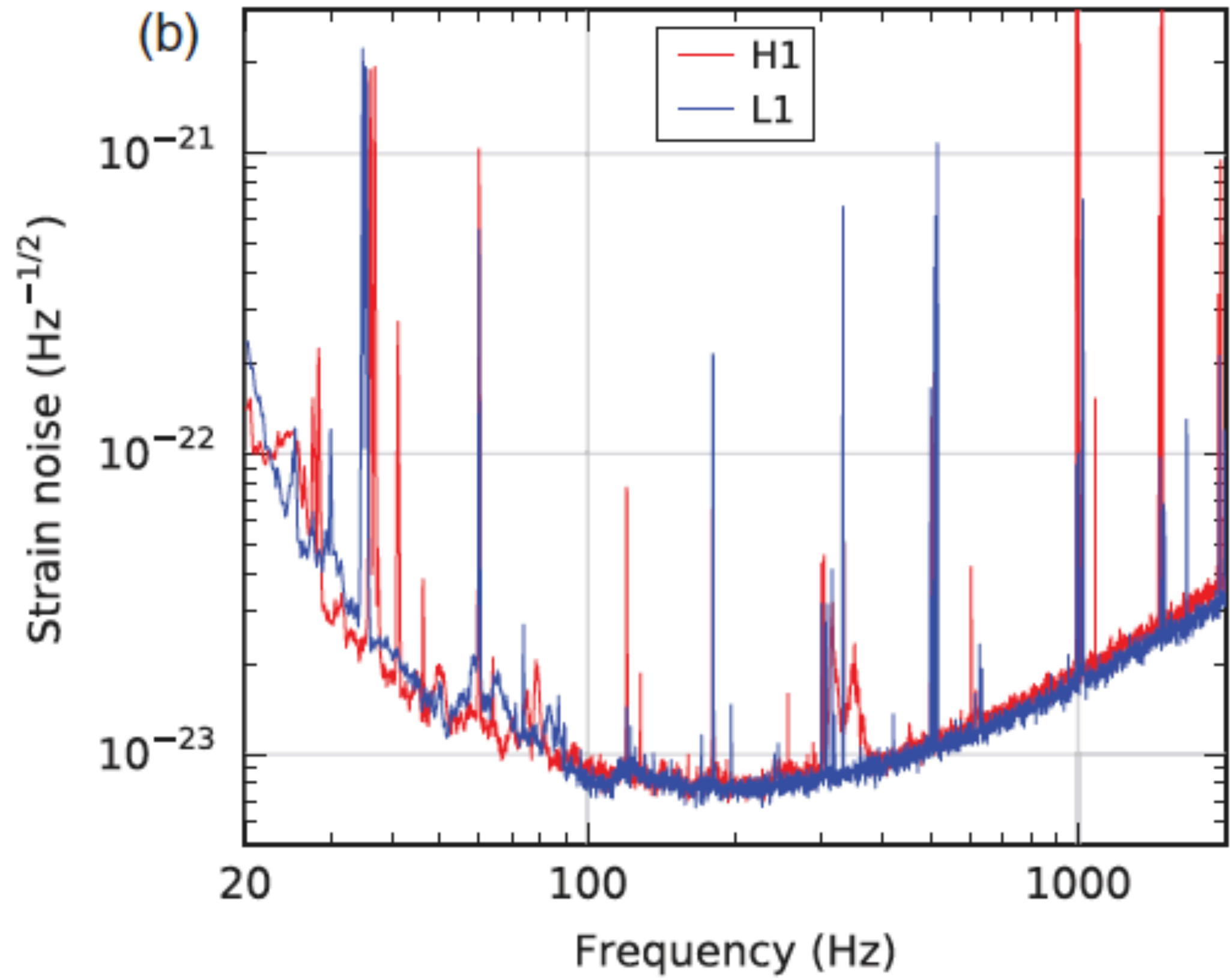
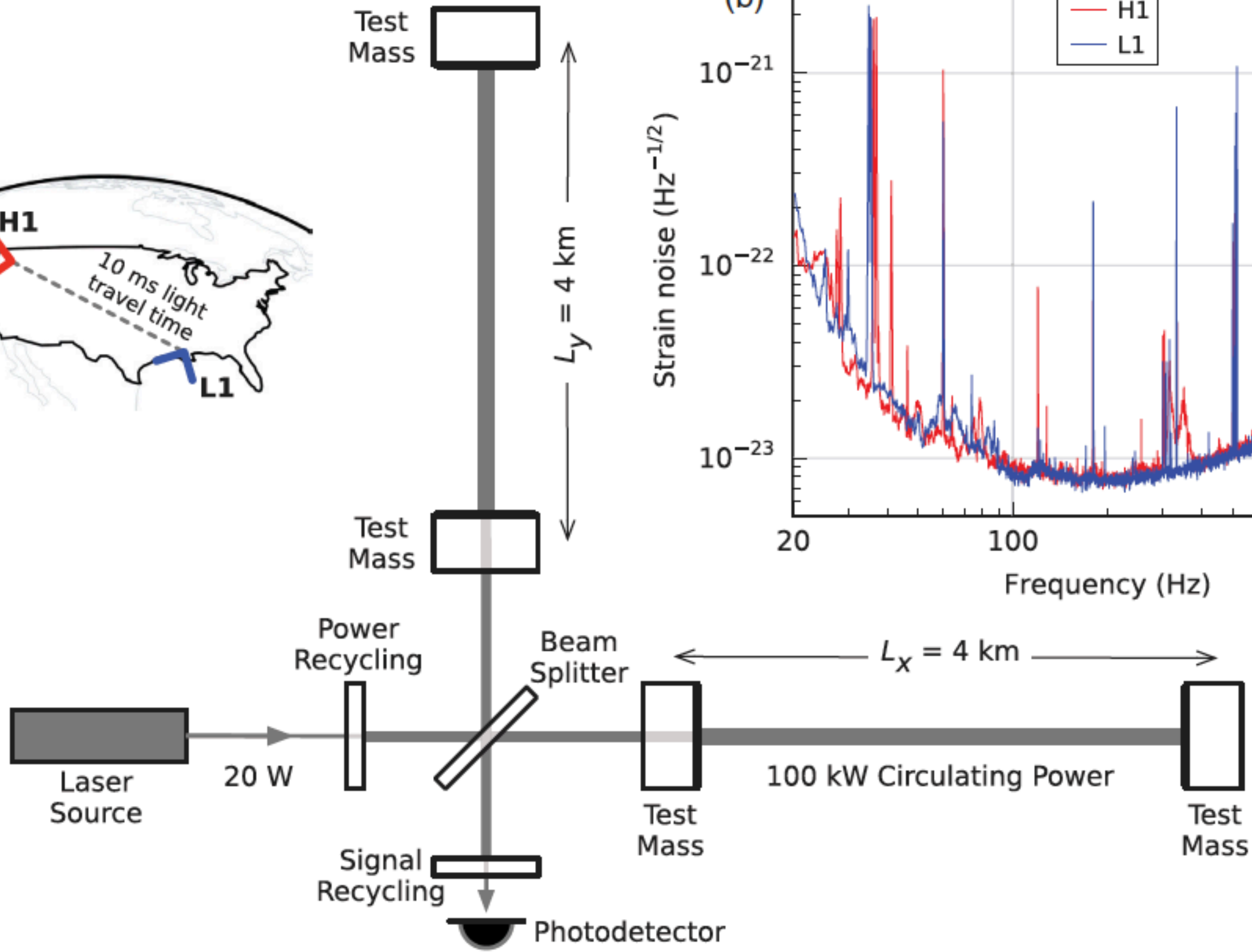
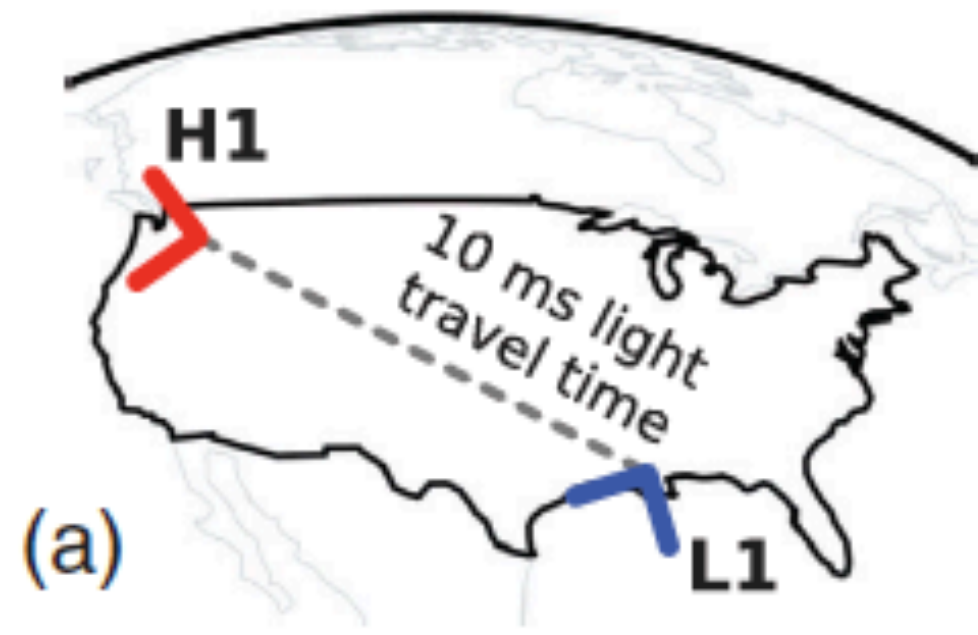




# LIGO Handford





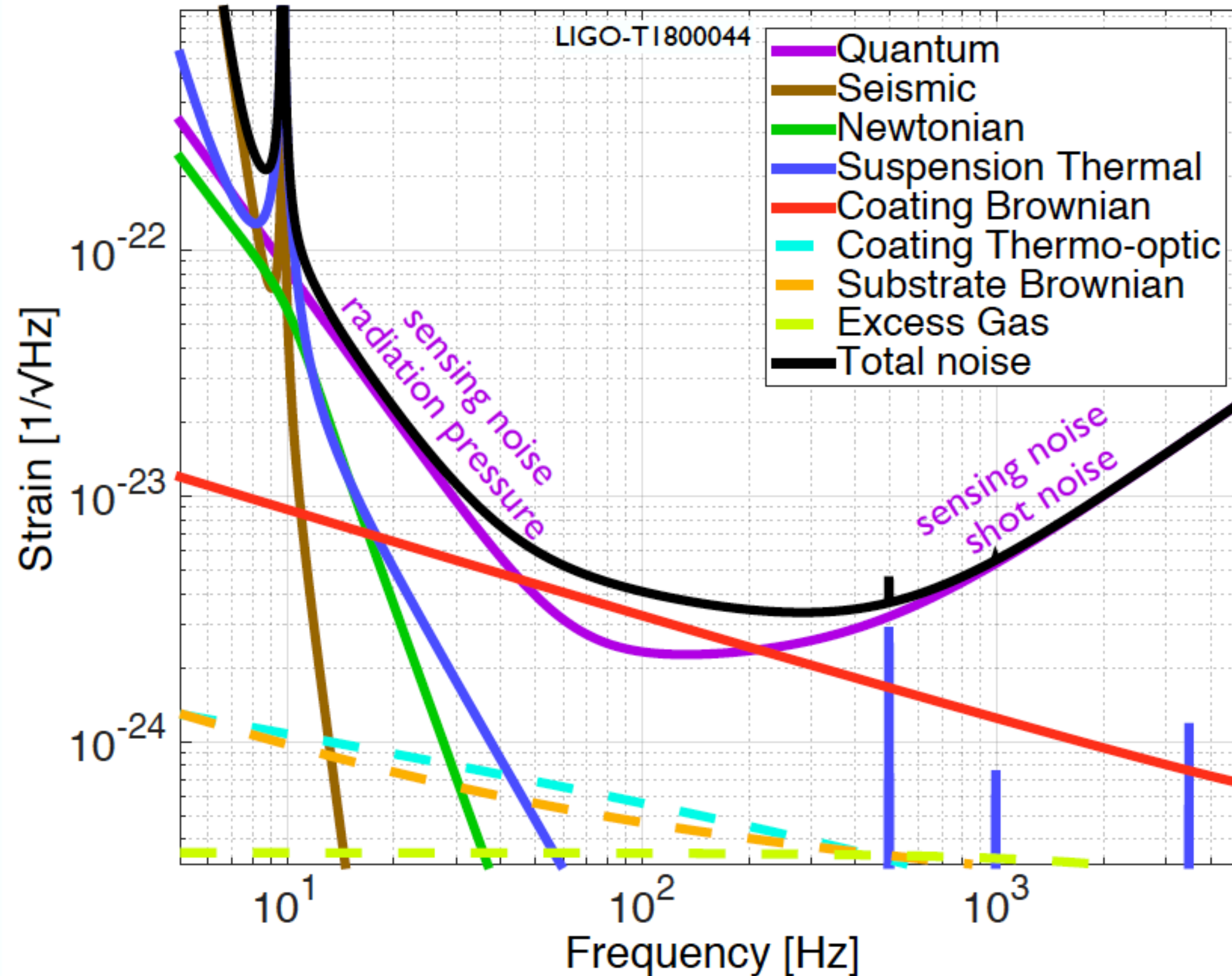




# Detector Noise (design)

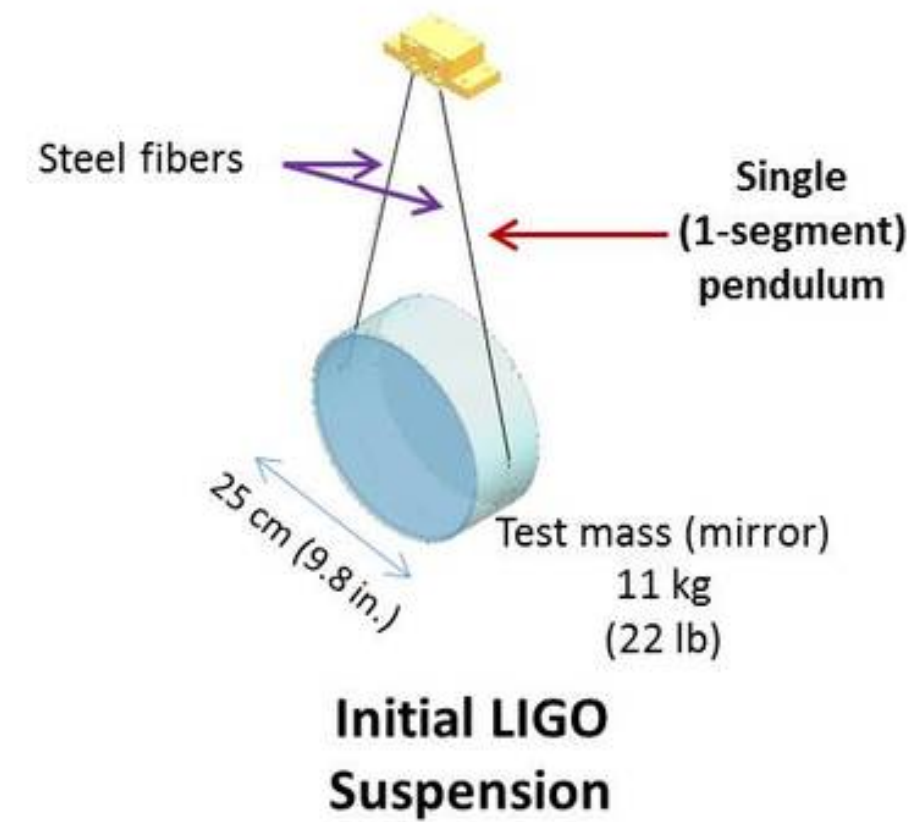


aLIGO new design curve: NSNS (1.4/1.4  $M_{\odot}$ ) 173 Mpc and BHBH (30/30  $M_{\odot}$ ) 1606 Mpc



$4e-19$   
m/rtHz

1269 13

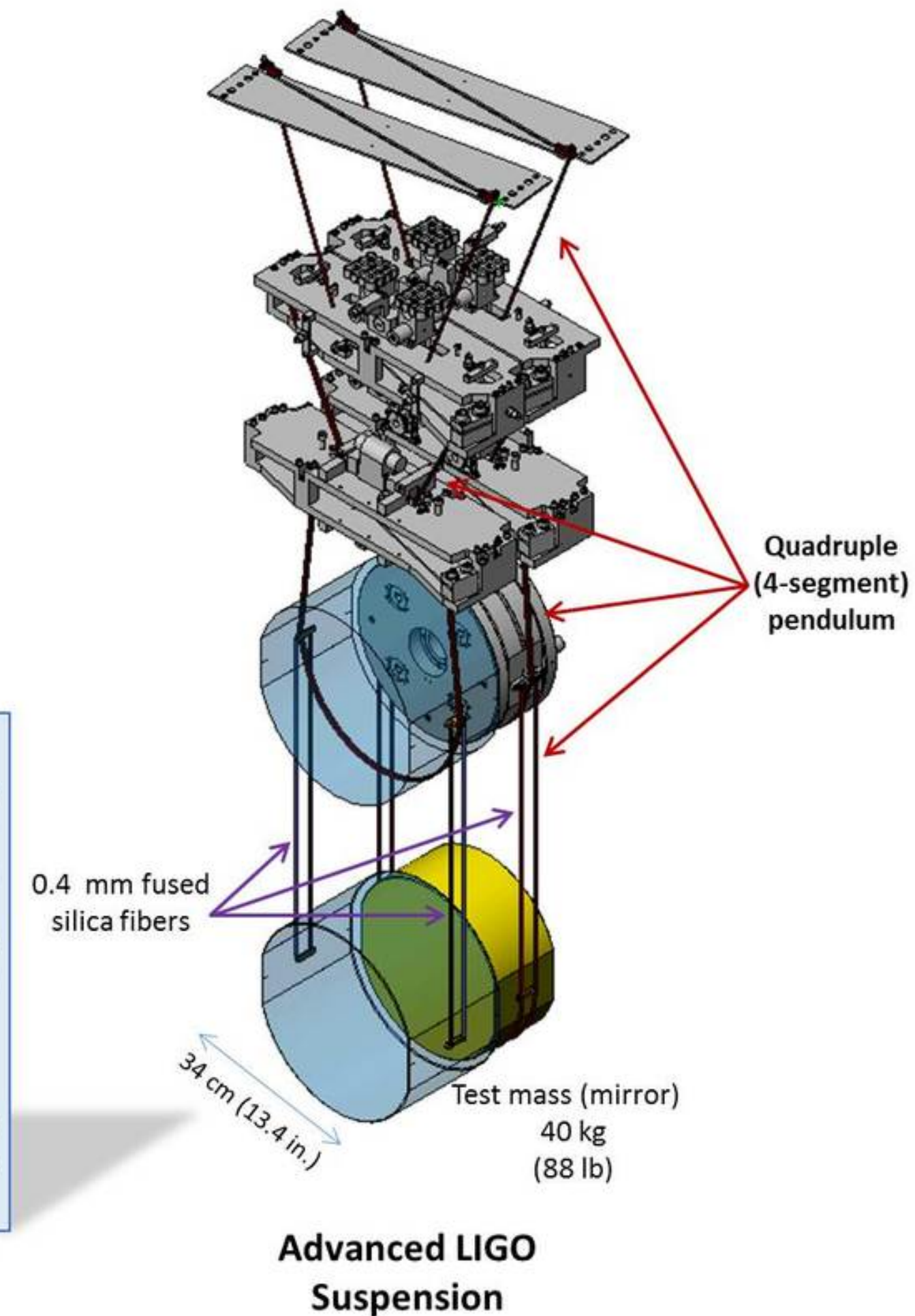


### iLIGO vs aLIGO suspension systems

These engineering drawings illustrate the striking differences between Initial- and Advanced LIGO's suspensions. The suspensions are shown to scale.

Initial LIGO's suspension was a single pendulum design with an 11 kg (22 lb) 'test mass' (mirror) hung by steel fibers.

Advanced LIGO's suspension system is a much heavier quadruple ("quad") pendulum with a 40 kg (88 lb) 'test mass' (mirror) hung by fused silica fibers.





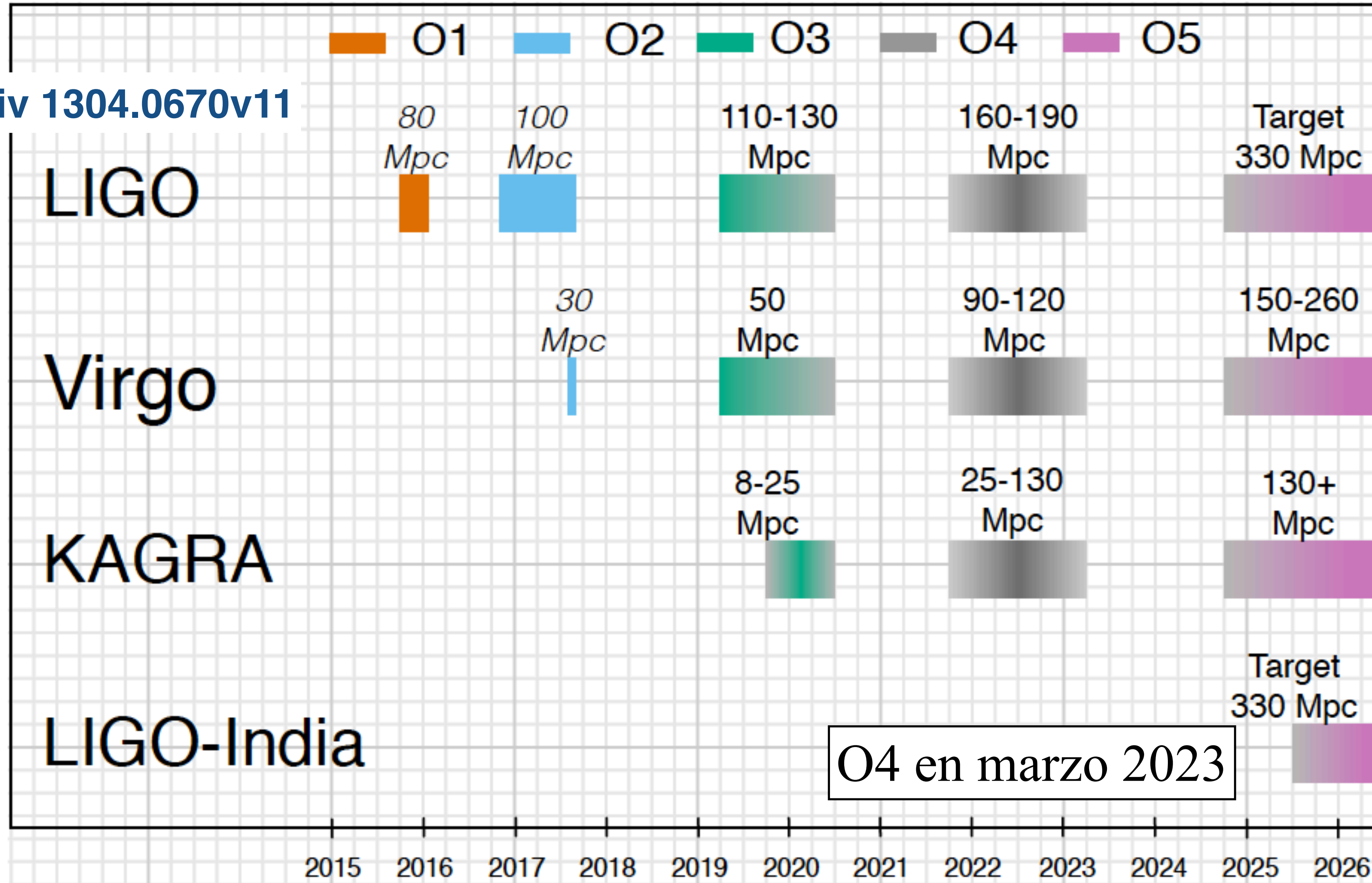
# International Network



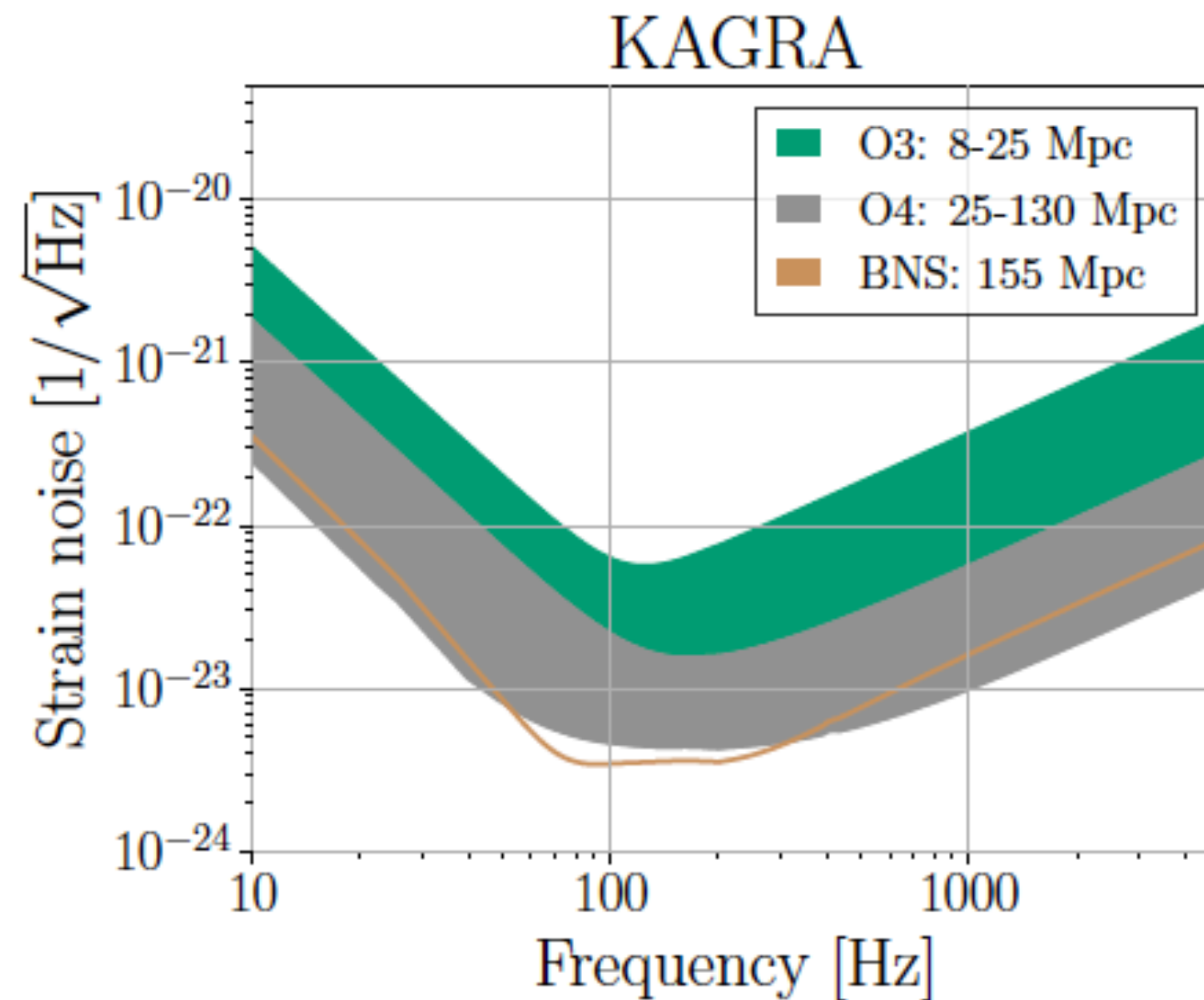
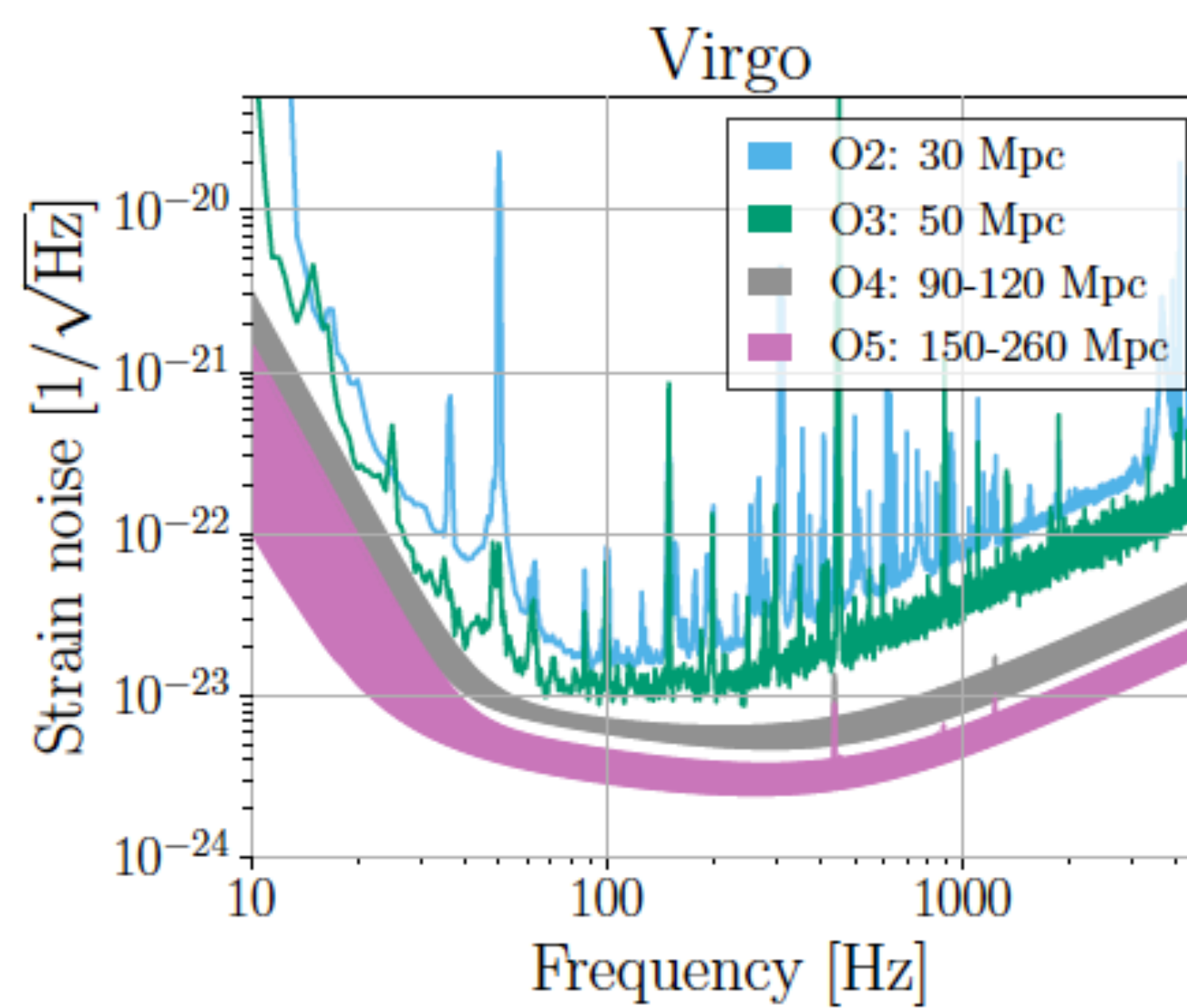
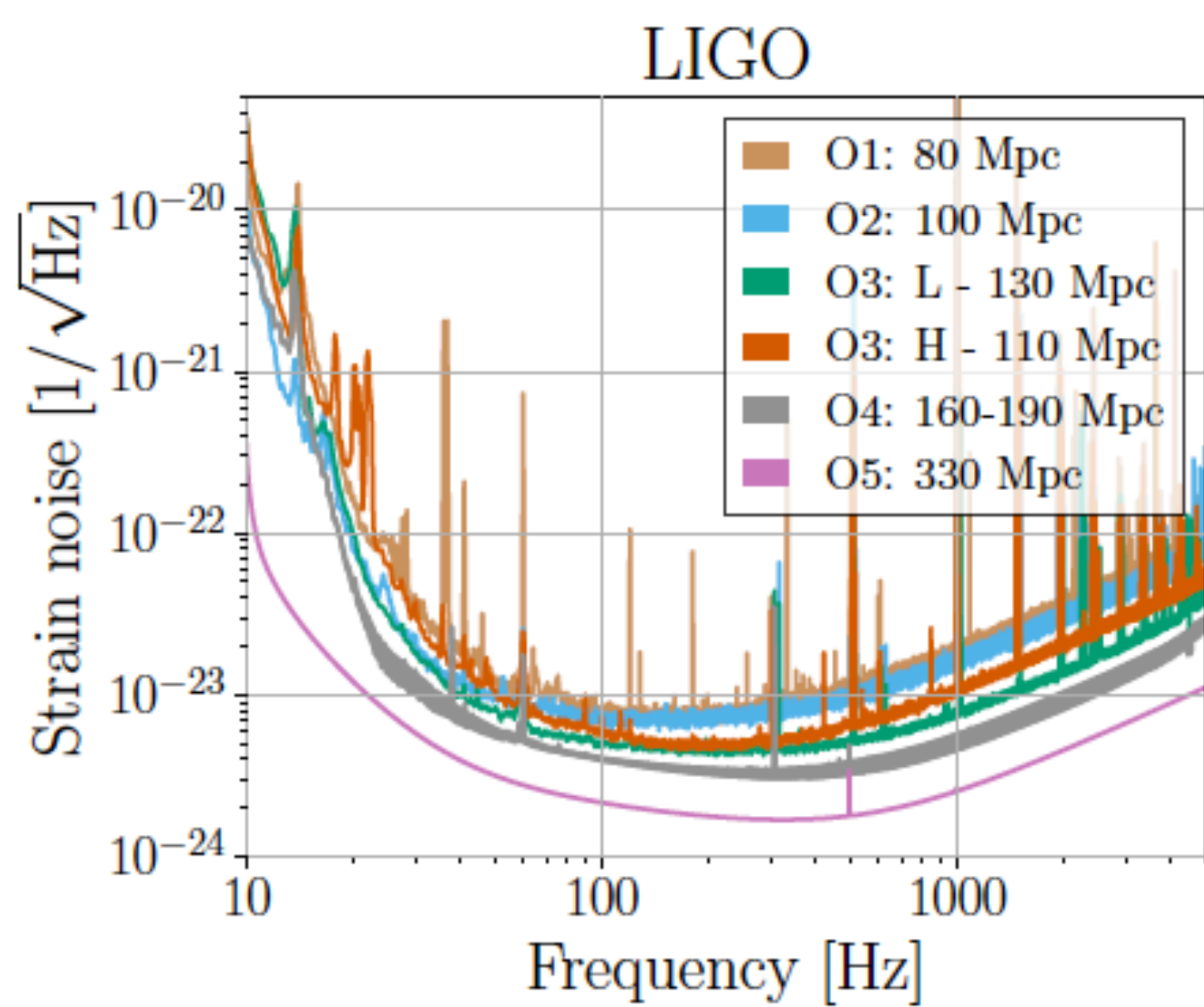
map from [http://www.nationsonline.org/maps/political\\_world\\_map3000.jpg](http://www.nationsonline.org/maps/political_world_map3000.jpg)



arXiv 1304.0670v11







O4: Late 2021/Early 2022 → Late 2022/Early 2023  
 O5: Late 2024/Early 2025 → 2026

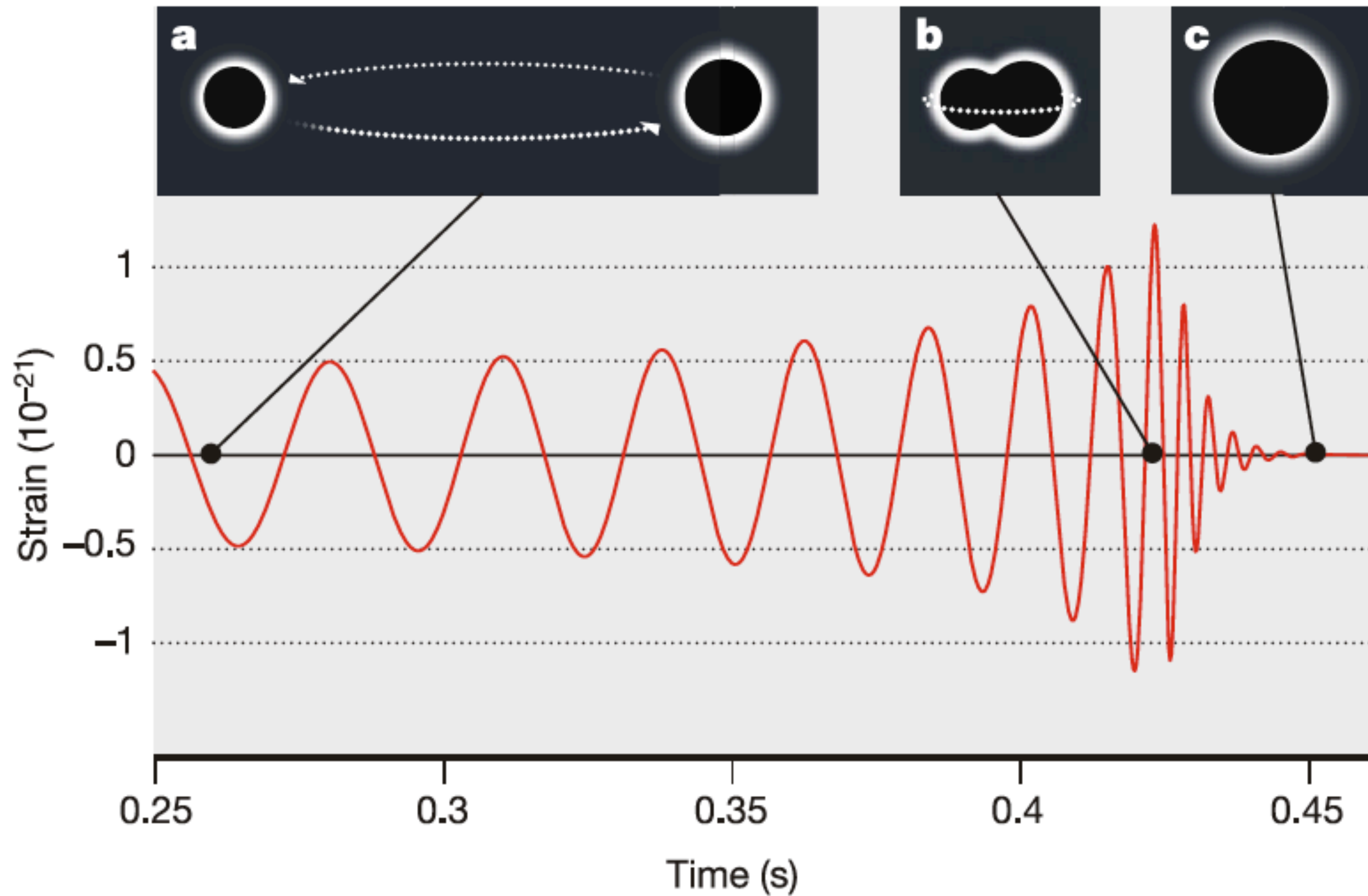
**Prospects for Observing and Localizing  
 Gravitational-Wave Transients with  
 Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA**  
 arXiv 1304.0670v11



# Ondas gravitacionales

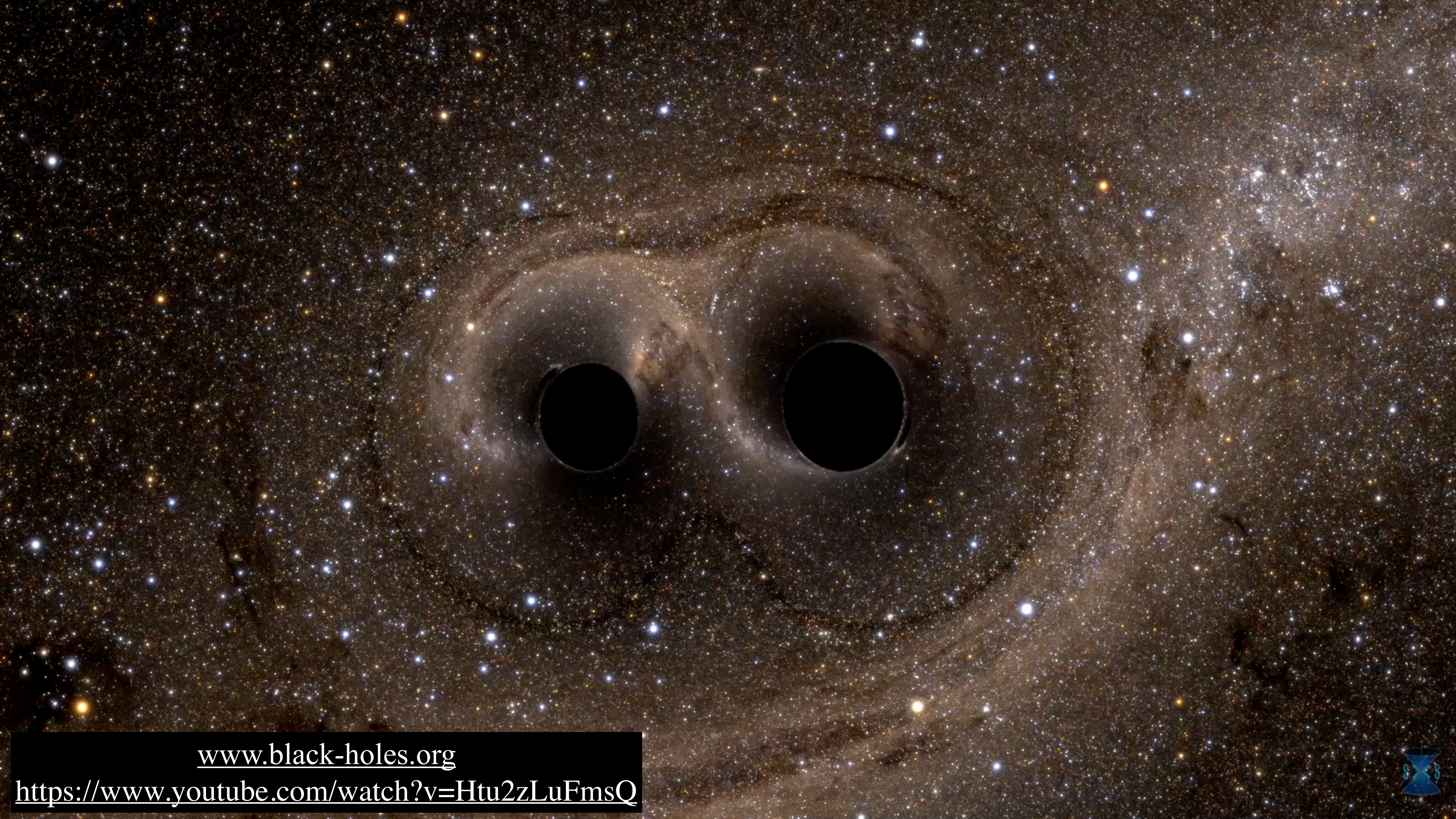
1. Ondas gravitacionales
2. Detectores de ondas gravitacionales
3. Observaciones de ondas gravitacionales
4. Futuros detectores





**Fig. 2 | Representation of gravitational waves emitted by a merging black hole binary. a, b,** Two black holes several orbits before their merger (a), and at the point of merger (b). **c,** The aftermath of the merger; the remnant has settled down into its final state as a single black hole. On the vertical axis, strain is the fractional change in the arm lengths of the LIGO detectors. Figure adapted from ref. <sup>91</sup> (Springer Nature).





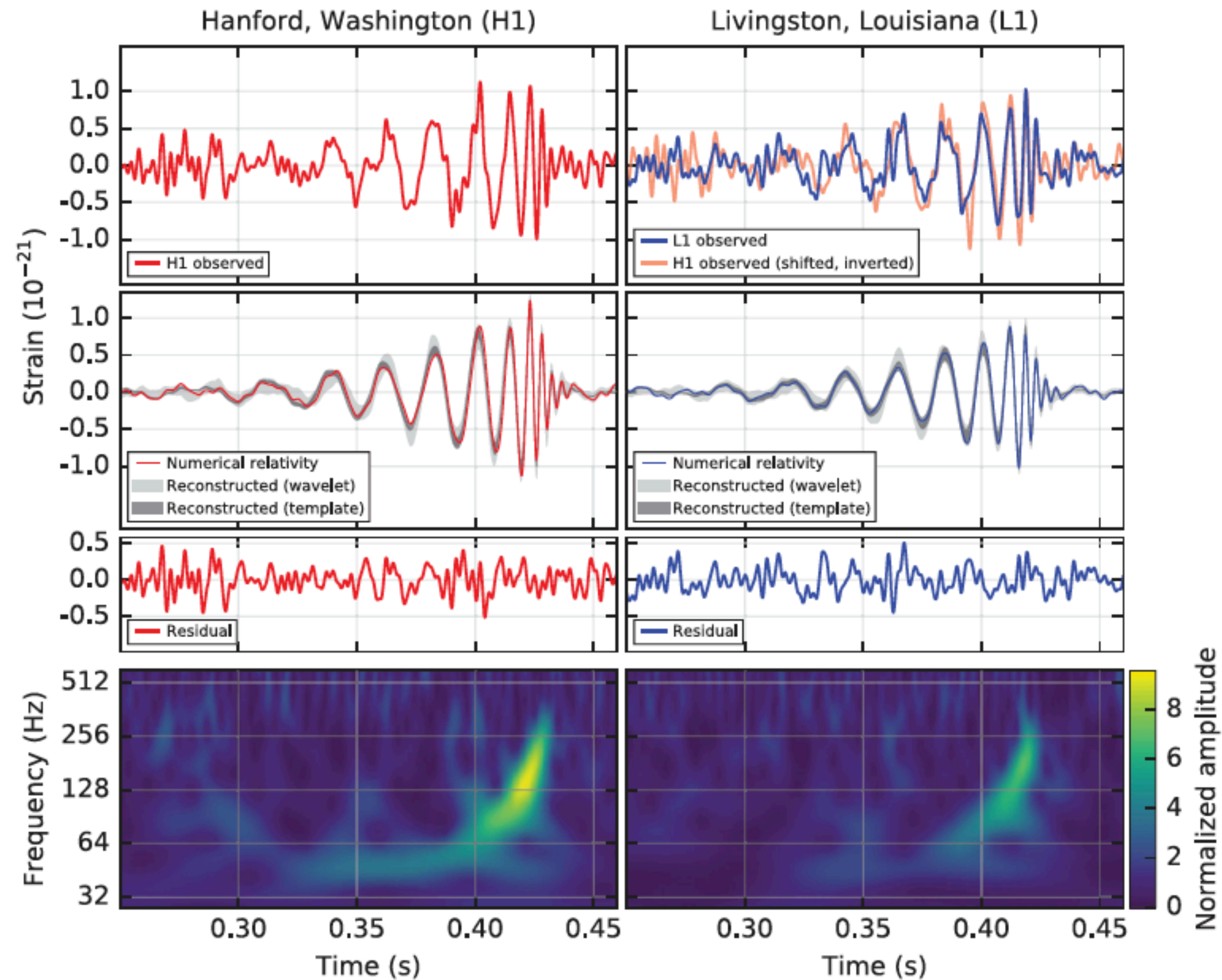
[www.black-holes.org](http://www.black-holes.org)

<https://www.youtube.com/watch?v=Htu2zLuFmsQ>





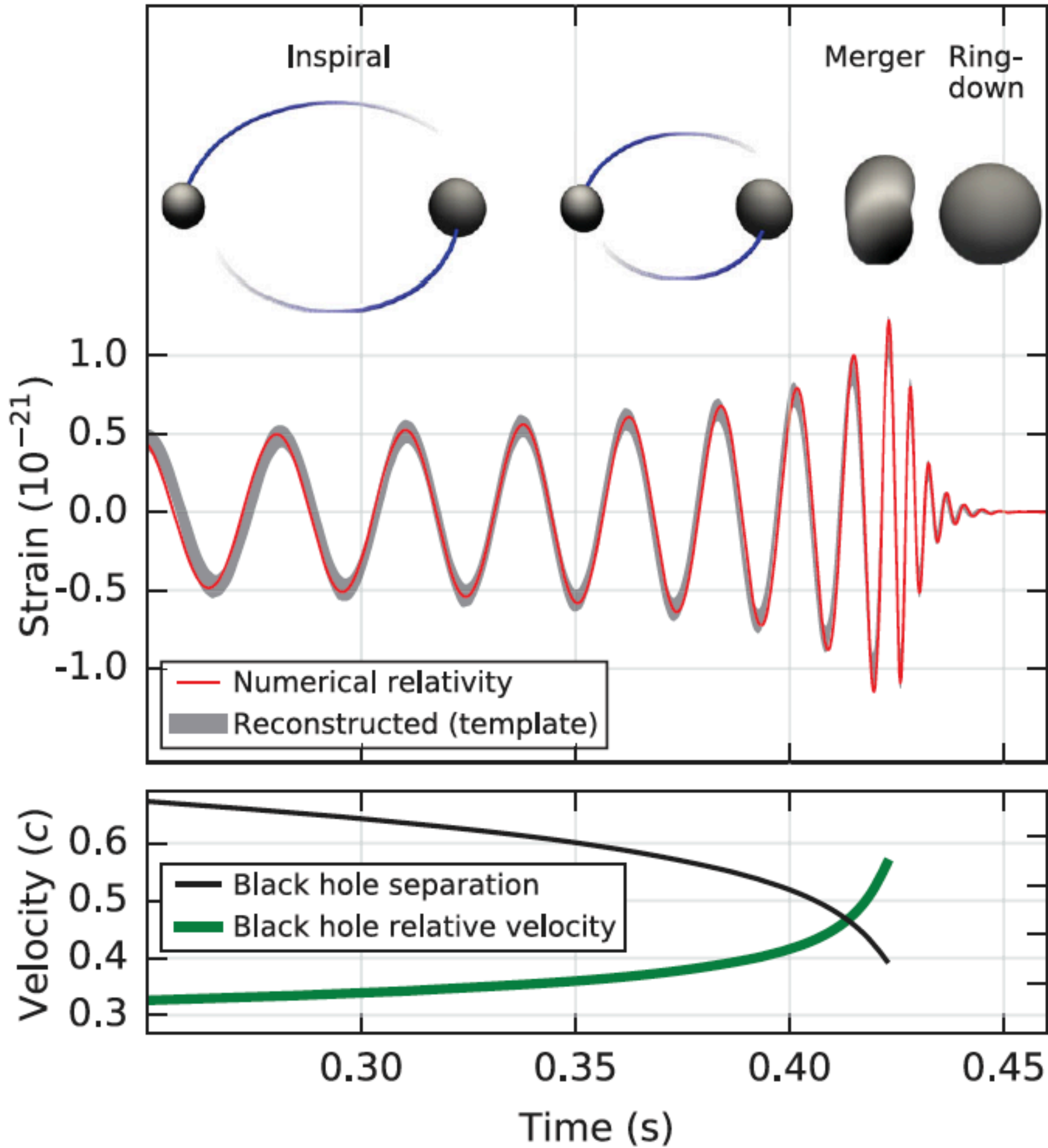
# GW 150914



PRL 116, 061102 (2016)



# GW 150914



Primary black hole mass

$$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$$

Secondary black hole mass

$$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

Final black hole mass

$$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

Final black hole spin

$$0.67^{+0.05}_{-0.07}$$

Luminosity distance

$$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$$

Source redshift  $z$

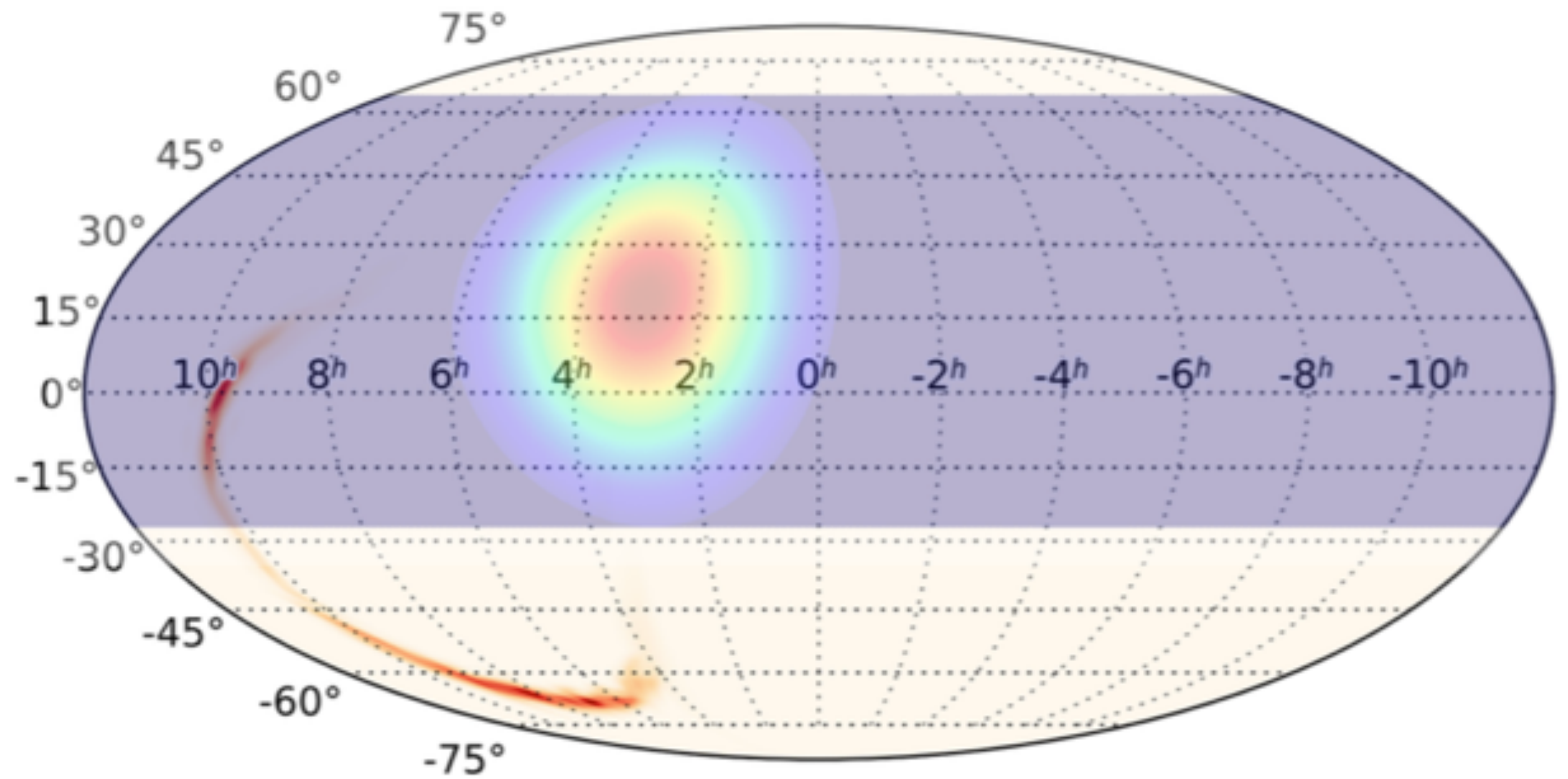
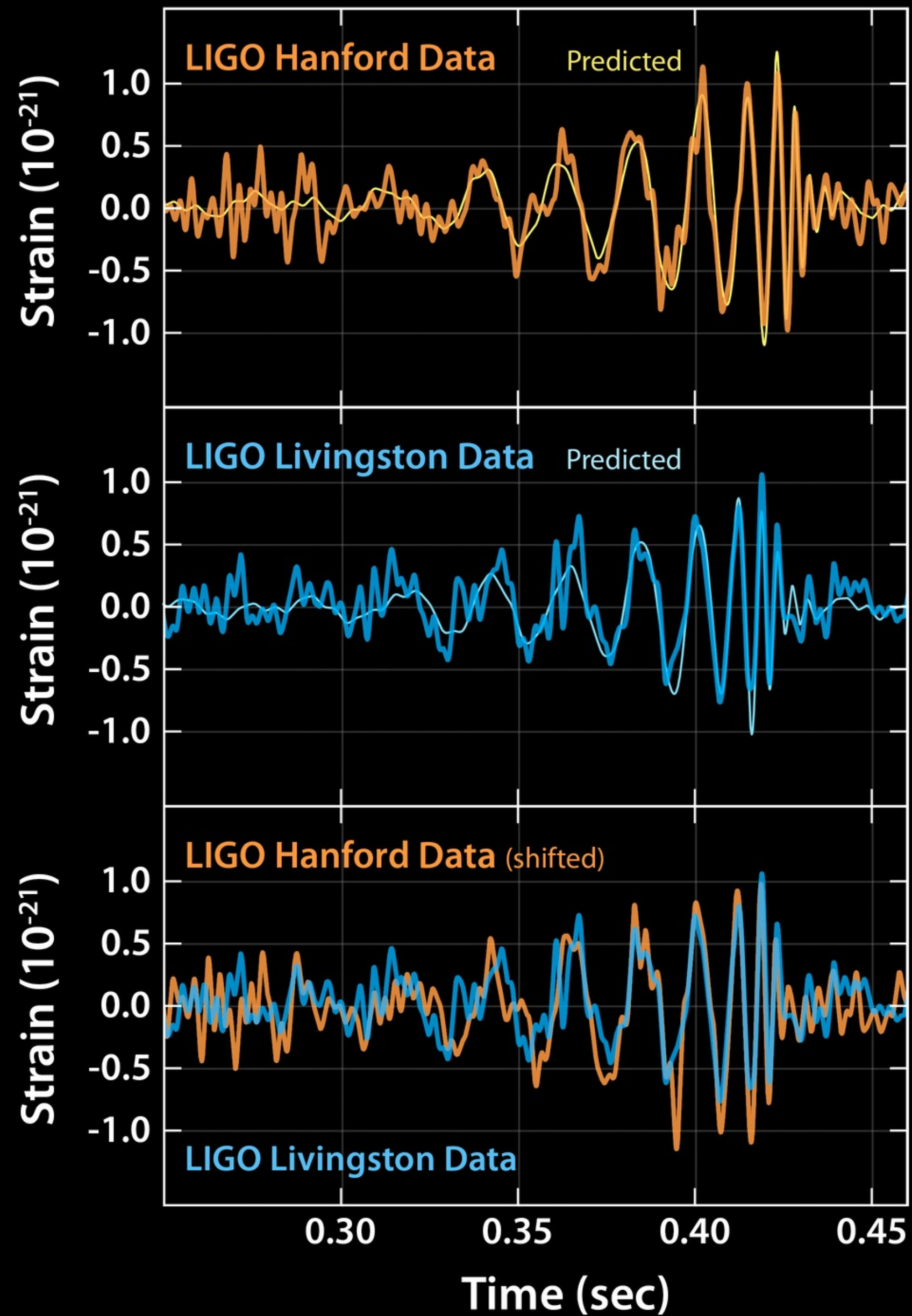
$$0.09^{+0.03}_{-0.04}$$

PRL 116, 061102 (2016)



# GW 150914

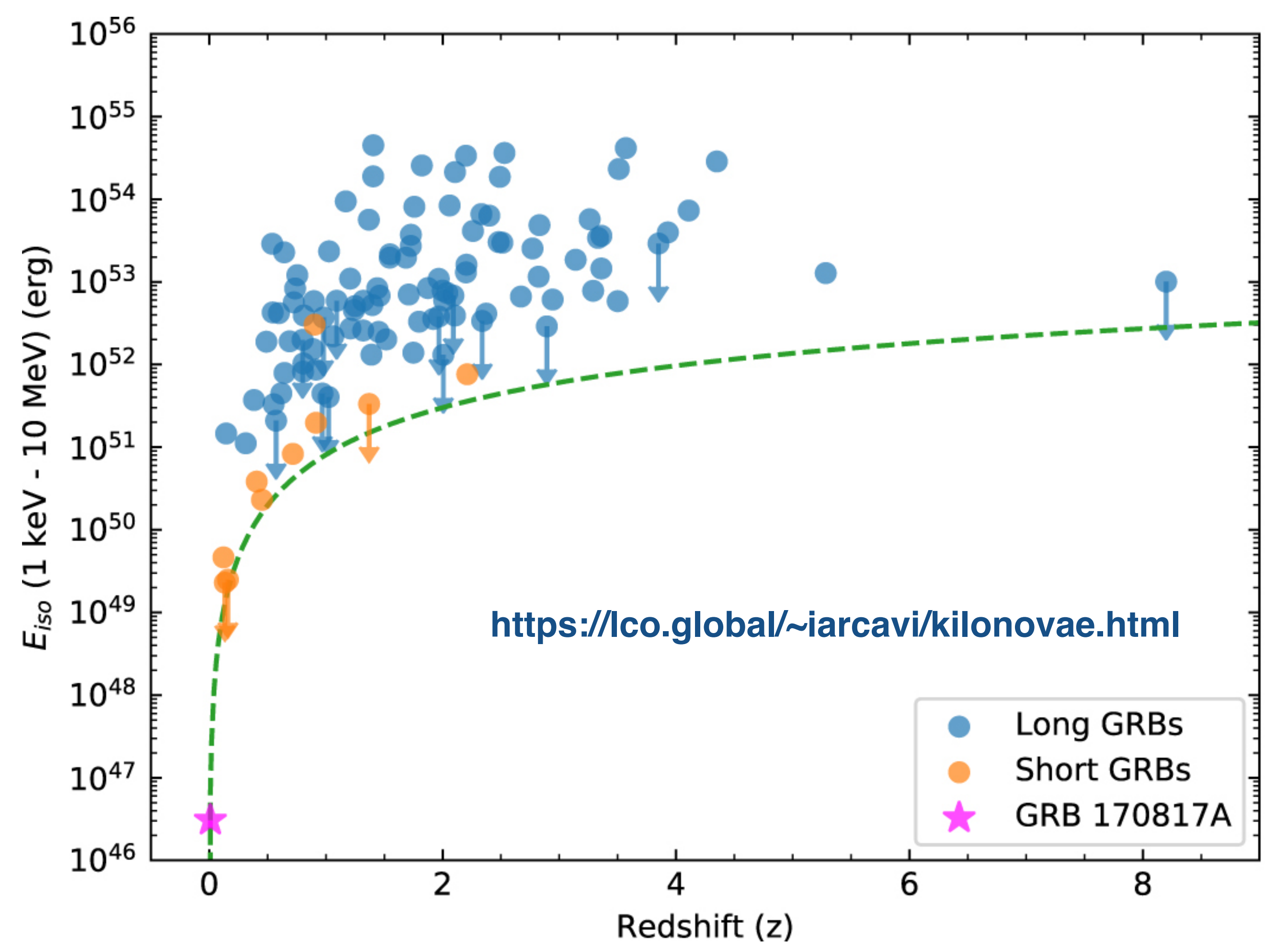
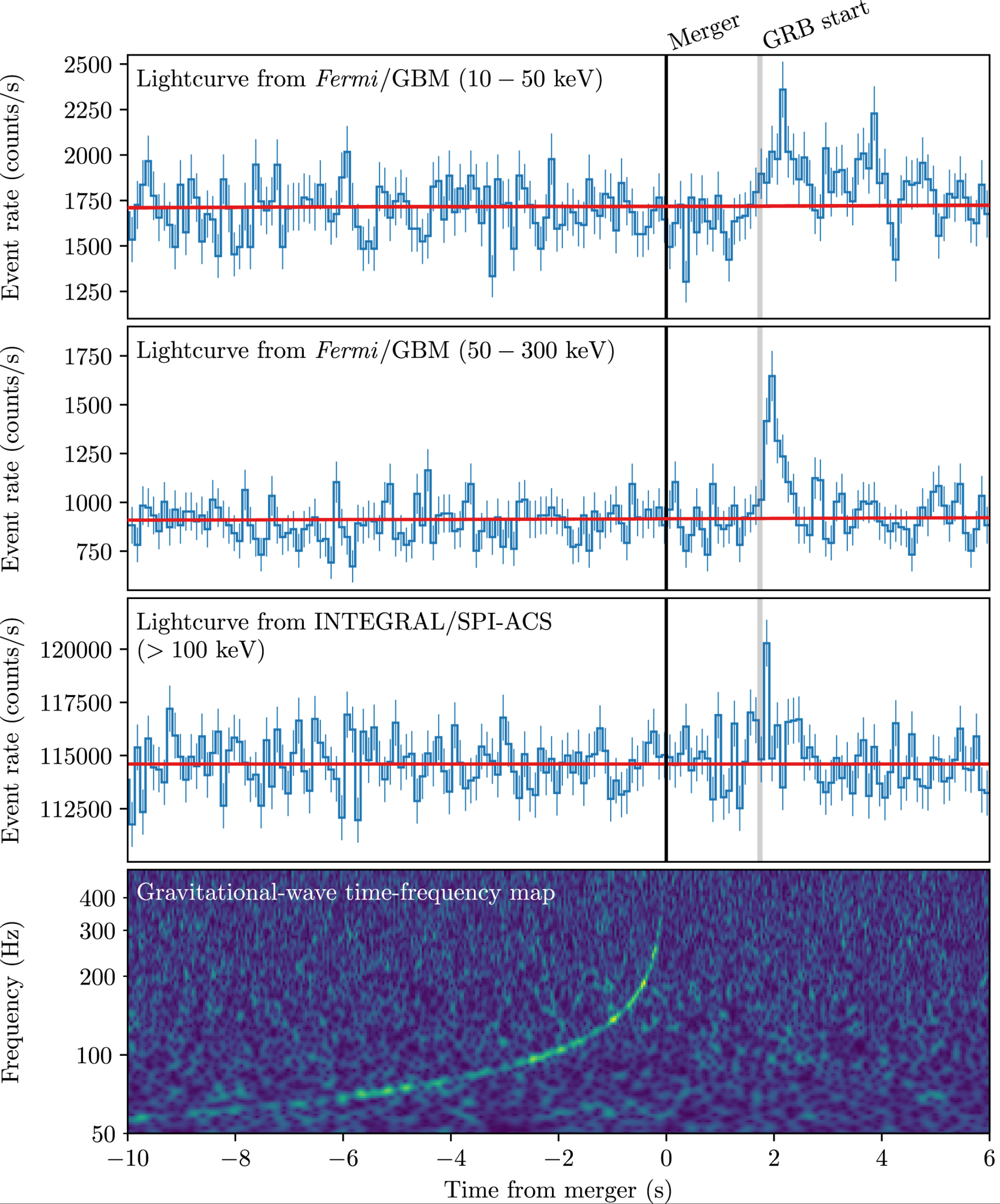
LIGO TRIGGER → 2015-09-14 09:50:45 UTC



Where was HAWC at this time?  
Sidereal angle  $43.22^\circ$ , 02:52:53

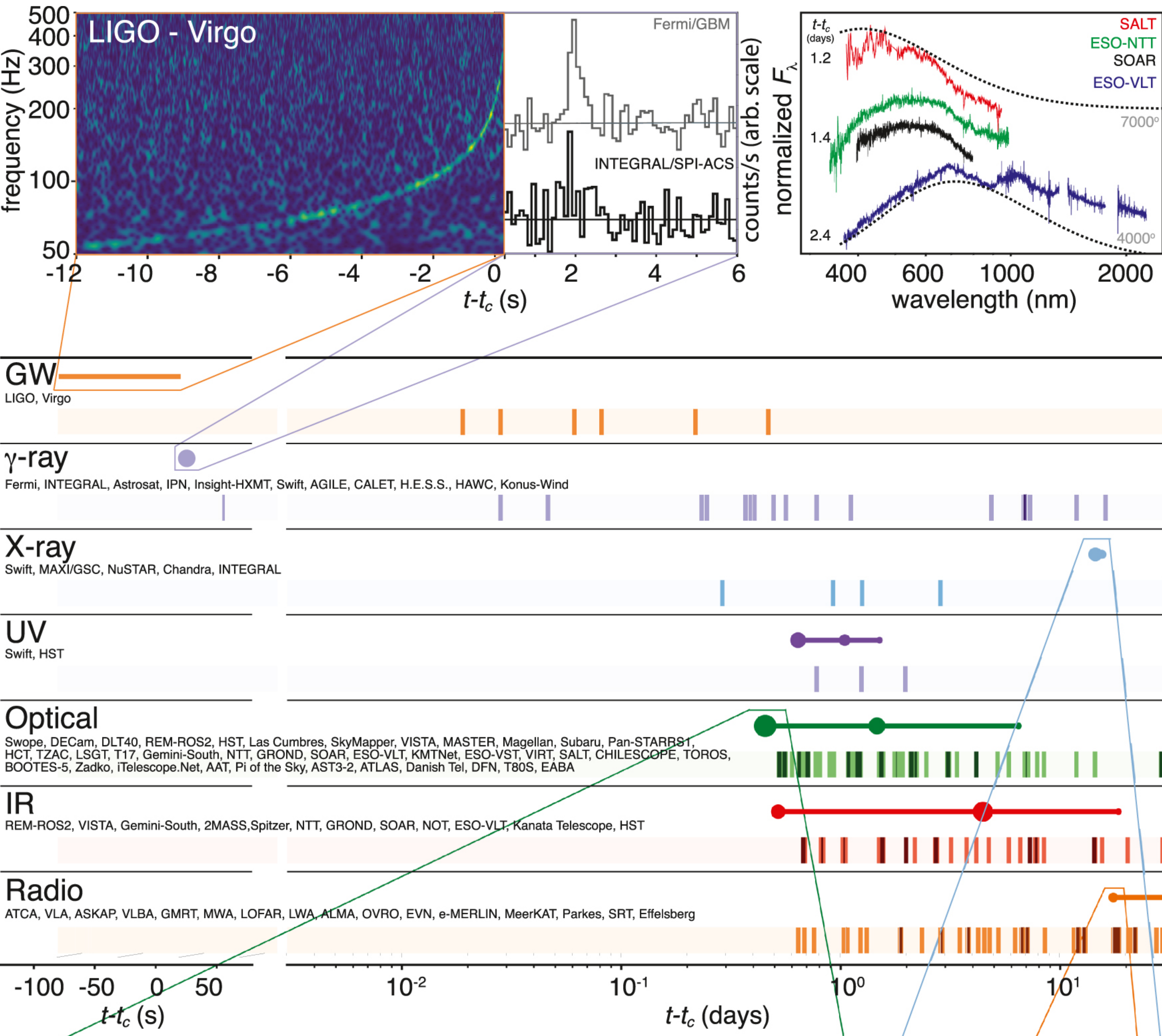


# GW170817





# GW170817



Las ondas gravitacionales se propagan a la velocidad de la luz

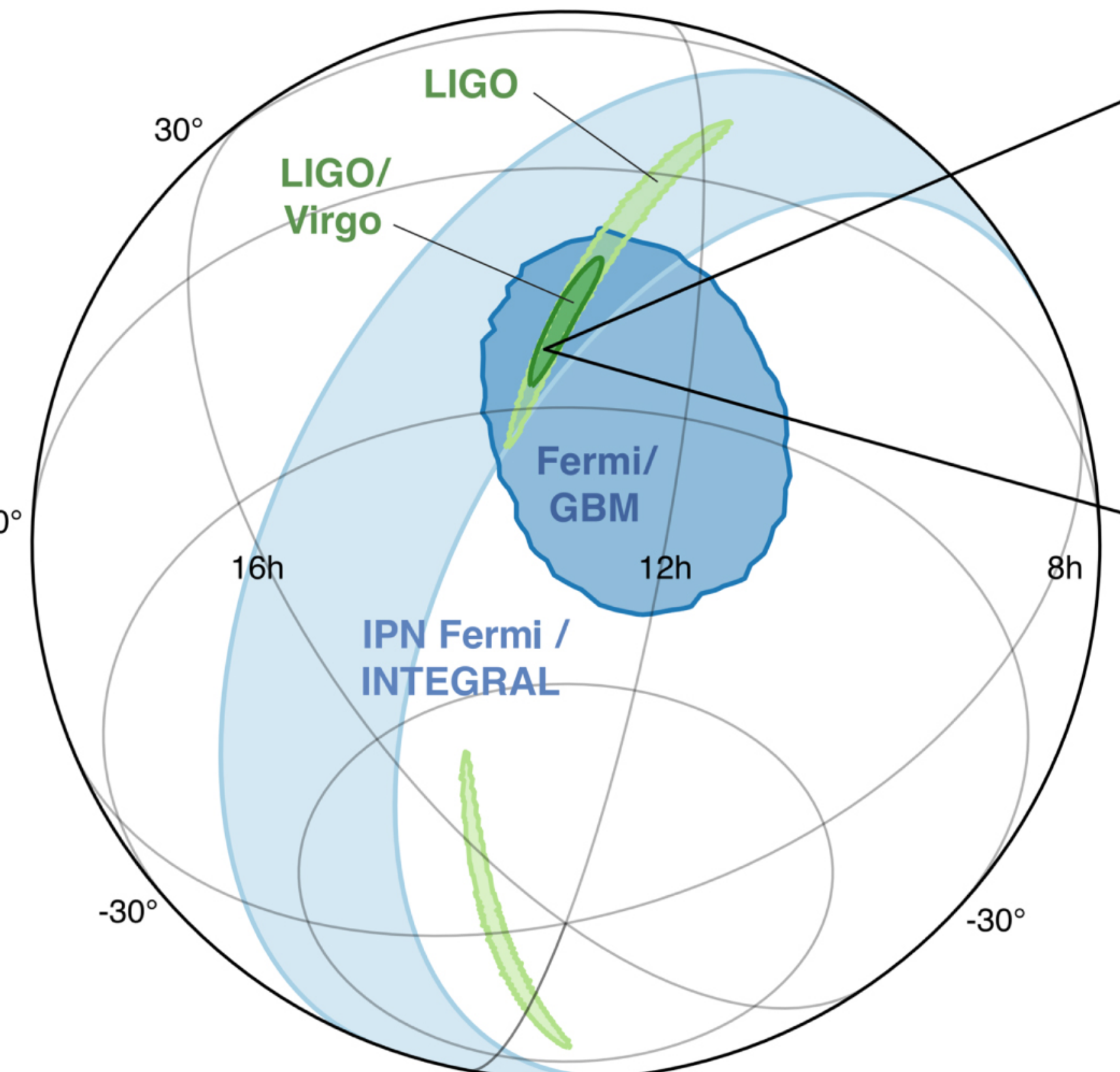
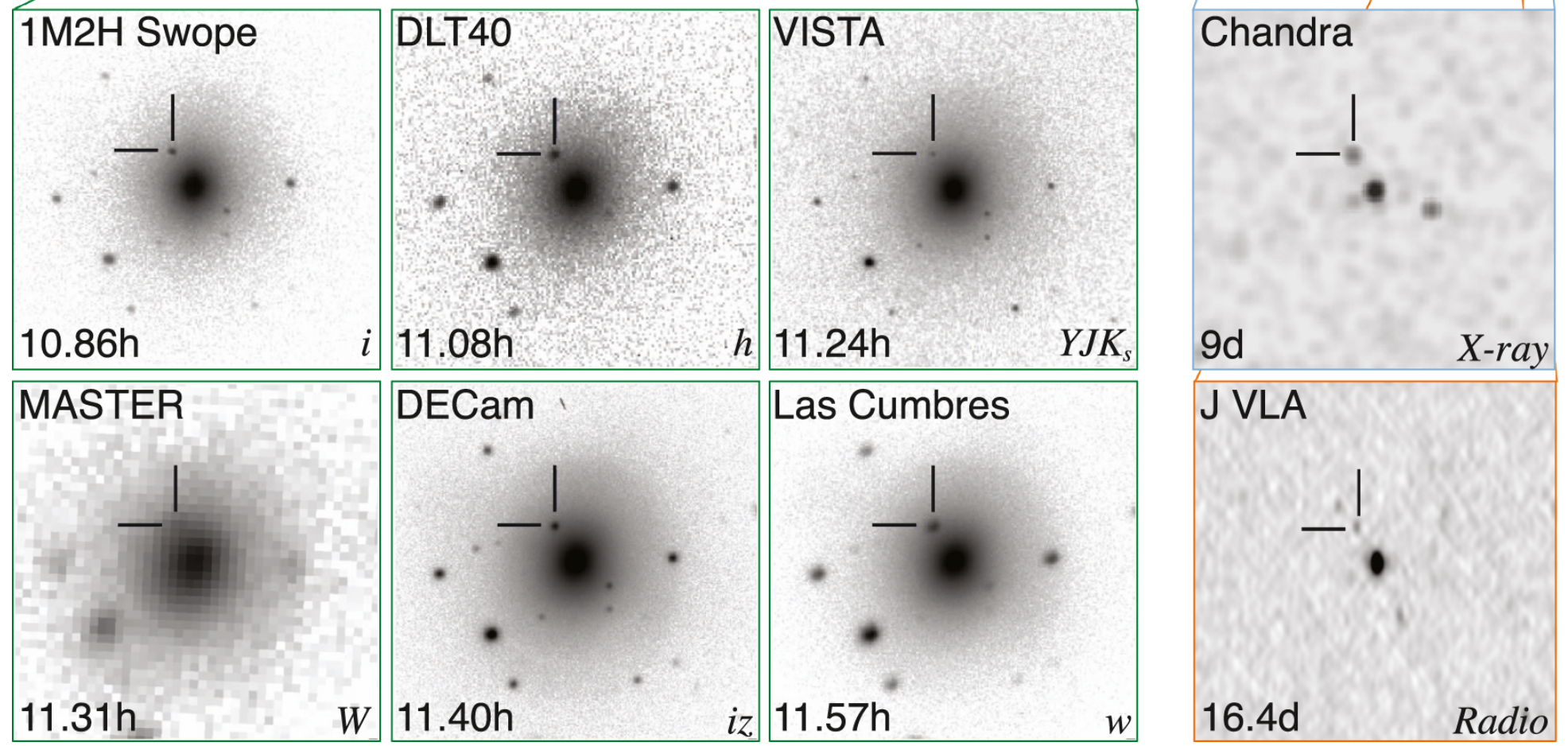
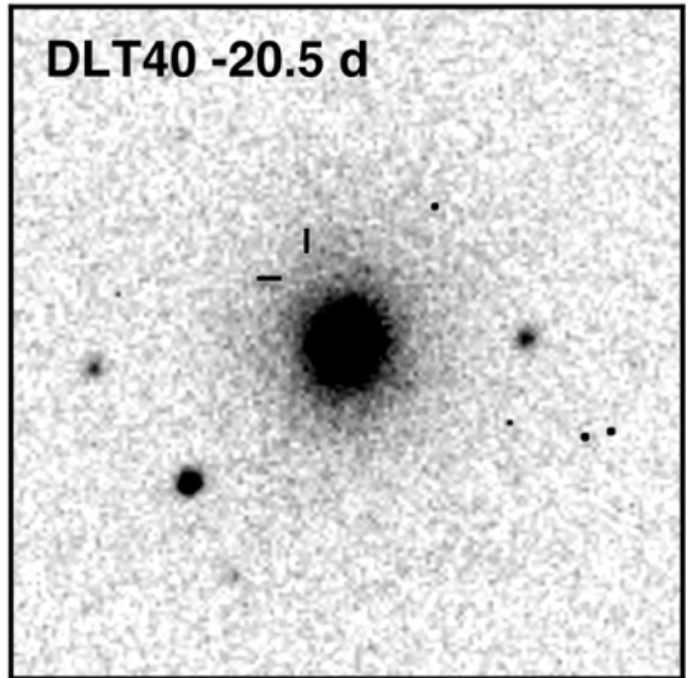
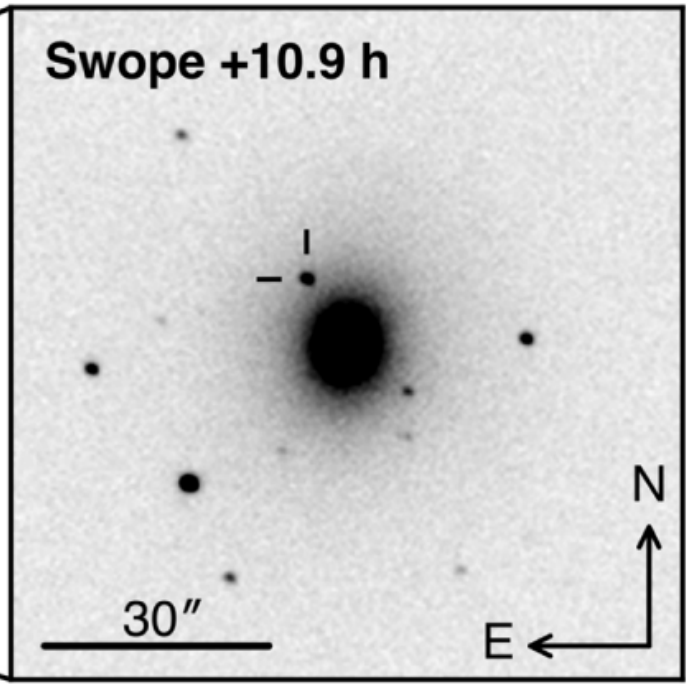
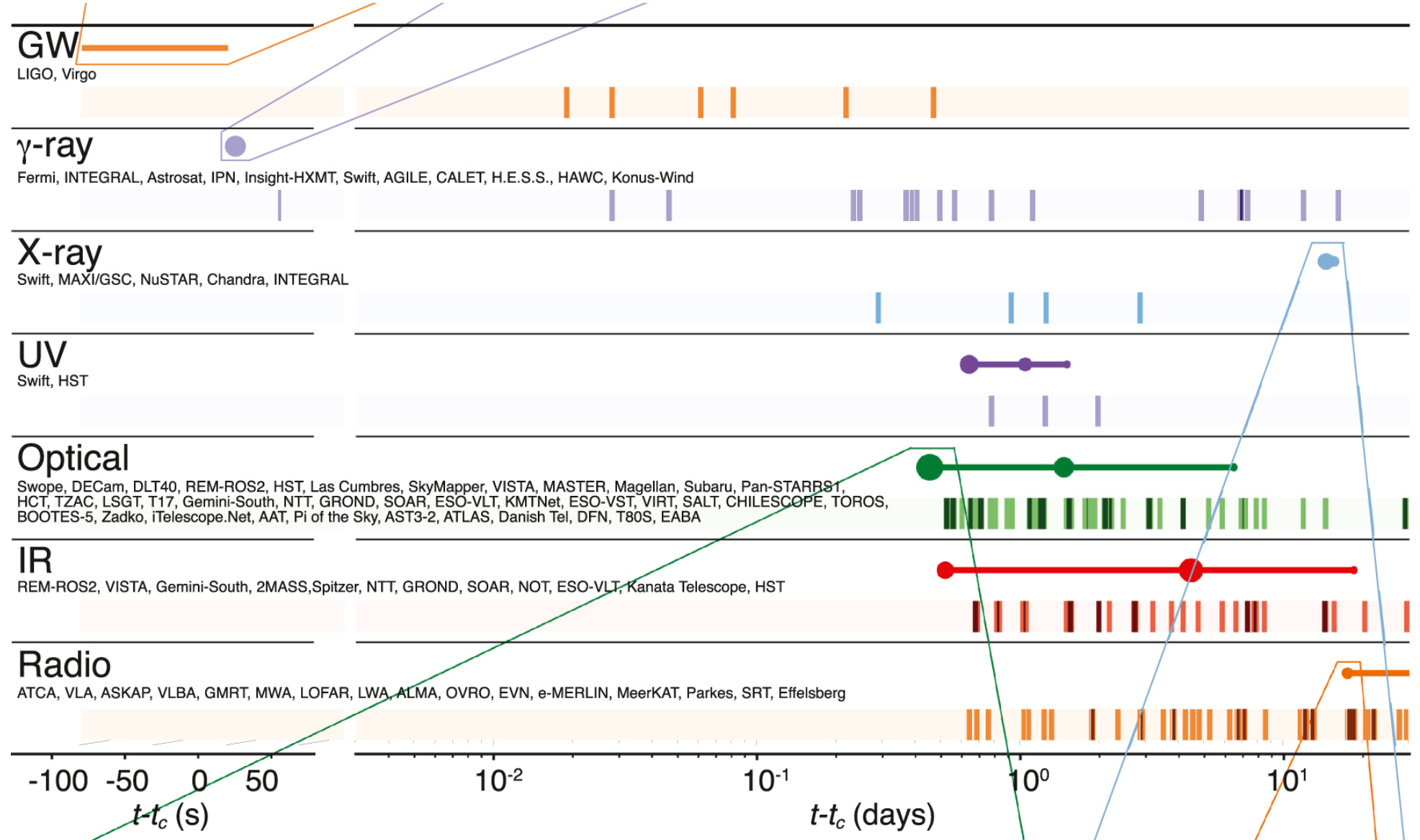
$$-3 \times 10^{-15} \leq \frac{v_{gw} - c}{c} \leq +7 \times 10^{-16}$$

- límite superior: generadas al mismo tiempo
- límite inferior: GRB 10s después

Daniel Holtz, SSI 2020



# GW170817



iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus\_on\_GW170817

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS

Focus on the Electromagnetic Counterpart of the Neutron Star Binary Merger GW170817

Edo Berger (Harvard University, Cambridge, MA)

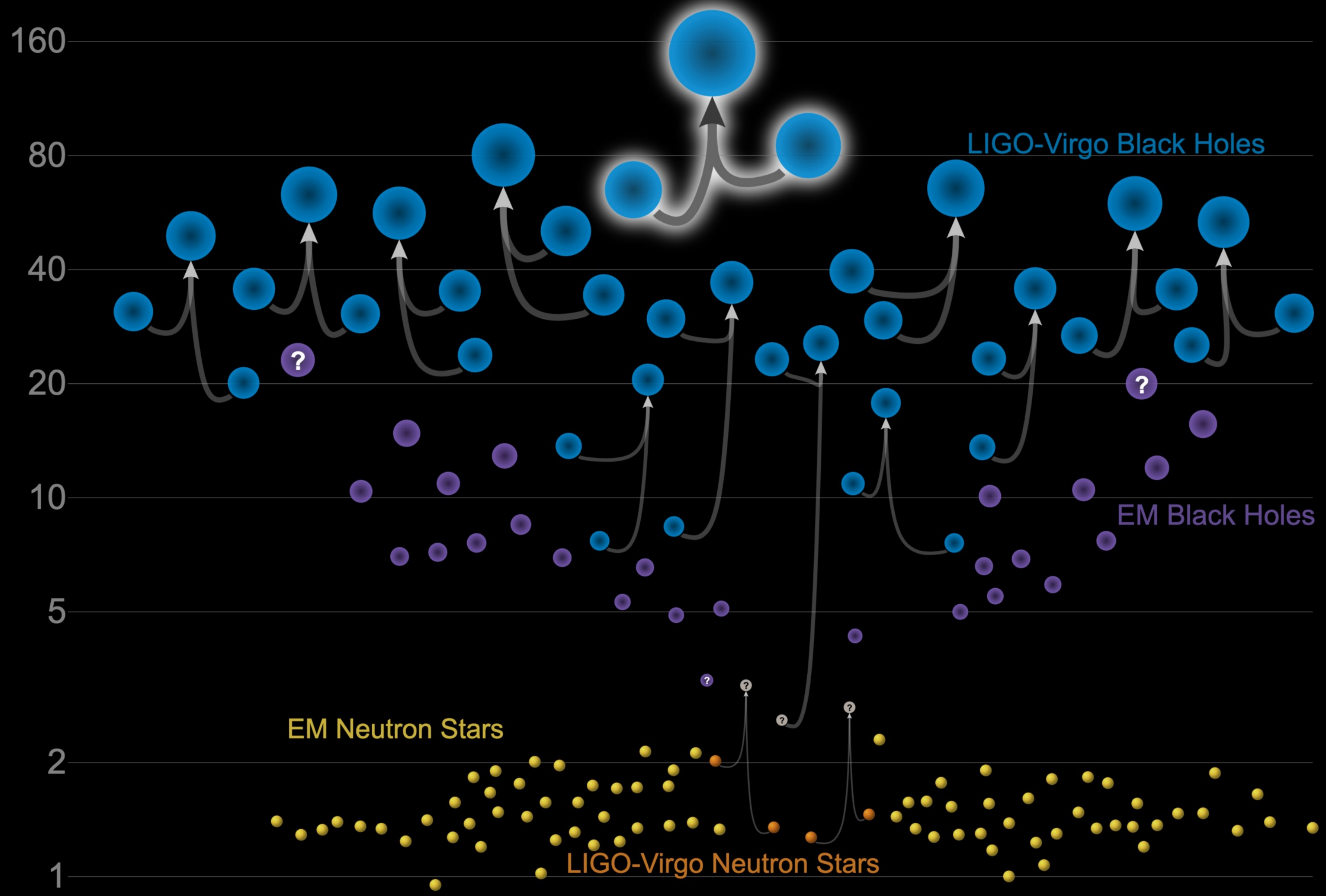
It is rare for the birth of a new field of astrophysics to be pinpointed to a singular event.

This focus issue follows such an event—the neutron star binary merger GW170817—marking the first joint detection and study of



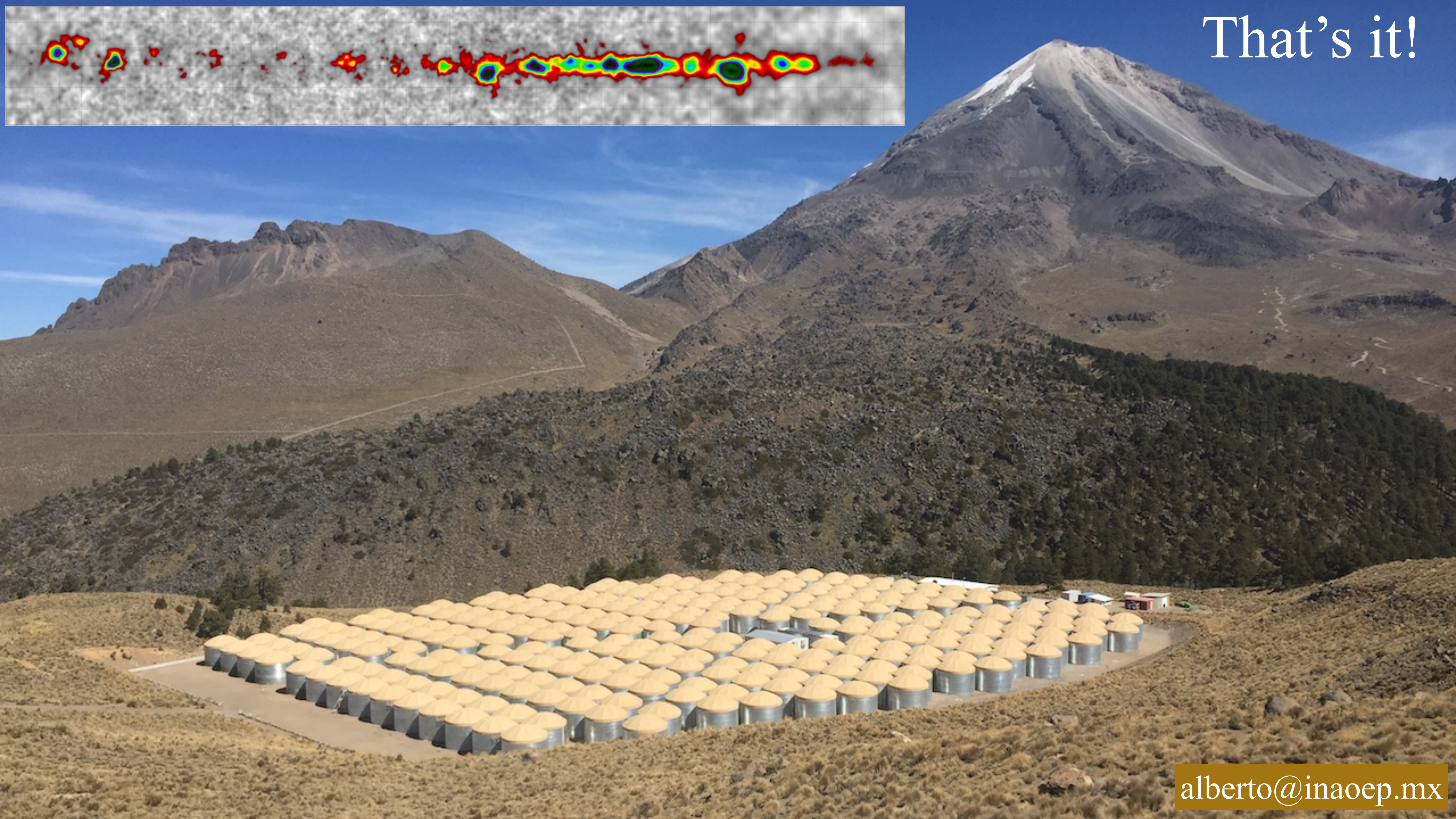
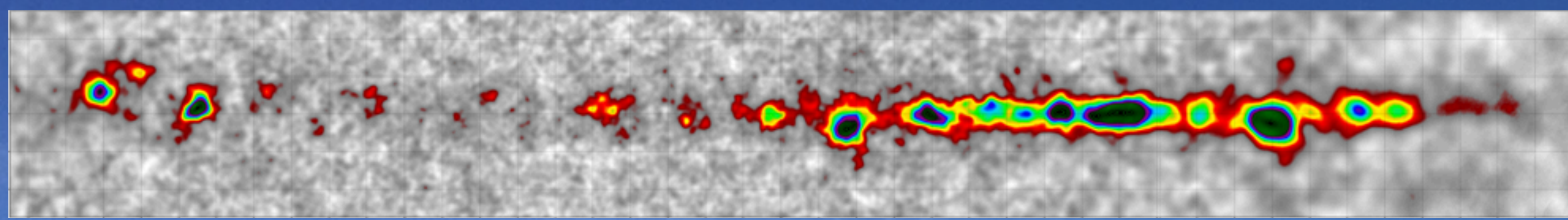
# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*





That's it!



alberto@inaoep.mx