

ONDAS GRAVITATORIAS: El cimbrar del espacio y el tiempo

Guillermo A. Mena Marugán

**Instituto de Estructura
de la Materia**

Semana de la Ciencia
8 de noviembre de 2016



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

FECYT



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA

Newton (1687): la gravedad se globaliza.



Hay un tiempo y un espacio absolutos. La gravedad es instantánea.



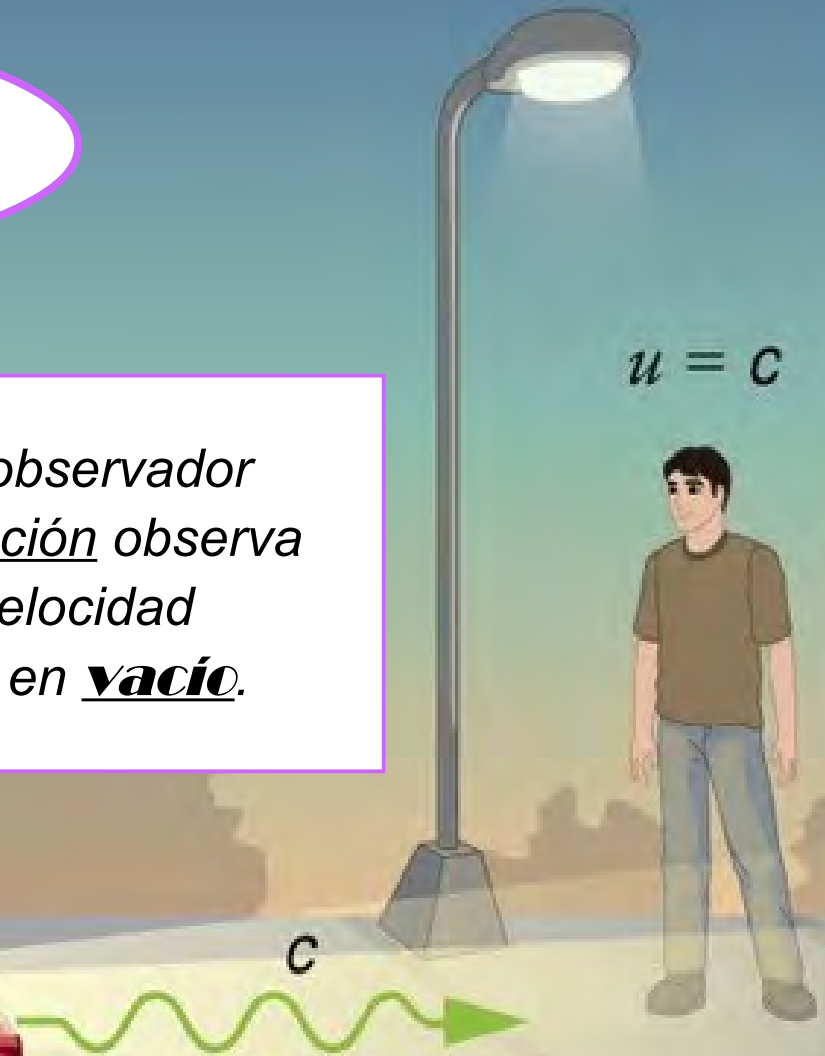
EINSTEIN introduce la
Relatividad Especial (1905).

*Cualquier observador
sin aceleración observa
la misma velocidad
para la **luz** en vacío.*

$$u' = c$$

$$u = c$$

c



¿Por qué habría de ser especial la Relatividad?

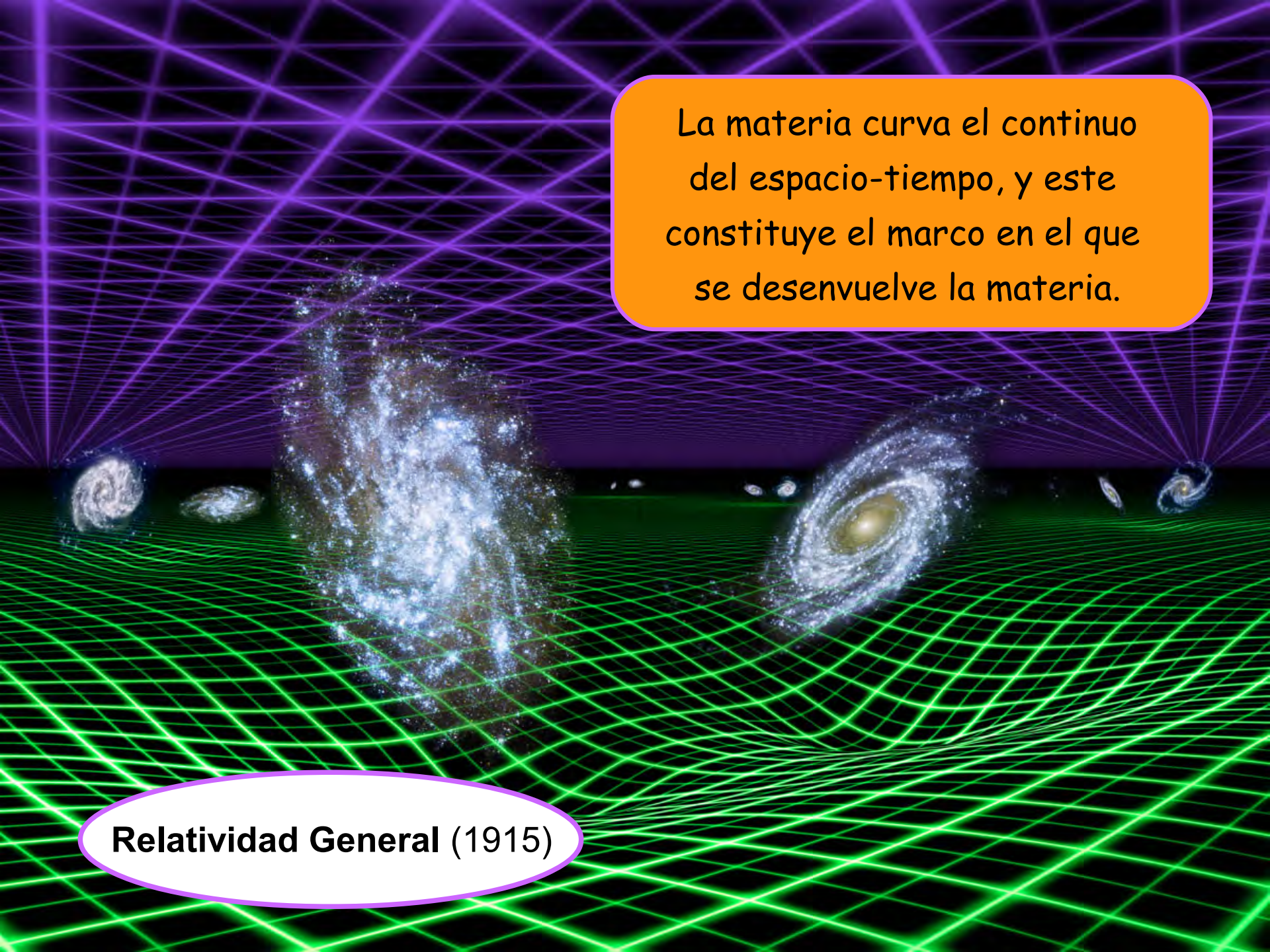
En una "caja" acelerada



En gravedad



EINSTEIN discurre sobre el Principio de Equivalencia (1907).



La materia curva el continuo del espacio-tiempo, y este constituye el marco en el que se desenvuelve la materia.

Relatividad General (1915)



EINSTEIN y la
Relatividad General



La velocidad de propagación
es finita:
ONDAS GRAVITATORIAS.

EINSTEIN y la
Relatividad General



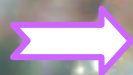
ONDAS GRAVITATORIAS:

- En aproximación lineal (1916-18).
- Exactas: ondas cilíndricas (1937).

Con errores...

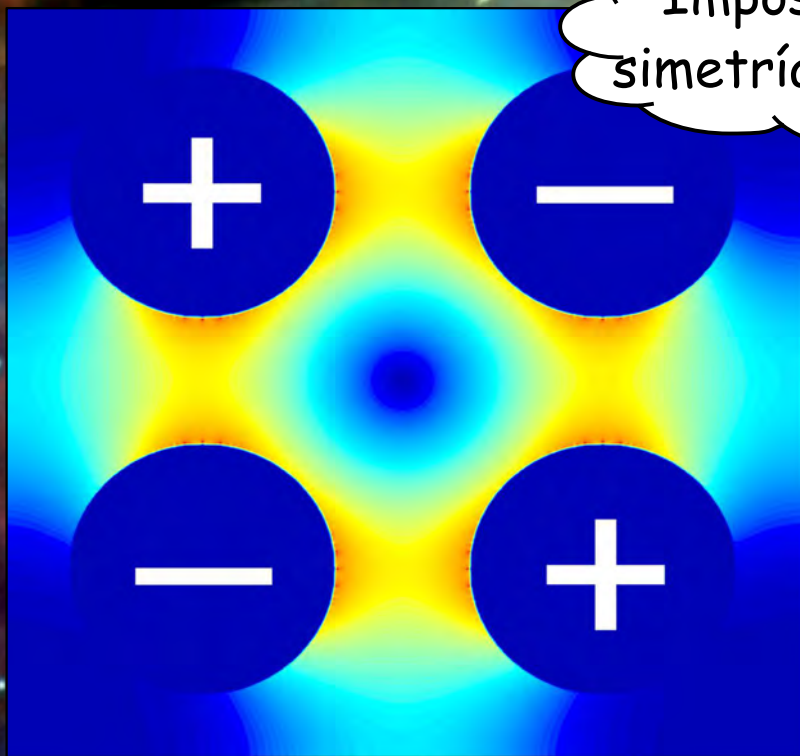


EINSTEIN y la
Relatividad General

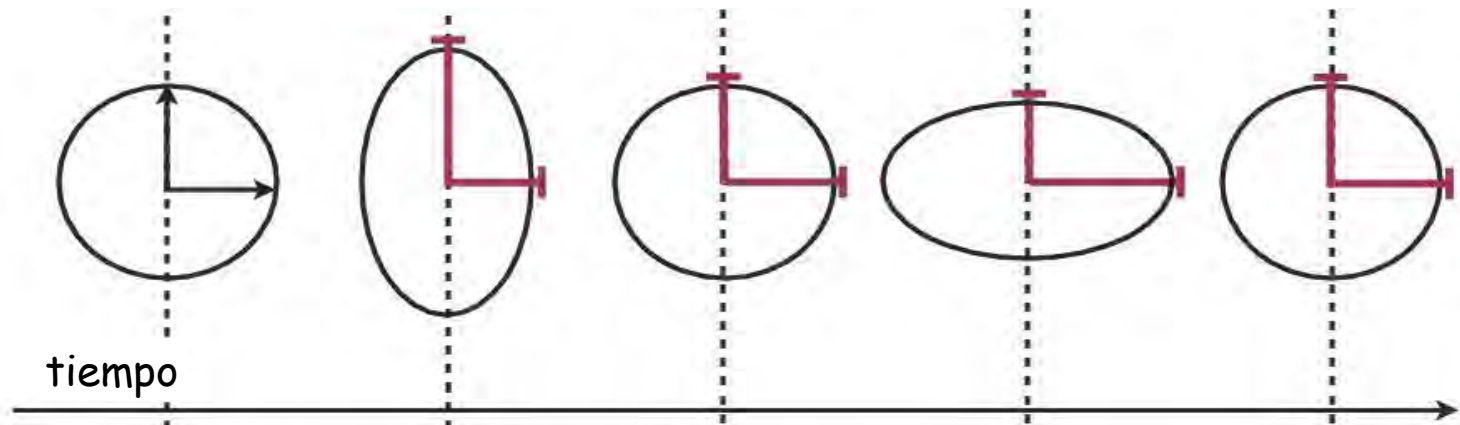


ONDAS GRAVITATORIAS:
● Emisión de cuadrupolo.

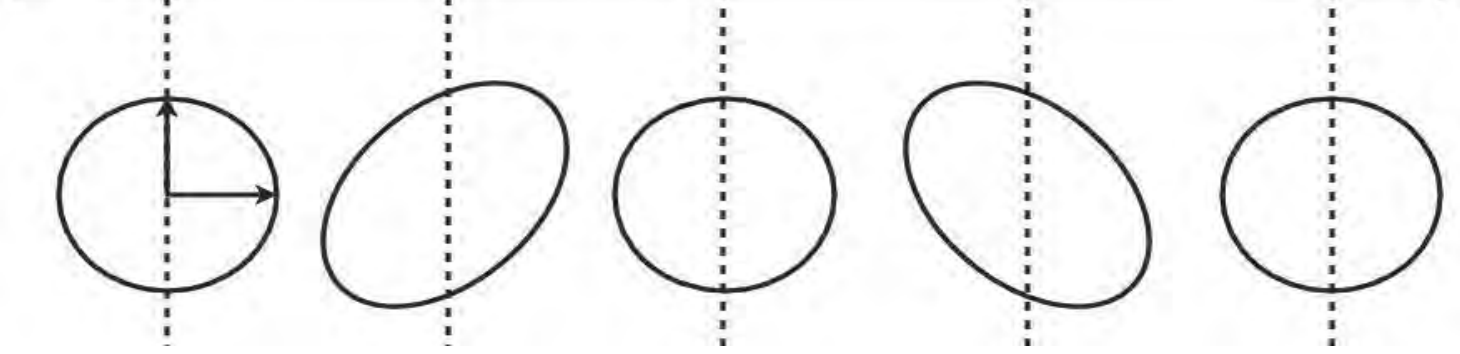
Imposible con
simetría esférica.



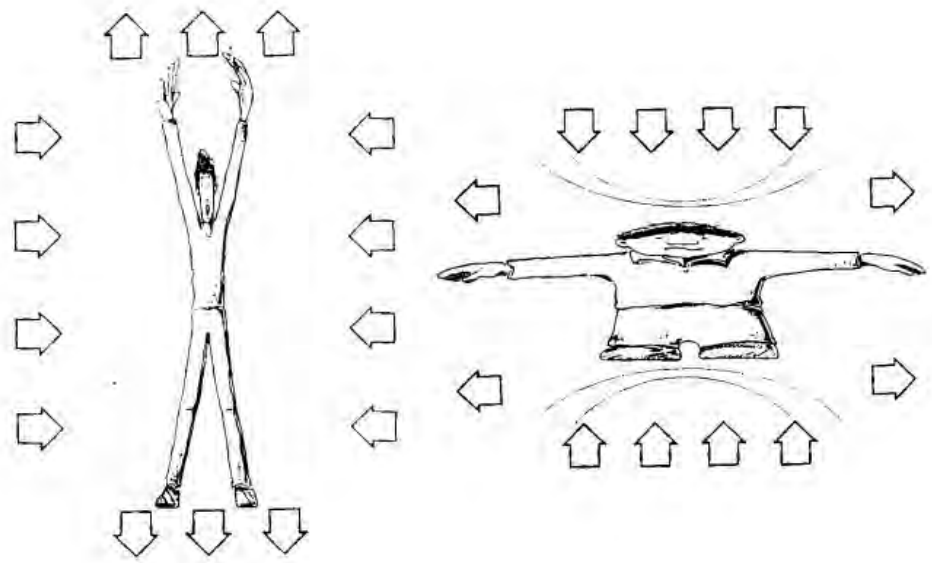
h_+

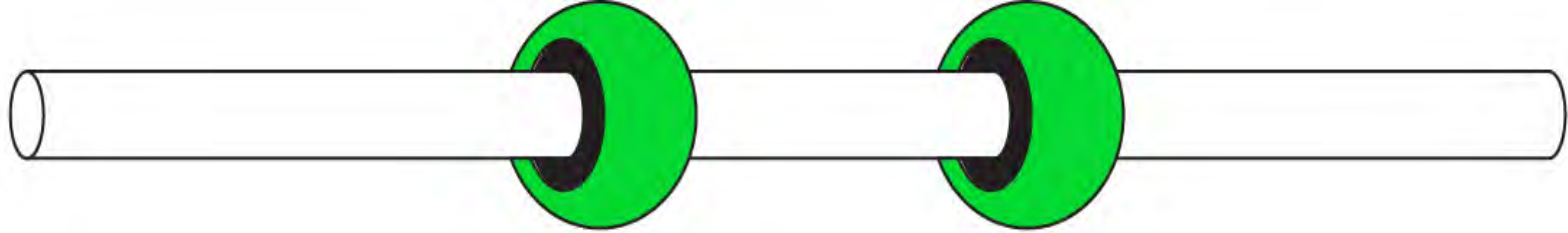


h_{\times}



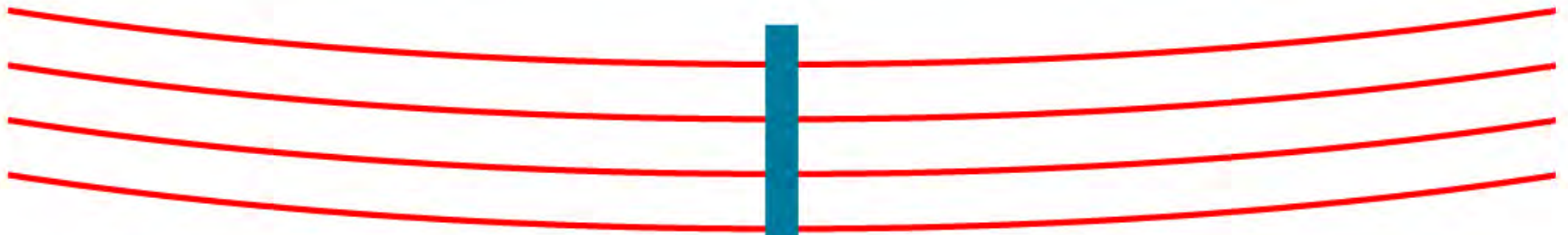
Deformación de la onda: proporcional a la energía cinética no esférica y al inverso de la distancia.





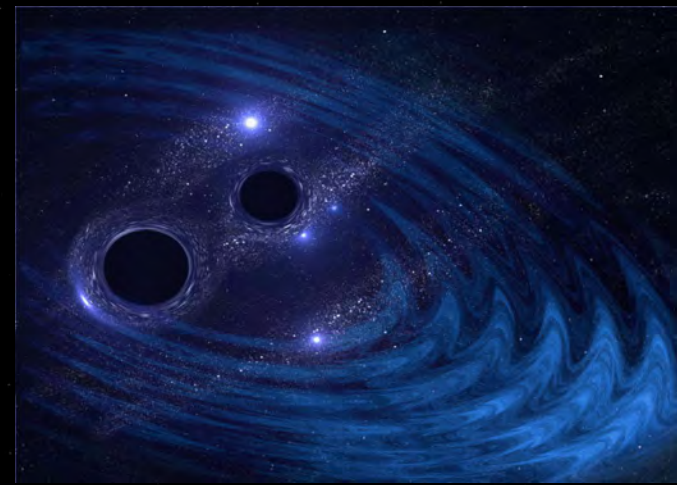
Estas ondas, ¿tienen realidad física?

Idea de las cuentas pegajosas:
● Pirani, Feymann, Bondi (1957).





Posibles emisores



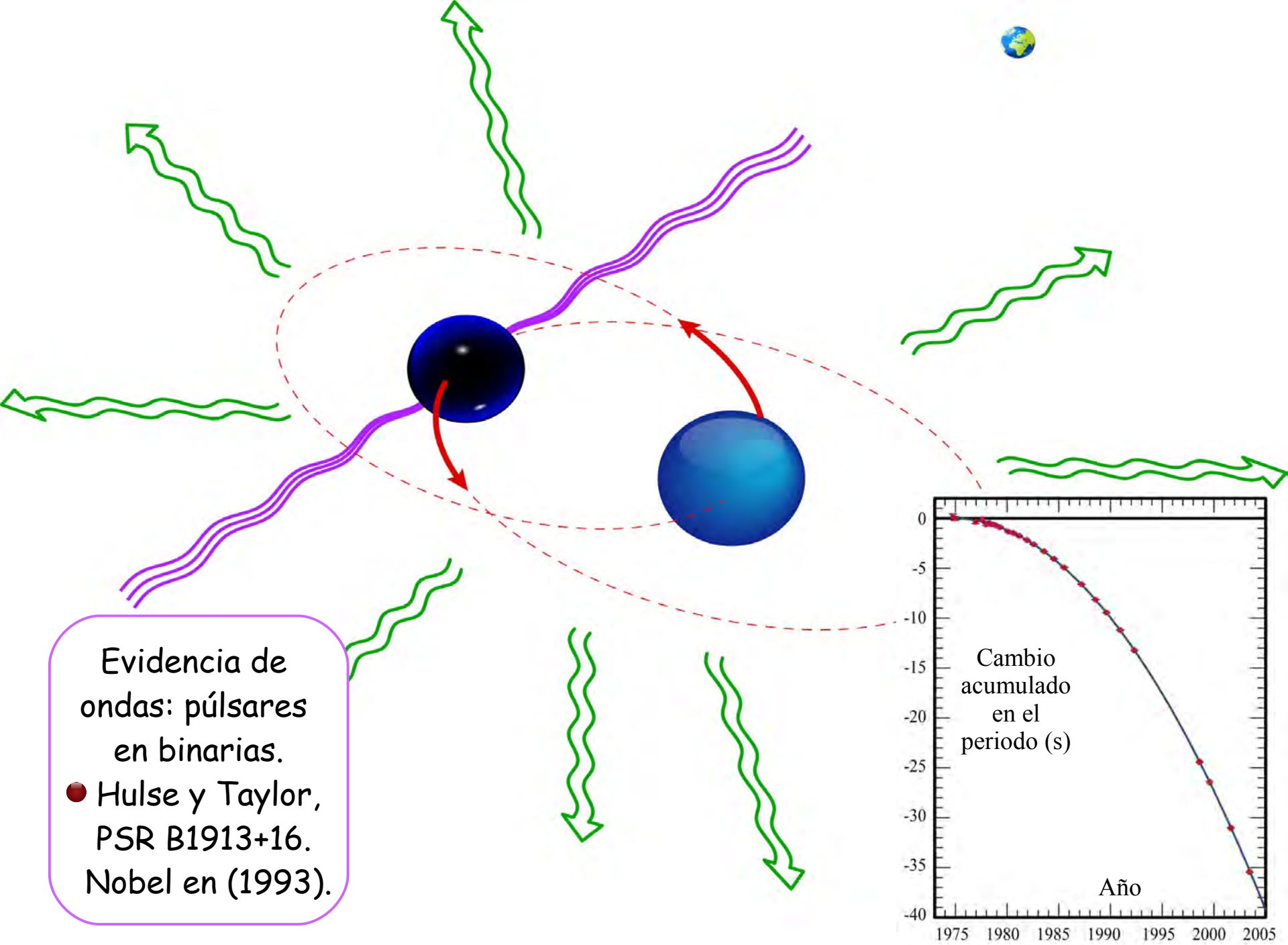
Objetos estelares compactos y no esféricos,
o binarios con un componente compacto.

Detección
con cilindros:

● Weber (1960).

Demasiadas
detecciones..



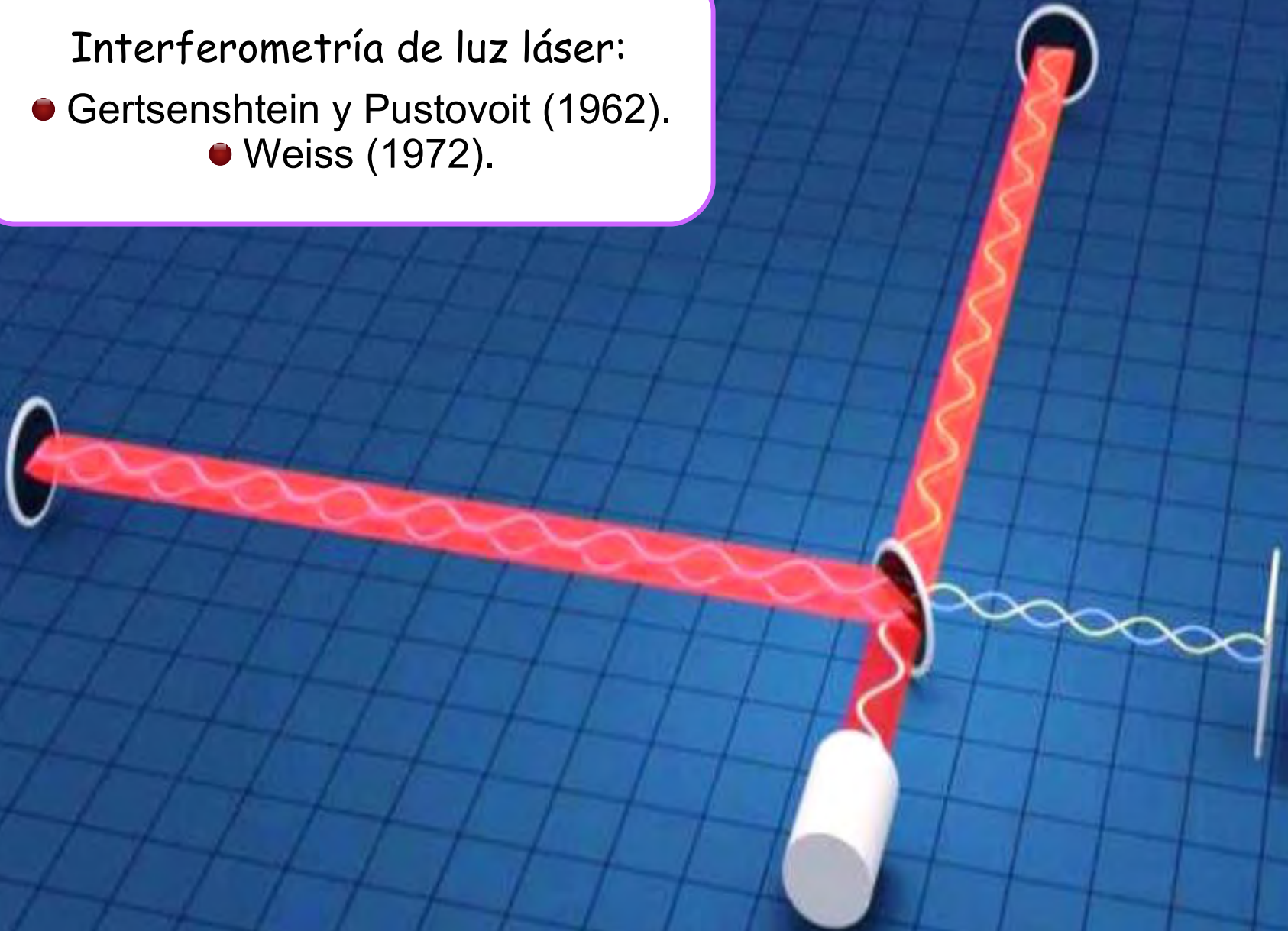


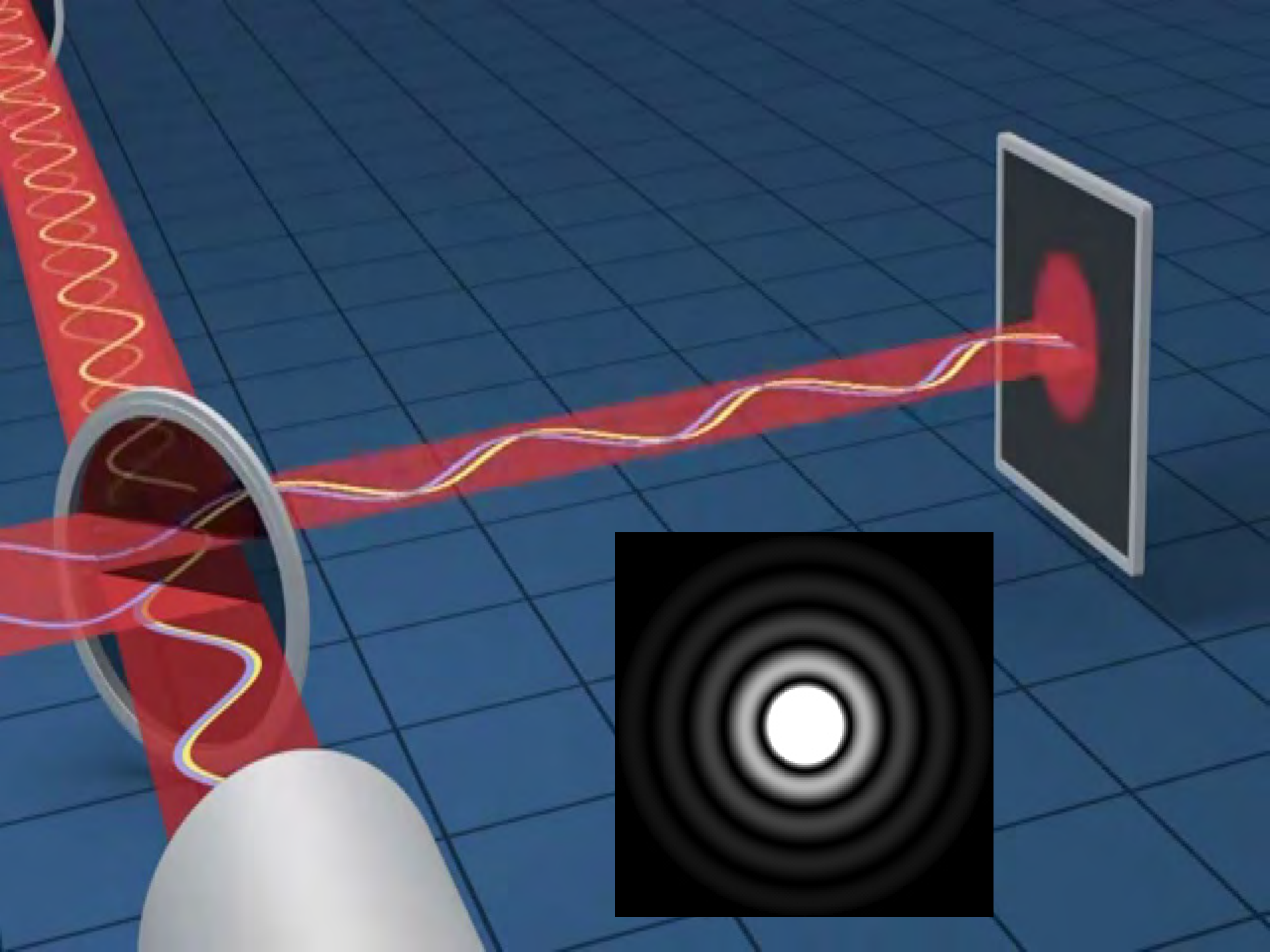
Evidencia de ondas: púlsares en binarias.

● Hulse y Taylor, PSR B1913+16. Nobel en (1993).

Interferometría de luz láser:

- Gertsenshtein y Pustovoit (1962).
- Weiss (1972).





- En una binaria, la frecuencia de la onda puede estimarse con física newtoniana: la gravedad compensa la aceleración centrífuga.

$$M \propto v^2 D^3.$$

- Para objetos muy compactos, el radio puede estimarse igualando el potencial gravitatorio con la energía cinética *casí* a la velocidad de la luz: la luz queda *casí* atrapada.

$$M \propto D.$$

- Resulta:
$$v \approx 10^4 \text{ Hz} \frac{M_{SOL}}{M}.$$

Para agujeros negros de unas treinta masas solares: $v \approx 350 \text{ Hz}.$

- Podemos establecer analogías con el **SONIDO**.

- Como son señales a la velocidad de la luz, su longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{c_{LUZ}}{\nu} \approx 900 \text{ km}.$$

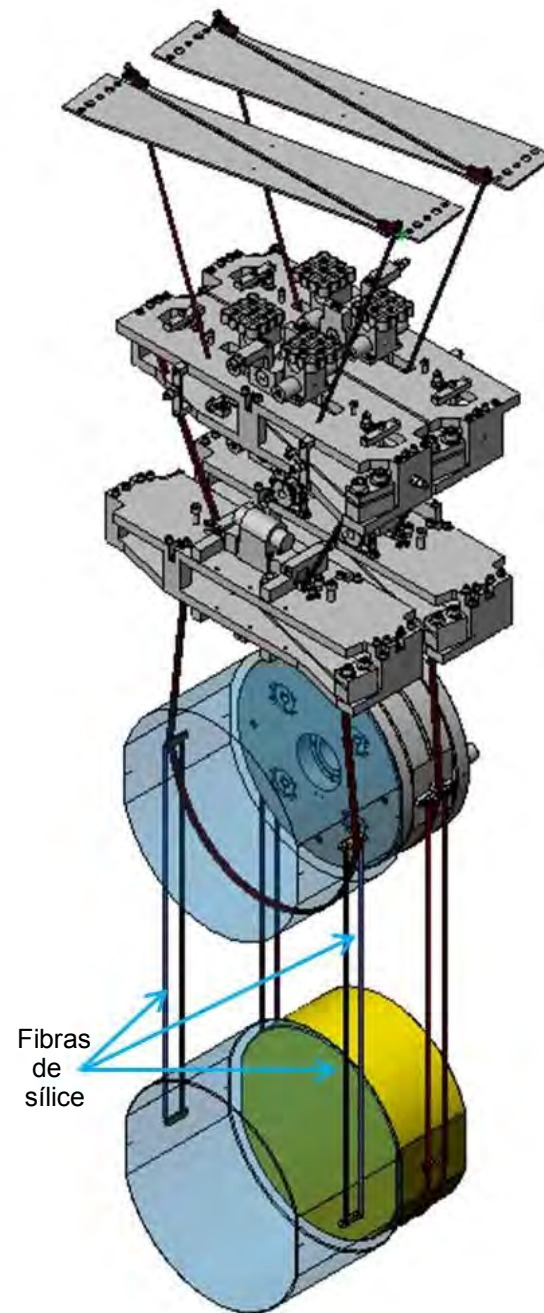
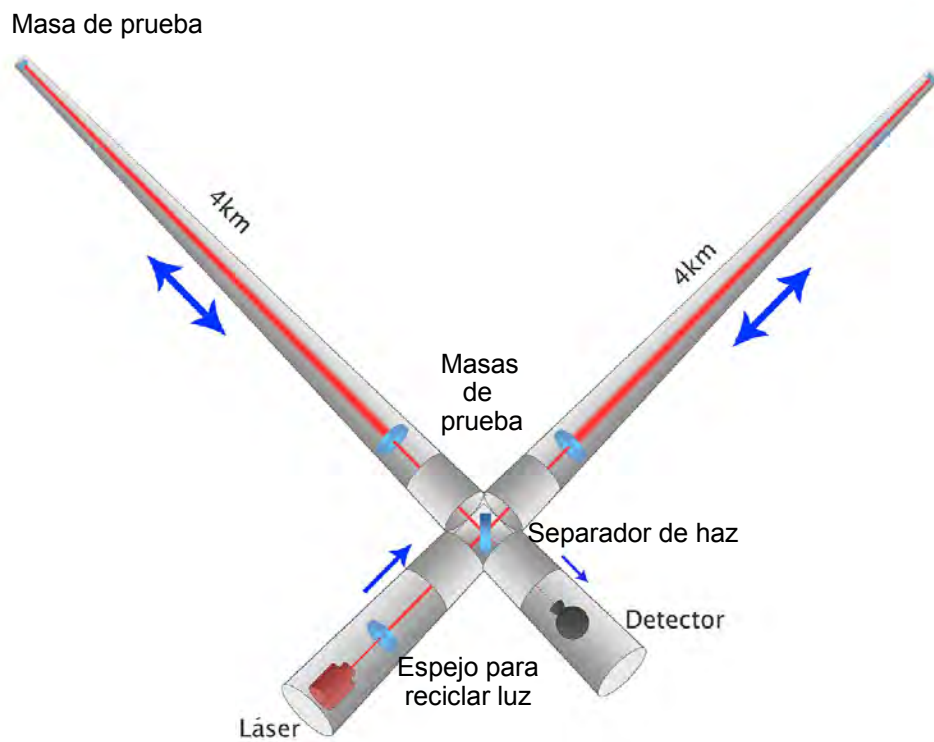
- Longitud típica del detector: $\frac{\lambda}{2} \approx 450 \text{ km}.$

- En una cavidad láser en la que la luz rebote unas cien veces:

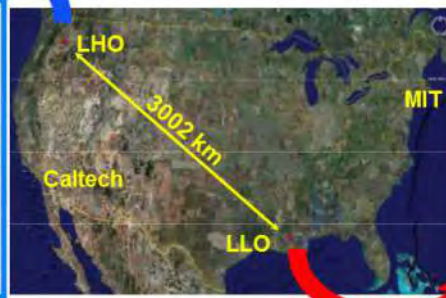
$$L \approx 4 \text{ km}.$$

- Si la binaria está a unos mil millones de años luz, la DEFORMACIÓN será aproximadamente de 10^{-21} .
- El brazo del láser se deformará la décima parte del tamaño de un núcleo atómico.

LIGO (Laser Interferometer Gravitational Observatory)

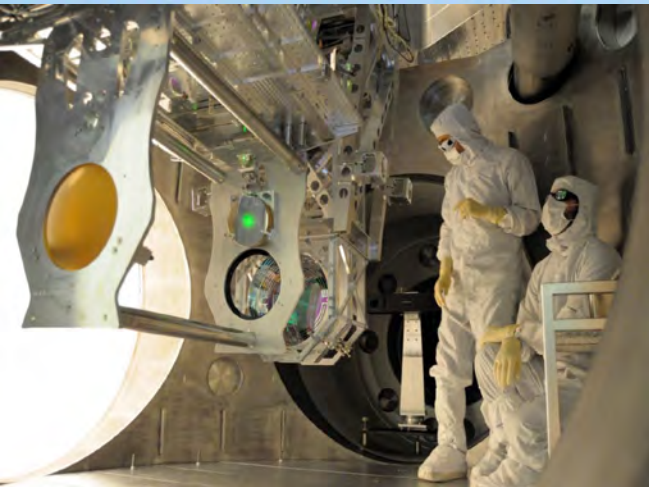


Hanford

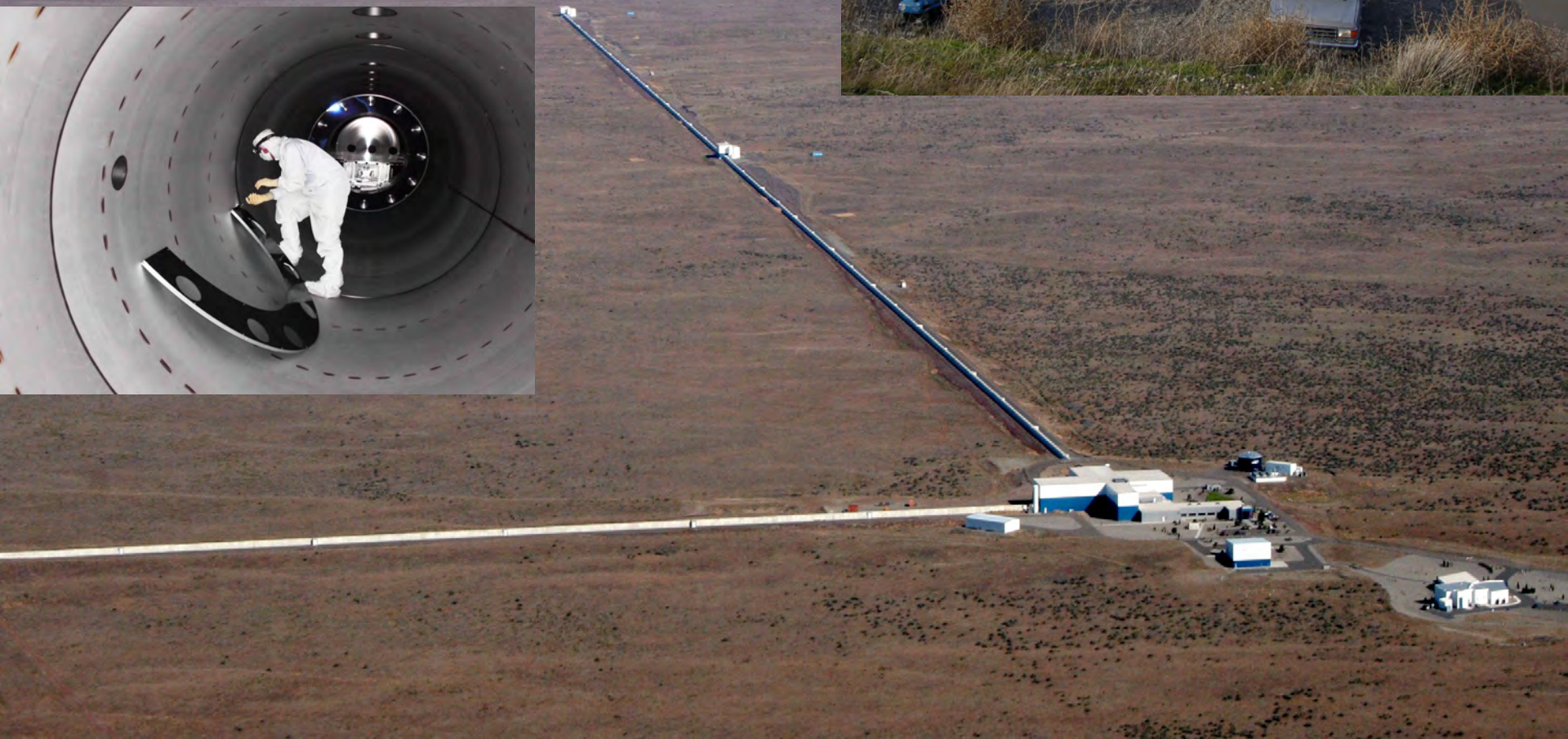
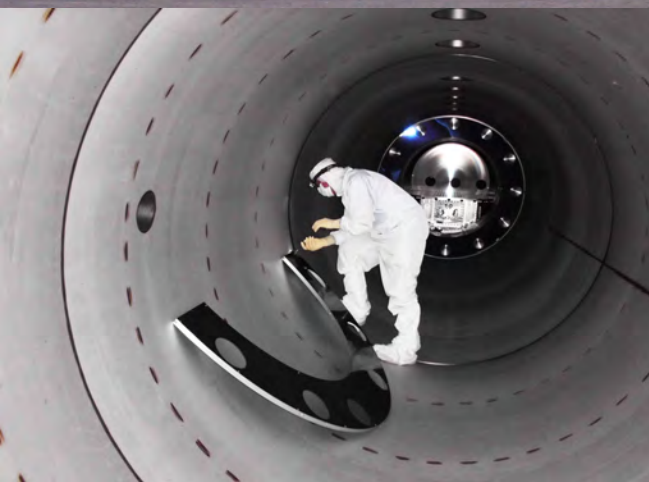


Livingston





LIGO:
vacío.





Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+80}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+4}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

Anuncio de la primera
detección (11 Feb 2016)



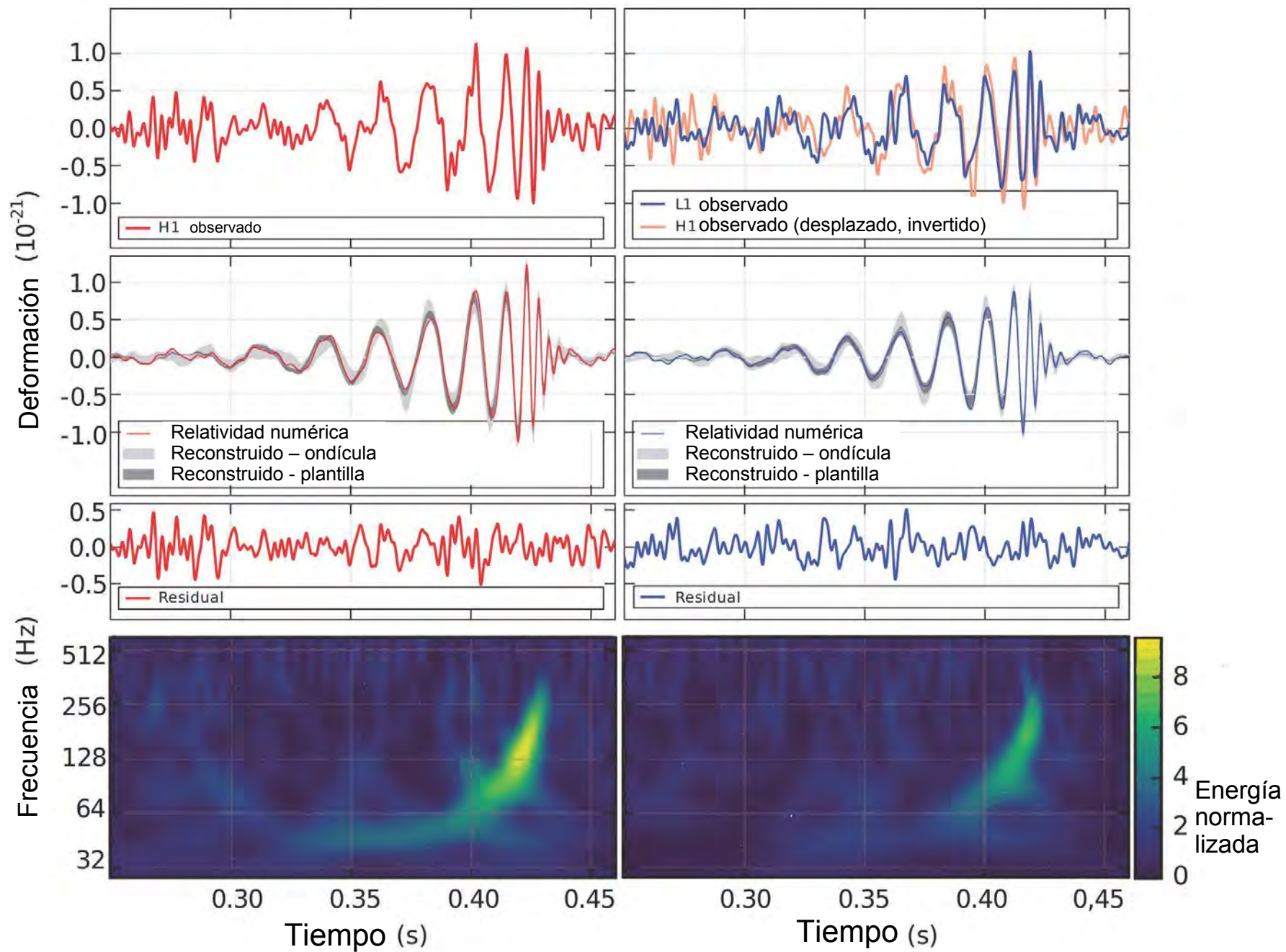
14 de septiembre de 2015 (11:50 h.)

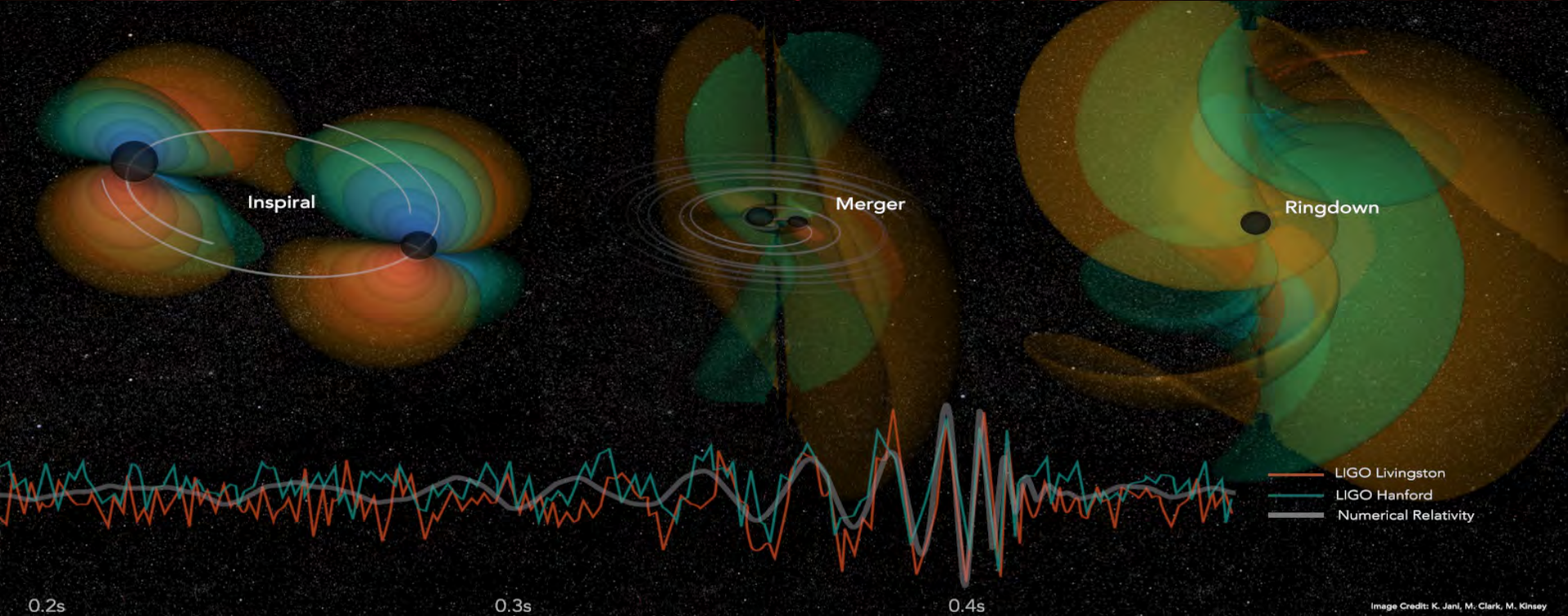
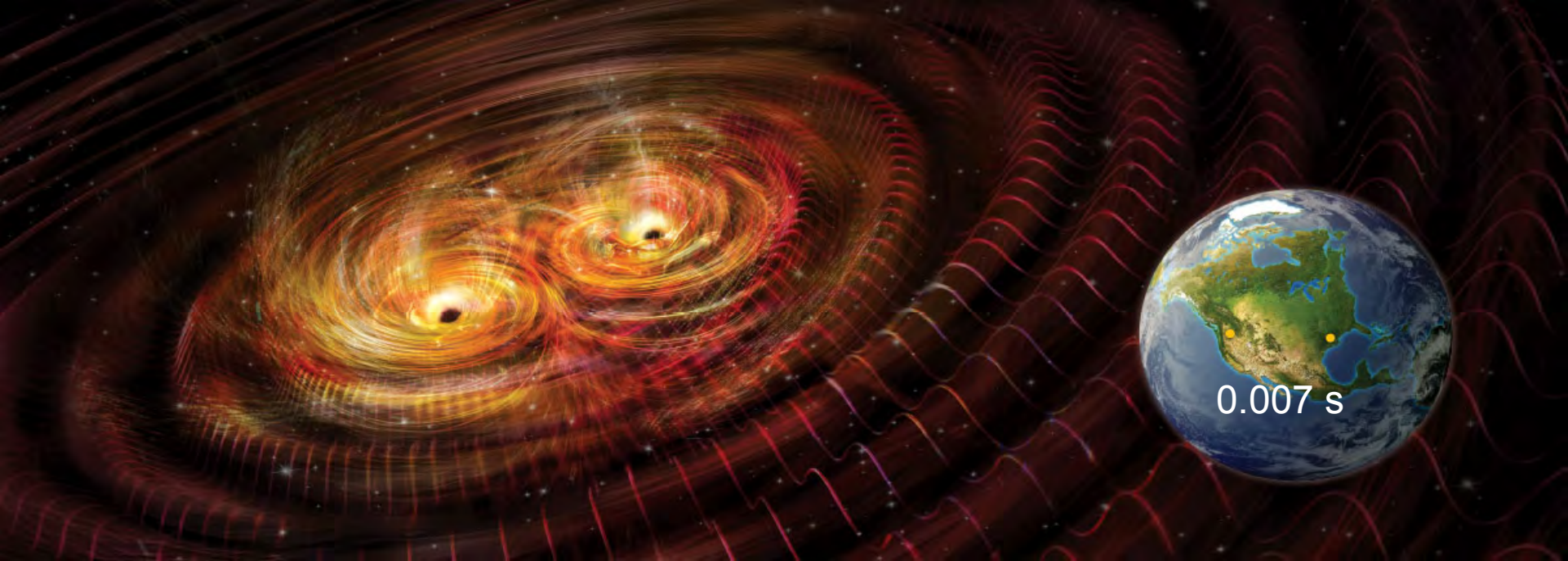
Marco Drago fue el primero en percatarse. Ni siquiera se había comenzado la observación tras las últimas mejoras. En horas se tenían los primeros análisis.




Hanford, Washington (H1)

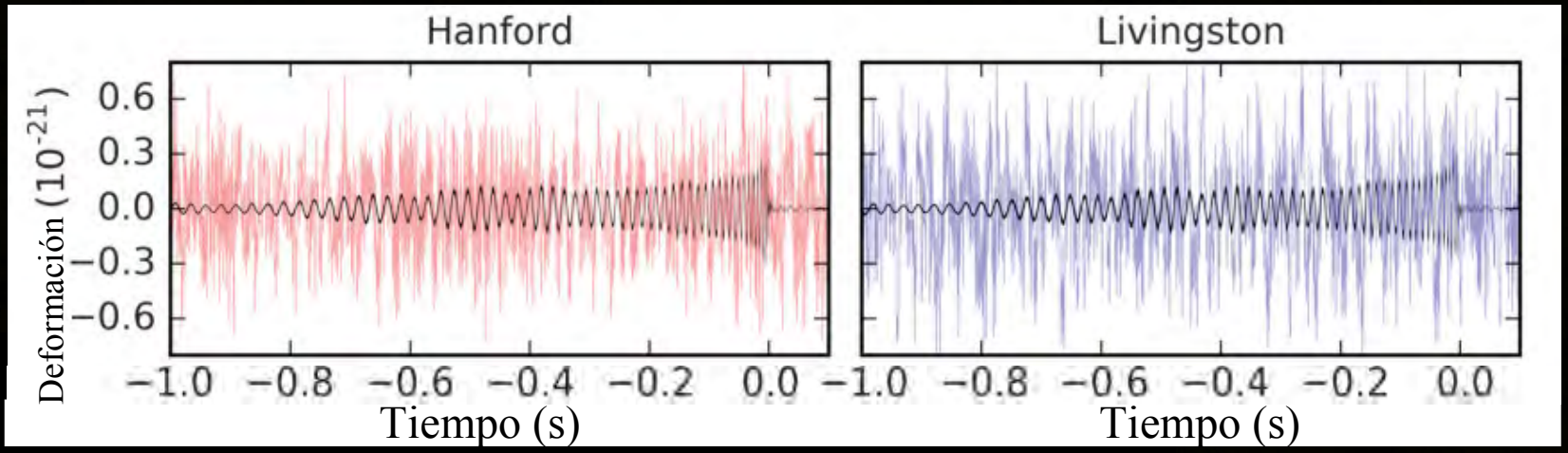
Livingston, Louisiana (L1)





The background of the slide is a detailed image of a galaxy, likely NGC 4038/4039, showing a complex structure of stars and dust. In the center of the galaxy, two black holes are depicted as dark, circular voids, representing the final stage of a binary black hole merger. The text is overlaid on the upper left portion of the galaxy image.

Masa del primer agujero negro: $36M_{\text{SOL}}$
Masa del segundo agujero negro: $29M_{\text{SOL}}$
Masa del agujero negro final: $62M_{\text{SOL}}$
Distancia luminosa: 1337 Mega-años luz



Masas Solares

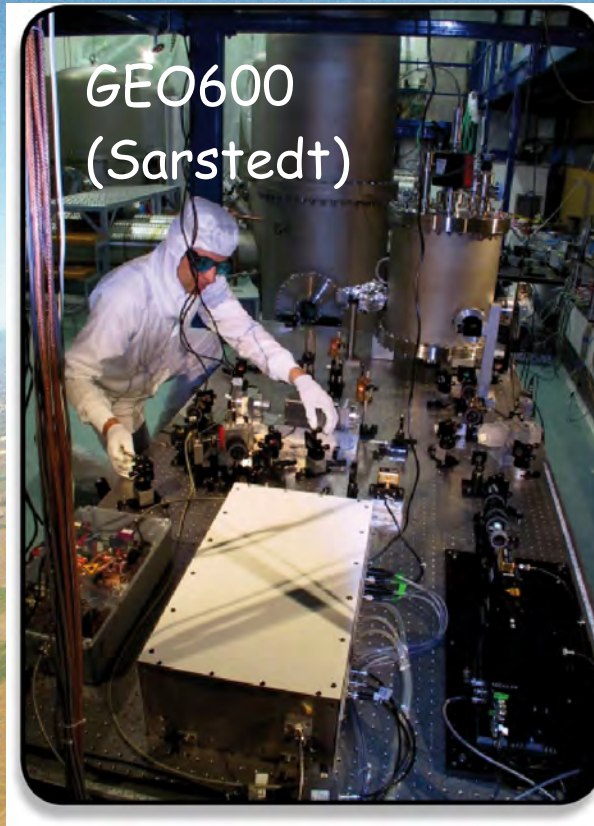


Más detecciones:
GW151226

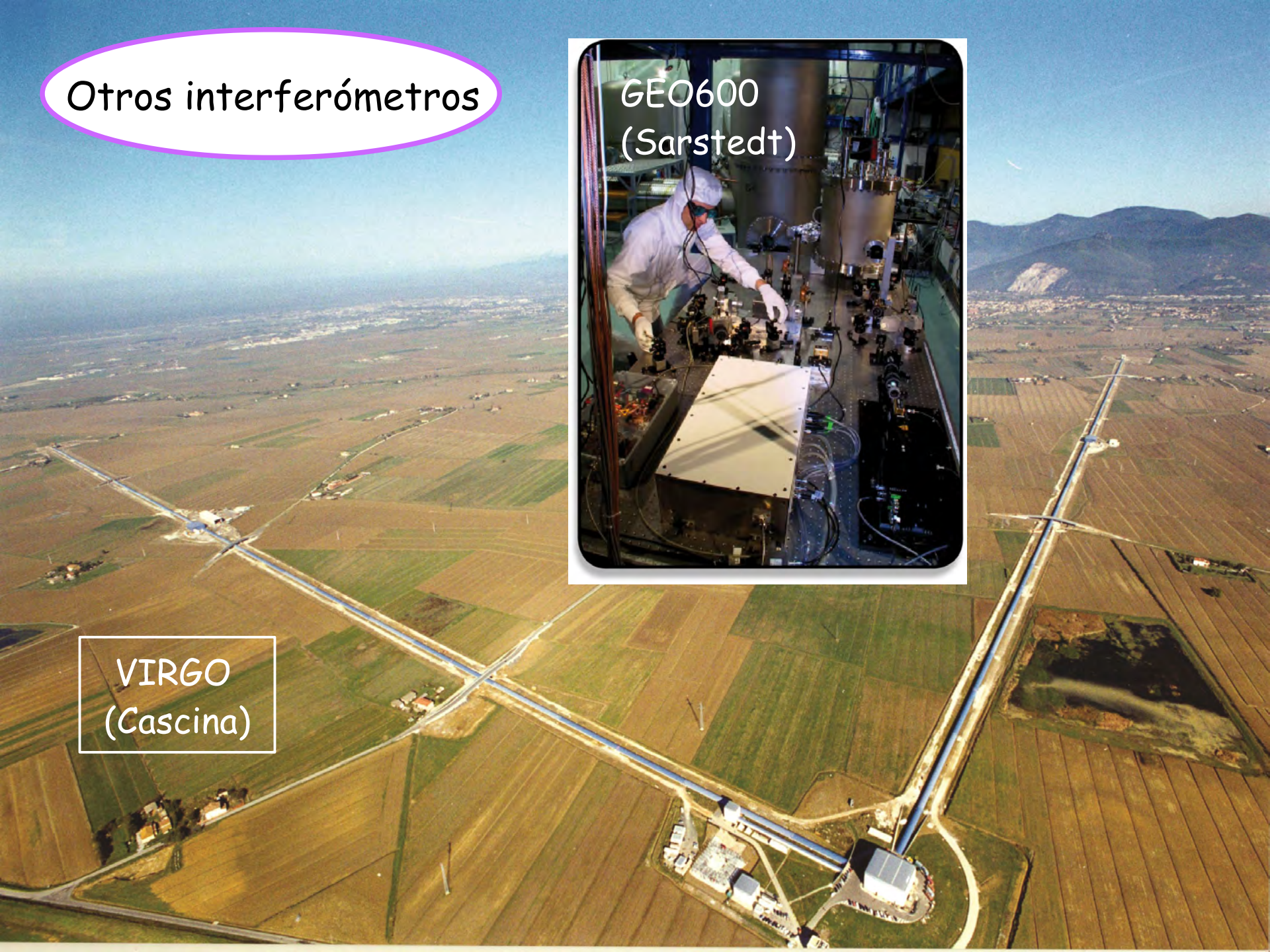
Masas de
agujeros
negros

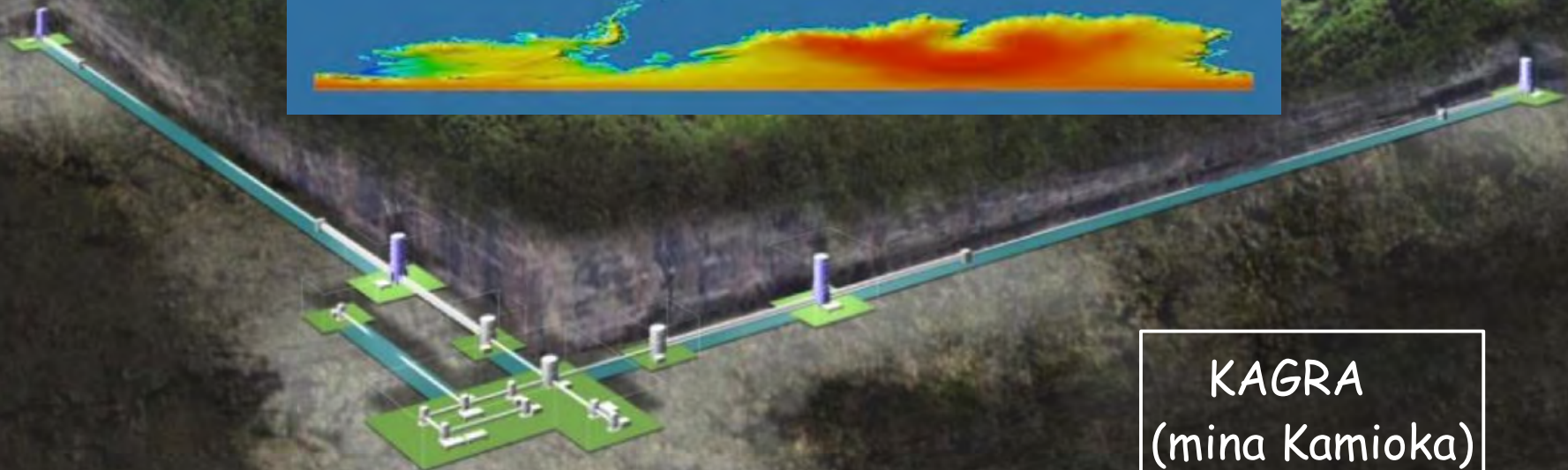
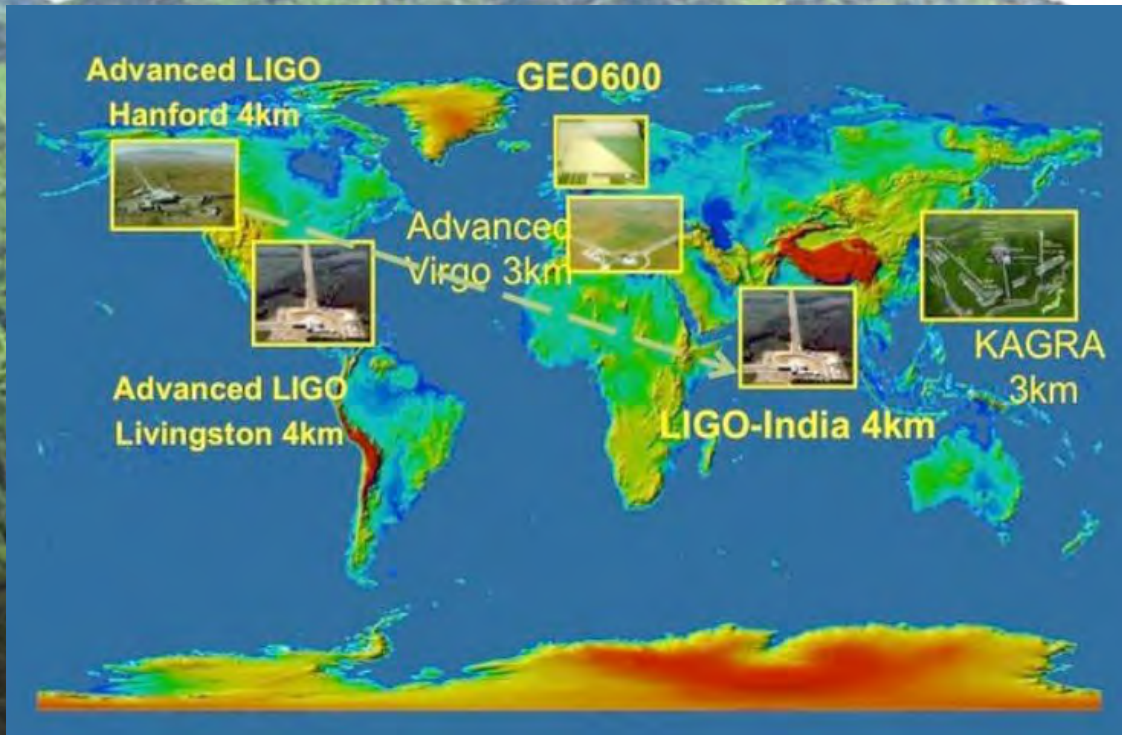
Otros interferómetros

GEO600
(Sarstedt)



VIRGO
(Cascina)





KAGRA
(mina Kamioka)

El futuro:
interferómetros
espaciales --
eLISA

